

Experimentelle und theoretische Betrachtung verklebter Holz- Holz- Verbindungen am Beispiel von Freiformflächen in Brettsperrholz

Aufgabenstellung | Anforderungen | Material | Biegetragmodell | Bemessung
| Versuchsplanung und Versuchsdurchführung | Auswertung | Schlussfolge-
rung | Umsetzung: FWF (L695)-Prototyp „Kobra“ | Ausblick

M-4-05/2012



Christoph Pfaller

Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz

Experimentelle und theoretische Betrachtung verklebter Holz- Holz-Verbindungen am Beispiel von Freiformflächen in Brettsperrholz

Masterarbeit von:
Christoph Pfaller, BSc

Eingereicht am:
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Fakultät für Bauingenieurwissenschaften
Technische Universität Graz

Begutachtung:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer

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

Graz, Juni 2012

*...meinem Freund Alexander „Eule“ Stoinschegg
1974 - 2005*

Erklärung

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

Christoph Pfaller

Graz, Jänner 2012

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen bedanken, die beim Erstellen dieser Arbeit behilflich waren.

Dem Projektteam des Instituts für Architektur und Medien rund um Herrn Ass.Prof. Mag.rer.nat. Dr.techn. Albert Wiltsche, danke ich für die Mitarbeit an einem interessanten herausfordernden Forschungsprojekt, für konstruktive Gespräche und der Bereitstellung von Bildmaterial für die vorliegende Arbeit. Bedanken möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. M.Arch. Heimo Schimek, der bei der Fertigung der Probekörper eine große Hilfe war.

Für die praktischen Tipps bei der Herstellung der Versuchskörper danke ich Herrn Ing. Bernd Heissenberger.

Sehr hilfreich war die Unterstützung der Firma Purbond für das Gelingen dieser Arbeit. Mein besonderer Dank geht an Herrn Dipl.-Ing. Bernd Pfeifer der interessiert und engagiert die Entwicklung der Klebeverbindung von der Idee bis zum Prototyp „Kobra“ mitverfolgte, und in jeder Phase mit Rat und Tat zur Seite stand.

Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer danke ich für die Begutachtung der Arbeit, dem Bereitstellen von Versuchsplatten und der Infrastruktur zur Fertigung und Durchführung der umfangreichen Versuchsserien.

Meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bogensperger danke ich für sein unermüdliches Engagement, seinem Feuer zur sofortigen Umsetzung von neuen Ideen und der Weitergabe seines fachlichen Wissens. Das konstruktive Arbeitsklima und der freundschaftliche Umgang waren sehr motivierend.

Für die statistische Auswertung bekam ich wertvolle Hilfe von Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Hübner und Frau Dipl.-Ing. Ursula Mahlknecht.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dipl.-Ing. Josef Koppelhuber, bei dem ich in den letzten Jahren wertvolle Arbeitspraxis im Fachgebiet Holzbau sammeln durfte, und mir mit einer flexiblen Arbeitszeitgestaltung den Abschluss meines Studiums erleichterte.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinem Vater Gerhard, meiner Mutter Elfi, meiner Schwester Clara und meiner Tante Magda, die mich während der langen Zeit meines Studiums begleitet, motiviert und in vielfältiger Form unterstützt haben.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Frau Susi bedanken. Sie hat die intensive Zeit des Lernens und Arbeitens für den Abschluss meines Studiums mitgetragen, mir den Rücken frei gehalten, mich motiviert und bedingungslos unterstützt.

Kurzfassung

Der Inhalt dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer biegesteifen Holz-Holz-Verbindung für Brettsperrholz (BSP). Die verklebte Verbindung ist für Tragstrukturen mit freier Formgebung entworfen, und deckt Anschlüsse für Gehrungswinkel bis ca. $\pm 30^\circ$ Grad ab. Eine Fügung der einzelnen Brettsperrholzplatten erfolgt mittels zur Hauptorientierung der BSP-Platten möglichst parallel eingeklebter Furnierschichtholzstreifen (Kerto-S). Die Verklebung der Kerto-Platten wird mit ein- bzw. zweikomponentigen Polyurethan-Klebstoffen durchgeführt.

Die Ermittlung der Biegespannungen im Brettsperrholz-Querschnitt wird wahlweise auf Grundlage des schubnachgiebigen Trägers nach Timoschenko und nach dem modifizierten γ -Verfahren durchgeführt. Mit den berechneten Biegespannungen wird die Biegetragfähigkeit der Verbindung über ein ingenieurmäßiges Modell abgeschätzt.

Die experimentelle Untersuchung der Verbindung gliedert sich in zwei Hauptversuchsreihen: In Zugversuchen an Brettsperrholz-Randlamellen mit eingeklebten Kertostreifen wird im Wesentlichen die Schubtragfähigkeit der Klebeverbindung in vier Prüfserien mit insgesamt 48 Versuchen geprüft. Drei verschiedene Prüfserien mit 1K-PU-Kleber und eine Prüfserie mit einem 2K-PU-Gießharz wurden einer Zugprüfung zur Ermittlung der Verklebefestigkeit unterzogen und bewertet.

Die zweite Hauptversuchsreihe sind Biegeversuche an verklebten BSP-Plattenstreifen. Diese werden in Anlehnung an die Prüfnorm EN 408 als 4-Punkt-Biegeversuch durchgeführt. In 9 Prüfserien werden an 62 Prüfkörpern die wesentlichen Einflussparameter auf die Biegetragfähigkeit untersucht. Geprüft wird der Systemeffekt unter Variation der Verbindernanzahl, die Einschubrichtung bei der Verklebung konischer Holzverbinder, die Faserabweichung bei einer Verklebung von Verbindern abweichend zur Faserrichtung der Decklamellen der Brettsperrholzplatte und der Einfluss des Gehrungswinkels auf die Tragfähigkeit. Eine Abschätzung der Biegetragfähigkeit auf Basis statistischer Modelle zeigt, dass die Verbindung einen hohen Wirkungsgrad aufweist. In einem großen Teil der Prüfungen wurde die rechnerische Tragfähigkeit der BSP-Platte im Nettoquerschnitt überschritten. Mit Versuchsserien an ungestoßenen Brettsperrholzplatten soll eine Referenz zur Biegetragfähigkeit der BSP-Platte hergestellt werden.

Als Ergebnis dieser Arbeit kann festgestellt werden, dass die Verbindung, unter Einhaltung wichtiger Randbedingungen bei der Herstellung (Passgenauigkeit, Holzfeuchte beim Fräsen und Verkleben), eine Möglichkeit bietet, eine leistungsfähige biegesteife Holz-Holz-Verbindung in Brettsperrholz auszuführen. Weitere Untersuchungen der Verbindung sind für eine allgemeine baupraktische Verwendung notwendig (Tragverhalten und Tragfähigkeit bei Normal- und Querkraftbeanspruchungen, bei kombinierter Beanspruchung, Feuchtigkeitsverhalten, Langzeitverhalten).

Abstract

The presented thesis deals with the development of a moment-resistant timber-timber connection for cross laminated timber (CLT). The glued connection is designed for free-form structures and is applicable to joints at angles up to ± 30 degrees. The connecting cross laminated timber panels are joined by laminated veneer lumber strips (Kerto-S) which are glued ideally parallel to the main orientation of the CLT-panels. Single-component or two-component polyurethane adhesives are used for the gluing of the Kerto panels.

The flexural bending stresses in the cross laminated timber section are determined based on Timoshenko's-Shear-Flexible-Beam-Theory and the Modified- γ -Method. The obtained bending stresses are then used to calculate the flexural capacity of the connection by an analysis model.

The practical investigation of the connection can be divided into two main series of experiments: The shear capacity of the glued connection is in principle evaluated by tensile tests on the edge strips of the cross laminated timber with glued Kerto-S in four test series. The glue capacity is verified in 48 tests. Three test series bonded with single-component polyurethane adhesives and one with two-component polyurethane pouring resin were tested and evaluated. The second main series are bending tests on CLT panel strips. These are carried out as 4-point bending tests in accordance with EN 408. Nine series on 62 specimens are used to evaluate the essential parameters with effect on the flexural bending capacity. The structural capacity is influenced by the number of connectors, the direction of installation of conical timber connectors, the angle deviation in case of glued connectors with grain orientation different to the one of the surface layer of the CLT and the joint angle. The flexural bending capacity obtained from a corresponding analysis model demonstrates that the connection has a high degree of efficiency. The measured capacity of the CLT panel section exceeds the calculated capacity in the majority of the tests. A test series on non-jointed CLT panels is used as reference for the flexural bending capacity.

As result of the present thesis it can be concluded that the assessed connection type offers a possibility to create an effective rigid timber-timber connection for CLT panels as long as certain boundary conditions are adhered to in the manufacturing process (accuracy, moisture content during milling and gluing). Further investigation is required to allow general application in practice (structural behaviour and capacity under axial and shear loading, under combined loading, moisture behaviour, long term behaviour).

1	Einleitung	1
1.1	Eye Catcher	1
1.2	FWF-Projekt: Non-standard Architektur mit Ornamenten und planaren Elementen	2
1.3	Ziel dieser Arbeit	3
1.4	Non-Standard-Projektentwürfe Grundlage für die Entwicklung der Verbindung	4
2	Material	7
2.1	Brettsperholz	7
2.1.1	Allgemeines	7
2.1.2	Das Produkt Brettsperholz.....	8
2.1.3	Bemessungsgrundlagen.....	12
2.1.4	Materialkennwerte BSP	13
2.1.5	Steifigkeits- und Spannungsermittlung für einen BSP-Plattenstreifen auf Basis des schubnachgiebigen Trägers nach Timoschenko	13
2.1.6	Steifigkeits- und Spannungsermittlung für einen BSP-Plattenstreifen auf Basis des modifizierten γ -Verfahrens	16
2.1.7	Steifigkeitswerte für die verwendeten BSP-Versuchsplatten.....	20
2.1.8	Festigkeiten der BSP-Produkte	21
2.2	Furnierschichtholz	24
2.2.1	Das Material	24
2.2.2	Das Produkt Kerto.....	24
2.2.3	Herstellung von Kerto-Furnierschichtholz.....	25
2.2.4	Materialkennwerte Kerto-S.....	26
2.2.5	Spannungsermittlung für Kerto-S	27
2.3	Klebstoff	28
2.3.1	Auswahl des verwendeten Klebstoffs	28
2.3.2	Verkleben von Holz	28
2.3.3	Anforderungen an Holzklebstoffe	31
2.3.4	Polyurethanklebstoffe	32
2.3.5	Materialkennwerte der verwendeten PU-Klebstoffe	36

3	Verbindung	41
3.1	Allgemeines	41
3.2	Anforderungen an die Verbindung.....	42
3.3	Verbindungsentwürfe.....	42
3.3.1	Stahl-Holz-Verbindung	43
3.3.2	Holz-Holz Verbindungen	45
3.4	Vorversuche zur gewählten Holz-Holz-Verbindung	47
3.4.1	Vorversuche Verklebung	47
4	Bemessung	51
4.1	Biegebemessung von Brettsperrholz.....	51
4.1.1	Berechnung der Biegespannung für BSP nach dem modifizierten γ -Verfahren (Produktzulassung)	51
4.1.2	Berechnung der Biegespannung für BSP auf Basis des Schubnachgiebigen Trägers nach Timoschenko	54
4.2	Ingenieurmäßige Vorbemessung der Verbindung auf Biegung....	56
4.2.1	Ingenieurmäßiges Modell	56
4.2.2	Bemessung der Verbindung	58
4.3	Bemessung der Biegezugversuche in einer Lamelle	63
4.3.1	Ingenieurmäßiges Modell	63
4.3.2	Bemessung der Zugprüfkörper	63
5	Versuchsprogramm Hauptversuche	67
5.1	Biegezugversuche	67
5.1.1	Vorbemerkung	67
5.1.2	Material Zugversuche	67
5.1.3	Verklebevarianten für die Zugversuche	68
5.1.4	Ermittlung der Prüfkraft	72
5.1.5	Prüfkonfigurationen	73

5.1.6	Nachweisführung für die Prüfkörper.....	75
5.1.7	Herstellung der Prüfkörper.....	77
5.1.8	Zugprüfung der Prüfkörper.....	86
5.1.9	Auswertung der Zugversuche.....	90
5.1.10	Schlussfolgerungen aus den Zugversuchen.....	98
5.2	Biegeversuche Verbindungsplatten.....	100
5.2.1	Vorbemerkung Biegeversuche.....	100
5.2.2	Material Biegeprüfkörper.....	100
5.2.3	Vorbemessung Biegeversuche.....	101
5.2.4	Prüfkonfigurationen.....	107
5.2.5	Herstellung der Prüfkörper.....	113
5.2.6	Biegeprüfung der Verbindungsplatten.....	121
5.2.7	Auswertung der Biegeversuche der Verbindungsplatten.....	131
5.3	Biegeversuche Referenzplatten.....	170
5.3.1	Ziel der Versuche.....	170
5.3.2	Material der Prüfkörper.....	170
5.3.3	Vorbemessung der Referenzplatten.....	171
5.3.4	Prüfkonfigurationen Referenzplatten.....	173
5.3.5	Herstellen der Prüfkörper.....	175
5.3.6	Biegeprüfung Referenzplatten.....	175
5.3.7	Auswertung der Biegeprüfung der Referenzplatten.....	180
6	Schlussfolgerung auf Basis der Versuche.....	195
7	FWF-Prototyp „Kobra“.....	197
7.1	Allgemeines.....	197
7.2	Statik.....	198
7.3	Fertigung.....	199
7.4	Transport und Montage (inkl. Fügung).....	201
7.4.1	Baustellenverklebung Montagefuge.....	202
7.5	Prototyp „Kobra“.....	205

8	Ausblick	209
A	Literaturverzeichnis	211
A.1	Normen	211
A.2	Zulassungen	212
A.3	Bücher/Dissertationen/Diplomarbeiten	213
A.4	Berichte/Skripten/Publikationen	214
A.5	Internet-Schriftverkehr	216
B	Anhang	217
B.1	Klebstoffliste	218
B.2	Querschnittswerte BSP-Versuchsplatten	219
B.2.1	Biegeversuche	219
B.3	Abbundpläne Biegeversuche	220
B.4	Dokumentation Verkleben Biegeversuche	223
B.5	Dokumentation Bruchursache Biegeversuche	229
B.6	Lösung des Differentialgleichungssystems	232
B.7	Auswertung Verbindungsplatten Biegeversuche	234
B.8	Auswertung Referenzplatten Biegeversuche	244
B.9	Biegespannungsermittlung Referenzplatten	248
C	Anhang	249
C.1	Querschnittswerte BSP-Versuchsplatten	250
C.1.1	Zugversuche	250
C.2	Lasteinleitung Zugversuche	251

C.3	Dokumentation Verklebung Zugversuche	253
C.4	Dokumentation Bruchursache Zugversuche	255
C.5	Delaminierungsprüfung Zugversuche (Firma Purbond)	257
C.6	Auswertung der Zugversuche	267

Einleitung

1.1 Eye Catcher

*„Das Durchschnittliche gibt der Welt ihren Bestand,
das Außergewöhnliche ihren Wert.“ Oscar Wilde*

Dieses Zitat trifft sicher für viele Bereiche des Lebens zu, im Besonderen gilt es aber sicherlich für Architektur und Bauingenieurskunst.

Im Laufe der Geschichte wurden immer wieder außergewöhnliche Bauwerke geschaffen die Kritiker und Bewunderer gleichermaßen berührten. Diese Architekturikonen bestehen einerseits durch ihr richtungsweisendes Erscheinungsbild, andererseits auch durch innovative Anwendung bestehender Ausführungstechnik. Zum Einsatz kamen und kommen hierbei aber auch oft komplett neu entwickelte Tragkonstruktionen, Herstellungsverfahren und Techniken, oftmals fern des aktuellen „Standes der Technik“. Nicht wenige der uns als Standardbauweisen bekannten Techniken wurden erstmals für die Ausführung eines bautechnischen Meilensteins entwickelt.

Ein immanenter Wunsch der architektonischen Gestaltung scheint eine freie Formgebung zu sein. Architekten setzten schon in den 50er Jahren mit der Kurve als Entwurfselement herausragende architektonische Akzente ihrer Zeit, und beeinflussten mit ihren Bauwerken die Entwicklung der Architektur nachhaltig. Unkonventionelle Entwürfe die einer freien Formgebung folgen, werden auch als „Non-standard“ bezeichnet. Als Grazer Non-standard-Architektur-Beispiel sei an dieser Stelle das Kunsthaus von Peter Cook und Colin Fournier erwähnt, das nicht zuletzt wegen seiner freien Formgebung einen außergewöhnlichen Eindruck vermittelt.



Abb. 1.1 Das Kunsthaus in Graz, Entwurf Peter Cook und Colin Fournier
(Quelle: www.museum-joanneum.at [61])

Mit den heutigen computerunterstützten Planungs- und Entwurfsmethoden ist die Möglichkeit einer freien Formgebung in sehr vielfältiger und leistungsfähiger Form gegeben. Die Umsetzung verschiedenster Entwürfe scheitert wohl oftmals an der Finanzierung und wahrscheinlich nicht weniger oft an der praktischen Ausführbarkeit des Objekts.

1.2 FWF-Projekt: Non-standard Architektur mit Ornamenten und planaren Elementen

Ein vom FWF - Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung - gefördertes Projekt (L695) am Institut für Architektur und Medien der TU-Graz beschäftigt sich aktuell mit Non-standard-Architektur. Diese Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes vom FWF unterstützt. Der Forschungsinhalt wird im folgenden Absatz dargestellt.

Abstrakt:

„Unkonventionelle geometrische Formen und glatte Freiformflächen waren schon immer eine große Herausforderung für Architekten, sei es im Entwurf, wie auch in der baulichen Umsetzung. In der Vergangenheit konnten dazu nur figurative Modelle davon erzeugt werden und der Entwurfsprozess wurde durch die Darstellungsmedien und den Maßstab begrenzt. Die Entwicklung der digitalen Technologien in den letzten fünfzehn Jahren führte zu einer formalen Freiheit im Entwurf und in der Definition von Non-standard Architektur. Non-standard Architektur erzeugt endlose Serien von Ausnahmen, was bedeutet, dass die traditionellen tektonischen Prozesse der Bautechnologie kaum implementiert und verwendet werden können. Für Architekten führt der Umgang mit Non-standard Architektur und Strukturen zu großen Problemen, sodass deren Umsetzung eine große Herausforderung darstellt, wobei noch viele Fragen ungelöst sind. Die nicht gelösten Probleme behindern einerseits die Umsetzung von Non-standard Architektur, öffnen aber andererseits ein großes Forschungsfeld zwischen Grundlagen- und

angewandter Forschung. Die Absicht dieses Projektes ist es, neue Wege zu erforschen, wie Non-standard Architektur mit Standard-Bauelementen, modernen Bauprozessen, Material und Kosten effizient, verwirklicht werden kann. In diesem Projekt werden wir ein Entwurfsgerüst und generische parametrische Details entwerfen und diese am ganzen Prozess, beginnend beim Entwurf bis zur Herstellung, teilhaben lassen. Am Ende des Projektes werden wir einen Prototypen, der als typisches Beispiel für Non-standard Architektur stehen soll, fertigen und bauen. „Mass customization“ and „File to Factory“ sind für unseren Ansatz zur Umsetzung von Non-standard Architektur fundamental und der Schlüssel zu unserer Arbeit ist der Versuch, die Ausnahmen der non-standard Formen zur Regel zu machen. Da glatte geometrische Formen sehr kompliziert und kostenaufwendig zu fertigen sind, konzentrieren wir uns auf diskrete Formen und Flächen. Das heißt, wir approximieren die glatten Formen durch ebene Teile (Platten). Dabei stehen für uns nicht Triangulierungen und dreieckige Platten im Mittelpunkt, sondern Flächen-Diskretisierungen mit vier, fünf und sechsseitigen Teilen. Der Ansatz glatte Flächen durch ebene Teile anzunähern und zu diskretisieren hat den Vorteil, dass ebene Teile in verschiedensten Formen verwendet werden können und daher die Kosten, unabhängig vom Material, niedrig gehalten werden. Das neue System, das wir definieren, basiert auf parametrischer Modellierung von Ornamenten und deren Ästhetik. Das sehen wir als besonderen und einzigartigen Beitrag zu dieser Thematik. Mit anderen Worten, wir übersetzen ebene Ornamente und Muster in komplexe räumliche Strukturen und Flächen und noch viel wichtiger in baubare Architektur, für die ebene standardisierte Baumaterialien (Platten) verwendet werden. Unser System baut auf einem Regelwerk auf, das eine unendliche Variation von verschiedenen Formen zulässt und daher einen visuellen und komplexen Reichtum besitzt. Die parametrischen Modelle werden als nicht reguläre dreidimensionale polygonale und ornamentale Strukturen entworfen. Solche parametrischen Modelle können als selbsttragende Strukturen, wie zum Beispiel Raumteiler, Ornamentwände, Fassadenelemente, Schatten- und Akustikpanele eingesetzt und verwendet werden.“

Quelle: Institut für Architektur und Medien, TU-Graz

1.3 Ziel dieser Arbeit

Als Zielsetzung dieser Arbeit wurde die Entwicklung einer Verbindung für den im Rahmen des Forschungsprojektes entworfenen Prototypen definiert. Die Umsetzung des Prototypen sollte in Brettsperrholz erfolgen.

Als Inhalt wird die Prüfung eines bereits vorgeschlagenen Verbindungsentwurfs, eventuelle Varianten dazu, eine statische Abschätzung und Tastversuche, eine ingenieurmäßige Modellbildung, und eine Versuchsreihe zur Abschätzung der Tragfähigkeit der Verbindung sein.

1.4 Non-Standard-Projektentwürfe Grundlage für die Entwicklung der Verbindung

Zum Zeitpunkt der Masterarbeitsausschreibung war geplant, einen Prototypen mit dem Namen „free_climber“ umzusetzen. Die Struktur war mit 10m Höhe und einer Fläche von ca. 300m² dimensioniert. Die Idee war es diese Struktur vorerst als Anschauungsobjekt aufzustellen, und dann in der „Nachnutzung“ als Kletterwand zu verwenden. Abb. 1.2 zeigt den Entwurf.



Abb. 1.2 Prototyp: Entwurf „free_climber“ (Quelle: IAM-TU-Graz)

Dieser Entwurf kam nicht zur Ausführung, wurde aber vordimensioniert. Die Vorbemessung (Bogensperger, holz.bau forschungs gmbh) verlangte 5-schichtige Brettsperrholz-Elemente von 150 mm Stärke. Teile der Masterarbeit gehen daher von einer BSP-Platte mit 150 mm Dicke für die Versuche aus (Biegezugversuche, Abschnitt 5.1).

Zur Umsetzung gelangte die in der 3. Projektphase (2011) entworfene Struktur „Kobra“. Der Neuentwurf war aufgrund genauer Kalkulationsgrundlagen notwendig. Die Kobrafäche wurde mit 65 m² deutlich kleiner geplant als der „free_climber“. Dieser Prototyp wurde in Brettsperrholz mit der in dieser Arbeit entwickelten Verbindung gebaut.

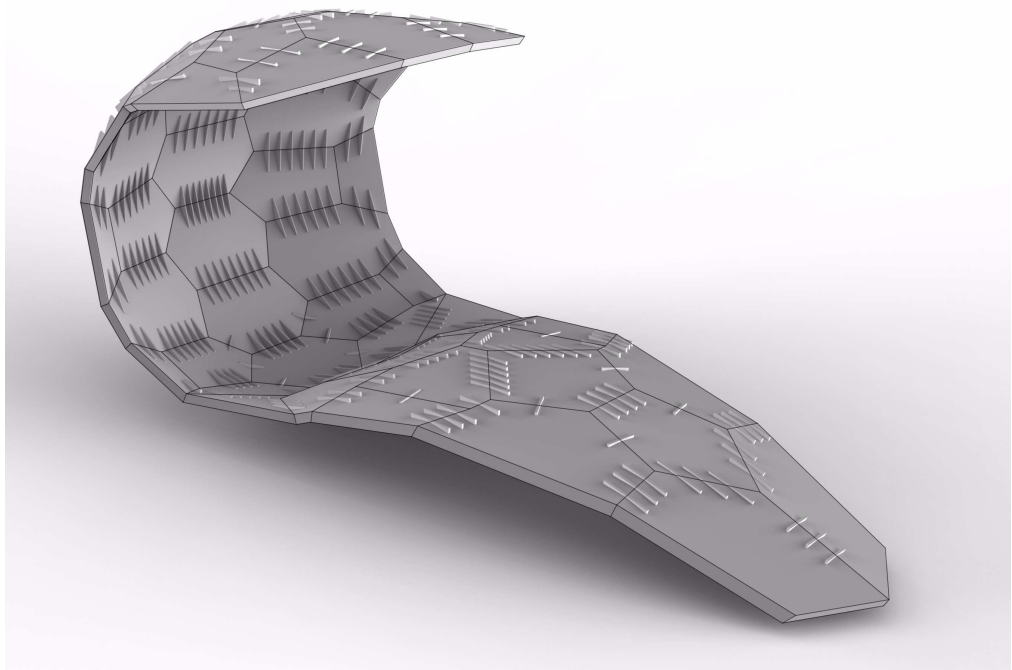


Abb. 1.3 Prototyp: Entwurf „Kobra“ (Quelle: IAM-TU-Graz)

Eine Bilddokumentation zur Herstellung des Prototypen findet sich in Kapitel 7 dieser Arbeit.

Die Bemessung wurde mit dem Finite Element Programm Abaqus durchgeführt (Bogensperger, holz.bau forschungs gmbh), und ergab eine 5-schichtige Brettsperrholzplatte von 95 mm Stärke. Diese Plattenstärke wurde für die Biegeversuche verwendet (Abschnitt 5.2).

Nähere Informationen zum verwendeten Material finden sich in Kapitel 2.

2.1 Brettsperrholz

2.1.1 Allgemeines

Das Bauprodukt Brettsperrholz wird in [36] wie folgt definiert.

„Als Brettsperrholz ... werden alle mehrschichtig verklebten, flächenhaften Holzprodukte verstanden, wobei die Faserlängsrichtung der aus Brettern bestehenden Einzelschichten rechtwinklig zueinander angeordnet sind. Der Querschnittsaufbau (Orientierung, Dicke und Festigkeitsklasse der Einzelschichten) ist zur Mittelebene symmetrisch“.

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl an Publikationen und Diplomarbeiten die das Thema Brettsperrholz betreffen. (insbesondere: [24], [36], und diverse Diplom- bzw. Masterarbeiten am Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU-Graz). In diesem Kapitel wird nur ein kurzer Überblick über das Produkt gegeben.

Am Markt befinden sich mehrere Hersteller des Produktes Brettsperrholz (KLH-Massivholz-GmbH, Stora-Enso-Wood-Products-GmbH, Mayr-Melnhof-Kaufmann-Gaishorn-GmbH, Binderholz-GmbH-Holzindustrie, Hasslacher-Norica-Timber, W. u. J. Derix GmbH + Co., HMS-Bausysteme-GmbH + Co. KG, Finnforest-Merk-GmbH, Eugen-Decker-Holzindustrie-KG, Haas-Fertigbau-GmbH, Lignotrend-Produktions-GmbH, Stephan-Holzbau-GmbH, Merkle-Holz-GmbH).

Die einzelnen Produkte sind grundsätzlich ident in ihrem Tragverhalten, variieren jedoch im Herstellungsverfahren, im verwendeten Grundmaterial, in den Plattenaufbauten und Plattengrößen. Spezifische Einzelheiten zu den einzelnen Produkten können auch auf den Internetseiten der Hersteller nachgelesen werden.

Es gibt mehrere gebräuchliche Bezeichnungen. Drei gängige Bezeichnungen sind BSP (für Brettsperrholz), CLT (für Cross-Laminated-Timber) und KLH (für Kreuzlagenholz). Anzumerken ist hierzu, dass der Begriff CLT von Prof. Schickhofer allgemein als Bezeichnung für Brettsperrholz eingeführt wurde, und nun auch als Produktname der Firma Stora-Enso verwendet wird. KLH ist ebenfalls Produkt- und Materialbezeichnung.

Nachfolgend wird die Bezeichnung BSP oder CLT für Brettsperrholz verwendet.

In der vorliegenden Arbeit wurden Produkte der Firma Stora-Enso und der Firma KLH für die Versuche verwendet. Das Plattenmaterial der Biegezugversuche (Abschnitt 5.1) waren ungeprüfte Restbestände einer Versuchsreihe (DA Salzman [30]) hergestellt von Stora-Enso. Die für die Biegeversuche der Verbindungs- und Referenzplatten (Abschnitt 5.2 und Abschnitt 5.3) verwendeten BSP-Teile stammen aus der Produktion des Herstellers KLH.

2.1.2 Das Produkt Brettsperrholz

Das Ausgangsmaterial für Brettsperrholz sind keilgezinkte Brettlamellen der Sortierklasse C24 (Für die Querlagen können auch bis zu einem bestimmten Prozentsatz niedrigere Festigkeitsklassen eingesetzt werden). Diese Brettlamellen werden zu Einzelschichten gefügt und diese dann zu einem Gesamtquerschnitt verklebt.

Je nach Herstellungsprozess werden die Einzelschichten nur übereinander geschichtet und gepresst oder zuerst zu Einzelplatten verklebt und danach zu Brettsperrholz verklebt. Alternativ besteht auch die Möglichkeit durch Pressen der Schmalseiten eine Seitenverklebung der Einzelschichten zu erreichen. Abschließend erfolgt der werksseitige Abbund. Abb. 2.1 zeigt das beschriebene Herstellungsschema für BSP-Platten.

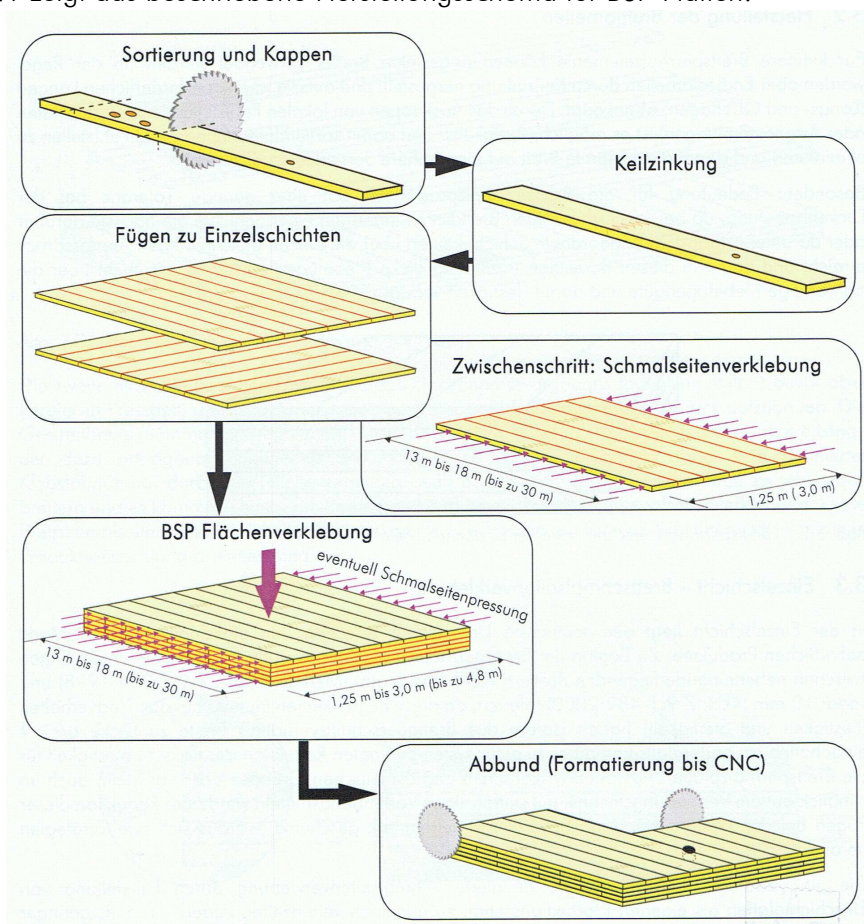


Abb. 2.1 Herstellungsschema von Brettsperrholz, aus [24]



Abb. 2.2 Brettsperrholzplatte 5-schichtig

2.1.2.1 Anwendung

Brettsperrholzplatten werden als großflächige lastabtragende Bauteile eingesetzt, die statisch als Platte und/oder Scheibe beansprucht werden. Üblicherweise wird BSP als Innen-, Aussenwand, Decke und Dachplatte im Hochbau, oder bei materialgerechter Konstruktion auch als lastabtragender Bauteil im Brückenbau verwendet.



Abb. 2.3 Einsatz von BSP als Wand-, Dach- und Deckenbauteil im Bauzustand
links: Bauvorhaben Volksschule Seiersberg, rechts: Bauvorhaben Sonneninsel Seekirchen
(Quelle: ZT Büro Koppelhuber, Rottenmann)

2.1.2.2 Aufbauten und Standardabmessungen

Aktuell werden verschiedenste Plattenaufbauten und Abmessungen angeboten. Momentan sind Platten in folgenden Abmessungen erhältlich:

- Stärken von ca. 40 mm bis ca. 340 mm
- Breiten bis 3500 mm
- Längen bis 22000 mm

Als Standardabmessungen können Plattengrößen von 2950x16000 mm mit Stärken von ca. 80 bis 240 mm angenommen werden. Abb. 2.4 und Abb. 2.5 zeigen die Standardaufbauten der Herstellerfirmen Stora-Enso und KLH (die verwendeten Produkte sind rot umrahmt).

KLH-Standardaufbauten

QUERSCHNITTSWERTE VERSCHIEDENER KLH-PLATTENTYPEN														
DECKLAGEN IN RICHTUNG DER PLATTENQUERRICHTUNG DQ														
Nennstärke in mm	Schichten	q	l	q	l	q	l	A _q [cm ²]	I _{voll} [cm ⁴]	I _{effektiv} (abhängig von der Spannweite L) [cm ⁴] / I _{voll}				
		19	19	19	19	19	19			L=1m	L=2m	L=2,95m		
		19	34	19	34	19	34			%	%	%		
57	3s	380	570	1354	1422	2567				69,7%	87,8%	92,2%		
72	3s	380	720	3110						52,3%	75,7%	82,5%		
95	5s	570	950	7145						43,8%	65,7%	72,3%		
158	5s	900	1580	32869						23,9%	48,7%	60,6%		
DECKLAGEN IN RICHTUNG DER PLATTENLÄNGSRICHTUNG DL														
Nennstärke in mm	Schichten	l	q	l	q	l	q	l	A _q [cm ²]	I _{voll} [cm ⁴]	I _{effektiv} (abhängig von der Spannweite L) [cm ⁴] / I _{voll}			
		19	22	19	22	19	22	19			L=2m	L=4m	L=6m	L=8m
		34 <td>19</td> <td>34</td> <td>19</td> <td>34</td> <td>19</td> <td>34</td> <td></td> <td></td> <td>%</td> <td>%</td> <td>%</td> <td>%</td>	19	34	19	34	19	34			%	%	%	%
60	3s	380	600	1800							85,3%	92,4%	93,9%	94,4%
78	3s	380	780	3955							71,2%	82,0%	84,5%	85,3%
90	3s	34	22	34	680	900	6075	5858	5913		82,6%	93,9%	96,4%	97,3%
95	3s	34	27	34	680	950	7145	6578	6795		78,8%	92,1%	95,1%	96,2%
108	3s	34	40	34	680	1080	10498	7292	9113		69,5%	86,8%	91,1%	92,7%
120	3s	40	40	40	800	1200	14400	9752	12511		67,7%	86,9%	91,9%	93,7%
117	5s	19	30	19	30	19	30	19	1347		52,4%	64,3%	67,2%	68,2%
125	5s	19	34	19	34	19	34	19	1250		48,5%	60,9%	64,0%	65,1%
140	5s	34	19	34	19	34	19	34	14799		64,7%	80,8%	84,4%	85,9%
146	5s	34	22	34	1020	1460	25934	15761	20181		60,8%	77,8%	82,2%	83,8%
162	5s	34	30	34	1020	1620	35429	18347	25181		51,8%	71,1%	76,4%	78,5%
182	5s	34	40	34	1020	1820	50238	21808	31979		43,0%	63,7%	70,0%	72,5%
200	5s	40	40	40	1200	2000	66667	27890	42965		41,8%	64,5%	71,9%	74,9%
202	7s	34	22	34	22	34	22	34	38927		56,7%	72,2%	76,1%	77,5%
226	7s	34	30	34	280	2260	96193	45728	62232		47,5%	64,7%	69,4%	71,2%
208	7ss	68	19	34	19	68		43322	61508		57,8%	82,0%	89,3%	92,2%
230	7ss	68	30	34	30	68		45979	74100		45,3%	73,1%	83,1%	87,3%
* 260	7ss	80	30	40	30	80		62593	104691		42,7%	71,5%	82,6%	87,5%
* 280	7ss	80	40	40	40	80		64335	117634		35,2%	64,3%	77,2%	83,2%
248	8ss	68	22	68	22	68		66273	98047		52,1%	77,1%	85,1%	88,3%
* 300	8ss	80	30	80	30	80		92760	155646		42,1%	69,2%	80,0%	84,7%
* 320	8ss	80	40	80	40	80		92385	169137		33,8%	61,9%	74,4%	80,1%








* Sonderplattentypen, Preis auf Anfrage, alle Angaben beziehen sich auf einen 1m breiten Plattenstreifen
 Querschnittswert für den Nachweis der Druckspannungen in Richtung der Orientierung der Decklage
 Querschnittswert für den Nachweis der Schubspannungen für Lastabtragung in Richtung der Decklage
 Trägheitsmoment des Vollquerschnittes - nur als Vergleichswert
 Trägheitsmoment für den Verbundquerschnitt inklusive des Schubverformungsmoments für die Lastabtragung in Richtung der Decklagen
 Verhältniswert der angibt, inwieweit die Querlagen das Trägheitsmoment des Querschnitts verändern.
 Widerstandsmoment für die Spannungsachse infolge Biegemomente = I_{effektiv} / (h* 0.5)
 Trägheitsradius des Verbundquerschnittes für die Ermittlung der Schlankeit = Wurzel (I_{effektiv} / A_{netto})

Abb. 2.4 Standardplattenaufbauten der Firma KLH [52]
















Stora-Enso-Standardaufbauten

 CLT STANDARDAUFBAUTEN
 für Wand und Deckenelemente


WANDAUFBAUTEN

Nenn- stärke [mm]	Bezeich- nung	Schich- ten [-]	Lamellenaufbau [mm]						Plattenbreiten Standard [cm]	Plattenlänge Maximal [cm]	
			C	L	C	L	C	L			
57	3s	3	19	19	19				245; 275; 295	1600	
83	3s	3	27,5	28	27,5				245; 275; 295	1600	
97	3s	3	35	27	35				245; 275; 295	1600	
95	5s	5	19	19	19	19	19		245; 275; 295	1600	
138	5s	5	27,5	27,5	28	27,5	27,5		245; 275; 295	1600	
161	5s	5	35	28	35	28	35		245; 275; 295	1600	

DECKENAUFBAUTEN

Nenn- stärke [mm]	Bezeich- nung	Schichten [-]	Lamellenaufbau [mm]						Plattenbreiten Standard [cm]	Plattenlänge Maximal [cm]		
			L	C	L	C	L	C				L
57	3s	3	19	19	19				245; 275; 295	1600		
74	3s	3	27,5	19	27,5				245; 275; 295	1600		
83	3s	3	27,5	28	27,5				245; 275; 295	1600		
97	3s	3	27,5	42	27,5				245; 275; 295	1600		
103	3s	3	42	19	42				245; 275; 295	1600		
112	3s	3	42	28	42				245; 275; 295	1600		
119	3s	3	42	35	42				245; 275; 295	1600		
126	3s	3	42	42	42				245; 275; 295	1600		
95	5s	5	19	19	19	19	19		245; 275; 295	1600		
121	5s	5	27,5	19	28	19	27,5		245; 275; 295	1600		
138	5s	5	27,5	27,5	28	27,5	27,5		245; 275; 295	1600		
150	5s	5	42	19	28	19	42		245; 275; 295	1600		
165	5s	5	42	19	43	19	42		245; 275; 295	1600		
182	5s	5	42	27,5	43	27,5	42		245; 275; 295	1600		
196	5s	5	42	35	42	35	42		245; 275; 295	1600		
211	5s	5	42	42	43	42	42		245; 275; 295	1600		
194	7s	7	27,5	27,5	28	28	28	27,5	27,5	245; 275; 295	1600	
216	7s	7	27,5	35	28	35	28	35	27,5	245; 275; 295	1600	
237	7s	7	27,5	42	28	42	28	42	27,5	245; 275; 295	1600	
209	7*s-2	7	55	35,5	28	35,5	55			245; 275; 295	1600	
223	7*s-2	7	55	42,5	28	42,5	55			245; 275; 295	1600	
249	7*s-2	7	84	19	43	19	84			245; 275; 295	1600	
267	7*s-2	7	84	28	43	28	84			245; 275; 295	1600	
296	7*s-2	7	84	43	42	43	84			245; 275; 295	1600	

* 7-schichtig, äußere Lagen bestehend aus 2 Längslagen

Stand: 10/2009

 Bezeichnung der Platten : z.B.: CLT 97 C3s oder CLT 165 L5s oder CLT 267 L7s-2
 (L: Decklage längs, C: Decklage quer)

www.clt.info www.clt.info www.clt.info www.clt.info www.clt.info

Abb. 2.5 Standardplattenaufbauten Stora-Enso-CLT [58]

Anmerkung: Die Aufbauten der Hersteller werden immer wieder verändert. Aktuell sind

auch Bestrebungen im Gange die Plattenaufbauten zu standardisieren. Stora-Enso hat ihre Produktpalette bereits umgestellt.

2.1.3 Bemessungsgrundlagen

Die Bemessung von Brettsperrholz ist aktuell nicht normativ geregelt. Es gibt mehrere Möglichkeiten BSP zu bemessen. Grundsätzlich findet man in der Produktzulassung notwendige Informationen zur Bemessung. Diese Produktzulassungen basieren meist auf der in EN 1995, Anhang B angeführten Bemessung von nachgiebig verbundenen Biegeträgern. Dieses Verfahren wurde für das Produkt Brettsperrholz angepasst und wird als modifiziertes γ -Verfahren bezeichnet.

gam

Abschnitte die sich auf dieses Verfahren beziehen werden weiterführend mit gekennzeichnet.

Alternativ wurde an der TU-Graz ein Bemessungsverfahren basierend auf dem baustatischen Modell des Timoschenko Trägers (Berücksichtigung der Schubverformung) für BSP entwickelt, welches auch im Bemessungsprogramm „CLT-Designer“ [57] der holz.bau forschung gmbh implementiert ist. Nähere Informationen zu diesem Verfahren und Allgemeine Informationen zu BSP finden sich im BSP-Handbuch [24].

tim

Abschnitte die sich auf dieses Verfahren beziehen werden weiterführend mit gekennzeichnet.

Beide Verfahren stimmen nicht für alle baustatischen Systeme exakt (z.B.: kurze Stützweiten, Mehrfeldträger) überein, unterscheiden sich jedoch in den Ergebnissen für den baupraktisch relevanten Bereich lt. BSP-Handbuch nur geringfügig.

Das Thema Bemessung von Brettsperrholz und ein Methodenvergleich von verschiedenen Bemessungsverfahren wird in der Diplomarbeit von T. Moosbrugger [29] näher erläutert. Ein weiterer Methodenvergleich zur Bemessung von Brettsperrholz wird aktuell an der holz.bau forschung gmbh von T. Bogensperger und G. Silly ausgearbeitet [47]. Teile dieser Publikation wurden für diese Arbeit zur Verfügung gestellt (Abschnitt 2.1.5 und Abschnitt 2.1.6).

In dieser Arbeit wird die Bemessung und Auswertung der Versuche vorrangig nach dem an der TU-Graz gelehrt Verfahren durchgeführt. Die Ermittlung der Biegespannung wird für beide Verfahren in weiterer Folge gezeigt.

Die Bemessung der Verbindung und das ingenieurmäßige Modell wird in Kapitel 4 ausführlich behandelt.

Nachfolgend werden die charakteristischen Materialsteifigkeiten und charakteristischen Festigkeiten von BSP angegeben.

2.1.3.1 Plattenaufbau

Die geplante Tragstruktur erfordert einen zumindest 5-schichtigen BSP-Plattenaufbau um

eine 2-achsige Tragwirkung zu erreichen. Die folgende Abbildung zeigt einen Platten-aufbau für eine 5-schichtige Platte. Die rot gefärbten Schichten sind faserparallel zur Spannrichtung der Platte gerichtet

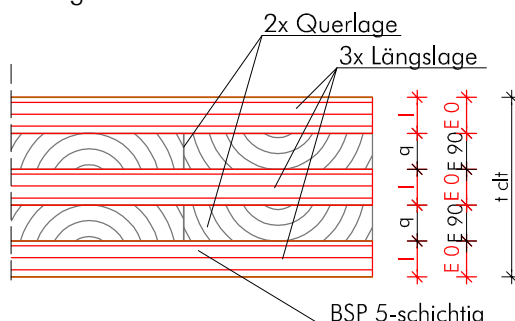


Abb. 2.6 Aufbau BSP-Platte 5-schichtig

2.1.4 Materialkennwerte BSP

2.1.4.1 Steifigkeiten des Grundmaterials

Für die Ermittlung der Plattensteifigkeiten ist es notwendig die Steifigkeiten des Grundmaterials zu kennen. Die Steifigkeiten für das KLH-Material wurden aus der aktuellen Produktzulassung [20] bzw. dem Produktdatenblatt von KLH [52] entnommen. Für das Stora-Enso-Produkt stammen die Werte aus [21]

Steifigkeiten	Bezeichnung	Wert KLH [N/mm ²]	Wert Stora-Enso [N/mm ²]
Elastizitätsmodul parallel zur Faser	$E_{0,mean}$	12000	11000
Elastizitätsmodul normal zur Faser	$E_{90,mean}$	370	370
Schubmodul parallel zur Faser	$G_{0,mean}$ (= $G_{ }$)	690	690
Rollschubmodul	$G_{r,mean}$ (= G_R)	50	50

Tab. 2.1 Steifigkeiten der verwendeten Brettsperrholzplatten lt. Zulassung [20] und [21]

2.1.5 Steifigkeits- und Spannungsermittlung für einen BSP-Plattenstreifen auf Basis des schubnachgiebigen Trägers nach Timoschenko [47]

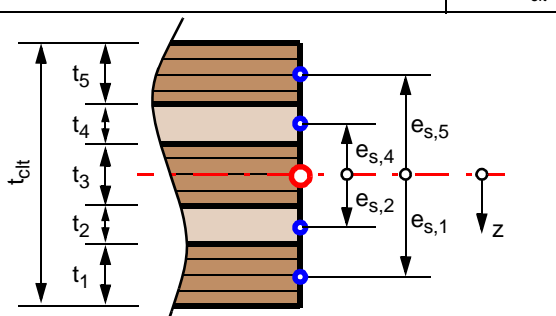
Dieser Abschnitt wurde aus dem Forschungsbericht „Approximative Nachweisverfahren für BSP – Methodenvergleich“ der holz.bau forschungs gmbh [47] übernommen und an die Formatierung dieser Masterarbeit angepasst.

2.1.5.1 Biegesteifigkeit eines 1D-Plattenstreifens aus BSP – K_{clt}

tim Wird von einer schichtweisen Konstanz der Materialparameter ausgegangen, so lässt sich die Biegesteifigkeit als Summe der Eigensteifigkeitswerte und der sogenannten „Steiner-Anteile“ anschreiben. In Tab. 2.2 ist diese Zerlegung für eine 5-schichtige BSP-Platte dargestellt.

$$K_{clt} = \sum(E_i \cdot I_i) + \sum(E_i \cdot A_i \cdot e_{s,i}^2) \quad [2.1]$$

ES	α	E	t	e_s	Eigentragheitsanteil	Steiner-Anteil
5	0	E_0	$t_5 = t_1$	$e_{s,1}$	$E_0 \cdot b \cdot t_1^3 / 12$	$E_0 \cdot b \cdot t_1 \cdot e_{s,1}^2$
4	90	E_{90}	$t_4 = t_2$	$e_{s,2}$	$E_{90} \cdot b \cdot t_2^3 / 12$	$E_{90} \cdot b \cdot t_2 \cdot e_{s,2}^2$
3	0	E_0	t_3	$e_{s,3}$	$E_0 \cdot b \cdot t_3^3 / 12$	0
2	90	E_{90}	t_2	$e_{s,2}$	$E_{90} \cdot b \cdot t_2^3 / 12$	$E_{90} \cdot b \cdot t_2 \cdot e_{s,2}^2$
1	0	E_0	t_1	$e_{s,1}$	$E_0 \cdot b \cdot t_1^3 / 12$	$E_0 \cdot b \cdot t_1 \cdot e_{s,1}^2$
$K_{clt} = \sum \text{Eigentragheitsanteil} + \sum \text{Steiner-Anteil}$						



● Schwerpunkt des Querschnitts
● Schwerpunkte der Einzelschichten

mit:

$t_1 = t_5$ und $t_2 = t_4$

$e_{s,1} = e_{s,5}$ und $e_{s,2} = e_{s,4}$

$e_{s,3} = 0$

Tab. 2.2 Tabellarische Ermittlung der Biegesteifigkeit einer 5-schichtigen BSP-Platte

 2.1.5.2 Schubsteifigkeit eines 1D-Plattenstreifens aus BSP – S_{clt} [47]

tim Die Mitberücksichtigung von Schubverformungen bei BSP ist wichtig, da die Schubsteifigkeit S_{clt} bedingt durch die sehr schubweichen Querlagen, gering ist. Die Schubdeformation kann hier bis zu 20% der Gesamtverformungen betragen. Da für die Schubverformungen kein exakter Ansatz zur Verfügung steht, können diese direkt ermittelt werden. Üblich ist es, den Grundwert der Schubsteifigkeit S_{clt} als Summe der Produkte der Einzelschichtdicken mit dem jeweiligen Schubmodul G zu definieren und diesen im Weiteren durch den so genannten Schubkorrekturfaktor κ zu dividieren.

Schubkorrekturfaktor κ

$$S_{clt} = \frac{\sum(G_i \cdot b \cdot t_i)}{\kappa} = \frac{\sum(G_i \cdot A_i)}{\kappa} \quad [2.2]$$

Der Schubkorrekturfaktor κ wird mit folgendem Integral definiert, welches z. B. über das Prinzip der virtuellen Kräfte hergeleitet werden kann.

$$\frac{\kappa}{\sum_i G_i \cdot t_i} = \frac{1}{K_{\text{clt}}^2} \cdot \int_{z = -\frac{t_{\text{clt}}}{2}}^{z = \frac{t_{\text{clt}}}{2}} \left[\int_{s = -\frac{t_{\text{clt}}}{2}}^{s = z} E(s) \cdot s \cdot ds \right]^2 \cdot \frac{dz}{G(z)} \quad [2.3]$$

Der Schubkorrekturfaktor κ hängt stark vom Schubsteifigkeitsverhältnis $G_{||}/G_R$ ab und kann für gleiche Schichtstärken näherungsweise mit der nachfolgend dargestellten Formel und den Werten aus Tab. 2.3 ermittelt werden:

$$\kappa_{(G_{||}/G_R)} \approx \kappa_{10} + \frac{\kappa_{14,4} - \kappa_{10}}{4.4} \cdot \left(\frac{G_{||}}{G_R} - 10 \right) \quad [2.4]$$

In Tab. 2.3 sind die Schubkorrekturfaktoren für ein Verhältnis der Schubsteifigkeit zur Rollschubsteifigkeit von $G_{||}/G_R = 10$ ($= \kappa_{10}$) und $G_{||}/G_R = 14,4$ ($= \kappa_{14,4}$) angeführt. mit:

Schichtanzahl #s	Haupttragrichtung	
	κ_{10}	$\kappa_{14,4}$
3	4,854	6,723
5	4,107	5,652
7	3,873	5,313

Tab. 2.3 Schubkorrekturfaktoren κ_{10} und $\kappa_{14,4}$ von BSP mit gleichen Schichtstärken für verschiedene Schubmodulverhältnisse

Das Verhältnis der Schubsteifigkeit zur Rollschubsteifigkeit von $G_{||}/G_R = 10$ findet sich in den bekannten Normenwerken (DIN 1052 [15], EN 338 [16]). In den einschlägigen Zulassungen zu BSP (z. B. ETA 06/0009 [22] oder ETA 06/0138 [20]) ist oft auch die Angabe von $G_{||} = 650 \dots 690 \text{ N/mm}^2$ als direkter Wert zu finden. Ebenfalls wird auf die Steifigkeitseigenschaften von Brettschichtholz (z.B. Z-9.1-680 [23]) verwiesen. Damit kommen die Werte der DIN1052 [15] bzw. ON EN 1194 [11] mit $G_{||} = 720 \text{ N/mm}^2$ (GL24h) zu tragen. Für den Rollschubmodul G_R ist meistens ein konstanter Wert von 50 N/mm^2 angegeben.

2.1.5.3 Biege- und Schubspannungen [47]

tim Bei der Ermittlung der Spannungen von Brettsperrholz muss der geschichtete Aufbau und die um 90° geänderte Faserorientierung benachbarter Schichten beachtet werden. Dies führt z.B. bei einer 5-schichtigen BSP-Platte zu der in Abb. 2.7 gezeigten Biege- und Schubspannungsverteilungen. Bei der Darstellung der Spannungen wurde die stark ausgeprägte Orthotropie zwischen dem E-Modul in (E_0) und jenem quer zur Faserrichtung (E_{90}) bereits berücksichtigt, was in der Praxis zu sehr geringen Biegespannungen in den Querlagen führt. E_{90} wird daher näherungsweise mit

0 angenommen.

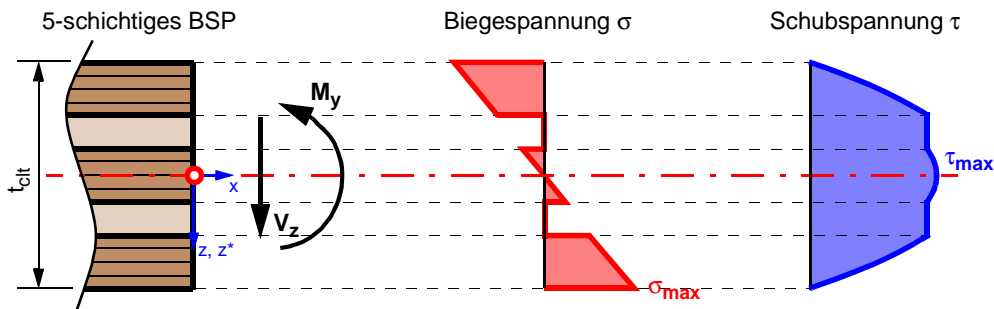


Abb. 2.7 Spannungen bei BSP unter Querkraftbiegung ($E_{90}=0$)

Biegespannung

$$\sigma(x, z) = \frac{M_y(x)}{K_{clt}} \cdot z \cdot E(z) \quad \sigma_{max} = \frac{M_{max}}{K_{clt}} \cdot \frac{t_{clt}}{2} \cdot E \quad [2.5]$$

Schubspannung

$$\tau(z) = \frac{V_z(x) \cdot \int_{-t_{clt}/2}^z (E(z^*) \cdot z^* \cdot b \cdot dz^*)}{K_{clt} \cdot b} \quad [2.6]$$

z.....Abstand der betrachteten Schubspannungsfuge vom SP [mm]

$$\tau_{max} = \frac{V_{max} \cdot \sum(S_m \cdot E_i)}{K_{clt} \cdot b} = \frac{V_{max} \cdot \sum(E_i \cdot A_i \cdot e_{s,i})}{K_{clt} \cdot b} \quad [2.7]$$

2.1.6 Steifigkeits- und Spannungsermittlung für einen BSP-Plattenstreifen auf Basis des modifizierten γ -Verfahrens [47]

gam Für viele BSP-Produkte wird in deren Zulassung ein Verfahren in Anlehnung an den Eurocode 5, Anhang B [2] zur Ermittlung der Plattensteifigkeiten und Spannungen empfohlen.

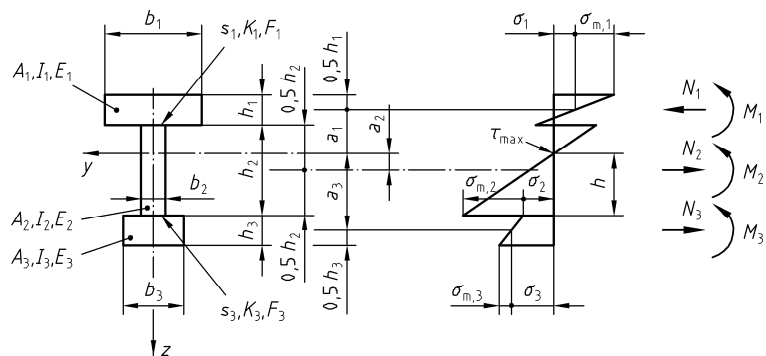
Dieser Abschnitt regelt die Berechnung von nachgiebig verbundenen Biegestäben. Für die Berechnung des Verformungsverhaltens von nachgiebig verbundenen Biegestäben wird eine wirksame Biegesteifigkeit des Querschnitts verwendet. Diese wirksame Biegesteifigkeit $(EI)_{ef}$ berücksichtigt die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel für aus mehreren Teilen zusammengesetzten Querschnitten.

Die Berechnung erfolgt für Querschnitte mit bis zu drei Schichten nach EN 1995-1-1:2009, Anhang B.2. Abschnitt 2.1.6.1 zeigt die in der Norm vorgegebenen Formeln.

2.1.6.1 Allgemeine Formeln nach EN 1995-1-1

Dieser Abschnitt wurden aus dem Forschungsbericht „Approximative Nachweisverfahren für BSP – Methodenvergleich“ [47] übernommen und an die Formatierung dieser Masterarbeit angepasst.

Typ A



Typ C

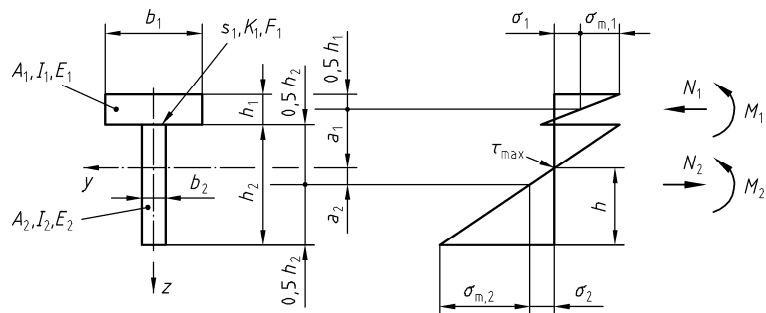


Abb. 2.8 Querschnittstypen nach EN 1995-1-1, Anhang B.

$$(EI)_{\text{ef}} = \sum_{i=1}^3 (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2)$$

$$A_i = b_i \cdot h_i$$

$$I_i = \frac{b_i \cdot h_i^3}{12}$$

$$\gamma_2 = 1$$

$$\gamma_{i(1,3)} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot s_i}{K_i \cdot l^2}}$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2) - \gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot (h_2 + h_3)}{\sum_{i=1}^3 \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i}$$

Abb. 2.9 Allgemeine Formeln nach EN 1995-1-1 [2]

Anmerkung: Laut EN 1995-1-1 kann für die Länge l bei Durchlaufträgern näherungsweise $4/5$ der Stützweite eingesetzt werden.

Der Abstand a_2 ist bei Typ-C immer positiv. Das heißt der Spannungsnulldpunkt liegt immer über dem geometrischen Schwerpunkt der Fläche A_2 . Beim Typ-A ist sowohl ein positiver als auch negativer Wert von a_2 möglich. Negativ wird a_2 dann, wenn der errechnete Spannungsnulldpunkt unter dem Flächenschwerpunkt von A_2 liegt.

Biegespannungsberechnung

gam

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A_i} = \frac{M}{(EI)_{\text{ef}}} \cdot \gamma_i \cdot E_i \cdot a_i$$

$$\sigma_{m,i} = \frac{M_i}{W_i} = \frac{M}{(EI)_{\text{ef}}} \cdot \frac{E_i \cdot h_i}{2}$$
[2.8]

Schubspannungsberechnung

$$\tau_{2,\text{max}} = \frac{V}{(EI)_{\text{ef}}} \cdot \frac{\gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot a_3 + 0,5 \cdot E_2 \cdot b_2 \cdot h^2}{b_2}$$
[2.9]

2.1.6.2 Besonderheiten bei der Berechnung von BSP [47]

Um mit dem oben beschriebenen Verfahren auch eine Nachweisführung von Brettsperrholz durchführen zu können, sind einige Anpassungen notwendig. In diesem Zusammenhang wird deshalb vom „modifizierten γ -Verfahren“ gesprochen.

Querschnittsanpassung

Aus dem 2- bzw. 3-teiligen Querschnitt (Typ-C bzw. Typ-A, siehe Abb. 2.8) kann die 3- bzw. 5-schichtige BSP-Platte abgeleitet werden (siehe Abb. 2.10). Dazu wird die Nachgiebigkeit der Verbindungsfugen (s_i/K_i) durch die schubnachgiebigen Querlagen des Brettsperrholzes ($h_{s_i}/(G_{R,i} \cdot b_i)$) ersetzt. Die Querschnittsbreite b_i der einzelnen Lagen ist bei der Berechnung von BSP als konstant anzunehmen ($b_i = b$).

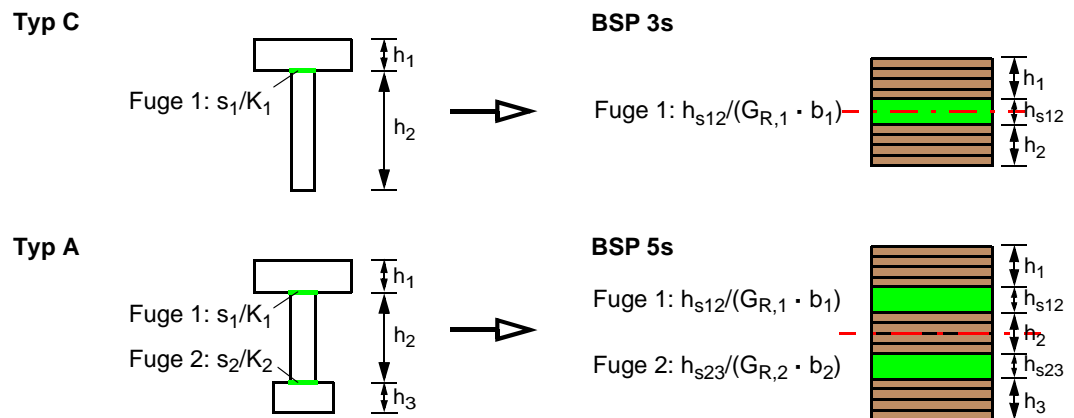


Abb. 2.10 Querschnittsanpassung für 3- und 5-schichtiges BSP.

Die Formeln lt. EN 1995-1-1, Anhang B können somit wie folgt angepasst werden:

$$\gamma_{i(1,3)} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot s_i}{K_i \cdot l^2}} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot h_i \cdot \cancel{b} \cdot h_{s_i}}{G_{90} \cdot \cancel{b} \cdot l^2}}$$

$$\gamma_{i(1,3)} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot h_i \cdot h_{s_i}}{G_{90} \cdot l^2}}$$

The diagram shows a cross-section of cross-laminated timber with five layers. The top layer has height h_1 , the second layer has height h_{s12} , the third layer has height h_2 , the fourth layer has height h_{s23} , and the bottom layer has height h_3 . A dashed red line indicates a joint between the second and third layers.

Vereinfachung bei gleichem Material sowie gleichen Schichtstärken

$$h_1 = h_2 = h_3 = h \text{ und } h_{s12} = h_{s23} = h$$

$$\gamma_1 = \gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_0 \cdot h^2}{G_{90} \cdot l^2}}$$

$$a_2 = 0$$

$$a_1 = a_3 = \frac{h_1}{2} + h_{s12} + \frac{h_2}{2} - a_2 = 2 \cdot h$$

2.1.7 Steifigkeitswerte für die verwendeten BSP-Versuchsplatten

Biegeversuche

Der gewählte Plattentyp ist eine Standardplatte der Firma KLH (Produktzulassung ETA-06/0138-OIB, [20]). Abb. 2.11 zeigt diesen Aufbau.

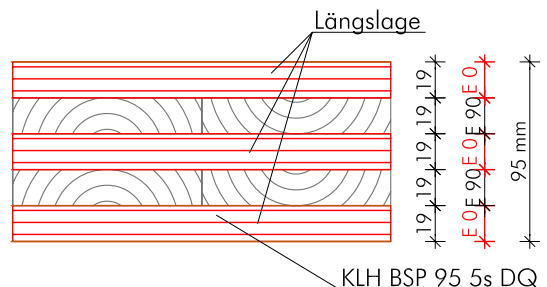


Abb. 2.11 BSP-Platte KLH-95-5s-DL

tim Die Berechnung der Querschnittswerte erfolgte mit einem Tabellenkalkulationsprogramm und kann in Abschnitt B.2 nachvollzogen werden (Die Steifigkeiten des Grundmaterials wurden lt. Tab. 2.1 angenommen, der Schubkorrekturfaktor wurde nach Gl. [2.3] für den verwendeten Plattentyp errechnet). Die Ergebnisse für die 5-schichtige Platte in Haupttragrichtung (lt. Abb. 2.11) sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Biegesteifigkeit	EI_{clt}	684,54 [kNm ²]	$=6,85 \times 10^{11}$ [Nmm ²]
Schubsteifigkeit	S_{clt}	7564,01 [kN]	$=7564011,83$ [N]
Schubkorrekturfaktor	κ	5,4508 [-]	$1/\kappa = 0,183$

Tab. 2.4 Steifigkeiten und Schubkorrekturfaktor für KLH-95-5s-DQ

Biegezugversuche

Diese BSP-Platte ist ein Produkt der Firma Stora-Enso (Produktzulassung Z-9.1-559-DIBT, [21]). Aktuell ist dieser Aufbau kein Standardaufbau (Standardaufbauten wurden geändert). Abb. 2.12 zeigt diesen Aufbau.

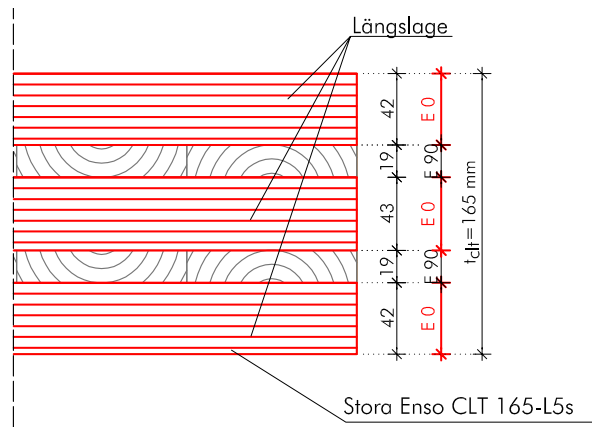


Abb. 2.12 BSP-Platte Stora-Enso-165-L5s

tim Die Berechnung der Querschnittswerte erfolgte mit einem Tabellenkalkulationsprogramm und kann in Abschnitt B.2 nachvollzogen werden (Die Steifigkeiten des Grundmaterials wurden lt. Tab. 2.1 angenommen; der Schubkorrekturfaktor wurde nach Gl. [2.3] für den verwendeten Plattentyp errechnet). Die Ergebnisse für die 5-schichtige Platte in Haupttragrichtung (lt. Abb. 2.12) sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Biegesteifigkeit	EI_{clt}	3717,44 [kNm ²]	=3,72x10 ¹² [Nmm ²]
Schubsteifigkeit	S_{clt}	19332,34 [kN]	=19,33x10 ⁶ [N]
Schubkorrekturfaktor	κ	4,630 [-]	1/ κ =0,216

Tab. 2.5 Steifigkeiten und Schubkorrekturfaktor für CLT-165-L5s

2.1.8 Festigkeiten der BSP-Produkte

2.1.8.1 Festigkeitswerte Modell BSP-Graz

An der TU-Graz wurden charakteristischen Festigkeitswerte für Brettsperrholz versuchs-technisch ermittelt [44].

Festigkeitswerte für BSP sind lt. BSP-Handbuch [24] (BSP-Graz):

Beanspruchung	Schub parallel zur Faser [$f_{v,k}$]	Rollschub [$f_{r,k}$]	Biegung [$f_{m,clt,k}$]
BSP-TU-Graz-Platte	3,0 N/mm ²	1,25 N/mm ²	28,9 N/mm ²

Tab. 2.6 Relevante Festigkeitskennwerte für BSP lt. [24].

Die Biegefestigkeit ermittelt sich lt. BSP-Handbuch mit:

$$f_{m,clt,k} = a_{clt} \times f_{t,0,l,k}^{0,8} \quad [2.10]$$

mit $a_{clt} = 3,5$ $f_{t,0,l,k} = 14,0 \frac{N}{mm^2}$

mit: $a_{clt}=3,5\dots$ für visuelle Sortierung
 $f_{t,0,l,k}\dots\dots\dots$ Zugfestigkeit für C24 nach EN 338 [16]

tim Diese Werte wurden für die Nachweisführung nach dem Verfahren Timoschenko herangezogen.

2.1.8.2 Festigkeitswerte für BSP nach Zulassung

In Tab. 2.7 sind die Festigkeitswerte aus den Produktzulassungen (KLH lt. ETA-06/0138-OIB [20], Stora-Enso-CLT lt. Z-9.1-559-DIBT [21]) angeführt:

Beanspruchung	Schub parallel zur Faser $[f_{v,k}]$	Rollschub $[f_{r,k}]$	Biegung $[f_{m,k}]$ lt Zulassung	k_l	Biegung $[f_{m,k}] \cdot k_l$
KLH als Platte	2,7 N/mm ²	1,5 N/mm ²	24,0 N/mm ²	1,1	26,4 N/mm ²
Stora-Enso-CLT als Platte	2,7 N/mm ²	1,25 N/mm ²	26,0 N/mm ²	1,1	28,6 N/mm ²

Tab. 2.7 Relevante Festigkeitskennwerte lt. Produktzulassung [20] und [21].

Für beide Produkte wurde die Biegefestigkeit f_{mk} mit einem Systembeiwert k_l multipliziert (Werte der Spalte 5 in Tab. 2.7).

Nach Z-9.1-559-DIBT kann die Biegefestigkeit mit einem Systembeiwert nach Gl. [2.11] erhöht werden.

$$k_l = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0,025 \times n \\ 1,1 \end{array} \right. \quad [2.11]$$

mit: $n =$ Anzahl der nebeneinander liegenden Bretter

2.1.8.3 Bemessungswerte der Festigkeiten

Die Bemessungswerte der Festigkeiten errechnen sich lt. EN-1995-1-1 für beide Verfahren mit:

$$X_d = \frac{X_k \cdot k_{mod}}{\gamma_m} \quad [2.12]$$

Für die Bemessung der Versuche wird, falls nicht anders definiert, mit den charakteristi-

schen Festigkeitswerten gerechnet. Somit ist γ_m und k_{mod} mit 1,0 anzunehmen.

2.2 Furnierschichtholz

2.2.1 Das Material [36]

„Als Furnierschichtholz (FSH) oder „Laminated Veneer Lumber“ werden platten- oder balkenförmige Holzwerkstoffe bezeichnet die aus mehreren überwiegend faserparallel verklebten Furnierschichten bestehen.“ (Definition aus HOLZ LEXIKON 1993 [34]).

Die einzelnen Furnierlagen werden so zusammengelegt, dass dichtschießende Schäftungsfugen entstehen. Die versetzte Schichtung der einzelnen Furniere gewährleistet eine statistische Verteilung der produktionsbedingten Schwachstellen und der in den einzelnen Furnierschichten vorhandenen Holzfehler, wie Äste oder Risse. Durch dieses Prinzip wird eine hohe Vergütung des Holzes bei geringen Streuungen der Produkteigenschaften erreicht.

Anforderungen:

Furnierschichthölzer bedürfen eines Nachweises der Verwendbarkeit durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen, in denen der Plattenaufbau die Furnierdicken, sowie die charakteristischen Festigkeits-, Steifigkeits-, und Rohdichtekennwerte festgelegt sind.

Anbieter:

Aktuell gibt es mehrere Anbieter von konstruktiv einsetzbarem Furnierschichtholz. Beispielfhaft werden drei genannt:

- | | |
|--------------|---------------------|
| - Trus Joist | Microllam LVL 2.0 E |
| - Finnforest | Kerto-S |
| - Steico | Ultralam-R |

2.2.2 Das Produkt Kerto

In diesem Projekt wurde das Produkt der Firma Finnforest gewählt. Die Gründe dafür waren die Verfügbarkeit des Produktes im Handel. Abb. 2.13 zeigt das gewählte Produkt. Alle Furnierschichten des Produktes Kerto-S sind in Pfeilrichtung (roter Pfeil) orientiert. Verwendet wurden Kerto-S Platten mit 27mm Dicke. Diese bestehen aus neun Furnierschichten.

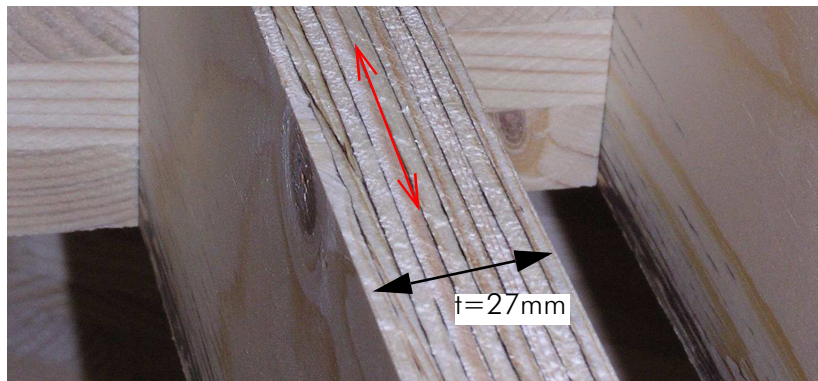


Abb. 2.13 Kerto-S-Furnierschichtholz, mit 27 mm Stärke

2.2.3 Herstellung von Kerto-Furnierschichtholz [60]

„Nadelholzstämmen werden gewässert, abgelängt und zu einem 3,2 mm (nach der Verpressung 3 mm) dicken Furnierband geschält. Daraus werden Furnierblätter gleicher Breite geschnitten und anschließend getrocknet. Nach einer speziellen Festigkeitssortierung werden sie beleiimt (mit hochwertigen Phenolharzen) und im Durchlaufverfahren mit versetzten Stößen aufeinandergeschichtet. Der kalten Vorpressung folgt die Heißverpressung zu Platten. Die Kerto-Furnierschichtholzplatte mit bis zu 23,00 m Länge wird nun nach Bedarf abgelängt, zugeschnitten und bis zum Abtransport gelagert. Das verwendete Produkt Kerto-S wird mit ausschließlich in Plattenlängsrichtung verlaufenden Furnierlagen hergestellt.“

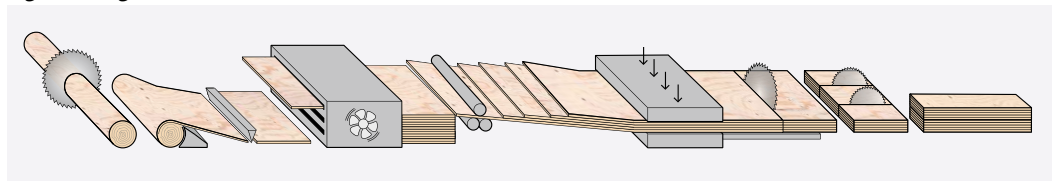


Abb. 2.14 Schematischer Herstellungsprozess von Kerto-Platten (Quelle Finforest [60])

Abmessungen

„Kerto ist als breite Platte (1,82 oder 2,50 m) oder schmaler, hoher Balken in Längen bis zu 23,00 m erhältlich. Durch die Fertigung im Endlosverfahren als homogene Platte werden Stöße und Verschnitte reduziert.“

Zulassung und Qualitätskontrolle

Die Anwendung von Kerto ist mit Zulassungsbescheid (Z-9.1-100) des Institutes für Bautechnik bauaufsichtlich zugelassen. Kerto wird ständig qualitätsüberwacht. Das Qualitätsmanagement entspricht der DIN ISO 9001.

Oberflächenqualität

Für die Anwendung als sichtbare Oberfläche kann Kerto auch mit geschliffener Oberfläche und einseitig ausgesuchten Deckfurnieren hergestellt werden. Eine einseitig helle Schäftungsfuge ist derzeit Standardausführung.

Anwendungsbereich

Kerto-S kann im Innen- und Außenbereich verwendet werden. Durch die Verwendung schadstoffarmer Leime kann Kerto im Innenbereich eingesetzt werden. Die Verleimung von Kerto ist wasserbeständig. Kerto kann im Kesseldruckverfahren für Anwendungen im Freien oder in feuchten Umgebungen kesseldruckimprägniert werden.“

entnommen aus „Kerto_in_der_Praxis_Broschuere15.12.08.pdf „ [60]

2.2.4 Materialkennwerte Kerto-S

Steifigkeiten und charakteristische Festigkeitswerte für das verwendete Kerto-S Material können aus der Zulassung Z-9.1-100-DIBT entnommen werden.

2.2.4.1 Steifigkeiten für Kerto-S

Die für die Vorbemessung relevanten Steifigkeitswerte sind lt. Zulassung [19]

Steifigkeiten	Bezeichnung	[N/mm ²]
Elastizitätsmodul parallel zur Faser	$E_{0,mean}$	13800
Elastizitätsmodul parallel zur Faser	$E_{0,05}$	11600
Elastizitätsmodul normal zur Faser	$E_{90,mean}$	300
Schubmodul parallel zur Faser	$G_{0,mean}$	500

Tab. 2.8 Steifigkeiten der verwendeten Kerto-S Platten lt. Zulassung [19]

2.2.4.2 Festigkeiten für Kerto-S

Die für die Vorbemessung relevanten Festigkeitswerte sind lt. Zulassung [19]:

Beanspruchung	Schub [$f_{v,k}$]	Biegung [$f_{m,k}$]	Zug [$f_{t,0,k}$]
Kerto-S als Platte	2,3 N/mm ²	--	--
Kerto-S als Scheibe	--	48,0 N/mm ²	38,0 N/mm ²

Tab. 2.9 Relevante Festigkeitskennwerte Kerto-S

2.2.5 Spannungsermittlung für Kerto-S

Die Bemessung und Ausführung erfolgt lt. Zulassung nach DIN 1052:2004-08. Diese beruht auf Bemessungskonzept der EN 1995-1-1 [2]. Auf die Spannungsermittlung nach EN 1995-1-1 wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Die Nachweisführung für die verwendeten Kerto-S Bauteile der Verbindung wird in Kapitel 4 erläutert.

Als Rechenwerte für den Modifikationsfaktor k_{mod} sind die entsprechenden Werte der DIN 1052:2004-08 [15] für Brettschichtholz zu verwenden.

Nähere Informationen zur Bemessung findet man in der Produktzulassung Z-9.1-100-DIBT [19].

2.3 Klebstoff

2.3.1 Auswahl des verwendeten Klebstoffs

Aktuell gibt es eine Vielzahl zugelassener Produkte. In Anhang B, Abschnitt B.1 befindet sich ein Teil einer Liste der MPA Stuttgart mit Stand vom 10.02.2011 [53].

Alleine aufgrund dieser Menge an erhältlichen Klebstoffsystemen für verschiedenste Einsatzzwecke ist eine eingehende Beschäftigung mit der Klebetechnologie und dementsprechendes Know-how vom Planer bis zum Ausführenden notwendig, um eine tragende Holzverbindung herzustellen.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird ausschließlich auf jene Klebstoffe eingegangen, die für dieses Projekt verwendet wurden.

Hierzu muss erwähnt werden, dass im Vorfeld der Versuche, im Zuge der Entwicklung der Verbindung, Kontakt mit verschiedenen Klebstoffherstellern und Experten aufgenommen wurde. Dabei wurde versucht, einerseits eine Aussage über die grundsätzliche Machbarkeit, und andererseits eine Empfehlung eines geeigneten Klebstoffs zu erhalten. Der Klebstoffhersteller Purbond war bereit Know-how und auch Klebermaterial bereitzustellen, deshalb wurden ausschließlich deren Produkte verarbeitet und getestet.

2.3.2 Verkleben von Holz

[32],[33],[35]

2.3.2.1 Aufbau der Klebefugen:

Das Verkleben wird den stoffschlüssigen Fügeverfahren zugeordnet. Fügeverfahren dienen der Herstellung von Verbindungen aus Werkstoffen gleicher Art oder aus Werkstoffkombinationen. Im speziellen Fall werden zwei Hölzer miteinander verklebt. Der Aufbau einer Verklebung ist in Abb. 2.15 dargestellt. Wichtig für die Qualität der Verklebung ist neben den Kohäsionkräften (Zusammenhangskräfte) im Klebstoff und im Holz im Speziellen die Ausbildung einer ausreichenden Adhäsion (Haftung) in der Grenzschicht zwischen Klebstoff und Festkörper.

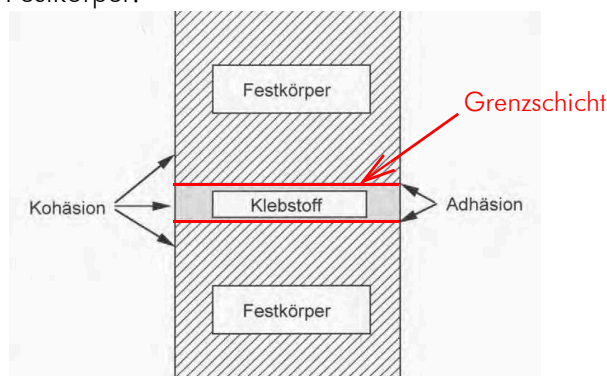


Abb. 2.15 Systematische Darstellung einer Holzverklebung (aus [35])

2.3.2.2 Wichtige Einflussparameter auf die Adhäsion [35],[33]

Für die Verklebung von Holz sind verschiedene Mechanismen der Adhäsion (Haftung) von Bedeutung. Von großer Bedeutung sind die mechanische Verankerung und die Adsorptionstheorie auf die Gesamtadhäsion. Auf diese Mechanismen wird im Folgenden näher eingegangen.

Von geringerer Bedeutung sind Diffusion, Weak boundary, chemische Bindung, polare und elektrostatische Anziehung für die Grenzschicht. Über diese Mechanismen kann in [31] und [33] nachgelesen werden.

Als mechanische Verankerung wird der Formschluss zwischen Oberfläche und Klebschicht bezeichnet. Aufgrund der fasrig-porösen Struktur des Materials Holz ist die Verklammerung zwischen Klebstoff und Holzoberfläche ein zentraler Baustein für die Festigkeit der Verklebung. Die Klebschicht verhakt sich dabei in der rauen Oberfläche des Holzes.

Die Adsorptionstheorie besagt, dass je nach Oberflächenspannung des Materials mehr oder weniger Oberflächenenergie für die physikalische Adhäsion vorhanden ist. Je mehr freie Oberflächenenergie vorhanden ist, desto besser ist die Benetzung der Oberfläche durch einen Flüssigkeitstropfen. Die vollständige und gleichmäßige Benetzung der Oberfläche durch Klebstoff ist eine unabdingbare Voraussetzung für die Herstellung einer festen Klebung. Als Maß für die Benetzbarkeit wird der Kontaktwinkel Θ des Flüssigkeitstropfens herangezogen. Von einer guten Benetzbarkeit spricht man bei einem Winkel Θ kleiner als 45° . Somit kann über den gemessenen Kontaktwinkel auf die Benetzbarkeit der Oberfläche geschlossen werden.

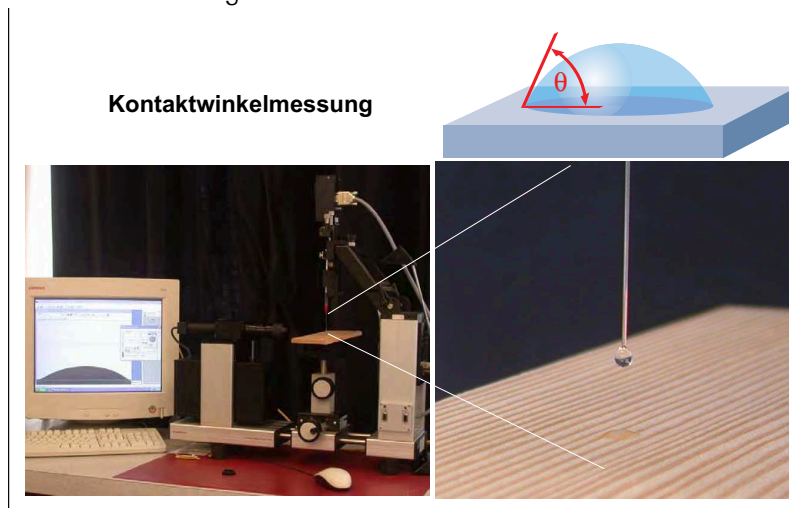


Abb. 2.16 Messung des Kontaktwinkels auf der Holzoberfläche (aus [35])

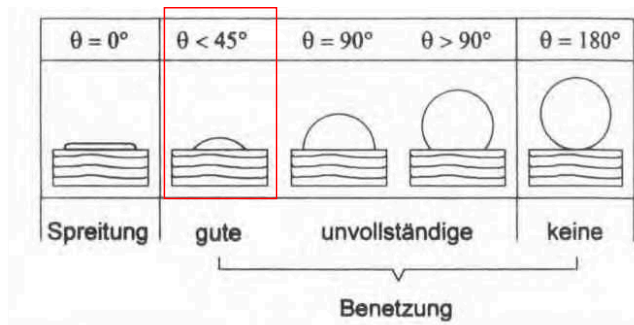


Abb. 2.17 Zusammenhang zwischen Kontaktwinkel und Benetzung der Oberfläche

Die Holzoberfläche hat einen großen Einfluss auf die Qualität der Verklebung. Die Oberfläche sollte vor der Verklebung gehobelt (besser als geschliffen) werden. Das Alter der Oberfläche hat einen großen Einfluss auf die freie Oberflächenenergie. Nachdem sich die Holzoberfläche durch äußere Einflüsse (Alterung, Sauerstoff, Energie, Wasser) aber auch durch den Transport von Kernstoffen an die Oberfläche ständig verändert, sollte die vorbehandelte Oberfläche so rasch wie möglich (optimal wäre innerhalb eines Tages) verklebt werden.

Zusammenfassend können drei wichtige Bedingungen für eine funktionierende Haftung der Füge­teile angeführt werden (aus [35]):

- A vollständige Benetzung der Oberfläche
- B inniger Kontakt zwischen Klebstoff und Holz
- C spannungsfreie Aushärtung

2.3.2.3 Herstellen von Verklebungen

In [32] werden folgende Verfahrensschritte im Zuge des Herstellens einer Verklebung unterschieden.

- Verfahren, die der Ausbildung der Adhäsionskräfte dienen
- Verfahren, die die Kohäsionsfestigkeit der Klebschicht bestimmen

Abb. 2.18 zeigt schematisch die Herstellung einer Verklebung

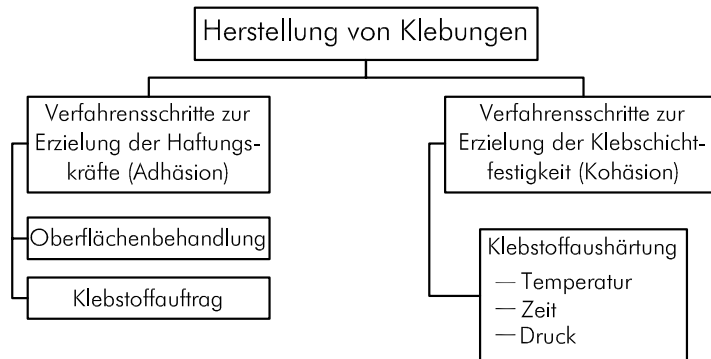


Abb. 2.18 Herstellung von Verklebungen (aus [32])

Für das Herstellen einer Holzverklebung sind das im speziellen folgende Arbeitsschritte:

- klimatisieren des Holzes zur Einhaltung der vom Klebstoffhersteller angegebenen Holzfeuchte (falls erforderlich)
- vorbehandeln der Oberfläche durch hobeln
- säubern der Oberfläche mit Druckluft
- rasches Verkleben der Oberfläche nach Vorbehandlung
- vorbereiten des Klebstoffs (falls erforderlich)
- Applikation des Klebstoffs (Spachtel, Walze, Spritzen, etc.)
- einhalten der richtigen Klebstoffauftragsmenge
- fixieren der Füge-teile
- garantieren der erforderliche Press- und Aushärtezeiten (Herstellen einer dünnen Klebefuge, falls notwendig mit Pressdruck)
- einhalten der klimatischen Bedingungen bei Verklebung und Aushärtung

2.3.3 Anforderungen an Holzklebstoffe [35]

Grundsätzlich werden die Anforderungen an Klebstoffe in den Normen EN 302 (für Aminoplast und Phenoplastklebstoffen) und in der EN 15425 (für einkomponentige Polyurethane) geregelt. Die folgende Zusammenstellung fasst allgemein technische Anforderungen für Holzklebstoffe zusammen [35]:

Festigkeit	gute Adhäsionseigenschaften; höhere Eigenfestigkeit (Kohäsion) des Klebstoffes als die Eigenfestigkeit des Holzes
------------	---

Tab. 2.10 Technische Anforderungen an Holzklebstoffe [35]

definierte Wasserbeständigkeit	in Abhängigkeit von Typ und Einsatzgebiet: - beständig gegen kaltes Wasser bis 20°C - beständig gegen warmes Wasser bis 70° - beständig gegen kochendes Wasser - nicht wasserbeständig
definierte Beständigkeit gegen Luftfeuchte	kein Quellen hydrophiler Bestandteile des Klebstoffs durch Luftfeuchte
Temperaturbeständigkeit	definiertes Verhalten bei höheren Temperaturen
biologische Beständigkeit	Beständigkeit gegen Schädlingen und Mikroorganismen
Dauerhaftigkeit	definiertes Verhalten bei Einwirkung von Luftsauerstoff, UV Strahlung, Wasser
neutrales Verhalten gegenüber Holz	keine Veränderung der Holzfarbe, keine Zerstörung der Holzsubstanz
Umweltverträglichkeit	keine schädlichen Emissionen bei Herstellung, Applikation, Gebrauch und Entsorgung

Tab. 2.10 Technische Anforderungen an Holzklebstoffe [35]

Nach EN 302 werden zwei verschiedene Klebstofftypen zur Herstellung tragender Holzverbindungen definiert. Für beide gilt die Vorgabe eine dauerhafte verklebte Verbindung über die erwartete Lebensdauer des Bauwerks herzustellen.

Klebstofftyp I darf für alle drei nach EN1995-1-1 definierten Nutzungsklassen verwendet werden. Klebstofftyp II darf nur in Bauwerken mit Nutzungsklasse 1 und 2 verwendet werden. (Temperaturbeanspruchung unter 50°C)

Die Klassifizierung des Klebstoffproduktes wird in der jeweiligen Produktzulassung angegeben.

Prüfnormen für Klebstoffe für den Einsatz in tragenden Bauteilen sind EN 302 Teil 1 bis 7 für Aminoplast- und Phenoplastklebstoffe und EN 15416 Teil 2 bis 5 für einkomponentige Polyurethanklebstoffe.

Weiters gibt es noch Normen zur Qualitätskontrolle geklebter Produkte. Eine Zusammenstellung findet sich im Skriptum für Klebetechnologie der TU-Graz [35].

2.3.4 Polyurethanklebstoffe

Eine übliche Einteilung der Klebstoffe im Holzbau wird nach der Aushärtungsart vorgenommen.

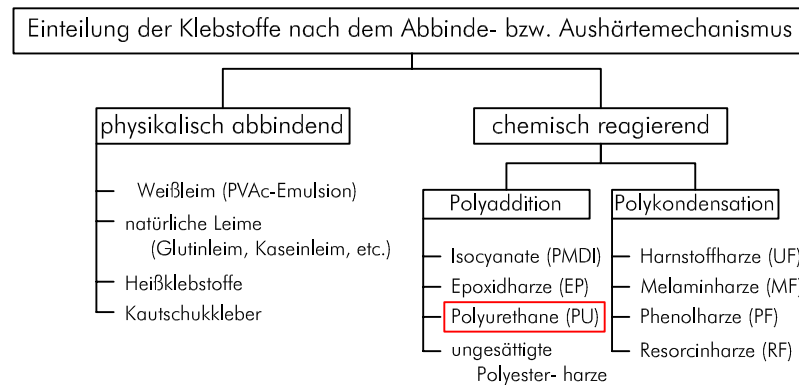


Abb. 2.19 Einteilung von Klebstoffen nach dem Aushärtemechanismus (nach [36])

Die im Projekt verwendeten Polyurethanklebstoffe sind chemisch reagierend. Sie werden in der Literatur den Reaktionsklebstoffen zugeordnet. Eine weitere Unterteilung erfolgt in zweikomponentige (2K) und einkomponentige (1K) Reaktionsklebstoffe. Diese unterscheiden sich in der Art der Aushärtung.

2.3.4.1 Aushärtung von PU-Klebstoffen

[32]

Polyurethanklebstoffe (auch PU- oder PUR-Klebstoffe genannt) härten nach dem Mechanismus der Polyaddition aus. Die Isocyanatgruppe des Klebstoffs, ist eine reaktionsfähige Gruppe an den Molekülen der Harzkomponente A. Diese Isocyanat-Gruppe reagiert mit Verbindungen in denen eine reaktive Hydroxid-Gruppe vorhanden ist. Diese für die Isocyanatvernetzung notwendigen Verbindungen tragen die Bezeichnung Polyole. Polyole sind bei den 2K-PUR-Klebstoffen die Härterkomponente B.

Die Molekulanordnung welche sich durch die chemische Reaktion von A und B bildet wird als Urethan-Gruppe bezeichnet. Besteht ein Polymermolekül aus mehreren dieser Gruppierungen, entstehen Makromoleküle welche als Polyurethane bekannt sind. Sie stellen nach der abgeschlossenen Härtingsreaktion die Klebschicht dar.

Aufgrund verschiedenartiger Ausgangsverbindungen, an denen die reaktiven Isocyanat und Hydroxid-Gruppen chemisch gebunden sind, existieren unterschiedliche Ausbildungen von Polyurethanklebstoffen.

Polyurethanklebstoffe, zweikomponentig (lösungsmittelfrei)

Klebstoffe, die zur Härtung mit einer zweiten Komponente gemischt werden, werden als 2K-Klebstoffe bezeichnet (häufig wird Komponente A als Harz bezeichnet, und Komponente B als Härter).

„Bei diesen Klebstoffsystemen besteht die Komponente A aus einem niedermolekularen Polyisocyanat die Komponente B aus einem niedermolekularen Polyol.

Da diese Komponenten nur aus relativ kleinen Molekülen bestehen, ist die Viskosität ge-

ring, sodass sie sich in dem jeweils vorgeschriebenen Verhältnis durch Rühren leicht mischen lassen. Die Härtingsreaktion läuft normalerweise bei Raumtemperatur ab.“

Quelle: Habenicht G., Kleben-erfolgreich und fehlerfrei

Durch das Mengenverhältnis der beiden Komponenten kann die Eigenschaft der Klebefuge beeinflusst werden (elastisch oder spröde, schnellere oder langsamere Aushärtung). Weiters kann die Viskosität durch Beigabe von Füllstoffen verändert werden.

Polyurethanklebstoffe, einkomponentig (lösungsmittelfrei)

Klebstoffe die ohne Zumischung einer zweiten Komponente aushärten werden als 1K-Klebstoff bezeichnet. Diese 1K-Klebstoffe härten durch den chemischen Zustand der Fügeiteiloberfläche aus. Im speziellen Fall reagiert der 1K-Klebstoff mit den im Holz vorhandenen Wassermolekülen.

„Der Hauptbestandteil dieser Klebstoffe besteht aus vorvernetzten, höhermolekularen Polyurethanen. Diese Prepolymere liegen in flüssiger oder pastöser Form vor und besitzen noch freie Isocyanatgruppen (sog. Polyisocyanat-Polyurethan). Mit diesen Isocyanatgruppen vermag die im Wasser vorhandene $-O-H$ Gruppe zu reagieren. Somit dienen Wassermoleküle als 2. Komponente für die endgültige Vernetzung. Sie sind als Reaktionspartner vorhanden:

- in Form der relativen Luftfeuchtigkeit.
- adsorbiert an den Fügeiteiloberflächen oder
- absorbiert in den Fügeiteilen (z. B. bei Holz, Leder, Pappe, Papier, Kunststoffschäumen, Mauerwerk).“

Quelle: Habenicht G., Kleben-erfolgreich und fehlerfrei

Abb. 2.20 zeigt die möglichen Feuchtigkeitsquellen.

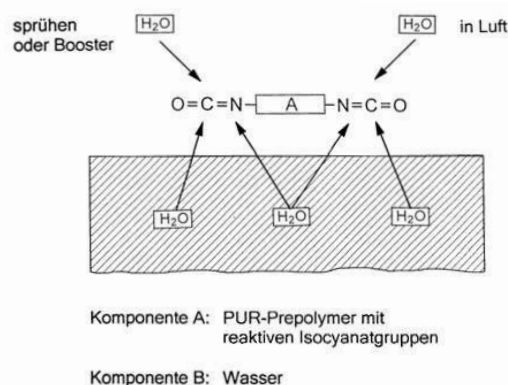


Abb. 2.20 Feuchtigkeitshärtung von 1 K-Polyurethanklebstoffen (aus [32])

Nachdem 1K-Polyurethanklebstoffe durch die Reaktion mit Wasser erhärten werden sie auch als feuchtigkeitshärtende 1K-Polyurethanklebstoffe bezeichnet.

Für das Verkleben von Holz mit 1K-PU-Klebern muss somit eine Mindestholzfeuchte laut Datenblatt des verwendeten Klebers eingehalten werden, oder es muss die Oberfläche mit Wasser besprüht werden. Dies sollte jedoch sehr vorsichtig passieren, da sich zu viel Wasser negativ auf die Qualität der Verklebung auswirken kann.

2.3.4.2 Anwendung von PU-Klebstoffen

Zur Anwendung kommen PU-Klebstoffe häufig in Brettschichtholz- und Brettsperrholzprodukten. Die 1K-PU-Kleber werden aber auch zur Herstellung von Schraubpressverklebungen (z.B.: Rippendecken aus BSP mit BSH Rippen) verwendet. 2K-PU-Kleber werden für Baustellenverklebungen, Sanierungen oder zum Einkleben von Gewindestangen verwendet.

2.3.4.3 Vor- und Nachteile der verwendeten PU-Klebstoffe

Die Vor- und Nachteile der Klebesysteme gelten allgemein, Angaben von Fugenstärken sind jedoch aus der jeweiligen Produktzulassung zu entnehmen.

Für das Projekt wurden, wie eingangs erwähnt, Produkte der Firma Purbond verwendet.

Zum Einsatz kamen dabei die 1K-PU-Kleber der HBS Serie (HB-S309, HB-S609, HB-S709). Diese Kleber unterscheiden sich im Wesentlichen nur in der offenen Zeit und in der Presszeit.

Als 2K-PU-Kleber wurde das Produkt CR-421 der Firma Purbond verwendet.

Vorteile von PU Klebstoffen im Allgemeinen:

- beständig gegen Feuchtigkeit
- Pressdruck bei Einhaltung der Fugenstärke lt. Zulassung nicht unbedingt erforderlich
- für den Innen und Aussenbereich geeignet
- keine Formaldehydemmission
- Lösungsmittelfrei
- keine Schrumpfung bei Härtung
- geringes Kriechen bei höherer Temperatur
- schwer entflammbar

Spezielle Vorteile der 1K-Klebesysteme

- einfach zu verarbeiten
- 1K-PU-Kleber schäumen auf, daher bedingt fugenfüllend
- Produkte mit variablen Verarbeitungs- (offene Zeit), Press- und Aushärtezeiten erhältlich

- günstiger Preis
- geringer Flächenauftrag
- farblose bis milchig-weiße Klebefuge (Ästhetik)
- zugelassen als Klebstofftyp I (Nutzungsklasse 1 bis 3 möglich)

Spezielle Vorteile der 2K-Klebesysteme

- gute Haftung auf fast allen Werkstoffen
- dicke Fugen bis 3,0 mm möglich; daher größere Toleranzen in der Fertigung möglich; auch für Montageverklebungen und Sanierungen geeignet

Nachteile von PU-Klebstoffen im Allgemeinen:

- Dermatosen bei Hautkontakt
- gesundheitsschädlich während der Verarbeitung (siehe Sicherheitsdatenblatt)
- austretende Dämpfe müssen abgeführt werden
- haftet auch auf metallischen Verarbeitungswerkzeugen, deshalb empfiehlt sich die Verwendung von Trennmitteln

Spezielle Nachteile der 1K-Klebesysteme

- schäumt ungehindert sehr stark auf, erhärtete Kleberreste sind schwer zu entfernen und unästhetisch
- Klebefugenstärke bis maximal 0,3 mm möglich (für Flächenverklebungen)

Spezielle Nachteile der 2K-Klebesysteme

- aufgrund der flüssigen Konsistenz schwierig zu verarbeiten (Abdichten der Fugen ist erforderlich)
- hoher Preis

2.3.5 Materialkennwerte der verwendeten PU-Klebstoffe

Die folgenden Informationen wurden aus den Technischen Datenblätter der Klebstoffe entnommen [48] [49] [50].

Purbond HB-S309 und HB-S709:

[48],[49]

Purbond HB-S309 und HB-S709 sind flüssige Einkomponenten-Polyurethanklebstoffe. Die Klebstoffe härten unter Einfluss von Material- und Luftfeuchte zu einem harten, unspröden Film aus. Ein leichtes Aufschäumen der Klebstoffe während der Härtung ist durch die chemische Reaktion bedingt und normal. Purbond HB-S309 und HB-S709 sind ohne Zusatz von Lösungsmitteln und Formaldehyd hergestellt.

Purbond HB-S309 und HB-S709 sind als Typ-1 Klebstoff klassifiziert und gemäß Z-9.1-

765 des DIBT zugelassen und registriert.

Der Klebstoffauftrag erfolgt maschinell oder von Hand (z.B.: Spachtel). Die erforderliche Klebstoffmenge wird bei Flächenverklebungen bei maschinellem Auftrag mit maximal 180g/m² angegeben. Für dieses Projekt wurde eine Auftragsmenge von ca.250 g/m² vom Hersteller empfohlen, der tatsächliche Verbrauch war jedoch durch Verluste beim Verkleben noch höher (siehe Anhang B, Abschnitt B.4).

Purbond CR-421:

[50]

Das Gießharz Purbond CR-421 basiert auf der Zweikomponenten-Polyurethantechnologie und wird ohne Zusatz von Lösungsmitteln und Formaldehyd hergestellt.

Purbond CR-421 ist als Typ-1 Klebstoff klassifiziert und gemäß Z-9.1-707 des DIBT zugelassen und registriert.

Der Klebstoffauftrag erfolgt maschinell oder mit einer von Purbond empfohlenen Applikationspistole mit Mischer, der die beiden Komponenten zu einem homogenen Gießharz vermischt (Die ersten 10g des Gemischs müssen entsorgt werden).



Abb. 2.21 Gebinde und Handauftragsgerät mit Statikmischrohr für Purbond CR-421-Gießharz

Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe

Nachfolgend ist eine Tabelle mit wichtigen Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe zusammengestellt.

Produktdaten	HB-S309	HB-S709	CR-421
Basis	Isocyanatprepolymer	Isocyanatprepolymer	Polyurethan
Konsistenz	gut fließend	gut fließend	gut fließend
Viskosität	24 000 MPa.s	24 000 MPa.s	9000 MPa.s (Gemisch)

Tab. 2.11 Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe (Quelle: FA. Purbond, Technische Datenblätter)

Produktdaten	HB-S309	HB-S709	CR-421
Dichte	1160 kg/m ³	1160 kg/m ³	1350 kg/m ³
Feuergefährlichkeit	schwer entflammbar	schwer entflammbar	schwer entflammbar
Beständigkeit	gegen schwache Alkalien, Säuren und Lösungsmittel	gegen schwache Alkalien, Säuren und Lösungsmittel	gegen schwache Alkalien, Säuren und Lösungsmittel
Holzfeuchte	min. 8%; max. 15% Unterschied der Füge­teile max. 4%	min. 8%; max. 15% Unterschied der Füge­teile max. 4%	max. 15%
Klebstoffauftrag	140-180 g/m ²	140-180 g/m ²	nach Fugenstärke
Klebefugendicke	min. 0,1 mm; max. 0,3 mm	min. 0,1 mm; max. 0,3 mm	max. 2,5 - 3,0 mm
Verarbeitungstemperatur	min. 18° für Klebstoff und Holz	min. 18° für Klebstoff und Holz	min. 15°; max. 30° für beide Teile
Wartezeit	30 Minuten	70 Minuten	je 10 Minuten Topf und Gelzeit
Presszeit Abbindezeit	75 Minuten bei passgenauer Fuge sonst 90 Min.	175 Minuten bei passgenauer Fuge sonst 200 Min.	120 Minuten
Pressdruck	k. A. in der Zulassung empfohlen 0,6-1,0 N/mm ²	k. A. in der Zulassung empfohlen 0,6-1,0 N/mm ²	nicht erforderlich
Weiterverarbeitung	nach abgelaufener Presszeit	nach abgelaufener Presszeit	mind. 2h
Nachlagerzeit	mind. 4 Stunden bei 20°	mind. 10 Stunden bei 20°	siehe Abb. 2.8
Sicherheit	Datenblatt beachten	Datenblatt beachten	Datenblatt beachten

Tab. 2.11 Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe (Quelle: FA. Purbond, Technische Datenblätter)

Wichtig ist noch die Aushärtecharakteristik des Purbond CR-421-Klebstoffs. Die Kurve bezieht sich auf eine Umgebungstemperatur von 20°. Diese sollte auch für eine spannungsfreie Aushärtung eingehalten werden.

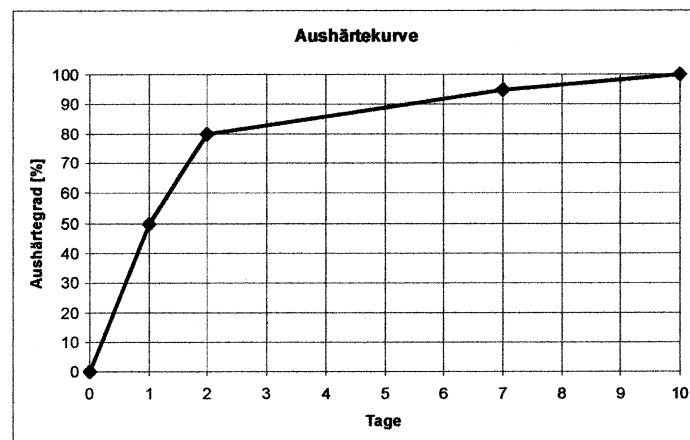


Abb. 2.22 Aushärtecharakteristik des Purbond CR-421-Gießharzes [50]

Weitere Informationen zu den Klebstoffen sind in den Technischen Datenblättern ([48], [49], [50]) der Klebstoffe oder auf der Homepage der Firma Purbond [59] nachzulesen.

Verbindung

3.1 Allgemeines

Holz wurde seit jeher als natürlich nachwachsender Rohstoff in verschiedenster Form genutzt. Sehr früh erkannte man die Leistungsfähigkeit des Materials als Baustoff, und erlernte dabei den Umgang mit den seinen besonderen physikalischen Eigenschaften. Den inhomogenen und anisotropen Eigenschaften wurde besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Durch eine gezielte Auswahl und Sortierung des Holzes und durch geschickte materialgerechte und vorteilhafte Konstruktionen konnten ästhetische und dauerhafte Tragstrukturen errichtet werden.

Aufgrund der anisotropen Eigenschaften des Holzes war oftmals das Verbindungsmittel bzw. die Ausbildung der Knoten der „Knackpunkt“ der Struktur beziehungsweise limitierend für die Ausführung weitgespannter Tragwerke.

In der Vergangenheit kamen dabei hauptsächlich Holz-Holz-Verbindungen mit relativ massiven Querschnittsschwächungen zum Einsatz. Viele Verbindungen funktionieren dennoch sehr gut für die Übertragung von Druckkräften. Zugverbindungen waren nur schwierig und mit schlechtem Wirkungsgrad herzustellen. Für ingenieurmäßige Verbindungsmittel unter Verwendung von Stahlteilen gilt dies nicht mehr in dieser Form. Druck- und Zuganschlüsse lassen sich mit stiftförmigen Verbindungsmitteln und stabförmigen Bauteilen schnell, günstig und mit einem guten Wirkungsgrad herstellen.

Biegesteife Verbindungen sind in der Regel aufwändig zu realisieren, und werden deshalb im Holzbau oftmals im statischen Entwurf vermieden. Insbesondere bei flächenhaften Bauteilen, die eine geringe Höhe und infolge dessen einen kleinen Hebelsarm aufweisen, ist eine biegesteife Verbindung schwierig zu realisieren, und vielfach auch nicht notwendig. Für die geplante Tragstruktur ist jedoch aufgrund der Auskrugung eine biegesteife Verbindung unbedingt erforderlich. Eine Möglichkeit zur Herstellung einer sehr steifen Holzverbindung ist das Verkleben der einzelnen Bauteile.

3.2 Anforderungen an die Verbindung

Für das Forschungsprojekt ergaben sich spezielle und allgemeine Anforderungen, die an die zu entwerfende Brettsperrholzverbindung gestellt wurden. Diese sind im folgenden aufgelistet:

- Biegemomente, Querkräfte und Normalkräfte müssen von der Verbindung übertragen werden können.
Dies erfordert die freie selbsttragende Formgebung der Tragstruktur mit auskragenden Bauwerksteilen.
- Eine einfache Anpassung der Verbindung an unterschiedlichste Geometriebedingungen ist unbedingt erforderlich.
Aufgrund der Zerlegung von Freiformflächen in planare Plattenelemente gleicht praktisch kein Teil dem Anderen.
- Die Verbindung soll baupraktisch verwendbar sein, und auch auf einfache geometrische Strukturen anwendbar sein.
- Der wirtschaftliche Aspekt sollte trotz der komplexen Geometrieanforderungen nicht außer Acht gelassen werden. Nachdem starke Krümmungen im Entwurf auftreten, sind relativ kleine Plattenabmessungen und eine große Anzahl an Verbindungselementen zu erwarten.
Daher ist auch ein möglichst hoher Wirkungsgrad der Verbindung anzustreben (Verhältnis Tragmoment der Verbindung zu Tragmoment der ungeschwächten BSP-Platte).
- Die Verbindung soll es erlauben, möglichst große transportfähige Flächen der Tragstruktur werkseitig vorzubereiten, um die Montagearbeit bauseits so kurz wie möglich zu halten.
- Das Verbindungssystem soll sichtbar bleiben, aber die Ästhetik des architektonischen Entwurfs nicht zerstören (Verstärkungen, Aufdoppelungen, aus der Plattenebene stark hervortretende Verbindungsteile sind nicht erwünscht). Eine Holz - Holz Verbindung ist aus diesem Grund, falls machbar, bevorzugt. Dadurch kann eine homogene selbsttragende ornamentierte 3D-Tragstruktur erreicht werden.
- Die Verbindung sollte auch beim Rückbau des geplanten Prototypen unproblematisch zu behandeln sein, die Entsorgung keine großen Kosten verursachen.
- Die Tragstruktur soll in Brettsperrholz ausgeführt werden. Ein Berücksichtigung des speziellen orthotropen Tragverhaltens des Produktes ist notwendig.
- Spezifische Materialeigenschaften des Baustoffes Holz müssen beachtet werden. (insbesondere Eigenschaftsänderungen des Holzes aufgrund von klimatischen Veränderungen).

3.3 Verbindungsentwürfe

Zum Zeitpunkt der Ausschreibung der Masterarbeit war bereits ein Vorentwurf für eine Holz-Holz-Verbindung der BSP-Platten vorhanden. Dieser Entwurf sollte weiterentwickelt-

beziehungsweise auf seine generelle Ausführbarkeit bewertet werden (siehe Abschnitt 3.4)

Alternativ wurden auch weitere Verbindungsmöglichkeiten überlegt.

3.3.1 Stahl-Holz-Verbindung

Im Vorfeld wurden auch Verbindungsmöglichkeiten in Stahl überlegt. Zu diesem Zeitpunkt war der Entwurf des „free_climbers“ aktuell, darum wurde die Verbindung für Plattenstärken mit 150 mm ausgelegt (siehe Abschnitt 1.4). Die folgenden Abbildungen (Abb. 3.1 und Abb. 3.2) zeigen Überlegungen einer möglichen Verbindung für eine Platte mit der Stärke von 95 mm. Die Abbildungen wurden nachträglich für das Dokument erstellt und beziehen sich auf den verwendeten Plattentyp des Entwurfs „Kobra“. Diese teiltragfähige Momentenverbindung wurde auf 70% des Plattentragmomentes (ca. $34 \cdot 0,7 \text{ kNm/m} = 23,8 \text{ kNm/m}$) der Brettsperrholzplatte (95mm Stärke) ausgelegt. Positiv zu bewerten ist die einfache Montierbarkeit der Verbindung und der geringe Aufwand für den Abbund der BSP-Platten.

Limitierend für die Tragfähigkeit ist die Lasteinleitung in die Holzplatte. Aufgrund des geringen Hebelsarmes (ca. 140 mm) sind die einzuleitenden Zug- bzw Druckkräfte aus der Momentenbeanspruchung beträchtlich. Daraus ergibt sich eine sehr große Anzahl an erforderlichen Vollgewinde-Holzschrauben. Dieses Problem verschärft sich mit der Erhöhung der Plattenstärke aufgrund der erhöhten Momententragfähigkeit der Platte.

Nachteilig ist, dass der Verbindungsteil auf jeden Gehrungswinkel angepasst werden muss, somit gibt es praktisch sehr wenige baugleiche Verbinder. Im Zuge einer Variantenstudie wurde angedacht die in Abb. 3.1 dargestellten Schweißverbindungen zwischen Stirnplatte und Laschen gelenkig auszuführen. Damit könnten verschiedene Gehrungswinkel mit einem Verbindungstyp abgedeckt werden.

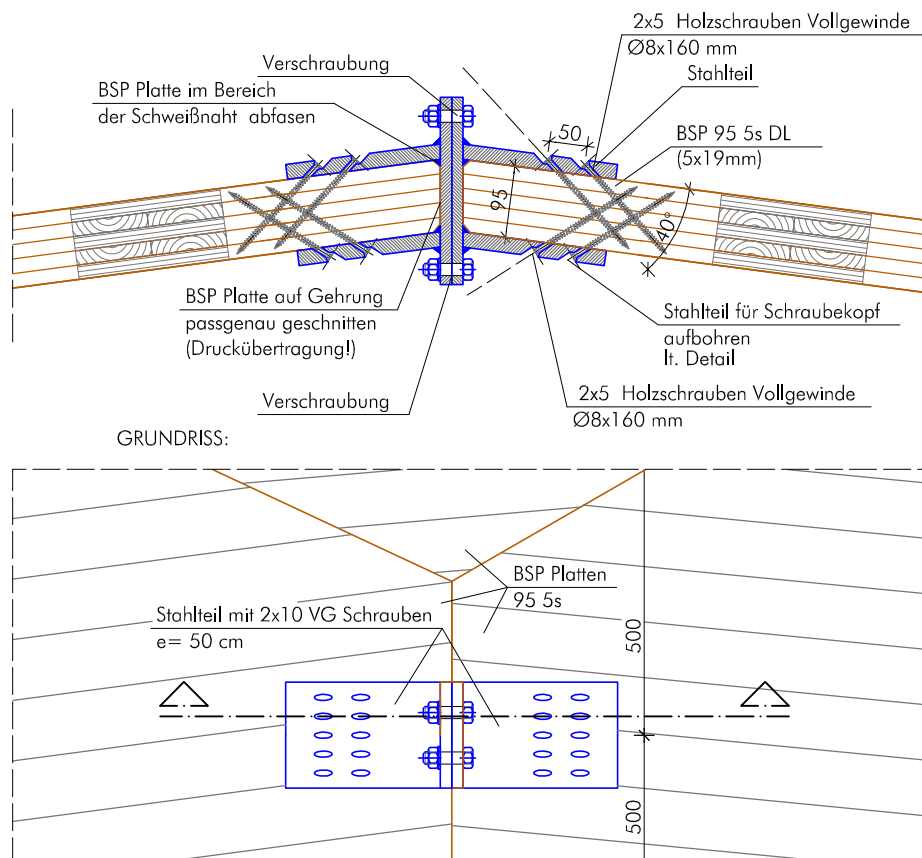


Abb. 3.1 Übersicht Stahlverbindung

Relativ aufwändig in der Fertigung ist jedoch der Lastübertragungspunkt zwischen Holzschraube und Stahlplatte. Zu dieser Variante konnte keine Alternative gefunden werden.

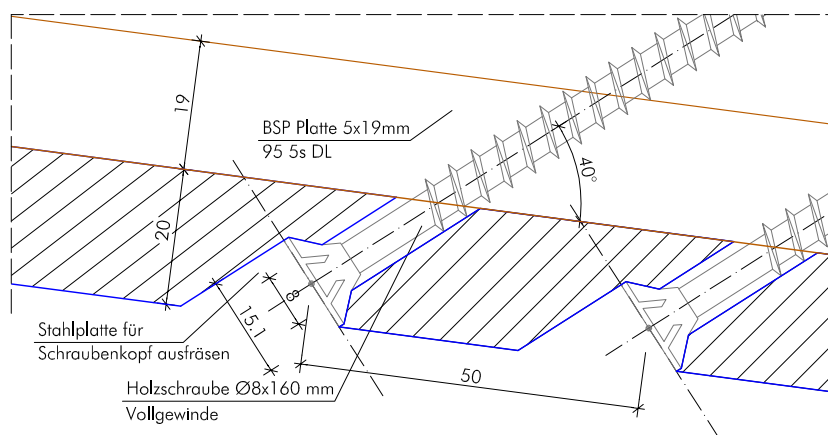


Abb. 3.2 Detail Holzschraube

Die Verbindungsentwürfe in Stahl wurden nicht ausgeführt.

3.3.2 Holz-Holz Verbindungen

Die Holz-Holz-Verbindung wurde an der holz.bau forschungs gmbh entworfen (Meisel). Die Idee ist eine Weiterentwicklung des Prinzips der aus dem Tischlerhandwerk bekannten Verbindung mit einer fremden Feder.

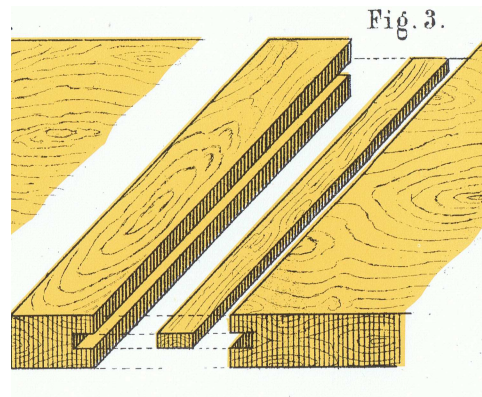


Abb. 3.3 Holzverbindung mit fremder Feder, (Quelle: Die Schule des Tischlers; Schröder, Ch./1885)

Adaptiert wurde das Prinzip der Klebeverbindung auf die vorliegende Problemstellung einer biegesteifen Verbindung von Brettsperrholzplatten.

Ein Vorteil des aktuellen Verbindungsentwurfs liegt in der Möglichkeit mit einer Art des Verbinders verschiedene Gehrungswinkel ohne großen Aufwand verbinden zu können. Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit die Anzahl der Verbinder sehr einfach an die vorhandene Belastung anzupassen. Die folgenden Abbildungen zeigen den grundsätzlichen Ablauf der Herstellung, und die fertig verklebte Verbindung.

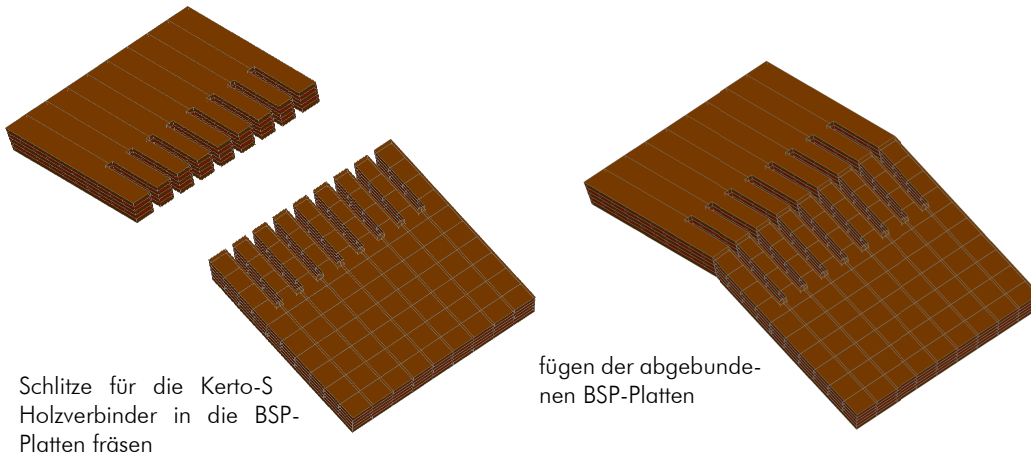


Abb. 3.4 Herstellung der Verbindung: Abbund und Fügen der Einzelplatten

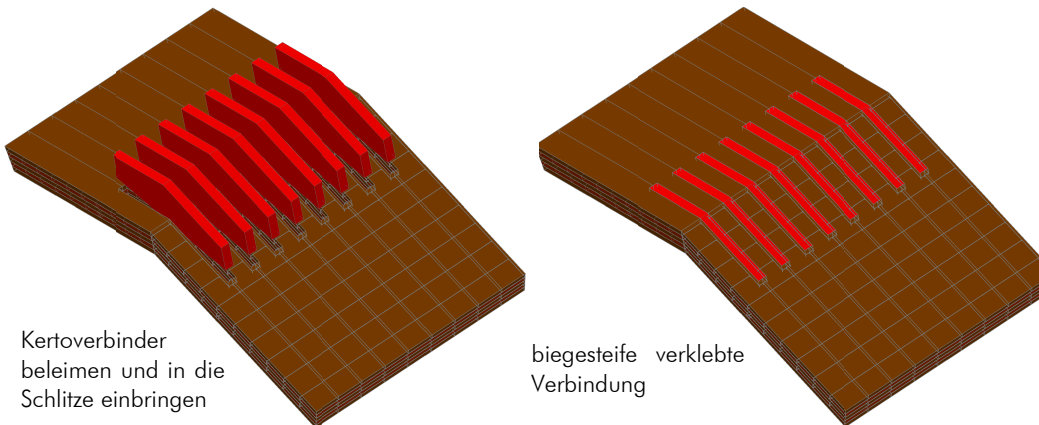


Abb. 3.5 Herstellung der Verbindung: Verkleben der Einzelplatten mit Kerto-S Holzverbindern

Unterseite der Verbindung:
Überstand der Verbinder statisch
erforderlich

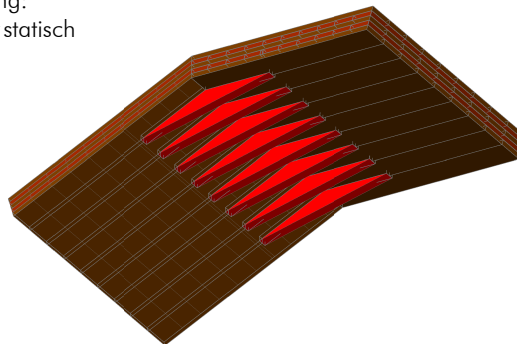


Abb. 3.6 Untersicht der fertigen Verbindung

Die Schlüssel bei der Ausführung der Verbindung besteht in der Herstellung einer zuverlässigen Verklebung.

Vorrangiges Ziel war es, eine tragfähige Verbindung mit parallelen Kerto-Verbindern herzustellen. Nachdem es im Normalfall, abweichend zu den Darstellungen (Abb. 3.4 bis Abb. 3.6) nicht möglich ist, einen seitlichen Pressdruck beim Verkleben der Platten aufzubringen (polygonale auf Gehrung verbundene Platten) müsste die Verklebung ohne Pressdruck funktionieren.

Anmerkung: In den Zulassungen der 1K-PU-Kleber diverser Hersteller ist nur die Einhaltung einer bestimmten Fugenstärke erforderlich, nicht die Aufbringung eines Pressdrucks.

Die erste Aufgabenstellung war es Möglichkeiten der Verklebung zu finden.

3.4 Vorversuche zur gewählten Holz-Holz-Verbindung

Die Vorversuche sollten die grundsätzliche Umsetzbarkeit der Verbindungstechnik zeigen. Diese Versuche sind als Machbarkeitsstudie zu sehen und wurden daher nicht wissenschaftlich ausgewertet.

Vorab wurden namhafte Klebstoffhersteller (Purbond, Jowat, BASF, WEVO Chemie) und Experten (Richter, K.; EMPA Dübendorf, aktuell TU München) zur Auswahl eines geeigneten Klebesystems für die Aufgabenstellung konsultiert. Zwei Klebstoffsysteme sollten dafür grundsätzlich geeignet sein.

- 1K-PU-Kleber, weil sie im Gegensatz zu MUF (Melamin-Harnstoff-Formaldehydharz) oder PRF (Phenol-Resorcin-Formaldehydharz) Klebern weniger Pressdruck erfordern, wenn die Passgenauigkeit (Fugenstärke) eingehalten wird.
- Kleber die für Sanierungen oder beim Einkleben von Gewindestangen verwendet werden. Das sind Epoxidklebstoffe oder 2K-PU-Klebesysteme. Diese Systeme brauchen keinen Pressdruck und erlauben eine größere Fugenstärke.

Im Zuge der Vorversuche wurden nur die einfacher zu verarbeitenden und kostengünstigeren 1K-PU-Kleber verwendet. Dass die Klebstoffsysteme für Sanierungen für die Aufgabenstellung funktionieren wurde angenommen.

3.4.1 Vorversuche Verklebung

Ziel dieser Versuche war es, praktisch durchführbare Verklebevarianten qualitativ zu bewerten, und geeignete Methoden der Verklebung in den Hauptversuchen weiterzuentwickeln.

Dazu wurden Probekörper aus vorhandenen 5-schichtigen Brettsperrholzwürfeln miteinander verklebt. Vorab wurden fünf Möglichkeiten der Verklebung überlegt, danach jeweils zwei Probekörper pro Variante verklebt.

Die verschiedenen Möglichkeiten werden nachfolgend dargestellt.

- Variante „Kleberaupe“

Der Klebstoff wurde auf den Verbinder aufgebracht. An der Oberkante des Schlitzes wurde eine Kleberraupe aufgetragen. Durch das Eindrücken des Verbinders in den Schlitz sollten beide Teile gleichmäßig benetzt werden. Die Verklebung erfolgt unter Einhaltung der Fugenstärke (geplant 0,25 mm) ohne Pressdruck.

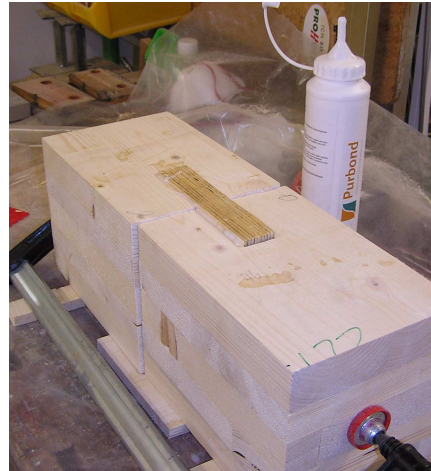
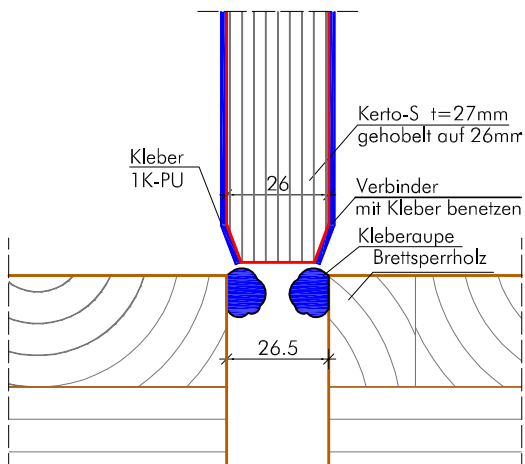


Abb. 3.7 Verklebevariante „Kleberaupe“

- Variante „Keilleiste“

Auf die Brettsperrholzplatte wurde eine Dreiecksleiste aufgeschraubt. Der Verbinder wurde in den Schlitz gesteckt. Der Kleber wurde in den so entstandenen Bereich eingegossen. Durch das Eindrücken des Verbinders in den Schlitz sollte der Verbinder gleichmäßig benetzt werden. Die Verklebung erfolgt unter Einhaltung der Fugenstärke (geplant 0,25 mm) ohne Pressdruck.

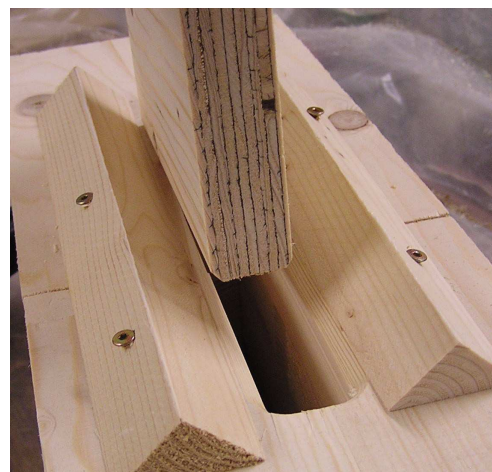
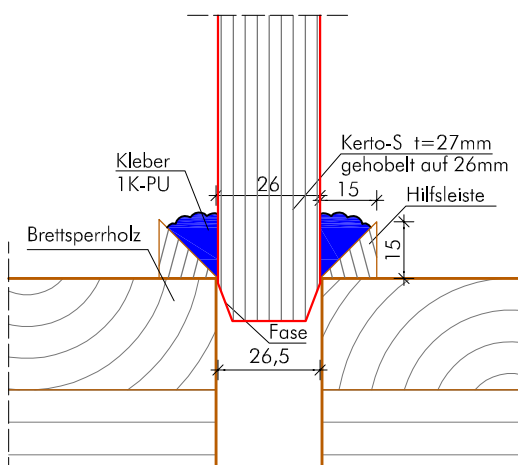


Abb. 3.8 Verklebevariante „Keilleiste“

- Variante „Verbinder aufgetrennt“

Bei dieser Variante wurde der Kertoverbinder in der Höhe in einem Winkel aufgetrennt. Die Schlitz wurden parallel gefräst. Die drei Klebeflächen wurden mit Klebstoff bestrichen. Durch die Konizität der Verbinderteile konnte bei Einbringen derselben durch gegenseitiges Verschieben ein Pressdruck aufgebaut werden.

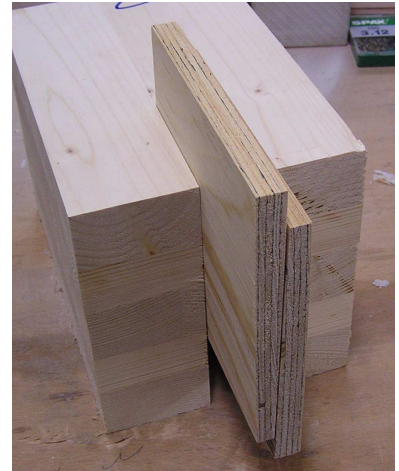
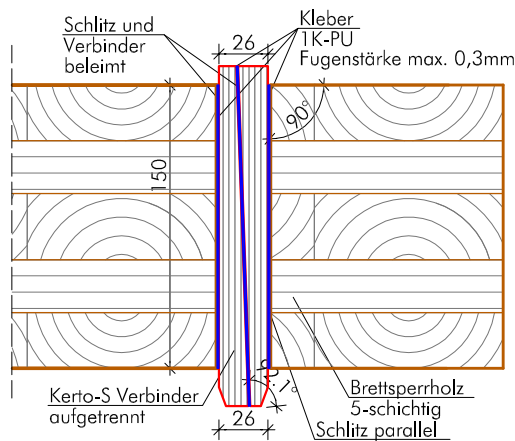


Abb. 3.9 Verklebevariante „Verbinder aufgetrennt“

- Variante „konisch“

Schlitz und Verbinder waren für diese Variante konisch gefertigt. Dabei wurde auf eine genaue Übereinstimmung der Winkel geachtet. Durch Eindrücken bzw. Einschlagen des Verbinders mit dem Gummihammer wurde der nötige Pressdruck erzeugt.

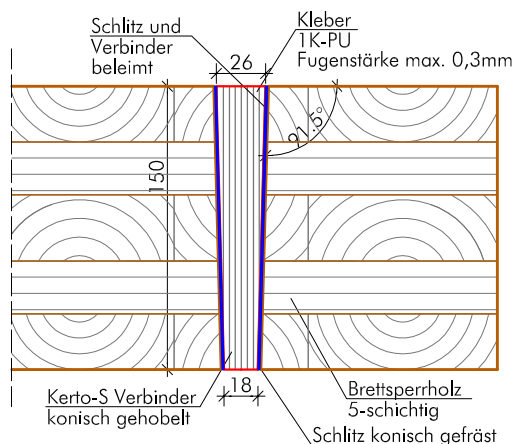


Abb. 3.10 Verklebevariante „konisch“

- Verklebevariante „profiliert“

In Anlehnung an den profilierten Buchenholzdübel wurde diese Variante mit einem profilierten Verbinder verklebt. Schlitz und Verbinder wurden passgenau gefertigt. In den durch die Profilierung entstehenden Hohlräumen sollte der Kleber eingeschlossen werden. Die dadurch verhinderte Ausdehnung des Klebers bewirkt einen Pressdruck im Hohlraum. Die Profiltiefe wurde aus fertigungstechnischen Gründen mit 0,5 mm gewählt. Eine größere Genauigkeit konnte bei der Herstellung mit der Tischfräse von Hand nicht erreicht werden.

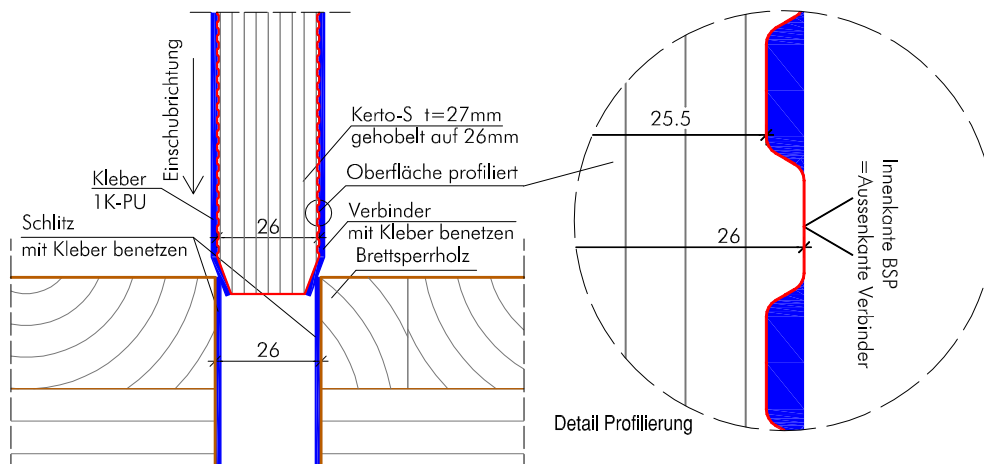


Abb. 3.11 Verklebevariante „profiliert“

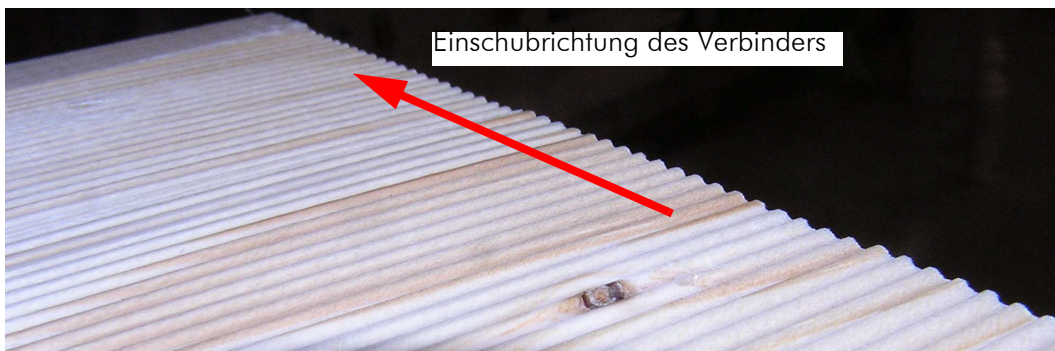


Abb. 3.12 profilierte Oberfläche des Verbinders

3.4.1.1 Schlussfolgerung der Vorversuche-Verklebung

Die Verklebung konnte mit allen fünf Varianten durchgeführt werden. Jene Varianten die durch Konizität Pressdruck erzeugen wurden vom Verarbeiter subjektiv besser bewertet. Die Verklebevariante „Verbinder aufgetrennt“ wurde aufgrund der dritten Klebefuge (weitere Fehlerquelle) dennoch nicht weiterverfolgt.

Bemessung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Verbindungssystem (BSP-Platten mit eingeklebten Kertverbindern) ausschließlich hinsichtlich ihrer Biegefestigkeit vorbemessen und geprüft. Vorab war es jedoch notwendig die Qualität der Verklebung zu überprüfen. Dies wurde mit Zugversuchen der Randlamellen (siehe Abschnitt 5.1) realisiert.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Biegebemessung von BSP-Platten (Biegeversuche Referenzplatten), mit der Vorbemessung der Biegeversuche der Verbindungsplatten, und der Bemessung der Biegezugversuche.

In diesem Kapitel wird nur die allgemeine Vorgehensweise gezeigt. Die Bemessung mit Rechenwerten erfolgt in Kapitel 5.

4.1 Biegebemessung von Brettsperrholz

Im folgenden Abschnitt wird die Ermittlung der Biegespannung für einen BSP-Querschnitt nach den in Kapitel 2, Abschnitt 2.1.3 beschriebenen Verfahren erläutert.

4.1.1 Berechnung der Biegespannung für BSP nach dem modifizierten γ -Verfahren (Produktzulassung)

gam

Vorgaben zur Bemessung des jeweiligen Produktes finden sich in der zugehörigen bauaufsichtlichen Zulassung.

Für das verwendete Produkt der Firma KLH wird in der Zulassung ein Verfahren in Anlehnung an den Eurocode 5, Anhang B [2] empfohlen. Dieser Abschnitt regelt die Berechnung von nachgiebig verbundenen Biegestäben. Für die Berechnung des Verformungsverhaltens von nachgiebig verbundenen Biegestäben wird eine effektive Biegesteifigkeit des Querschnitts verwendet. Diese wirksame Biegesteifigkeit $(EI)_{ef}$ berücksichtigt die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel für aus mehreren Teilen zusammengesetzten Querschnitten. Für Brettsperrholz werden die Nachgiebigkeiten der Querlagen in eine Nachgiebigkeit der Fugen umgerechnet (modifiziertes γ -Verfahren).

Die Berechnung erfolgt für Querschnitte mit bis zu drei Schichten nach EN 1995-1-

1:2009, Anhang B.2. Diese Gleichungen sind in Abschnitt 2.1.6, Abb. 2.9 dargestellt. Die Biegespannungsberechnung erfolgt nach den Gl. [2.8] in Kapitel 2.

Diese Gleichungen sind für nachgiebig verbundene Biegestäbe mit zwei oder drei Querschnittsteilen allgemein gültig.

Für Brettsperrholz werden diese wie folgt modifiziert. Dafür werden folgende Querschnittsbezeichnungen eingeführt.

Abb. 4.1 zeigt den Plattenaufbau mit den im folgenden benutzten Bezeichnungen einer 5-schichtigen Brettsperrholzplatte.

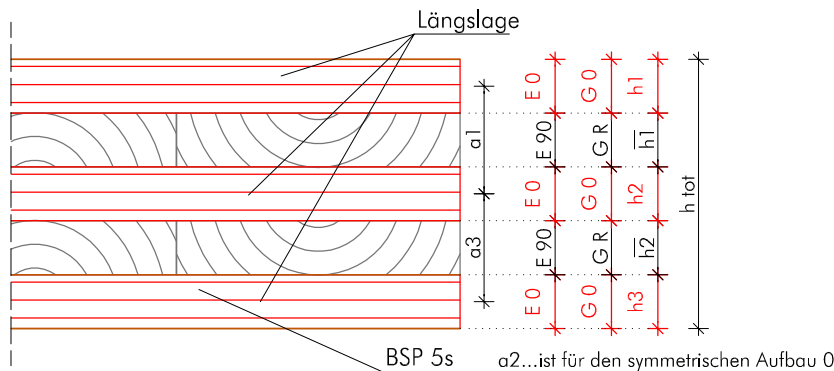


Abb. 4.1 Aufbau und Bezeichnungen einer 5-schichtigen Brettsperrholzplatte

Die Querlage wird mit \bar{h}_i bezeichnet. Die zugehörigen Steifigkeiten der jeweiligen Brettlagen sind aus Abb. 4.1 ersichtlich.

Für die Berechnung des Trägheitsmomentes I_{eff} in Anlehnung an EC 5, Anhang B ergibt sich für Brettsperrholz folgender Formalismus.

$$I_{eff} = \sum_{i=1}^3 (I_i + \gamma_i A_i a_i^2) \quad [4.1]$$

mit:

$$A_i = b_i h_i \quad I_i = \frac{b_i h_i^3}{12}$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_0 A_1 \bar{h}_1}{G_R b l^2}} \quad \gamma_2 = 1 \quad \gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_0 A_3 \bar{h}_2}{G_R b l^2}}$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 A_1 \left(\frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} \right) - \gamma_3 A_3 \left(\frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2} \right)}{\sum_{i=1}^3 \gamma_i A_i}$$

$$a_1 = \left(\frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} \right) - a_2 \quad a_3 = \left(\frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2} \right) + a_2$$

Die Berechnung der Biegerandspannung für den Biegespannungsnachweis erfolgt mit:

$$\sigma_{m,r,i,d} = \pm \frac{M_d}{I_{eff}} \left(\gamma_i \cdot a_i + \frac{h_i}{2} \right) \leq f_{m,d} \quad [4.2]$$

In Gl. [4.1] und Gl. [4.2] sind einzusetzen:

h_{tot}	Elementdicke gesamt [mm]
h_i	Dicke der einzelnen Lagen parallel zur Richtung der Lastabtragung [mm]
\bar{h}_i	Dicke der einzelnen Lagen rechtwinklig zur Richtung der Lastabtragung [mm]
b	Elementbreite, im Allgemeinen 1 m breiter Plattenstreifen
n	Anzahl der Lagen
l	Spannweite [mm]
I_{ef}	wirksames Flächenträgheitsmoment [mm ⁴]
G_R	Rollschubmodul [N/mm ²]
E_0	E-Modul parallel zur Faserrichtung der Bretter (Mittelwert) [N/mm ²]
$f_{m,d}$	Bemessungswert der Biegefestigkeit lt. Produktzulassung (siehe Kap.2, Abschnitt 2.1.8, Tab. 2.6)

Abweichend von Gl. [4.2] ist in der Produktzulassung der Firma KLH (ETA-06/0138) [20] folgende Vorgehensweise zur Spannungsermittlung erlaubt.

Berechnung des wirksamen Widerstandsmomentes W_{eff} :

$$W_{\text{eff}} = \frac{2 \times I_{\text{eff}}}{h_{\text{tot}}} \quad \text{mit} \quad h_{\text{tot}} = \sum_i (h_i + \bar{h}_i) \quad [4.3]$$

Berechnung der Biegerandspannung $\sigma_{m,r,i,d}$:

$$\sigma_{m,r,i,d} = \frac{M_d}{W_{\text{eff}}} \quad [4.4]$$

mit:

M_d Bemessungswert des Biegemomentes

W_{eff} nach Gl. [4.3]

Der Nachweis der Biegerandspannung erfolgt mit:

$$\sigma_{m,r,i,d} \leq f_{m,d} \quad [4.5]$$

mit

$f_{m,d}$ Bemessungswert der Biegefestigkeit lt. Produktzulassung

(siehe Abschnitt 2.1.8, Tab. 2.6)

Anmerkung: Vergleicht man Gl. [4.2] mit Gl. [4.4] fällt auf, dass bei der Spannungsermittlung nach Produktzulassung (Gl. [4.4]) die Nachgiebigkeit der Fuge (Faktor γ_i) unberücksichtigt bleibt. Somit liefert die Ermittlung der Biegespannung nach Gl. [4.4] höhere Werte als nach Gl. [4.2].

4.1.2 Berechnung der Biegespannung für BSP auf Basis des Schubnachgiebigen Trägers nach Timoschenko

tim

Für die Ermittlung der Randspannung muss die Biegesteifigkeit EI_{clt} oder K_{clt} der Platte berechnet werden. Abb. 4.2 zeigt die Bezeichnungen für einen 5-schichtigen Querschnitt lt. BSP-Handbuch.

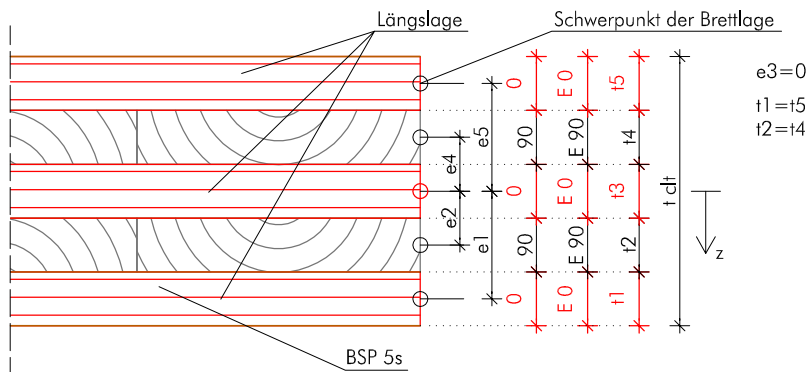


Abb. 4.2 Bezeichnungen für den 5-schichtigen Aufbau lt. BSP-Handbuch

Die Biegesteifigkeit der Platte ermittelt sich unter Berücksichtigung der Materialparameter der einzelnen Brettlagen (E0 und E90, siehe Kapitel 2, Tab. 2.1) sich lt. BSP-Handbuch wie folgt:

$$EI_{clt} = K_{clt} = \Sigma(I_i \cdot E_i) + \Sigma(A_i \cdot e_i^2 \cdot E_i) \quad [4.6]$$

mit:

- K_{clt} Biegesteifigkeit des geschichteten Querschnitts [Nmm²]
- J_i Eigenträgheitsmoment der Einzelschicht [mm⁴]
- E_i E_{mean} -Modul der Einzelschicht [N/mm²]
- A_i Querschnittfläche der Einzelschichte [mm²]
- e_i Abstand zwischen Teilflächen und Gesamtschwerpunkt [mm]
- z Dickenkoordinate bezogen auf den Schwerpunkt des Querschnitts

Berechnung der Biegenormalspannung:

$$\sigma_{(z),d} = \frac{M_d}{K_{clt}} \times z \times E(z) \quad \text{mit} \quad z \in \mathbb{R} \mid -\frac{t_{clt}}{2} \leq z \leq \frac{t_{clt}}{2} \quad [4.7]$$

Der Nachweis der Biegerandspannung erfolgt mit:

$$\sigma_{(z),d} \leq f_{m,d} \quad [4.8]$$

mit:

$f_{m,d}$ Bemessungswert der Biegefestigkeit lt. BSP-Handbuch (siehe Kap.2, Abschnitt 2.1.8, Tab. 2.7)

Die Ermittlung der Schubspannung ist in Kapitel 2, Gl. [2.7] dargestellt, den Verlauf der Schub- und Biegespannungen im BSP-Querschnitt zeigt Abb. 2.7 in Kapitel 2.

4.2 Ingenieurmäßige Vorbemessung der Verbindung auf Biegung

4.2.1 Ingenieurmäßiges Modell

Im ingenieurmäßigen Modell wird die verklebte Verbindung als biegesteif angesehen. Die Biegetragfähigkeit der Verbindung wird jedenfalls geringer sein als das Plattentragmoment des Bruttoquerschnitts. Folgende Nachweise werden geführt:

Nachweis A **Biegetragfähigkeit der BSP-Platte im Nettoquerschnitt**

Nachweis B **Biegetragfähigkeit der Kertoverbinder**

Nachweis C **Schubkraftübertragung in der Randlamelle**

Um die Überlegungen zum Tragverhalten der Verbindung zu erörtern, werden die in der folgenden Abbildung dargestellten Schnitte genauer betrachtet.

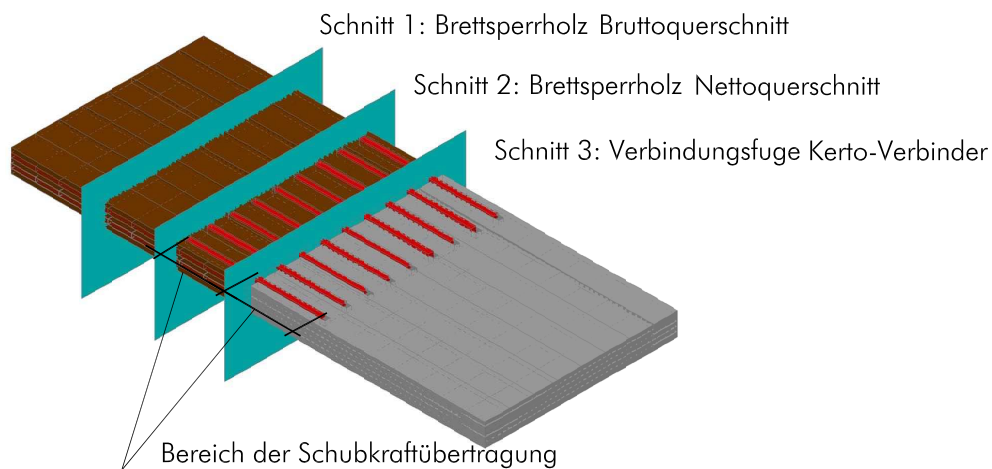


Abb. 4.3 Systemische Darstellung der Brettsperrholzplatte mit eingeklebten Kerto-Verbindern

Betrachtet man den Spannungsverlauf der BSP-Platte unter reiner Biegebelastung (Schnitt 1, Abb. 4.3) so erhält man folgende Verteilung:

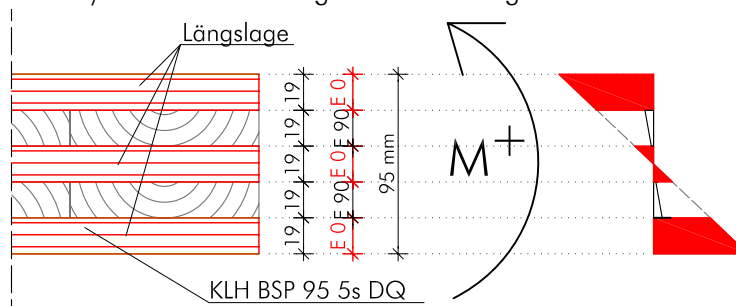


Abb. 4.4 Qualitativer Spannungsverlauf einer BSP-Platte unter Biegebelastung

Aus Abb. 4.4 wird ersichtlich, dass der Hauptteil der Biegemomentenbeanspruchung durch die Randlamellen der Platte übertragen wird. Diese Tatsache ergibt sich aus der geringeren Biegesteifigkeit der Querlage ($E_{90} = 370 \text{ N/mm}^2$) im Gegensatz zur Längslage ($E_0 = 12000 \text{ N/mm}^2$). Vereinfachend kann somit die Biegebeanspruchung als Kräftepaar auf die Randlamellen wirkend gedacht werden (Abb. 4.5).

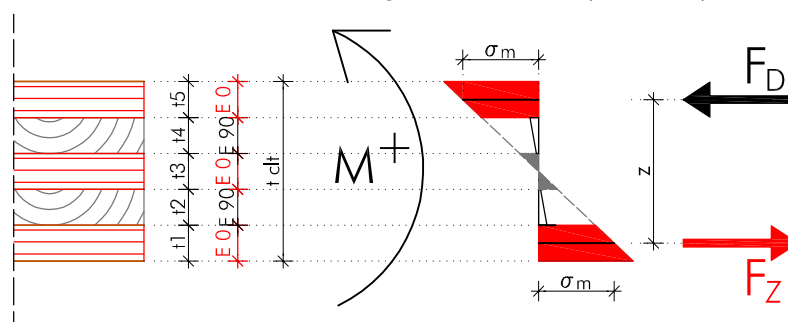


Abb. 4.5 BSP unter Biegebeanspruchung- Beanspruchung der Randlamelle

Die Kräfte F_Z und F_D in den Randlamellen müssen auch im Nettoquerschnitt (Schnitt 2, Abb. 4.3) der Verbindung übertragen werden. Die Querschnittsschwächung bewirkt eine Erhöhung der Biegespannung.

In weiterer Folge werden die Kräfte über die Verklebung (Schubbeanspruchung) in die Kertverbinder eingeleitet. Hierbei muss davon ausgegangen werden, dass im Lasteinleitungsbereich Spannungsspitzen vorhanden sind (Schubspannungsverteilung einer Klebefuge lt. [35]). Der Qualität der Randlamellen und ihrer Verklebung muss daher besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Schlussendlich verteilen sich die eingeleiteten Schubkräfte über die gesamte Querschnittshöhe der Kertverbinder und beanspruchen diese auf Biegung (Schnitt 3, Abb. 4.3).

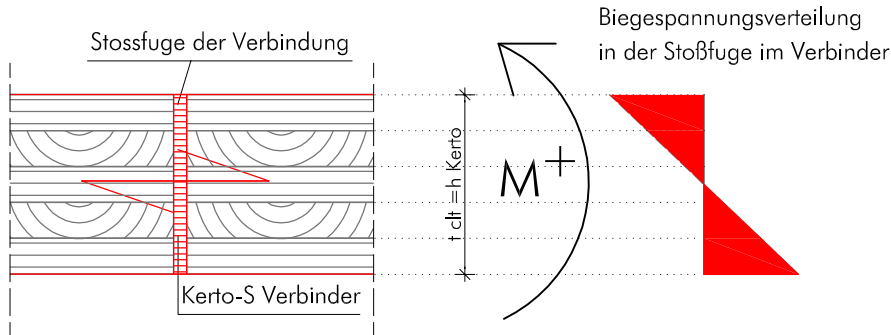


Abb. 4.6 Biegespannungsverteilung im Kertoverbinder

4.2.2 Bemessung der Verbindung

Nachfolgend ist die Vorbemessung für einen 1m breiten Plattenstreifen dargestellt. Abb. 4.7 zeigt eine Übersicht über die im Anschluss verwendeten Bezeichnungen.

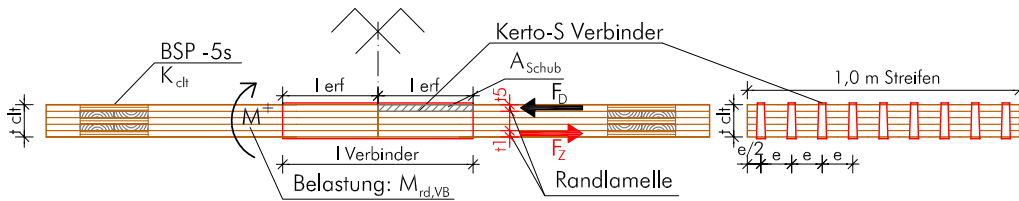


Abb. 4.7 Biegebemessung Verbindungsplatten-Übersicht

4.2.2.1 Momententragfähigkeit der Verbindung

Die Verbindung wird eine geringere Tragfähigkeit als der Brettsperrholzbruttoquerschnitt haben. Die Abminderung für die teiltragfähige Momentenverbindung wurde über den Faktor f definiert. Dieser wurde über das Verhältnis der Biegefestigkeiten von BSP und Kerto definiert. Beide Biegefestigkeiten sollten hoch ausgenutzt werden. Der Faktor f errechnet sich wie folgt:

Unter der Annahme $E_{90}=0$ lässt sich nach [44] die Biegesteifigkeit EI_{cft} für 5-schichtige BSP-Platten mit fünf Schichten gleicher Dicke nach Gl. [4.9] berechnen.

$$K_{cft} = EI_{cft} = \frac{99}{125} \times E_0 \times \frac{bt_{cft}^3}{12} \quad [4.9]$$

Dividiert man durch E_0 kann ein Trägheitsmoment I_{clt} der BSP-Platte errechnet werden.

$$I_{clt} = \frac{99}{125} \times \frac{bt_{clt}^3}{12} \quad [4.10]$$

Das wirksame Widerstandsmoment W_{clt} für den 5-schichtigen BSP-Querschnitt mit gleichen Schichtdicken ergibt sich zu:

$$W_{clt} = \frac{I_{clt}}{t_{clt}/2} = \frac{33}{250} \times bt_{clt}^2 \quad [4.11]$$

Die Biegeandspannung für den Brettsperrholzquerschnitt kann somit wie folgt errechnet werden:

$$\sigma_{b,clt} = \frac{M_{sd}}{W_{clt}} \quad [4.12]$$

durch Umformen von Gl. [4.12] errechnet sich das Tragmoment der BSP-Platte für den BSP-Querschnitt mit:

$$M_{rd,clt} = f_{m,d,BSP} \times W_{clt} = f_{m,d,clt} \times \frac{33}{250} \times bt_{clt}^2 \quad [4.13]$$

Die analoge Vorgehensweise für den Kerto-Verbinder ergibt folgendes Ergebnis:

$$M_{rd,Kerto} = f_{m,d,Kerto} \times W_{Kerto} = f_{m,d,Kerto} \times \frac{1}{6} \times bt_{clt}^2 \quad [4.14]$$

mit $W_{Kerto} = \frac{bt_{clt}^2}{6}$

Für die Verbindung gilt:

$$M_{r,d,clt} \times f = M_{r,d,Kerto} \times (1-f)$$

$$f_{m,d,clt} \times \frac{33}{250} \times bt_{clt}^2 \times f = f_{m,d,Kerto} \times \frac{1}{6} \times bt_{clt}^2 \times (1-f) \quad [4.15]$$

f wird als Verhältnis der BSP-Breite zur Gesamtbreite $b_{ref}=1,0m$ definiert.

$1-f$ ist das Verhältnis der Kertofläche zur Gesamtbreite $b_{ref}=1,0m$.

für den Faktor f ergibt sich:

$$f = \frac{\frac{f_{m,d,Kerto}}{6}}{f_{m,d,clt} \times \frac{33}{250} + f_{m,d,Kerto} \times \frac{1}{6}} \quad [4.16]$$

Unter Berücksichtigung der Biegefestigkeiten für BSP und Kerto errechnet sich f mit:

$$f = \frac{\frac{48}{6}}{28,9 \times \frac{33}{250} + 48 \times \frac{1}{6}} = 0,677 \approx 0,68 \quad [4.17]$$

$$f_{m,d,clt} = f_{m,k,BSP} = 28,9 \text{ N/mm}^2 \quad \text{IAbschnitt 2.1.8}$$

$$f_{m,d,Kerto} = f_{m,k,Kerto} = 48,0 \text{ N/mm}^2 \quad \text{IAbschnitt 2.2.4.2}$$

Um das Tragmoment der Verbindung zu berechnen ist die Kenntnis des Tragmoments der ungeschwächten BSP-Platte notwendig:

$$\begin{aligned} \text{aus} \quad \sigma_{(z),d} &= \frac{M_d}{K_{clt}} \times z \times E_{(z)} \\ \text{folgt} \quad M_{rd,clt,brutto} &= \frac{f_{m,d} \times K_{clt}}{z \times E_{(z)}} \end{aligned} \quad [4.18]$$

mit:	$\sigma_{(z)}$	Biegespannung in der BSP-Platte
	$f_{m,d}$	Designwert der Biegefestigkeit von BSP
	z	Abstand von der neutralen Faser (siehe Abb. 4.2)
	$E_{(z)}$	Elastizitätsmodul abhängig vom Abstand z
	K_{clt}	Biegesteifigkeit der BSP-Platte lt.Gl. [4.6]

Die Momententragfähigkeit der Verbindung ermittelt sich zu:

$$M_{rd,VB} = M_{rd,clt,brutto} \times f \quad [4.19]$$

4.2.2.2 Nachweisführung für die Verbindung für einen 1m Plattenstreifen:

Nachweis A: Biegespannung im BSP-Nettoquerschnitt

Berechnung der Biegespannung im BSP-Nettoquerschnitt:

$$\sigma_{b,clt,netto,(z),d} = \frac{M_{rd,VB}}{K_{clt,netto}} \times z \times E_{(z)} \leq f_{m,d,clt} \quad [4.20]$$

mit:

$K_{\text{clt netto}} = K_{\text{clt}} \cdot f$ Biegesteifigkeit des Nettoquerschnitts

$f_{\text{m,d,clt}}$ Designwert der Biegefestigkeit von BSP

Nachweis B: Biegespannung im Kertverbinder

Berechnung der Biegegrandspannung im Kertverbinder:

$$\sigma_{\text{b, Verbinder, d}} = \frac{M_{\text{rd, VB}}}{n_{\text{Kerto}} \times W_{\text{Verbinder}}} \leq f_{\text{m, d, Kerto}} \quad [4.21]$$

mit: n_{Kerto} Anzahl der Kertverbinder in einem 1 m breiten Plattenstreifen

$W_{\text{Verbinder}}$ Widerstandsmoment des Verbinders

$f_{\text{m,d,Kerto}}$ Designwert der Biegefestigkeit von Kerto

Alternativ kann für den rechteckigen Kertverbinder das Produkt $n_{\text{Kerto}} \times W_{\text{Verbinder}}$ durch $(1-f) \times b_{\text{ref}} \times \frac{t_{\text{clt}}^3}{6}$ ersetzt werden.

Nachweis C: Nachweis der Schubspannung in der Randlamelle

Bezugnehmend auf die Überlegungen in Abb. 4.5 ermittelt man die Zug- bzw. Druckkraft der Randlamelle.

Gl. [4.22] zeigt die Ermittlung der Zugkraft für die Zuglamelle mit der Stärke t_1 (lt. Abb. 4.2); analog gilt dies für die Drucklamelle mit der Stärke t_5 .

$$F_{1, d} = \frac{M_{\text{rd, VB}}}{(t_{\text{clt}} - t_1)} \quad [4.22]$$

mit: $F_{1, d}$ = Zugkraft in der Randlamelle

t_1 = Schichtdicke der Randlamelle

t_{clt} = Plattenstärke BSP

Die Schubspannung in der Schubfläche errechnet sich lt. Gl. [4.23].

Daraus kann auch die erforderliche Einbindelänge l_{erf} des Verbinders in der BSP-Platte ermittelt werden. Dabei wird von einer sachgemäßen Verklebung der Verbindungsteile ausgegangen (Schubfestigkeit des Holzes ist geringer als die Schubfestigkeit der Verklebung). Maßgebend für die Verbindung ist somit die Schubfestigkeit des Kertverbinders, diese ist mit $f_{\text{vk}} = 2,3 \text{ N/mm}^2$ geringer als jene von BSP. Die Schubspannung errechnet

sich lt. Gl. [4.23]:

$$\tau_d = \frac{F_{1,d}}{A_{\text{schub}} \times n_{\text{Kerto}}} \leq f_{v,d,\text{Kerto}} \quad [4.23]$$

mit $A_{\text{schub}} = 2 \times t_1 \times l_{\text{erf}}$

mit:	n_{Kerto}	Anzahl der Kertoverbinder in einem 1m breiten Plattenstreifen
	τ_d	Schubspannung in der Randlamelle
	$f_{v,d,\text{Kerto}}$	Schubfestigkeit des Kertoverbinders $f_{v,k,\text{Kerto}} = 2,3 \text{ N/mm}^2$

Mit der Schubfestigkeit von Kerto kann die erforderliche Einbindelänge des Verbinders errechnet werden.

$$l_{\text{erf}} = \frac{F_{1,d}}{2 \times t_1 \times f_{v,d,\text{Kerto}} \times n_{\text{Kerto}}} \quad [4.24]$$

mit $A_{\text{schub}} = 2 \times t_1 \times l_{\text{erf}}$

mit:	n_{Kerto}	Anzahl der Kertoverbinder in einem 1m breiten Plattenstreifen
	τ_d	Schubspannung in der Randlamelle

4.2.2.3 Festigkeitswerte für die Biegeversuchsplatten.

Die Bemessung wurde mit den mittleren Steifigkeitswerten und charakteristischen Festigkeitswerten (5%-Quantilwerte, $k_{\text{mod}}=1,0$, $\gamma_m=1,0$, siehe Kapitel 2) vorgenommen. Folgende Festigkeitswerte wurden für die Nachweise verwendet:

Nachweis	Festigkeit	Wert
A-BSP-Nettoquerschnitt	$f_{m,\text{BSP},05}$	28,9 N/mm ²
B-Kertoverbinder	$f_{m,\text{Kerto-Scheibe},05}$	48,0 N/mm ²
C- Schubkraftübertragung	$f_{v,\text{Kerto-Platte},05}$	2,3 N/mm ²

Tab. 4.1 Festigkeitswerte für die Biegebemessung der Prüfkörper

Die Berechnung der maximal zu erwartenden Bruchwerte (95%-Quantilwerte) und eine Vorbemessung mit jeweiligen Werten für die Biegeprüfkfigurationen findet sich in Abschnitt 5.2.3.

4.3 Bemessung der Biegezugversuche in einer Lamelle

4.3.1 Ingenieurmäßiges Modell

Bezugnehmend auf das in Abschnitt 4.2.1 angenommene Tragmodell, spielt die Schubkraftübertragung in der Randlamelle eine wichtige Rolle für das Tragverhalten der Verbindung. Wie bereits festgestellt wurde, sollte die Schubfestigkeit der Verklebung größer als jene des Holzes sein. Die Verklebequalität sollte mit Biegezugversuchen nachgewiesen werden. Dazu wurden aus dem verklebten Brettsperrholzquerschnitt beide Randlamellen herausgetrennt, und auf Zug geprüft.

Weiterführend werden die Biegezugversuche als Zugversuche benannt.

Abb. 4.8 zeigt schematisch die Vorgehensweise der Herstellung der Prüfkörper. Nähere Informationen dazu finden sich in Abschnitt 5.1.

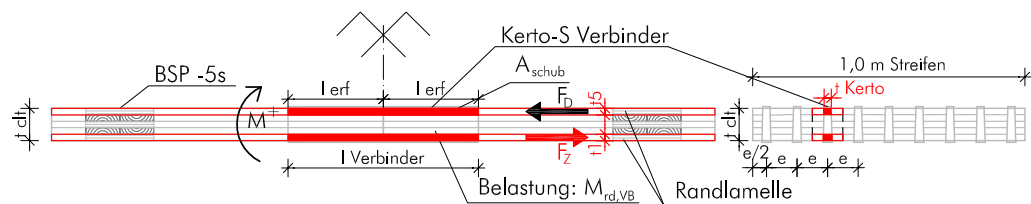


Abb. 4.8 Herstellung der Zugprüfkörper

herausgetrennter Prüfkörper

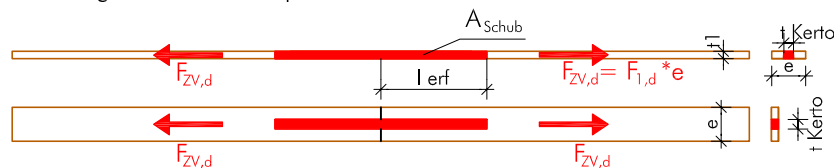


Abb. 4.9 Zugprüfkörper

4.3.2 Bemessung der Zugprüfkörper

Ziel der Zugprüfungen war die Ermittlung der Schubfestigkeit der Verklebung.

Die zu erwartenden Zugkräfte ($F_{ZV,d}$) für die Zugprüfung wurden über die vorhandene Schubfläche und die Schubfestigkeit der Brettsperrholzplatte errechnet.

$$F_{ZV,d} = 2 \times (f_{v,cltd} \times A_{schub}) = 2 \times f_{v,clt,d} \times t_1 \times l_{erf} \quad [4.25]$$

mit $F_{ZV,d}$ = Bemessungswert für den Zugprüfkörper

t_1 = Schichtdicke der Randlamelle

$f_{v,clt,d}$ = Bemessungswert der Schubspannung für Brettsper Holz

A_{schub} = Schubfläche lt. Abb. 4.9

Das Versagen des Prüfkörpers sollte in der Verklebung stattfinden. Folgende Nachweise sind im Zuge der Bemessung der Zugprüfkörper zu führen.

- A** **Normalspannungsnachweis im Nettoquerschnitt der Brettlamelle**
- B** **Normalspannungsnachweis im Verbinder**
- C** **Schubspannung in der Klebefuge**

Nachweis A: Normalspannungsnachweis in der Brettlamelle

Die Zugnormalspannung im Nettoquerschnitt der Brettlamelle errechnet sich nach Gl. [4.26]:

$$\sigma_{N,RL,d} = \frac{F_{ZV,d}}{A_{netto}} \leq f_{t,0,d} \quad [4.26]$$

mit $A_{netto} = t_1 \times (e - t_{Kerto})$

mit: e = Abstand der Kertoverbinder lt. Abb. 4.8

mit $f_{t,0,d} = f_{t,0,C24,05}$ = Bemessungswert der Brettlamelle für die Zugversuche

Nachweis B: Normalspannungsnachweis im Verbinder

Die Normalspannung im Querschnitt des Kerto-Verbinders errechnet sich zu:

$$\sigma_{N,Kerto,d} = \frac{F_{ZV,d}}{A_{Kerto}} \leq f_{t,0,d} \quad [4.27]$$

mit $A_{Kerto} = t_1 \times t_{Kerto}$

mit $f_{t,0,d} = f_{t,0,Kerto-Scheibe,05}$ = Bemessungswert des Kertoverbinders für die Zugversuche

Nachweis C: Schubnachweis in der Klebefuge

Die maximale Schubspannung in der Klebefuge errechnet sich zu.

$$\tau_{Klebefuge,d} = \frac{F_{ZV,d}}{A_{schub}} \leq f_{v,d,Kerto} \quad [4.28]$$

mit $A_{schub} = 2 \times t_1 \times l_{erf}$

mit: $\tau_{\text{Klebefuge,d}}$ Schubspannung in der Klebefuge

$f_{v,d,\text{Kerto}} = f_{v,\text{Kerto},95}$ = Bemessungswert der Schubfestigkeit des Kerto-verbinders für die Zugversuche

4.3.2.1 Festigkeitswerte für die Nachweisführung der Zugversuche

Die Bemessung wurde mit charakteristischen Festigkeitswerten ($k_{\text{mod}}=1,0$, $\gamma_m=1,0$) vorgenommen.

Bei den Zugversuchen sollte der Bruch im Bereich der Klebefuge (Holzbruch in Fugennähe) stattfinden. Somit wurde der Schubnachweis mit einem 95%-Quantilwert der Schubfestigkeit von BSP (lt. Kapitel 2, Tab. 2.6) bemessen. Aufgrund der höheren Schubfestigkeit wird die erforderliche Einbindelänge des Verbinders kürzer. Das Versagen des Prüfkörpers im Bereich der Klebefuge wird mit hoher Wahrscheinlichkeit eintreten. Der 95%-Quantilwert der Festigkeit wurde auf Basis einer normalverteilten Grundgesamtheit abgeschätzt:

$$f_{v,95} = f_{v,05} / (1 - 1,645 \times \text{COV}) \times (1 + 1,645 \times \text{COV}) \quad [4.29]$$

mit einem gewählten Variationskoeffizienten von $\text{COV}=0,12$

Folgende Festigkeitswerte wurden für die Bemessung der Zugprüfkörper verwendet.

Nachweis	Festigkeit	Wert
A-Brettlamelle Nettoquerschnitt	$f_{t,0,05}$	14,0 N/mm ²
A-Kertoverbinder Nettoquerschnitt	$f_{t,0,\text{Kerto-Scheibe},05}$	38,0 N/mm ²
C- Schubkraftübertragung	$f_{v,\text{Kerto},95}$	3,06 N/mm ²
	$f_{v,\text{BSP},95}$	4,48 N/mm ²

Tab. 4.2 Festigkeitswerte für die Biegebemessung der Prüfkörper

Die Berechnung der maximal zu erwartenden Bruchwerte (95%-Quantilwerte) und eine Vorbemessung mit Werten für die Zugversuche findet sich in Abschnitt 5.1.

Versuchsprogramm Hauptversuche

5.1 Biegezugversuche

5.1.1 Vorbemerkung

Nachdem in den Vorversuchen festgestellt wurde, dass eine Verklebung der Verbindung grundsätzlich möglich ist, sollte mit Biegezugversuchen die Qualität der Verklebung bezüglich ihrer Festigkeit geprüft werden. Da die herausgetrennten Randlamellen auf Zug geprüft werden, wird im weiteren von Zugversuchen gesprochen.

Die geeigneten Verklebevarianten der Vorversuche wurden in den Zugversuchen weiterverfolgt.

Im Zuge des FWF-Projekts wurden verschiedene Tragstrukturen entworfen (Abschnitt 1.4). Vorerst war geplant den „free_climber“ im Rahmen des FWF-Projekts umzusetzen. Diese Struktur wurde auch im Finite Element Programm ABAQUS von Thomas Bogensperger vordimensioniert. Das Ergebnis der Vorbemessung lieferte eine 5-schichtige BSP-Platte mit einer erforderlichen Stärke von ca. 150 mm. Zum Zeitpunkt der Zugversuche war diese Struktur aktuell, daher wurden Platten dieser Stärke dafür gewählt.

5.1.2 Material Zugversuche

5.1.2.1 BSP-Platten

Die verwendeten BSP-Platten sind Standardware der Firma Stora-Enso. Die verwendeten Platten waren ungeprüfte Restbestände von Querdruckversuchen. (Masterarbeit Salzmann,[30]. Die genaue Plattenbezeichnung lautet CLT-165-L5s. Der Plattenaufbau besteht aus 5 Schichten lt. Abb. 5.1. Nähere Informationen zu den Platten finden sich in Kapitel 2, Abschnitt 2.1.7.

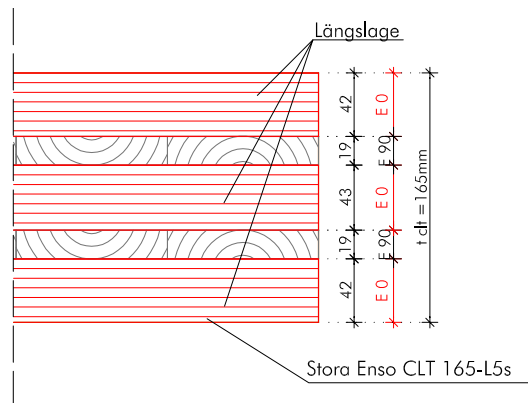


Abb. 5.1 Plattenaufbau Stora-Enso-165-L5s

Die verwendeten BSP-Platten hatten Rohmaße von ca. 600x600x165 mm.

5.1.2.2 Kerto-Verbinder

Als Kertoverbinder wurden Kertoplaten mit 27 mm Stärke 1820 mm Länge und 1250 mm Breite der Firma Finforest verwendet. Die Kertoverbinder wurden für die Zugversuche in der Breite zu einem Verbinder mit 54 mm Gesamtbreite verleimt, um für die Zugversuche eine bessere Abstufung mit den Zuglamellen zu erreichen.

5.1.2.3 Kleber

Die Prüfkörper wurden mit PU-Klebern der Firma Purbond verklebt. Hauptsächlich wurden die 1K-PU-Kleber HB-S309 und HB-S709 verwendet. Weiters wurde eine Konfiguration mit CR-421, einem 2K-PU-Gießharz vergossen. Allgemeine Informationen über die verwendeten Klebstoffe finden sich in Abschnitt 2.3.

5.1.3 Verklebevarianten für die Zugversuche

Als Ergebnis der Vorversuche wurden vier Varianten der Verklebung festgelegt. Die vorhandenen BSP-Platten (ca. 600x600x165 mm) wurden mit drei Kertoverbindern verklebt. Vorgreifend auf die genaue Beschreibung der Herstellung der Prüfkörper zeigt Abb. 5.2 die Verklebung der BSP-Platten mit den drei Kertoverbindern. Die Verklebung erfolgte in einem Arbeitsschritt.

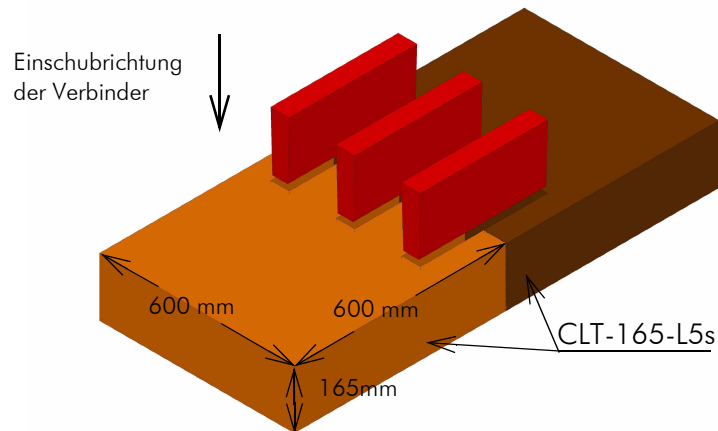


Abb. 5.2 Verklebung der BSP-Platten für die Biegezugversuche

Nachfolgend sind die Verklebevarianten für jeweils einen Verbinder detailliert beschrieben.

5.1.3.1 Variante A, „konischer Verbinder flach“

Verbinder: Kerto-S 2x27mm verleimt
keilförmig gehobelt
Winkel: $1,6^\circ$

Kleber: 1K-PU
Purbond HB-S309 oder 709
maximale Stärke der Klebefuge
lt. Zulassung 0,3 mm

geplante Klebefugenstärke: 0,25 mm
= ca. 290 g/m²

Kleberauftrag: mit Zahnpachtel zweiseitig auf
Verbinder und BSP-Schlitz

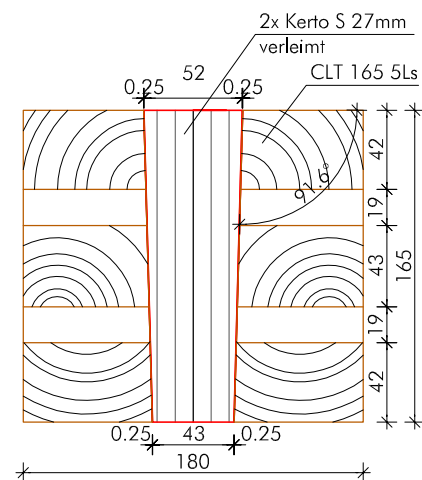


Abb. 5.3 Verklebung Variante A

5.1.3.2 Variante B, „konischer Verbinder steil“

Verbinder: Kerto-S 2x27 mm verleimt
keilförmig gehobelt
Winkel: 2,4°

Kleber: 1K-PU
Purbond HB-S309 oder 709
maximale Stärke der Klebefuge
lt. Zulassung 0,3 mm

geplante Klebefugenstärke: 0,25 mm
= ca. 290 g/m²

Kleberauftrag: mit Zahnpachtel zweiseitig auf
Verbinder und BSP-Schlitz

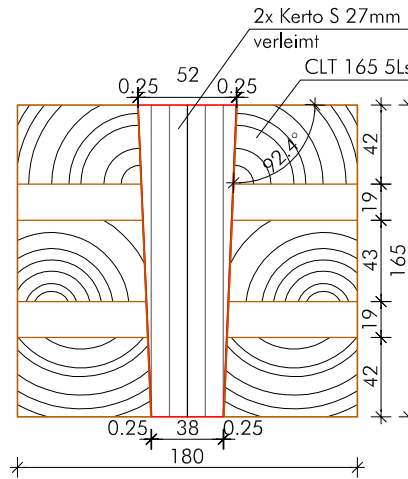


Abb. 5.4 Verklebung Variante B

5.1.3.3 Variante C, „paralleler Verbinder fugenfüllend“

Verbinder: Kerto-S 2x27 mm verleimt
parallel auf 52 mm Breite gehobelt
Winkel: 0°

Kleber: 2K-PU
Purbond CR-421
maximale Stärke der Klebefuge
lt. Zulassung 3 mm

geplante Klebefugenstärke: 2,0 mm
= ca. 2200 g/m²

Kleberauftrag: Schlitz abgedichtet und mit Kleber vergossen

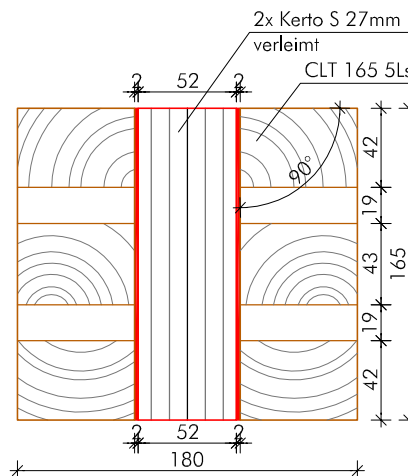


Abb. 5.5 Verklebung Variante C

5.1.3.4 Variante D, „Verbinder profiliert“

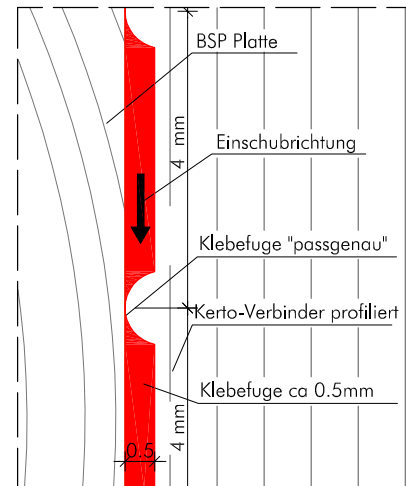
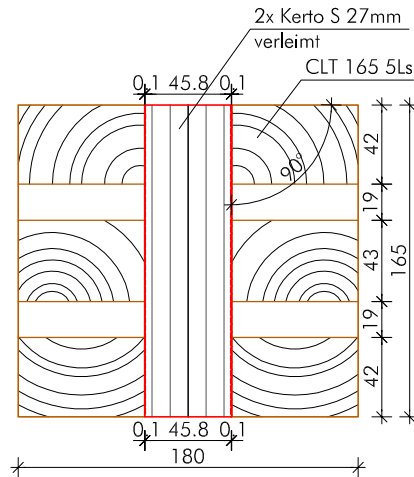


Abb. 5.6 Verklebung Variante D

Detail: Profil des Verbinders Variante D

Verbinder: Kerto-S 2x27 mm verleimt
keilförmig gehobelt
Oberfläche profiliert, lt. Detail Abb. 5.6
Winkel: 0°

Kleber: 1K-PU
Purbond HB-S309 oder 709
maximale Stärke der Klebefuge
lt. Zulassung 0,3mm

geplante Klebefugenstärke: ca. 0,5 mm, bzw. passgenau
= ca. 520 g/m²

Kleberauftrag: mit Zahnpachtel zweiseitig auf Verbinder und BSP-Schlitz



Abb. 5.7 Kertoverbinder profiliert

5.1.4 Ermittlung der Prüfkräfte

Das mechanische Ingenieurmodell zur Vorbemessung der Verbindung auf Biegung wurde in Kapitel 4 beschrieben. Vorab sollte die Qualität der Klebefuge, als wesentlicher Parameter für die Biegetragfähigkeit der Verbindung, getestet werden.

Ziel der Zugprüfungen war die Ermittlung der Schubfestigkeit in den Randlamellen der BSP-Platten, für die festgelegten Verklebevarianten (lt. Abschnitt 5.1.3).

Für die Zugprüfungen wurden BSP-Platten lt. Abb. 5.1 verwendet.

Die Einbindelänge wurde mit 180 mm festgelegt. Dieser Wert wurde aus Produktionstechnischen Gründen so gewählt.

Abb. 5.8 zeigt das Herstellungsschema der Zugprüfkörper. Aus den verklebten BSP-Platten wurden die obere und untere Randlamelle jedes Verbinders herausgetrennt und in weiterer Folge einer Zugprüfung unterzogen. In der Darstellung ist die prinzipielle Herstellungsweise für den mittleren Verbinder des Verklebten Querschnitts dargestellt. Analog gilt dies für die beiden restlichen Verbinder.

Für die BSP-Platten CLT-165-L5s mit der gewählten Einbindelänge von 180 mm ergibt sich die Geometrie der Zugprüfkörper lt. Abb. 5.8.

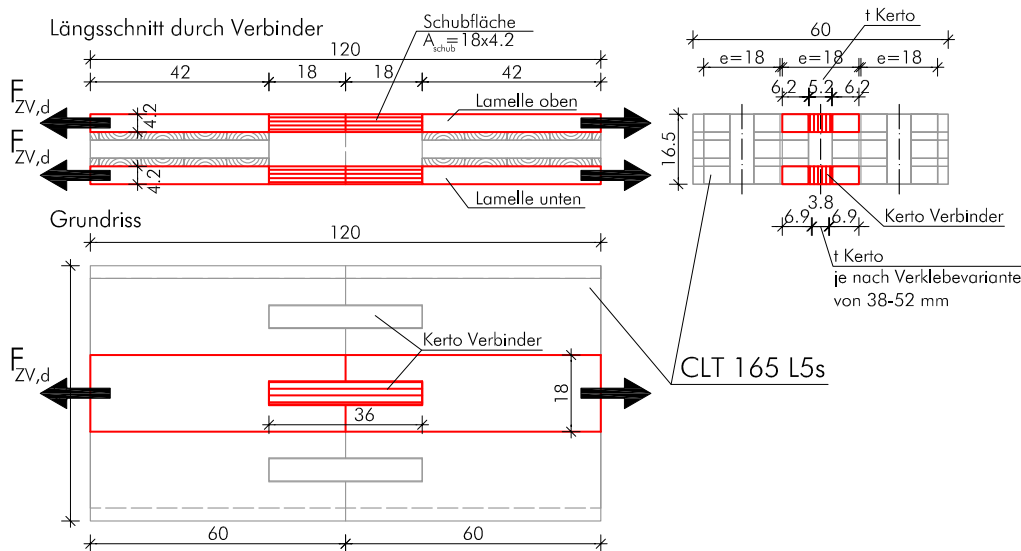


Abb. 5.8 Geometrie und Herstellungsschema der Zugprüfkörper

Die Zugkräfte ($F_{ZV,d}$) wurden für die Prüfkörper mit der vorhandenen Schubfläche A_{schub} und der Schubfestigkeit der Brettsperrholzplatte errechnet.

Für die Schubfestigkeit von BSP wurde der Wert der 95%-Quantile als Bemessungswert verwendet, um hier jedenfalls ein Versagen auf Schub in der Klebefuge zu erreichen. Dieser errechnet sich lt. Gl. [4.29], Kapitel 4. Somit ergibt sich der Bemessungswert der

Zugversuche zu:

$$F_{ZV,d} = 2 \times (f_{v,95,clt} \times A_{schub}) = 2 \times f_{v,95,clt} \times t_1 \times l_{gew} \quad [5.1]$$
$$F_{ZV,d} = 2 \times 4,48 \times 42 \times 180 = 67,7 \text{ kN}$$

mit: $F_{ZV,d}$ = Bemessungswert für den Zugprüfkörper

t_1 = Schichtdicke der Randlamelle

$f_{v,clt,d}$ = Bemessungswert der Schubspannung für Brettsper Holz
 $f_{v,clt,95} = 4,48 \text{ N/mm}^2$, lt. Kapitel 4, Gl. [4.29]

A_{schub} = Schubfläche lt. Abb. 5.8

Mit dem Wert von 67,7 kN sind die Kertoverbinder und die Brettlamellen zu dimensionieren. Dies erfolgt in Abschnitt 5.1.6.

5.1.5 Prüfkonfigurationen

Aus den entwickelten Verklebevarianten und den Überlegungen beide Randlamellen getrennt auf Zug zu prüfen, ergaben sich 8 verschiedene Prüfkonfigurationen bzw. Prüfserien. Die Trennung in obere und untere Randlamelle sollte auch zeigen, welchen Einfluss die Einschubrichtung des Verbinders auf die Verklebung hat. Ein Grundproblem der Verklebung war es den Kleber auf die gesamte Klebefläche gleichmäßig zu verteilen.

5.1.5.1 Bezeichnung der Prüfkörper

Die Bezeichnung der Prüfkörper wurde wie folgt gewählt.

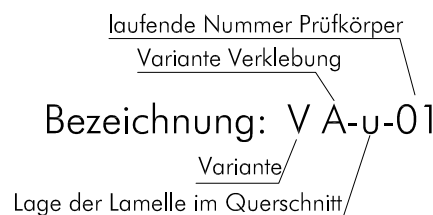


Abb. 5.9 Bezeichnung der Zugprüfkörper

Folgende Bezeichnungen sind möglich:

Variante: V

Variante Verklebung: A,B,C,D; lt. Abschnitt 5.1.3

Lage der Lamelle im Querschnitt:

- o obere Randlamelle
- u untere Randlamelle

laufende Nummer: von 01 bis 06

5.1.5.2 Prüfkörperarten-Prüfserien

Die Geometrie der Zugprüfkörper ist für alle Prüfkörper ident. Unterschiedlich sind die Varianten der Verklebung (A, B, C oder D lt. Abschnitt 5.1.3) und die Stärke des Kertoverbinders (t_{Kerto}). Abb. 5.10 zeigt die Geometrie der Prüfkörper.

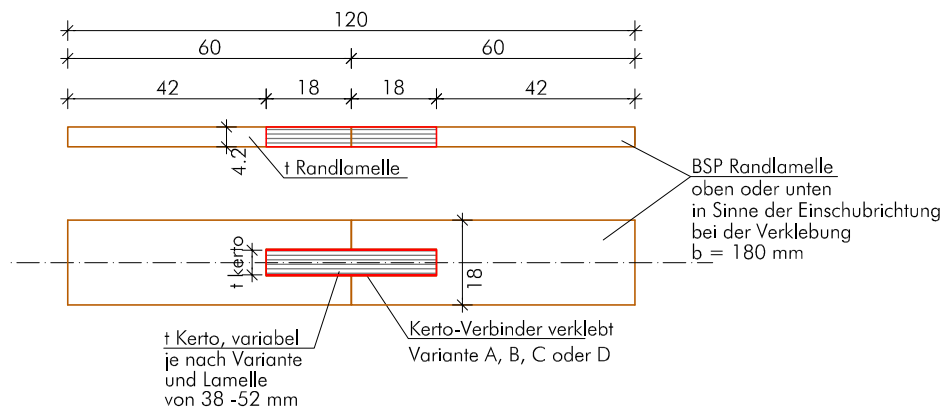


Abb. 5.10 Geometrie der Zugprüfkörper

Tab. 5.1 zeigt die Bezeichnung der verschiedenen Prüfserien, die Anzahl der Prüfkörper, und die Breiten der Kertoverbinder. Für die Verklebevarianten A und B (keilförmige Verbinde) wurden die mittleren Breiten angegeben.

Serienbezeichnung	Anzahl der Prüfkörper	t_{Kerto} [mm]
VA-o	6	51,4
VA-u	6	43,6
VB-o	6	51,1
VB-u	6	38,9
VC-o	6	52,0
VC-u	6	52,0
VD-o	6	45,8
VD-u	6	45,8
Summe	48 Stück	

Tab. 5.1 Prüfserien Zugversuche

5.1.6 Nachweisführung für die Prüfkörper

Das Versagen des Prüfkörpers sollte in der Verklebung stattfinden. Folgende Nachweise sind im Zuge der Bemessung der Zugprüfkörper zu führen.

- A **Normalspannungsnachweis im Nettoquerschnitt der Brettlamelle**
- B **Normalspannungsnachweis im Verbinder**
- C **Schubspannung in der Klebefuge**
- D **Nachweis der Lasteinleitung**

Nachweis A: Normalspannung in der Brettlamelle

Die Zugnormalspannung im Nettoquerschnitt der Brettlamelle (Qualität C24) errechnet sich nach Gl. [5.2]:

$$\sigma_{N,RL,d} = \frac{F_{ZV,d}}{A_{\text{netto}}} = \frac{67,7 \times 10^3}{5376} = 12,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [5.2]$$

$$\text{mit } A_{\text{netto}} = t_1 \times (e - t_{\text{Kerto}}) = 42 \times (180 - 52) = 5376 \text{ mm}^2$$

mit: e = Abstand der Kertoverbinder lt. Abb. 5.8

Der Normalspannungsnachweis:

$$\sigma_{N,RL,d} \leq f_{t,0,05,C24}$$

$$12,6 \leq 14,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [5.3]$$

mit $f_{t,0,05,C24}$ = Bemessungswert der Brettlamelle

Nachweis B: Normalspannungsnachweis im Verbinder

Die Normalspannung im Querschnitt des Kerto-Verbinders errechnet sich zu:

$$\sigma_{N,Kerto,d} = \frac{F_{ZV,d}}{A_{\text{Kerto}}} = \frac{67,7 \times 10^3}{2184} = 31,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [5.4]$$

$$\text{mit } A_{\text{Kerto}} = t_1 \times t_{\text{Kerto}} = 42 \times 52 = 2184 \text{ mm}^2$$

Der Normalspannungsnachweis lautet:

$$\sigma_{N, \text{Kerto}, d} \leq f_{t, 0, 05, \text{Kerto}} \quad [5.5]$$

$$31, 0 \leq 38, 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

mit $f_{t, 0, 05, \text{Kerto}}$ = Bemessungswert des Kertoverbinders

Anmerkung: Der Spannungsnachweis für den Fall mit der kleinsten Querschnittsfläche des Kertoverbinders (Verklebevariante B, Lamelle unten) ist nicht erfüllt. Diese Überschreitung wurde toleriert.

Nachweis C: Schubspannung in der Klebefuge

Die maximale Schubspannung in der Klebefuge errechnet sich zu.

$$\tau_{\text{Klebefuge}, d} = \frac{F_{ZV, d}}{A_{\text{schub}}} = \frac{67, 7 \times 10^3}{15120} = 4, 48 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [5.6]$$

mit $A_{\text{schub}} = 2 \times t_1 \times l_{\text{gew}} = 2 \times 42 \times 180 = 15120 \text{ mm}^2$

mit: $\tau_{\text{Klebefuge}, d}$ Schubspannung in der Klebefuge

Der Schubnachweis in der Randlamelle:

Die Schubspannung in der Klebefuge sollte größer als der Bemessungswert der Schubspannung des Holzes sein. Maßgebend ist hierbei die Schubspannung im Kertoverbinder. Somit sollte der Verbinder auf Schub versagen.

Tritt dieser Fall ein, so kann angenommen werden dass die Schubfestigkeit der Klebefuge höher als die Schubfestigkeit des Verbinders ist.

$$\tau_{\text{Klebefuge}, d} \geq f_{v, 95, \text{Kerto}} \quad [5.7]$$

$$4, 48 \geq 3, 06 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Die Ermittlung der 95%-Quantilwerte ist in Abschnitt 4.3.2.1 dargestellt.

Weiters sollte die Schubspannung in der Klebefuge größer als der charakteristische Festigkeitswert der Brettlamelle sein. Der Nachweis erfolgt mit:

$$\tau_{\text{Klebefuge}, d} \geq f_{v, 05, \text{clt}} \quad [5.8]$$

$$4, 48 \geq 3, 00 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Es ist zu erwarten, dass es mit der gewählten Versuchskonfiguration mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Versagen in der Schubfläche kommen wird.

D Nachweis der Lasteinleitung

Die Lasteinleitung in den Zugprüfkörper erfolgte über einen Stahlteil mit zwei außenliegenden Blechen (Abb. 5.24). Zur Verstärkung des Holzquerschnitts wurden außen zwei Lamellen mit Sperrholz ($t=11\text{ mm}$) aufgeleimt. Die Bemessung der Stabdübelverbindung erfolgte nach EN 1995-1-1 und kann in Abschnitt C.2 nachvollzogen werden. Gewählt wurden 6x2 Stück Stabdübel mit einem Durchmesser von 8mm.

Der Nachweis lautet:

$$F_{ZV,d} \leq R_{v,d}$$

$$67,7 \leq 75,4 \text{ kN}$$

5.1.7 Herstellung der Prüfkörper

Die Herstellung der Zugprüfkörper erfolgte nach folgendem Ablauf:

- Lagerung der BSP-Platten in der Klimakammer (20° und 65% relative Luftfeuchte)
- Transport der BSP-Platten ins Holzinnovationszentrum HIZ nach Zeltweg
- Abbund der BSP-Platten im HIZ (Fräsen der Schlitze, Formatieren der BSP-Platten)
- Transport der BSP-Platten nach Graz
- Fertigung der Kertverbinder in der Tischlerei (Verkleben, Hobeln, Fräsen, Formatieren)
- verkleben der Prüfplatten
- heraustrennen der oberen und unteren Randlamellen
- planhobeln der Zugprüfkörper

Auf einige Herstellungsschritte soll in der Folge näher eingegangen werden.

5.1.7.1 Plattenabbund

Der BSP-Plattenabbund der Zugversuchskonfigurationen erfolgte im Holzinnovationszentrum in Zeltweg (HIZ) mit einem 7-Achs-Industrieroboter der Firma ABB. Vorab musste für jede Verklebevariante eine Abbundzeichnung erstellt werden.

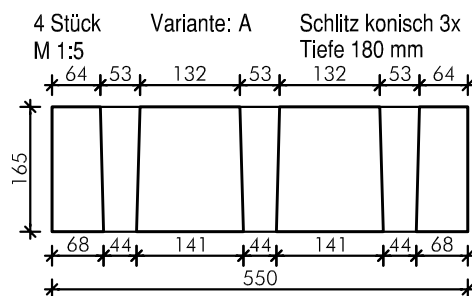


Abb. 5.11 2-D CAD Abbundplan für die Prüfserie VA-x

Auf Basis der 2D-CAD-Zeichnungen (Abb. 5.11 zeigt jene für Variante VA-x) wurden 3D-Modelle im CAD Programm Rhino gebaut.

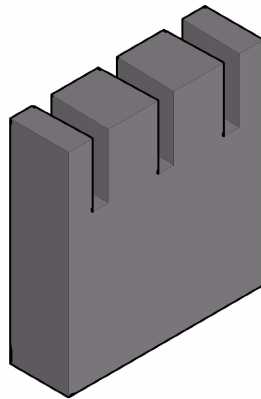


Abb. 5.12 3-D-Modell für Prüfserie VA-x

Für diese 3D-Modelle wurden von der Firma ABB Fräsfiles erstellt. Schlussendlich wurde der Abbund der BSP-Plattenteile mit dem Fräsroboter durchgeführt. Das Fräsen der Schlitze wurde mit verschiedenen Fingerfräsern durchgeführt. Die Einstellungen der Drehzahl und des Vorschubes des Fräasers konnten nach Bedarf eingestellt werden. Ziel war es, eine möglichst exakte und ausrissfreie Oberfläche für die Verklebung zu erhalten. Die Genauigkeit des Gerätes liegt im Zehntelmillimeter-Bereich. Die folgenden Bilder zeigen den Fräsroboter im Einsatz.

Anmerkung: Ursprünglich war geplant die komplette Prüfserie dieser Arbeit mit dem Fräsroboter an der TU-Graz zu fertigen. Nach einer Wartezeit von 8 Monaten aufgrund technischer Probleme, wurde entschieden, den Abbund extern im Holzinnovationszentrum HIZ in Knittelfeld fertigen zu lassen. Vom Beginn dieser Arbeit im Oktober 2010 bis zur Fertigstellung (Juni 2012) wurde kein Teil dieses Projektes auf der universitätseigenen Anlage gefertigt.

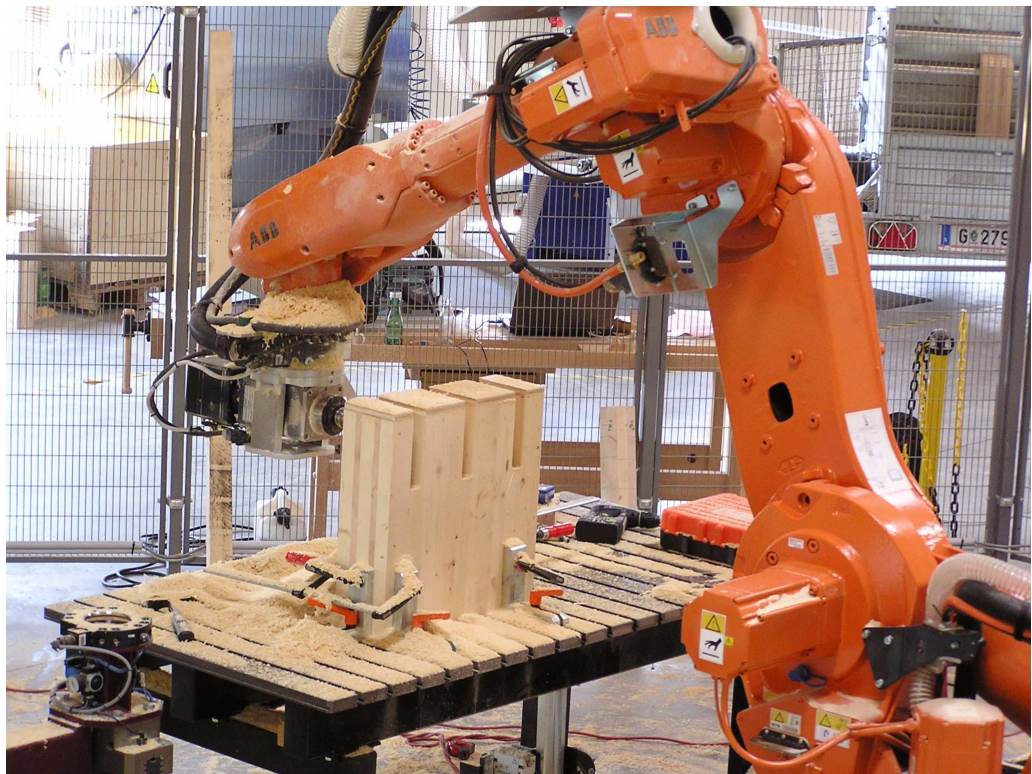


Abb. 5.13 Plattenabbund im HIZ in Zeltweg

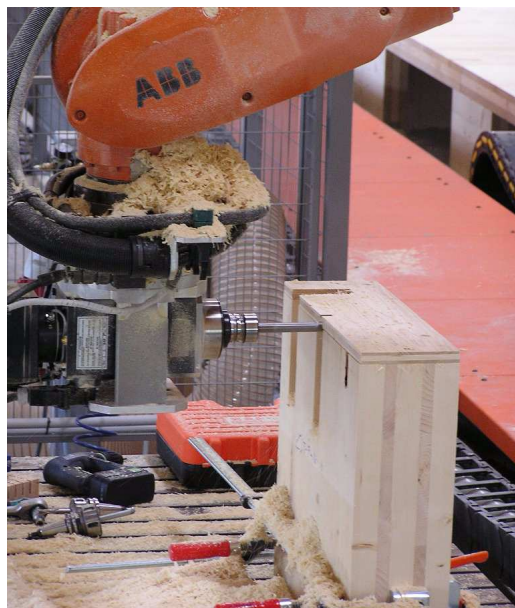
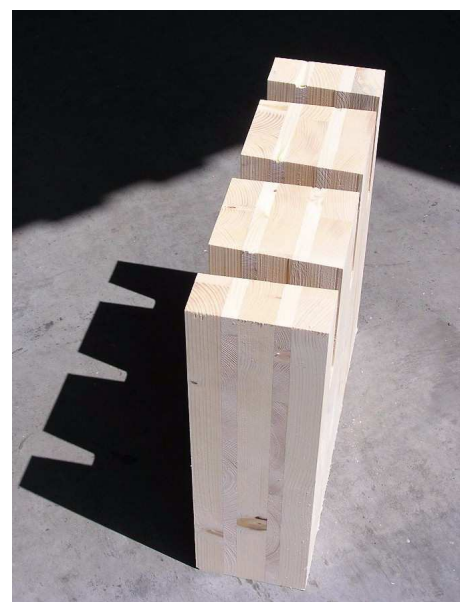


Abb. 5.14 Der 7-Achs-Fräser im Einsatz



Das Ergebnis

5.1.7.2 Fertigung der Kertoverbinder

Die Anlieferung der Kertoverbinder erfolgte in Platten mit den Abmessungen von 1820x225x1250 mm und einer Holzfeuchte von ca. 12%. Die Weiterverarbeitung erfolgte in der Tischlerei vor Ort am Tag vor der Verklebung, um ein optimales Oberflächenalter zu erreichen.

Für die Verbinder der Zugprüfkörper wurden zwei Kerto-Platten mit einer Stärke von 27 mm verleimt ($t_{\text{Kerto,max.}} = 52 \text{ mm}$). Nach der Presszeit und dem Aushärten des Klebers wurden im nächsten Arbeitsschritt Platten längs auf der Kreissäge auf Fertighöhe geschnitten ($h_{\text{Verbinder}} = t_{\text{clt}} + 5 \text{ mm} = 165 + 5 = 170 \text{ mm}$).



Abb. 5.15 Längsschnitt der Kertoverbinder

Anschließend wurden die Teile für parallele Verbinder (Variante C, Variante D) dickengehobelt oder mit Hilfe einer aus Hartholz gefertigten Hobellehre keilförmig gehobelt (Variante A und Variante B). Die Genauigkeit der Hobellehre spielt eine wesentliche Rolle für die Passgenauigkeit der Verbindung. Vor allem bei größerer Plattenstärke muss der Winkel von Schlitz und Verbinder exakt übereinstimmen.

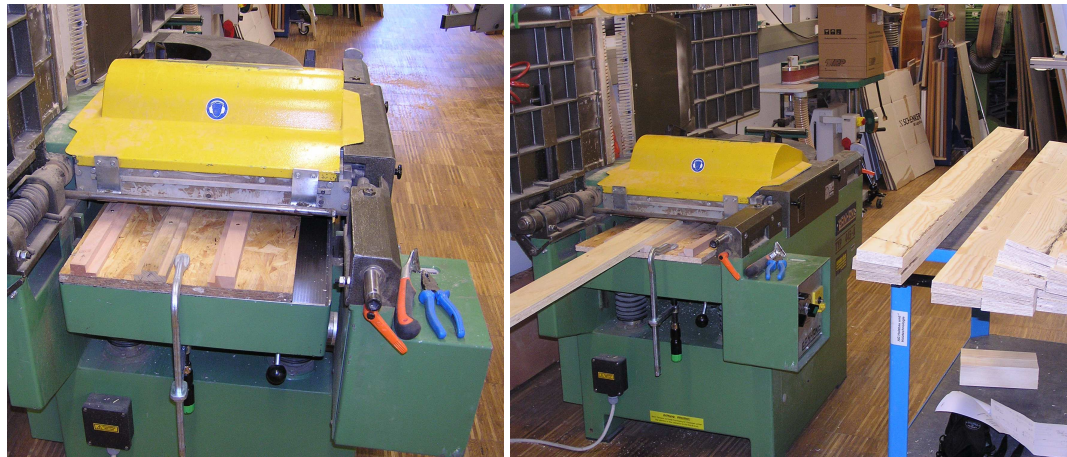
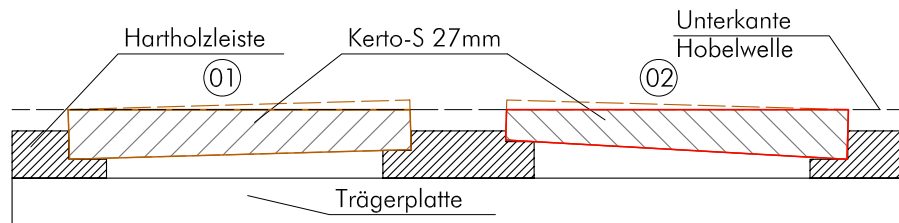


Abb. 5.16 Hobellehre zur Herstellung des keilförmigen Kertoverbinders

Für die Verklebevariante D (profilierter Verbinder) musste noch eine Oberflächenbearbeitung mit der Tischfräse durchgeführt werden. Das Profilmesser für den Fräskopf wurde für die gewünschte Profilierung angefertigt (lt. Abb. 5.6).

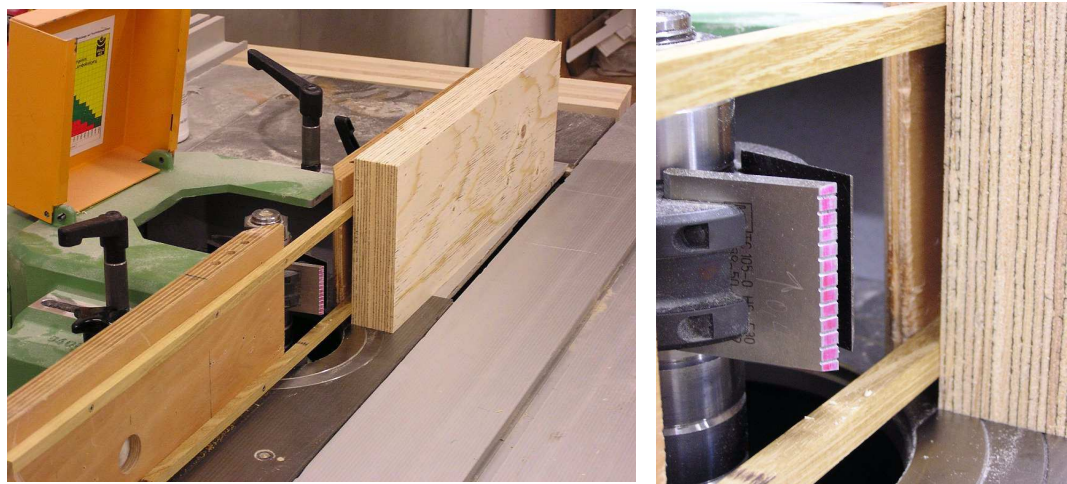


Abb. 5.17 Oberflächenprofilierung mit der Tischfräse

Die Verbinder wurden auf der Formatkreissäge auf Schlitzlänge abgelängt.

Zuletzt wurde die Passgenauigkeit in „trockenem“ Zustand überprüft.

5.1.7.3 Verkleben der Probekörper

Verklebevariante A

Die Verklebung der Probekörper erfolgte mit 1K-PU-Kleber (Purbond HB-S309 und HB-S709)

Am Tag vor der Verklebung wurden die Kertoverbinder lt. Abschnitt 5.1.7.2 gefertigt und die BSP-Platten aus der Klimakammer entnommen. Die BSP-Teile wurden auf Latten aufgelegt und fixiert.

Mit einem Holzfeuchtemessgerät (Gann Hydromette M4050 [55]) wurde die Holzfeuchte durch mehrmaliges Messen an BSP und Kerto ermittelt. Neben der Mindestholzfeuchte von 8% ist auch eine Bauteiltemperatur von 18° und eine Raumtemperatur von 20° einzuhalten [17].

Die verwendeten PU-Kleber brauchen Feuchtigkeit um abzubinden, daher wurde die Oberfläche der Kerto-Verbinder vor dem Verkleben mit wenig Wasser besprüht.

(Anmerkung: Zu viel Wasser wirkt sich negativ auf die Verklebung aus)

Die Kleberapplikation erfolgte mit einer Zahnpachtel auf Schlitz und Kertoverbinder. Für das Aufbringen des Klebers im Schlitz wurde eine eigens dafür angefertigte Zahnpachtel gefertigt, die einen Kleberauftrag von ca. 200 g/m² ermöglicht (siehe Abb. 5.18).



Abb. 5.18 Zahnpachtel zur Beleimung der Schlitze

Obleich sehr sparsam gearbeitet wurde, war der Verbrauch ein Vielfaches der erforderlichen Klebstoffmenge (ca. 140-180 g/m² für 0,1mm Fugenstärke lt. Herstellerangabe[17]). Zu berücksichtigen ist, dass eine nicht zu vernachlässigende Menge beim Einbringen des Verbinders im Schlitz nach unten geschoben wird, und somit verloren wird. Die verbrauchten Klebstoffmengen wurden in einem Dokumentationsblatt eingetragen (Abschnitt C.3). Die Kertoverbinder wurden mit einem planmäßigen Überstand gefertigt, um in jedem Fall die volle Höhe der BSP-Randlamellen zu verkleben.

Das Einbringen der beleimten Kertoverbinder erfolgte von Hand, wobei die Geschwin-

digkeit, mit der der Verbinder eingebracht wurde relativ langsam sein musste, um die Verteilung des Klebers zu ermöglichen. Zuletzt wurden die Kertoverbinder mittels Gummihammer in die Sollage (planmäßiger Überstand 5 mm) gebracht.

Die Mindestpresszeit des HB-S709 Klebers wird mit 3,5 Stunden bei 20° und 65% Luftfeuchtigkeit angegeben [17]. Die Teile dürfen in dieser Zeit nicht mechanisch beansprucht werden. Aufgrund des Herstellungsprozesses an der TU-Graz konnten alle Prüfkörper mindestens 12h ohne Beanspruchung aushärten.



Abb. 5.19 Beleimen von Schlitz und Verbinder mit der Zahnspachtel



Abb. 5.20 Zentrisches Einbringen des Kerto-Verbinders, Einschlagen mit dem Gummihammer

Verklebevariante B

Diese Variante erfolgte analog zu Variante A. Der Unterschied zu Variante A besteht im Winkel des keilförmigen Verbinders ($2,4^\circ$ statt $1,6^\circ$).

Verklebevariante C

Diese Prüfkonfiguration wurde mit Purbond 2K-PU-Gießharz CR-421 verklebt bzw. ver-

gossen. Dafür wurden die Schlitze mit einer Plastikfolie abgedichtet und diese mit einer OSB-Platte mechanisch gesichert. Der Kleber wurde in Kartuschen mit Statikmischrohr geliefert. Das Mischrohr mixt die beiden Komponenten im richtigen Verhältnis während sie durch das Rohr gepresst werden. Die ersten austretenden Hübe müssen entsorgt werden. Die Seitenwände der Schlitze wurden mit Kleber benetzt, danach wurden die abgedichteten Schlitze bis zu einer vorher ermittelten Höhe mit Kleber befüllt. Als nächster Schritt wurden die gehobelten und mit Leisten zentrierten Verbinder in die Schlitze eingebracht, sodass der Kleber an den Seitenwänden hochgedrückt und schlussendlich an der Oberseite austrat. Wichtig war dabei die Kertverbinder zentriert zu halten, um beidseitig gleich starke Klebefugen zu erreichen (planmäßig 2 mm, maximal 3 mm zulässig [18]).

Einfüllen des Klebers

Einbringen des Verbinders

Fertig verklebter Prüfkörper

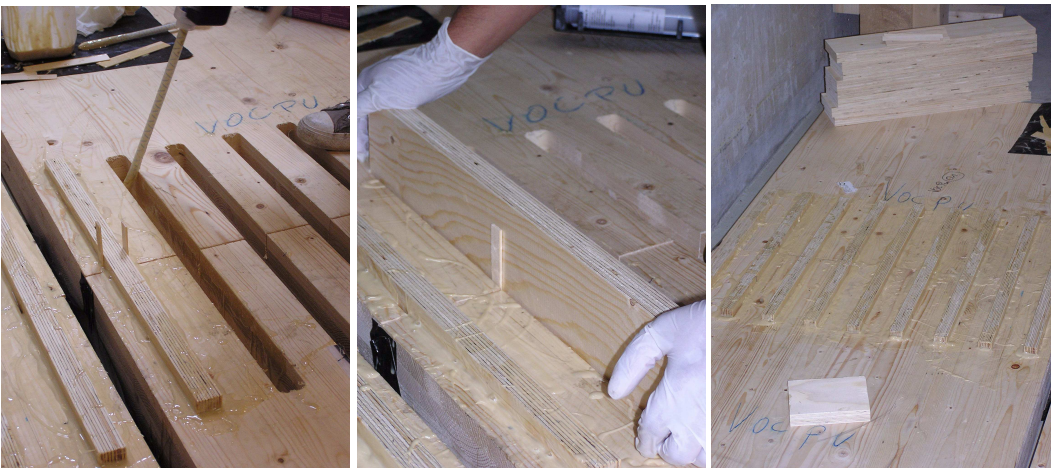


Abb. 5.21 Verklebevariante C: 2K-PU-Gießharz Purbond CR-421

Verklebevariante D

Diese Variante erfolgte analog zu Variante A. Der Unterschied besteht nur in der Geometrie der Verbinder (paralleler profilierter Verbinder).

Abbildung Abb. 5.22 zeigt die verklebten BSP-Platten. Es wurden für jede Prüferserie 2x2 BSP-Platten mit drei Verbindern verklebt.



Abb. 5.22 Prüfserien für die Biegezugversuche nach dem Verkleben

Nach dem Aushärten der verklebten Prüfkörper waren noch weitere Arbeitsschritte notwendig.

5.1.7.4 Auftrennen der Prüfkörper

Aus den verklebten BSP-Platten lt. Abb. 5.22 wurden die Zugprüfkörper mit der Formatkreissäge herausgetrennt. Abb. 5.23 zeigt das Auftrennschema.

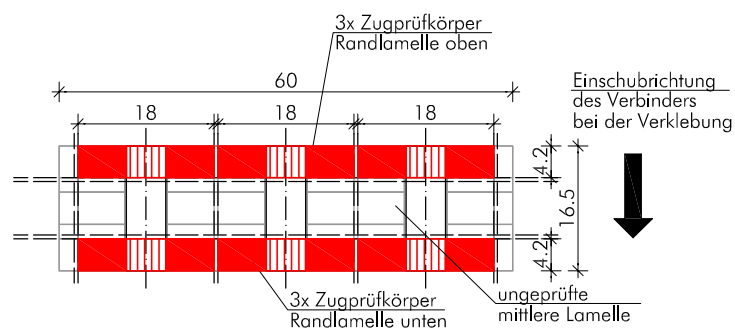


Abb. 5.23 Auftrennschema für die Zugversuche

5.1.7.5 Finish

Nach dem Auftrennen der Platten wurden die Prüfkörper auf eine Dicke von 39 mm anstatt der ursprünglich vorhandenen 42 mm (siehe Abb. 5.24) gehobelt. Die Prüfkörper mussten im Bereich der Lasteinleitung mit Sperrholzplatten verstärkt werden. Für die Stabdübelverbindung wurden die notwendigen Bohrungen (2x12 Stk/Prüfkörper) mit der Tischbohrmaschine durchgeführt.

5.1.8 Zugprüfung der Prüfkörper

5.1.8.1 Prüfaufbau

Die Durchführung der Zugprüfung erfolgte auf der Universalprüfmaschine des Instituts für Holzbau und Holztechnologie an der TU-Graz. Diese kann Druck- oder Zugkräfte im Bereich von 0 bis ± 275 kN auf den Prüfkörper aufbringen. Die Messeinrichtungen entsprechen den Anforderungen nach EN 302-1 bzw. EN 408.

Die Zugkräfte wurden über eine Stabdübel-Verbindung in den Prüfkörper eingeleitet. Von Interesse waren bei den Zugprüfungen nur die Festigkeiten (Bruchkraft), somit wurden keine weiteren Weg- und Dehnungsmesser angebracht.

Abb. 5.24 zeigt den Prüfaufbau für die Zugprüfung.

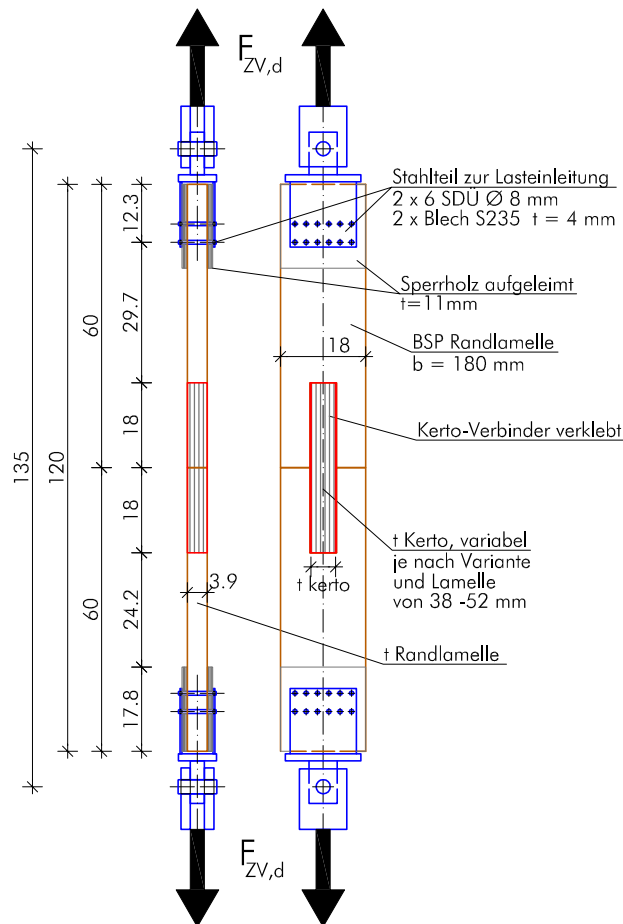


Abb. 5.24 Prüfaufbau Zugprüfung



Abb. 5.25 Prüfaufbau-Zugversuche, Zwick-Universalprüfmaschine

5.1.8.2 Einstellungen der Prüfmaschine

Die Lastaufbringung passierte mit konstanter Geschwindigkeit von 0,7 mm/min bis zum Bruch. Die Geschwindigkeit wurde so gewählt, dass der Bruch bei 300 ± 120 s Belastungsdauer eintrat. Beispielgebend zeigt Abb. 5.26 die Kraft-Weg-Diagramme für die Prüfsérie VB-o.

(Anmerkung: Die Aufzeichnung der Verformung erfolgte durch die Prüfmaschine und nicht über extern angebrachte Wegaufnehmer. Diese Messungen enthalten somit auch die Nachgiebigkeiten der Lasteinleitung).

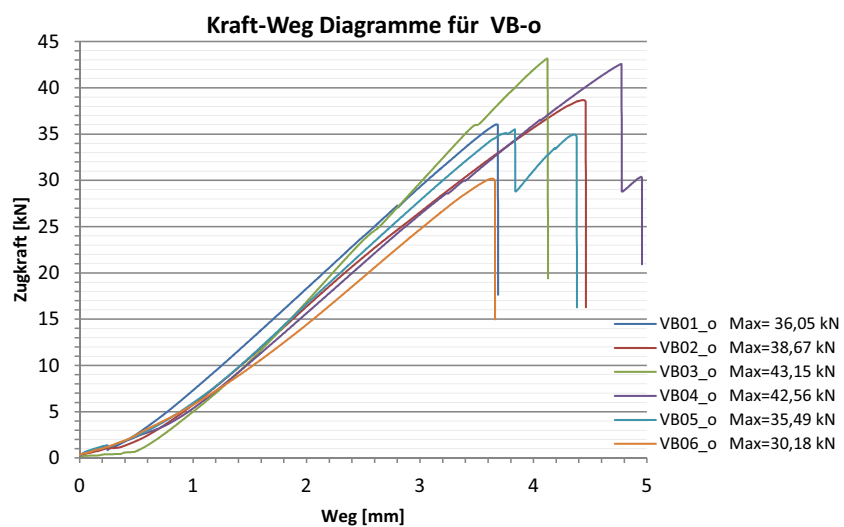


Abb. 5.26 Beispielhaftes Kraft-Weg-Diagramm für die Prüfsérie VB-o

5.1.8.3 Ablauf der Zugprüfungen

Vorbereitung

- Anbringen der Stahlteile zur Lasteinleitung



Abb. 5.27 Montage der Stahlteile zur Lasteinleitung

- Einbau des Prüfkörpers in die Prüfmaschine

Prüfvorgang

- Start und Durchführung der Zugprüfung unter Beobachtung des Bruchvorgangs
- Laststeigerung bis zum Bruch

Dokumentation (Abschnitt C.4)

- Bruchkraft notieren
- Prüfkörper in Bruchstellung halten und Bruchursache feststellen, notieren und anzeichnen
- Fotodokumentation
- Sicherung der Prüfdaten

Demontage

- Entfernen des Prüfkörpers aus der Prüfmaschine
- Entnahme der Darrprobe aus dem geprüften Probekörper

5.1.8.4 Bestimmung der Holzfeuchte

Die Bestimmung der Holzfeuchte wurde nach EN 13183-1 [3] durchgeführt. Dafür wurde ein Stück Holz direkt nach der Zugprüfung aus dem Probekörper geschnitten. Nach einer Wägung erfolgte die Trocknung im Darrschrank und danach wurde der Prüfkörper zur Feuchtebestimmung wiederum gewogen. Die Berechnung der Holzfeuchte erfolgte nach Gl. [5.26].

Feuchteberechnung nach EN 13183-1:

$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad [5.9]$$

mit:

m_1 Masse in Gramm, des Prüfkörpers vor dem Trocknen

m_0 Masse in Gramm, des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand

u der Feuchtegehalt in Prozent

Eine Liste alle Prüfkörper und deren Feuchtegehalt findet sich in Abschnitt C.6.

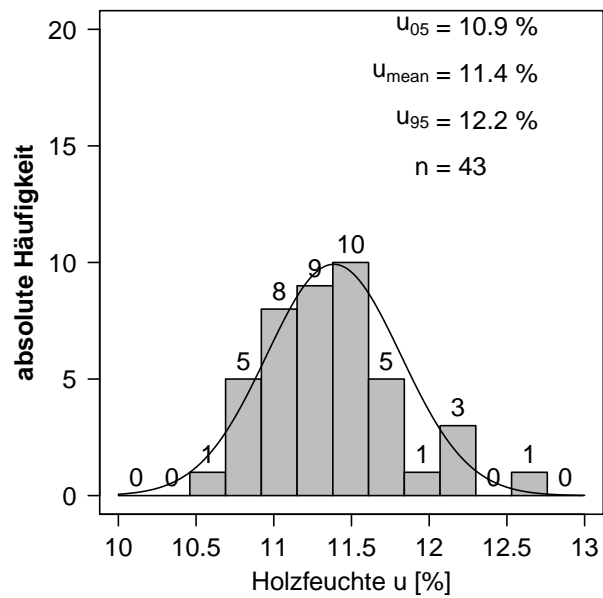


Abb. 5.28 Holzfeuchteverteilung der Zugversuche

5.1.9 Auswertung der Zugversuche

5.1.9.1 Bruchursachen

Die vorwiegende Bruchursache war ein Schubversagen im Bereich der Klebefuge (vorwiegend Holzbruch in Fugennähe).



Abb. 5.29 Vorwiegende Bruchursache Schubversagen im Bereich der Klebefuge (meistens Holzbruch)

Weitere Versagensursachen:

- Kurz vor dem endgültigen Versagen des Prüfkörpers war mehrfach auch ein Versagen des Verbinders auf Querzug festzustellen (Abb. 5.32 a).
- Holzbrüche im Nettoquerschnitt wurden durch lokale Fehlstellen in der Brettlamelle verursacht (Äste oder Buchs, Abb. 5.30 und Abb. 5.32 b).



$$F_{\text{Bruch}} = 34,19 \text{ kN}$$

Abb. 5.30 Mischbruch des Prüfkörpers VB-u-03 (Zug- und Schubversagen)

Die Bruchflächen des Prüfkörpers im Detail:



Abb. 5.31 Bruchflächen des Prüfkörpers VB-u-03

Holzfaserverbelag auf der Bruchfläche



Abb. 5.32 a) Kerto-Querzugversagen



b) Holzbruch an lokaler Fehlstelle (Ast)

5.1.9.2 Analyse der Klebefuge

Vorbemerkung

Die Brettschichtholznorm EN 14080 [8] fordert einen Holzfaserverbruchanteil von 100% für eine Schubfestigkeit $\leq 4,0 \text{ N/mm}^2$.

Nachdem die Prüfkongfiguration für die Schubfestigkeit nach EN 14080; Anhang F, (siehe auch EN 392 [10]) unterschiedlich zu den hier durchgeführten Zugversuchen ist, ist eine direkte Anwendung dieser Anforderung der EN 1480 auf die durchgeführten Zugprüfungen zu hinterfragen.

Insbesondere der Einfluss der Größe der Schubfläche auf die Schubfestigkeit sollte berücksichtigt werden (siehe auch Diplomarbeit von Lackner [25]).

Wissenschaftliche Untersuchungen zur Bestimmung der Schubfestigkeit von verschiede-

nen Klebstoffsystemen wurden an der BOKU Wien durchgeführt. In mehreren Publikationen wurde festgestellt, dass die in der EN 302-1 festgelegte Längszugscherprüfung, die der hier durchgeführten Zugprüfung eher ähnelt, für die Beurteilung der Verklebungsgüte ebenfalls kritisch zu betrachten ist [42], [43].

Bewertung des Klebefugen-Holzbruchanteils

Die Beurteilung der Bruchflächen wurde visuell durchgeführt und beurteilt. Die Beurteilung des 1K-PU-Klebers ist aufgrund seiner Transparenz nicht einfach. Bei zufriedenstellenden Bruchwerten konnte durchwegs ein hoher Holzfaserverbruchanteil festgestellt werden.

Dies trifft insbesondere auf Verklebevariante C (CR-421) zu. Grundsätzlich gilt das auch für die Varianten A und B (keilförmige Verbinder).

Bei Prüfserie VA-u wurde verhältnismäßig oft ein hoher Anteil an Kleberbruch festgestellt. Die Erklärung hierfür dürfte die nicht exakte Geometrie des Kertverbinders sein. Der Winkel des Verbinders war etwas zu steil, deshalb war zu wenig Pressdruck bzw. eine zu dicke Klebefuge bei den Prüfkörpern dieser Serie zu beobachten. Die schlechte Güte der Verklebung spiegelt sich auch in den Bruchkräften und der Festigkeitsermittlung wieder (Tab. 5.2 und Tab. 5.3).

Die Analyse der Bruchflächen für Variante D zeigte, dass eine Verklebung mit einer dünnen Klebefuge (max. 0,3mm für 1-K-PU-Klebesysteme) ohne Pressdruck nicht möglich war. Für die Versuchsserie VD-o bzw. VD-u wurde sehr häufig Klebstoffversagen als Bruchursache festgestellt. Diese Tatsache spiegelt sich in stark streuenden bzw. zum Teil sehr niedrigen Bruchkräften wieder. Abb. 5.33 und Abb. 5.34 zeigen zwei typische Bruchflächen für die Zugversuchsproben.

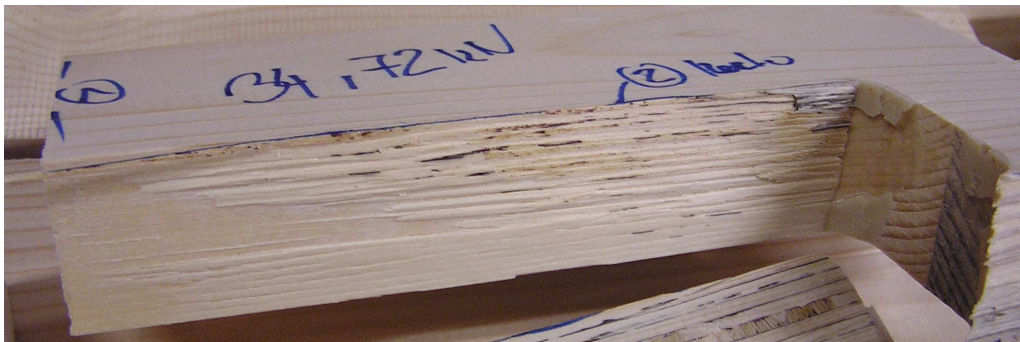


Abb. 5.33 Holzfaserverbelag auf der Klebefläche- Beurteilung als Holzbruch



Abb. 5.34 Vorwiegend Kleberversagen- Beurteilung als Klebstoffversagen

Bewertung der Klebefugen-Stärke der Klebefuge: (Verklebevariante A, B und D)

Die Stärke der Klebefuge darf für die verwendeten 1K-PU-Kleber (HB-S309 bzw. 709) einen maximalen Wert von 0,3 mm (dünne Fuge) erreichen. Trotz sehr sorgfältiger Fertigung der zu verklebenden Einzelteile war es sehr schwierig, diese Fugentoleranz zu erreichen. Tatsächlich konnte eine dünne Fuge nur durch die keilförmige Geometrie der Verbinder, und dem durch Einschlagen der Verbinder erzeugten Pressdruck, erreicht werden. Das Aufschäumen des PU-Klebers erzeugt insbesondere an der freien Oberfläche Lufteinschlüsse die nicht vertauenserweckend auf den Verfasser der Arbeit wirkten. Deshalb wurden einige Klebefugenabschnitte mit einem digitalen Mikroskop betrachtet um ihre Dicke zu messen.

In Abb. 5.35 sieht man beispielhaft einen Versatz in der Klebefuge im Bereich der Stoßfuge bzw. einen Größenvergleich der Fuge zu einem Maßband und einem Fine-Liner. Abb. 5.36 zeigt das Ergebnis zweier im Mikroskop betrachteten Fugenabschnitte des Prüfkörpers VA-u-03. Der Bruchwert des Probekörpers mit 21,6 kN ist relativ gering. Die Bruchfläche weist kaum Holzfaserbelag auf. Die visuelle Betrachtung ergab starke Schwankungen der Stärke der Klebefuge (0,09 mm - 0,3 mm). Ein Zusammenhang zwischen dem Bruchwert und der Stärke bzw. der Schwankungen der Stärke der Klebefuge wird vermutet, obgleich die Werte im Bereich der Zulassung [17] liegen.

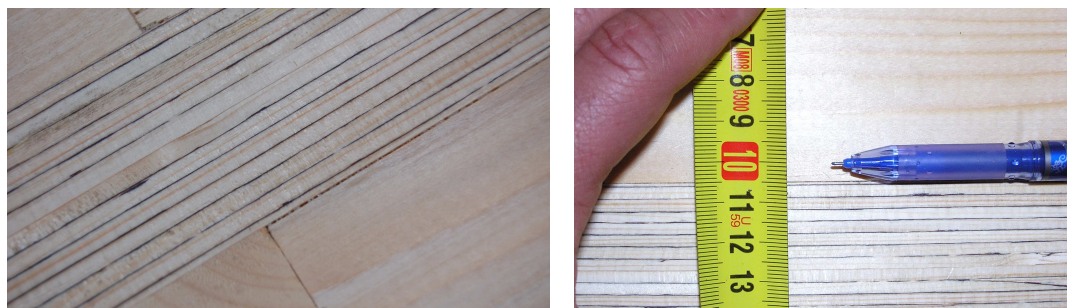


Abb. 5.35 Klebefugenanalyse visuell

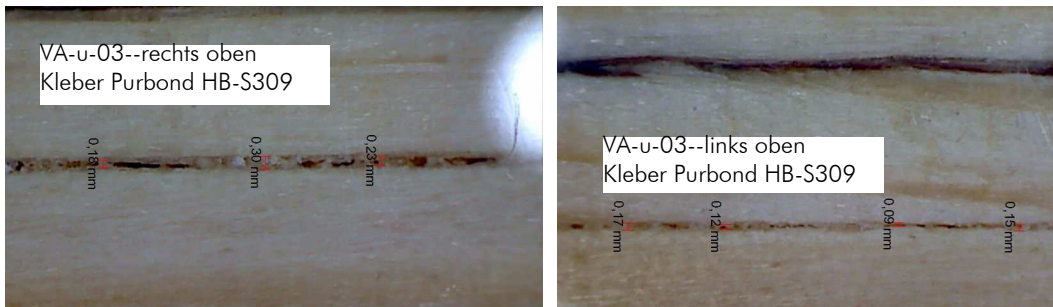


Abb. 5.36 Klebefugenstärke unter Mikroskop

Delaminierungsprüfung

Aufgrund der Unsicherheit über die Güte der Verklebung der Zugversuchsprobekörper wurde eine Delaminierungsprüfung der ungeprüften mittleren Lamellen der Prüfkörper durchgeführt (siehe Abb. 5.23). Die Prüfserien der Verklebevariante D (profilierter Verbinder) wurden aufgrund der schlechten Ergebnisse der Zugprüfung nicht auf Delaminierung geprüft.

Die Delaminierungsprüfung wurde von der Firma Purbond in der Schweiz durchgeführt.

Die geprüften Bauteile wurden als sehr beständig gegen Delaminierung eingestuft.

Der gesamte Prüfbericht liegt in Abschnitt C.5 bei.

5.1.9.3 Auswertung der Festigkeiten

Vorbemerkungen

Die Auswertung der Zugversuche erfolgte mit einem institutseigenen Statistik-Auswerter im Programm MS-Excel. Die Bruchwerte der Probekörper (Abschnitt C.4) wurden nach den verschiedenen Prüfserien (Tab. 5.1) statistisch ausgewertet. Als Ergebnis wurde ein 5%- und 95%-Quantilwert für jede Prüfserie abgeschätzt. Diese Werte beruhen auf einer empirischen Verteilung, welche im Programm MS-Excel implementiert ist. Mit diesen Werten wurden die Schubfestigkeiten für jede Serie errechnet.

In der Auswertung wurden einige Prüfkörper aufgrund von Fertigungsfehlern ausgeschieden. Dies betrifft die Prüfkörper VA-o-01, VA-u-01, VB-u-03, VD-o-04 und VD-u-04.

Die verwendeten Prüfdaten der statistischen Auswertung für die einzelnen Prüfserien finden sich Abschnitt C.6.

Für die graphische Darstellung der Festigkeitswerte wurden BOX-Plots erstellt. Abb. 5.37 erklärt diese Darstellungart (aus [28]).

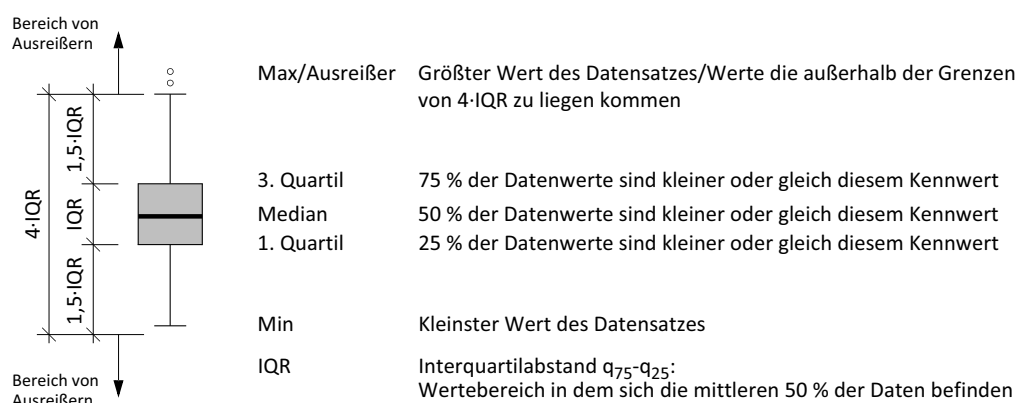


Abb. 5.37 BOX Plot Darstellung

Die graphischen Darstellungen wurden mit dem Statistik-Programm R [56] berechnet und erstellt. Informationen zum Programm finden sich in [27], [40] und [41].

Serienauswertung der Bruchkräfte

Tab. 5.2 zeigt die Serienauswertung der Bruchkräfte. Dargestellt ist der Variationskoeffizient und die Schätzwerte der 5%- und 95%-Quantile.

Serie	Anzahl der Prüfkörper n	COV [%]	Min [kN]	Mean [kN]	Max [kN]	F ₀₅ 5%-Quantil [kN]
VA-o	5	10,3	32,50	35,57	40,34	32,55
VA-u	5	17,9	21,59	26,85	32,29	21,92
VB-o	6	12,9	30,18	37,68	43,15	31,51
VB-u	5	15,0	30,77	38,18	46,42	31,72
VC-o	6	11,6	26,46	32,94	36,36	27,44
VC-u	6	6,2	31,88	34,51	37,12	32,11
VD-o	5	29,7	14,48	26,68	35,03	16,61
VD-u	5	40,6	13,49	29,44	37,78	14,03

Tab. 5.2 Zugversuche, Auswertung der Prüfserien, Bruchkräfte

Serienauswertung der Schubfestigkeit

Die Berechnung der Schubfestigkeit erfolgte mit den 5%- und 95%-Quantilwerten für die

Versuchserien nach Tab. 5.2.

Da die vorhandene Schubfläche der Zugprüfkörper etwas kleiner als die geplante war, wurde diese für die Auswertung der Spannungen auf die tatsächliche Größe korrigiert. Die Schlitzlänge wurde um den Radius des Fingerfräasers zu kurz gefräst. Somit verringert sich die Einbindelänge der Verbinder von geplanten 180 auf 170 mm.

Die Ermittlung der Schubspannung in der Klebefuge für den Bruchwert F_{05} der Serie VA-o wird beispielhaft gezeigt.

Die Schubspannung in der Klebefuge errechnet sich zu.

$$\tau_{\text{Klebefuge}} = \frac{F_{05}}{A_{\text{schub}}} = \frac{32,55 \times 10^3}{13260} = 2,45 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [5.10]$$

mit $A_{\text{schub}} = 2 \times t_1 \times l_{\text{vorh}} = 2 \times 39 \times 170 = 13260 \text{mm}^2$

- mit: $\tau_{\text{Klebefuge}}$ charakteristische Schubspannung in der Klebefuge
- A_{schub} vorhandene Schubfläche
- F_{05} charakteristischer Bruchwert der Prüfserie VA-o lt. Tab. 5.2

Analog wurde für alle weiteren Prüfserien vorgegangen.

Tab. 5.3 zeigt die Serienauswertung der Schubspannung. Dargestellt sind die Spannungen ($f_{v,05}$, $f_{v,\text{mean}}$ bzw. $f_{v,95}$) auf Basis der Schätzwerte der 5%-Quantile der Bruchwerte (F_{05}). Die Schubfläche ist für alle Prüfserien mit 13260mm^2 errechnet.

Serie	F_{05} 5%-quantil [kN]	$f_{v,05}$ [N/mm ²]	$f_{v,\text{mean}}$ [N/mm ²]	$f_{v,95}$ [N/mm ²]
VA-o	32,55	2,45	2,68	3,02
VA-u	21,92	1,65	2,02	2,42
VB-o	31,51	2,38	2,84	3,24
VB-u	31,72	2,39	2,88	3,39
VC-o	27,44	2,07	2,48	2,89
VC-u	32,11	2,42	2,60	2,80
VD-o	16,61	1,25	2,01	2,60
VD-u	14,03	1,06	2,22	2,73

Tab. 5.3 Zugversuche, Auswertung der Prüfserien, Schubspannung

Tab. 5.4 zeigt einen Vergleich der versuchstechnisch ermittelten charakteristischen Fes-

tigkeiten $f_{v,05}$ mit den charakteristischen Schubkennwerten der Kertoplatte $f_{v,k,Kertoplatte}$ ($= 2,3 \text{ N/mm}^2$). Dargestellt ist die prozentuale Abweichung jeder Prüfserie zu diesem Festigkeitswert.

Serie	$f_{v,05}$ [N/mm ²]	Abweichung zu $f_{v,k,Kerto} = 2,3 \text{ N/mm}^2$ [%]
VA-o	2,45	+6,7
VA-u	1,65	-28,1
VB-o	2,38	+3,3
VB-u	2,39	+4,0
VC-o	2,07	-10,0
VC-u	2,42	+5,3
VD-o	1,25	-45,5
VD-u	1,06	-54,0

Tab. 5.4 Zugversuche, Auswertung der Prüfserien, Schubspannungsvergleich

Eine auffallend große Abweichung zu den charakteristischen Schubfestigkeitswerten weisen die Serien VD-o, VD-u und VA-u auf.

Die Verklebung der Varianten D (profilierter Verbinder) hatte nicht funktioniert. Dies zeigte die Analyse der Bruchflächen ebenso deutlich wie die erreichten Festigkeiten.

Für Variante VA-u wurde festgestellt, dass der Kertoverbinder zu steil gefertigt wurde. Die Folge war ein zu geringer Pressdruck und eine zu dicke Klebefuge in der unteren Randlamelle. Die abweichenden Ergebnisse für Variante VA-u im Vergleich zu den Serien VA-o, VB-o und VB-u verdeutlichen die Notwendigkeit einer sehr präzisen Fertigung bei Verwendung von 1K-PU-Klebern.

Abb. 5.38 zeigt die statistische Auswertung der Schubfestigkeit. Jede Serie wurde in Form eines Box-Plots dargestellt. Diese Darstellung wurde im Statistik Programm R erstellt.

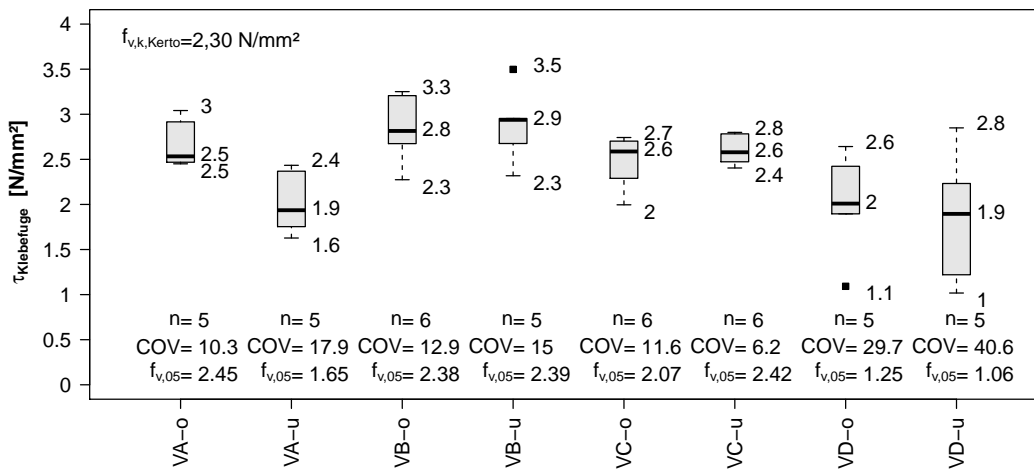


Abb. 5.38 Ergebnis der statistischen Auswertung der Zugversuche bezüglich der Schubfestigkeit.

5.1.10 Schlussfolgerungen aus den Zugversuchen

Folgende Erkenntnisse und Schlussfolgerungen wurden für die weitere Vorgehensweise aus den Biegezugversuchen gewonnen:

- Die Verklebung der Verbindung ist mit einer präzisen Fertigung aller Verbindungsteile möglich. Geometrieabweichungen wirken sich stark auf die Festigkeiten aus (siehe Prüferie VA-u).
- Ein Pressdruck ist für die Verklebung mit einem 1K-PU-Kleber unbedingt notwendig. Der keilförmige Querschnitt des Verbinders wird weiterverfolgt.
- Die zugelassene Klebefugenstärke bei den 1K-PU-Klebern muß unbedingt eingehalten werden.
- Alternativ kann auch mit 2K-PU-Systemen mit einer geplanten Fugenstärke von 2 mm verklebt werden. Die Fugen müssen für die Verklebung aufwändig abgedichtet werden.

Weitere Vorgehensweise für die Biegeversuche:

- Weiterverfolgt wird für die Biegeversuche die Verklebevariante A (Verbinder keilförmig flach).
- Variante A wurde aufgrund des flacheren Winkels und dem dadurch größeren Restquerschnitt des Verbinders in der unteren Randlamelle gegenüber Variante B bevorzugt.
- Verklebevariante C (paralleler Verbinder fugenfüllend) wird trotz aufwändiger Herstellungsweise als „sicher funktionierende“ Variante im Zuge der Biegeversuche weiterverfolgt.
- Variante D wird aufgrund der schlechten Ergebnisse nicht weiterverfolgt.

- Die Biegezugversuche stellen eine isolierte Belastung der Klebefuge der Randlamelle dar. Im Verbindungssystem haben lokale Fehlstellen des Holzes weniger Einfluß auf die Festigkeit als bei der durchgeführten Biegezugprüfung. Diese Annahme bestätigt die Auswertung der Schubspannungen der Biegeversuche (Abschnitt 5.2.7.5).
- Für die Bemessung der Biegeversuche wird eine Schubfestigkeit der Verklebung von mindestens $2,3 \text{ N/mm}^2$ angenommen. Dieser Wert entspricht der charakteristischen Schubfestigkeit des Kerto-Verbinders.

5.2 Biegeversuche Verbindungsplatten

5.2.1 Vorbemerkung Biegeversuche

Die Umsetzung der Struktur „free_climber“ im Rahmen des FWF-Projekts wurde aus verschiedenen Gründen verworfen. Zur Realisierung sollte jedoch der Entwurf „Kobra“ kommen. Die Vordimensionierung für „Kobra“ ergab eine erforderliche Plattenstärke von 95mm. Die Biegeversuche werden mit diesem Plattentyp durchgeführt.

Ziel der Biegeversuche war die versuchstechnische Ermittlung der Biegefestigkeit der Verbindung zur Bemessung des FWF-Prototypen „Kobra“. Weiters sollte auch das grundsätzliche Tragverhalten der Verbindung (Drehfedersteifigkeit) und ein eventuell vorhandener Systemeffekt untersucht werden.

Aufgrund der Anforderungen der geplanten Tragstruktur wurden Konfigurationen mit nicht faserparallel eingeklebten Verbindern (BSP-Decklage zu Kertoverbindern) gefertigt und geprüft. Weitere Varianten sollten den Einfluss der Einschubrichtung der Kertoverbinder, und die Verbindung der Platten auf Gehrung auf die Biegefestigkeit zeigen.

5.2.2 Material Biegeprüfkörper

5.2.2.1 BSP-Platten

Die BSP-Platten wurden als Standardware bei der Firma KLH bestellt. Die genaue Plattenbezeichnung lautet KLH-95-5s-DQ-NSI. Der Plattenaufbau besteht aus 5 Schichten zu 19mm. Die Decklage der Platten verläuft parallel zur Spannrichtung. Ein genauer Abundplan liegt im Abschnitt B.3 bei.

5.2.2.2 Kerto-Verbinder

Als Kertoverbinder wurden Platten mit 27 mm Stärke 1820 mm Länge und 225 mm Breite der Firma Finnforest verwendet.

5.2.2.3 Kleber

Die Prüfkörper wurden mit PU-Klebern der Firma Purbond verklebt. Hauptsächlich wurden die 1K-PU-Kleber HB-S609 und HB-S709 verwendet. Weiters wurde eine Konfiguration mit CR-421, einem 2K-PU-Gießharz vergossen.

Allgemeine Informationen über die verwendeten Materialien finden sich in Kapitel 2.

5.2.3 Vorbemessung Biegeversuche

5.2.3.1 Baustatisches Modell

Abb. 5.39 zeigt das baustatische Modell und die Abmessungen für den Vierpunkt-Biegeversuch. Die Stützweite wurde in Anlehnung an die Prüfnorm EN 408:2009 [4] mit ca. $18 \cdot h$ gewählt. Dieses Verhältnis sollte auch Brüche auf Rollschub vermeiden. Die Lasteinleitung wurde bewusst nicht in die Drittelpunkte gelegt, sondern nach außen verschoben, um im Bereich der Verbindung sicher eine konstante Biegebeanspruchung zu erreichen, bzw. im querkraftfreien Abschnitt des Prüfkörpers zu sein.

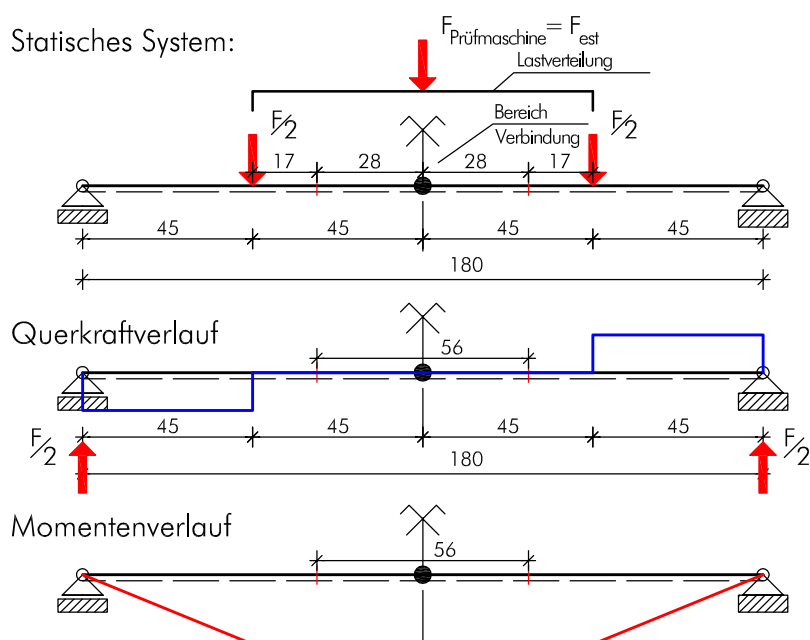


Abb. 5.39 Baustatisches Modell zur Vorbemessung der Biegeprüfplatten

5.2.3.2 Vorbemessung der Verbindung

Allgemeine Informationen zum ingenieurmäßigen Modell der Verbindung und der Vorbemessung finden sich in Kapitel 4. An dieser Stelle wird die Bemessung der Biegeprüfplatten mit Rechenwerten gezeigt.

Die Probekörper der Biegeversuchsreihe wurden mit Kerto-S Verbindern der Stärke 27 mm ausgeführt. Somit ergab sich die Nachweisführung der Verbindung wie im folgenden Abschnitt gezeigt.

Der verwendete Plattentyp ist in Abb. 5.40 dargestellt.

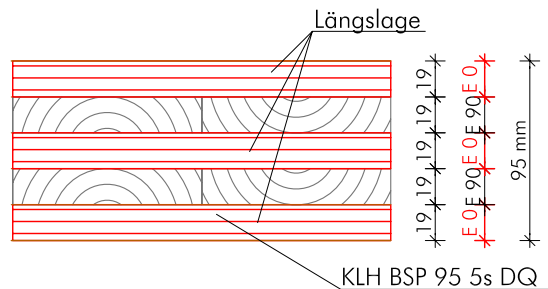


Abb. 5.40 Plattenaufbau KLH-95-5s-DL

Die verwendeten Steifigkeiten der Materialien finden sich in Kapitel 2.
Die Festigkeiten wurden aus Kapitel 4, Tab. 4.1 entnommen.

Um das Tragmoment der Verbindung zu berechnen ist die Kenntnis des Tragmoments der ungeschwächten BSP-Platte notwendig:

$$M_{rd, clt, brutto} = \frac{f_{m,d} \times K_{clt}}{z \times E_{(z)}} = \frac{28,9 \times 6,845 \times 10^{11}}{47,5 \times 12000} \times 10^{-6} = 34,7 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} \quad [5.11]$$

mit:	$f_{m,d}$	Designwert der Biegefestigkeit von BSP
	z	Randabstand von der neutralen Faser
	$E_{(z)}$	Elastizitätsmodul abhängig vom Abstand z
	K_{clt}	Biegesteifigkeit der BSP-Platte (Abschnitt 2.1.7)

Die Ermittlung des Abminderungsfaktors f für die Verbindung wird in Abschnitt 4.2.2.1 gezeigt. Der theoretische Faktor f wurde für die volle Ausnutzung des BSP-Nettoquerschnitts und des Kerthoverbinders auf Biegung mit 0,68 errechnet.

Dieser Wert ergibt eine erforderliche Anzahl von $n=12$ Stück Verbinder (Verbinder mit 27mm Stärke) pro einem Meter Verbindungsbreite. Bei einer Wahl von 12 Stück Verbinder pro Meter ergibt sich ein Verbinderabstand von $e=8,33\text{cm}$.

Dieser Abstand wurde aus Herstellungsgründen und als zu gering erachtet und auf $e=9\text{cm}$ erhöht (Abb. 5.41). Der Faktor f für die Biegeversuche wird mit 0,61 gewählt.

Die Momententragfähigkeit der Verbindung ermittelt sich zu:

$$M_{rd, VB} = M_{rd, clt, brutto} \times f = 34,7 \times 0,61 = 21,2 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} \quad [5.12]$$

mit: f = Abminderungsfaktor für die Verbindung,
Herleitung siehe Abschnitt 4.2.2.1

5.2.3.3 Nachweisführung für die Verbindung:

Für die Nachweisführung der Verbindung muss vorab die erforderliche Anzahl der Verbinder errechnet werden. Die Ersatzdicke t^* aller Kertoverbinder für den ein Meter breiten Plattenstreifen der teiltragfähigen Momentenverbindung errechnet sich zu:

$$t^* = \frac{6 \times M_{rd,VB}}{f_{md,Kerto} \times h_{clt}^2} = \frac{6 \times 21,9 \times 10^6}{48,0 \times 95^2} = 294 \text{ mm} \quad [5.13]$$

Daraus ergibt sich erforderliche Anzahl an Verbindern:

$$n_{erf} = \frac{t^*}{t_{Kerto}} = \frac{294}{27} = 10,9 \text{ Stk} \rightarrow 11 \text{ Stk} \quad [5.14]$$

mit: t_{Kerto} Stärke des gewählten Kertomaterials

Somit ergibt sich eine Nettobreite für den BSP-Querschnitt zu:

$$b_{clt,netto} = 1000 - (11 \times 27) = 703 \text{ mm} \quad [5.15]$$

Nachweis A: Biegespannung im BSP-Nettoquerschnitt

Berechnung der Biegespannung im BSP-Nettoquerschnitt:

$$\sigma_{b,clt,netto,(z),d} = \frac{M_{rd,VB}}{K_{clt,netto}} \times z \times E_{(z)} = \frac{21,2 \times 10^6}{0,703 \times 6,845 \times 10^{11}} \times 47,5 \times 12000 = 25,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [5.16]$$

mit:

$K_{clt,netto}$ Biegesteifigkeit des Nettoquerschnitts

Nachweis der Biegespannung im Nettoquerschnitt:

$$\sigma_{b,clt,netto,(z),d} \leq f_{m,d,BSP} \quad [5.17]$$

$$25,0 \leq 28,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Nachweis B: Biegespannung im Kertoverbinder

Berechnung der Biegegrandspannung in des Kertoverbinders:

$$\sigma_{b,Verbinder,d} = \frac{M_{rd,VB}/n_{Kerto}}{I_{Verbinder}} \times z_{Verbinder} = \frac{(21,2 \times 10^6)/11}{1929094} \times 47,5 = 47,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [5.18]$$

$$\text{mit } I_{Verbinder} = \frac{t_{Verbinder} \times t_{clt}^3}{12} = \frac{27 \times 95^3}{12} = 1929094 \text{ mm}^4$$

mit:

n_{Kerto}	Anzahl der Kertoverbinder in einem 1 m breiten Plattenstreifen
$I_{\text{Verbinder}}$	Trägheitsmoment des Verbinders
$z_{\text{Verbinder}}$	Abstand zur Randfaser des Kertoverbinders

Nachweis der Biegespannung im Kertoverbinder:

$$\sigma_{b, \text{Verbinder}, d} \leq f_{m, d, \text{Kerto}} \quad [5.19]$$

$$47,5 \leq 48,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Nachweis C: Nachweis der Schubspannung in der Randlamelle

Die Normalkraft in der Randlamelle ermittelt sich nach Gl. [5.20].

$$F_{1,d} = \frac{M_{rd, VB}}{(t_{clt} - t_1)} = \frac{21,2 \times 10^6}{(95 - 19)} = 278947 \text{ N} = 279,0 \text{ kN} \quad [5.20]$$

mit $F_{1,d}$ = Zugkraft in der Randlamelle

t_1 = Schichtdicke der Randlamelle

t_{clt} = Plattenstärke BSP

Die erforderliche Einbindelänge l_{erf} errechnet sich zu:

$$l_{\text{erf}} = \frac{F_{1,d}}{2 \times t_1 \times n_{\text{Kerto}} \times f_{v, d, \text{Verklebung}}} = \frac{279,0 \times 10^3}{2 \times 19 \times 11 \times 2,4} = 278 \text{ mm} \quad [5.21]$$

mit: $f_{v, k, \text{Verklebung}} = 2,39 \text{ N/mm}^2$ Ergebnis der Schubfestigkeit der Verklebung aus den Zugversuchen

Anmerkung:

Die Auswertung der Zugversuche lieferte eine charakteristische Schubfestigkeit der Klebefuge von $f_{v, k} = \text{ca. } 2,4 \text{ N/mm}^2$ (Tab. 5.3).

Für die Biegeversuchsplatten wurde eine Einbindelänge von 280 mm gewählt. Somit ergibt sich eine Überschreitung im Schubspannungsnachweis ($f_{v, k, \text{Kerto}} = 2,3 \text{ N/mm}^2$), welche durch die versuchstechnisch ermittelte Festigkeit toleriert werden kann.

Der Schubspannungsnachweis in der Randlamelle:

$$\tau_d = \frac{F_{1,d}}{A_{\text{scher}}} \leq f_{v,d, \text{Kertoverbinder}} \quad [5.22]$$

$$\tau_d = \frac{279,0 \times 10^3}{11 \times 2 \times 280 \times 19} = 2,38 > 2,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

5.2.3.4 Ergebnis der Bemessung

Abb. 5.41 zeigt das Ergebnis der Vorbemessung der Biegeprüfplatten für einen 1 m breiten Plattenstreifen.

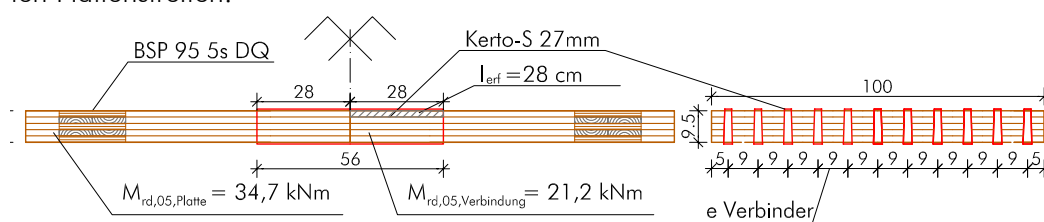


Abb. 5.41 Bemessungsergebnis für die Biegeprüfplatten für 1,0 m Breite

5.2.3.5 Erwartete Kräfte

Nachfolgend wird die Berechnung der zu erwartenden Kräfte (F_{est} lt. EN 26891 [5]) für das Versagen der Verbindung erläutert. Aufgrund der Streuung des Grundmaterials werden auch die zu erwartenden Tragfähigkeiten einer Streuung unterworfen sein. Eine Abschätzung der maximal aufzubringenden Kräfte ist für die Konfiguration der Prüfmaschine unbedingt notwendig, und erfolgte über die Berechnung der 95%-Quantilwerte für Versagen der Verbindung. Dafür wurde eine Abschätzung des Variationskoeffizienten (COV) vorgenommen. Ein Wert von 12% wurde dafür gewählt.

Das Tragmoment der ungeschwächten BSP-Platte mit einem Meter Breite beträgt lt. Gl. [5.11] 34,7 kNm/m.

Der 95%-Quantilwert für das Tragmoment der Verbindung wurde unter der Annahme einer normalverteilten Grundgesamtheit abgeschätzt.

$$M_{rd;clt;95} = M_{rd;clt;05} / (1 - 1,645 \times \text{COV}) \times (1 + 1,645 \times \text{COV}) \quad [5.23]$$

mit $\text{COV} = 0,12$

Die erwarteten Kräfte für die unterschiedlichen Biegeprüfkonfigurationen (unterschiedliche Breiten lt. Abschnitt 5.2.4) sind in Tab. 5.5 dargestellt.

Mit F_{05} bzw. F_{95} sind die von der Prüfmaschine einzuleitenden minimalen bzw. maximalen

len Kräfte bezeichnet. Sie errechnen sich aufgrund der Geometrie und dem statischen System lt. Abb. 5.39 zu:

$$F_{05} = \frac{2 \times M_{rd,05}}{0,45} [\text{kN}]$$

$$F_{95} = \frac{2 \times M_{rd,95}}{0,45} [\text{kN}]$$
[5.24]

Mit F_{est} werden die zu erwartenden minimalen bzw. maximalen Kräfte für das Versagen der Verbindung bezeichnet:

$$F_{est,05} = F_{05} \times f$$

$$F_{est,95} = F_{95} \times f$$
[5.25]

mit: $f=0,61$ lt. Kapitel 4, Abb. 4.2.2.1

Bis zu einer Belastung von $0,4 \times F_{est}$ wird die Wegmessung durchgeführt. Die zu erwartenden Kräfte sind in den Zeilen 7 und 8 in Tab. 5.5 dargestellt.

	Prüfkörperbreite Anzahl der Verbinder	1,0 m kein Verbinder	0,8 m 9 Verbinder	0,265 m 3 Verbinder	0,085 m 1 Verbinder
1	$M_{rd,BSP,brutto,05}$ [kNm/m]	34,7	27,8	9,20	2,95
2	$M_{rd,BSP,brutto,95}$ [kNm/m]	51,8	41,4	13,7	4,40
3	F_{05} [kN]	154	123	40,8	13,1
4	F_{95} [kN]	230	184	60,9	19,6
5	$F_{est,05}$ [kN]	94,0	75,0	24,9	8,00
6	$F_{est,95}$ [kN]	140	112	37,1	12,0
7	$F_{est,05} \times 0,4$ [kN]	37,6	30,0	9,96	3,20
8	$F_{est,95} \times 0,4$ [kN]	56,0	44,8	14,8	4,80

Tab. 5.5 Erwartete Kräfte für die Biegeprüfungen

Die Werte für $F_{est,95}$ (rot) wurden im Zuge der Biegeprüfung nochmals auf das tatsächliche Tragniveau korrigiert. F_{est} darf eine maximale Abweichung von 20% zum Mittelwert der Höchstlasten der schon durchgeführten Prüfungen aufweisen.[5]

Die endgültigen Werte für F_{est} sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Prüfkörperbreite	$F_{est,95}$ errechnet	$F_{est,95}$ korrigiert
800 mm	112 KN	112,5 KN

Tab. 5.6 F_{est} Bruchwerte für die Verbindungsplatten lt. EN 26 891

Prüfkörperbreite	$F_{est,95}$ errechnet	$F_{est,95}$ korrigiert
265 mm	37,1 KN	40,0 KN
85 mm	12,0 KN	11,0 KN

Tab. 5.6 F_{est} Bruchwerte für die Verbindungsplatten lt. EN 26 891

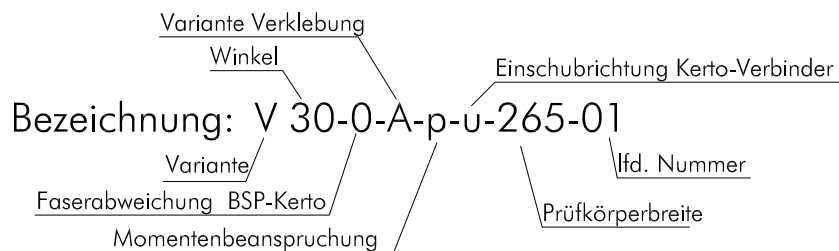
5.2.4 Prüfkonfigurationen

Wie schon eingangs beschrieben, wurde es aufgrund der Vielzahl an Einflußparametern auf die Biegefestigkeit erforderlich unterschiedliche Prüfkonfigurationen zu entwickeln. Hierbei muss angemerkt werden, dass im Rahmen dieser Biegeversuchsreihe nur eine Abschätzung des Einflusses dieser Parameter gemacht werden kann. Eine genaue Quantifizierung bzw. Angabe von Bemessungswerten kann im Rahmen dieser Masterarbeit nicht ermittelt werden.

Bei der Entwicklung der Prüfkonfigurationen wurde das Ziel verfolgt, möglichst viele Einflußfaktoren in ihrer Größenordnung beurteilen zu können, um eine Bemessung für den Prototypen und eventuell erforderliche Abminderungen vornehmen zu können.

Ausgehend von diesen Überlegungen wurden 9 verschiedene Biegeprüfkonfigurationen für die Verbindungsplatten entwickelt und geprüft. In weiterer Folge werden die einzelnen Konfigurationen genauer vorgestellt. An dieser Stelle wird ein Überblick über die Bezeichnungen der Prüfkörper und deren Bedeutung gegeben.

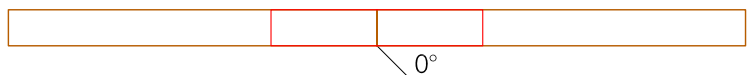
5.2.4.1 Bezeichnung der Prüfkörper



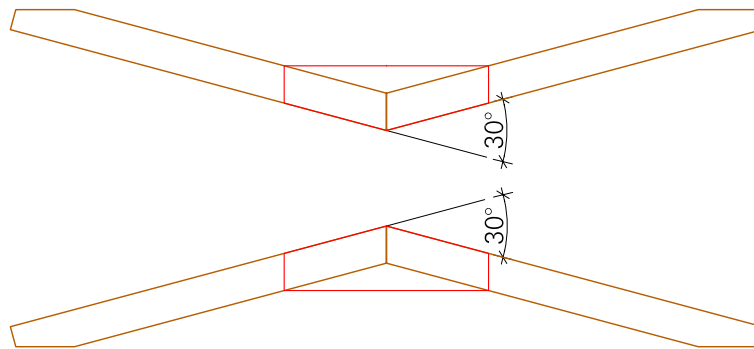
Möglichkeiten der Bezeichnung:

- Variante: Variante
- Winkel: Gehrungswinkel der Platten:

0°:



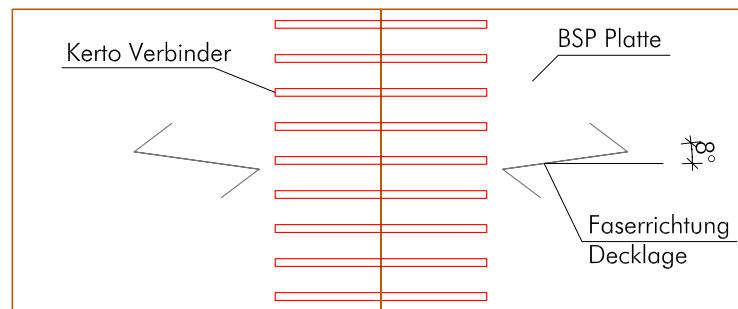
30°:



- Faserabweichung von Kertoverbinder zur Decklage der BSP-Platte:

0.....Kertoverbinder und Decklage faserparallel

08...8° Faserabweichung lt. nachfolgender Skizze



- Variante Verklebung in Anlehnung an die Zugversuche

A.....PU-Kleber Purbond HB-S709 oder HB-S609

C.....PU-Kleber Purbond 2K-PU
CR-421-Gießharz

- Momentenbeanspruchung: p.....positiv
n.....negativ

- Einschubrichtung Kertoverbinder:
u.....von unten
o.....von oben

- Prüfkörperbreite: 085 mm
265 mm
800 mm

- Rand Nähere Informationen unter Abschnitt 5.2.5

Im Anschluss werden die getesteten Prüfkörper und das jeweilige Prüfziel einzeln dargestellt. Die Abbundpläne mit genauen Abmaßen befinden sich als Beilage in Abschnitt B.3.

5.2.4.2 Prüfkörperarten-Prüfserien

V0-0-A-p-u-085 und V0-0-A-p-u-085-Rand:

Kleber Variante A: 1K-PU

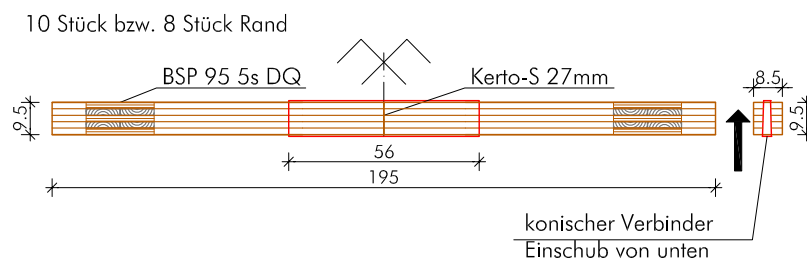


Abb. 5.42 Prüfsreihe V0-0-A-p-u-085 und V0-0-A-p-u-085-Rand

Ziele:

- Biegefestigkeit des Einzelverbinders
- Federsteifigkeit der Verbindung
- Ermittlung eines möglichen Systemeffekts

V0-0-A-p-u-265:

Kleber Variante A: 1K-PU

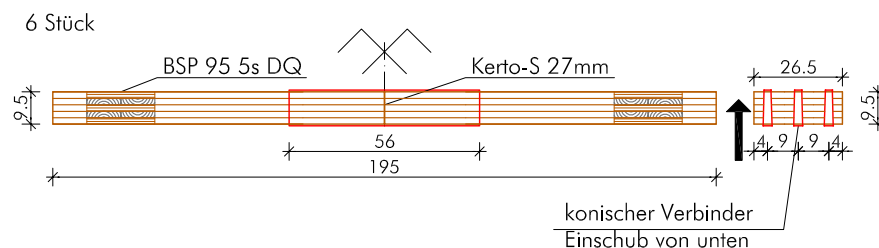


Abb. 5.43 Prüfsreihe V0-0-A-p-u-265

Ziele:

- Biegefestigkeit von drei Verbindern
- Federsteifigkeit der Verbindung
- Ermittlung eines möglichen Systemeffekts

V0-0-A-p-u-800:

Kleber Variante A: 1K-PU

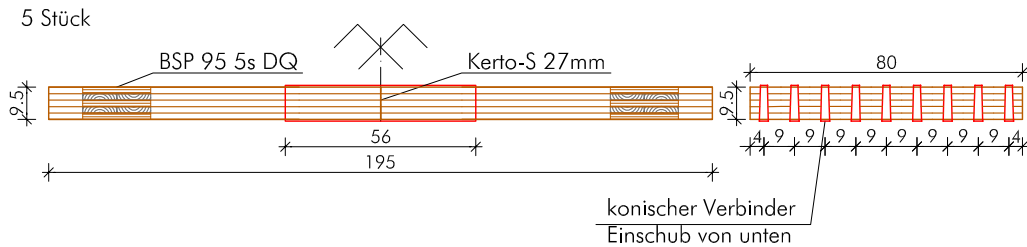


Abb. 5.44 Prüfsérie V0-0-A-p-u-800

Ziele:

- Biegefestigkeit von mehreren Verbindern
- Federsteifigkeit der Verbindung
- Ermittlung eines möglichen Systemeffekts

V0-0-A-p-o-800:

Kleber Variante A: 1K-PU

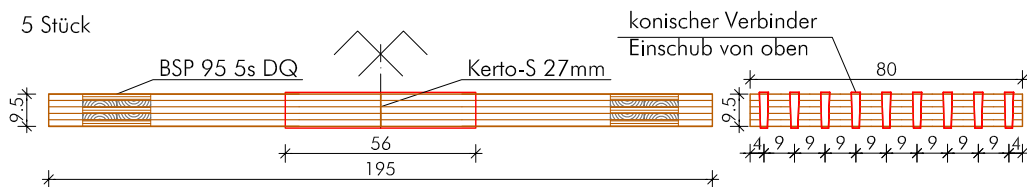


Abb. 5.45 Prüfsérie V0-0-A-p-o-800

Ziele:

- Biegefestigkeit von mehreren Verbindern
- Federsteifigkeit der Verbindung
- Einfluss der Biegezugbeanspruchung der Schmalseite des Kertokeiles auf die Biegefestigkeit

V0-08-A-p-u-800:

Kleber Variante A: 1K-PU

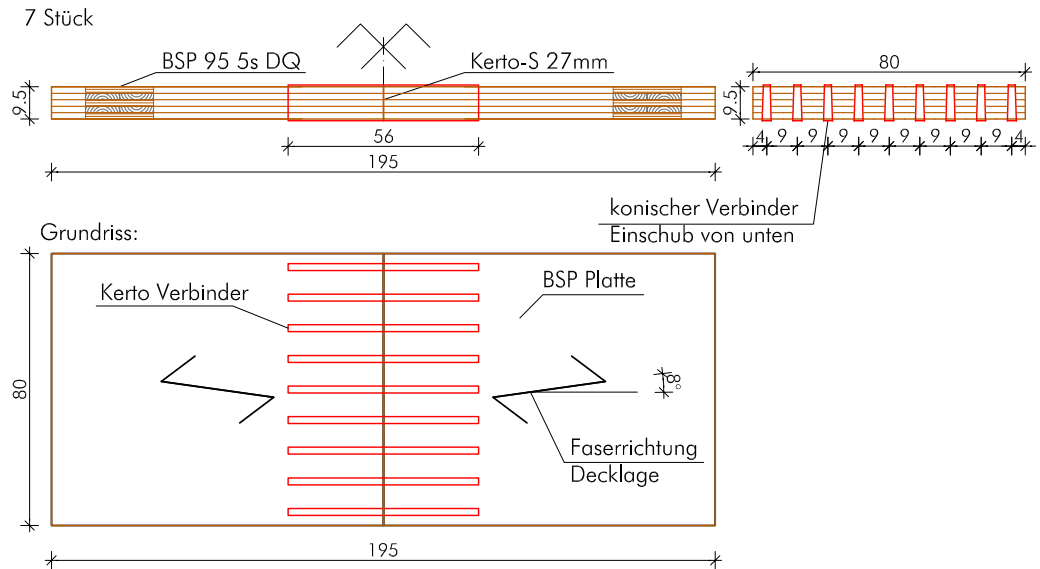


Abb. 5.46 Prüferie V0-08-A-p-u-800

Ziel:

- Biegefestigkeit von mehreren Verbindern
- Federsteifigkeit der Verbindung
- Einfluss der Faserabweichung von Kertoverbinder und BSP-Decklamelle auf die Biegefestigkeit

V0-0-C-p-u-800:

Kleber Variante C: 2K-PU-Gießharz CR-421

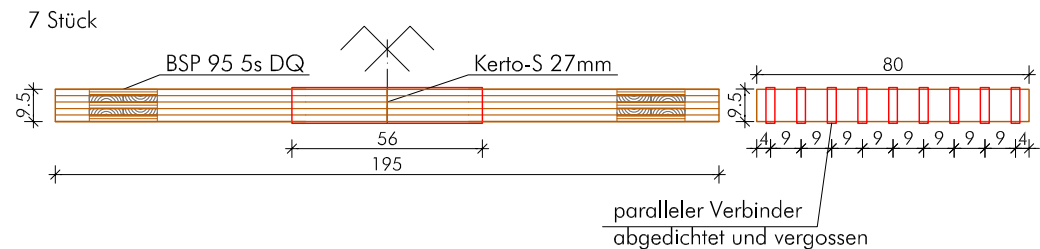


Abb. 5.47 Prüferie V0-0-C-p-u-800

Ziele:

- Biegefestigkeit von mehreren Verbindern

- Einfluss des Klebers auf die Biegefestigkeit und die Federsteifigkeit der Verbindung

V30-0-A-p-u-800:

Kleber Variante A: 1K-PU

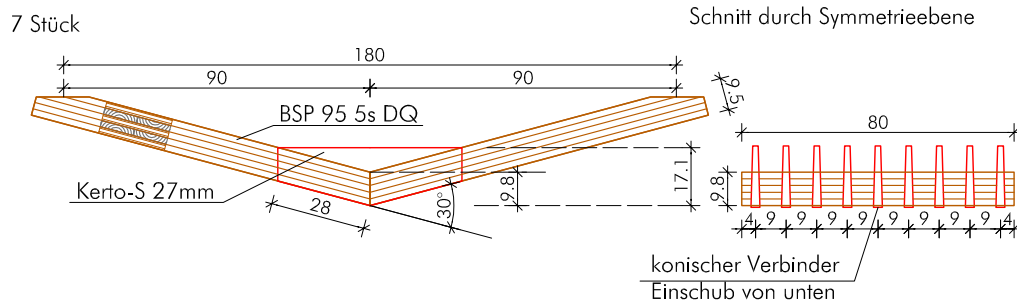


Abb. 5.48 Prüferserie V30-0-A-p-u-800

Ziel:

- Biegefestigkeit von mehreren Verbindern
- Veränderung der Biegefestigkeit bei auf Gehrung gestoßenen Platten

Anmerkung: 30° ist der maximal auftretende Winkel des geplanten Prototypen

V30-0-A-n-u-800:

Kleber Variante A: 1K-PU

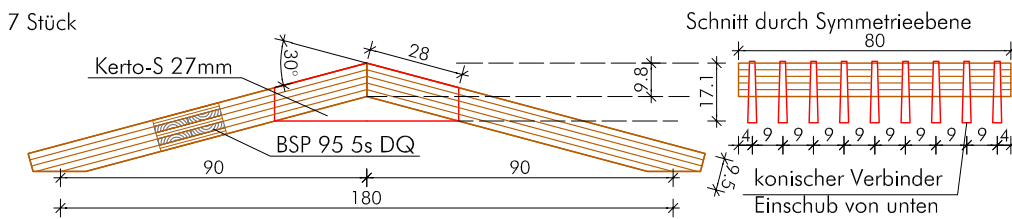


Abb. 5.49 Prüferserie V30-0-A-n-u-800

Ziel:

- Biegefestigkeit von mehreren Verbindern
- Veränderung der Biegefestigkeit bei auf Gehrung gestoßenen Platten

Anmerkung: 30° ist der maximal auftretende Winkel des geplanten Prototypen

Biegeprüfkörper Übersicht:

Bezeichnung	Anzahl
V0-0-A-p-u-085	10 Stk
V0-0-A-p-u-085-Rand	8 Stk
V0-0-A-p-u-265	6 Stk
V0-0-A-p-u-800	5 Stk
V0-0-A-p-o-800	5 Stk
V0-08-A-p-u-800	7 Stk
V0-0-C-p-u-800	7 Stk
V30-0-A-p-u-800	7 Stk
V30-0-A-n-u-800	7 Stk
Summe:	62 Stück

Tab. 5.7 Biegeprüfkonfigurationen Übersicht

5.2.5 Herstellung der Prüfkörper

Die Fertigung der Biegeprüfkörper erfolgte in mehreren Arbeitsschritten und verschiedenen Produktionsstätten. Ziel war die Herstellung der Verbindung mit handelsüblichen Materialien und vorhandener Technik.

Die hohen Anforderungen an die Genauigkeit des Abbundes (Klebefugenstärke des 1K-PU-Klebers ist max. 0,3 mm [17]) erforderte eine zwei stufige Fertigung der BSP-Platten. Aktuell bieten die Herstellerbetriebe von BSP keinen Abbund der Schlitze an, die Abbundanlagen wären dazu grundsätzlich in der Lage, jedoch sind die Abbundzeiten und der Aufwand im Vergleich zum konventionellen Plattenabbund hoch und daher für die Firmen nicht wirtschaftlich und eher uninteressant.

Unterschiedlich zum Abbund der Zugversuchsplatten, die von einem Fräsroboter (HIZ Knittelfeld) bearbeitet wurden, konnte der Abbund der BSP-Platten von einer Tischlerei mit einer konventionellen CNC-Anlage (Typ: SCM-CNC-Bearbeitungszentrum-Record 210) vorgenommen werden.



Abb. 5.50 CNC-Abbandanlage Tischlerei Freissling, Sebersdorf (Quelle: Tischlerei Freissling)

Die Entscheidung für den Tischlereiabband lag in der höheren Genauigkeit der Anlage im Vergleich zum Roboter und den geringeren Kosten in der Herstellung. Tab. 5.8 zeigt eine Kostenaufstellung für den Abband der Schlitzlöcher für die Biegezugversuche (HIZ-Roboter) und dem Abband der Schlitzlöcher für die Biegeversuche (Tischlerei Freissling). Ein direkter Preisvergleich ist hier aufgrund der verschiedenartigen Fertigung, Geometrie und Kubatur der Schlitzlöcher nicht sinnvoll.

Hersteller	Schlitzgeometrie	Anzahl	Preis pro Schlitz	Kubatur pro Schlitz	Summe
HIZ Knittelfeld Fräsroboter	gerade oder konisch	8*3=24	104,2.- €	1663 cm ³	2500,0.- €
	doppelt konisch	0	0,0.- €	0	0,0.- €
Tischlerei Freissling CNC-Anlage	gerade oder konisch	56*9=504	4,36.- €	798 cm ³	2195,2.- €
	doppelt konisch	28*9=252	4,91.- €	916 cm ³	1237,6.- €

Tab. 5.8 Kostenaufstellung (Nettopreise) für den Abband der Versuchsplatten

Außerdem war das große Know-how der Firma bezüglich der Datenübertragung zwischen CAD-Planung und der Fertigung, bzw. dem Erstellen der Fräsfiles ausschlaggebend. Um Zufriedenstellende Ergebnisse zu bekommen, bedarf es einiger Erfahrung, angefangen bei der Wahl des richtigen Werkzeugs bis hin zur richtigen Drehzahl, dem zugehörigen Vorschub, und anderem mehr. Im Falle einer Freiformfläche bei der im Allgemeinen kein Teil dem Anderen gleicht, ist es nicht möglich und wirtschaftlich jeden Teil für die Abbandanlage grundlegend neu aufzubereiten. Idealerweise kann die Planung übernommen werden. Obgleich dies auf der Hand liegt, ist es nicht immer der Fall. Vielfach bietet eine Abbandanlage mehr Möglichkeiten als momentan genutzt werden. Anzunehmen ist, dass Tischlereibetriebe im Allgemeinen aufgrund der Vorkommenshäufigkeit bei der Umsetzung von komplexeren Bauteilgeometrien aktuell mehr Erfahrung haben als Betriebe des Baugewerbes. Nachteilig ist bei Tischlereianlagen sicherlich die beschränkte Bearbeitungsfläche (ca.1,5 x 3,0 m in diesem Fall) und

die begrenzte Nutzlänge der Werkzeuge (bis ca. 140 mm). Ausführungen zur Herstellung des Prototypen finden sich in Kapitel 7.

Ausschlaggebend für die Vergabe des Abbundes an einen Tischlereibetrieb waren die Ausführungen oben, insbesondere wurde das Augenmerk auf eine maximal erreichbare Genauigkeit und eine optimale Oberflächenqualität gelegt.

Grundsätzlicher Ablauf der Herstellung der Biegeprüfkörper:

BSP-Platten

- Abbund der BSP-Platten im Werk (Formatierung und Gehrungsschnitte)
- Lieferung der abgebundenen Platten zur Tischlerei
- fräsen der Schlitze mittels konventioneller CNC-Anlage
- Lieferung der Platten an die TU-Graz

Kerto-Verbinder

- Lieferung der Kertoplatten an die TU-Graz
- formatieren und hobeln der Geometrie in der Tischlereiwerkstatt vor Ort
- verkleben der Prüfkörper an der TU-Graz

Auf die genaue Beschreibung der Herstellung wird besonderer Wert gelegt, da die Qualität der Verbindung im Wesentlichen von der Verklebung abhängig ist. Wie die Auswertung der Biegeprüfung zeigen wird, ist dies mit der nachfolgenden Herstellungsweise gelungen. Hinzu kommt noch die Tatsache, dass eine nachträgliche Kontrolle der Verbindung kaum möglich ist, aber kleine Probleme (z.B. Passgenauigkeit Schlitz-Keil) bei der Herstellung (siehe Zugversuche und Vorversuche) möglicherweise große Auswirkung auf die Qualität der Verklebung beziehungsweise auf die Tragfähigkeit der Verbindung haben können.

Eine genaue Dokumentation der Herstellung ist für eine Qualitätssicherung unbedingt erforderlich, und wurde in Form von Dokumentationsblättern durchgeführt. Das nachfolgende beispielhafte Dokumentationsblatt (Abb. 5.51) wurde für alle Prüfonfigurationen erstellt. Diese liegen in Abschnitt B.4 bei.

Verklebung Biegeprüfkörper

28.09.2011

Variante: V0Apo

7Stk

Verarbeiter: Christoph Pfaller; Heimo Schimek; Emanuel Ruffo Calderon Dominguez

Probekörper: BSP: LxBxH 1950x800x95
 Kerto: LxBxH 560x105x(26,3 auf 20,4mm; Winkel 1,6°)
 Schlitz: LxBxH 560x95x(26 auf 21 mm; Winkel 1,6°)

Kleber: HBS 709 Dichte 1,16 800g/Flasche= 689,66 ml
Kleberauftrag: Mit Zahnpachtel; Lasche und Schlitz bestrichen

Kleberverbrauch:

	Volumen /Schlitz		
Soll	0,0213 dm³	Planmäßige Fugenstärke 0,2mm	
Ist	0,1203 dm³	Gesamtverbrauch(7 x9 Schlitze):	11 Flaschen zu 800g
Verbrauch:	1,13 Liter/m²	1,245 kg/m²	

Einflussfaktoren:

Holzfeuchte Kerto: 14,37 %
 BSP: 11,55 %

Raumklima: Temperatur: 22,8 °
 Luftfeuchte: 57,90%

Oberfläche :

BSP: Variante V0Apo gefräst in von Fa. Freissling, Sebersdorf
 in der Woche 12.-16.09 2011
 Lieferung an TU Graz am 15.09 bzw 19.09.2011
 Lagerung in der Werkstatt danach in der
 Klimakammer(20°/65%LF) von 21.9-28.9
 Kerto: Lasche: Am 28.09.2011 geschnitten und gehobelt
 Lagerung in Plastik foliert auf Palette bei Raumklima

Verarbeitung:

Herstellen der Kertolaschen (schneiden und hobeln)
 Entnahme aus der Klimakammer und Reinigung der BSP Platten mit Druckluft.
 Positionieren der Fügeiteile
 Messung der Holzfeuchte und Raumklima (Gann Hydromette M 4050)
 Besprühen der Kertolaschen mit Wasser(sehr wenig)

Klebstoffauftrag: Kleber wurde auf der Lasche und im Schlitz mit einer Zahnpachtel aufgetragen
 ca. 250g/m² jeweils
 Danach wurde die Lasche zentrisch eingeschoben,
 wodurch die Kleberauppen an den Seitenwänden verteilt wurden.
 Die Lasche wurde, zuerst durch händisches Drücken, dann mit Hilfe
 eines Gummihammers bis in die Sollage eingetrieben.

Aushärtezeit: Lagerung bis 4.10. in der Werkstatt (= 6 Tage)

Zeitaufwand: nur Verkleben: ca. 1 h für 9 Schlitze(= 1 Prüfkörper) (1 Person)
 ca. 20min für 9 Schlitze bei 2 Personen

Fertigung Laschen: ca. 1h für 7*9 Stück(mit fertiger Hobelschablone; 1 Person)

Im folgenden möchte ich auf die Herstellung der Testplatten an der TU-Graz näher eingehen.

BSP-Plattenabbund-Planung

Für die zu fertigenden Teile wurden mittels CAD-2D-Abbundpläne erstellt (Abschnitt B.3). Diese Pläne waren die Basis zur Erstellung von 3D-CAD Modellen, welche wiederum Grundlage für die Erstellung der endgültigen Fräsfiles waren.

Die bestellten BSP-Plattenteile hatten eine Breite von 800 mm und jeweils 9 Schlitz (siehe Abschnitt B.3). Insgesamt wurden 84 Platten für die Herstellung von 42 Probekörpern (6 verschiedene Varianten zu jeweils 7 Stück) vom Tischlereibetrieb gefertigt.

Vorbereitung der BSP-Platten

Die BSP-Platten wurden fertig abgebunden an die TU-Graz geliefert. Unmittelbar vor der Weiterverarbeitung erfolgte eine mehrere Tage dauernde Lagerung in der Klimakammer (Normklima 20° und 65% rel. Luftfeuchte; Holzfeuchte 12%). Aus Platzgründen war dies nicht durchgehend nach der Anlieferung möglich, konnte jedoch für mehrere Tage vor der Verklebung realisiert werden (genaue Dokumentation: Abschnitt B.4), sodass eine Oberflächenfeuchte im Rahmen der Zulassung [17] des Klebers (mind. 8%) sichergestellt werden konnte. Die Holzfeuchte bei Auslieferung der Platten wurde mit ca. 12% vom Hersteller angegeben. Vor dem Verkleben der BSP-Platten wurden die Schlitz mit Druckluft von Frässtaub gereinigt.

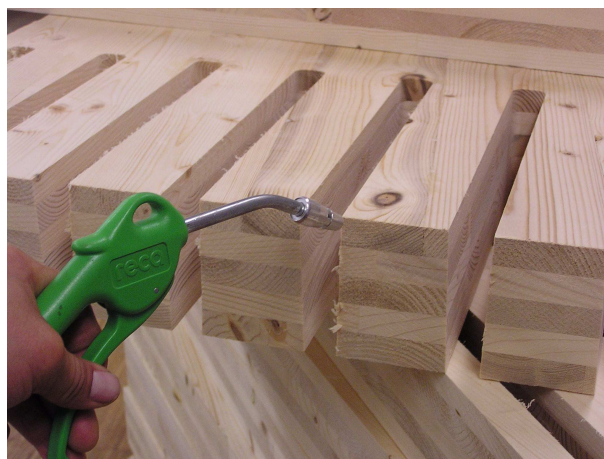


Abb. 5.52 Lagerung der BSP-Platten in der Klimakammer

Druckluftreinigung der Schlitz

Herstellung der Kerto-Verbinder

Der Ablauf der Herstellung der Verbinder ist grundsätzlich ident mit jenem in Abschnitt 5.1.7.2 für die Zugversuche beschriebenen. Daher werden an dieser Stelle nur Abweichungen von diesem beschrieben.

Die Anlieferung der Kertoverbinder erfolgte in Platten mit den Abmessungen von

1820x225x27 mm und einer Holzfeuchte von ca.12%. Die Weiterverarbeitung erfolgte in der Tischlerei vor Ort jeweils am Tag der Verklebung oder maximal einen Tag zuvor, um ein optimales Oberflächenalter zu erreichen.

Als erster Arbeitsschritt wurden die Platten längs auf der Kreissäge auf Fertighöhe geschnitten.

Anschließend wurden die Teile für parallele Verbinder dickengehobelt oder mit Hilfe einer aus Hartholz gefertigten Hobellehre (siehe Abschnitt 5.1.7.2) keilförmig gehobelt.

Die erwünschte Geometrie wurde durch das Ablängen auf Schlitzlänge erreicht. Für die auf Gehrung geschnittenen Platten war weiters das Schneiden der Winkel erforderlich.



Abb. 5.53 Winkelschnitt des Verbinders

Fertige Verbinder für Konfiguration V-30

Zuletzt wurde die Passgenauigkeit in „trockenem“ Zustand überprüft.

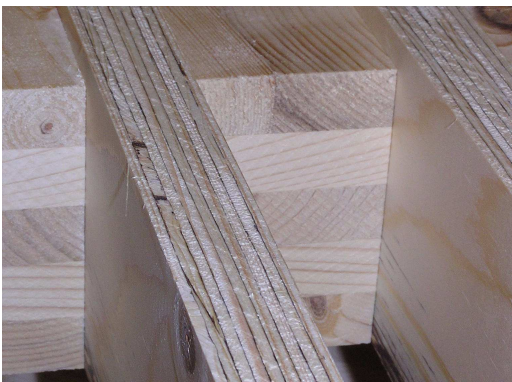


Abb. 5.54 Prüfen der Passgenauigkeit vor dem Verkleben (Verklebevariante A)

Verkleben der Probekörper

Die Bezeichnung der Verklebung erfolgte in Anlehnung an die Zugversuche. Für die Biegeversuche wurden nur die Varianten A und C ausgeführt. (siehe Abschnitt 5.1.3).

Verklebevariante A

Die Verklebung der Probekörper erfolgte mit 1K-PU-Kleber (Purbond HB-S609 und HB-S709)

Die Vorgangsweise wurde analog zu den Zugversuchen ausgeführt (siehe Abschnitt 5.1.7.3).

Das Verkleben eines Prüfkörpers (9 Verbinder) dauerte ca. 1h bei Bearbeitung durch eine Person, bei Bearbeitung von 2 Personen konnte das Verkleben der Platten in 20 Minuten durchgeführt werden. Die folgenden Abbildungen zeigen die Verklebung der Biegeprüfplatten.



Abb. 5.55 Beileimen von Schlitz und Verbinder der Biegeprüfplatten mit der Zahnschachtel



Abb. 5.56 Zentrisches Einbringen des Kerto-Verbinders

Das Verkleben der auf Gehrung geschnittenen Platten (Varianten V30-0-A-n-u und V30-0-A-p-u) erfolgte analog, abweichend davon war die Notwendigkeit von speziellen Rüs-

tungen.



Abb. 5.57 Konfiguration V30-0-A-n-u



Abb. 5.58 Konfiguration V30-0-A-p-u

Verklebevariante B

Diese Variante wurde bei den Biegeversuchen nicht ausgeführt.

Verklebevariante C

Die Verklebung erfolgte analog zu den Zugversuchen (siehe Abschnitt 5.1.7.3)

Verklebevariante D

Diese Variante wurde bei den Biegeversuchen nicht ausgeführt.

Finish

Nach dem Aushärten der verklebten Prüfkörper waren noch weitere Arbeitsschritte notwendig.

Die planmäßigen Überstände der Kertverbinder und erhärtete Kleberreste wurden mit Handhobelmaschinen entfernt. Dies war einerseits eine optische Vorgabe des Entwurfs, andererseits wurden damit auch mögliche Abweichungen im Tragverhalten aufgrund verschieden hoher Verbinderüberstände egalisiert.

Auf die Konfigurationen V30-0-A-p-u und V30-0-A-n-u mussten noch Auflager- bzw. Lasteinleitungssättel mittels Schraubpressleimung angebracht werden.

Für die Herstellung der schmäleren Probekörper (Breite 85 bzw. 265 mm, siehe Abschnitt 5.2.4.2) wurden vier fertig verklebte Prüfkörper (jeweils zwei Stück von Konfiguration V0-0-A-p-o-800 und V0-0-A-p-u-800) mit 800mm Breite laut folgendem Schema aufgetrennt.

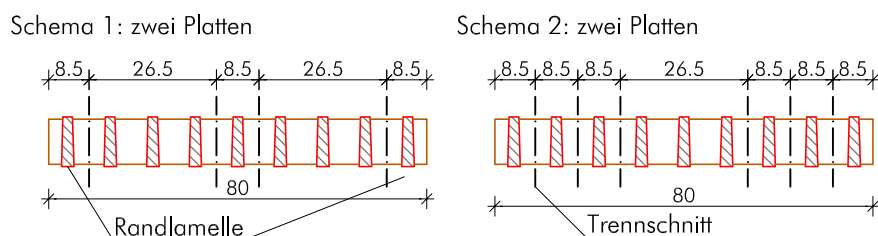


Abb. 5.59 Auftrennschema der Probekörper

Aus diesem Auftrennschema ergaben sich 10 Probekörper mit 85 mm aus der Mitte der Platte, 8 Probekörper mit 85 mm vom Rand der Platte (diese Probekörper führen die Zusatzbezeichnung -Rand) und 6 Probekörper mit 265 mm Breite.

Dieses Auftrennschema sollte eine möglichst homogene Verteilung der Eigenschaften auf jede Prüfkörperkonfiguration aus der Gesamtheit der Platte ergeben.

5.2.6 Biegeprüfung der Verbindungsplatten

5.2.6.1 Prüfaufbau

Die Durchführung der Biegeprüfung erfolgte auf der Universalprüfmaschine des Instituts für Holzbau und Holztechnologie an der TU-Graz. Diese kann Druck- oder Zugkräfte im Bereich von 0 bis ± 275 kN auf den Prüfkörper aufbringen. Die Messeinrichtungen entsprechen den Anforderungen nach EN 26 891 bzw. EN 408.

Aufgrund der Breite der Biegeprüfkörper musste die Prüfmaschine mit lastverteilenden Trägern in den Lasteinleitungs- bzw. Auflagerpunkten ergänzt werden. Die Abb. 5.60, Abb. 5.63 und Abb. 5.66 zeigen die schematische Darstellung der Biegeprüfaufbauten für die Versionen mit 0° bzw. 30° .

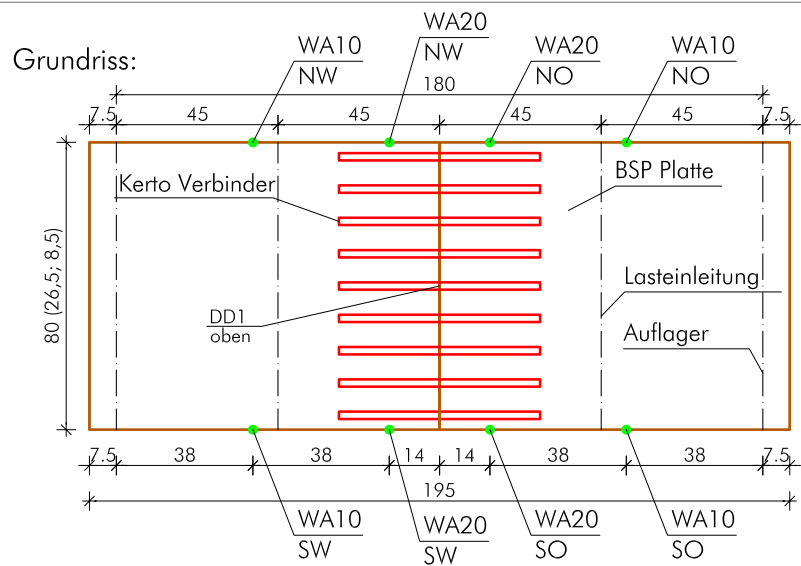
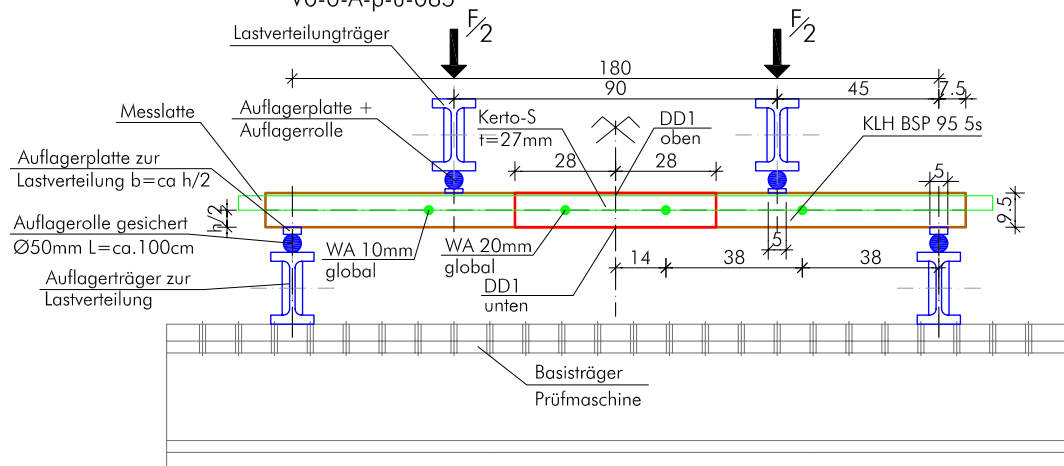
Konfigurationen mit 0° Gehrungswinkel

Abb. 5.60 zeigt weiters die angebrachten Wegaufnehmer (WA). Die Positionierung der Wegaufnehmer im Grundriss ist beispielhaft für die 800 mm breiten Prüfkörper dargestellt. Für die restlichen Breiten wurden die Messungen analog an der Seite des Prüfkörpers in der Plattenachse durchgeführt. Die Wegaufnehmer wurden auf einer Alulatte im Abstand l_t Plan montiert. Auf den Prüfkörpern wurden im Schnittpunkt der Auflagerachse mit der Mittelachse der Platte Nägel zur Auflagerung der Alu-Messlatte mit den Wegaufnehmern eingeschlagen. In den Plattenachsen wurden in den Messpunkten Aluwinkel mit Glasplatten befestigt, auf denen die Tastspitzen der Wegaufnehmer auflagerten und dort die globalen Vertikalverformungen der Platte maßen.

Die Bezeichnung der Wegaufnehmer (WA) mit Tastspitze wurde mit dem Messbereich des Geräts in mm und der geographischen Lage auf dem Prüfkörper ergänzt, um das jeweilige Messgerät im Zuge der Auswertung richtig zuordnen zu können (z.B.: WA10 NW bedeutet Wegaufnehmer 10 mm, Nord-West).

Die Dehnungsmessungen an den Kertoverbindern an der Ober- und Unterseite der Prüfkörper wurden mit DD1-Dehnungsaufnehmer [54] gemessen (Messbereich $\pm 2,5$ mm; Linearitätsabweichung $\pm 0,05\%$).

Biegeprüfkonfiguration: V0-0-A-p-o-800 V0-0-C-p-u-800
 V0-0-A-p-u-800 V0-08-A-p-u-800
 V0-0-A-p-u-265 V0-0-A-p-u-085-Rand
 V0-0-A-p-u-085



WA10.....Wegaufnehmer 10mm

Abb. 5.60 Biegeprüfung 0° und angebrachte Messpunkte

Bilder der Biegeprüfkonfiguration:



Abb. 5.61 Biegeprüfung Konfiguration $V0^\circ$ mit 800 mm Breite



Abb. 5.62 Biegeprüfung Konfiguration $V0^\circ$ mit Breite 85 mm; Messlatte mit Wegaufnehmern und Dehnungsmessern

Konfigurationen mit 30° Gehrung

Für die Biegeprüfung der auf 30° Gehrung geschnittenen Platten musste die Messvorrichtung etwas adaptiert werden. Die Messung der vertikalen Verformung erfolgte global in den Messpunkten lt. Abb. 5.63 bzw. Abb. 5.66. Die Wegaufnehmer mit Tastspitze wurden durch Wegaufnehmer mit Tauchanker (TA) ersetzt (Abb. 5.68). Die Bezeichnung erfolgte analog zu den Konfigurationen mit 0° .

Dehnungen auf den Plattenober- und Unterseiten wurden nicht gemessen.

Biegeprüfkonfiguration: V30-0-A-p-u-800

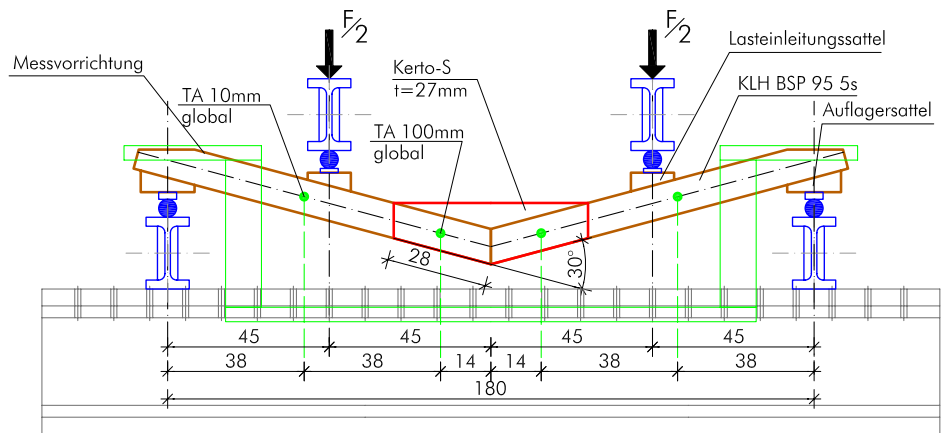


Abb. 5.63 Biegeprüfung V-30-0-A-p-u-800

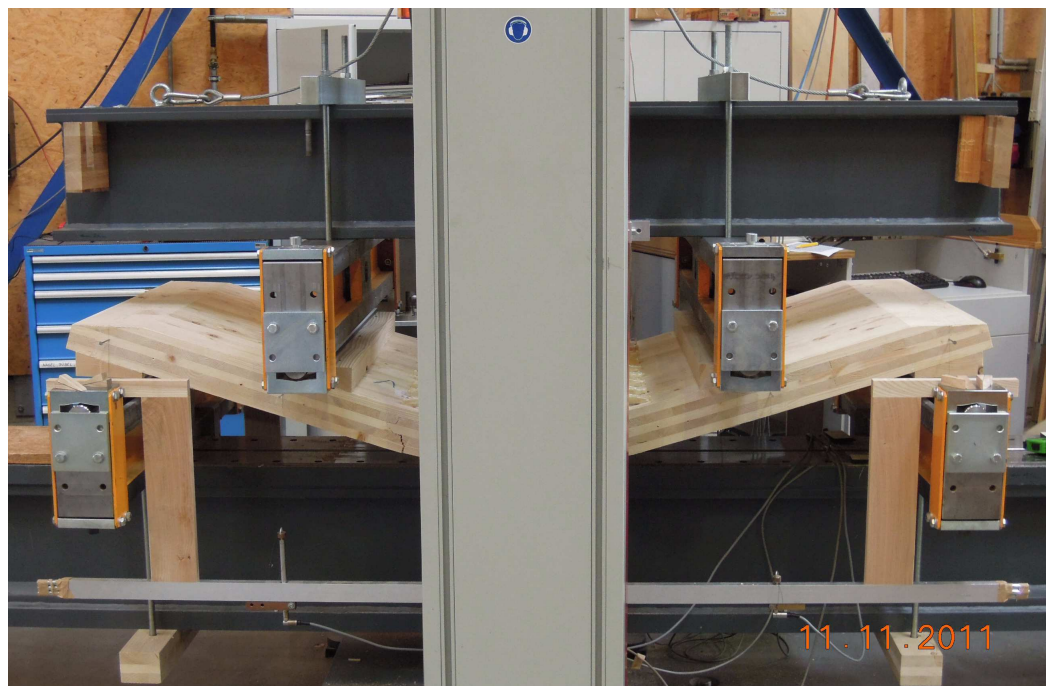


Abb. 5.64 Bilder Biegeprüfung Konfiguration V30-0-A-p-u-800



Abb. 5.65 Bilder Biegeprüfung Konfiguration V30-0-A-p-u-800; Auflager und Lasteinleitung

Biegeprüfkongfiguration: V30-0-A-n-u-800

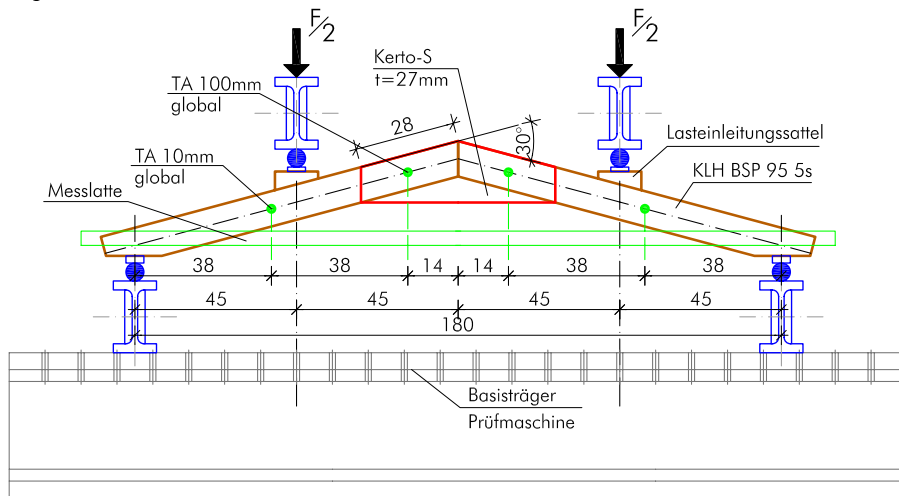


Abb. 5.66 Biegeprüfung V-30-A-n-u-800



Abb. 5.67 Bilder Biegeprüfung Konfiguration V30-0-A-n-u-800



Abb. 5.68 Bilder Biegeprüfung Konfiguration V30-0-A-n-u-800; Untersicht, Wegaufnehmer

5.2.6.2 Einstellungen der Prüfmaschine

Die Einstellung der Prüfmaschine erfolgte in Anlehnung an die EN 26891. Die Lastaufbringung passierte mit konstanter Geschwindigkeit. Der Prüfkörper wurde bis $0,4 \cdot F_{\text{est}}$ (Abschnitt 5.2.3.5) belastet (Belastungsast 1); danach wurde die Last auf $0,1 F_{\text{est}}$ ($t=0$) reduziert und wiederum bis zum Lastniveau $0,4 \cdot F_{\text{est}}$ belastet. Zum Entfernen der Messgeräte wurde dieses Niveau für 30 sec. gehalten. Die Laststeigerung wurde darauffolgend bis zum Bruch mit konstanter Geschwindigkeit beibehalten (Belastungsast 2). Die Geschwindigkeit wurde so gewählt, dass der Bruch im 2. Belastungsast bei 300 ± 120 s eintrat. Beispieligend zeigt Abb. 5.69 die Kraft-Weg-Diagramme für eine Prüfserie.

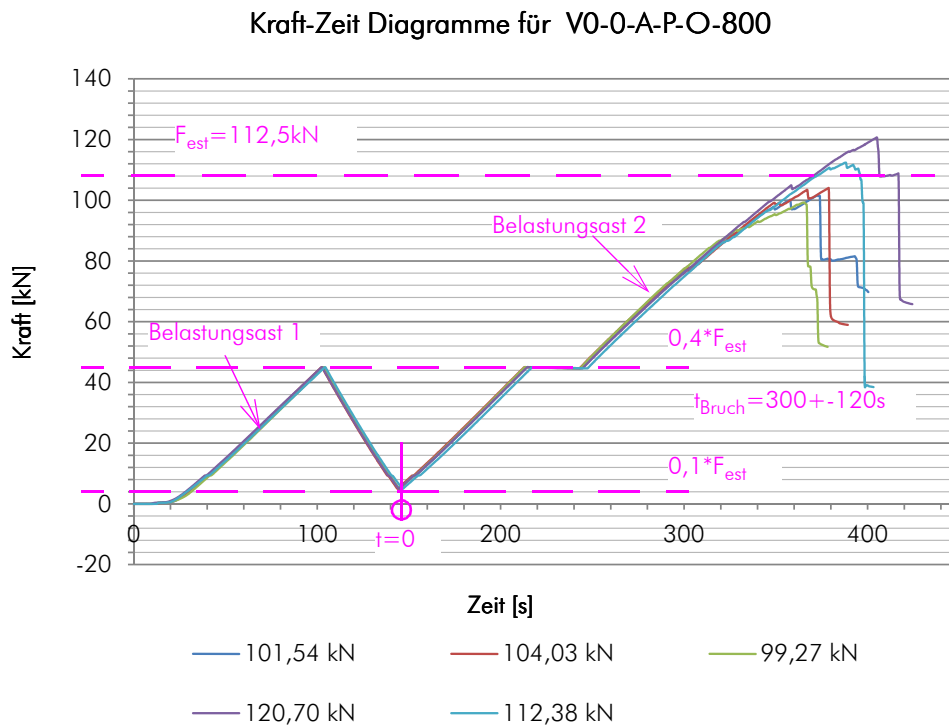


Abb. 5.69 Beispielhaftes Kraft-Zeit-Diagramm

5.2.6.3 Ablauf der Biegeprüfung für die Verbindungsplatten

Vorbereitung

- vermessen des Prüfkörpers
- anzeichnen der Auflagerlinien und Messpunkte mit Hilfe einer Alulatte als Schablone
- einschlagen der erforderlichen Nägel zum Auflagern der Messlatte (alle Konfigurationen) und Anbringen der Wegaufnehmer (nur Konfigurationen V30°)
- anbringen der Aluwinkel für die Wegaufnehmer mit Tastspitze (nur Konfigurationen V0°)
- eindrehen der Schrauben zu Befestigung der DD1 Dehnungsmesser (nur Konfigurationen V0°)
- einheben des Prüfkörpers in die Prüfmaschine
- einlegen der Lastverteilungsplatten und Zentrieren des Prüfkörpers
- auflegen der Messvorrichtung bzw. Messlatten (mit im richtigen Abstand vormontierten Wegaufnehmern) auf die eingeschlagenen Nägel
- Lagekontrolle



Abb. 5.70 Vorbereiten der Prüfkörper (V30-0-A-p-u-800)

Prüfvorgang

- Funktionskontrolle der Wegaufnehmer und Dehnungsmesser
- Wegaufnehmer und Dehnungsmesser auf Null setzen
- Start des Prüfvorgangs und Überwachung der Messungen in Bezug auf offensichtliche Messfehler (notieren)
- Entfernung der Wegaufnehmer und Dehnungsmesser im dafür vorgesehenen Zeitfenster (Belastungsast 2)
- Laststeigerung bis zum Bruch

Dokumentation (siehe Anhang B, Abschnitt B.5)

- Bruchkraft notieren
- Prüfkörper in Bruchstellung halten und Bruchursache feststellen und notieren
- Fotodokumentation
- Sicherung der Prüfdaten

Demontage

- entfernen des Prüfkörpers aus der Prüfmaschine
- entfernen von Nägeln und Aluwinkel
- Entnahme der Darrprobe aus dem geprüften Probekörper

5.2.6.4 Bestimmung der Holzfeuchte

Die Bestimmung der Holzfeuchte wurde nach EN 13183-1 [3] durchgeführt. Dafür musste ein Stück Holz direkt nach der Biegeprüfung aus dem Probekörper geschnitten werden. Nach einer Wägung erfolgte die Trocknung im Darrschrank und danach wurde der Prüfkörper zur Feuchtebestimmung wiederum gewogen. Die Berechnung der Holz-

feuchte erfolgte nach Gl. [5.26]:

$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad [5.26]$$

mit:

m_1 Masse in Gramm, des Prüfkörpers vor dem Trocknen

m_0 Masse in Gramm, des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand

u der Feuchtegehalt in Prozent

Eine Liste alle Prüfkörper und deren Feuchtegehalt findet sich in Anhang B Abschnitt B.5.

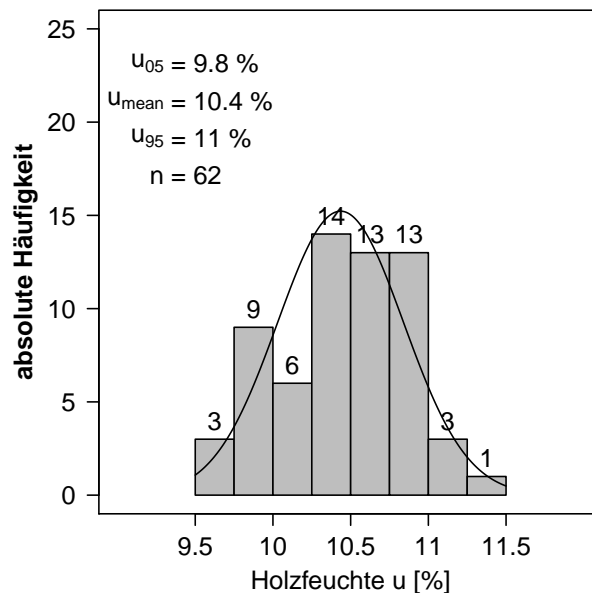


Abb. 5.71 Holzfeuchteverteilung der Verbindungsplatten

Abb. 5.71 zeigt eine Abweichung der gemessenen mittleren Holzfeuchte der Verbindungsprüfkörper hinsichtlich der in der Norm geforderten Holzgleichsfeuchte von 12% [4]. Laut [36] ändert sich der E-Modul des Holzes mit der Änderung der Holzfeuchte um nach folgendem Zusammenhang:

$$E_{0,u_2} = E_{0,u_1} \times [1 - 0,015 \times (u_2 - u_1)] \quad [5.27]$$

Die Änderung der Holzfeuchte von $u_1 = 12,0\%$ auf $u_2 = 10,44\%$ (Abb. 5.71) bewirkt eine Änderung des E-Moduls $E_{0,u_1} = 12000 \text{ N/mm}^2$ auf $E_{0,u_2} = 12280 \text{ N/mm}^2$. Die damit einhergehende Erhöhung der Biegesteifigkeit der Platten von $685,54 \text{ kNm}^2$ auf $700,38 \text{ kNm}^2$ (entspricht 2,2%) wurde in der Auswertung nicht berücksichtigt.

5.2.7 Auswertung der Biegeversuche der Verbindungsplatten

5.2.7.1 Bruchursachen

Der Bruch der Verbindungsplatten sollte laut ingenieurmäßiger Vorbemessung aufgrund eines Schubversagens im Bereich der Klebefuge (Holzbruch in Fugennähe) stattfinden (Ausnutzung 1,0). Wie jedoch schon in Kapitel 4 angedeutet, ist das Tragverhalten bzw. die reale Spannungsverteilung abweichend vom Modell. Abgesehen davon muss festgestellt werden, dass der Ausnutzungsgrad aller Nachweise relativ hoch ist (mindestens 0,86). Das bedeutet, kein Teil der Verbindung ist stark überdimensioniert. Weiters bedingt diese Tatsache, dass Streuungen des Grundmaterials durchaus Einfluss auf den Ort des Versagens haben können.

Diese Feststellungen werden durch die tatsächlichen, offensichtlich feststellbaren Bruchursachen gestützt. Die Prüfkörper wurden in der Endlage der Biegeprüfung (gebrochener Zustand) gehalten, und ihr Bruchzustand wurde mittels Fotos dokumentiert, weiters wurden die feststellbaren Bruchursachen aufgezeichnet (Anhang B, Abschnitt B.5). Es konnte dabei nicht für jeden Verbinder die Versagensursache dargestellt werden. Bei einem eindeutig zuzuordnendem Versagensgrund wurde dies getan. Daraus ergibt sich eine geringere Anzahl an bewerteten Verbindern als geprüft wurden. Tab. 5.9 und Tab. 5.10 zeigen die quantitative und prozentuale Auswertung der Dokumentation für die einzelnen Varianten 0° und 30°, bzw. eine Gesamtauswertung. Zur Auswertung der Bruchursachen muss angemerkt werden, dass die Beurteilung nur optisch, nach erfolgter Prüfung durchgeführt wurde. Die Probekörper wurden nicht bzw. nur in zweifelhaften Fällen aufgetrennt und beurteilt. Die Beurteilung der initialen Ursache ist sehr schwierig, da sich der Bruch nur durch das Reißen von einzelnen Fasern (das kann auch bei relativ kleinen Lasten schon auftreten) ankündigt, und ansonsten schlagartig versagt (Ausnahme V30-0-A-n-u), was auch aus den Arbeitslinien der Prüfkfigurationen ersichtlich ist. Es ist daher nur in den seltensten Fällen möglich, die initiale Ursache des Verbindungsversagens eindeutig festzustellen. Insbesondere gilt dies für die Prüfkörper mit 800 mm Breite (9 Verbinder), da sich die Last dort immer wieder kurzfristig auf noch tragfähige Verbinder umlagert, bis der endgültige Kollaps eintritt. Doch auch für diese Breite gab es Fälle in denen der gesamte Querschnitt versagte (meist BSP-Nettoquerschnitt).

Besonders schwierig ist die Beurteilung der Klebefuge, insbesondere bei farblosen 1K-PU-Klebern. Dies bestätigte auch die Delaminierungsprüfung der Zugversuchsprobekörper (siehe Anhang C, Abschnitt C.5). Vor allem bei der Bruchursache „Kerto-Querzug“ ist oftmals wenig Faserbelag zu erkennen (Abb. 5.74). Offen bleibt die Frage ob das Querzugversagen des Verbinders durch eine schlechte Verklebung (schlagartiges Versagen und dadurch Querzugversagen) oder tatsächlich durch die Beanspruchung auf Querzug hervorgerufen wurde. Für die Beurteilung dieser Fragen müssten weitere Versuche durchgeführt werden.

Die folgenden Bilder zeigen typische Bruchursachen.

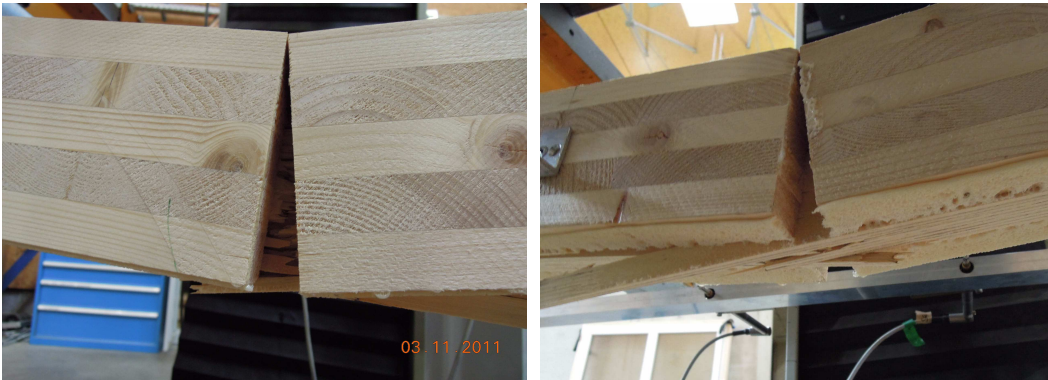


Abb. 5.72 Biegebruch Kertverbinder



Abb. 5.73 Querkzugversagen Kertverbinder

Vergrößerte Darstellung von Bild links in Abb. 5.73



Abb. 5.74 Wenig Holzfaserbelag bei Querkzugversagen des Kertverbinders

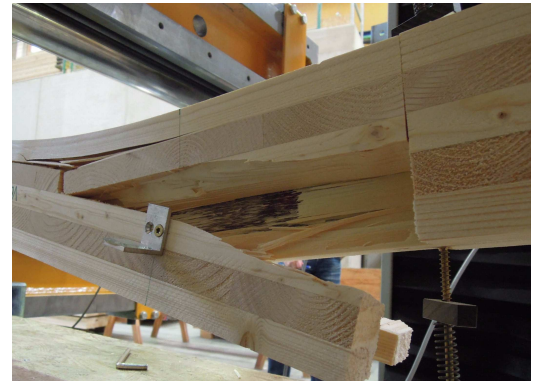


Abb. 5.75 Schubbruch der Kertverbinder



Abb. 5.76 Biegebruch BSP-Platte im Nettoquerschnitt

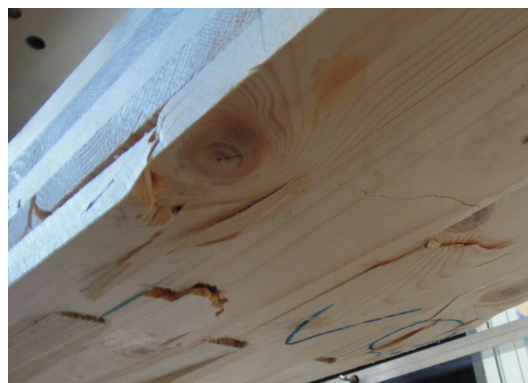


Abb. 5.77 Biegebruch BSP-Platte im Bruttoquerschnitt

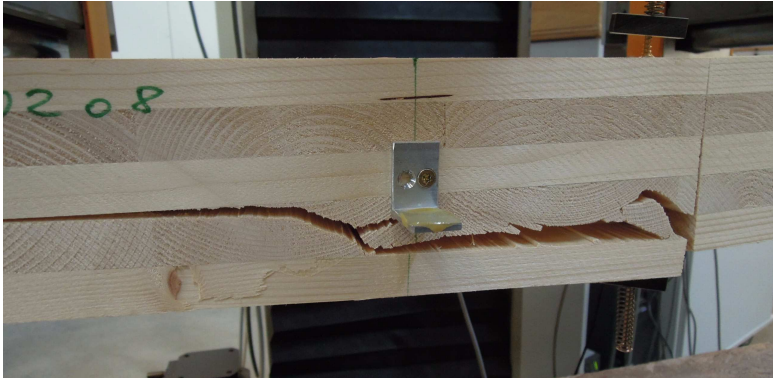


Abb. 5.78 BSP Rollschubversagen

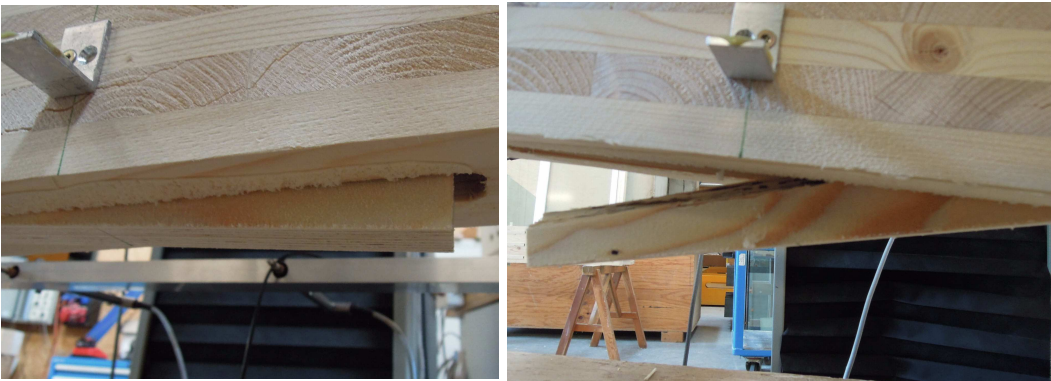


Abb. 5.79 Versagen der Klebefuge

	Verbinder Gesamt	Verbinder bewertet	Bruchursache Verbinder							
			Kerto Biegung	Kerto Querzug	Kerto Schub	BSP Biegung Netto	BSP Biegung Brutto	BSP Querzug	BSP Rollschub	Klebefuge
V00Apu-085 Rand	8	8	2	0	0	2	0	0	0	4
		100,0%	25,0%	0,0%	0,0%	25,0%	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%
V00Apu-085	10	10	0	0	2	4	1	0	0	3
		100,0%	0,0%	0,0%	20,0%	40,0%	10,0%	0,0%	0,0%	30,0%
V00Apu-265	18	18	6	5	0	4	3	0	0	0
		100,0%	33,3%	27,8%	0,0%	22,2%	16,7%	0,0%	0,0%	0,0%
V00Apu-800	45	36	8	17	1	7	0	3	0	0
		80,0%	22,2%	47,2%	2,8%	19,4%	0,0%	8,3%	0,0%	0,0%
V00Apo-800	45	30	15	0	0	15	0	0	0	0
		66,7%	50,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
V08Apu-800	63	39	19	6	0	13	0	1	0	0
		61,9%	48,7%	15,4%	0,0%	33,3%	0,0%	2,6%	0,0%	0,0%
V00Cpu-800	63	46	20	4	6	14	0	2	0	0
		73,0%	43,5%	8,7%	13,0%	30,4%	0,0%	4,3%	0,0%	0,0%
Summe:	252	187	70	32	9	59	4	6	0	7
		74,2%	37,4%	17,1%	4,8%	31,6%	2,1%	3,2%	0,0%	3,7%

Tab. 5.9 Auswertung der Bruchursachen der Verbindungsplatten V0°

Bruchursache Verbinder für Varianten mit 0°

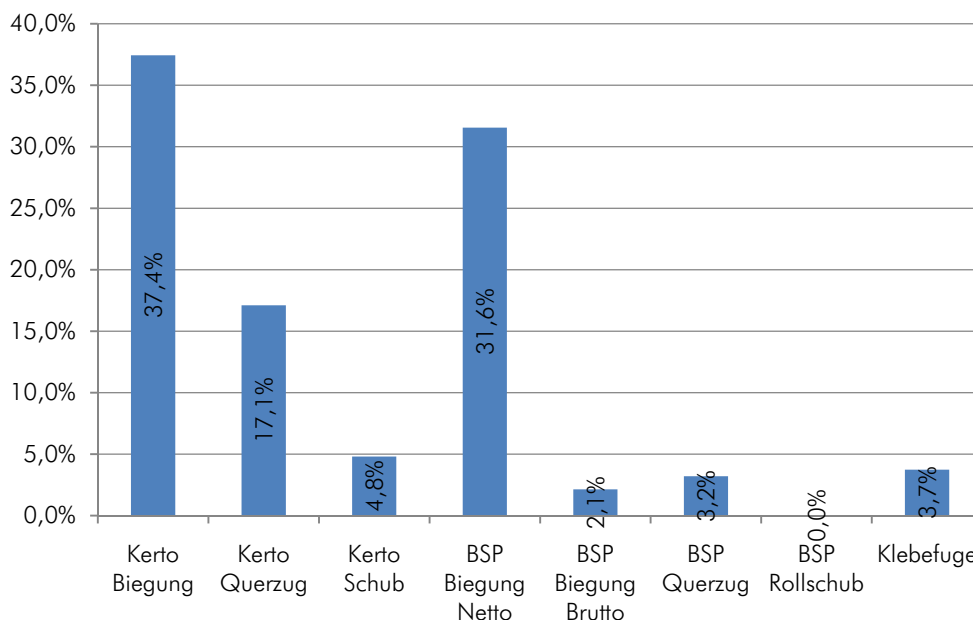


Abb. 5.80 Verteilung der Bruchursachen für die Varianten V0° (für 187 bewertete Verbinder, lt. Tab. 5.9)

Anmerkung: Als Bruch des BSP-Bruttoquerschnitts wurde ein Versagen des Querschnitts ab einem Abstand von ca. 10 cm neben dem Verbinder im ungeschwächten BSP-Querschnitt definiert.

Der Bruch des Brettsperrholz-Bruttoquerschnitts wurde nur in Prüfserien mit der Breite von 85 mm (ein Verbinder) festgestellt. Bei diesen Prüfkfigurationen haben lokale Fehlstellen der Brettlamelle (z.B.: Äste, Buchs) einen wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit des BSP-Querschnitts. Von diesen Fehlstellen ging das Versagen des Querschnitts aus.

	Verbinder Gesamt	Verbinder bewertet	Bruchursache Verbinder							
			Kerto Biegung	Kerto Querzug	Kerto Schub	BSP Biegung Netto	BSP Biegung Brutto	BSP Querzug	BSP Rollschub	Klebefuge
V300Apu-800	63	45	0	38	0	7	0	0	0	0
		71,4%	0,0%	84,4%	0,0%	15,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
V300Anu-800	63	33	12	0	0	16	0	0	0	5
		52,4%	36,4%	0,0%	0,0%	48,5%	0,0%	0,0%	0,0%	15,2%
Summe:	126	78	12	38	0	23	0	0	0	5
		61,9%	15,4%	48,7%	0,0%	29,5%	0,0%	0,0%	0,0%	6,4%

Tab. 5.10 Auswertung der Bruchursachen der Verbindungsplatten V30°

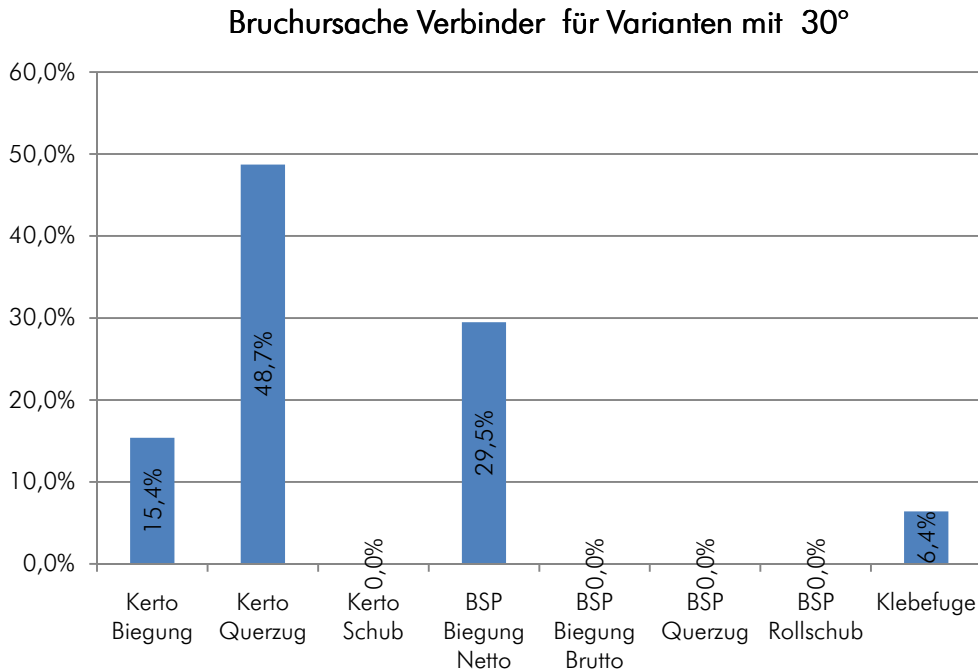


Abb. 5.81 Verteilung der Bruchursachen für die Varianten V30° (für 78 bewertete Verbinder, lt. Tab. 5.10)

Schlussfolgerungen aus den beobachteten Bruchursachen

Nachdem viele verschiedene Versagensmechanismen auftreten, kann davon ausgegangen werden, dass die Verbindung als Gesamtsystem eine sehr gute Ausnutzung besitzt. Ziel der Prüfung war, einen Biegebruch, bzw. eine aufgrund von Biegebeanspruchung verursachte Bruchursache der Verbindung zu erreichen. Dies wurde bis auf wenige Fälle (Rollschubbruch im BSP) erreicht. Festgestellt wurde, welche Versagensursache auch maßgebend war, die erreichten Bruchwerte streuen relativ wenig und hatten sehr hohe Werte. Die Beurteilung der Klebefuge bzw. des Einflusses der Verklebung auf den Bruch ist sehr schwierig. Nach der Brett-schichtholznorm EN 386 [14] muss die Klebefuge für Nadelhölzer eine Scherfestigkeit von mindestens 4 N/mm² betragen, wenn kein Kleberversagen an der gesamten Bruchfläche festgestellt wird (Faserbruchanteil 100%). Diese Normvorgabe ist jedoch in Fachkreisen durchaus umstritten (insbesondere bei 1K-PU-Klebern, siehe Abschnitt 5.1.9.2 und [42] bzw [43]). Betrachtet man vergleichend die Flächen in denen Klebstoffversagen stattfand mit den unversehrten verklebten Flächen (ohne den Prüfkörper aufzutrennen), ist der Flächenanteil für Klebebruch durchwegs sehr gering. Abgesehen davon ist das Versagen der Klebstofffuge nicht häufig aufgetreten. Aus diesen Gründen und dem Ergebnis der Delaminierungsprüfung im Rahmen der Zugversuche wurde dem Klebstoffversagen keine größere Aufmerksamkeit geschenkt.

5.2.7.2 Aufbereitung der Versuchsdaten

Zunächst wurden die von der Prüfmaschine aufgezeichneten Versuchsdaten der Biegeprüfung in das Tabellenkalkulationsprogramm MS-Excel importiert und weiterbearbeitet. Im Zuge der Analyse der Rohdaten wurde für jeden Prüfkörper ein Kraft-Zeit-Diagramm (bis zum Bruch) und ein Kraft-Weg-Diagramm (bis Lastniveau Fest*0,4; Abnahme der Wegaufnahme) erstellt. Diese Diagramme erlaubten eine erste qualitative Beurteilung der Rohdaten und Messwerte (Wegmessung) auf Plausibilität. Beispielhaft zeigt Abb. 5.82 ein Kraft Weg Diagramm und Abb. 5.83 ein Kraft Zeit Diagramm für einen Prüfkörper der Konfiguration V0-A-p-u-800-01.

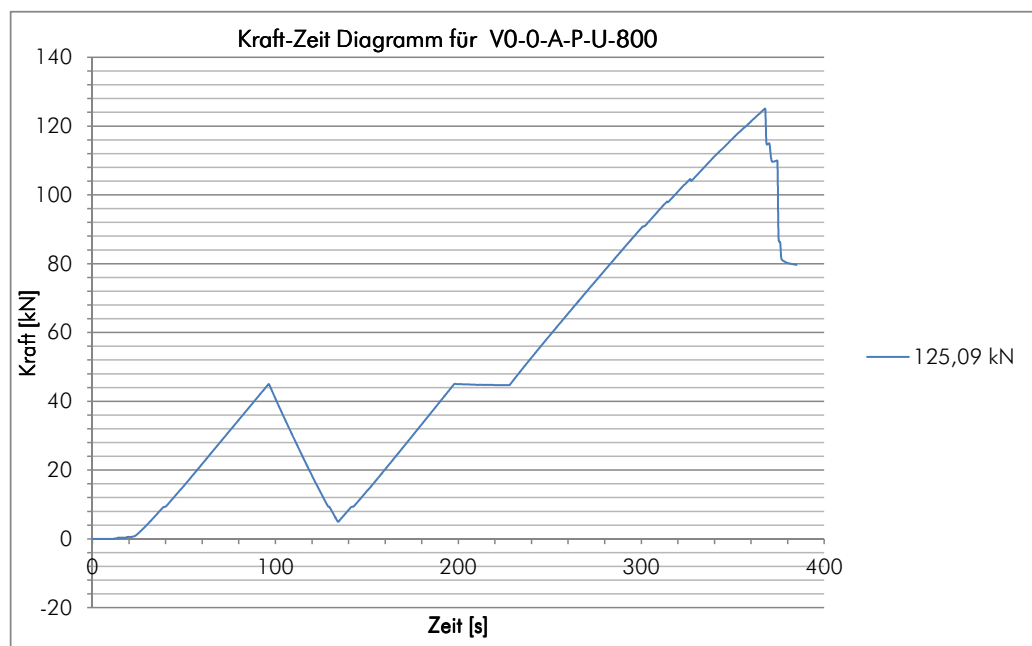


Abb. 5.82 Kraft- Zeit Diagramm für V0-A-p-u-800-01



Abb. 5.83 Kraft Weg Diagramm bis Lastniveau 0,4* Fest (45kN) für WA10 und WA20 für Prüfkörper V0-0-A-p-u-800-01

Die Auswertung der Einzelprüfkörper erfolgte in Anlehnung an EN 26891. Das idealisierte Kraft-Weg-Diagramm zeigt die zur weiteren Auswertung erforderlichen Werte aus den Rohdaten der Prüfmaschine. Für jeden Einzelprüfkörper wurden die Verschiebungen am Belastungsast 1 (v_{01}, v_{04}), und die Verschiebungen am Belastungsast 2 (v_{21}, v_{24}), zur Berechnung der Federsteifigkeit K der Verbindung, und der Biegesteifigkeit EI der BSP-Platten entnommen. Weiters war der Bruchwert F_{max} zur Spannungsermittlung im Querschnitt erforderlich (siehe Abb. 5.84).

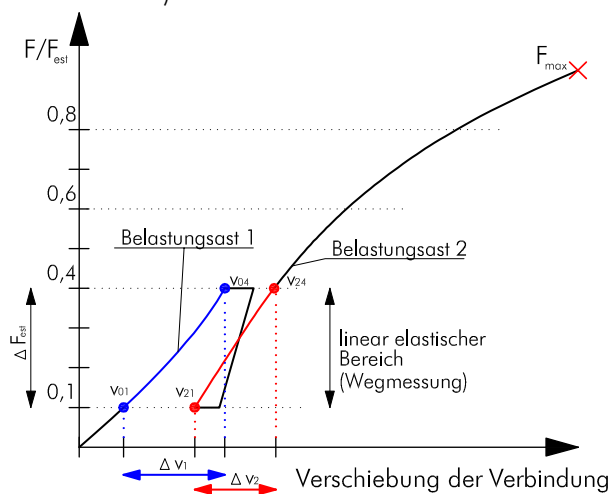


Abb. 5.84 Idealisiertes Kraft-Weg-Diagramm in Anlehnung an EN 26891

Im Zuge der Biegeprüfung wurden bis zu einer Belastung von $0,4 \cdot F_{\text{est}}$ (Tab. 5.6) in 8 Messpunkten (lt. Abb. 5.60) die Verformungen aufgezeichnet. Aus den Verformungsmessungen der jeweils paarweise symmetrischen Messpunkte (w_{A10} viermal und w_{A20} viermal), wurden die Mittelwerte gebildet. Die gemittelten Messwerte für die äußeren (WA10) und inneren Trägerabschnitte (WA20) wurden für die weiteren Auswerteberechnungen herangezogen. Auf die Indexbezeichnung „mean“ wurde verzichtet, da immer die gemittelten Werte aus den 4 Messpunkten verwendet wurden.

Um eventuelle Nachgiebigkeiten der Prüfmaschine und den Einfluss verschiedener Anfangsverformungen bei der Lastaufbringung auszuschalten, wurde für Belastungsast 1 die relative Kraft ΔF_{est} und die zugehörigen relativen Verschiebungen $\Delta v_{1,WA10}$ für den äußeren Trägerteil und $\Delta v_{1,WA20}$ für den inneren Trägerteil berechnet (lt. Abb. 5.84). Identisch wurde für Belastungsast 2 vorgegangen (Bezeichnung mit Index 2 für Belastungsast 2: z.B.: $\Delta v_{2,WA10}$).

Die relativen Kraft- und Verschiebungswerte wurden für die Berechnung der Federsteifigkeit der Verbindung herangezogen.

Tab. 5.11 zeigt beispielhaft die Aufbereitung der Messwerte für den Prüfkörper VO-A-p-o-800-01 (Abb. 5.45). Die Werte beziehen sich auf den in Abb. 5.84 blau dargestellten Belastungsast 1 ($\Delta v_{1,x}$).

F_{est} wurde mit 112,5 kN berechnet (Tab. 5.6).

Kräfte	Verschiebungen Trägerteil außen (WA10)	Verschiebungen Trägerteil innen (WA20)	Anmerkung
$0,4 F_{\text{est}} = 45 \text{ kN}$	$v_{04} = 5,11 \text{ mm}$	$v_{04} = 7,95 \text{ mm}$	Bezeichnung lt. Abb. 5.84
$0,1 F_{\text{est}} = 11,25 \text{ kN}$	$v_{01} = 1,14 \text{ mm}$	$v_{01} = 1,80 \text{ mm}$	Bezeichnung lt. Abb. 5.84
$\Delta F_{\text{est}} = 33,75 \text{ kN}$	$\Delta v_{1,WA10} = 3,96 \text{ mm}$	$\Delta v_{1,WA20} = 6,15 \text{ mm}$	relative Kräfte und Verschiebungen

Tab. 5.11 Berechnung der Relativen Kräfte und der zugehörigen Verschiebungen für Prüfkörper 01 der Konfiguration VO-0-A-p-u-800

Alle für die weitere Auswertung erforderlichen Messwerte der Prüfkörper nach Serien geordnet, finden sich in Tabellen in Abschnitt B.7.

5.2.7.3 Vorbemerkung zur statistischen Auswertung

Im Rahmen der Biegeversuche wurden verschiedene für die Beurteilung der Biegetragfähigkeit bzw. des Tragverhaltens der Verbindung relevante Messungen durchgeführt. Diese Messungen weisen Streuungen auf, die es zu beurteilen und auszuwerten gilt. Ziel der Versuche wäre eine Angabe der für die Dimensionierung erforderlichen Festigkeits- und Steifigkeitswerte der Verbindung. Die Angabe von charakteristischen Verbindungswiderständen erforderte umfangreichere Versuchsreihen (Tragverhalten auf Querkraft-

beanspruchung, Zug- bzw. Druckbeanspruchung, etc.). Im Rahmen dieser Arbeit wurde die statistische Bearbeitung auf einzelne statistische Kennwerte beschränkt, da das vorrangige Ziel eine Machbarkeitsstudie, bzw. die praktische Entwicklung des Verbindungssystems war.

Die nachfolgend angegebenen Versuchsergebnisse sind daher als eine erste Abschätzung des Biegetragverhaltens zu sehen und keinesfalls als wissenschaftlich abgesicherte Bemessungswerte für die Verbindung.

Im Rahmen der statistischen Bearbeitung wurden mehrere, für die versuchstechnische Ermittlung von Kennwerten im Holzbau, empfohlene Verteilungsfunktionen (siehe [36] bzw. [6]) benutzt, ohne jedoch eine genauere statistische Untersuchungen durchzuführen. Grundsätzlich sollten die empirisch ermittelten Daten mit der gewählten Verteilungsfunktion gute Übereinstimmungen ergeben.

Erfahrungsgemäß sind Festigkeitswerte im Bereich des Holzbaus oftmals logarithmisch-normalverteilt, Steifigkeitswerte eher normalverteilt [36]. Für die Auswertung der Prüfserien hinsichtlich der Festigkeiten (Bruchkräfte F_{max} , Spannungen) wurde vorab eine 2-parametrische-Logarithmische-Normalverteilung gewählt (rote Werte in Tab. 5.22), für die Angabe der Steifigkeiten (Biegesteifigkeit EI_{calc} , Federsteifigkeit K) wurde eine normalverteilte Grundgesamtheit angenommen (Tab. 5.20 und Tab. 5.21). Tab. 5.22 zeigt auch vergleichsweise die Abschätzung der 5%-Quantilwerte für Bruch auf Basis einer normalverteilten, einer 2-parametrisch-logarithmisch-normalverteilten, und einer t-verteilten Grundgesamtheit nach ON EN 14358.

Der charakteristische Festigkeitswert lt. EN 14358 Wert ist nach folgender Gleichung zu bestimmen:

$$m_k = e^{(\bar{y} - k_s s_y)} \quad [5.28]$$

mit: \bar{y} Mittelwert
 s_y Standardabweichung
 k_s k_s -Wert

Alle Parameter sind nach EN 14358 zu berechnen.

Der k_s -Wert wird zur Bestimmung des charakteristischen Wertes m_k benötigt. Dieser berücksichtigt Unsicherheiten bei geringer Stichprobenanzahl. Der Wert kann Tabelle 1 der ÖNORM entnommen werden. Fehlende Werte wurden im Statistik-Programm R berechnet.

Anzahl n	k_s -Wert
3	3,15
4	2,68
5	2,46

Tab. 5.12 k_s -Werte nach EN 14358

Anzahl n	k_s -Wert
6	2,34
7	2,25
8	2,19
9	2,14
10	2,10

Tab. 5.12 k_s -Werte nach EN 14358

Die Vorgehensweise und weitere notwendige Gleichungen zur Ermittlung des charakteristischen Festigkeitswertes finden sich in EN 14358.

Informationen zu den Verteilungsfunktionen finden sich in [36] in [38] oder in fachspezifischer Literatur.

Die Ergebnisse der Auswertung wurden graphisch dargestellt. Gewählt wurden zwei Darstellungsarten.

Für die Steifigkeiten wurde die Darstellung in Abb. 5.85 gewählt. Die horizontalen Linien begrenzen den Messbereich der Prüferie mit dem minimalen und dem maximalen Messwert. Der Mittelwert wurde als Punkt dargestellt.

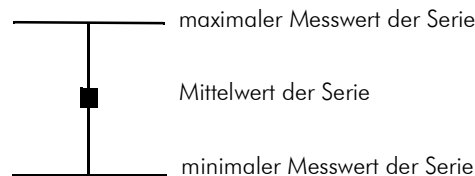


Abb. 5.85 Graphische Darstellung der Steifigkeitswerte

Für die graphische Darstellung der Festigkeitswerte wurden BOX-Plots erstellt. Abb. 5.86 erklärt diese Darstellungart (aus [28]).

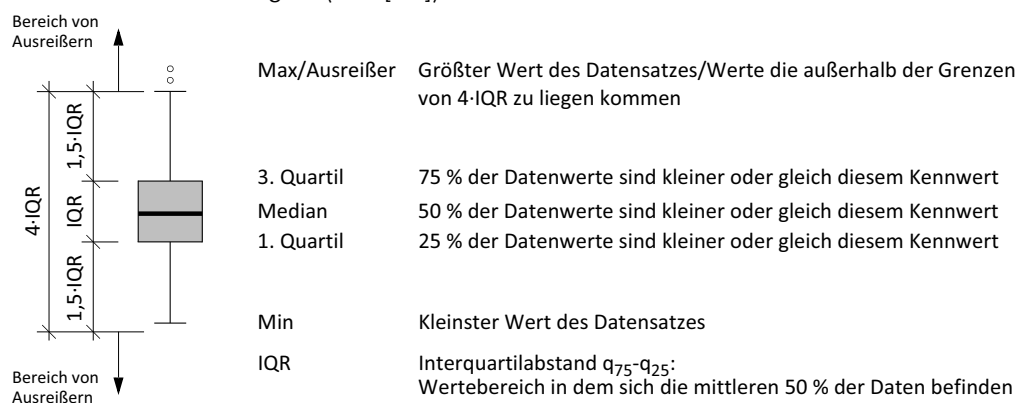


Abb. 5.86 BOX Plot Darstellung

Die graphischen Darstellungen wurden mit dem Statistik-Programm R [56] berechnet

und erstellt. Informationen zum Programm finden sich in [27], [40] und [41].

5.2.7.4 Auswertung der Steifigkeiten

Einzelauswertung der Prüfkörper

Abweichend zum statischen Modell der Vorbemessung, in der die Klebeverbindung als biegesteif angenommen wurde, ist die Verbindung in der Realität nachgiebig. Die Kenntnis dieser Nachgiebigkeiten ist für eine verbesserte realitätsnahe Modellierung im Zuge einer statischen Systemberechnung von Interesse.

Zur Ermittlung der Federsteifigkeit der Verbindung wird das statische System lt. Abb. 5.87 verwendet. Für die Modellierung der Verbindung wird eine Drehfeder (Drehfedersteifigkeit K) eingeführt. Unbekannt sind weiters die Biegesteifigkeit EI und die Schubsteifigkeit S der BSP-Platte.

Die Auswertung der Prüfkörper bezüglich ihrer Nachgiebigkeit erfolgte nur für die V0-Varianten (Gehrungswinkel 0°).

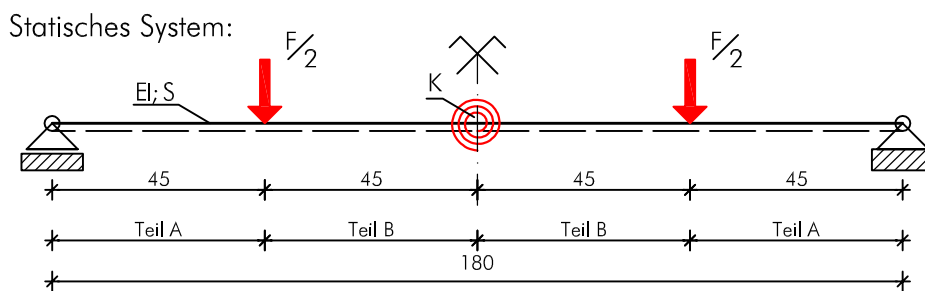


Abb. 5.87 Statisches System der Biegeprüfkonfiguration mit Drehfeder

tim Dieses Modell kann unter Berücksichtigung der Schubverformung (Grundlage: Timoschenko Balken) analytisch gelöst werden. Für die Berechnung der Verformungen (w_A bzw. w_B lt. Abb. 5.88) muss ein Differentialgleichungssystem 4. Ordnung für Teil A ($0 \leq x_A \leq a$) und Teil B ($0 \leq x_B \leq b$) des Trägers (Abb. 5.87), unter Berücksichtigung der Rand-, Übergangs- und Symmetriebedingungen gelöst werden. Die Berechnung erfolgte durch Th. Bogensperger.

Im Zuge der Biegeprüfungen wurden an 8 Messpunkten Verformungen des Prüfkörpers gemessen. Die genaue Bezeichnung und Lage der Messpunkte bzw. Messgeräte kann in Abschnitt 5.2.6 nachgelesen werden.

Die Verformungsmessungen W_{A20} bzw. W_B in Abb. 5.88 befinden sich genau im Halbierungspunkt des in der Platte eingebundenen Verbinders. Der Grund dieser Anordnung ist die Annahme, dass sich in diesem Punkt (Zentrum der Verbindung) die tatsächliche Verformung des Systems mit der in Abb. 5.88 qualitativ dargestellten Biegelinie, und dem angenommenen statischen Modell deckt (annähernd stetiger Verlauf in Trägerteil B bis zu diesem Punkt). Die Messpunkte in Trägerteil A (W_{A10} bzw. w_A) befinden sich im Halbierungspunkt zum Auflager.

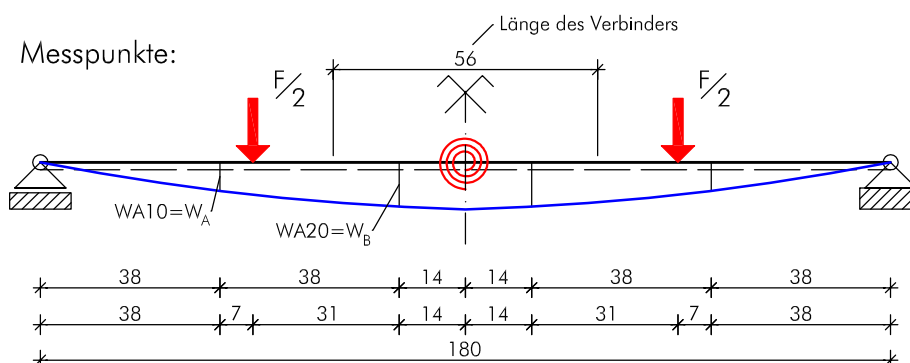


Abb. 5.88 Geometrieverhältnisse der Biegeprüfkonfiguration mit Messpunkten

Berechnung der Steifigkeiten:

Mit den Lösungsgleichungen (Anhang B, Abschnitt Gl. [B.1] und Gl. [B.3]) des Differentialgleichungssystem können nun die Verformungen in jedem Punkt des Trägers ermittelt werden.

Als Eingangswerte benötigt man die Federsteifigkeit K der Verbindung, die Biegesteifigkeit EI und die Schubsteifigkeit S der Platte. Diese Steifigkeiten sind unbekannt.

Die im Zuge der Biegeprüfungen gemessenen Verformungen $w_A(x)$ und $w_B(x)$, können jedoch in die Gleichungen eingesetzt werden, und ermöglichen die Berechnung der Federsteifigkeit K und einer weiteren unbekanntes Steifigkeit.

Eine der beiden Plattensteifigkeiten muss nach Kapitel 2 berechnet und somit angenommen werden. Nachdem der Einfluss der Schubsteifigkeit auf die Gesamtverformung wesentlich geringer als jener der Biegesteifigkeit ist, wurde die Schubsteifigkeit nach Gl. [2.2] in Kapitel 2 berechnet.

Löst man die Gl. [B.1] und Gl. [B.3] in Anhang B Abschnitt nach der Federsteifigkeit K und der Biegesteifigkeit EI , so erhält man die Auswertgleichungen für die Steifigkeiten. Biegesteifigkeit EI :

$$EI = \frac{FSx_A \times (a^3 - ax_A^2 + 3a^2x_B - x_A^2x_B + 3ax_B^2)}{12aSw_A - (12Sw_Bx_A + 12Sw_Ax_B) - 6Fx_Ax_B} \quad [5.29]$$

Drehfedersteifigkeit K :

$$K = \frac{aFSx_A \times (-a^3 + ax_A^2 - 3a^2x_B + x_A^2x_B - 3ax_B^2)}{(8a^3Sw_A + 24a^2bSw_A + 2a^3Fx_A - 12a^2Sw_Bx_A - 24abSw_Bx_A - 2aFx_A^3 + 4Sw_Bx_A^3 + 24abSw_Ax_B - 12abFx_Ax_B - 12aSw_Ax_B^2 + 6aFx_Ax_B^2)} \quad [5.30]$$

mit den Eingangswerten lt. Abb. 5.87 und Abb. 5.88

und der Schubsteifigkeit S errechnet nach Kapitel 2 Gl. [2.2].

Wie in Abschnitt 5.2.7.2 beschrieben, wurden für die Berechnungen nicht die absoluten,

sondern relative Werte der Kräfte und ihre zugehörigen Verschiebungen verwendet. Einsetzen der Messwerte in Gl. [5.29] und Gl. [5.30] (mit ΔF_{est} für F , $\Delta v_{1,WA10}$ für w_A , $\Delta v_{1,WA20}$ für w_B (Bezeichnungen beispielhaft für Belastungsast 1)) und der errechneten Schubsteifigkeit S der Platte (7564,01 kN für den 1m breiten Plattenstreifen lt. Kapitel 2 Tab. 2.4) liefert die errechnete Biegesteifigkeit der Platte EI_{calc} und die Federsteifigkeit der Verbindung k .

Die Einzelauswertung der Prüfkörper hinsichtlich der Feder- und Biegesteifigkeit wurde mit einem Tabellenkalkulationsprogramm durchgeführt. Die Ergebnisse für alle Prüfkörper liegen in Abschnitt B.7 bei.

Beispielhaft wird die Berechnung für einen Prüfkörper der Serie **V0-0-A-p-u-800-01** (siehe Abschnitt 5.2.4.2).

Zur Berechnung der Steifigkeiten benötigt man folgende Eingangswerte.

Geometriewerte:

	Trägereil A	Trägereil B	Anmerkung
Länge	$a=0,45$ m	$b=0,45$ m	lt. Abb. 5.87 bzw. Abb. 5.88
Abstand	$x_A=0,38$ m	$x_B=0,31$ m	lt. Abb. 5.87 bzw. Abb. 5.88

Tab. 5.13 Geometrie Eingangswerte zur Ermittlung der Feder- und Biegesteifigkeit

Steifigkeiten:

Steifigkeiten	Kurzbezeichnung	Wert [N/mm ²]
Elastizitätsmodul parallel zur Faser	$E_{0,mean}$	12000
Elastizitätsmodul normal zur Faser	$E_{90,mean}$	370
Schubmodul parallel zur Faser	$G_{0,mean}$	690
Rollschubmodul	$G_{r,mean}$	50

Tab. 5.14 Steifigkeiten der KLH-Brettsperrholzplatten lt. Zulassung [20]

	Trägereil A	Trägereil B	Anmerkung
Schubkorrekturfaktor κ	5,45 [-]	5,45 [-]	berechnet lt. Kap.2 nach Gl. [2.2]
$S=G_{BSP,b=1,0\text{ m}}$	7564,0 kN/m	7564,0 kN/m	Ermittlung lt. Kap. 2 Gl. [2.2]

Tab. 5.15 Schubkorrekturfaktor und errechnete Schubsteifigkeit für die BSP-Platte

	Trägerteil A	Trägerteil B	Anmerkung
$S = G_{BSP,b=0,8\text{ m}}$	6051,2 kN/m	6051,2 kN/m	--

Tab. 5.15 Schubkorrekturfaktor und errechnete Schubsteifigkeit für die BSP-Platte

Messwerte, Kräfte und Verschiebungen:

Für diese Prüfkfiguration wurde ein erwarteter Bruchwert von $F_{est} = 112,5\text{ kN}$ errechnet (Abschnitt 5.2.3.5). Die Messwerte beziehen sich auf den Belastungsast 1 ($\Delta v_{1,x}$)

Kräfte	Verschiebungen Trägerteil A ($W_{A10} = W_A$)	Verschiebungen Trägerteil B ($W_{A20} = W_B$)	Anmerkung
$0,4 F_{est} = 45\text{ kN}$	$v_{04} = 5,11\text{ mm}$	$v_{04} = 7,95\text{ mm}$	Messwerte lt. Abb. 5.84
$0,1 F_{est} = 11,25\text{ kN}$	$v_{01} = 1,14\text{ mm}$	$v_{01} = 1,80\text{ mm}$	Messwerte lt. Abb. 5.84
$F = \Delta F_{est} = 33,75\text{ kN}$	$w_A(x) = \Delta v_{1;WA10} = 3,96\text{ mm}$	$w_B(x) = \Delta v_{1;WA20} = 6,15\text{ mm}$	relative Kräfte und Verschiebungen = Eingabewerte

Tab. 5.16 Kräfte und Verschiebungen zur Ermittlung der Feder- und Biegesteifigkeit für Versuch V0-0-A-p-u-800-01

Setzt man die rot gedruckten Werte in Gl. [5.29] bzw. Gl. [5.30] so errechnet sich die Biegesteifigkeit EI_{calc} zu $913,25\text{ kNm}^2/\text{m}$ und die Federsteifigkeit K zu 1529 kNm . Diese Werte beziehen sich auf eine Breite von 800 mm .

Die Werte für $1,0\text{ m}$ Breite sind in Tab. 5.17 dargestellt.

Auswertung für $1,0\text{ m}$ Verbindungsstreifen	
Biegesteifigkeit errechnet:	$EI_{calc} = 1142\text{ kNm}^2/\text{m}$
Federsteifigkeit errechnet:	$K_{calc} = 1911\text{ kNm}/\text{m}$

Tab. 5.17 Biegesteifigkeit und Federsteifigkeit errechnet

Anmerkung zur Berechnung der Biege- und Federsteifigkeit:

Die Ergebnisse EI_{calc} und K_{calc} reagieren sehr empfindlich auf eine Änderung und somit Fehler der Verformungsmessung.

Eine Änderung der Relativverschiebung $w_A(x)$ um $+0,1\text{ mm}$, von $3,96$ auf $4,06\text{ mm}$ ver-

ändert das Ergebnis lt. Tab. 5.18

Auswertung für 1,0 m Verbindungsstreifen			
Verformung	$w_A(x) = \Delta v_1; w_{A10} =$ 3,96 mm $w_B(x) = \Delta v_1; w_{A20} =$ 6,15 mm	$w_A(x) = \Delta v_1; w_{A10} =$ 4,06 mm $w_B(x) = \Delta v_1; w_{A20} =$ 6,15 mm	Änderung [%]
EI_{alc}	1142 kNm ² /m	938 kNm ² /m	-17,8
K_{calc}	1911 kNm/m	2920 kNm/m	+52,8

Tab. 5.18 Einfluss der Verformungsmessung auf die errechneten Steifigkeiten

Eine Veränderung beider Messwerte $w_A(x)$ und $w_B(x)$ um +0,1 mm wirkt sich weniger stark aus.

Auswertung für 1,0 m Verbindungsstreifen			
Verformung	$w_A(x) = \Delta v_1; w_{A10} =$ 3,96 mm $w_B(x) = \Delta v_1; w_{A20} =$ 6,15 mm	$w_A(x) = \Delta v_1; w_{A10} =$ 4,06 mm $w_B(x) = \Delta v_1; w_{A20} =$ 6,25 mm	Änderung [%]
EI_{alc}	1142 kNm ² /m	1030 kNm ² /m	-9,8
K_{calc}	1911 kNm/m	2171 kNm/m	+13,6

Tab. 5.19 Einfluss der Verformungsmessung auf die errechneten Steifigkeiten

Serienauswertung der Feder- und Biegesteifigkeit

Die nachfolgenden Tabellen (Tab. 5.20 und Tab. 5.21) zeigen die Zusammenfassung der Auswertung aller Prüfkonfigurationen ohne Gehrungswinkel (nur V0) bezüglich der Biegesteifigkeit EI und dem daraus resultierenden Trägheitsmoment I (unter Berücksichtigung des gewählten Referenzelastizitätsmoduls von 12000 N/mm²), und der Federsteifigkeit K . Es wurde Belastungsast 1 und Belastungsast 2 (Abb. 5.84) getrennt ausgewertet.

Die statistische Abschätzung (Mittelwert, 95%-Quantilwert, 5%-Quantilwert) bezüglich der Biege- und Federsteifigkeit der verschiedenen Prüfkonfigurationen erfolgte auf Grundlage einer normalverteilten Grundgesamtheit (siehe Kapitel Spannungsermittlung nachfolgend). Mittelwerte sind in den folgenden Tabellen rot gedruckt. Die Ermittlung der Steifigkeiten für die Einzelprüfkörper erfolgte wie in Abschnitt 5.2.7.2 gezeigt und kann in Abschnitt B.7 eingesehen werden.

Steifigkeitsauswertung für Belastungsast 1

Variante:	V0-0-A-P-U-085-R 085 10 Stk	V0-0-A-P-U-265 265 6 Stk	V0-0-A-P-U-800 800 5 Stk	V0-0-C-P-U-800 800 7 Stk	V0-0-A-P-O-800 800 5 Stk	V0-08-A-P-U-800 800 7 Stk
$\Delta F_{est} = 0,4 F_{est} - 0,1 F_{est}$	3,30 kN	12,00 kN	33,75 kN	33,75 kN	33,75 kN	33,75 kN
Verformungen, gemessen (Mittelwert der Messwerte)	$\Delta v_{1,WA10,mean} = 4,15$ mm $\Delta v_{1,WA20,mean} = 6,40$ mm	4,36 mm 6,64 mm	4,23 mm 6,57 mm	3,87 mm 5,87 mm	4,33 mm 6,79 mm	4,73 mm 7,40 mm
Federsteifigkeit:	$K_{1,05}$ [kNm] 1607 $K_{1,mean}$ [kNm] 2046 2484 $K_{1,95}$ [kNm] 2484	2044 2525 3005	1691 1821 1952	2046 2668 3289	1658 2069 2481	1055 1681 2308
Biegesteifigkeit:	COV 13,0%	21,2%	4,4%	14,2%	12,1%	22,7%
	$El_{calc,1,05}$ [kNm ² /m] 724 $El_{calc,1,mean}$ [kNm ² /m] 889 1053 $El_{calc,1,95}$ [kNm ² /m] 1053	894 986 1078	870 1038 1205	901 1066 1232	807 898 989	595 915 1236
Trägheitsmoment:	COV 11,3%	13,4%	9,8%	9,4%	6,1%	21,3%
	$I_{(2000),1,05}$ [cm ⁴ /m] 6034 $I_{(2000),1,mean}$ [cm ⁴ /m] 7405 8775 $I_{(2000),1,95}$ [cm ⁴ /m] 8775	7446 8214 8981	7252 8648 10044	7508 8886 10265	6729 7485 8241	4959 7629 10299
Auswertung Belastungsast 1						

Tab. 5.20 Auswertung der Biegesteifigkeit El und der Federsteifigkeit K für Varianten V0°; Belastungsast 1

Abb. 5.89 und Abb. 5.90 zeigen eine graphische Darstellung der Auswertung bezüglich der Biegesteifigkeit EI_{calc} bzw. der Federsteifigkeit K für **Belastungsast 1**. Dargestellt sind die Minimal-, die Maximal- und die Mittelwerte für jede Prüfserie. Weiters wurde die Anzahl der Prüfkörper (n) und der Variationskoeffizient (COV) angegeben.

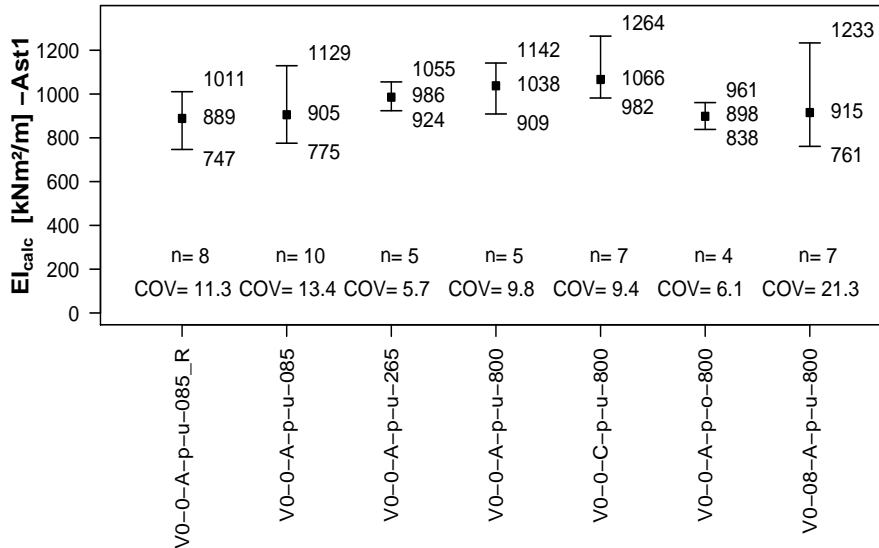


Abb. 5.89 Biegesteifigkeit EI_{calc} für Belastungsast 1 der Verbindungsplatten

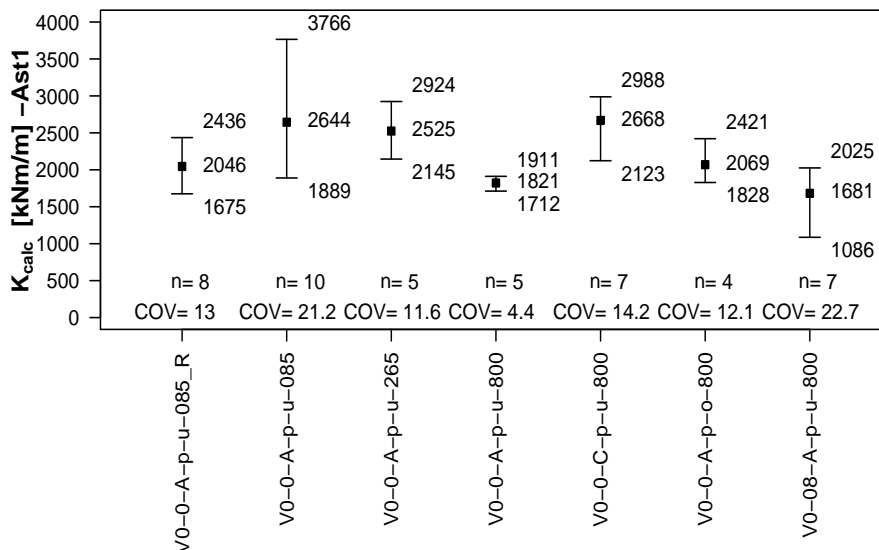


Abb. 5.90 Drehfedersteifigkeit K_{calc} für Belastungsast 1 der Verbindungsplatten

Abb. 5.91 zeigt die Gesamtauswertung aller Prüfkörper für **Belastungsast 1** bezüglich der Steifigkeiten.

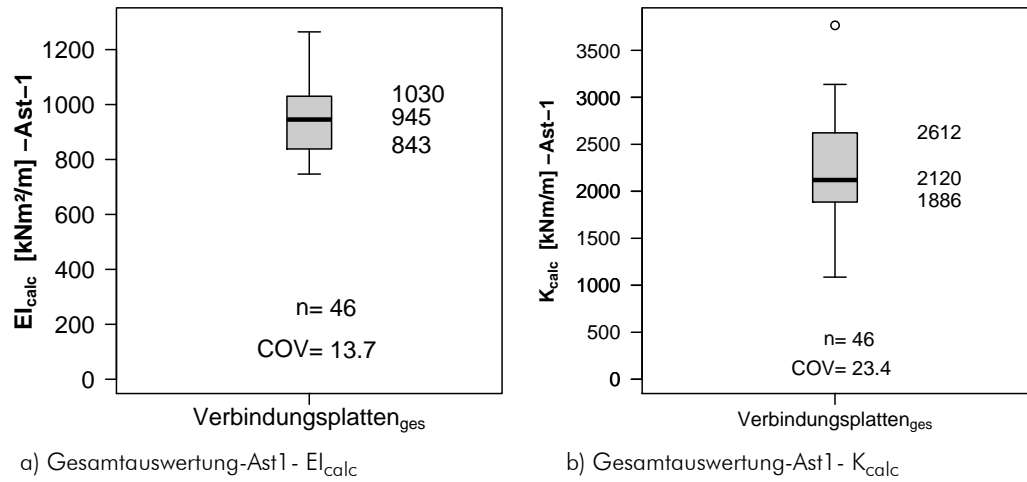


Abb. 5.91 Gesamtauswertung Verbindungsplatten Ast 1

Steifigkeitsauswertung für Belastungsast 2

Variante:	V0-0-A-P-U-085-R 8 Stk	V0-0-A-P-U-085 10 Stk	V0-0-A-P-U-265 6 Stk	V0-0-A-P-U-800 5 Stk	V0-0-C-P-U-800 7 Stk	V0-0-A-P-O-800 5 Stk	V0-08-A-P-U-800 7 Stk
	$\Delta F_{est} = 0,4 F_{est} - 0,1 F_{est}$	3,30 kN	12,00 kN	33,75 kN	33,75 kN	33,75 kN	33,75 kN
Verformung, gemessen	$\Delta v_{2,W\Delta 10,mean} = 4,05$ mm $\Delta v_{2,W\Delta 20,mean} = 6,21$ mm	3,85 mm 5,83 mm	4,32 mm 6,55 mm	4,13 mm 6,38 mm	3,80 mm 5,76 mm	4,21 mm 6,58 mm	4,60 mm 7,18 mm
Federsteifigkeit:	$K_{2,05}$ [kNm] $K_{2,mean}$ [kNm] $K_{2,95}$ [kNm]	1834 2899 3965	2164 2783 3401	1830 1967 2104	2191 2770 3349	1721 2230 2739	1078 1787 2497
	COV	22,3%	13,5%	4,2%	12,7%	13,9%	24,1%
Biegesteifigkeit:	$EI_{calc,2,05}$ [kNm ² /m] $EI_{calc,2,mean}$ [kNm ² /m] $EI_{calc,2,95}$ [kNm ² /m]	735 903 1070	865 975 1085	875 1053 1230	926 1086 1247	817 922 1027	592 945 1299
	COV	11,3%	6,8%	10,2%	9,0%	6,9%	22,7%
Trägheitsmoment:	$I_{(12000),2,05}$ [cm ⁴ /m] $I_{(12000),2,mean}$ [cm ⁴ /m] $I_{(12000),2,95}$ [cm ⁴ /m]	6129 7525 8921	7210 8124 9039	7295 8773 10251	7715 9053 10391	6808 7685 8562	4931 7879 10827
Auswertung Belastungsast 2							

Tab. 5.21 Auswertung der Biegesteifigkeit EI und der Federsteifigkeit K für Varianten V0°; Belastungsast 2

Abb. 5.92 und Abb. 5.93 zeigt eine graphische Darstellung der Auswertung bezüglich der Biegesteifigkeit EI_{calc} bzw der Federsteifigkeit K für **Belastungsast 2**. Dargestellt sind die Minimal-, die Maximal- und die Mittelwerte für jede Prüferie. Weiters wurde die Anzahl der Prüfkörper (n) und der Variationskoeffizient (COV) angegeben.

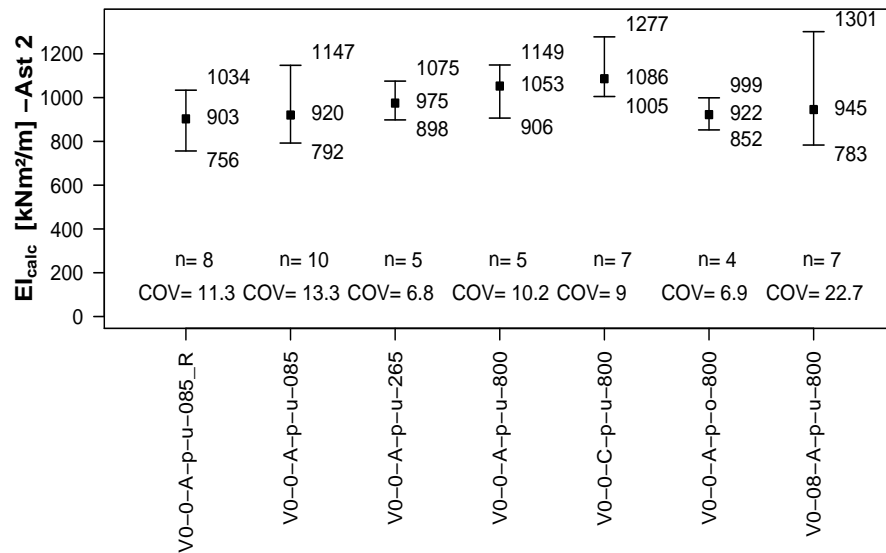


Abb. 5.92 Biegesteifigkeit EI_{calc} für Belastungsast 2 der Verbindungsplatten

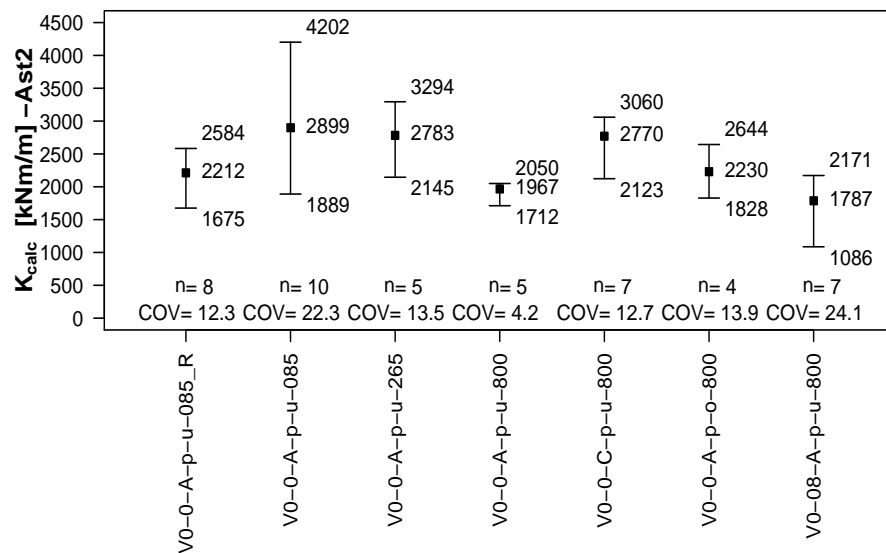


Abb. 5.93 Drehfedersteifigkeit K_{calc} für Belastungsast 1 der Verbindungsplatten

Abb. 5.94 zeigt die Gesamtauswertung aller Prüfkörper für **Belastungsast 2** bezüglich der Steifigkeiten.

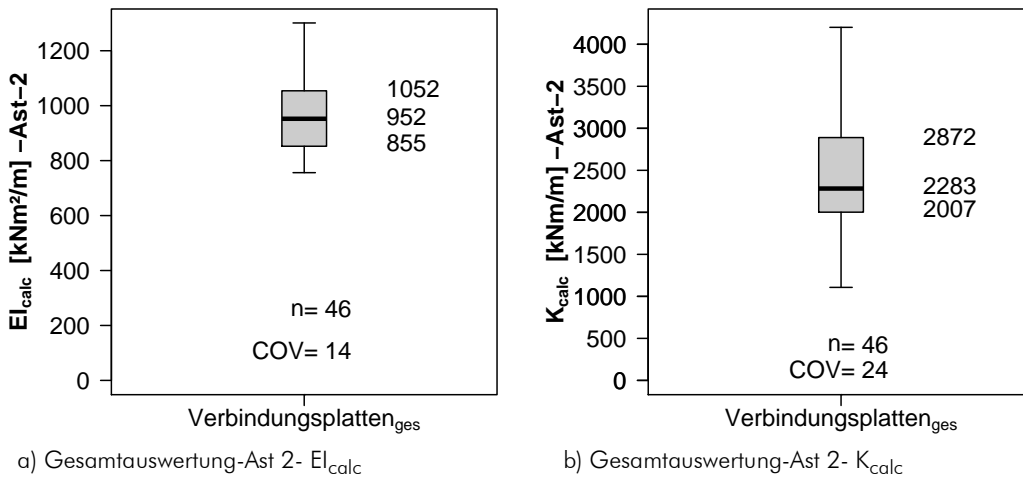


Abb. 5.94 Gesamtauswertung Verbindungsplatten Ast 2

5.2.7.5 Auswertung der Festigkeiten

Bruchkräfte

Wie in Abschnitt 5.2.7.3 beschrieben, wurden für die Ermittlung der Festigkeiten die Bruchkräfte der Prüfkörper statistisch ausgewertet, um eine Abschätzung der charakteristischen Festigkeitswerte der einzelnen Prüfserien angeben zu können. Tab. 5.22 zeigt die 5%-Quantilwerte der Bruchkräfte für verschiedene Verteilungsfunktionen. Vergleichend sind die Werte für eine normalverteilte, eine 2-parametrisch-normalverteilte und eine t-verteilte (nach EN14358) Grundgesamtheit dargestellt. Die Werte für eine 2-p-Normalverteilte Grundgesamtheit (rot gedruckte Werte) wurden in weiterer Folge für die Berechnung der Spannungen im Querschnitt herangezogen.

Variante:	V0-0-A-P-U-085-R	V0-0-A-P-U-085	V0-0-A-P-U-265	V0-0-A-P-U-800	V0-0-C-P-U-800
Anzahl Prüfkörper	8 Stk	10 Stk	6 Stk	5 Stk	7 Stk
Erwartungswert Bruch	11,0	11,0	40,0	112,5	112,5
Bruchlast Mittelwert	12,7	12,5	39,1	114,7	120,2
Kräfte	$F_{\max,mean} / F_{est}$ [kN]	1,16	0,98	1,02	1,07
Variationskoeffizient:	COV	15,0%	13,0%	5,8%	7,0%
Normalverteil	$F_{0,5,NV}$ [kN]	9,59	9,84	35,37	101,41
Studentische t-Verteilung	$F_{0,5,stud+V}$ [kN]	8,90	9,43	34,03	96,34
2p-Log Normalv.	$F_{0,5;2-p-Log-NV}$ [kN]	9,85	10,03	35,49	101,91
111,59					
111,38					
108,69					
111,59					

Variante:	V0-0-A-P-O-800	V0-08-A-P-U-800	V30-0-A-P-U-800	V30-0-A-N-U-800
Anzahl Prüfkörper	5 Stk	7 Stk	7 Stk	7 Stk
Erwartungswert Bruch	112,5	112,5	112,5	112,5
Bruchlast Mittelwert	107,6	100,5	128,3	125,9
Kräfte	$F_{\max,mean} / F_{est}$ [kN]	0,96	0,89	1,14
Variationskoeffizient:	COV	8,2%	4,3%	6,1%
Normalverteil	$F_{0,5,NV}$ [kN]	93,03	93,45	115,41
Studentische t-Verteilung	$F_{0,5,stud+V}$ [kN]	87,98	91,32	110,80
2p-Log Normalv.	$F_{0,5;2-p-Log-NV}$ [kN]	93,67	93,61	115,83
115,81				

Tab. 5.22 Statistische Auswertung der Bruchkräfte

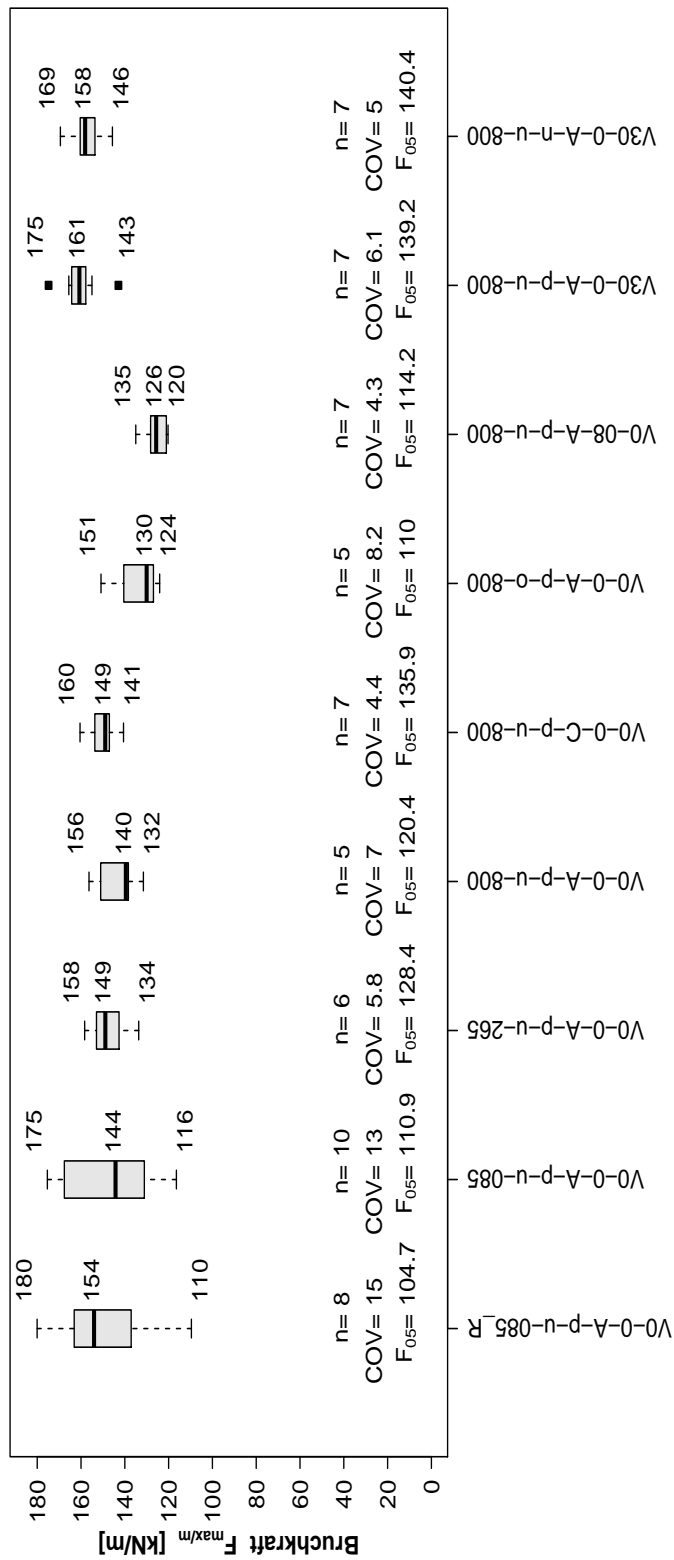


Abb. 5.95 Bruchkräfte der Verbindungsplatten (Prüfserien) für einen 1 m breiten Plattenstreifen

Abb. 5.95 zeigt eine graphische Darstellung der Auswertung bezüglich der Bruchkräfte. Dargestellt sind Boxplots für jede Prüfserie. Die erreichten Kräfte der einzelnen Prüfkörper wurden zur besseren Vergleichbarkeit auf einen 1 Meter breiten Plattenstreifen hochgerechnet. In Abb. 5.95 wurden die Minimal- und Maximalwerte, und der Median beschriftet. Weiters wurde die Anzahl der Prüfkörper (n) der Variationskoeffizient (COV) und der geschätzte 5%-Quantilwert F_{05} auf Basis der Studentschen-t-Verteilung nach EN 14358 angegeben.

Einzelauswertung der Prüfkörper

Spannungsermittlung

Die Berechnung der Spannungen im Querschnitt erfolgte auf zwei Arten.

- Variante 1:

Die Spannungen wurden für jede Prüfserie mit den 5%-Quantilschätzwerten auf Basis einer 2-p-normalverteilten Grundgesamtheit berechnet (rot gedruckte Werte in Tab. 5.22).

- Variante 2:

Im Tabellenkalkulationsprogramm MS-Excel wurden die Spannungen zum Zeitpunkt des Verbindungsbruchs für jeden einzelnen Prüfkörper errechnet. Die errechneten Bruchspannungen wurden in weiterer Folge im Statistik-Programm R für jede Serie ausgewertet (Schätzung des 5%-Quantilwertes) und graphisch dargestellt (Boxplot).

Beispielhaft wird die Spannungsermittlung im Querschnitt für eine Prüfserie nach Variante 1 gezeigt. Dies entspricht dem Rechengang zur Spannungsermittlung des Einzelprüfkörpers nach Variante 2.

Als statistische Grundlage zur Ermittlung der Biegespannung diene das Modell lt. Abb. 5.96.

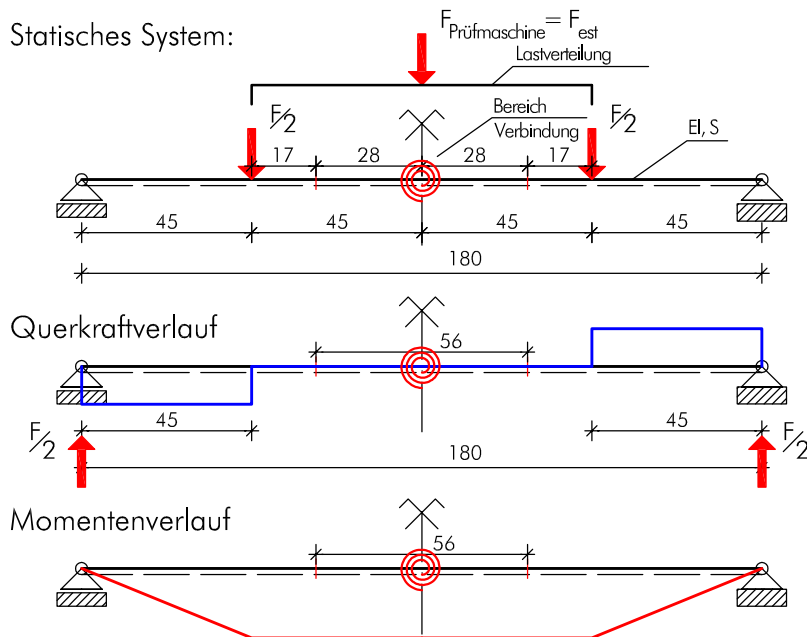
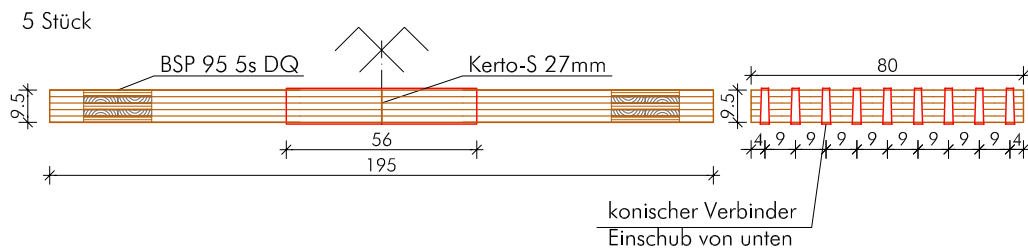


Abb. 5.96 Baustatisches Modell zur Spannungsermittlung der Biegeprüfplatten

tim

Folgend ist die Berechnung der Biege- und Schubspannungen im Verbindungsquerschnitt dargestellt. Beispielhaft wird die Berechnung für die Prüfserie der Konfiguration V0-0-A-p-u-800 durchgeführt. Der Querschnittsaufbau der BSP-Platte ist 5-schichtig (5x19mm).



Die Geometrie des Kerto-Verbinders:

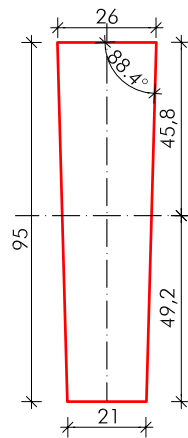


Abb. 5.97 Querschnitt des Verbinders

Die Momentenbeanspruchung des Querschnitts errechnet sich zu:

$$M_{rd,05} = \frac{F_{05,2-p-log-NV} \times 0,45}{2} = \frac{101,91 \times 0,45}{2} = 22,9 \text{ kNm} \quad [5.31]$$

Der 5%-Quantilwert für die Prüfsérie V0-A-p-u-800 wurde aus Tab. 5.22 entnommen.

Die Biegerandspannung im Bruttoquerschnitt der BSP-Platte:

$$\sigma_{b,05,clt,brutto} = \frac{M_{rd,05}}{K_{clt,brutto}} \times E_{ref} \times \frac{h_{clt}}{2} \quad [5.32]$$

$$\sigma_{b,05,clt,brutto} = \frac{22,9 \times 10^6}{(6,85 \times 10^{11}) \times 0,8} \times 12000 \times \frac{95}{2} = 23,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Die Berechnung der Biegesteifigkeit K_{clt} erfolgte nach Kapitel 4 Gl. [4.6].

Die Biegerandspannung im Nettoquerschnitt der BSP-Platte:

$$\sigma_{b,05,clt,netto} = \frac{M_{rd,05}}{K_{clt,netto}} \times E_{ref} \times \frac{h_{clt}}{2} \quad [5.33]$$

$$\sigma_{b,05,clt,netto} = \frac{22,93 \times 10^6}{3,88 \times 10^{11}} \times 12000 \times \frac{95}{2} = 33,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

mit:

$$K_{clt,netto} = K_{clt} \times b_{netto} = 6,85 \times 10^{11} \times (0,8 - 9 \times 0,026) = 3,88 \times 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [5.34]$$

Die Biegezugspannung im Kertverbinder:

$$\sigma_{b, \text{Kerto}, 05} = \frac{M_{rd, 05} / n_{\text{Kerto}}}{I_{\text{Verbinder}}} \times z_{\text{Verbinder}} \quad [5.35]$$

$$\sigma_{b, \text{Kerto}, 05} = \frac{(22,9 \times 10^6) / 9}{1673000} \times 45,8 = 69,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

mit: n_{Kerto} Anzahl der Verbinder im Querschnitt
 $I_{\text{Verbinder}}$ Flächenträgheitsmoment des Verbinders (lt. Abb. 5.97)
 $z_{\text{Verbinder}}$ Abstand zur Randfaser

Schubspannung in der Randlamelle

Mittlere Biegezugspannung in der Randlamelle der BSP-Platte:

$$\sigma_{m, \text{clt}, 05} = \frac{M_{rd, 05}}{K_{\text{clt}, \text{brutto}}} \times E_{\text{ref}} \times \left(\frac{h_{\text{clt}}}{2} - \frac{t_1}{2} \right) \quad [5.36]$$

$$\sigma_{m, \text{clt}, 05} = \frac{22,9 \times 10^6}{(6,85 \times 10^{11}) \times 0,8} \times 12000 \times \left(\frac{95}{2} - \frac{19}{2} \right) = 19,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Zugkraft in der Randlamelle:

$$F_{Z, 05} = \sigma_{m, \text{clt}, 05} \times t_1 \times b_{\text{clt}} \quad [5.37]$$

$$F_{Z, 05} = 19,1 \times 19 \times 800 = 290320,0 \text{ N} = 290 \text{ kN}$$

mit: t_1 Dicke der Randlamelle
 $t_1 = 19 \text{ mm}$

Berechnung der Schubfläche:

$$A_{\text{schub}} = 2 \times t_1 \times l_{\text{gew}} \times LA_{\text{vorh}} \quad [5.38]$$

$$A_{\text{schub}} = 2 \times 19 \times 280 \times 9 = 95760 \text{ mm}^2$$

Berechnung der Schubspannung in der Randlamelle:

$$\tau_{05} = \frac{F_{Z, 05}}{A_{\text{schub}}} \quad [5.39]$$

$$\tau_{05} = \frac{290320,0}{95760} = 3,03 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$$

Zusammenfassung des Berechnungsbeispiels-Spannungsvergleich mit Zulassungswerten

Die zulässigen Festigkeitswerte der Materialien sind:

Die für die Auswertung relevanten Festigkeitswerte für BSP sind lt. BSP-Handbuch [24]:

Beanspruchung	Schub parallel zur Faser [$f_{v,k}$]	Biegung [$f_{m,k}$]
BSP-Graz	3,0 N/mm ²	28,9 N/mm ²

Tab. 5.23 Relevante Festigkeitskennwerte für BSP lt. [24]

Die für die Auswertung relevanten Festigkeitswerte für den Verbinder sind lt. Zulassung [19]:

Beanspruchung	Schub [$f_{v,k}$]	Biegung [$f_{m,k}$]
Kerto-S als Platte	2,3 N/mm ²	--
Kerto-S als Scheibe	--	48 N/mm ²

Tab. 5.24 Relevante Festigkeitskennwerte Kerto-S lt. [19]

Als Zusammenfassung zeigt die Tab. 5.25 eine Gegenüberstellung der errechneten charakteristischen (5%-Quantilwerte) Spannungen und den lt. Zulassung bzw. für BSP lt. Modell-BSP-Graz erlaubten.

Beanspruchung	charakteristische Spannung [N/mm ²]	errechnete Spannung (5%-Quantilwert) [N/mm ²]	Verhältnis
Biegung BSP brutto	28,9	23,9	0,83
Biegung BSP netto	28,9	33,7	1,17
Biegung Kertoverbinder	48,0	69,8	1,45
Schubspannung in der Randlamelle	2,3 (Kerto)	3,03	1,32

Tab. 5.25 Spannungsvergleich für Berechnungsbeispiel

Anmerkung:

Für die Varianten V30-A-p-u-800 und V30-A-n-u-800 stimmt die angenommene Spannungsverteilung für die Kertoverbinder nicht. Die Biegebeanspruchung der BSP-Platte ist jedoch mit dem Modell ident. Daher wurden für diese Varianten nur Biegespannungen im BSP-Querschnitt (Tab. 5.27), jedoch keine Biegespannungen der Verbinder und Schubspannungen in der Klebefuge angegeben.

Serienauswertung der Festigkeiten

Die gemessenen Bruchwerte F_{\max} wurden für jede Prüfkongfiguration (Prüfserie) auf Basis einer **2-p-log-normalverteilten Grundgesamtheit** ausgewertet. Die gemessenen Bruchwerte der einzelnen Prüfkörper und alle bei der statistischen Auswertung verwendeten Daten finden sich Abschnitt B.7. Tab. 5.26 und Tab. 5.27 zeigen eine Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse.

Variante:	V0-0-A-P-U-085-R	V0-0-A-P-U-085	V0-0-A-P-U-265	V0-0-A-P-U-800	V0-0-C-P-U-800
Anzahl Prüfkörper	8 Stk	10 Stk	6 Stk	5 Stk	7 Stk
Erwartungswert Bruch	F _{est} [kN]	11,0	40,0	112,5	112,5
Bruchlast Mittelwert	F _{max,mean} [kN]	12,7	39,1	114,7	120,2
Kräfte	F _{max,mean} / F _{est} [kN]	1,16	0,98	1,02	1,07
Variationskoeffizient:	COV	15,0%	13,0%	5,8%	7,0%
Normalverteil	F _{05,NV} [kN]	9,59	9,84	35,37	101,41
Studentische t-Verteilung	F _{05,stud-t,v} [kN]	8,90	9,43	34,03	96,34
2p-Log Normalv.	F _{05,2-p-Log,NV} [kN]	9,85	10,03	35,49	101,91
Biegerandspannung	$\sigma_{b,BSP-Brutto,05}$ [N/mm ²]	21,7	22,1	25,1	23,9
char.Festigkeit	f _{mk} = 28,9 N/mm ²	0,75	0,76	0,87	0,83
char.Festigkeit	$\sigma_{b,Zugrand,BSP-Netto,05}$ [N/mm ²]	31,3	31,8	35,6	33,7
	f _{mk} = 28,9 N/mm ²	1,08	1,10	1,23	1,17
char.Festigkeit	$\sigma_{b,Zugrand,Kerbo,05}$ [N/mm ²]	60,7	61,8	72,9	69,7
	f _{mk} = 48,0 N/mm ²	1,26	1,29	1,52	1,45
Schubspannung Klebfuge	$\tau_{Randlamelle,05}$ [N/mm ²]	2,64	2,68	3,17	3,03
char.Festigkeit	f _{vk} = 2,3 N/mm ²	1,15	1,17	1,38	1,32

Tab. 5.26 Spannungsauswertung der Prüfkfigurationen; 2-p-log-normalverteil; Teil 1

Variante:	V0-0-A-P-O-800	V0-08-A-P-U-800	V30-0-A-P-U-800	V30-0-A-N-U-800
Anzahl Prüfkörper	5 Stk	7 Stk	7 Stk	7 Stk
Erwartungswert Bruch	F_{est} [kN]	112,5	112,5	112,5
Kräfte	$F_{max,mean}$ [kN]	107,6	128,3	125,9
	$F_{max,mean} / F_{est}$ [kN]	0,96	1,14	1,12
Variationskoeffizient:	COV	8,2%	4,3%	5,0%
Statistik	Normalverteil	$F_{05,NV}$ [kN]	93,03	93,45
	Studentische t-Verteilung	$F_{05,stud,t,v}$ [kN]	87,98	91,32
	2p-Log Normalv.	$F_{05,2-p,Log,NV}$ [kN]	93,67	93,61
Biegerandspannung char.Festigkeit	$\sigma_{b,BSP-Brutto,05}$ [N/mm ²]	21,9	21,9	27,1
	$f_{mk} = 28,9$ N/mm ²	0,76	0,76	0,94
char.Festigkeit	$\sigma_{b,Zugrand,BSP-Netto,05}$ [N/mm ²]	28,7	31,0	36,0
	$f_{mk} = 28,9$ N/mm ²	0,99	1,07	1,25
char.Festigkeit	$\sigma_{b,Zugrand,Kerz,05}$ [N/mm ²]	68,9	64,1	
	$f_{mk} = 48,0$ N/mm ²	1,43	1,33	
Schubspannung Klebefuge char.Festigkeit	$\tau_{Randlamelle,05}$ [N/mm ²]	2,79	2,78	
	$f_{tk} = 2,3$ N/mm ²	1,21	1,21	

Tab. 5.27 Spannungsauswertung der Prüfkonfigurationen; 2-p-log-normalverteilt; Teil 2

Tab. 5.28 und Tab. 5.29 zeigen eine Zusammenfassung der Spannungsermittlung auf Basis einer **t-verteiltern Grundgesamtheit** unter Berücksichtigung des k_s Wertes in Anlehnung an EN 14358. Diese Tabellen dienen zur besseren Vergleichbarkeit mit den graphischen Darstellungen (Abb. 5.98, Abb. 5.99, Abb. 5.100 und Abb. 5.101) der Spannungsauswertung mit dem Statistikprogramm R.

Variante:	V0-O-A-P-U-085-R	V0-O-A-P-U-085	V0-O-A-P-U-265	V0-O-A-P-U-800	V0-O-C-P-U-800
Anzahl Prüfkörper	8 Stk	10 Stk	6 Stk	5 Stk	7 Stk
Erwartungswert Bruch	F_{est} [kN]	11,0	40,0	112,5	112,5
Bruchlast Mittelwert	$F_{max,mean}$ [kN]	12,7	39,1	114,7	120,2
	$F_{max,mean} / F_{est}$ [kN]	1,16	0,98	1,02	1,07
	$F_{max,mean/r}$ [kN]	150	148	143	150
Variationskoeffizient:	COV	15,0%	13,0%	5,8%	7,0%
Normalverteilt	$F_{0,5,NV}$ [kN]	9,59	9,84	35,37	101,41
Studentische t-Verteilung	$F_{0,5,stud+V}$ [kN]	8,90	9,43	34,03	96,34
2p-Log Normalv.	$F_{0,5;2-p,Log-NV}$ [kN]	9,85	10,03	35,49	101,91
Biegerandspannung	$\sigma_{b,BSP-Beitfs,05}$ [N/mm ²]	19,6	20,8	24,1	22,6
char. Festigkeit	$f_{mk} = 28,9$ N/mm ²	0,68	0,72	0,83	0,78
	$\sigma_{b,Zugrand,BSP-Neitfs,05}$ [N/mm ²]	28,2	29,9	34,1	31,9
char. Festigkeit	$f_{mk} = 28,9$ N/mm ²	0,98	1,04	1,18	1,10
	$\sigma_{b,Zugrand,Kerro,05}$ [N/mm ²]	54,8	58,1	69,9	65,9
char. Festigkeit	$f_{mk} = 48,0$ N/mm ²	1,14	1,21	1,46	1,37
Schubspannung Klebefuge	$\tau_{Randhornle,05}$ [N/mm ²]	2,38	2,52	3,04	2,86
char. Festigkeit	$f_{tk} = 2,3$ N/mm ²	1,04	1,10	1,32	1,25

Tab. 5.28 Spannungsauswertung der Prüfkonfigurationen; t-verteilt nach EN 14358; Teil 1

Variante:	V0-0-A-P-O-800	V0-08-A-P-U-800	V30-0-A-P-U-800	V30-0-A-N-U-800
Anzahl Prüfkörper	5 Sik	7 Sik	7 Sik	7 Sik
Erwartungswert Bruch	F_{est} [kN]	112,5	112,5	112,5
Bruchlast Mittelwert	$F_{max,mean}$ [kN]	107,6	100,5	128,3
	$F_{max,mean}/F_{est}$ [kN]	0,96	0,89	1,14
	$F_{max,mean}/m$ [kN]	134	126	160
Variationskoeffizient:	COV	8,2%	4,3%	6,1%
Normalverteil	$F_{0,5,NV}$ [kN]	93,03	93,45	115,41
Studentische t-Verteilung	$F_{0,05,stud-t-NV}$ [kN]	87,98	91,32	110,80
2p-Log Normalv.	$F_{0,5,2-p,Log-NV}$ [kN]	93,67	93,61	115,83
Biegezugspannung	$\sigma_{b,BSP-Buhto,0,5}$ [N/mm ²]	20,6	21,4	25,9
char.Festigkeit	$f_{mk} = 28,9$ N/mm ²	0,71	0,74	0,90
char.Festigkeit	$\sigma_{b,Zugrand,BSP-Netto,0,5}$ [N/mm ²]	27,0	30,2	34,5
	$f_{mk} = 28,9$ N/mm ²	0,93	1,05	1,19
char.Festigkeit	$\sigma_{b,Zugrand,Kerir,0,5}$ [N/mm ²]	64,7	62,5	
	$f_{mk} = 48,0$ N/mm ²	1,35	1,30	
Schubspannung Klebefuge	$\tau_{Randlamelle,0,5}$ [N/mm ²]	2,62	2,72	
char.Festigkeit	$f_{tk} = 2,3$ N/mm ²	1,14	1,18	

Tab. 5.29 Spannungsauswertung der Prüfkfigurationen; t-verteilt nach EN14358; Teil 2

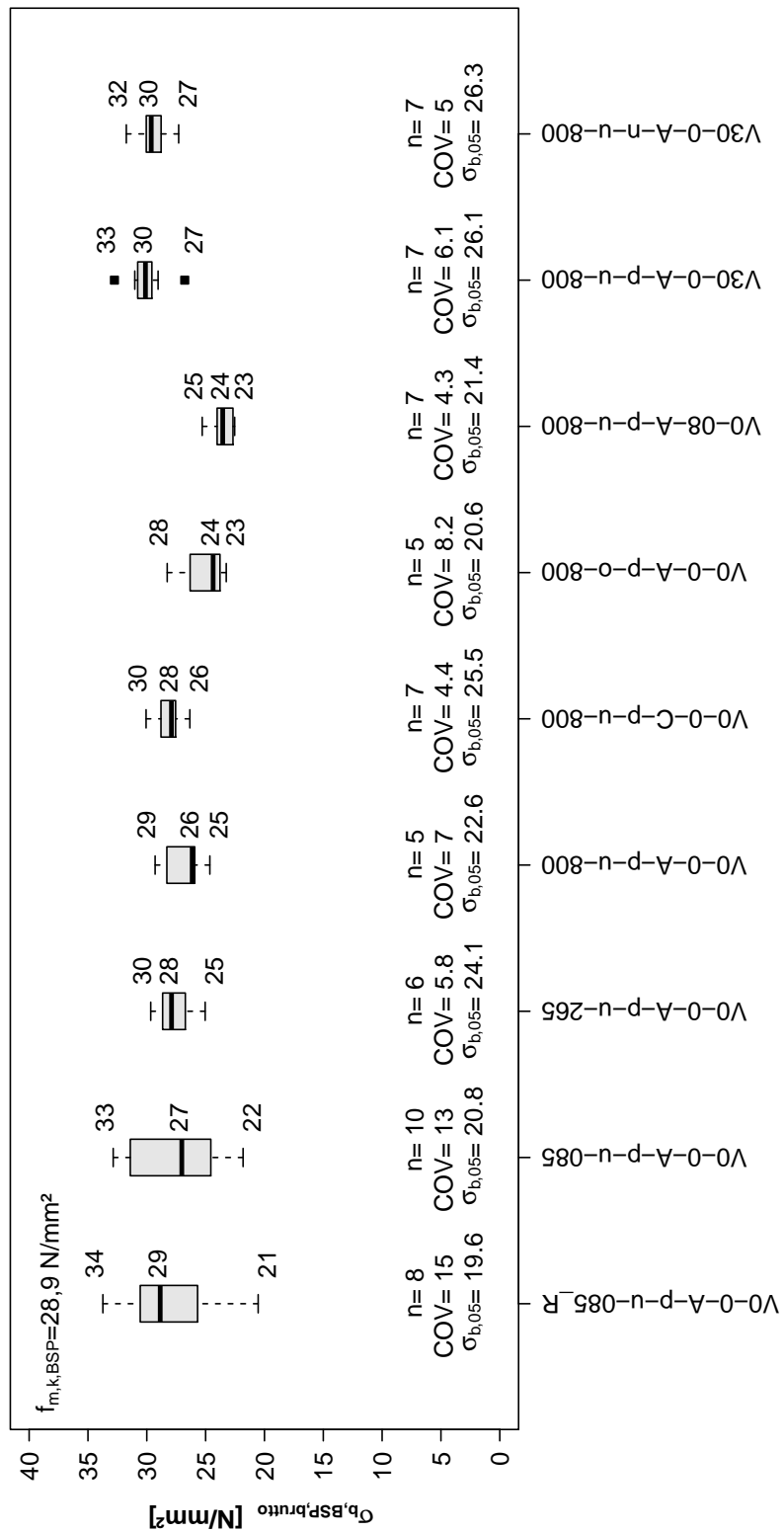


Abb. 5.98 Biegerandspannung im BSP-Bruttoquerschnitt

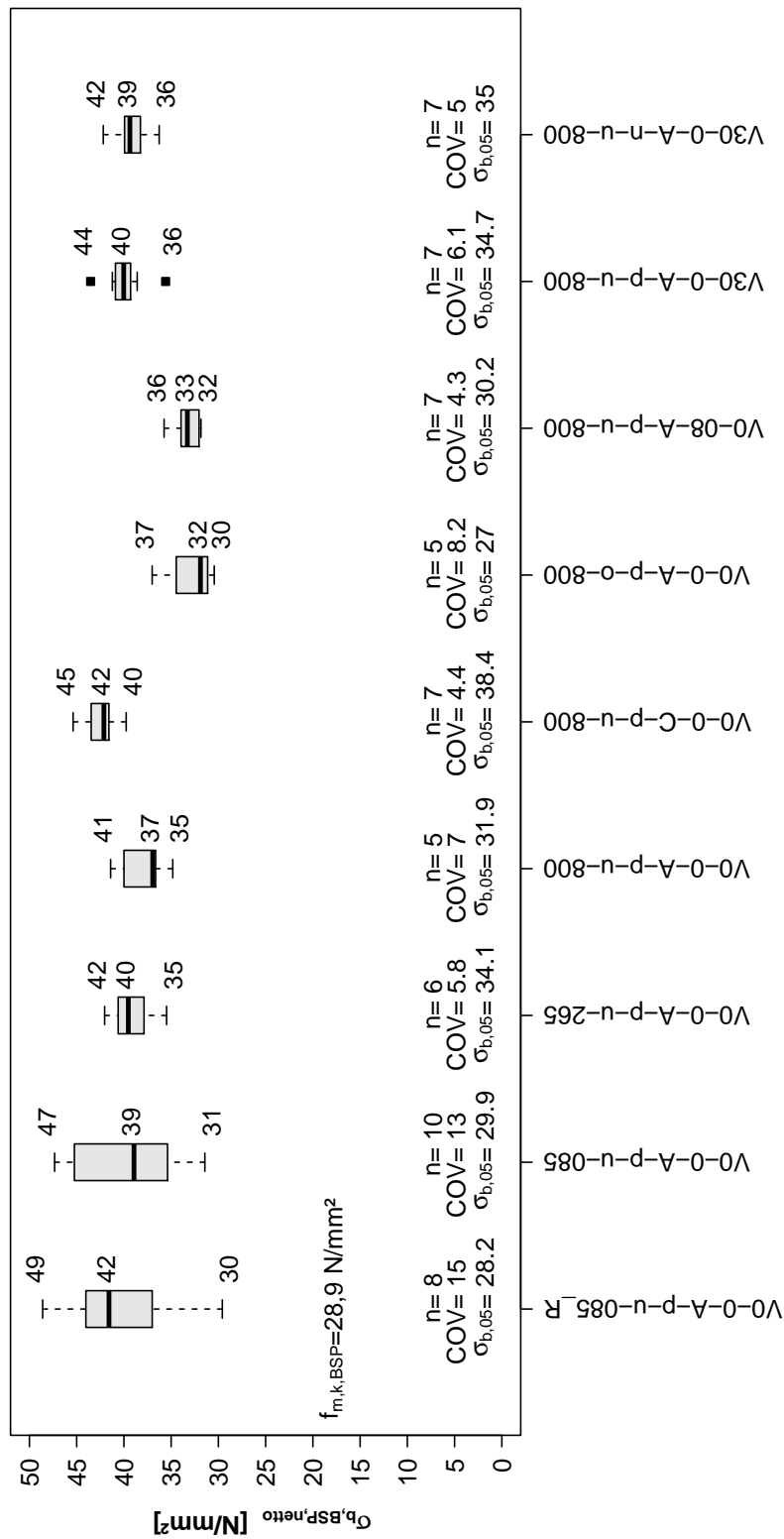


Abb. 5.99 Biegerandspannung im BSP-Nettoquerschnitt

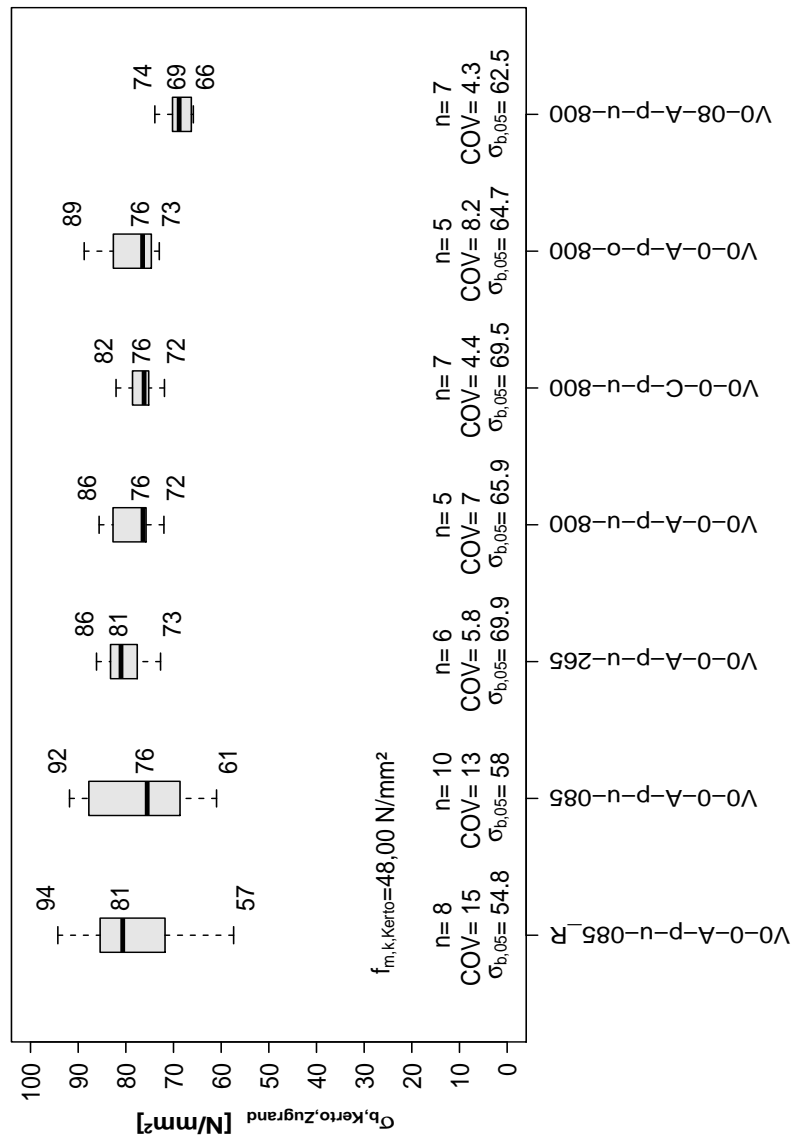


Abb. 5.100 Biegerandspannung im Kerfverbinder

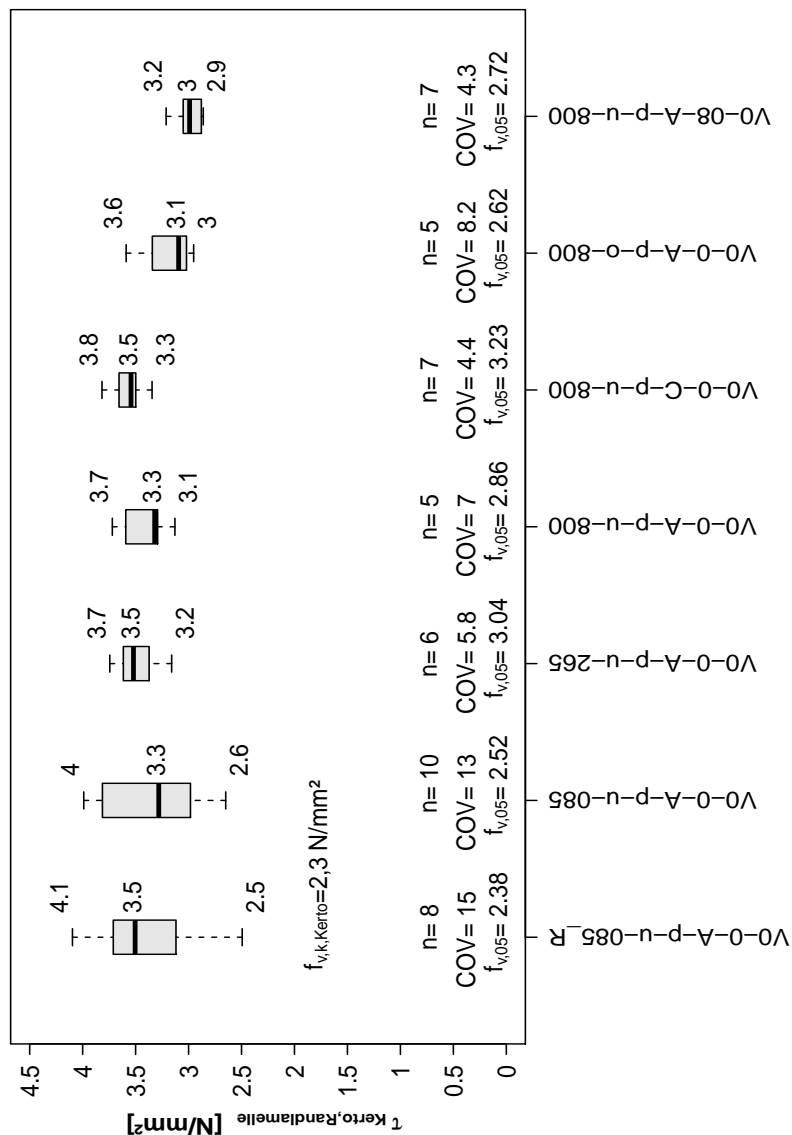


Abb. 5.101 Schubspannung im Kertverbinder (Randlamelle)

5.2.7.6 Systemeffekt des Verbindungssystems

Die Prüfung von Verbindungsplatten mit unterschiedlicher Anzahl von Verbindern sollte auch einen Systemeffekt bei gleichzeitigem Wirken von mehreren Verbindern zeigen. Betrachtet man die auf einen Meter Breite hochgerechneten Bruchkräfte in Abb. 5.95 so kann keine signifikante Erhöhung der Bruchkraft zwischen den Konfigurationen mit einem, drei und neun Verbindern beobachtet werden (V0-0-A-p-u-085-R, V0-0-A-p-u-085, V0-0-A-p-u-265, V0-0-A-p-u-800). Betrachtet man jedoch die Variationskoeffizienten dieser Prüfkfigurationen so kann eine Abnahme der Streuung festgestellt werden. Dieser Effekt ist in Abb. 5.102 dargestellt.

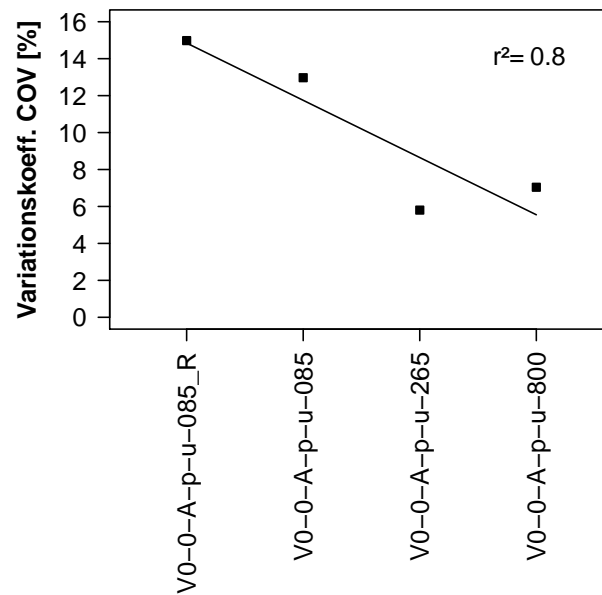


Abb. 5.102 Zunehmende Homogenisierung bei steigender Anzahl von Verbindern

5.2.7.7 Auswertung der Dehnungen

Die Dehnungsmessungen (DD1) an den Prüfkörpern wurden nicht weiter ausgewertet, da sich die Absolutbeträge der Messungen auf Ober- und Unterseite (Druck- und Zugseite) nur sehr geringfügig bzw. nicht unterscheiden.

5.3 Biegeversuche Referenzplatten

5.3.1 Ziel der Versuche

Vorrangiges Ziel der Biegeversuche der Referenzplatten war es, den Wirkungsgrad der Verbindung zu ermitteln.

Vorab wurde nur geplant, die Biegefestigkeit des Verbindungssystems zu ermitteln. Im Zuge der Biegeprüfung der Verbindungsplatten wurde beschlossen, auch BSP-Platten desselben Aufbaus und derselben Breite ohne Verbinder zu prüfen. Somit wurden Referenzwerte der Biegefestigkeit der ungestoßenen Platten nicht nur lt. Zulassung errechnet, sondern auch versuchstechnisch ermittelt.

Ein weiteres Ziel war über die Messung der Durchbiegungen der Platten die realen Steifigkeiten (E-Modul und Schubsteifigkeit) der geprüften BSP-Platten zu errechnen.

5.3.2 Material der Prüfkörper

5.3.2.1 BSP-Platten

Die BSP-Platten wurden als Standardware bei Firma KLH bestellt. Wie eingangs erwähnt, wurden diese Platten erst zu einem späteren Zeitpunkt bestellt, sind somit nicht aus derselben Charge wie das Grundmaterial der Verbindungsplatten.

Die genaue Plattenbezeichnung lautet KLH-95-5s-DL-NSI. Der Plattenaufbau besteht aus 5 Schichten zu 19 mm, und ist laut Zulassung und Produktbeschreibung ident mit jenen Platten die zur Herstellung der Verbindungsplatten verwendet wurden (gleiche Sortierung).

Überraschender Weise waren jedoch die Brettlamellen der Referenzplatten in der Breite unterschiedlich gegenüber den Verbindungsplatten. Durch die wesentlich breiteren Bretter (23 cm gegenüber 11 cm Lamellenbreite bei den Verbindungsplatten, siehe Abb. 5.104) wirkten sich Holzfehler in den Brettern, insbesondere in Brettern der auf Zug beanspruchten Randlamelle, stärker auf das Biegetragvermögen der Platte aus.

Anzumerken ist an dieser Stelle auch, dass ein in Rechnung stellen des Faktors k_l (Lamelleneffekt für gleichzeitiges Wirken von mindestens vier Brettern, lt. Kapitel 2, Abschnitt 2.1.8.2) erst bei einer Plattenbreite von ca. 1,0 m möglich ist.

Die folgende Abbildung zeigt den Plattenaufbau der Referenzplatten. Die rot gefärbten Schichten sind faserparallel zur Spannrichtung der Platte gerichtet

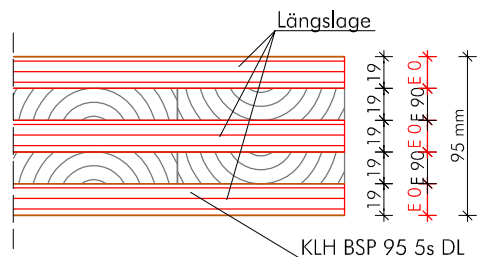


Abb. 5.103 Aufbau KLH-BSP-95-5s-DL

Die nachfolgenden Bilder zeigen den Vergleich der Brettlamellenbreite zwischen den verwendeten Verbindungsplatten und den nachträglich erworbenen Referenzplatten.



Referenzplatten KLH-95-5s-DL

Verbindungsplatten KLH-95-5s-DQ

Abb. 5.104 Breitenvergleich der Brettlamellen

5.3.3 Vorbemessung der Referenzplatten

5.3.3.1 Vorbemessung der BSP-Platte

Ein kurzer Überblick über den Formalismus zur Biegespannungsermittlung von BSP wurde in Abschnitt 4.1 gegeben.

Die Auswertung der errechneten Festigkeiten der Referenzplatten erfolgt in Abschnitt 5.3.7.4.

In diesem Abschnitt werden nur die zu erwartenden Kräfte nach dem Verfahren-Timoshenko dargestellt.

5.3.3.2 Baustatisches Modell

Abb. 5.105 zeigt das baustatische Modell und die Abmessungen für den Vierpunkt-Biegeversuch. Die Stützweite wurde in Anlehnung an die Prüfnorm EN 408:2009 [4] mit ca. $18 \cdot h$ gewählt. Dieses Verhältnis sollte auch Brüche auf Rollschub vermeiden.

Die Lasteinleitungspunkte wurde analog zu den Verbindungsplatten gewählt um eine Vergleichsmöglichkeit mit den Verbindungsplatten zu erzielen.

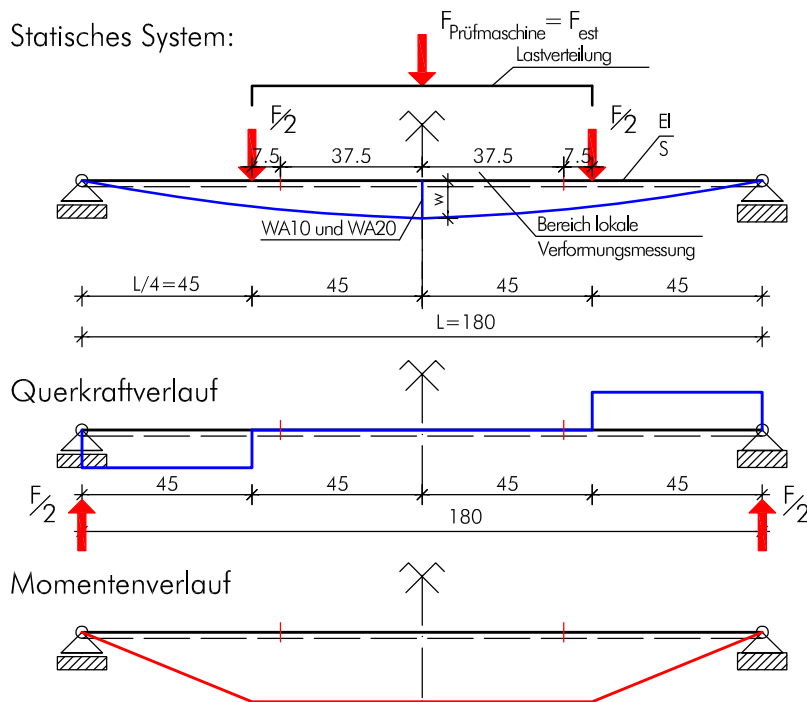


Abb. 5.105 Baustatisches Modell Biegeversuche Referenzplatten

5.3.3.3 Erwartete Kräfte

tim Nachfolgend wird die Berechnung der zu erwartenden Bruchkräfte für das Versagen der BSP-Prüfkörper erläutert. Aufgrund der Streuung des Grundmaterials werden auch die zu erwartenden Tragfähigkeiten einer Streuung unterworfen sein. Eine Abschätzung der maximal aufzubringenden Kräfte ist für die Konfiguration der Prüfmaschine unbedingt notwendig, und erfolgte über die Berechnung der 95%-Quantilwerte für Versagen der Verbindung. Dafür wurde eine Abschätzung des Variationskoeffizienten (COV) vorgenommen. Ein Wert von 12% wurde dafür gewählt.

Die Berechnung der Biegerandnormalspannung erfolgt nach dem Verfahren-Timoschenko (Abschnitt 4.1.2):

$$\sigma_{(z),d} = \frac{M_{r,d}}{K_{clt}} \times z \times E(z) \quad \text{mit} \quad z = \frac{t_{clt}}{2} \quad [5.40]$$

Aus Gl. [5.40] lässt sich das Tragmoment der Platte berechnen.

$$M_{rk,clt,05} = \frac{K_{clt} \times f_{m,k,clt}}{E_{ref} \times (t_{clt} \times 0,5)} \quad [5.41]$$

mit $K_{clt,b=1,0m} = 6,845 \times 10^{11} \text{ N/mm}^2$ (Kapitel 2, Gl. [2.1])

$$f_{m,k,clt} = 28,9 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{\text{ref}} = 12000 \text{ N/mm}^2$$

$$t_{\text{clt}} = 95 \text{ mm}$$

Der 95%-Quantilwert des Tragmoments der BSP-Platte errechnet sich für eine normalverteilte Grundgesamtheit:

$$M_{r,k;clt,95} = M_{r,k;clt,05} / (1 - 1,645 \times \text{COV}) \times (1 + 1,645 \times \text{COV}) \quad [5.42]$$

Der Variationskoeffizient wurde mit 12% gewählt.

Für das baustatische Modell lt. Abb. 5.105 errechnet sich die von der Prüfmaschine aufzubringende Kraft F_{est} zu:

$$F_{\text{est}} = F_{\text{Prüfmaschine}} = \frac{2 \times M_{r,k}}{0,45} \quad [5.43]$$

Wertet man Gl. [5.41] bis Gl. [5.43] aus so erhält man die Ergebnisse lt. Tab. 5.30. Mit $F_{k,05}$ bzw. $F_{k,95}$ sind die minimal bzw. maximal zu erwartenden Kräfte dargestellt. Als F_{est} wurden die geschätzten Bruchwerte bezeichnet. Die Wegmessung wurde nach Erreichen einer Belastung von $0,4 \cdot F_{\text{est}}$ beendet (siehe 5.3.6.2). F_{est} sollte eine maximale Abweichung von 20% zum Mittelwert der Höchstlasten der schon durchgeführten Prüfungen aufweisen [5].

Breite Prüfkörper [mm]	$M_{r,k,05}$ [kNm]	$M_{r,k,95}$ [kNm]	$F_{k,05}$ [kN]	$F_{k,95}$ [kN]	F_{est} [kN]	$0,4 F_{\text{est}}$ [kN]
1000	34,7	51,8	154	230	--	--
800	27,8	41,4	123	184	150	60
265	9,2	13,7	40,0	60,9	50	20
85	2,95	4,40	12,8	19,6	17,5	7

Tab. 5.30 Erwartete Kräfte für Biegeprüfung der Referenzplatten

5.3.4 Prüfkonfigurationen Referenzplatten

Grundsätzlich muss angemerkt werden, dass die Prüfkonfigurationen mit einer Breite von 85 bzw. 265 mm nicht als Brettsperrholz lt. Zulassung betrachtet werden dürfen, da für Brettsperrholz im Allgemeinen eine Systemtragwirkung vorausgesetzt wird. Dieser Effekt spiegelt sich auch in den charakteristischen Festigkeitswerten für das zugelassene Bauprodukt wieder. Eine Systemtragwirkung ist jedoch für schmale Streifen mit 85 bzw. 265 mm meist nicht gegeben. Somit haben Holzfehler in einzelnen Lamellen einen wesentlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Plattenstreifens.

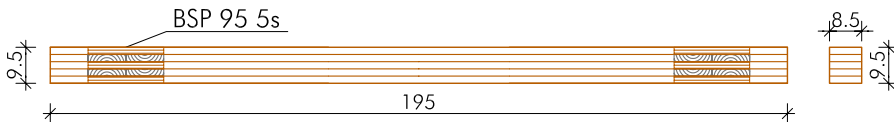
Die Biegeprüfungen der schmalen Teile dürfen somit nur als Referenzwerte zu den Verbindungsplatten gesehen werden, nicht aber als Aussage über die Qualität des Bauproduktes Brettsperrholz.

Die Bezeichnung der Prüfkörper wurde in Anlehnung an die Verbindungsplatten gewählt (siehe Abschnitt 5.2.4.1). Der Buchstabe „R“ steht hierbei für Referenz.

5.3.4.1 Prüfkörperarten-Referenzplatten

VO-R-085:

9 Stück

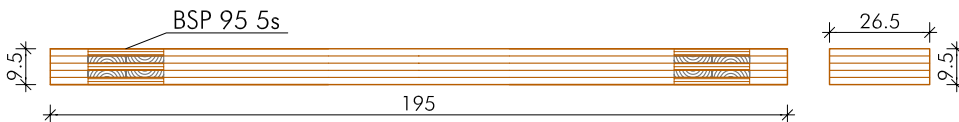


Ziele:

- Biegefestigkeit ohne Verbinder: Plattenbreite 85 mm
- Biegesteifigkeit der Platte
- Schubsteifigkeit der Platte

VO-R-265:

3 Stück



Ziele:

- Biegefestigkeit ohne Verbinder: Plattenbreite 265 mm
- Biegesteifigkeit der Platte
- Schubsteifigkeit der Platte

VO-R-800:

4 Stück



Ziele:

- Biegefestigkeit ohne Verbinder: Plattenbreite 800 mm

- Biegesteifigkeit der Platte
- Schubsteifigkeit der Platte

5.3.5 Herstellen der Prüfkörper

Die Herstellung der BSP-Platten erfolgte im KLH-Werk in Katsch an der Mur. Die sechs Biegeprüfplatten wurden dort auf die Breite von 800 mm und eine Länge von 1950 mm zugeschnitten. Laut Hersteller erfolgte die Produktion mit einer sortierten Brettware. 90% der Brettware sollte die Qualität C24, die verbleibenden 10% mindestens Qualität C16 aufweisen. Die Holzfeuchte verarbeiteten Brettware wird mit $12 \pm 2\%$ angegeben. Nach dem Transport wurden zwei der 800 mm breiten Platten auf 3 Stück mit 265 mm Breite und 9 Stück mit 85 mm Breite zugeschnitten. Danach erfolgte eine Lagerung in der Klimakammer (Normklima mit 20°C und 65% relativer Luftfeuchte) über mehrere Tage vor der Biegeprüfung.

5.3.6 Biegeprüfung Referenzplatten

5.3.6.1 Prüfaufbau

Die Durchführung der Biegeprüfung erfolgte auf der Universalprüfmaschine des Instituts für Holzbau und Holztechnologie an der TU-Graz. Diese kann Druck- oder Zugkräfte im Bereich von 0 bis ± 275 kN auf den Prüfkörper aufbringen. Die Messeinrichtungen entsprechen den Anforderungen nach EN 408.

Aufgrund der Breite der Biegeprüfkörper musste die Prüfmaschine mit lastverteilenden Trägern in den Lasteinleitungs- bzw. Auflagerpunkten ergänzt werden. Die Ergänzungen der Prüfmaschine (Lasteinleitungs- und Auflagerträger) sind ident mit jenen der Verbindungsplatten (siehe Abschnitt 5.2.6.1).

Abb. 5.106 zeigt den Prüfaufbau (Prüfmaschine und Prüfkörper) und die an den Prüfkörpern angebrachten Wegaufnehmer (WA). Die Positionierung der Wegaufnehmer im Grundriss ist beispielhaft für die 800 mm breiten Prüfkörper dargestellt. Für die restlichen Breiten wurden die Messungen analog an der Seite des Prüfkörpers in der Plattenachse durchgeführt. Die Wegaufnehmer wurden auf einer Alulatte im Abstand lt. Plan montiert. Auf den Prüfkörpern wurden im Schnittpunkt der Auflagerachse mit der Mittelachse der Platte Nägel zur Auflagerung der Messlatte (in Abb. 5.106 grün dargestellt) mit den Wegaufnehmern eingeschlagen. Im Schnittpunkt der Plattenachse mit der Symmetrieachse des Prüfkörpers wurden Aluwinkel mit Glasplatten befestigt, auf denen die Tastspitzen der Wegaufnehmer auflagerten und dort die globalen bzw. lokalen Vertikalverformungen der Platte maßen (Abb. 5.106 und Abb. 5.107)

Die Bezeichnung der Wegaufnehmer (WA) mit Tastspitze wurde mit dem Messbereich des Geräts in mm und der geographischen Lage auf dem Prüfkörper ergänzt, um das jeweilige Messgerät im Zuge der Auswertung richtig zuordnen zu können (z.B.: WA10 N bedeutet Wegaufnehmer 10 mm, Nord).

Biegeprüfkonfiguration: V0-R-800
 V0-R-265
 V0-R-085

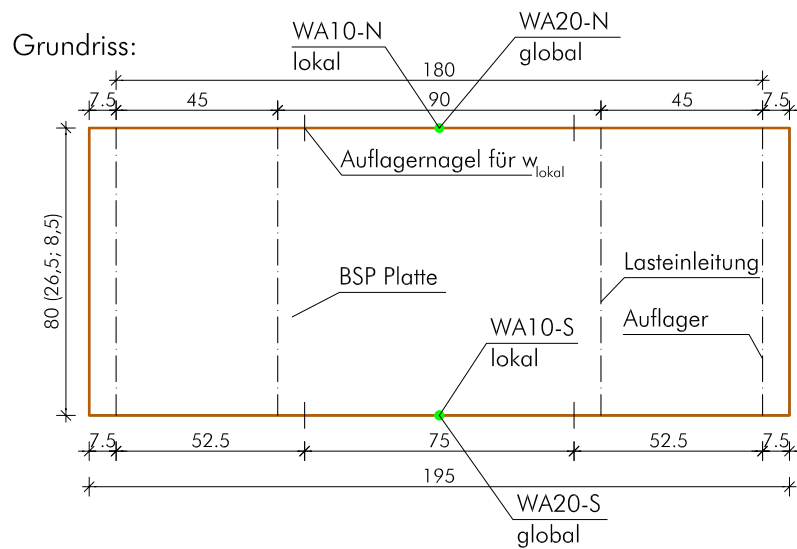
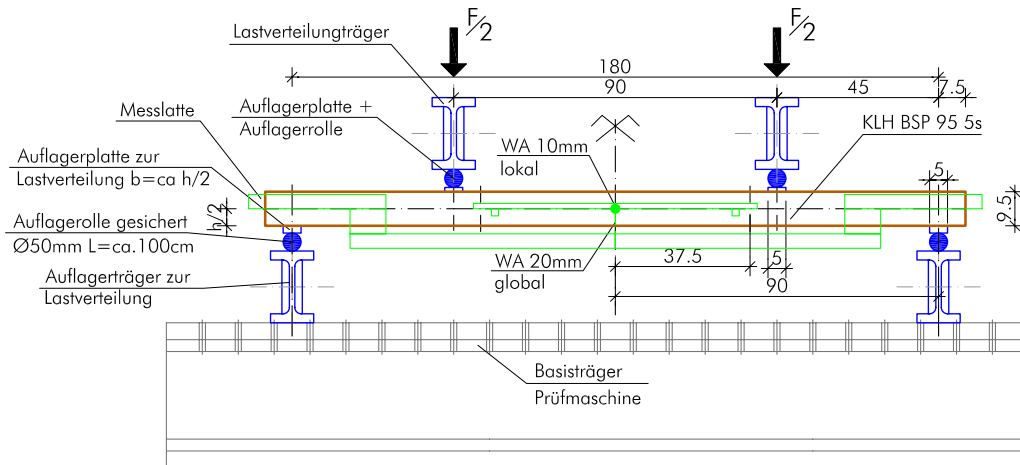


Abb. 5.106 Prüfaufbau Referenzplatten



Abb. 5.107 Biegeprüfung der Referenzplatten: Wegaufnehmer zur Verformungsmessung; Prüfkörper unter Biegebeanspruchung (Breite 85 mm)

5.3.6.2 Einstellungen Prüfmaschine

Die Einstellung der Prüfmaschine wurde analog zu den Verbindungsplatten vorgenommen, und diese erfolgte in Anlehnung an die EN 26891. Die Lastaufbringung passierte mit konstanter Geschwindigkeit. Der Prüfkörper wurde bis $0,4 \cdot F_{\text{est}}$ (Abschnitt 5.3.3.3) belastet (Belastungsast 1), danach wurde die Last auf $0,1 F_{\text{est}}$ ($t=0$) reduziert und wiederum bis zum Lastniveau $0,4 \cdot F_{\text{est}}$ belastet. Zum Entfernen der Messgeräte wurde dieses Niveau für 30 sec gehalten. Die Laststeigerung wurde darauffolgend bis zum Bruch mit konstanter Geschwindigkeit beibehalten (Belastungsast 2). Die Geschwindigkeit wurde so gewählt, dass der Bruch im 2. Belastungsast bei 300 ± 120 sec eintrat. Beispielgebend zeigt Abb. 5.108 ein Kraft-Weg-Diagramm für einen Prüfkörper der Serie V0-R-800.

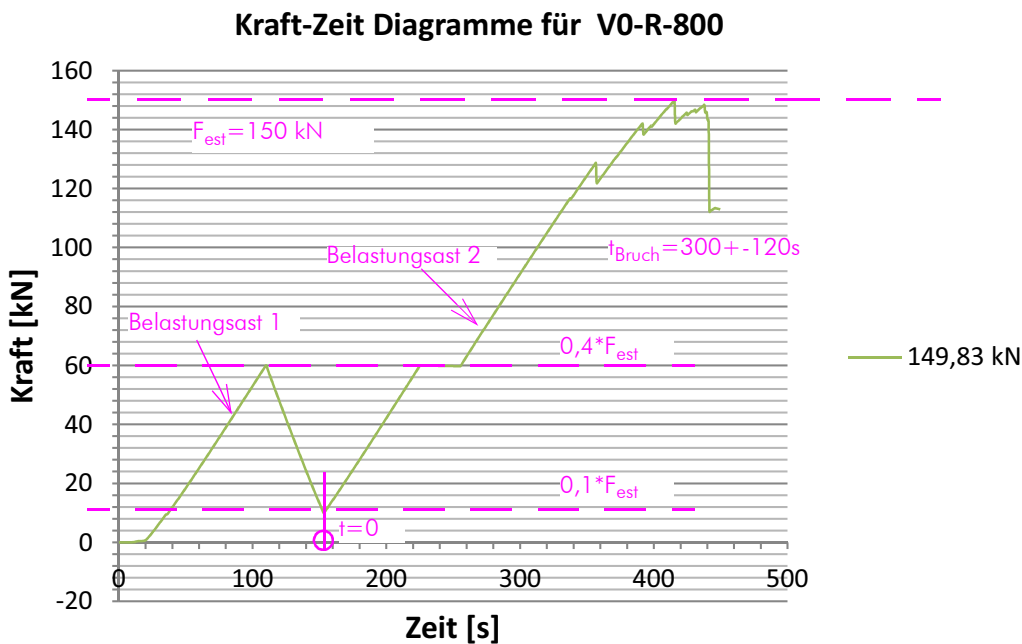


Abb. 5.108 Beispielhaftes Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfschleife V0-R-800

5.3.6.3 Ablauf der Biegeprüfung der Referenzplatten

Vorbereitung

- Vermessen des Prüfkörpers
- Anzeichnen der Auflagerlinien, Lasteinleitungslinien und Messpunkte mit Hilfe einer Alulatte als Schablone
- Einschlagen der erforderlichen Nägel zum Auflagern der Messlatten
- Anbringen der Aluwinkel für die Wegaufnehmer mit Tastspitze
- Einheben des Prüfkörpers in die Prüfmaschine
- Einlegen der Lastverteilungsplatten und Zentrieren des Prüfkörpers
- Auflegen der Messvorrichtung bzw. Messlatten für die lokale und globale Verformungsmessung (mit im richtigen Abstand vormontierten Wegaufnehmern) auf die eingeschlagenen Nägel (Abb. 5.107)
- Lagekontrolle

Prüfvorgang

- Funktionskontrolle der Wegaufnehmer und Dehnungsmesser
- Wegaufnehmer und Dehnungsmesser auf Null setzen
- Start des Prüfvorgangs und Überwachung der Messungen in Bezug auf offensichtliche Messfehler (notieren)

- Entfernung der Wegaufnehmer und Dehnungsmesser im dafür vorgesehenen Zeitfenster (Belastungsast 2)
- Laststeigerung bis zum Bruch

Dokumentation (siehe Anhang B, Abschnitt B.5)

- Bruchkraft notieren
- Prüfkörper in Bruchstellung halten und Bruchursache feststellen und notieren
- Fotodokumentation
- Sicherung der Prüfdaten

Demontage

- Entfernen des Prüfkörpers aus der Prüfmaschine
- Entfernung von Nägeln und Aluwinkel
- Entnahme der Darrprobe aus dem geprüften Probekörper

5.3.6.4 Bestimmung der Holzfeuchte

Die Bestimmung der Holzfeuchte wurde nach EN 13183-1 [3] durchgeführt. Dafür wurde ein Stück Holz direkt nach der Biegeprüfung aus dem Probekörper geschnitten. Nach einer Wägung erfolgte die Trocknung im Darrschrank und danach wurde der Prüfkörper zur Feuchtebestimmung wiederum gewogen. Die Berechnung der Holzfeuchte erfolgte nach Gl. [5.26].

Feuchteberechnung nach EN 13183-1:

$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad [5.44]$$

mit:

m_1 Masse in Gramm, des Prüfkörpers vor dem Trocknen

m_0 Masse in Gramm, des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand

u der Feuchtegehalt in Prozent

Eine Liste alle Prüfkörper und deren Feuchtegehalt findet sich in Abschnitt B.8.

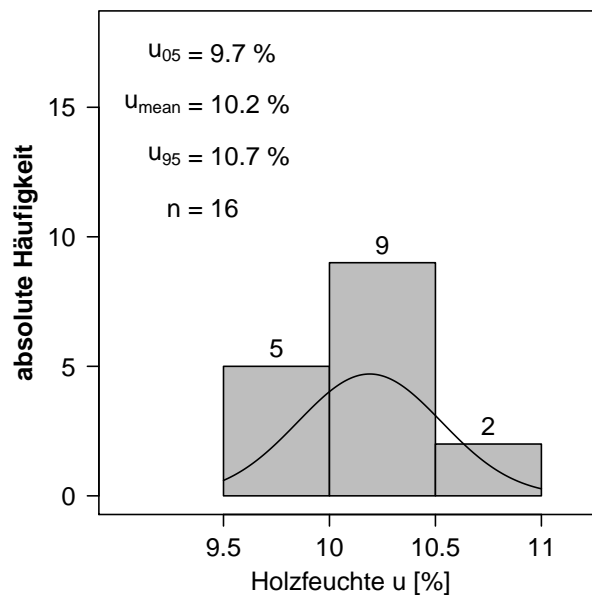


Abb. 5.109 Holzfeuchteverteilung der Referenzplatten

Abb. 5.109 zeigt eine Abweichung der gemessenen mittleren Holzfeuchte der Verbindungsprüfkörper hinsichtlich der in der Norm geforderten Holzgleichsfeuchte von 12% lt. EN 408[4]. Laut [36] ändert sich der E-Modul des Holzes mit der Änderung der Holzfeuchte nach folgendem Zusammenhang:

$$E_{0,u_2} = E_{0,u_1} \times [1 - 0,015 \times (u_2 - u_1)] \quad [5.45]$$

Die Änderung der Holzfeuchte von $u_1 = 12,0\%$ auf $u_2 = 10,2\%$ (Abb. 5.109) bewirkt eine Erhöhung des Referenz-E-Moduls $E_{0,u_1} = 12000 \text{ N/mm}^2$ auf $E_{0,u_2} = 12325 \text{ N/mm}^2$. Die damit einhergehende Erhöhung der Biegesteifigkeit der Platten entspricht etwa 2,7%. Dies wurde in den weiteren Berechnungen nicht berücksichtigt.

5.3.7 Auswertung der Biegeprüfung der Referenzplatten

5.3.7.1 Bruchursachen

Die vorherrschende Bruchursache der Referenzplatten war ein Biegezugversagen. Vorherrschend war das Versagen der Randlamelle aufgrund lokaler Fehlstellen des Holzes (Ast, lokale Schrägfaser, etc.). Weiters traten Biegezugbrüche im Bereich der Keilzinkung auf (siehe Abb. 5.110).

In allen drei Prüfserien trat jeweils ein Rollschubversagen der Prüfplatte im Auflagerbereich auf. Nachdem alle restlichen Bruchwerte (Biegezugbrüche) der jeweiligen Prüfserie niedriger waren als der Bruchwert auf Rollschub, wurde angenommen, dass die Biegefestigkeit des auf Rollschub gebrochenen Prüfkörpers höher war als die Rollschubfestigkeit. Somit läge der Bruchwert auf Rollschub auf der „sicheren“ Seite und begründet den Verbleib der auf Rollschub gebrochenen Prüfkörper in der Auswertung. Die Dokumenta-

tion der Bruchursachen und der zugehörigen Bruchkräfte liegt in Abschnitt B.8 bei.



Abb. 5.110 Biegebrüche an lokalen Fehlstellen: Kernast; Biegebruch im Bereich der Keilzinkung



Abb. 5.111 Rollschubbruch im Auflagerbereich

5.3.7.2 Aufbereitung der Versuchsdaten

Die Aufbereitung der Messdaten erfolgte nach dem selben Prinzip wie für die Verbindungsplatten (vgl. Abschnitt 5.2.7.2).

Der typische qualitative Verlauf eines Kraft-Zeit-Diagramms und eines Kraft-Weg-Diagramms wie in Abb. 5.82 und Abb. 5.83 dargestellt gilt auch für die Prüfkörper der Referenzplatten.

Die Auswertung der Einzelprüfkörper erfolgte in Anlehnung an EN 26891.

Das idealisierte Kraft-Weg-Diagramm zeigt die zur weiteren Auswertung erforderlichen Messwerte aus den Rohdaten der Prüfmaschine. Für jeden Einzelprüfkörper wurden die Verschiebungen am Belastungsast 1 (v_{01}, v_{04}), und die Verschiebungen am Belastungsast 2 (v_{21}, v_{24}), zur Berechnung der Biegesteifigkeit EI und der Schubsteifigkeit S der BSP-Referenzplatten entnommen.

Weiters war der Bruchwert F_{\max} zur Biegespannungsermittlung im Querschnitt erforderlich (siehe Abb. 5.112).

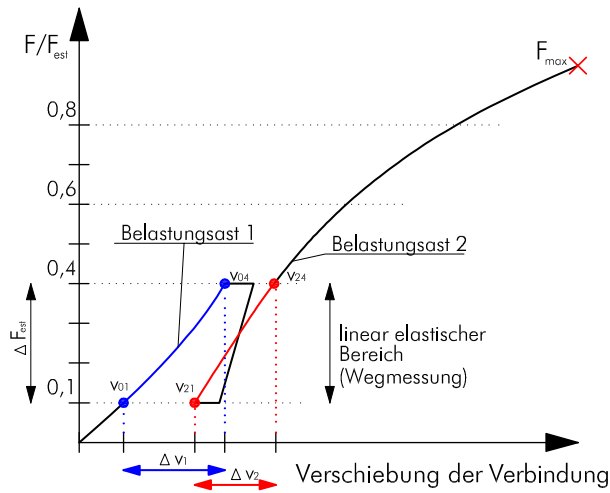


Abb. 5.112 Idealisiertes Kraft-Weg-Diagramm in Anlehnung an EN 26891

Im Zuge der Biegeprüfung der Referenzplatten wurden bis zu einer Belastung von $0,4 \cdot F_{est}$ (Tab. 5.30) in zwei Messpunkten (lt. Abb. 5.106) die lokalen und globalen Verformungen aufgezeichnet. Die beiden Messwerte für die lokale bzw. globale Verformung gemittelt.

Um eventuelle Nachgiebigkeiten der Prüfmaschine und den Einfluss verschiedener Anfangsverformungen bei der Lastaufbringung auszuschalten, wurde für Belastungsast 1 die relative Kraft ΔF_{est} und die zugehörigen relativen Verschiebungen $\Delta v_{1,WA10}$ und $\Delta v_{1,WA20}$ berechnet (lt. Abb. 5.112). In weiterer Folge werden die relativen Verschiebungen $\Delta v_{1,WA10}$ vereinfacht mit $\Delta v_{1,lok}$ und $\Delta v_{1,WA20}$ mit $\Delta v_{1,glob}$ bezeichnet.

Identisch wurde für Belastungsast 2 vorgegangen (Bezeichnung mit Index 2 für Belastungsast 2: z.B.: $\Delta v_{2,WA10}$)

Tab. 5.31 zeigt beispielhaft die Aufbereitung der Messwerte für den Prüfkörper VO-R-800-03 (Abschnitt B.8). Die Werte beziehen sich auf den in Abb. 5.112 blau dargestellten Belastungsast 1 ($\Delta v_{1,x}$).

Fest wurde mit 150 kN berechnet (Tab. 5.30).

Kräfte	Verschiebungen lokal (WA10)	Verschiebungen global (WA20)	Anmerkung
$0,4 F_{est} = 60 \text{ kN}$	$v_{04} = 1,79 \text{ mm}$	$v_{04} = 9,72 \text{ mm}$	Bezeichnung lt. Abb. 5.112
$0,1 F_{est} = 15 \text{ kN}$	$v_{01} = 0,45 \text{ mm}$	$v_{01} = 2,34 \text{ mm}$	Bezeichnung lt. Abb. 5.112

Tab. 5.31 Berechnung der relativen Kräfte und der zugehörigen Verschiebungen für Prüfkörper 03 der Konfiguration VO-R-800

Kräfte	Verschiebungen lokal (WA10)	Verschiebungen global (WA20)	Anmerkung
$\Delta F_{est}=45 \text{ kN}$	$\Delta v_{1;lok}=1,34 \text{ mm}$	$\Delta v_{1;glob}=7,38 \text{ mm}$	relative Kräfte und Verschiebungen

Tab. 5.31 Berechnung der relativen Kräfte und der zugehörigen Verschiebungen für Prüfkörper 03 der Konfiguration V0-R-800

Alle weiteren Messwerte der Prüfkörper, nach Serien geordnet, finden sich in Tabellen in Abschnitt B.8.

5.3.7.3 Auswertung der Steifigkeiten

Einzelauswertung der Steifigkeiten

Für die Einzelauswertung der Prüfkörper bezüglich der Steifigkeiten wurden zwei verschiedene Varianten untersucht.

Die statische Grundlage beider Varianten stellt Abb. 5.113 dar. Die Messung der lokalen und globalen Vertikalverformungen wurde in der Symmetrieachse durchgeführt. In weiterer Folge werden diese Verformungen mit w_{lok} und w_{glob} bezeichnet. Alle weiteren verwendeten Bezeichnungen sind in Abb. 5.113 und Abb. 5.114 dargestellt.

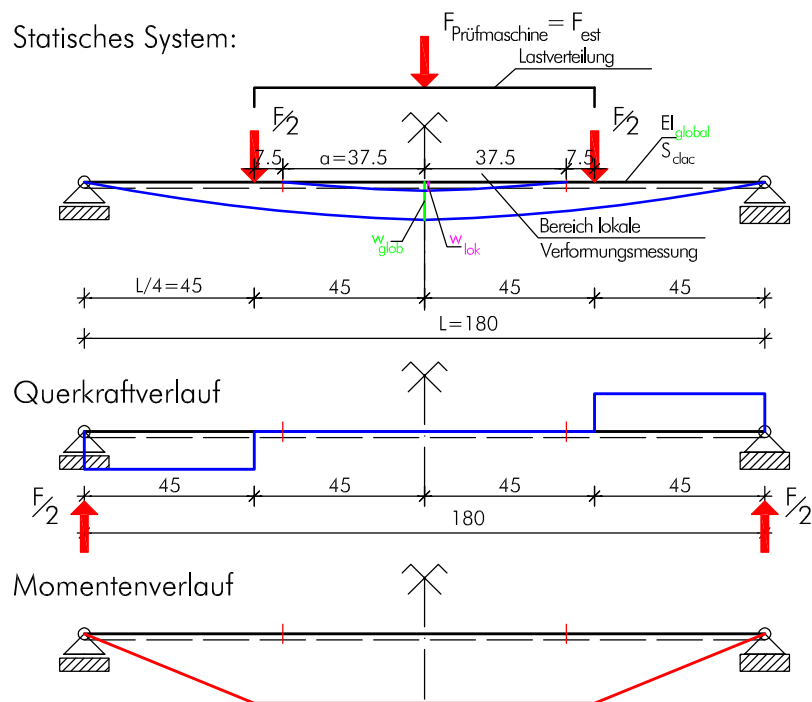


Abb. 5.113 Statisches System Biegeprüfung-Referenzplatten-global

- **Variante 1: Versuchstechnische Bestimmung der Biegesteifigkeit und Schubsteifigkeit der Platte**

Zunächst wird nur der mittlere Bereich mit einer Länge von $2 \cdot a = 75 \text{ cm}$ des Prüfkörpers betrachtet (Abb. 5.114).

Dieser Bereich ist querkräftfrei, somit entsteht keine Schubverzerrung im Querschnitt. Der Schubverformungsanteil an der vertikalen Gesamtverformung ist null. Die Vertikalverformung wird nur durch die Biegebeanspruchung der Platte verursacht. Die Verformung w_{lok} errechnet sich lt. Gl. [5.46] zu.

$$w_{\text{lok}} = \frac{F}{EI_{m,l,clt}} \times \frac{La^2}{16} \quad [5.46]$$

mit: $EI_{m,l,clt}$ Biegesteifigkeit für den inneren Trägerteil (lt. Abb. 5.114)

Die lokale Verformung wurde gemessen, somit lässt sich die Biegesteifigkeit $EI_{m,l,clt}$ der Platte in Anlehnung an die Norm EN 408 [4] bestimmen. Nach der in Abschnitt 5.3.7.2 beschriebenen Vorgehensweise wurden die relativen Kräfte und Verschiebungen (beispielhaft wurden die Bezeichnungen für Belastungsast mit den Indizes „1“ gewählt) bestimmt, und in der Auswertung herangezogen. Somit errechnet sich die lokale Biegesteifigkeit der Platte mit:

$$EI_{m,l,clt} = \frac{\Delta F}{\Delta v_{1,lok}} \times \frac{La^2}{16} \quad [5.47]$$

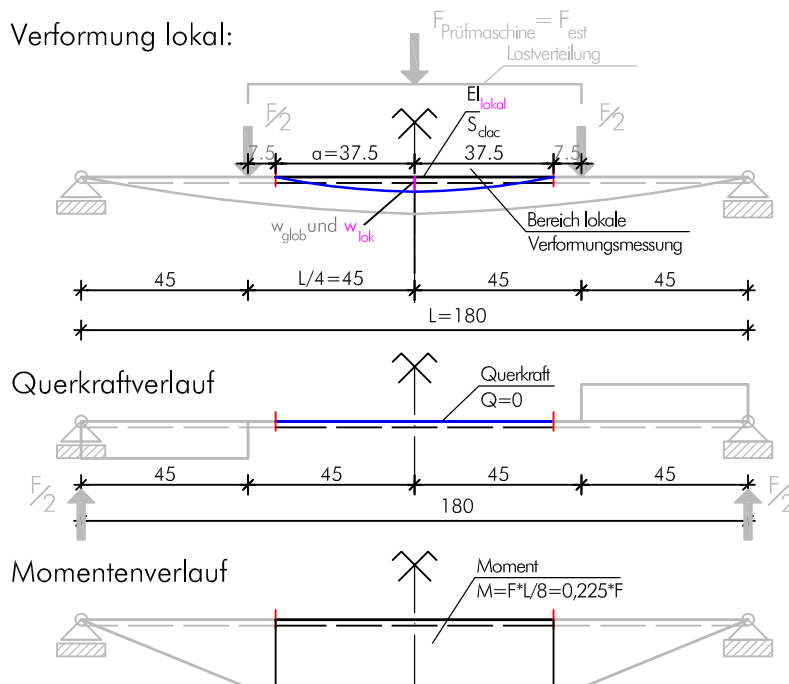


Abb. 5.114 Statisches System Biegeprüfung Referenzplatten- lokal

Die Verformung w_{glob} am Gesamtsystem lt. Abb. 5.113 kann unter Berücksichtigung der Schubverformung für die BSP-Platte errechnet werden:

$$w_{glob} = \int_0^l \frac{1}{EI_{m,l,clt}} \times \delta M \cdot M dx + \int_0^l \frac{1}{S_{calc,clt}} \times \delta Q \cdot Q dx \quad [5.48]$$

$$w_{glob} = \frac{11}{768} \cdot \frac{FL^3}{EI_{m,l,clt}} + \frac{1}{8} \cdot \frac{FL}{S_{calc,clt}}$$

Aus Gl. [5.48] lässt sich die Schubsteifigkeit $S_{calc,clt}$ wie folgt berechnen.

$$S_{calc,clt} = \frac{96 \cdot EI_{m,l,clt} \cdot FL}{768 \cdot EI_{m,l,clt} \cdot w_{glob} - 11 FL^3} \quad [5.49]$$

Für die relativen Kräfte und Verschiebungen lautet Gl. [5.49]:

$$S_{calc,clt} = \frac{96 \cdot EI_{m,l,clt} \cdot \Delta FL}{768 \cdot EI_{m,l,clt} \cdot \Delta v_{1,glob} - 11 \Delta FL^3} \quad [5.50]$$

Beispielhaft wird der Berechnungsformalismus für den Prüfkörper V0-R800-03 gezeigt:

Die Relativen Kräfte und Verformungen:

Kräfte	Verschiebungen lokal (WA10)	Verschiebungen global (WA20)	Anmerkung
$\Delta F_{est} = 45 \text{ kN}$	$\Delta v_{1,lok} = 1,34 \text{ mm}$	$\Delta v_{1,glob} = 7,38 \text{ mm}$	relative Kräfte und Verschiebungen

Tab. 5.32 Relative Kraft und zugehörige Verformungen für Prüfkörper V0-R-800-03

Berechnung der lokalen Biegesteifigkeit:

$$EI_{m,l,clt} = \frac{\Delta F}{\Delta v_{1,lok}} \times \frac{L a^2}{16} = \frac{45}{1,34 \cdot 10^{-3}} \times \frac{1,8 \cdot 0,375^2}{16} = 531,3 \text{ kNm}^2 \quad [5.51]$$

Berechnung der Schubsteifigkeit $S_{calc,clt}$:

$$S_{calc,clt} = \frac{96 \cdot EI_{m,l,clt} \cdot \Delta FL}{768 \cdot EI_{m,l,clt} \cdot \Delta v_{1,glob} - 11 \Delta FL^3} = \frac{96 \cdot 531,3 \cdot 45 \cdot 1,8}{768 \cdot 531,3 \cdot 7,38 \cdot 10^{-3} - 11 \cdot 45 \cdot 1,8^3} = 33188 \text{ kN} \quad [5.52]$$

Die Ergebnisse von Gl. [5.51] und Gl. [5.52] beziehen sich auf einen 0,8m breiten Plattenstreifen. Für einen 1m breiten Plattenstreifen ergeben sich folgende Steifigkeiten:

Biegesteifigkeit	Schubsteifigkeit
$EI_{m,l,clt} = 664 \text{ kNm}^2$	$S_{calc,clt} = 41485 \text{ kN}$

Tab. 5.33 Steifigkeiten nach Variante 1 für Prüfkörper VO-R-800-03

• **Variante 2: Versuchstechnische Bestimmung der Biegesteifigkeit mit angenommener Schubsteifigkeit**

Für die in der Norm EN 408 empfohlene Prüfgeometrie (Stützweite $L = 18h \pm 3h$; Lasteinleitungspunkt vom Auflager mit $6h \pm 1,5h$; wobei mit h die Dicke der Platte bezeichnet wird) wurde eine Möglichkeit zur Berechnung des globalen Elastizitätsmoduls für Brettsperrholzprüfkörper von Bogensperger/Schickhofer [45] entwickelt.

Mit der gemessenen Biegeverformung w_{glob} wird eine für einen schubstarreren homogenen Biegeträger korrekte Biegesteifigkeit EI_{app} berechnet. EI_{app} errechnet sich für die Geometrie nach Abb. 5.106 folgendermaßen:

$$EI_{app} = \frac{11}{786} \times \frac{FL^3}{w_{glob}} \quad [5.53]$$

Für die relativen Kräfte und Verschiebungen ergibt sich:

$$EI_{app} = \frac{11}{786} \times \frac{\Delta FL^3}{\Delta v_{1, glob}} \quad [5.54]$$

Nach [45] errechnet sich die globale Biegesteifigkeit $EI_{m,g,clt}$ für den BSP-Querschnitt wie folgt:

$$EI_{m,g,clt} = \frac{EI_{app} \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{(L/4)^2}{L^2}\right)}{1 - \frac{4 \cdot (L/4)^2}{3 \cdot L^2} - 8 \cdot \frac{EI_{app}}{S_{clt} \cdot L^2}} \quad [5.55]$$

mit:

L ... Stützweite lt. Abb. 5.106

EI_{app} ... lt. Gl. [5.53]

S_{clt} ... Schubsteifigkeit für den BSP-Plattenstreifen lt. Kapitel 2, Gl. [2.2]

Beispielhaft wird die Berechnung der Biegesteifigkeit für den Prüfkörper VO-R800-03 gezeigt.

$$EI_{app} = \frac{11}{786} \times \frac{\Delta FL^3}{\Delta v_{1, glob}} = \frac{11}{786} \times \frac{45 \times 1,8^3}{0,00738} = 497,7 \text{ kNm}^2 \quad [5.56]$$

Die errechnete Biegesteifigkeit bezieht sich auf eine Breite von 800mm.

Für einen 1m breiten Streifen ergibt sich ein Wert von:

$$EI_{app,1,0} = \frac{497,7}{0,8} = 622,1 \frac{\text{kNm}^2}{\text{m}} \quad [5.57]$$

[5.58]

$$EI_{m,g,clt} = \frac{EI_{app} \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{(L/4)^2}{L^2}\right)}{1 - \frac{4 \cdot (L/4)^2}{3 \cdot L^2} - 8 \cdot \frac{EI_{app}}{S_{clt} \cdot L^2}} = \frac{622,1 \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{0,45^2}{1,8^2}\right)}{1 - \frac{4 \cdot (0,45)^2}{3 \cdot 1,8^2} - 8 \cdot \frac{622,1}{7564,01 \cdot 0,8 \cdot 1,8^2}} = 799,1 \frac{\text{kNm}^2}{\text{m}}$$

mit $S_{clt}=7564,01$ lt. Kapitel 2, Gl. [2.2].

Für einen 1m breiten Plattenstreifen ergeben sich folgende Steifigkeiten:

Biegesteifigkeit	Schubsteifigkeit lt. Zulassung
$EI_{m,g,clt} = 799,1 \text{ kNm}^2$	$S_{clt} = 7564,01 \text{ kN}$

Tab. 5.34 Steifigkeiten nach Variante 2 für Prüfkörper VO-R-800-03

Ergebnisse der Einzelauswertung:

Tab. 5.35 zeigt die Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse für den Prüfkörper VO-R-800-03. Für die Serienauswertung der Steifigkeiten wurde nur Variante 2 weiterverfolgt. Die errechneten Werte für die Schubsteifigkeit der Platten nach Variante 01 sind nicht plausibel

Variante	Biegesteifigkeit	Schubsteifigkeit
Variante 1	$EI_{m,l,clt}=664,1 \text{ kNm}^2$	$S_{calc,clt}=41485 \text{ kN}$
Variante 2	$EI_{m,g,clt}=799,1 \text{ kNm}^2$	$S_{clt}=7564,01 \text{ kN}$
mit Zulassungswerten errechnet	$EI_{clt}=684,5 \text{ kNm}^2$	$S_{clt}=7564,01 \text{ kN}$

Tab. 5.35 Steifigkeitsermittlung für Prüfkörper VO-R-800-03-Variantenvergleich

Alle Ergebnisse der Einzelauswertung sind in Anhang B, Abschnitt nachzulesen.

Serienauswertung der Steifigkeiten

Die errechneten Werte der Biegesteifigkeit nach Variante 2 der Einzelauswertung wurden mit dem Statistik Programm R ausgewertet und graphisch dargestellt.

Die Ausführungen in Abschnitt 5.2.7.3 erklären die nachfolgend dargestellten Diagram-

me.

Die Prüfserien wurden für Belastungsast 1 und Belastungsast 2 getrennt ausgewertet (Abb. 5.112).

Abb. 5.115 zeigt eine graphische Darstellung der Auswertung bezüglich der Biegesteifigkeit $EI_{m,g,clt}$ **Belastungsast 1**. Dargestellt sind die Minimal-, die Maximal- und die Mittelwerte für jede Prüfserie. Weiters wurde die Anzahl der Prüfkörper (n) und der Variationskoeffizient (COV) angegeben. Die angegebenen Werte beziehen sich auf einen 1m breiten Plattensteifen.

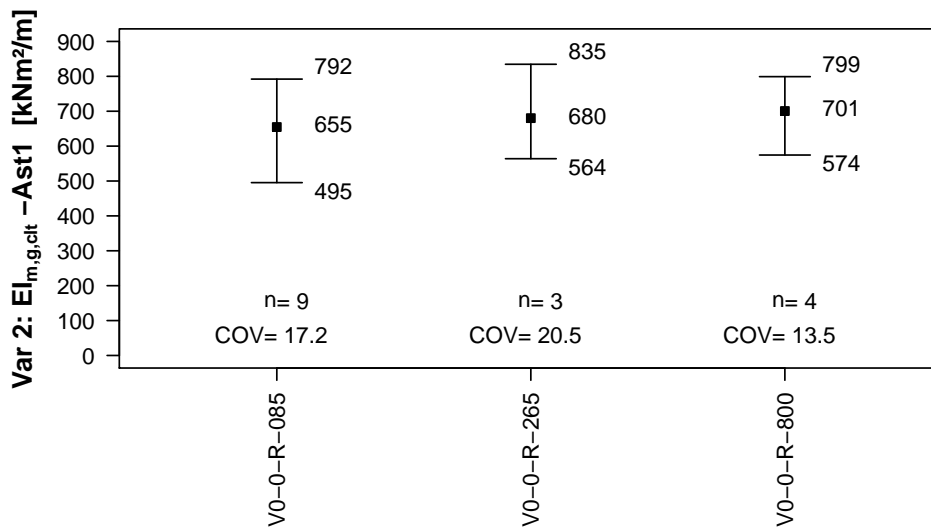


Abb. 5.115 Biegesteifigkeit $EI_{m,g,clt}$ für Belastungsast 1 der Referenzplatten

Abb. 5.116 zeigt die Gesamtauswertung (Boxplot Erklärung, Abschnitt 5.2.7.3) für alle Prüfkörper der Referenzplatten für Belastungsast 1 bezüglich der Biegesteifigkeit $EI_{m,g,clt}$.

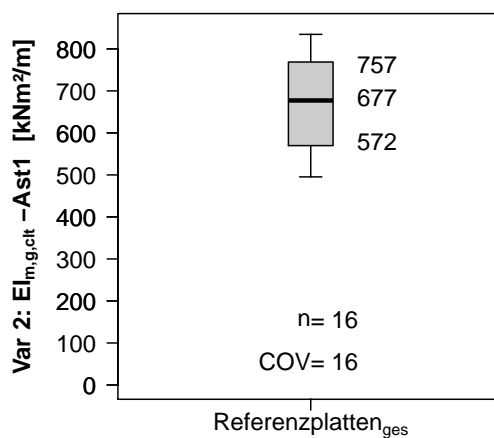


Abb. 5.116 Biegesteifigkeit $EI_{m,g,clt}$ Für Belastungsast 1

Abb. 5.117 zeigt eine graphische Darstellung der Auswertung bezüglich der Biegesteifigkeit $EI_{m,g,clt}$ **Belastungsast 2**. Dargestellt sind die Minimal-, die Maximal- und die Mittelwerte für jede Prüferie. Weiters wurde die Anzahl der Prüfkörper (n) und der Variationskoeffizient (COV) angegeben. Die angegebenen Werte beziehen sich auf einen 1 m breiten Plattensteifen.

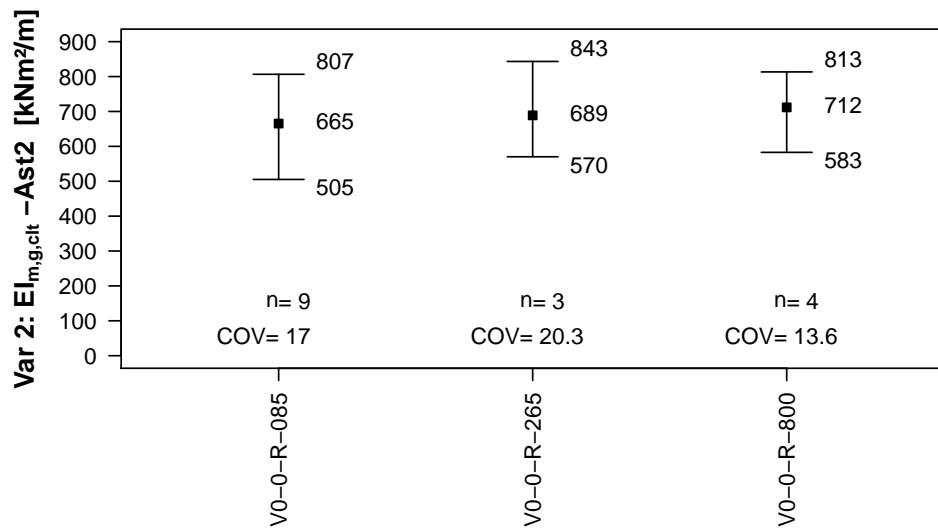


Abb. 5.117 Biegesteifigkeit $EI_{m,g,clt}$ für Belastungsast 2 der Referenzplatten

Abb. 5.116 zeigt die Gesamtauswertung (Boxplot Erklärung, Abschnitt 5.2.7.3) für alle Prüfkörper der Referenzplatten für Belastungsast 2 bezüglich der Biegesteifigkeit $EI_{m,g,clt}$.

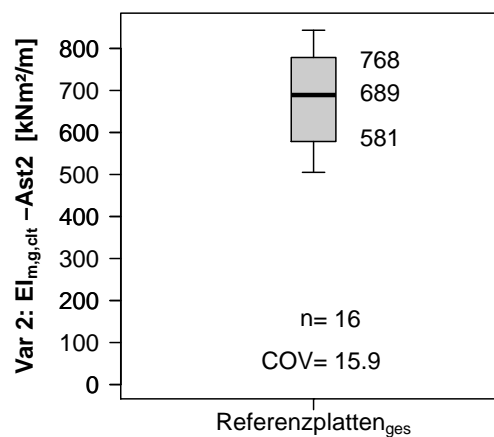


Abb. 5.118 Biegesteifigkeit $EI_{m,g,clt}$ Für Belastungsast 2

5.3.7.4 Auswertung der Biegefestigkeit

Die Biegespannungsermittlung für Brettsper Holz ist in Kapitel 4, Abschnitt 4.1 gezeigt. In diesem Kapitel wird beispielhaft die Spannungsermittlung für einen Prüfkörper der Serie VO-R-800 nach den unterschiedlichen Verfahren gezeigt und ein Vergleich der Ergebnisse dargestellt.

Einzelauswertung der Biegespannungen

 Berechnung der Biegespannung für BSP nach dem modifizierten γ -Verfahren (Produktzulassung)

gam

Der verwendete Plattenaufbau ist in Abb. 5.103 dargestellt. Die Steifigkeiten für das Grundmaterial sind in Kapitel 2, Tab. 2.1 angegeben.

Abb. 5.119 zeigt den Plattenaufbau mit den im folgenden benutzten Bezeichnungen einer 5-schichtigen Brettsper Holzplatte.

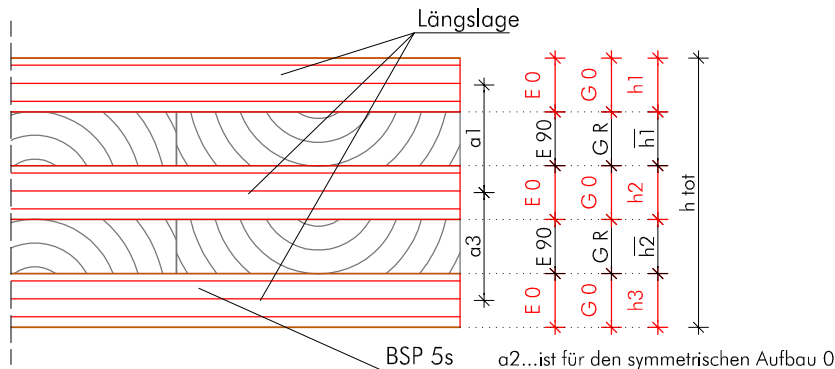


Abb. 5.119 Aufbau und Bezeichnungen einer 5-schichtigen Brettsper Holzplatte

Für den Prüfkörper VO-R-800-03 wurde ein Bruchkraft von 149,83 kN gemessen. Daraus errechnet sich für das baustatische Modell lt. Abb. 5.105 das Biegemoment in der BSP-Platte mit:

$$M_{\text{Bruch},0,8} = \frac{0,45 \times F_{\text{Bruch}}}{2} = \frac{0,45 \times 149,83}{2} = 33,7 \text{ kNm} \quad [5.59]$$

Somit errechnet sich das Moment für einen 1 m Plattenstreifen mit:

$$M_{\text{Bruch},1\text{m}} = \frac{M_{\text{Bruch},0,8}}{0,8} = 42,1 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} \quad [5.60]$$

Die Berechnung des wirksamen Flächenträgheitsmomentes I_{ef} erfolgt nach EN 1995-1-1:2009, Anhang B.2 für eine Stützweite $l = 1,8 \text{ m}$ und eine Plattenbreite $b = 1,0 \text{ m}$ (nä-

here Informationen in Abschnitt 4.1.1).

$$I_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^3 (I_i + \gamma_i A_i a_i^2) = 4512,89 \text{ cm}^4 = 4,51 \times 10^7 \text{ mm}^4 \quad [5.61]$$

Die Berechnung der wirksamen Biegesteifigkeit EI_{ef} erfolgt mit einem Referenz E-Modul von 12000 N/mm^2 . Damit ergibt sich EI_{ef} zu:

$$EI_{\text{eff}} = E_{\text{ref}} \times I_{\text{eff}} = 12000 \times 4,51 \times 10^7 = 5,42 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2 = 541,6 \frac{\text{kNm}^2}{\text{m}} \quad [5.62]$$

Die Berechnung der Biegerandspannung für den Biegespannungsnachweis erfolgt mit:

$$\sigma_{m,r,i,d} = \pm \frac{M_{\text{Bruch}}}{I_{\text{eff}}} \left(\gamma_i \cdot a_i + \frac{h_i}{2} \right)$$

$$\sigma_{m,r,i,d} = \frac{42,14 \times 10^6}{4,51 \times 10^7} 0,791 \cdot 38 + 8,5 = 36,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [5.63]$$

mit $\gamma_i = 0,791$ $a_i = 38 \text{ mm}$ $\frac{h_i}{2} = \frac{19}{2} = 8,5 \text{ mm}$

Die errechneten Werte für γ_i , a_i und h_i der Randlamelle wurden nach Kapitel 4, Gl. [4.1] berechnet. Die vollständige Ermittlung der Werte liegt in Abschnitt B.9 bei.

Abweichend von Gl. [5.63] ist in der Produktzulassung der Firma KLH (ETA-06/0138) [20] folgende Vorgehensweise zur Spannungsermittlung erlaubt. Berechnung des wirksamen Widerstandsmomentes W_{eff} :

$$W_{\text{eff}} = \frac{2 \times I_{\text{eff}}}{h_{\text{tot}}} = \frac{2 \times 4,51 \times 10^7}{95} = 949473 \text{ mm}^3 \quad [5.64]$$

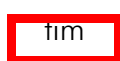
mit $h_{\text{tot}} = \sum_i (h_i + \bar{h}_i) = 5 \times 19 = 95 \text{ mm}$

Berechnung der Biegerandspannung $\sigma_{m,r,i,d}$:

$$\sigma_{m,r,i,d} = \frac{M_{\text{Bruch}}}{W_{\text{eff}}} = \frac{42,1 \times 10^6}{949473} = 44,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [5.65]$$

Anmerkung: Bei der Spannungsermittlung nach Produktzulassung ETA-06/0138 (Gl. [5.65]) bleibt die Nachgiebigkeit der Fuge (Faktor γ_i) unberücksichtigt. Somit liefert die Ermittlung der Biegespannung nach Gl. [5.65] höhere Werte als nach Gl. [5.63].

Berechnung der Biegespannung für BSP auf Basis des schubnachgiebigen Trägers nach Timoschenko



Die Ermittlung der Biegesteifigkeit EI_{clt} für die Referenzplatten errechnet sich nach Gl. [5.66]. Nähere Informationen zur Berechnung (Steifigkeiten des Grundmaterials etc.) finden sich in Abschnitt 2.1.7 bzw. in Abschnitt 4.1.2.

Die Berechnung der Biegesteifigkeit liegt in Abschnitt B.2.1 bei:

$$EI_{\text{clt}} = K_{\text{clt}} = \Sigma(I_i \cdot E_i) + \Sigma(A_i \cdot e_i^2 \cdot E_i) = 684,54 \frac{\text{kNm}^2}{\text{m}} \quad [5.66]$$

Berechnung der Normalspannung im Biegerand:

$$\sigma_{(z),d} = \frac{M_{\text{Bruch}}}{K_{\text{clt}}} \times z \times E(z) = \frac{42,14 \times 10^6}{6,85 \times 10^{11}} \times 47,5 \times 12000 = 35,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [5.67]$$

mit $z = \frac{t_{\text{clt}}}{2} = \frac{95}{2} = 47,5 \text{ mm}$

Biegespannungsvergleich

Der Nachweis der Biegerandspannung für das Bemessungsverfahren nach EN 1995 erfolgt mit:

$$\sigma_{m,r,i,d} \leq f_{m,d} \quad [5.68]$$

mit:

$f_{m,d}$ Bemessungswert der Biegefestigkeit lt. Produktzulassung (siehe Abschnitt 2.1.8, Tab. 2.6)

Der Nachweis der Biegerandspannung nach dem Verfahren Timoschenko erfolgt mit:

$$\sigma_{(z),d} \leq f_{m,d} \quad [5.69]$$

mit:

$f_{m,d}$ Bemessungswert der Biegefestigkeit lt. Produktzulassung oder Modell-TU-Graz (Abschnitt 2.1.8, Tab. 2.7 bzw. Tab. 2.6)

Tab. 5.36 zeigt einen Vergleich der charakteristischen Biegefestigkeitswerte:

	Biegefestigkeit [$f_{m,k}$]	Anmerkung
Produktzulassung KLH (ETA-06/0138-OIB)	26,4 N/mm ²	berücksichtigt $k_1 = 1,1$
Modell-TU-Graz	28,9 N/mm ²	siehe Kapitel 2, Abschnitt 2.1.8

Tab. 5.36 Biegefestigkeitskennwerte für Brettsperrholz

Vergleichend sind die ermittelten Biegespannungen für den Prüfkörper V0-R-800-03 im

Bruchzustand dargestellt. Als Bezugsbiegefestigkeit wird 28,9 N/mm² gewählt.

Bemessungsverfahren	$M_{sd} = M_{bruch}$ kNm/m	σ_b N/mm ²	$f_{m,k,clt}$ N/mm ²	Ausnutzung [%]
EN 1995-1-1, Anhang B	42,1	36,0	28,9	+25
EN 1995-1-1, Anhang B; Zulassung ETA-06/0138	42,1	44,3	28,9	+53
Verfahren Timoschenko	42,1	35,1	28,9	+21

Tab. 5.37 Biegespannungsvergleich für Prüfkörper VO-R-800-03

Serienauswertung der Spannungen

tim Für die Prüfserienauswertung wurde das Verfahren Timoschenko zur Biegespannungsermittlung herangezogen. Die nachfolgenden Abbildungen (Box-Plots) wurden mit dem Statistik Programm R erstellt. Die angegebenen 5%-Quantilwerte wurden mit diesem Programm errechnet. Weiters wird die Anzahl der Prüfkörper (n) und der Variationskoeffizient der Prüfserie (COV) angegeben.

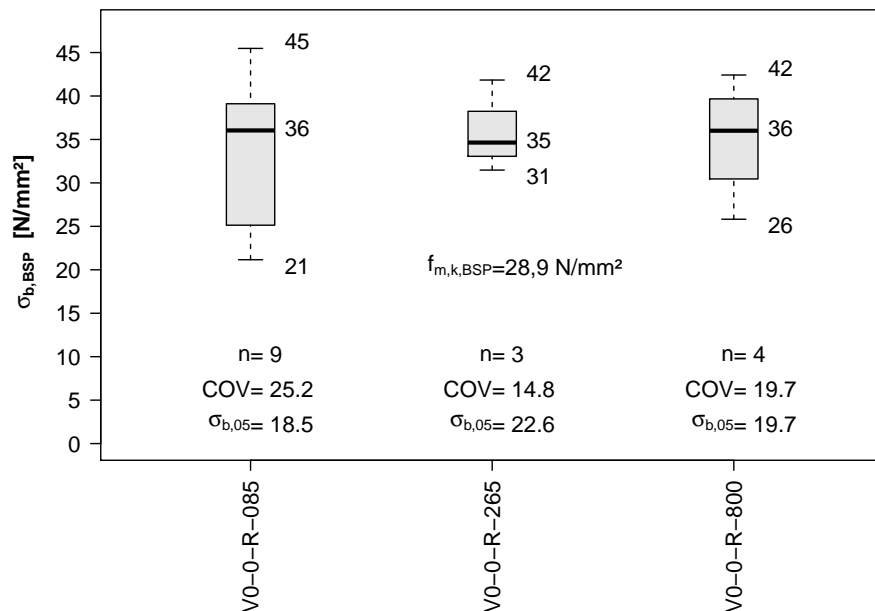


Abb. 5.120 Biegerandspannung Referenzplatten-Serienauswertung

Abb. 5.121 zeigt die Auswertung der Biegespannungen aller geprüfter Referenzplatten.

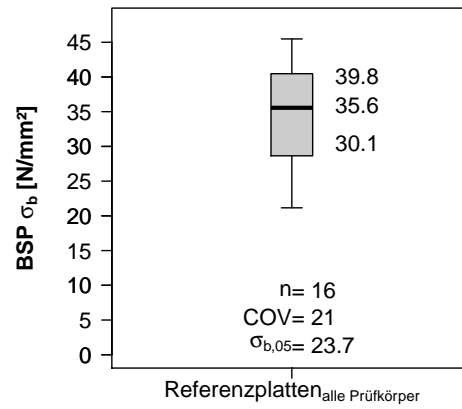


Abb. 5.121 Biegerandspannung Referenzplatten-Gesamtauswertung

Schlussfolgerung auf Basis der Versuche

Wesentliche Teile dieser Arbeit befassen sich mit der praktischen Herstellung der verklebten Verbindung. Die Verklebung ist mit 1K-PU-Klebern und mit 2K-PU-Klebern möglich. Für das Verkleben tragender Bauteile müssen klebetechnologische Parameter unbedin

gt eingehalten werden. Für beide Kleber sind die in den technischen Datenblättern angegebenen Werte der Holzfeuchte und der Raum- und Fügepartemperatur bei der Fertigung und Verklebung der Bauteile einzuhalten. Feuchteänderungen, insbesondere das Nachtrocknen von abgeordneten BSP-Teilen sollte unbedingt vermieden werden, da sich das unterschiedliche Schwindmaß von Holz quer und längs zur Faserrichtung sehr negativ auf die Oberflächenqualität auswirkt.

Bei 1K-PU-Klebern (Purbond HB-S-Serie) handelt es sich dabei im Speziellen um die Einhaltung der Fugenstärke laut Zulassung. Dafür ist eine sehr passgenaue Herstellung von Schlitz und Verbinder und die Aufbringung von Pressdruck bei der Verklebung notwendig. Der erforderliche Pressdruck kann mit konischen Verbindern erreicht werden.

Die Verklebung mit 2K-PU-Kleber (Purbond CR-421-Gießharz) hat den Vorteil einer größeren zulässigen Klebschichtstärke. Dadurch können Ungenauigkeiten im Abbund besser bewältigt werden. Aufgrund der Notwendigkeit einer vollständigen Abdichtung der Klebefuge und dem daraus entstehenden Arbeitsaufwand ist die Herstellung der Verklebung mit dem verwendeten 2K-PU-Kleber relativ aufwändig.

Bei der Planung der Verbindung ist auf genügend Abstand zum freien Plattenrand zu achten, um ein Nachgeben des BSP-Querschnitts beim Einbringen des konischen Verbinders zu vermeiden.

Die durch die Biegezugversuche ermittelte Schubfestigkeit der Verklebung der Randleiste von ca. $f_{v,05} = 2,4 \text{ N/mm}^2$ (für Prüfsérie VB-o und VB-u; ausgeführt mit konischem Verbinder und 1K-PU-Kleber) zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem charakteristischen Schubfestigkeitswert der Kerto-Platte ($f_{v,k} = 2,3 \text{ N/mm}^2$). Anzumerken ist hierzu, dass die durchgeführten Biegezugversuche eine sehr isolierte Belastung der Verklebung darstellt. Die ermittelten charakteristischen Schubfestigkeiten aus den Biegeversuchen sind durchschnittlich größer als $2,4 \text{ N/mm}^2$.

Im Zuge der Biegeversuche wurden verschiedene Einflussparameter auf die Biegefestigkeit der Verbindung geprüft. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für alle Prüfkonfigurationen eine charakteristische Biegefestigkeit im Brettsperrholz-Nettoquerschnitt von mindestens $f_{m,clt,netto,05} = 28,2 \text{ N/mm}^2$ ermittelt wurde. Die Variationskoeffizienten sinken mit steigender Anzahl an Verbindern, was den vermuteten Systemeffekt bei gleichzeitigem Wirken von mehreren Verbindern verdeutlicht. Die COV-Werte für die Biegespannungen im BSP-Nettoquerschnitt (eine sehr häufige Bruchursache) ab einer Anzahl von drei Verbindern liegen für die verschiedenen Prüferien in einem Bereich von min. 4,3% bis max. 8,2%.

Auffallend in den Ergebnissen der statistischen Abschätzung der charakteristischen Festigkeiten verhalten sich die Prüfkonfigurationen V30-0-A-p-u-800 und V30-0-A-n-u-800 (auf Gehrung verbunden), sowie die Variante V0-C-p-u-800 (verklebt mit 2K-PU-Gießharz). Sie weisen durchwegs höhere Festigkeiten als der Rest der Prüferien auf. Für die Serie V0-C-p-u-800 dürfte das auf den steiferen 2K-PU-Kleber zurückzuführen sein, für die auf Gehrung verbundenen Platten müsste zur Beurteilung des Tragverhaltens und der Ergebnisse eine umfangreiche FE-Studie durchgeführt werden, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt wurde.

Das Ziel einen Wirkungsgrad der Verbindung versuchstechnisch zu ermitteln, und somit eine Anbindung an die Biegetragfähigkeit der ungestoßenen BSP-Platte zu erhalten wurde aufgrund des unterschiedlichen BSP-Plattenmaterials nicht erreicht. Die Biegeversuche an den Referenzplatten haben jedoch gezeigt, dass die Biegetragfähigkeit von BSP alleine durch die Wahl der Decklamellenbreite stark beeinflusst wird.

Die Versuchsergebnisse der geraden Verbindungsplatten (Varianten ohne Knickwinkel) korrelieren gut mit dem gewählten ingenieurmäßigen Bemessungsmodell der Biegetragfähigkeit der Verbindung. Die versuchstechnisch ermittelten Festigkeitswerte liegen meist höher als die charakteristischen Materialfestigkeiten, und damit auf der „sicheren Seite“. Mit der Verbindung kann im optimalen Fall ca. 68% des Biegetragmomentes der ungeschwächten BSP-Platte übertragen werden.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Verbindung unter Einhaltung wichtiger Randbedingungen bei der Herstellung (Passgenauigkeit, Holzfeuchte beim Fräsen und Verkleben), eine Möglichkeit bietet, eine leistungsfähige biegesteife Holz-Holz-Verbindung in Brettsperrholz auszuführen.

Anmerkung: Die Angabe von charakteristischen Verbindungswiderständen erfordert umfangreichere Versuchsreihen (Tragverhalten auf Querkraftbeanspruchung, Zug- bzw. Druckbeanspruchung, etc.). Im Rahmen dieser Arbeit wurde die statistische Bearbeitung auf einzelne statistische Kennwerte beschränkt, da das vorrangige Ziel eine Machbarkeitsstudie, bzw. die praktische Entwicklung des Verbindungssystems war.

Die angegebenen Versuchsergebnisse sind daher als eine erste Abschätzung des Biegetragverhaltens zu sehen und keinesfalls als wissenschaftlich abgesicherte Bemessungswerte für die Verbindung.

FWF-Prototyp „Kobra“

7.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt zeigt die Umsetzung der Verbindung an dem im 3. Projektabschnitt (2011) des FWF-Projekts am Institut für Architektur und Medien entworfenen Prototypen „Kobra“. Der Pavillon wurde als temporäres Bauwerk geplant, der Standort ist das Universitätsgelände der TU-Graz in der Innfeldgasse.

In diesem Kapitel wird die Entstehung großteils bildlich beschrieben. Detaillierte Informationen finden sich im Forschungsbericht des FWF-Projekts (L695) oder in einer Ausgabe der Zeitschrift „Bauen mit Holz“.

Verbaut wurden ca. 65 m² BSP-Platten mit einer Stärke von 95 mm. Die äußeren Abmessungen betragen 10x4x4 m. Die Fläche wurde als glatte Fläche entworfen und mit dem am Institut für Architektur und Medien entwickelten Algorithmus in fünf- sechs- und siebeneckige planare Elemente zerlegt.

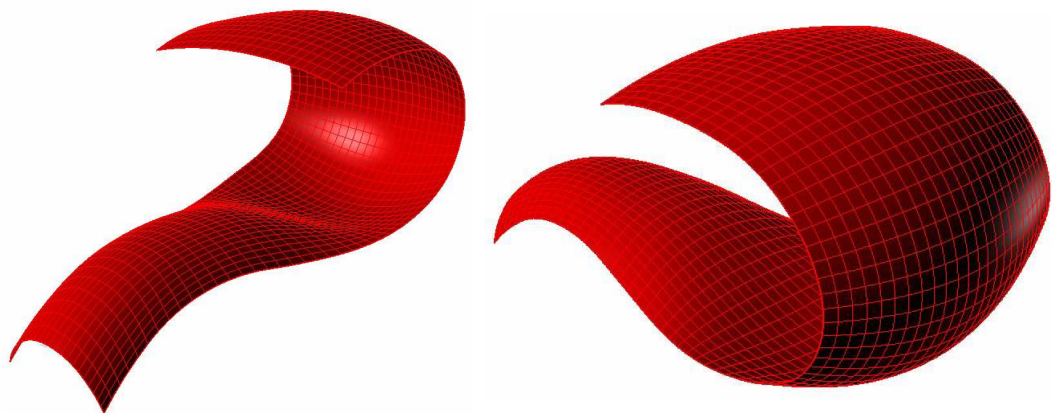


Abb. 7.1 Entwurf des Prototypen als glatte Fläche (Quelle: IAM-TU-Graz)

7.2 Statik

Die statische Berechnung wurde am Kompetenzzentrum für Holzbau (holz.bau forschungs gmbh) von T. Bogensperger mit dem FE-Programm ABAQUS durchgeführt. Als Lastfälle wurde Eigengewicht und Wind parallel zur Längsrichtung des Bauwerks untersucht. Wind normal zur Symmetrieffläche wurde lediglich für den Standsicherheitsnachweis untersucht. Für die Tragfähigkeit wurde dieser Lastfall als nicht maßgebend eingeschätzt. Die Struktur besitzt die in Abb. 7.2a) dargestellte Symmetrieffläche. Die Ausrichtung der Decklage der BSP-Platten erfolgte möglichst parallel zu dieser Ebene. In Abb. 7.2 b) sind die zur Lastübertragung herangezogenen Schnittkanten rot dargestellt. Als Fundamentierung der temporären Struktur dient ein Stahlrahmen.

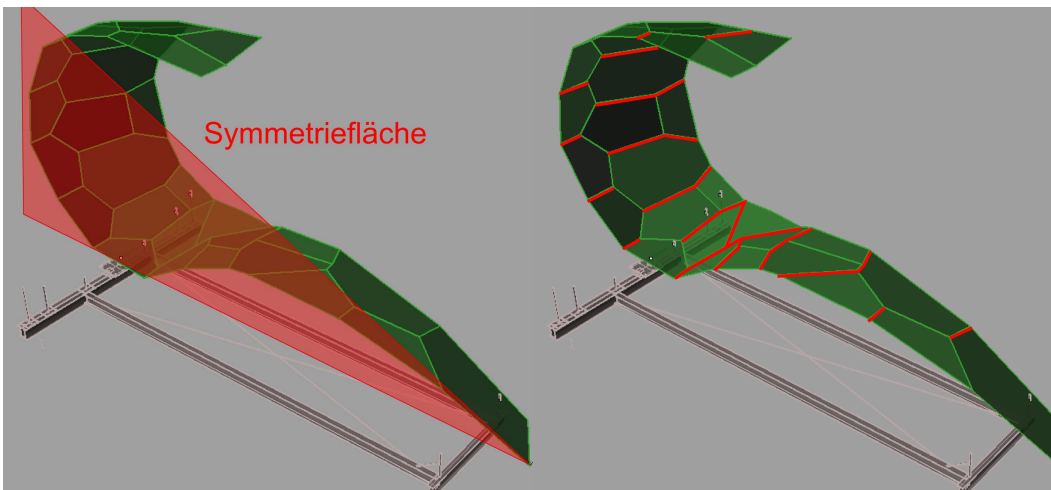


Abb. 7.2 a) Symmetrieffläche der Struktur (Quelle: IAM-TU-Graz) b) Hauptfugen zur Übertragung der Lasten (rot)

Abb. 7.3 zeigt die Aufteilung der Kertverbinder auf die Verbindungskanten. Insgesamt wurden ca. 300 Stück Verbinder eingebaut.

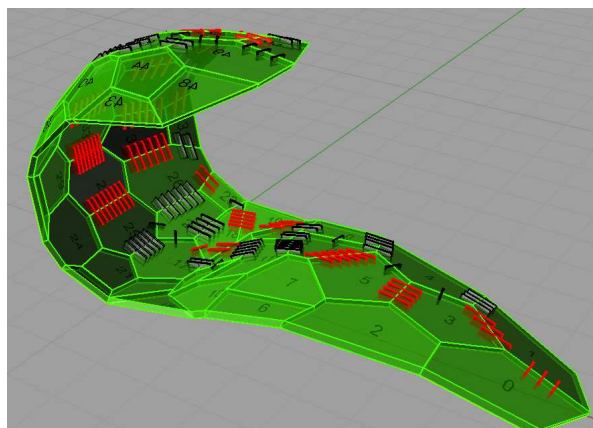


Abb. 7.3 Kertverbinder in den Verbindungsfugen (Quelle: IAM-TU-Graz)

7.3 Fertigung

Die Fertigung erfolgte in der HTBLA Graz Ortweinschule. Die Struktur wurde für die Fertigung in drei Teile gestückelt.

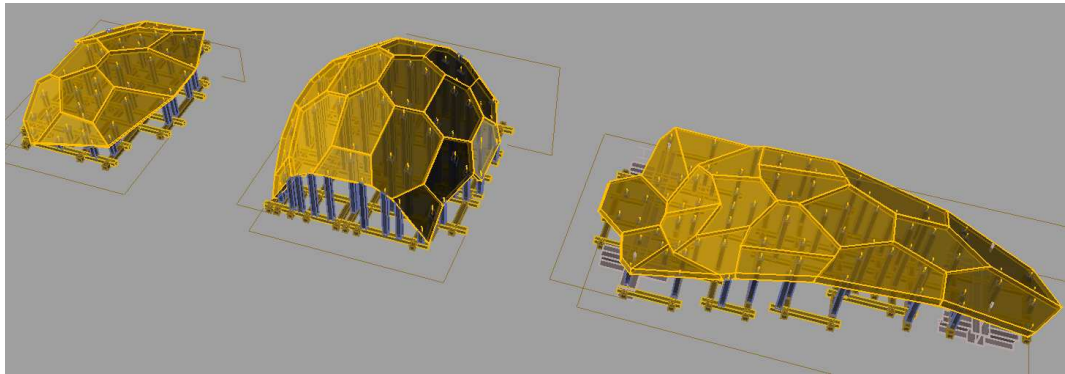


Abb. 7.4 Zerlegung der Struktur in Dach- Mittel- und Basisteil (von links nach rechts).
(Quelle: IAM-TU-Graz)

Für jeden Einzelteil wurde eine Rüstung aus CNC-mäßig abgebandenen und zimmermannsmäßig verbundenen (Schlitz-Zapfenverbindungen) Kanthölzern (KVH) hergestellt. Die erforderliche Passgenauigkeit für die Verklebung kann nur durch eine exakte Geometrie der BSP-Platten und der Rüstung erreicht werden.



Abb. 7.5 Abbund der Rüstung auf der CNC-Anlage, die fertige Rüstung.
(Quelle: IAM-TU-Graz)

Die Schlitz-Zapfenverbindungen wurden mit Schrauben verstärkt, die Aussteifung der Rüstung erfolgte durch OSB-Platten. Anschließend wurden die BSP-Teile auf der Rüstung mit Stabdübel in der Lage fixiert. Die Bohrungen für die Stabdübel wurden beim Abbund der BSP-Platten und der Rüstung mitgefertigt. Bei der Planung der Rüstung musste darauf geachtet werden, dass die Stützung nicht im Bereich der Verbinder lag.



Abb. 7.6 Aussteifung der Rüstung
(Quelle: IAM-TU-Graz)



vor der Verklebung des Bauteils

Es wurden drei Verbindungstypen verschiedener Höhe, abhängig vom Gehrungswinkel verklebt. Um ein optisch anspruchsvolles Ergebnis zu erhalten, wurden nicht zu verklebende Flächen mit Klebeband abgedeckt.

Stabdübel zur Lagesicherung auf der Rüstung



Abb. 7.7 Zuordnung Schlitz-Verbinder
(Quelle: IAM-TU-Graz)



auftragen des 1K-PU-Klebstoffs (Purbond HB-S709)

Die Verklebung musste innerhalb der offenen Zeit (70min) des Klebstoffs erfolgen.



Abb. 7.8 Die Verklebung des Basisteils (Quelle: IAM-TU-Graz).

7.4 Transport und Montage (inkl. Fügung)

Die Verklebung von Mittel und Dachteil konnte noch in der HTBLA durchgeführt werden. Die verbleibenden zwei Einzelteile wurden mit Lastkraftwagen zur Baustelle transportiert.



Abb. 7.9 Dach und Mittelteil
(Quelle: IAM-TU-Graz)



Basisteil bei der Verladung auf den LKW



Abb. 7.10 abladen der Teile
(Quelle: IAM-TU-Graz)



Der Basisteil auf dem Stahlrahmen

Am Standort erfolgte die Ausrichtung der beiden Bauteile für die Verklebung der Montagefuge mit dem Autokran



Abb. 7.11 einrichten und fixieren der beiden Teile in der Endlage (Quelle: IAM-TU-Graz)



7.4.1 Baustellenverklebung Montagefuge

Nach dem Fixieren der beiden Bauwerksteile in der Sollage wurde die Verklebung der Montagefuge bauseits durchgeführt. Die Montagefuge wurde mit einem 2K-Klebstoffsystem der Firma Purbond (CR-421) verklebt. Die Klebstofffuge wurde mit 2 mm Stärke zur Aufnahme vorhandener Fertigungstoleranzen geplant. Die vorab gefrästen Schlitzte waren bei Fertigung und Transport abgeklebt, um die Oberflächen vor Verschmutzung zu schützen. Durch diese Maßnahme sollte auch die Alterung der Oberfläche verzögert werden. Eine Baustellenverklebung tragender Bauteile ist grundsätzlich schwierig herzustellen, wurde in diesem Fall aus ästhetischen und aus Gründen der Homogenität des Bauwerks gewählt. Nähere Informationen zu Baustellenverklebungen finden sich in [46].



Abb. 7.12 Durch Stahlstützen wurden die Bauwerksteile in der Sollage fixiert

Bei der Verwendung des flüssigen 2K-PU-Klebesystems müssen die zu verklebenden Fugen dicht mit gut haftenden Klebebändern dicht abgeklebt werden. Vor dem Abkleben wurden am tiefsten und am höchsten Punkt jeder Fuge Einfüll- bzw. Auslaufbohrungen gesetzt.

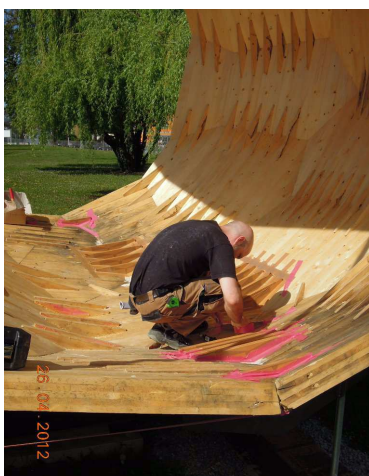
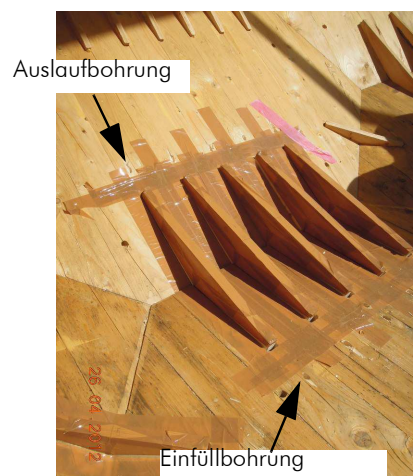


Abb. 7.13 abkleben der Fugen



Einfüll- und Auslaufbohrungen

Vorab wurden auch im Verbinder Löcher gebohrt, um eine gleichmäßige Verteilung des flüssigen Klebstoffs auf beide Klebefugen eines Verbinders beim Verpressen zu erreichen. Die mechanische Sicherung der Klebebänder wurde mit Holzwerkstoffplatten und Leisten durchgeführt.



Abb. 7.14 Verbinder mit Entlastungsbohrungen

mechanische Sicherung der Klebebänder

Vor dem Verkleben wurde die Holzfeuchte im Bereich der zu verklebenden Teile gemessen. Dabei wurden je nach Ausrichtung zur Sonne Werte von ca. 12,5 - 15,5% gemessen. Die Lufttemperatur betrug zu diesem Zeitpunkt ca. 20°C. Anzumerken ist, dass hierbei nicht die Holzfeuchte der Oberfläche der Klebeflächen gemessen wurde. Dies war aus Geometriegründen nicht möglich. Laut Produktzulassung [18] ist eine Holzfeuchte der zu verklebenden Teile von max. 15% einzuhalten. Weiters muss eine Bauteiltemperatur von min. 15°C bis max. 30°C eingehalten werden.

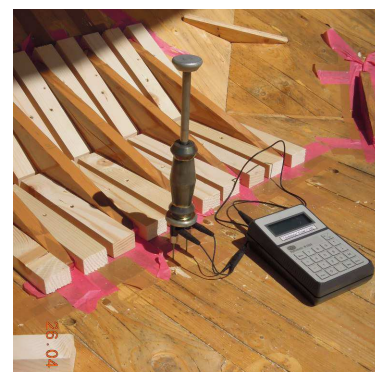


Abb. 7.15 mechanische Sicherung der Klebebänder

Messung der Holzfeuchte

Folgende Arbeitsschritte wurden beim Verkleben eines Verbinders durchgeführt:

- herstellen von vier Kontrollbohrungen
- ansetzen des Handauftragsgeräts mit Statikmischrohr am tiefsten Punkt der Klebefuge
- einpressen des Klebstoffs vom tiefsten Punkt - bei offenen Kontrollbohrungen.
- verpressen der Fuge bis zum Klebstoffaustritt aus den ersten beiden Kontrollbohrungen
- verschließen der ersten beiden Kontrollbohrlöcher mit Schrauben
- einpressen des Klebstoffs bis aus den höherliegenden Kontrollbohrungen Klebstoff austritt
- verschließen der Einfüllöffnung am Tiefpunkt mit einem Holzdübel
- auffüllen des Klebstoffs in die Auslauföffnung bis die Fuge vollständig gefüllt ist



Abb. 7.16 verkleben eines Verbinders



Abb. 7.17 verschließen der Kontrollbohrungen



verschließen der Einfüllöffnungen



Abb. 7.18 herstellen der Baustellenverklebung

7.5 Prototyp „Kobra“

Die folgenden Bilder zeigen den fertiggestellten Prototypen „Kobra“.



Abb. 7.19 „Kobra“ (Quelle: IAM-TU-Graz)



Abb. 7.20 „Kobra“ (Quelle: IAM-TU-Graz)



Abb. 7.21 „Kobra“ (Quelle: IAM-TU-Graz)



Abb. 7.22 Detail Holz-Holzverbindung



Abb. 7.23 Detail Holz-Holzverbindungverbindung

Ausblick

Weitere Untersuchungen zur Anwendbarkeit auf Freiformflächen und technische Standardflächen wie Zylinderflächen und Kuppelflächen wären sinnvoll. Der Einsatz der Verbindung in bautechnisch häufiger verwendeten Tragstrukturen wie Faltdächern ohne Queraussteifungen (eine freie Durchsicht durch ein Bauwerk ist ein oft geäußelter Architektenwunsch), ist ebenfalls anzudenken und liegt auf der Hand. Diese Tragstrukturen bieten sich beispielsweise bei Dachgeschoss-Aus- und Umbauten an.

Dafür müsste das Tragverhalten der Verbindung für weitere Verbindungswinkel bis hin zum Rahmeneck versuchstechnisch und in FE-Studien analysiert werden. Das Verhalten der Verbindung bei Feuchtigkeitsänderungen wäre ebenso wie kombinierte Beanspruchungen (Moment, Querkraft, Normalkraft) bei einer Weiterentwicklung zu untersuchen. Für den Einsatz in Faltdachstrukturen müsste auch das Tragverhalten auf Kantenschub in die Untersuchungen miteinbezogen werden.

Entscheidend für den praxistauglichen Einsatz und somit der Verwendung der Klebeverbindung, wird die Entwicklung einer rationellen kostengünstigen Fertigungstechnik sein. Das oberste Prinzip muss dabei die Qualität der Verklebung sein. Das Fräsen der Schlitzlöcher und das Verkleben sollten ohne Verzögerung und im Idealfall unter gleichbleibenden Bedingungen (Halle) stattfinden. Möglicherweise könnte die Verbindung schon im BSP-Werk hergestellt werden.

Zu thematisieren wäre auch eine Modifikation des Klebstoffs. Optimal wäre aus Sicht des Verfassers ein Klebstoff, der die Eigenschaften des 1K-PU mit jenen des 2K-PU-Klebers vereint.

Laut Aussage von Klebstoffexperten ist eine Anpassung des 2K-PU-Klebers im Bezug auf die Viskosität möglich.

Der modifizierte Kleber sollte mit einer Spachtel aufgetragen werden können, und für Fugenstärken bis max. 1,0 mm geeignet sein. Dies würde die Anforderungen an den Abdruck stark reduzieren, und somit die Praxistauglichkeit der Verbindung wesentlich erhöhen.

A Literaturverzeichnis

A.1 Normen

- [1] ÖNORM EN 1990:2003-03-01
Grundlagen der Tragwerksplanung
- [2] ÖNORM EN 1995-1-1:2009-07
Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [3] EN 13183-1:2004
Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz-Teil 1-Bestimmung durch Darrverfahren
- [4] Entwurf ÖNORM EN 408:2009
Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften
- [5] ÖNORM EN 26 891:1991
Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln - Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens (ISO 6891:1983)
- [6] ÖNORM EN 14358:2006
Holzbauwerke-Berechnung der 5%-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben
- [7] ON-EN 302:2004
Klebstoffe für tragende Holzbauteile-Prüfverfahren
- [8] ON-prEN14080:2009
Holzbauwerke-Brettschichtholz und Balkenschichtholz-Anforderungen

- [9] ON-EN 391
Brettschichtholz-Delaminierungsprüfung von Klebstoffugen
- [10] ON-EN 392
Brettschichtholz-Scherprüfung der Leimfugen
- [11] EN-1194
Brettschichtholz-Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte
- [12] ON EN 923:2008
Klebstoffe - Benennungen und Definitionen
- [13] EN 301:2006
Klebstoffe für tragende Holzbauteile-Phenoplaste und Aminoplaste-Klassifizierung und Leistungsanforderungen
- [14] EN 386:2002
Brettschichtholz-Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung
- [15] DIN 1052:2008
Entwurf Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau
- [16] ON EN 338:2009
Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen

A.2 Zulassungen

- [17] Z-9.1-765-DIBT
1-K-PUR-Klebstoffe PURBOND HB-S109 bis HB-S709 für die Verklebung tragender Holzbauteile
Gültigkeit bis: 25.10.2015
- [18] Z-9.1-707-DIBT
2-K-PUR-Klebstoffe PURBOND CR-421 zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe
Gültigkeit bis: 31.05.2015
- [19] Z-9.1-100-DIBT
KERTO-Furnierschichtholz
Gültigkeit bis 31.05.2011
- [20] ETA-06/0138-OIB
KLH-Massivholzplatten

- Massive plattenförmige Holzbauelemente für tragende Bauteile in Bauwerken
Gültigkeit bis 26.07.2011
- [21] Z-9.1-559-DIBT
CLT-Cross-Laminated-Timber
Gültigkeit bis 31.01.2012
- [22] ETA 06/0009
Binder Brettsperrholz BBS
Mehrschichtige Holzbauelemente für Wand-, Decken-, Dach-, und Sonderbauteile
- [23] Z-9.1-680
HMS Element

A.3 Bücher/Dissertationen/Diplomarbeiten

- [24] Schickhofer, G.; et. al.
BSPhandbuch | Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz
2. Auflage, 2010
- [25] Lackner, H.
Festlegung einer Prüfkongfiguration für die Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholz sowie Analyse des Größeneinflusses
Diplomarbeit, TU-Graz, 2011
- [26] Battisti, V.
Faltwerke aus Brettsperrholz
Diplomarbeit, TU-Graz, 2009
- [27] Sachs, L.; Heddrich, J.
Angewandte Statistik, Methodensammlung mit R
12. Auflage, Springer Verlag
Kiel, 2006
- [28] Hirschmann, B.
Ein Beitrag zur Bestimmung der Scheibenschubfestigkeit von Brettsperrholz
Masterarbeit, TU-Graz 2011
- [29] Moosbrugger, T.
Ein Beitrag zur Bemessung vom mehrschichtigen flächenhaften Holzbauteilen am Beispiel von Brettsperrholzplatten
Diplomarbeit, TU-Graz 2004
- [30] Salzmann, C.

Ermittlung von Querdruckkenngrößen für Brettspertholz (BSP)
Masterarbeit, TU-Graz 2010

- [31] Habenicht, G.
Kleben-Grundlagen-Technologien-Anwendungen
Vieweg 2006
- [32] Habenicht, G.
Kleben-erfolgreich und fehlerfrei
Vieweg 2006
- [33] Zeppenfeld, G.; Grunwald, D.
Klebstoffe in der Holz und Möbelindustrie
DRW Verlag 2005
- [34] DRW Verlag
Holz - Lexikon
(1988), 3. Nachdruck 1993

A.4 Berichte/Skripten/Publicationen

- [35] Richter K.; Brandner R.
Klebertechnologie und Holzwerkstoffe
SS 2010
Skriptum, Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU-Graz
- [36] Schickhofer, G.
Holzbau, Teil A | Der Roh- und Werkstoff Holz
Version 1.2, WS 2006/2007
Skriptum, Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU-Graz
- [37] Schickhofer, G.
Holzbau, Teil B | Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz
Version 1.2, WS 2005/2006
Skriptum, Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU-Graz
- [38] Stadlober, E.
Angewandte Statistik
WS 2008/09
Institut für Statistik, TU-Graz
- [39] Greiner, R.; Unterweger, H.
Stahlbau, 2007
Skriptum, Institut für Stahlbau und Flächentragwerke, TU-Graz
- [40] Plank, A.

- Grafiken und Statistik in R
Institut für Geologische Wissenschaften, FU Berlin
29. März 2010
- [41] Groß, J.; Peters, B.
R Reader | Arbeiten mit dem Statistikprogramm R
1.Version, Juli 2009
- [42] Veigel, S.; Follrich, J.; Gindl-Altmatter, W.; Müller, U.
Comparison of fracture energy testing by means of double cantilever beam-
DCB-specimens and lap joint testing method for characterization of adhe-
sively bonded wood
Published online: 17.November 2010
DOI 10.1007/s00107-010-0499-6
- [43] Gindl, W.; Teischinger, A.; Konnerth, J.; Müller, U.
Die Schäftprobe-Eine ergänzende Methode zur Prüfung der Verklebungsfes-
tigkeit
BOKU Wien
- [44] Jöbstl, R.A.; Moosbrugger, Th.; Bogenperger, Th.; Schickhofer, G.
A contribution to the design and system effect of cross laminated timber
(CLT)
CIB 2006 W18/39-12-15, 2006
- [45] Bogenperger, Th.; Schickhofer, G.
The mechanical inconsistency in the evaluation of the modulus of elasticity
according to EN 408
CIB 2006 W18/39-21-2, 2006
- [46] Publisher: Universität für Bodenkultur, Wien
Lignovisionen, Issue 18
Core Document of the COST Action E34
Bonding of Timber
ISSN-1681-2808/2008
- [47] Bogensperger, Th.; Silly, G.;
Approximative Nachweisverfahren für BSP – Methodenvergleich
Forschungsbericht der holz.bau forschungs gmbh
TU-Graz 2012
- [48] Purbond
TDS Purbond HB-S709_D
Holzleimbau Technik /06-2010
- [49] Purbond
TDS Purbond HB-S309_D

Holzleimbau Technik /06-2010

- [50] Purbond
TDS Purbond CR-421_D
Holzleimbau Technik /April-2010

A.5 Internet-Schriftverkehr

- [51] <http://www.roomu.net/architecture/oscar-niemeyer-quot-architect-centennial-quot.htm> | 16.11.2010
- [52] <http://www.klh.at/technische-anwendung/statik.html> | 31.01.2012
- [53] http://www.mpa.uni-stuttgart.de/organisation/fb_1/abt_12/listen_und_verzeichnisse/Klebstoffliste-I-Stand-10-02-2011.pdf
| 02.09.2011
- [54] <http://www.hbm.com/de/menu/produkte/aufnehmer-sensoren/dehnung/dd1/> | 28.01.2012
- [55] <http://www.gann.de/default.asp?action=products&id=24> | 31.01.2012
- [56] <http://www.r-statistik.de/> | 04.04.2012
- [57] <http://www.cltdesigner.at/> | 22.04.2012
- [58] <http://www.clt.info/> | 21.03.2011
- [59] <http://www.purbond.com/> | 25.05.2012
- [60] <http://www.kerto.de/> | 25.05.2012
Kerto_in_der_Praxis_Broschuere15.12.08.pdf
- [61] <http://www.museum-joanneum.at/> | 27.05.2012

Anhang

B.1 Klebstoffliste

MPA MPA STUTTGART
Otto-Graf-Institut

Klebstoffliste I der MPA Universität Stuttgart
Stand 10.02.2011
Seite 7/8

zu 3. Holzklebstoffe mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung des DIBt ¹⁾

Zulassungsbescheid Nr.	Bezeichnung des Zulassungsgegenstandes	Anschrift des Herstellers
Z-9.1-669	PUR-Klebstoff „Purbond HB 221“ für die Herstellung verklebter tragender Holzbauteile	Purbond AG Industriegebiet Rank 6203 Sempach-Station / Schweiz
Z-9.1-685	Klebstoffsystem „Prefere 4720“ mit Härter „Prefere 5020“ für Keilzinkenverbindungen von einteiligem Nadelholz mit getrenntem Klebstoff-/Härterauftrag	Dynea ASA Svellevæien 33 2001 Lillestrom / Norwegen
Z-9.1-686	Klebstoff „Purbond HB 230“ für die Herstellung verklebter tragender Holzbauteile	Purbond AG Industriegebiet Rank 6203 Sempach-Station / Schweiz
Z-9.1-690	1K-PUR-Klebstoff „Jowapur 686.19“ für die Herstellung verklebter tragender Holzbauteile	Jowat AG Ernst-Hilker-Straße 10 - 14 32758 Detmold / Deutschland
Z-9.1-691	Klebstoff „Jowapur 686.30“ für die Herstellung tragender Holzbauteile	Jowat AG Ernst-Hilker-Straße 10 - 14 32758 Detmold / Deutschland
Z-9.1-692	1K-PUR-Klebstoff „Purbond HB 230“ für die Verklebung von Keilzinkenverbindungen in Verbindung mit dem Klebstoffauftragssystem Hydrotop KB und dem Sicherungssystem PSS	Purbond AG Industriegebiet Rank 6203 Sempach-Station / Schweiz
Z-9.1-705	2K-EP-Klebstoff WEVO-Spezialharz EP 32 S mit WEVO-Härter B 22 TS zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe	Wevo-Chemie GmbH Schönbergstr. 14 73760 Ostfildern-Kemnat
Z-9.1-707	2-K-PUR-Klebstoff Purbond CR 421 zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe	Purbond AG Industriegebiet Rank 6203 Sempach-Station / Schweiz
Z-9.1-711	1-K-PUR-Klebstoffe Purbond HB S049 bis Purbond HB S709 für die Verklebung von tragenden Keilzinkenverbindungen	Purbond AG Industriegebiet Rank 6203 Sempach-Station / Schweiz
Z-9.1-715	Kauramin Leim 681 flüssig mit Kauramin Härter 688 flüssig für die Herstellung von tragenden Keilzinkenverbindungen mit getrenntem Auftrag von Klebstoff und Härter	BASF Aktiengesellschaft 67056 Ludwigshafen Deutschland
Z-9.1-730	Klebstoff 1247 mit Härter 2526 für Keilzinkenverbindungen mit getrenntem Auftrag von Klebstoff und Härter	Casco Adhesives AB P.O. Box 11538 S - 10061 Stockholm / Schweden
Z-9.1-750	WEVO-Spezialharz EP 20/VP1 mit WEVO-Härter B 20/1 zur Instandsetzung von tragenden Holzbauteilen	Wevo-Chemie GmbH Schönbergstr. 14 73760 Ostfildern-Kemnat
Z-9.1-765	1-K-PUR-Klebstoffe Purbond HB S109 bis Purbond HB S709 für die Verklebung tragender Holzbauteile	Purbond AG Industriegebiet Rank 6203 Sempach-Station / Schweiz
Z-9.1-771	1K-PUR-Klebstoff Jowapur 680.20 für die Verklebung von Keilzinkenverbindungen von Nadelhölzern	Jowat AG Ernst-Hilker-Straße 10 - 14 32758 Detmold / Deutschland

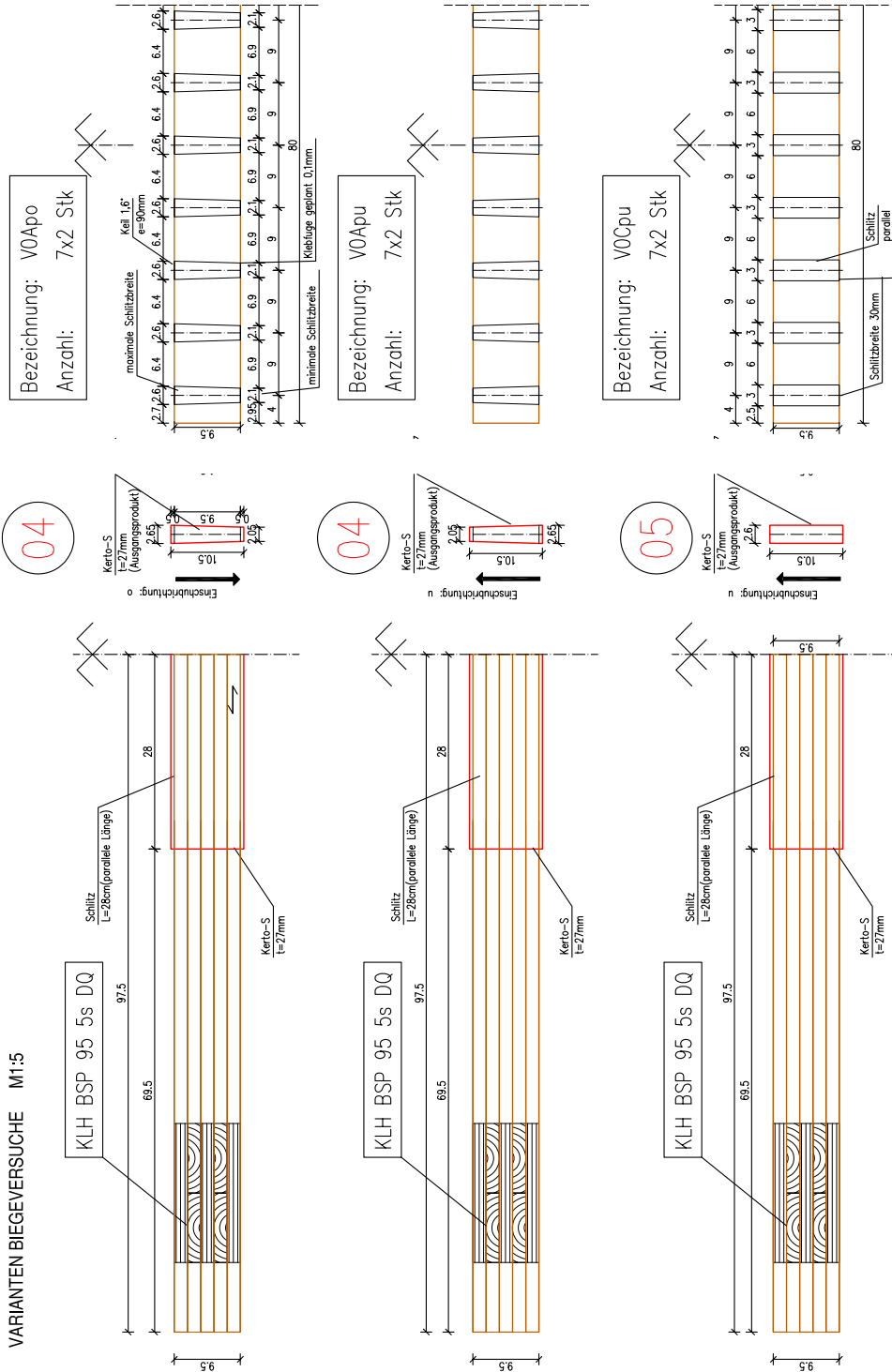
¹⁾ Genauere Informationen zum Zulassungsgegenstand und zum Anwendungsbereich sind dem jeweiligen Zulassungsbescheid zu entnehmen

B.2 Querschnittswerte BSP-Versuchsplatten

B.2.1 Biegeversuche

BSP Kennwerte												
KIH 95 5s DQ												
Breite: 1000 mm Schlubbkorektur: für Platte errechnet												
Platte symmetrisch: Platte Richtung 1 (längs)												
Orientierung	Platte	z _i	A _i z _i	A _i	e _i	E _i	E _i A _i	A _i e _i ²	I _y ² E _i	A _i e _i ³ E _i	G _i	G _i A _i
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm ²]	[mm]	[N/mm ²]	[N]	[mm ⁴]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N]
1	19	9,5	180500	1000	19000	380	228000000	2,74E+07	6,86E+09	3,29E+11	3,36E+11	1,31E+07
q	19	28,5	541500	1000	19000	19	7030000	6,86E+06	2,11E+08	2,54E+09	2,75E+09	9,50E+05
1	19	47,5	902500	1000	19000	0	228000000	0,00E+00	6,86E+09	0,00E+00	6,86E+09	1,31E+07
q	19	66,5	1263500	1000	19000	-19	7030000	6,86E+06	2,11E+08	2,54E+09	2,75E+09	9,50E+05
1	19	85,5	1624500	1000	19000	-38	228000000	2,74E+07	6,86E+09	3,29E+11	3,36E+11	1,31E+07
0	0	95	0	1000	0	-47,5	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0	0	95	0	1000	0	-47,5	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe												
			h _{0,1} = 95		4512500		E _{0,1} = 6,98E+08					
		0,095	z ₁ = 47,5 mm		95000							
E _{0,mean} = 370,0 N/mm ² G _{0,mean} = 50,0 N/mm ²												
1200000 KN/m ² 690000 KN/m ²												
370000 KN/m ² 50000 KN/m ²												
K _{0,1} = 6,85E+11 Nmm ² Schubkorektur 1/K = 0,183 S _{0,1} = 7,56E+06 N												
S _{surv,0} = 4,12E+07 N Schubkorektur 1/K = 0,154 S _{0,2} = 6,36E+06 N												
5,451												
Platte Richtung 2 (quer)												
Orientierung	Platte	z _i	A _i z _i	A _i	e _i	E _i	E _i A _i	A _i e _i ²	I _y ² E _i	A _i e _i ³ E _i	G _i	G _i A _i
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm ²]	[mm]	[N/mm ²]	[N]	[mm ⁴]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N]
q	0	9,5	180500	1000	19000	19	228000000	6,86E+06	6,86E+09	8,23E+10	8,92E+10	1,31E+07
1	19	28,5	541500	1000	19000	0	7030000	0,00E+00	2,11E+08	0,00E+00	2,11E+08	9,50E+05
q	19	47,5	902500	1000	19000	-19	228000000	6,86E+06	6,86E+09	8,23E+10	8,92E+10	1,31E+07
0	0	57	0	1000	0	-28,5	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0	0	57	0	1000	0	-28,5	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe												
			h _{0,2} = 57		1624500		E _{0,2} = 4,63E+08					
		0,057	z ₁ = 28,5 mm		57000							
K _{0,2} = 1,79E+11 Nmm ² Schubkorektur 1/K = 0,154 S _{0,2} = 6,36E+06 N												
S _{surv,2} = 2,72E+07 N Schubkorektur 1/K = 0,154 S _{0,2} = 6,36E+06 N												
6,484												

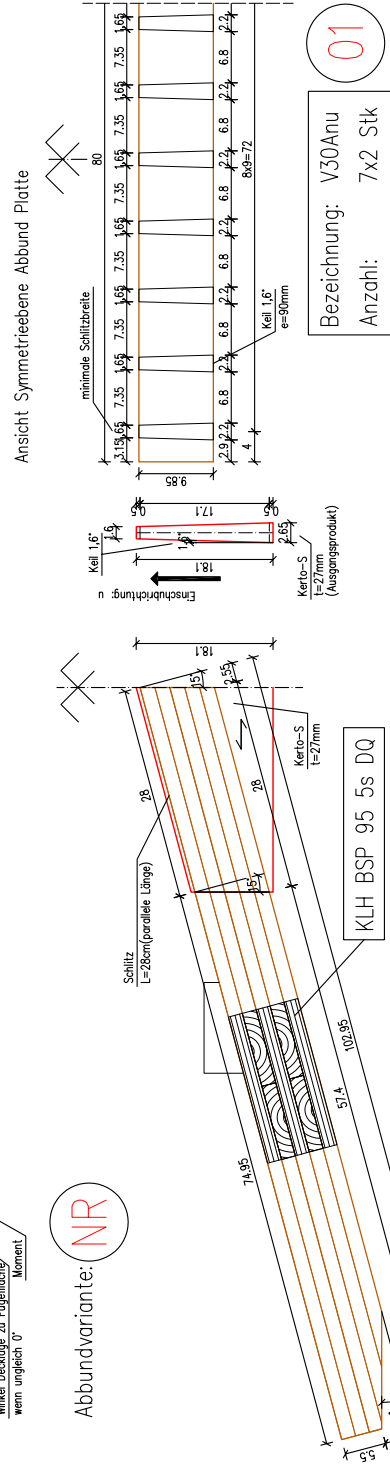
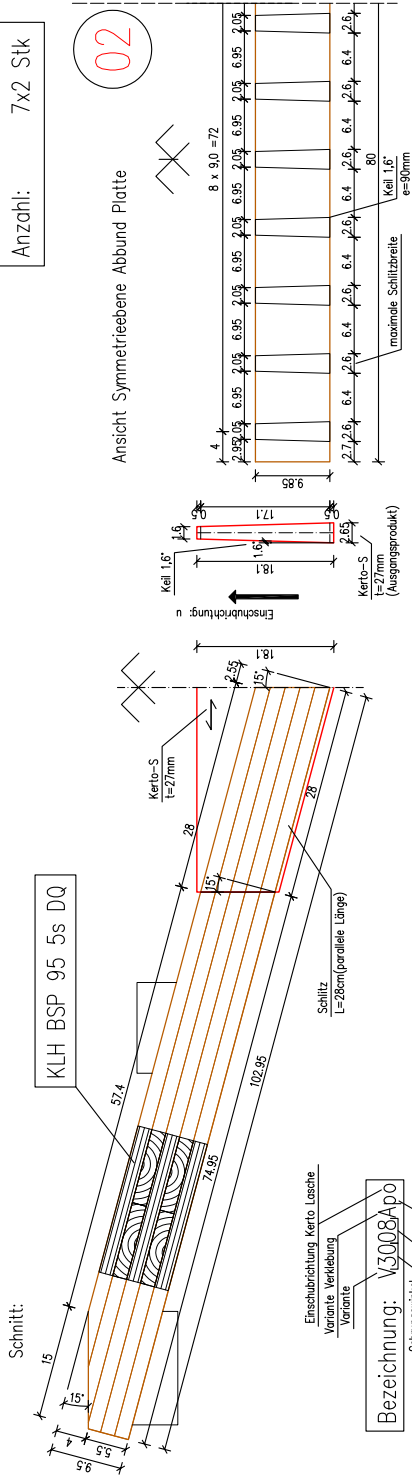
B.3 Abbundpläne Biegeversuche



Vorabzug

11.08.14 Seite 01/03

VARIANTEN BIEGEVERSUCHE M1:5



Abbandvariante: NR

Bezeichnung: V308Apo
Gehungswinkel
Winkel Deckloge zu Fugelflache
wenn ungleich 0°
Moment

Vorabzug

11.08.14

Seite 03/03

B.4 Dokumentation Verkleben Biegeversuche

Verklebung Biegeprüfkörper	20.09.2011		
Variante:	V0Cpu	7Stk	
Verarbeiter:	Christoph Pfaller; Heimo Schimek; Emanuel Ruffo Calderon Dominguez		
Probekörper:	BSP:	LxBxH	1950x800x95
	Kerto:	LxBxH	560x105x26
	Schlitz:	LxBxH	560x95x30
Kleber:	CR421:	Dichte 1,1	550g= 500,00 ml
Kleberauftrag:	abgedichtet und vergossen; mit Applikationspistole+Statikmischer; Fa. Purbond		
Kleberverbrauch:	Volumen /Schlitz		
	Soll	0,22 dm³	Einfüllhöhe 0,63 cm Fugenstärke 2mm
	Ist	0,42 dm³	Gesamtverbrauch(7 x9 Schlitze): 52,66 Tuben zu 0,5 Liter
Einflussfaktoren:			
Holzfeuchte	Kerto:	ca 14-15%	
	BSP:	ca 12%	
Raumklima:	Temperatur:	21°	(Werte in der Werkstatt)
	Luftfeuchte:	40-50%	
Oberfläche :			
	BSP: Variante V0Cpu	gefräst in von Fa. Freissling, Sebersdorf in der Woche 12.-16.09 2011 Lieferung an TU Graz am 15.09 bzw 19.09.2011 Lagerung in der Werkstatt	
	Kerto: Lasche:	Am 19.09.2011 geschnitten und gehobelt Lagerung in Plastik foliert auf Palette bei Raumklima	
Verarbeitung:	Herstellen der Kertolaschen (schneiden und hobeln) Reinigung der BSP Platten mit Druckluft Anbringen der Abdichtung(Plastikfolie und mechanische Sicherung) Positionieren der Fügeiteile Messung der Holzfeuchte und Raumklima (Gann Hydromette M 4050)		
Klebstoffauftrag:	CR421 wurde in den abgedichteten Schlitz (Wände wurden mitbenetzt), ca. 19 mm hoch eingegossen(Applikationspistole+Statikmischer; Fa. Purbond). Danach wurde die Lasche mit Führungen zentrisch eingeschoben wodurch der Kleber an den Seitenwänden hochgedrückt wurde Lasche bis zum geplanten Überstand eingebracht (10mm) eventuell nachverfüllen von oben falls notwendig(selten)		
Aushärtezeit:	Lagerung bis 27.9. in der Werkstatt (= 7 Tage)		
Zeitaufwand:	nur Verkleben:	ca. 1 h für 9 Schlitze(= 1 Prüfkörper) (1 Person)	
	Fertigung Laschen:	ca. 1h für 7*9 Stück (1 Person)	

Verklebung Biegeprüfkörper

28.09.2011

Variante: **VOApo**

7Stk

Verarbeiter: Christoph Pfaller; Heimo Schimek; Emanuel Ruffo Calderon Dominguez

Probekörper:

BSP:	LxBxH	1950x800x95
Kerto:	LxBxH	560x105x(26,3 auf 20,4mm; Winkel 1,6°)
Schlitz:	LxBxH	560x95x(26 auf 21 mm; Winkel 1,6°)

Kleber: HBS 709 Dichte 1,16 800g/Flasche= 689,66 ml

Klebeauftrag: Mit Zahnpachtel; Lasche und Schlitz bestrichen

Kleberverbrauch:

	Volumen /Schlitz		
Soll	0,0213 dm³	Planmäßige Fugenstärke 0,2mm	
Ist	0,1203 dm³	Gesamtverbrauch(7 x9 Schlitze):	11 Flaschen zu 800g
Verbrauch:	1,13 Liter/m²	1,245 kg/m²	

Einflussfaktoren:

Holzfeuchte

Kerto:	14,37 %
BSP:	11,55 %

Raumklima:

Temperatur:	22,8 °
Luftfeuchte:	57,90%

Oberfläche :

BSP: Variante VOApo	gefräst in von Fa. Freissling, Sebersdorf in der Woche 12.-16.09 2011 Lieferung an TU Graz am 15.09 bzw 19.09.2011 Lagerung in der Werkstatt danach in der Klimakammer(20°/65%LF) von 21.9-28.9
Kerto: Lasche:	Am 28.09.2011 geschnitten und gehobelt Lagerung in Plastik foliert auf Palette bei Raumklima

Verarbeitung:

Herstellen der Kertolaschen (schneiden und hobeln)
Entnahme aus der Klimakammer und Reinigung der BSP Platten mit Druckluft.
Positionieren der Fügeiteile
Messung der Holzfeuchte und Raumklima (Gann Hydromette M 4050)
Besprühen der Kertolaschen mit Wasser(sehr wenig)

Klebstoffauftrag: Kleber wurde auf der Lasche und im Schlitz mit einer Zahnpachtel aufgetragen
ca. 250g/m² jeweils
Danach wurde die Lasche zentrisch eingeschoben,
wodurch die Kleberauppen an den Seitenwänden verteilt wurden.
Die Lasche wurde, zuerst durch händisches Drücken, dann mit Hilfe
eines Gummihammers bis in die Sollage eingetrieben.

Aushärtezeit: Lagerung bis 4.10. in der Werkstatt (= 6 Tage)

Zeitaufwand: nur Verkleben: ca. 1 h für 9 Schlitze(= 1 Prüfkörper) (1 Person)
ca. 20min für 9 Schlitze bei 2 Personen

Fertigung Laschen: ca. 1h für 7*9 Stück(mit fertiger Hobelschablone; 1 Person)

Verklebung Biegeprüfkörper

27.09.2011

Variante: **VOApu**

7Stk

Verarbeiter: Christoph Pfaller; Heimo Schimek; Emanuel Ruffo Calderon Dominguez

Probekörper: BSP: LxBxH 1950x800x95
Kerto: LxBxH 560x105x(26,3 auf 20,4mm; Winkel 1,6°)
Schlitz: LxBxH 560x95x(26 auf 21 mm; Winkel 1,6°)

Kleber: HBS 709 Dichte 1,16 800g/Flasche= 689,66 ml
Kleberauftrag: Mit Zahnpachtel; Lasche und Schlitz bestrichen

Kleberverbrauch:

	Volumen /Schlitz		
Soll	0,0213 dm³	Planmäßige Fugenstärke 0,2mm	
Ist	0,1148 dm³	Gesamtverbrauch(7 x9 Schlitze):	10,5 Flaschen zu 800g
Verbrauch:	1,08 Liter/m²	1,188 kg/m²	

Einflussfaktoren:

Holzfeuchte Kerto: 13,60 %
BSP: 12,37 %

Raumklima: Temperatur: 24,3 °
Luftfeuchte: 53,20%

Oberfläche :

BSP: Variante VOApu gefräst in von Fa. Freissling, Sebersdorf
in der Woche 12.-16.09 2011
Lieferung an TU Graz am 15.09 bzw 19.09.2011
Lagerung in der Werkstatt danach in der
Klimakammer(20° / 65%LF) von 21.9-27.9
Kerto: Lasche: Am 27.09.2011 geschnitten und gehobelt
Lagerung in Plastik foliert auf Palette bei Raumklima

Verarbeitung:

Herstellen der Kertolaschen (schneiden und hobeln)
Entnahme aus der Klimakammer und Reinigung der BSP Platten mit Druckluft.
Positionieren der Fügeiteile
Messung der Holzfeuchte und Raumklima (Gann Hydromette M 4050)
Besprühen der Kertolaschen mit Wasser(sehr wenig)

Klebstoffauftrag: Kleber wurde auf der Lasche und im Schlitz mit einer Zahnpachtel aufgetragen
ca. 250g/m² jeweils
Danach wurde die Lasche zentrisch eingeschoben,
wodurch die Kleberauppen an den Seitenwänden verteilt wurden.
Die Lasche wurde, zuerst durch händisches Drücken, dann mit Hilfe
eines Gummihammers bis in die Sollage eingetrieben.

Aushärtezeit: Lagerung bis 28.9. in der Werkstatt (= 1 Tag)

Zeitaufwand: nur Verkleben: ca. 1 h für 9 Schlitze(= 1 Prüfkörper) (1 Person)
ca. 20min für 9 Schlitze bei 2 Personen

Fertigung Laschen: ca. 1h für 7*9 Stück(mit fertiger Hobelschablone; 1 Person)

Verklebung Biegeprüfkörper

04.10.2011

Variante: **V008Apu**

7Stk

Verarbeiter: Christoph Pfaller; Heimo Schimek

Probekörper:

BSP:	LxBxH	1950x800x95
Kerto:	LxBxH	560x105x(26,3 auf 20,4mm; Winkel 1,6°)
Schlitz:	LxBxH	560x95x(26 auf 21 mm; Winkel 1,6°)

Kleber: HBS 609 Dichte 1,16 800g/Flasche= 689,66 ml

Kleberauftrag: Mit Zahnpachtel; Lasche und Schlitz bestrichen

Kleberverbrauch:

	Volumen /Schlitz		
Soll	0,0223 dm³	Planmäßige Fugenstärke 0,2mm	
Ist	0,1094 dm³	Gesamtverbrauch(7 x9 Schlitz):	10 Flaschen zu 800g
Verbrauch:	0,98 Liter/m²	1,080 kg/m²	

Einflussfaktoren:

Holzfeuchte

Kerto:	16,40 %
BSP:	12,30 %

Raumklima:

Temperatur:	23,2 °
Luftfeuchte:	54,60%

Oberfläche :

BSP: Variante V008Apu gefräst in von Fa. Freissling, Sebersdorf in der Woche 12.-16.09 2011
 Lieferung an TU Graz am 15.09 bzw 19.09.2011
 Lagerung in der Werkstatt danach in der Klimakammer(20° / 65%LF) von 28.9-4.10
 Kerto: Lasche: Am 4.10.2011 geschnitten und gehobelt
 Lagerung in Plastik foliert auf Palette bei Raumklima

Verarbeitung:

Herstellen der Kertolaschen (schneiden und hobeln)
 Entnahme aus der Klimakammer und Reinigung der BSP Platten mit Druckluft.
 Positionieren der Fügeiteile
 Messung der Holzfeuchte und Raumklima (Gann Hydromette M 4050)
 Besprühen der Kertolaschen mit Wasser(sehr wenig)

Klebstoffauftrag: Kleber wurde auf der Lasche und im Schlitz mit einer Zahnpachtel aufgetragen
 ca. 250g/m² jeweils

Danach wurde die Lasche zentrisch eingeschoben,
 wodurch die Kleberauppen an den Seitenwänden verteilt wurden.
 Die Lasche wurde, zuerst durch händisches Drücken, dann mit Hilfe eines Gummihammers bis in die Sollage eingetrieben.

Aushärtezeit: Lagerung bis 6.10. in der Werkstatt (= 2 Tage)

Zeitaufwand: nur Verkleben: ca. 1 h für 9 Schlitz(= 1 Prüfkörper) (1 Person)

ca. 20min für 9 Schlitz bei 2 Personen

Fertigung Laschen: ca. 1h für 7*9 Stück(mit fertiger Hobelschablone; 1 Person)

Verklebung Biegeprüfkörper **06.10.2011 bis 12. 10. 2011**

Variante: **V30Apu** **75Stk**

Verarbeiter: Christoph Pfaller; Heimo Schimek

Probekörper: BSP: LxBxH ca. 1961x800x95 Gehrung auf 30°
 Kerto: LxBxH 530x181x(26,65 auf 16,3mm; Winkel 1,6°)
 Schlitz: LxBxH 560x95x(26 auf 20,5 mm; Winkel 1,6°)

Kleber: HBS 609 Dichte 1,16 800g/Flasche= 689,66 ml
Kleberauftrag: Mit Zahnpachtel; Lasche und Schlitz bestrichen

Kleberverbrauch:
 Volumen /Schlitz
Soll 0,0223 dm³ Planmäßige Fugenstärke 0,2mm
Ist 0,1203 dm³ Gesamtverbrauch(7 x9 Schlitz): 11 Flaschen zu 800g
Verbrauch: 1,08 Liter/m² 1,188 kg/m²

Einflussfaktoren:

Holzfeuchte Kerto: 13,93 % Mittelwert
 BSP: 12,45 % Mittelwert

Raumklima: Temperatur: 22,1 % Mittelwert
 Luftfeuchte: 42,98 % (Zentralheizung!) Mittelwert

Oberfläche :
 BSP: Variante V30Apu gefräst in von Fa. Freissling, Sebersdorf
 in der Woche 12.-16.09 2011
 Lieferung an TU Graz am 15.09 bzw 19.09.2011
 Lagerung in der Werkstatt danach in der
 Klimakammer(20° / 65%LF) von 28.9-bis lt. Liste
 Kerto: Lasche: Am Tag der Verklebung geschnitten und gehobelt
 Lagerung in Plastik foliert auf Palette bei Raumklima

Verarbeitung:
 Herstellen der Kertolaschen (schneiden-hobeln-schneiden)
 Entnahme aus der Klimakammer und Reinigung der BSP Platten mit Druckluft.
 Positionieren der Füge-teile auf Rüstung
 Messung der Holzfeuchte und Raumklima (Gann Hydromette M 4050)
 Besprühen der Kertolaschen mit Wasser(sehr wenig)

Klebstoffauftrag: Kleber wurde auf der Lasche und im Schlitz mit einer Zahnpachtel aufgetragen
 ca. 250g/m² jeweils
 Danach wurde die Lasche zentrisch eingeschoben,
 wodurch die Kleberauren an den Seitenwänden verteilt wurden.
 Die Lasche wurde, zuerst durch händisches Drücken, dann mit Hilfe
 eines Gummihammers bis in die Sollage eingetrieben.

Aushärtezeit: Lagerung lt. Liste in der Werkstatt
Zeitaufwand: nur Verkleben: ca. 1 h für 9 Schlitz(= 1 Prüfkörper) (1 Person)
 ca. 20min für 9 Schlitz bei 2 Personen
 Fertigung Laschen: ca. 1h für 9 Stück(mit fertiger Hobelschablone; 1 Person)

Zeitlicher Verlauf:

Verklebung	Probekörper Bez.	Klimakammer	Aushärtung	Anmerkung
06.10.2011	01 und 02	28.9-6.10	3 Tage	
10.10.2011	03 und 04	28.9-10.10	1 Tag	
11.10.2011	05 und 06	28.9-11.10	1 Tag	bei PK 05 wurden nur die Laschen beleimt
12.10.2011	07	28.9-12.10	5 Tage	

Aushärtung: PK wurde in dieser Zeit nicht bewegt, nach dieser Zeit von der Rüstung genommen und unbelastet gelagert.

V30Apu 111022 Biegeprüfung Verkleben Doku

Verklebung Biegeprüfkörper **18.10.2011 bis 21. 10. 2011**

Variante: V30Anu **7Stk**

Verarbeiter: Christoph Pfaller; Heimo Schimek

Probekörper: BSP: LxBxH ca. 1961x800x95 Gehrung auf 30°
 Kerto: LxBxH 530x181x(26,65 auf 16,3mm; Winkel 1,6°)
 Schlitz: LxBxH 560x95x(22 auf 16,5 mm; Winkel 1,6°)

Kleber: HBS 609 Dichte 1,16 800g/Flasche= 689,66 ml
Kleberauftrag: Mit Zahnpachtel; Lasche und Schlitz bestrichen

Kleberverbrauch:
 Volumen /Schlitz
Soll **0,0223 dm³** Planmäßige Fugenstärke 0,2mm
Ist **0,1203 dm³** Gesamtverbrauch(7 x9 Schlitz): 11 Flaschen zu 800g
Verbrauch: **1,08 Liter/m²** **1,188 kg/m²**

Einflussfaktoren:

Holzfeuchte Kerto: 13,88 % Mittelwert
 BSP: 12,13 % Mittelwert

Raumklima: Temperatur: 22,3 % Mittelwert
 Luftfeuchte: 43,18 % (Zentralheizung!) Mittelwert

Oberfläche :
 BSP: Variante V30Anu gefräst in von Fa. Freissling, Sebersdorf
 in der Woche 12.-16.09 2011
 Lieferung an TU Graz am 15.09 bzw 19.09.2011
 Lagerung in der Werkstatt danach in der
 Klimakammer(20° / 65%LF) von 28.9-bis lt. Liste
 Kerto: Lasche: Am Tag der Verklebung geschnitten und gehobelt
 Lagerung in Plastik foliert auf Palette bei Raumklima

Verarbeitung:
 Herstellen der Kertolaschen (schneiden-hobeln-schneiden)
 Entnahme aus der Klimakammer und Reinigung der BSP Platten mit Druckluft.
 Positionieren der Fügeteile auf Rüstung und verschrauben
 Messung der Holzfeuchte und Raumklima (Gann Hydromette M 4050)
 Besprühen der Kertolaschen mit Wasser(sehr wenig)

Klebstoffauftrag: Kleber wurde auf der Lasche und im Schlitz mit einer Zahnpachtel aufgetragen
 ca. 250g/m² jeweils
 Danach wurde die Lasche zentrisch eingeschoben,
 wodurch die Kleberauppen an den Seitenwänden verteilt wurden.
 Die Lasche wurde, zuerst durch händisches Drücken, dann mit Hilfe
 eines Gummihammers bis in die Sollage eingetrieben.

Aushärtezeit: Lagerung lt. Liste in der Werkstatt
Zeitaufwand: nur Verkleben: ca. 1 h für 9 Schlitz(= 1 Prüfkörper) (1 Person)
 ca. 20min für 9 Schlitz bei 2 Personen
 Fertigung Laschen: ca. 1h für 9 Stück(mit fertiger Hobelschablone; 1 Person)

Zeitlicher Verlauf:

Verklebung	Probekörper Bez.	Klimakammer	Aushärtung	Anmerkung
18.10.2011	01 und 02	28.9-18.10	1 Tag	
19.10.2011	03 und 04	28.9-19.10	1 Tag	
20.10.2011	05 und 06	28.9-20.10	1 Tag	
21.10.2011	07	28.9-21.10	4 Tage	

Aushärtung: PK wurde in dieser Zeit nicht bewegt, nach dieser Zeit von der Rüstung genommen und unbelastet gelagert.

B.5 Dokumentation Bruchursache Biegversuche

Bez.	Bezeichnung Bilder	Platte Nr	Lasche	Kraft	Versagen 01	Versagen2	Anmerkung	Prüfdatum
DA	Zwick Rohdaten							
V00Apu-085 Rnd	Vapo	01	01	12,50 kN	Klebefuge Querzug	Kerto Querzug		03.11.2011
	Vapo	07	01	13,68 kN	BSP (Buchs)	Kerto Schub		03.11.2011
	Vapo	09	09	15,08 kN	Kerto Biegung	Klebefuge Zug		03.11.2011
	Vapo	06	01	15,30 kN	BSP Zugzone	Klebefuge		03.11.2011
	Vapo	06	09	10,85 kN	Klebefuge Zug	Kerto Querzug		03.11.2011
	Vapo	01	09	12,08 kN	BSP Rollschub	Klebefuge Zug		03.11.2011
	Vapo	02	01	13,91 kN	Kerto Biegung	--		03.11.2011
	Vapo	02	09	12,46 kN	Kerto Biegung	--		03.11.2011
	Vapo	01	07	11,15 kN	BSP Brutto QS	--		04.11.2011
	Vapo	01	03	11,08 kN	BSP Brutto QS	--		04.11.2011
V00Apu-085	Vapo	06	05	14,24 kN	Kerto Schub	--		03.11.2011
	Vapo	07	05	14,87 kN	Kerto Schub	BSP		03.11.2011
	Vapo	01	02	9,91 kN	BSP Brutto QS	--		04.11.2011
	Vapo	02	08	12,27 kN	GZ-BSP+Kerto Mitte	Klebensversagen		04.11.2011
	Vapo	02	07	12,25 kN	KA-LSF-BSP	--		04.11.2011
	Vapo	01	08	14,26 kN	LSF-Buchs-BSP	--		04.11.2011
	Vapo	02	03	11,80 kN	Mitte BSP-GZ Kerto	Klebensversagen		04.11.2011
	Vapo	02	02	13,17 kN	Mitte QZ Kerto	Klebensversagen		04.11.2011
	Vapo	07	02-04	39,50 kN	LSF-AA-BSP	--		04.11.2011
	Vapo	06	02-04	35,46 kN	LSF-Buchs-BSP	QZ Kerto		04.11.2011
V00Apu-265	Vapo	06	06-08	40,57 kN	Mitte Kertobruch Biegung	--		04.11.2011
	Vapo	02	04-06	37,84 kN	Mitte, QZ Kerto	--		04.11.2011
	Vapo	01	04-06	42,04 kN	Mitte QZ + BB Kerto	--		04.11.2011
	Vapo	07	06-08	39,52 kN	QZ-Kerto KA-BSP	--		04.11.2011
	Vapo	04	01-09	125,30 kN	Mittig QZ + 2xBB Kerto	2xBB BSP	M positiv-Zugseite starker QS	07.11.2011
	Vapo	03	01-09	105,27 kN	3x QZ Kerto;	1xBB + 3xGZ BSP	M positiv-Zugseite starker QS	07.11.2011
	Vapo	05	01-09	120,95 kN	2x QZ Kerto; 2xBB Kerto	2xBB BSP	M positiv-Zugseite starker QS	07.11.2011
	Vapo	04	01-09	111,75 kN	4xQZ Kerto; 2xBB Kerto	2xBB BSP	M positiv-Zugseite starker QS	07.11.2011
	Vapo	05	01-09	110,80 kN	7x QZ Kerto; 2x BB Kerto		M positiv-Zugseite starker QS	07.11.2011
	Vapo	03	01-09	99,28 kN	3xBB Kerto; 2x BB BSP		M negativ-Zugseite schwacher QS	07.11.2011
V00Apo-800	Vapo	06	01-09	120,81 kN	2x BB Kerto; 3x BB BSP		M negativ-Zugseite schwacher QS	07.11.2011
	Vapo	01	01-09	101,60 kN	4x BB Kerto; 2xBB BSP		M negativ-Zugseite schwacher QS	07.11.2011
	Vapo	02	01-09	104,15 kN	6x BB Kerto; 1x BB BSP		M negativ-Zugseite schwacher QS	07.11.2011
	Vapo	07	01-09	112,49 kN	BB in BSP Netto QS	(Beginn Schlitz)	M negativ-Zugseite schwacher QS	07.11.2011
	V008Apu	01	01-09	96,82 kN	BB in BSP	(Netto-QS-Beginn Schlitz)	M negativ-Zugseite schwacher QS	07.11.2011

Bez.	Bezeichnung Bilder	Platte Nr	Lasche	Kraft	Versagen 01	Versagen2	Anmerkung	Prüfdatum
V08Apu-800	V008Apu	02	01-09	100,70 kN	3x QZ Kerto; 1x BB Kerto	3xBB BSP		07.11.2011
	V008Apu	05	01-09	102,92 kN	6x BB Kerto			07.11.2011
	V008Apu	03	01-09	108,18 kN	4xBB Kerto; 1x QZ Kerto			08.11.2011
	V008Apu	04	01-09	97,07 kN	5xBB Kerto; 1xQZ Kerto			08.11.2011
	V008Apu	06	01-09	96,29 kN	2xBB+ 1xQZ Kerto			08.11.2011
	V008Apu	07	01-09	102,52 kN	1xBB Kerto; 2xBB BSP			08.11.2011
	VCPu	01	-	118,19 kN	BB BSP; 1xQZ Kerto			08.11.2011
V00Cpu-800	VCPu	02	-	117,48 kN	BB BSP; 1xQZ Kerto			08.11.2011
	VCPu	03	-	128,49 kN	9xBB Kerto			08.11.2011
	VCPu	04	-	112,60 kN	4x BB BSP; 1x QZ Kerto			08.11.2011
	VCPu	05	-	125,86 kN	5xBB Kerto; 1x QZ Kerto			08.11.2011
	VCPu	06	-	119,25 kN	2x BB Kerto; 2x QZ Kerto	2x BB BSP		08.11.2011
	VCPu	07	-	120,36 kN	3xBB Kert 2x QZ Kerto	2xBB BSP		08.11.2011
	VR800	01	-	157,85 kN	BB Zuglamelle	(Rollschub)		09.11.2011
V00R800	VR800	02	-	110,43 kN	BB- Keilzinkengrundbruch(K)	(Rollschub)		09.11.2011
	VR800	03	-	150,05 kN	BB			09.11.2011
V00R265	VR800	04	-	181,28 kN	Rollschub			09.11.2011
	VR265	01	-	49,03 kN	BB-LSF			09.11.2011
V00R265	VR265	02	-	44,58 kN	BB-AA			09.11.2011
	VR265	03	-	59,22 kN	Rollschub			09.11.2011
V00R085	VR085	01	-	19,55 kN	BB; KA; LSF			09.11.2011
	VR085	02	-	17,77 kN	BB; LSF Ast			09.11.2011
	VR085	03	-	16,53 kN	BB; LSF Ast			09.11.2011
	VR085	04	-	20,64 kN	Rollschub			09.11.2011
	VR085	05	-	11,14 kN	BB; KA			09.11.2011
	VR085	06	-	16,36 kN	BB; Ast			09.11.2011
	VR085	07	-	11,42 kN	BB; Ast			09.11.2011
	VR085	08	-	9,63 kN	BB; KZGB			09.11.2011
	VR085	09	-	15,68 kN	BB; LSF Ast			09.11.2011
V300Apu-800	V30-Anu	01	-	127,74 kN	4xQZ Kerto; 2xBB BSP			10.11.2011
	V30-Anu	02	-	126,58 kN	5x QZ Kerto; 2x BB BSP			11.11.2011
	V30-Anu	03	-	116,57 kN	7x QZ Kerto			11.11.2011
	V30-Anu	04	-	126,61 kN	7x QZ Kerto			11.11.2011
	V30-Anu	05	-	129,03 kN	5x QZ Kerto			11.11.2011
	V30-Anu	06	-	119,47 kN	7x QZ Kerto			11.11.2011
V30-Anu	07-01	-	103,68 kN	kein Bruch- Wege gemessen		Prüfkörper von der Auflagerrolle get	11.11.2011	

Bez.	Bezeichnung Bilder	Platte Nr	Lasche	Kraft	Versagen 01	Versagen2	Anmerkung	Prüfdatum
V300Anu-800	V30-Anu	07-02	-	135,59 kN	3x QZ Kerto; 3x BB BSP		ohne Wegmessung	11.11.2011
	V30-Apu	01	-	124,04 kN	2x Netto QS BSP	Klebefuge Kerto		10.11.2011
	V30-Apu	02	-	128,61 kN	2x Netto QS BSP	2x BB Kerto		10.11.2011
	V30-Apu	03	-	139,93 kN	5x Netto QS BSP; 1x Abscheren in Klebefuge			10.11.2011
	V30-Apu	04	-	132,51 kN	3x Netto QS BSP			10.11.2011
	V30-Apu	05	-	130,46 kN	3x BB Kerto		nur Laschen belimit!	10.11.2011
	V30-Apu	06	-	128,64 kN	7x BB Kerto; 2xBB BSP			10.11.2011
V30-Apu	07	-	114,37 kN	2x Netto QS; 2x Klebefuge Kerto			10.11.2011	
	Abkürzungen:							
	KA	Kernast						
	QZ	Querzug						
	LSF	lokale Schrägfasern						
	AA	Astansammlung						
	BB	Biegebruch						

B.6 Lösung des Differentialgleichungssystems

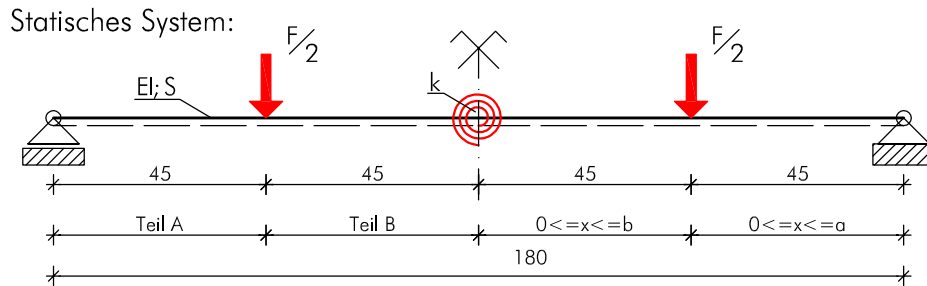


Abb. B.2 Verbessertes Statisches System Biegeprüfung

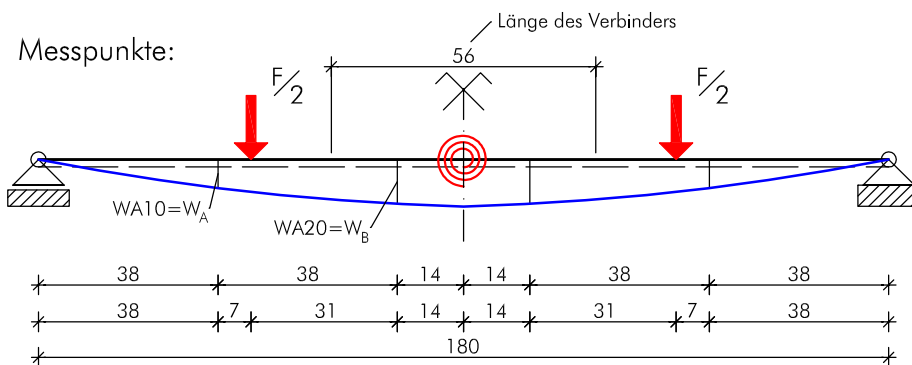


Abb. B.3 Geometrie und Messpunkte für die Biegeprüfungen

Die Trägerverformung für Teil A ($0 < x < a$; Abb. B.2) errechnet sich zu:

$$w_A(x) = C_1 + C_2 x_{(A)} + C_3 \frac{x_{(A)}^2}{2} + C_4 \frac{x_{(A)}^3}{6} \quad [B.1]$$

mit:

$$\begin{aligned} C_1 &= 0 \\ C_2 &= -\frac{-2EI \cdot F \cdot k - a \cdot EI \cdot F \cdot S - a^2 \cdot F \cdot k \cdot S - 2ab \cdot F \cdot k \cdot S}{4 \cdot EI \cdot k \cdot S} \\ C_3 &= 0 \\ C_4 &= -\frac{F}{2EI} \end{aligned} \quad [B.2]$$

Die Trägerverformung für Teil B ($0 < x < b$; Abb. B.2) errechnet sich zu:

$$w_B(x) = D_1 + D_2 x_{(B)} + D_3 \frac{x_{(B)}^2}{2} + D_4 \frac{x_{(B)}^3}{6} \quad [\text{B.3}]$$

mit:

$$\begin{aligned} D_1 &= -\frac{-6a \cdot EI \cdot F \cdot k - 3a^2 \cdot EI \cdot F \cdot S - 2a^3 \cdot F \cdot k \cdot S - 6a^2 b \cdot F \cdot k \cdot S}{12 \cdot EI \cdot k \cdot S} \\ D_2 &= \frac{a \cdot F \cdot (EI + 2b \cdot k)}{4EI \cdot k} \\ D_3 &= -\frac{a \cdot F}{2EI} \\ D_4 &= 0 \end{aligned} \quad [\text{B.4}]$$

B.7 Auswertung Verbindungsplatten Biegeversuche

Bezeichnung DA	Serie	Verbinder	Holzfeuchte [%]	Fmax Zwick [kN]	Δfest [kN]	Verformung Ast 1		Steffigkeit Ast 1	
						Δv1;WA10= [mm]	Δv1;WA20= [mm]	EIcalc;1 [kNm ²]	k1 [kNm]
V0-0-A-p-u-085_R-01	V0-0-A-p-u-085_R	01	9,61	12,504	3,30	4,118	6,402	932,49	1783,91
V0-0-A-p-u-085_R-02	V0-0-A-p-u-085_R	09	10,18	9,316	3,30	4,216	6,521	868,22	1919,13
V0-0-A-p-u-085_R-03	V0-0-A-p-u-085_R	01	10,26	13,901	3,30	4,407	6,775	779,17	2116,89
V0-0-A-p-u-085_R-04	V0-0-A-p-u-085_R	09	9,92	12,463	3,30	4,050	6,326	989,74	1675,44
V0-0-A-p-u-085_R-05	V0-0-A-p-u-085_R	01	9,67	15,304	3,30	3,991	6,180	963,05	1900,66
V0-0-A-p-u-085_R-06	V0-0-A-p-u-085_R	09	9,78	10,843	3,30	4,224	6,468	818,27	2282,05
V0-0-A-p-u-085_R-07	V0-0-A-p-u-085_R	01	9,81	13,684	3,30	4,419	7,4688	2435,78	2435,78
V0-0-A-p-u-085_R-08	V0-0-A-p-u-085_R	09	9,74	13,828	3,30	3,754	5,754	1010,58	2250,98
V0-0-A-p-u-085-01	V0-0-A-p-u-085	02	9,77	9,898	3,30	4,017	6,107	856,55	2621,79
V0-0-A-p-u-085-02	V0-0-A-p-u-085	03	9,80	11,082	3,30	4,205	6,364	775,40	2917,87
V0-0-A-p-u-085-03	V0-0-A-p-u-085	07	9,98	11,142	3,30	4,070	6,140	803,93	3137,20
V0-0-A-p-u-085-04	V0-0-A-p-u-085	08	10,05	14,248	3,30	3,964	6,141	977,68	1889,43
V0-0-A-p-u-085-05	V0-0-A-p-u-085	02	10,24	13,170	3,30	4,002	6,157	921,76	2105,80
V0-0-A-p-u-085-06	V0-0-A-p-u-085	03	10,34	11,803	3,30	3,962	6,027	880,00	2584,42
V0-0-A-p-u-085-07	V0-0-A-p-u-085	07	10,06	12,253	3,30	4,002	5,995	797,69	3765,56
V0-0-A-p-u-085-08	V0-0-A-p-u-085	08	9,76	12,268	3,30	4,124	6,294	835,52	2440,44
V0-0-A-p-u-085-09	V0-0-A-p-u-085	05	9,80	14,275	3,30	3,379	5,105	1129,34	2875,35
V0-0-A-p-u-085-10	V0-0-A-p-u-085	05	10,01	14,906	3,30	3,681	5,667	1076,57	2101,58
V0-0-A-p-u-265-01	V0-0-A-p-u-265	04-06	10,28	41,961	12,00	4,426	6,722	940,06	2656,35
V0-0-A-p-u-265-02	V0-0-A-p-u-265	04-06	10,54	37,800	12,00	4,230	6,462	1055,32	2382,08
V0-0-A-p-u-265-03	V0-0-A-p-u-265	02-04	10,26	35,417	12,00	4,141	6,255	1027,59	2924,26
V0-0-A-p-u-265-04	V0-0-A-p-u-265	06-08	10,39	40,529	12,00	4,512	6,873	923,74	2515,65
V0-0-A-p-u-265-05	V0-0-A-p-u-265	02-04	9,98	39,443	12,00	0,000	0,000	0,00	0,00
V0-0-A-p-u-265-06	V0-0-A-p-u-265	06-08	10,29	39,472	12,00	4,492	6,904	981,47	2145,29
V0-0-A-p-u-800-01	V0-0-A-p-u-800	01-09	10,39	125,086	33,75	3,967	6,147	1141,62	1911,36
V0-0-A-p-u-800-02	V0-0-A-p-u-800	01-09	10,36	105,217	33,75	4,184	6,531	1082,65	1711,64
V0-0-A-p-u-800-03	V0-0-A-p-u-800	01-09	10,55	120,824	33,75	4,054	6,290	1104,78	1869,29
V0-0-A-p-u-800-04	V0-0-A-p-u-800	01-09	10,78	111,626	33,75	4,435	6,899	950,76	1772,39
V0-0-A-p-u-800-05	V0-0-A-p-u-800	01-09	10,52	110,699	33,75	4,506	6,989	908,86	1841,56
V0-0-C-p-u-800-01	V0-0-C-p-u-800	-	10,50	117,926	33,75	3,682	5,667	1264,50	2123,09
V0-0-C-p-u-800-02	V0-0-C-p-u-800	-	10,69	117,357	33,75	3,947	5,957	981,86	2987,61
V0-0-C-p-u-800-03	V0-0-C-p-u-800	-	10,42	128,362	33,75	4,005	6,081	988,81	2659,85
V0-0-C-p-u-800-04	V0-0-C-p-u-800	-	10,69	112,472	33,75	3,850	5,819	1035,07	2886,89
V0-0-C-p-u-800-05	V0-0-C-p-u-800	-	10,85	125,720	33,75	3,855	5,823	1029,54	2920,39
V0-0-C-p-u-800-06	V0-0-C-p-u-800	-	10,69	119,153	33,75	3,875	5,957	1134,47	2150,42
V0-0-C-p-u-800-07	V0-0-C-p-u-800	-	10,49	120,198	33,75	3,848	5,809	1030,33	2946,97

Bezeichnung DA	Verformung Ast 1		Steifigkeit Ast 1		Bruchmoment		Geometrie Platte			
	$\Delta v_2; WA_{10} =$ [mm]	$\Delta v_2; WA_{20} =$ [mm]	EI _{calc;2} [kNm ²]	k ₂ [kNm]	Mbruch [kN]	Hplatte [mm]	Bplatte [mm]	Stärke Rand- lamelle [mm]	Anzahl Schlitze	
V0-0-A-p-u-085_R-01	4,030	6,229	935,98	1951,20	2,813	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085_R-02	4,078	6,260	879,92	2187,70	2,096	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085_R-03	4,297	6,581	795,47	2277,97	3,128	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085_R-04	3,966	6,168	1001,04	1785,45	2,804	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085_R-05	3,884	5,988	984,75	2040,18	3,443	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085_R-06	4,123	6,291	836,41	2437,97	2,440	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085_R-07	4,346	6,615	756,18	2583,52	3,079	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085_R-08	3,653	5,573	1033,90	2432,38	3,111	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085-01	3,925	5,933	863,50	2958,42	2,227	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085-02	4,103	6,187	792,39	3168,18	2,494	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085-03	3,990	5,996	815,96	3415,08	2,507	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085-04	3,894	6,029	1005,97	1912,24	3,206	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085-05	3,884	5,926	926,19	2436,84	2,963	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085-06	3,875	5,863	887,00	2889,75	2,656	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085-07	3,889	5,799	819,20	4201,67	2,757	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085-08	4,006	6,078	851,63	2729,93	2,760	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085-09	3,312	4,985	1147,44	3078,94	3,212	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-085-10	3,614	5,548	1094,60	2200,65	3,354	95,00	85,00	19,00	1	
V0-0-A-p-u-265-01	4,303	6,499	958,78	2954,13	9,441	95,00	265,00	19,00	3	
V0-0-A-p-u-265-02	4,120	6,262	1075,30	2598,95	8,505	95,00	265,00	19,00	3	
V0-0-A-p-u-265-03	4,405	6,623	898,08	3294,37	7,969	95,00	265,00	19,00	3	
V0-0-A-p-u-265-04	4,386	6,646	943,45	2774,01	9,119	95,00	265,00	19,00	3	
V0-0-A-p-u-265-05	0,000	0,000	0,00	0,00	8,875	95,00	265,00	19,00	3	
V0-0-A-p-u-265-06	4,391	6,723	998,83	2291,74	8,881	95,00	265,00	19,00	3	
V0-0-A-p-u-800-01	3,891	6,001	1148,90	2049,91	28,144	95,00	800,00	19,00	9	
V0-0-A-p-u-800-02	4,058	6,306	1114,61	1828,01	23,674	95,00	800,00	19,00	9	
V0-0-A-p-u-800-03	3,968	6,134	1124,16	1973,69	27,185	95,00	800,00	19,00	9	
V0-0-A-p-u-800-04	4,273	6,595	969,62	2001,88	25,116	95,00	800,00	19,00	9	
V0-0-A-p-u-800-05	4,443	6,861	906,36	1981,29	24,907	95,00	800,00	19,00	9	
V0-0-C-p-u-800-01	3,603	5,517	1277,40	2288,28	26,533	95,00	800,00	19,00	9	
V0-0-C-p-u-800-02	3,880	5,848	1004,93	3059,79	26,405	95,00	800,00	19,00	9	
V0-0-C-p-u-800-03	3,927	5,944	1006,42	2817,57	28,881	95,00	800,00	19,00	9	
V0-0-C-p-u-800-04	3,774	5,693	1063,84	2973,06	25,306	95,00	800,00	19,00	9	
V0-0-C-p-u-800-05	3,796	5,728	1054,23	2959,39	28,287	95,00	800,00	19,00	9	
V0-0-C-p-u-800-06	3,807	5,837	1152,53	2247,30	26,809	95,00	800,00	19,00	9	
V0-0-C-p-u-800-07	3,798	5,723	1044,82	3044,49	27,045	95,00	800,00	19,00	9	

Bezeichnung DA	Geometrie Lasche		Nettobreite BSP		EI BSP [Nmm ²]	E ref [N/mm ²]
	Breite Schlitz Druck [mm]	Breite Schlitz Zug [mm]	BSP Netto Druck [mm]	BSP Netto Zug [mm]		
VO-0-A-p-u-085_R-01	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085_R-02	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085_R-03	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085_R-04	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085_R-05	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085_R-06	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085_R-07	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085_R-08	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085-01	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085-02	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085-03	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085-04	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085-05	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085-06	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085-07	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085-08	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085-09	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-085-10	21,00	26,00	64,00	59,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-265-01	21,00	26,00	202,00	187,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-265-02	21,00	26,00	202,00	187,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-265-03	21,00	26,00	202,00	187,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-265-04	21,00	26,00	202,00	187,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-265-05	21,00	26,00	202,00	187,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-265-06	21,00	26,00	202,00	187,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-800-01	21,00	26,00	611,00	566,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-800-02	21,00	26,00	611,00	566,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-800-03	21,00	26,00	611,00	566,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-800-04	21,00	26,00	611,00	566,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-A-p-u-800-05	21,00	26,00	611,00	566,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-C-p-u-800-01	30,00	30,00	530,00	530,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-C-p-u-800-02	30,00	30,00	530,00	530,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-C-p-u-800-03	30,00	30,00	530,00	530,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-C-p-u-800-04	30,00	30,00	530,00	530,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-C-p-u-800-05	30,00	30,00	530,00	530,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-C-p-u-800-06	30,00	30,00	530,00	530,00	684539631666,67	12000,00
VO-0-C-p-u-800-07	30,00	30,00	530,00	530,00	684539631666,67	12000,00

02.06.2012

Auswertung Verbindungsplatten

3 von 10

Bezeichnung DA	Spannungsermittlung										Zugkraft Rand lamelle [N]	Schub fläche [mm ²]	f _{v,05} ,Rand lamelle [N/mm ²]
	ob,Rand, BSP, Brutto [N/mm ²]	ob,Druckrand, BSP, Netto [N/mm ²]	ob,Zugrand, BSP, Netto [N/mm ²]	Schlitze länge [mm]	ob,Randlamelle mitte BSP,Brutto [N/mm ²]								
V0-0-A-p-u-085_R-01	27,56	-36,60	39,71	280,00	22,05	35608,22	10640,00	3,35					
V0-0-A-p-u-085_R-02	20,53	-27,27	29,58	280,00	16,43	26530,32	10640,00	2,49					
V0-0-A-p-u-085_R-03	30,64	-40,69	44,14	280,00	24,51	39586,02	10640,00	3,72					
V0-0-A-p-u-085_R-04	27,47	-36,49	39,58	280,00	21,98	35492,66	10640,00	3,34					
V0-0-A-p-u-085_R-05	33,73	-44,80	48,60	280,00	26,99	43582,59	10640,00	4,10					
V0-0-A-p-u-085_R-06	23,90	-31,74	34,43	280,00	19,12	30877,22	10640,00	2,90					
V0-0-A-p-u-085_R-07	30,16	-40,06	43,45	280,00	24,13	38968,37	10640,00	3,66					
V0-0-A-p-u-085_R-08	30,48	-40,48	43,91	280,00	24,38	39379,13	10640,00	3,70					
V0-0-A-p-u-085-01	21,82	-28,98	31,43	280,00	17,45	28187,72	10640,00	2,65					
V0-0-A-p-u-085-02	24,43	-32,44	35,19	280,00	19,54	31559,88	10640,00	2,97					
V0-0-A-p-u-085-03	24,56	-32,62	35,38	280,00	19,65	31729,35	10640,00	2,98					
V0-0-A-p-u-085-04	31,40	-41,71	45,24	280,00	25,12	40573,91	10640,00	3,81					
V0-0-A-p-u-085-05	29,03	-38,55	41,82	280,00	23,22	37505,45	10640,00	3,52					
V0-0-A-p-u-085-06	26,02	-34,55	37,48	280,00	20,81	33612,43	10640,00	3,16					
V0-0-A-p-u-085-07	27,01	-35,87	38,91	280,00	21,61	34892,24	10640,00	3,28					
V0-0-A-p-u-085-08	27,04	-35,91	38,96	280,00	21,63	34937,15	10640,00	3,28					
V0-0-A-p-u-085-09	31,46	-41,79	45,33	280,00	25,17	40652,19	10640,00	3,82					
V0-0-A-p-u-085-10	32,86	-43,64	47,33	280,00	26,28	42449,47	10640,00	3,99					
V0-0-A-p-u-265-01	29,67	-38,92	42,04	280,00	23,73	31949,75	31920,00	3,74					
V0-0-A-p-u-265-02	26,72	-35,06	37,87	280,00	21,38	107643,79	31920,00	3,37					
V0-0-A-p-u-265-03	25,04	-32,85	35,48	280,00	20,03	100858,99	31920,00	3,16					
V0-0-A-p-u-265-04	28,65	-37,59	40,61	280,00	22,92	115417,82	31920,00	3,62					
V0-0-A-p-u-265-05	27,89	-36,58	39,52	280,00	22,31	112323,34	31920,00	3,52					
V0-0-A-p-u-265-06	27,91	-36,61	39,55	280,00	22,33	112406,49	31920,00	3,52					
V0-0-A-p-u-800-01	29,29	-38,36	41,40	280,00	23,44	356212,67	95760,00	3,72					
V0-0-A-p-u-800-02	24,64	-32,26	34,83	280,00	19,71	299630,78	95760,00	3,13					
V0-0-A-p-u-800-03	28,30	-37,05	39,99	280,00	22,64	344078,00	95760,00	3,59					
V0-0-A-p-u-800-04	26,14	-34,23	36,95	280,00	20,91	317884,14	95760,00	3,32					
V0-0-A-p-u-800-05	25,92	-33,94	36,64	280,00	20,74	315244,30	95760,00	3,29					
V0-0-C-p-u-800-01	27,62	-41,69	41,69	280,00	22,09	335824,30	95760,00	3,51					
V0-0-C-p-u-800-02	27,48	-41,49	41,49	280,00	21,99	334205,15	95760,00	3,49					
V0-0-C-p-u-800-03	30,06	-45,38	45,38	280,00	24,05	365542,17	95760,00	3,82					
V0-0-C-p-u-800-04	26,34	-39,76	39,76	280,00	21,07	320293,19	95760,00	3,34					
V0-0-C-p-u-800-05	29,44	-44,44	44,44	280,00	23,55	358020,86	95760,00	3,74					
V0-0-C-p-u-800-06	27,90	-42,12	42,12	280,00	22,32	339317,67	95760,00	3,54					
V0-0-C-p-u-800-07	28,15	-42,49	42,49	280,00	22,52	342294,74	95760,00	3,57					

Spannungsermittlung Kerto										
Bezeichnung DA	ly= [mm ⁴]	zZug rand [mm]	zDruck rand [mm]	Mkerto lasche [kNm]	ob,05,Zugrand,K erto [N/mm ²]	ob,05,Druck rand [N/mm ²]	fv,05,Rand lamelle [N/mm ²]	FmaxZwick auf 1m [kN]		
V0-0-A-p-u-085_R-01	1673000,00	45,80	49,20	2,813	77,02	-82,74	3,35	147,11		
V0-0-A-p-u-085_R-02	1673000,00	45,80	49,20	2,096	57,38	-61,64	2,49	109,60		
V0-0-A-p-u-085_R-03	1673000,00	45,80	49,20	3,128	85,62	-91,98	3,72	163,54		
V0-0-A-p-u-085_R-04	1673000,00	45,80	49,20	2,804	76,77	-82,47	3,34	146,63		
V0-0-A-p-u-085_R-05	1673000,00	45,80	49,20	3,443	94,27	-101,27	4,10	180,05		
V0-0-A-p-u-085_R-06	1673000,00	45,80	49,20	2,440	66,79	-71,74	2,90	127,56		
V0-0-A-p-u-085_R-07	1673000,00	45,80	49,20	3,079	84,29	-90,54	3,66	160,99		
V0-0-A-p-u-085_R-08	1673000,00	45,80	49,20	3,111	85,18	-91,50	3,70	162,68		
V0-0-A-p-u-085-01	1673000,00	45,80	49,20	2,227	60,97	-65,50	2,65	116,45		
V0-0-A-p-u-085-02	1673000,00	45,80	49,20	2,494	68,26	-73,33	2,97	130,38		
V0-0-A-p-u-085-03	1673000,00	45,80	49,20	2,507	68,63	-73,72	2,98	131,08		
V0-0-A-p-u-085-04	1673000,00	45,80	49,20	3,206	87,76	-94,27	3,81	167,62		
V0-0-A-p-u-085-05	1673000,00	45,80	49,20	2,963	81,12	-87,15	3,52	154,94		
V0-0-A-p-u-085-06	1673000,00	45,80	49,20	2,656	72,70	-78,10	3,16	138,86		
V0-0-A-p-u-085-07	1673000,00	45,80	49,20	2,757	75,47	-81,07	3,28	144,15		
V0-0-A-p-u-085-08	1673000,00	45,80	49,20	2,760	75,57	-81,18	3,28	144,33		
V0-0-A-p-u-085-09	1673000,00	45,80	49,20	3,212	87,93	-94,46	3,82	167,94		
V0-0-A-p-u-085-10	1673000,00	45,80	49,20	3,354	91,82	-98,63	3,99	175,37		
V0-0-A-p-u-265-01	1673000,00	45,80	49,20	3,147	86,15	-92,55	3,74	158,34		
V0-0-A-p-u-265-02	1673000,00	45,80	49,20	2,835	77,61	-83,37	3,37	142,64		
V0-0-A-p-u-265-03	1673000,00	45,80	49,20	2,656	72,72	-78,12	3,16	133,65		
V0-0-A-p-u-265-04	1673000,00	45,80	49,20	3,040	83,21	-89,39	3,62	152,94		
V0-0-A-p-u-265-05	1673000,00	45,80	49,20	2,958	80,98	-87,00	3,52	148,84		
V0-0-A-p-u-265-06	1673000,00	45,80	49,20	2,960	81,04	-87,06	3,52	148,95		
V0-0-A-p-u-800-01	1673000,00	45,80	49,20	3,127	85,61	-91,96	3,72	156,36		
V0-0-A-p-u-800-02	1673000,00	45,80	49,20	2,630	72,01	-77,36	3,13	131,52		
V0-0-A-p-u-800-03	1673000,00	45,80	49,20	3,021	82,69	-88,83	3,59	151,03		
V0-0-A-p-u-800-04	1673000,00	45,80	49,20	2,791	76,40	-82,07	3,32	139,53		
V0-0-A-p-u-800-05	1673000,00	45,80	49,20	2,767	75,76	-81,39	3,29	138,37		
V0-0-C-p-u-800-01	1857645,83	47,50	47,50	2,948	75,38	-75,38	3,51	147,41		
V0-0-C-p-u-800-02	1857645,83	47,50	47,50	2,934	75,02	-75,02	3,49	146,70		
V0-0-C-p-u-800-03	1857645,83	47,50	47,50	3,209	82,06	-82,06	3,82	160,45		
V0-0-C-p-u-800-04	1857645,83	47,50	47,50	2,812	71,90	-71,90	3,34	140,59		
V0-0-C-p-u-800-05	1857645,83	47,50	47,50	3,143	80,37	-80,37	3,74	157,15		
V0-0-C-p-u-800-06	1857645,83	47,50	47,50	2,979	76,17	-76,17	3,54	148,94		
V0-0-C-p-u-800-07	1857645,83	47,50	47,50	3,005	76,84	-76,84	3,57	150,25		

Bezeichnung DA	Serie	Verbinder	Holzfeuchte [%]	Fmax Zwick [kN]	Δfest [kN]	Verformung Ast 1		Steffigkeit Ast 1		
						Δv1,WA10= [mm]	Δv1,WA20= [mm]	E _{calc,1} [kNm ²]	k1 [kNm]	
V0-0-A-p-o-800-01	V0-0-A-p-o-800	01-09	10,52	101,542	33,75	4,382	6,762	925,17	2005,15	
V0-0-A-p-o-800-02	V0-0-A-p-o-800	01-09	10,42	104,029	33,75	4,379	6,798	960,90	1828,28	
V0-0-A-p-o-800-03	V0-0-A-p-o-800	01-09	10,58	99,267	33,75	0,000	0,000	0,00	0,00	
V0-0-A-p-o-800-04	V0-0-A-p-o-800	01-09	10,48	120,695	33,75	4,479	6,838	838,25	2421,10	
V0-0-A-p-o-800-05	V0-0-A-p-o-800	01-09	10,75	112,382	33,75	4,532	6,988	868,61	2023,25	
V0-08-A-p-u-800-01	V0-08-A-p-u-800	01-09	11,01	96,700	33,75	4,896	7,544	761,01	2025,35	
V0-08-A-p-u-800-02	V0-08-A-p-u-800	01-09	10,77	100,548	33,75	4,503	7,228	1151,33	1205,09	
V0-08-A-p-u-800-03	V0-08-A-p-u-800	01-09	10,70	107,996	33,75	4,646	7,229	878,80	1742,53	
V0-08-A-p-u-800-04	V0-08-A-p-u-800	01-09	10,93	96,941	33,75	4,537	7,357	1233,38	1086,47	
V0-08-A-p-u-800-05	V0-08-A-p-u-800	01-09	10,90	102,816	33,75	4,854	7,483	773,82	2010,45	
V0-08-A-p-u-800-06	V0-08-A-p-u-800	01-09	10,75	96,207	33,75	4,758	7,382	829,14	1813,23	
V0-08-A-p-u-800-07	V0-08-A-p-u-800	01-09	10,72	102,350	33,75	4,888	7,564	780,58	1885,31	
V30-0-A-p-u-800-01	V30-0-A-p-u-800	-	10,73	124,003	33,75	0,000	0,000	0,00	0,00	
V30-0-A-p-u-800-02	V30-0-A-p-u-800	-	10,48	128,500	33,75	3,578	5,183	0,00	0,00	
V30-0-A-p-u-800-03	V30-0-A-p-u-800	-	10,71	139,853	33,75	3,388	4,786	0,00	0,00	
V30-0-A-p-u-800-04	V30-0-A-p-u-800	-	10,52	132,460	33,75	3,522	4,916	0,00	0,00	
V30-0-A-p-u-800-05	V30-0-A-p-u-800	-	10,77	130,360	33,75	3,527	5,024	0,00	0,00	
V30-0-A-p-u-800-06	V30-0-A-p-u-800	-	10,77	128,593	33,75	3,750	5,374	0,00	0,00	
V30-0-A-p-u-800-07	V30-0-A-p-u-800	-	10,83	114,339	33,75	3,717	5,284	0,00	0,00	
V30-0-A-n-u-800-01	V30-0-A-n-u-800	-	10,77	127,677	33,75	0,000	0,000	0,00	0,00	
V30-0-A-n-u-800-02	V30-0-A-n-u-800	-	11,02	126,492	33,75	3,463	5,495	0,00	0,00	
V30-0-A-n-u-800-03	V30-0-A-n-u-800	-	10,95	116,532	33,75	3,513	5,694	0,00	0,00	
V30-0-A-n-u-800-04	V30-0-A-n-u-800	-	11,06	126,427	33,75	3,258	5,170	0,00	0,00	
V30-0-A-n-u-800-05	V30-0-A-n-u-800	-	10,87	128,926	33,75	3,372	5,283	0,00	0,00	
V30-0-A-n-u-800-06	V30-0-A-n-u-800	-	10,24	119,394	33,75	3,369	5,748	0,00	0,00	
V30-0-A-n-u-800-07a	V30-0-A-n-u-800	-	11,26	0,000	33,75	3,233	5,110	0,00	0,00	
V30-0-A-n-u-800-07b	V30-0-A-n-u-800	-	11,26	135,539	0,00	0,000	0,000	0,00	0,00	

Bezeichnung DA	Verformung Ast 1		Steffigkeit Ast 1		Bruchmoment	Geometrie Platte			
	$\Delta v_2; WA10=$ [mm]	$\Delta v_2; WA20=$ [mm]	EIcalc;2 [kNm ²]	k2 [kNm]		Mbruch [kN]	Hplatte [mm]	Bplatte [mm]	Stärke Rand- lamelle [mm]
V0-0-A-p-o-800-01	4,248	6,518	946,02	2203,76	22,847	95,00	800,00	19,00	9
V0-0-A-p-o-800-02	4,256	6,594	998,96	1893,47	23,406	95,00	800,00	19,00	9
V0-0-A-p-o-800-03	0,000	0,000	0,00	0,00	22,335	95,00	800,00	19,00	9
V0-0-A-p-o-800-04	4,372	6,644	852,43	2643,63	27,156	95,00	800,00	19,00	9
V0-0-A-p-o-800-05	4,402	6,759	891,42	2179,31	25,286	95,00	800,00	19,00	9
V0-08-A-p-u-800-01	4,752	7,296	783,33	2171,42	21,758	95,00	800,00	19,00	9
V0-08-A-p-u-800-02	4,364	6,990	1204,10	1249,89	22,623	95,00	800,00	19,00	9
V0-08-A-p-u-800-03	4,540	7,037	894,20	1854,14	24,299	95,00	800,00	19,00	9
V0-08-A-p-u-800-04	4,412	7,151	1301,15	1106,80	21,812	95,00	800,00	19,00	9
V0-08-A-p-u-800-05	4,717	7,247	796,25	2142,77	23,134	95,00	800,00	19,00	9
V0-08-A-p-u-800-06	4,631	7,153	845,10	1962,50	21,647	95,00	800,00	19,00	9
V0-08-A-p-u-800-07	4,774	7,358	794,15	2023,65	23,029	95,00	800,00	19,00	9
V30-0-A-p-u-800-01	0,000	0,000	0,00	0,00	27,901	95,00	800,00	19,00	9
V30-0-A-p-u-800-02	3,306	4,768	0,00	0,00	28,913	95,00	800,00	19,00	9
V30-0-A-p-u-800-03	3,207	4,520	0,00	0,00	31,467	95,00	800,00	19,00	9
V30-0-A-p-u-800-04	3,343	4,667	0,00	0,00	29,804	95,00	800,00	19,00	9
V30-0-A-p-u-800-05	3,315	4,718	0,00	0,00	29,331	95,00	800,00	19,00	9
V30-0-A-p-u-800-06	3,486	4,997	0,00	0,00	28,933	95,00	800,00	19,00	9
V30-0-A-p-u-800-07	3,438	4,854	0,00	0,00	25,726	95,00	800,00	19,00	9
V30-0-A-n-u-800-01	0,000	0,000	0,00	0,00	28,727	95,00	800,00	19,00	9
V30-0-A-n-u-800-02	3,388	5,371	0,00	0,00	28,461	95,00	800,00	19,00	9
V30-0-A-n-u-800-03	3,401	5,540	0,00	0,00	26,220	95,00	800,00	19,00	9
V30-0-A-n-u-800-04	3,199	5,126	0,00	0,00	28,446	95,00	800,00	19,00	9
V30-0-A-n-u-800-05	3,304	5,197	0,00	0,00	29,008	95,00	800,00	19,00	9
V30-0-A-n-u-800-06	3,265	5,580	0,00	0,00	26,864	95,00	800,00	19,00	9
V30-0-A-n-u-800-07a	3,112	4,982	0,00	0,00	0,000	95,00	800,00	19,00	9
V30-0-A-n-u-800-07b	0,000	0,000	0,00	0,00	30,496	95,00	800,00	19,00	9

Bezeichnung DA	Geometrie Lasche		Nettobreite BSP		EI BSP EI [Nmm ²]	E ref E [N/mm ²]
	Breite Schlitz Druck [mm]	Breite Schlitz Zug [mm]	BSP Netto Druck [mm]	BSP Netto Zug [mm]		
V0-0-A-p-o-800-01	26,00	21,00	566,00	611,00	684539631666,67	12000,00
V0-0-A-p-o-800-02	26,00	21,00	566,00	611,00	684539631666,67	12000,00
V0-0-A-p-o-800-03	26,00	21,00	566,00	611,00	684539631666,67	12000,00
V0-0-A-p-o-800-04	26,00	21,00	566,00	611,00	684539631666,67	12000,00
V0-0-A-p-o-800-05	26,00	21,00	566,00	611,00	684539631666,67	12000,00
V0-08-A-p-u-800-01	21,00	26,00	611,00	566,00	684539631666,67	12000,00
V0-08-A-p-u-800-02	21,00	26,00	611,00	566,00	684539631666,67	12000,00
V0-08-A-p-u-800-03	21,00	26,00	611,00	566,00	684539631666,67	12000,00
V0-08-A-p-u-800-04	21,00	26,00	611,00	566,00	684539631666,67	12000,00
V0-08-A-p-u-800-05	21,00	26,00	611,00	566,00	684539631666,67	12000,00
V0-08-A-p-u-800-06	21,00	26,00	611,00	566,00	684539631666,67	12000,00
V0-08-A-p-u-800-07	21,00	26,00	611,00	566,00	684539631666,67	12000,00
V30-0-A-p-u-800-01	16,00	22,00	656,00	602,00	684539631666,67	12000,00
V30-0-A-p-u-800-02	16,00	22,00	656,00	602,00	684539631666,67	12000,00
V30-0-A-p-u-800-03	16,00	22,00	656,00	602,00	684539631666,67	12000,00
V30-0-A-p-u-800-04	16,00	22,00	656,00	602,00	684539631666,67	12000,00
V30-0-A-p-u-800-05	16,00	22,00	656,00	602,00	684539631666,67	12000,00
V30-0-A-p-u-800-06	16,00	22,00	656,00	602,00	684539631666,67	12000,00
V30-0-A-p-u-800-07	16,00	22,00	656,00	602,00	684539631666,67	12000,00
V30-0-A-n-u-800-01	16,00	22,00	656,00	602,00	684539631666,67	12000,00
V30-0-A-n-u-800-02	16,00	22,00	656,00	602,00	684539631666,67	12000,00
V30-0-A-n-u-800-03	16,00	22,00	656,00	602,00	684539631666,67	12000,00
V30-0-A-n-u-800-04	16,00	22,00	656,00	602,00	684539631666,67	12000,00
V30-0-A-n-u-800-05	16,00	22,00	656,00	602,00	684539631666,67	12000,00
V30-0-A-n-u-800-06	16,00	22,00	656,00	602,00	684539631666,67	12000,00
V30-0-A-n-u-800-07a	16,00	22,00	656,00	602,00	684539631666,67	12000,00
V30-0-A-n-u-800-07b	16,00	22,00	656,00	602,00	684539631666,67	12000,00

Bezeichnung DA	Spannungsermittlung									
	ob;Rand, BSP, Brutto [N/mm ²]	ob;Druckrand, BSP, Netto [N/mm ²]	ob;Zugrand, BSP, Netto [N/mm ²]	Schlitzlänge [mm]	ob;Randlamelle, BSP, Brutto [N/mm ²]	Zugkraft Randlamelle [N]	Schubfläche [mm ²]	fv,05 Randlamelle [N/mm ²]		
V0-0-A-p-o-800-01	23,78	-33,61	31,14	280,00	19,02	289166,57	95760,00	3,02		
V0-0-A-p-o-800-02	24,36	-34,43	31,90	280,00	19,49	286248,25	95760,00	3,09		
V0-0-A-p-o-800-03	23,25	-32,86	30,44	280,00	18,60	282688,16	95760,00	2,95		
V0-0-A-p-o-800-04	28,27	-39,95	37,01	280,00	22,61	343709,61	95760,00	3,59		
V0-0-A-p-o-800-05	26,32	-37,20	34,46	280,00	21,06	320036,33	95760,00	3,34		
V0-08-A-p-u-800-01	22,65	-29,65	32,01	280,00	18,12	275379,00	95760,00	2,88		
V0-08-A-p-u-800-02	23,55	-30,83	33,28	280,00	18,84	286336,13	95760,00	2,99		
V0-08-A-p-u-800-03	25,29	-33,12	35,75	280,00	20,23	307546,82	95760,00	3,21		
V0-08-A-p-u-800-04	22,70	-29,73	32,09	280,00	18,16	276064,71	95760,00	2,88		
V0-08-A-p-u-800-05	24,08	-31,53	34,03	280,00	19,26	292793,98	95760,00	3,06		
V0-08-A-p-u-800-06	22,53	-29,50	31,85	280,00	18,02	273974,66	95760,00	2,86		
V0-08-A-p-u-800-07	23,97	-31,38	33,88	280,00	19,18	291466,35	95760,00	3,04		
V30-0-A-p-u-800-01	29,04	-35,41	38,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
V30-0-A-p-u-800-02	30,09	-36,70	39,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
V30-0-A-p-u-800-03	32,75	-39,94	43,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
V30-0-A-p-u-800-04	31,02	-37,83	41,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
V30-0-A-p-u-800-05	30,53	-37,23	40,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
V30-0-A-p-u-800-06	30,12	-36,73	40,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
V30-0-A-p-u-800-07	26,78	-32,65	35,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
V30-0-A-n-u-800-01	29,90	-36,46	39,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
V30-0-A-n-u-800-02	29,62	-36,13	39,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
V30-0-A-n-u-800-03	27,29	-33,28	36,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
V30-0-A-n-u-800-04	29,61	-36,11	39,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
V30-0-A-n-u-800-05	30,19	-36,82	40,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
V30-0-A-n-u-800-06	27,96	-34,10	37,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
V30-0-A-n-u-800-07a	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
V30-0-A-n-u-800-07b	31,74	-38,71	42,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		

02.06.2012

Auswertung Verbindungsplatten

9 von 10

Bezeichnung DA	Spannungsermittlung Kerto											FmaxZwick auf 1m [kN]
	ly= [mm4]	zZug rand [mm]	zDruck rand [mm]	Mkerto lasche [kNm]	ob,05,Zugrand,K erto [N/mm ²]	ob,05,Druck rand Kerto [N/mm ²]	fv,05,Rand lamelle [N/mm ²]					
V0-0-A-p-o-800-01	1673000,00	49,20	45,80	2,539	74,65	-69,50	3,02					126,93
V0-0-A-p-o-800-02	1673000,00	49,20	45,80	2,601	76,48	-71,20	3,09					130,04
V0-0-A-p-o-800-03	1673000,00	49,20	45,80	2,482	72,98	-67,94	2,95					124,08
V0-0-A-p-o-800-04	1673000,00	49,20	45,80	3,017	88,74	-82,60	3,59					150,87
V0-0-A-p-o-800-05	1673000,00	49,20	45,80	2,810	82,62	-76,91	3,34					140,48
V0-08-A-p-u-800-01	1673000,00	45,80	49,20	2,418	66,18	-71,09	2,88					120,88
V0-08-A-p-u-800-02	1673000,00	45,80	49,20	2,514	68,82	-73,92	2,99					125,69
V0-08-A-p-u-800-03	1673000,00	45,80	49,20	2,700	73,91	-79,40	3,21					135,00
V0-08-A-p-u-800-04	1673000,00	45,80	49,20	2,424	66,35	-71,27	2,88					121,18
V0-08-A-p-u-800-05	1673000,00	45,80	49,20	2,570	70,37	-75,59	3,06					128,52
V0-08-A-p-u-800-06	1673000,00	45,80	49,20	2,405	65,84	-70,73	2,86					120,26
V0-08-A-p-u-800-07	1673000,00	45,80	49,20	2,559	70,05	-75,25	3,04					127,94
V30-0-A-p-u-800-01	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00					155,00
V30-0-A-p-u-800-02	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00					160,63
V30-0-A-p-u-800-03	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00					174,82
V30-0-A-p-u-800-04	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00					165,58
V30-0-A-p-u-800-05	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00					162,95
V30-0-A-p-u-800-06	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00					160,74
V30-0-A-p-u-800-07	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00					142,92
V30-0-A-n-u-800-01	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00					159,60
V30-0-A-n-u-800-02	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00					158,11
V30-0-A-n-u-800-03	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00					145,67
V30-0-A-n-u-800-04	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00					158,03
V30-0-A-n-u-800-05	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00					161,16
V30-0-A-n-u-800-06	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00					149,24
V30-0-A-n-u-800-07a	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00					0,00
V30-0-A-n-u-800-07b	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00					169,42

B.8 Auswertung Referenzplatten Biegeversuche

Bezeichnung DA	Serie	Holzfeuchte [%]	Fmax Zwick [kN]	Δfest [kN]	Verformung Ast1		Variante I Ast 1	
					Δv1;WA10= lokal [mm]	Δv1;WA20= global [mm]	Scht_I,calc [kN]	EI1,calc [kNm ²]
V0-0-R-085-01	V0-0-R-085	10,36	19,532	5,25	1,4976	8,5552	21451,07	652,46
V0-0-R-085-02	V0-0-R-085	10,28	17,743	5,25	1,3183	8,1599	11588,29	741,20
V0-0-R-085-03	V0-0-R-085	10,32	16,522	5,25	1,3441	8,1629	13034,99	726,99
V0-0-R-085-04	V0-0-R-085	10,38	20,633	5,25	1,5367	8,8719	18327,57	635,88
V0-0-R-085-05	V0-0-R-085	10,77	11,116	5,25	1,8849	10,7162	18187,10	518,41
V0-0-R-085-06	V0-0-R-085	9,76	16,349	5,25	1,6215	9,4258	16075,37	602,63
V0-0-R-085-07	V0-0-R-085	10,27	11,402	5,25	1,9853	11,3230	16529,33	492,19
V0-0-R-085-08	V0-0-R-085	10,12	9,599	5,25	2,1794	11,9721	29899,96	448,35
V0-0-R-085-09	V0-0-R-085	10,47	15,669	5,25	1,7908	10,1929	18841,13	545,65
V0-0-R-265-01	V0-0-R-265	10,24	49,002	15	1,7011	9,8375	14879,84	526,43
V0-0-R-265-02	V0-0-R-265	10,41	44,521	15	1,5455	8,8411	18698,56	579,44
V0-0-R-265-03	V0-0-R-265	10,66	59,176	15	1,1793	7,1809	13349,56	759,32
V0-0-R-800-01	V0-0-R-800	9,74	157,650	45	1,3874	7,8807	22786,84	641,43
V0-0-R-800-02	V0-0-R-800	9,81	110,250	45	1,7161	9,6270	22359,49	518,56
V0-0-R-800-03	V0-0-R-800	9,71	149,830	45	1,3422	7,3805	43069,68	663,03
V0-0-R-800-04	V0-0-R-800	9,77	181,119	45	1,5262	8,2526	65219,71	583,07

Auswertung Referenzplatten

1 von 4

02.06.2012

Bezeichnung DA	Variante 2 Ast 1			Verformung Ast2			Variante1 Ast 2		
	Scht,1,calc [kN]	EI1,global,calc [kNm ²]	EI1,lokal,calc [kNm ²]	Δv2;WA10= lokal [mm]	Δv2;WA20= global [mm]	Scht,2,calc [kN]	EI2,calc [kNm ²]		
V0-0-R-085-01	7564,01	589,25	745,72	1,47997	8,45	21788,08	660,24		
V0-0-R-085-02	7564,01	617,79	792,04	1,30953	8,05	12283,92	746,17		
V0-0-R-085-03	7564,01	617,56	791,67	1,33947	8,10	13530,41	729,50		
V0-0-R-085-04	7564,01	568,21	712,35	0	8,79	0,00	0,00		
V0-0-R-085-05	7564,01	470,42	565,08	1,86092	10,57	18583,37	525,08		
V0-0-R-085-06	7564,01	534,83	660,65	1,60696	9,30	17019,00	608,07		
V0-0-R-085-07	7564,01	445,21	529,09	1,94279	11,12	16205,56	502,96		
V0-0-R-085-08	7564,01	421,07	495,35	2,15077	11,78	33086,31	454,32		
V0-0-R-085-09	7564,01	494,57	600,30	1,76753	10,03	19953,52	552,83		
V0-0-R-265-01	7564,01	469,62	563,93	1,68862	9,75	15304,45	530,31		
V0-0-R-265-02	7564,01	522,55	642,02	1,52824	8,72	19479,05	585,96		
V0-0-R-265-03	7564,01	643,36	834,56	1,17485	7,12	13841,48	762,22		
V0-0-R-800-01	7564,01	582,57	735,06	1,38553	7,80	25885,52	642,28		
V0-0-R-800-02	7564,01	476,89	574,45	1,70266	9,51	24187,07	522,65		
V0-0-R-800-03	7564,01	622,05	799,06	1,33099	7,28	50220,66	668,59		
V0-0-R-800-04	7564,01	556,32	693,76	1,51221	8,13	86266,42	588,47		

Bezeichnung DA	Variante 2 Ast 2				Geometrie					
	Schtr.z,calc [kN]	EI2,global,calc [kNm ²]	EI2,lokal,calc [kNm ²]	Mbruch [kN]	Hplatte [mm]	Bplatte [mm]	Stärke Randlamelle [mm]	Anzahl Schlitzte	Bbsp Netto Druck [mm]	Bbsp Netto Zug [mm]
V0-0-R-085-01	7564,01	596,44	757,28	4,39	95,00	85	19	1,00	85,00	85
V0-0-R-085-02	7564,01	626,57	806,52	3,99	95,00	85	19	1,00	85,00	85
V0-0-R-085-03	7564,01	622,40	799,63	3,72	95,00	85	19	1,00	85,00	85
V0-0-R-085-04	7564,01	573,36	720,47	4,64	95,00	85	19	1,00	85,00	85
V0-0-R-085-05	7564,01	476,77	574,27	2,50	95,00	85	19	1,00	85,00	85
V0-0-R-085-06	7564,01	541,98	671,60	3,68	95,00	85	19	1,00	85,00	85
V0-0-R-085-07	7564,01	453,52	540,88	2,57	95,00	85	19	1,00	85,00	85
V0-0-R-085-08	7564,01	428,08	505,08	2,16	95,00	85	19	1,00	85,00	85
V0-0-R-085-09	7564,01	502,65	612,25	3,53	95,00	85	19	1,00	85,00	85
V0-0-R-265-01	7564,01	473,93	570,15	11,03	95,00	265	19	3,00	265,00	265
V0-0-R-265-02	7564,01	529,63	652,74	10,02	95,00	265	19	3,00	265,00	265
V0-0-R-265-03	7564,01	648,56	843,33	13,31	95,00	265	19	3,00	265,00	265
V0-0-R-800-01	7564,01	588,25	744,13	35,47	95,00	800	19	9,00	800,00	800
V0-0-R-800-02	7564,01	482,59	582,74	24,81	95,00	800	19	9,00	800,00	800
V0-0-R-800-03	7564,01	630,67	813,33	33,71	95,00	800	19	9,00	800,00	800
V0-0-R-800-04	7564,01	564,62	706,72	40,75	95,00	800	19	9,00	800,00	800

Auswertung Referenzplatten

02.06.2012

3 von 4


Bezeichnung DA	EI [Nmm ²]	E [N/mm ²]	Spannungen			Bruchkraft	
			ob.;Rand, BSP, Brutto [N/mm ²]	ob.;Druckrand, BSP, Netto [N/mm ²]	ob.;Zugrand, BSP, Netto [N/mm ²]	FmaxZwick auf 1m [kN]	
V0-0-R-085-01	6,8454E+11	12000,00	43,05	-43,05	43,05	229,79	
V0-0-R-085-02	6,8454E+11	12000,00	39,11	-39,11	39,11	208,74	
V0-0-R-085-03	6,8454E+11	12000,00	36,42	-36,42	36,42	194,38	
V0-0-R-085-04	6,8454E+11	12000,00	45,48	-45,48	45,48	242,74	
V0-0-R-085-05	6,8454E+11	12000,00	24,50	-24,50	24,50	130,77	
V0-0-R-085-06	6,8454E+11	12000,00	36,04	-36,04	36,04	192,34	
V0-0-R-085-07	6,8454E+11	12000,00	25,13	-25,13	25,13	134,14	
V0-0-R-085-08	6,8454E+11	12000,00	21,16	-21,16	21,16	112,93	
V0-0-R-085-09	6,8454E+11	12000,00	34,54	-34,54	34,54	184,34	
V0-0-R-265-01	6,8454E+11	12000,00	34,64	-34,64	34,64	184,91	
V0-0-R-265-02	6,8454E+11	12000,00	31,48	-31,48	31,48	168,00	
V0-0-R-265-03	6,8454E+11	12000,00	41,84	-41,84	41,84	223,31	
V0-0-R-800-01	6,8454E+11	12000,00	36,92	-36,92	36,92	197,06	
V0-0-R-800-02	6,8454E+11	12000,00	25,82	-25,82	25,82	137,81	
V0-0-R-800-03	6,8454E+11	12000,00	35,09	-35,09	35,09	187,29	
V0-0-R-800-04	6,8454E+11	12000,00	42,42	-42,42	42,42	226,40	

B.9 Biegespannungsermittlung Referenzplatten

Biegespannungsermittlung nach dem modifizierten γ -Verfahren für Prüfkörper VO-R-800-03 für $b_{ref} = 1,0m$.

BSP Kennwerte lt ECS

Bezeichnung: **K1H 95.5s DQ**
 Plattenaufbau: für nicht vorbeschichteten 0 eingeteilt



Stützweite: 1,8 m
 Breite: 1800,0 mm

Festigkeitswerte:
 $E_{0,mean} = 12000,0 \text{ N/mm}^2$
 $E_{90,mean} = 3900,0 \text{ N/mm}^2$
 $G_{mean} = 690,0 \text{ N/mm}^2$
 $G_{90,mean} = 50,0 \text{ N/mm}^2$

Platte Richtung 1 (längs)

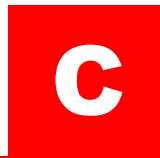
Platte	h _i [mm]	z _i [mm]	5 -schichtig	A _i z _i	b _i [mm]	A [mm ²]	A _{i,j}	e _i [mm]	I _{y,i} [mm ⁴]	E _i [N/mm ²]	V _i	σ _i	V * A _i * σ _i ²	I _{y+V} * σ _i ²
1	19	9,5		180500	1000	19000	19000	38,0	5,72E+05	12000	0,791	38,00	2,17E+07	2,228E+07
q	19	28,5		541500	1000	19000	19000	0	0,00E+00	390	0,000	0,00	0,00E+00	0,000E+00
1	19	47,5		902500	1000	19000	19000	-19	5,72E+05	12000	1,000	0,00	0,00E+00	5,716E+05
q	19	66,5		1263500	1000	19000	19000	0	0,00E+00	390	0,000	0,00	0,00E+00	0,000E+00
1	19	85,5		1624500	1000	19000	19000	-38	5,72E+05	12000	0,791	38,00	2,17E+07	2,228E+07
Summe	h_{tot} 95	z_i 0,095		4512500		95000 mm²	57000 mm²							4,51E+07 mm⁴
				47,5 mm		950,0 cm²	570,0 cm²							4512,89 cm⁴

Normalspannungen lt. ECS: $M_{0,95} = 42,14 \text{ kNm}$

Orientierung	h _{tot} [mm]	W _{eff} [mm ⁴]	σ _{m,x,i} = σ _i + σ _{m,i}	σ _{m,x,i} mit: $\sigma_i = \frac{M}{(EI)_{eff}}$	σ _{m,i} = $\frac{0,5 * E_i * h_{i,j} * M}{(EI)_{eff}}$
1	19	421,37500	-8,87 N/mm ²	-36,94 N/mm ²	8,87 N/mm ²
q	19	421,37500	8,87 N/mm ²	8,87 N/mm ²	8,87 N/mm ²
1	19	421,37500	8,87 N/mm ²	36,94 N/mm ²	8,87 N/mm ²
q	19	421,37500	8,87 N/mm ²	36,94 N/mm ²	8,87 N/mm ²

Normalspannungen lt. ETA-06/0138: $M_{0,95} = 42,14 \text{ kNm}$

Platte	h _{tot} [mm]	W _{eff} [mm ⁴]	σ _{x,i} = $\frac{M}{W_{eff}}$	σ _{x,i} mit: $W_{eff} = 0,5 * h_{tot}$	h _{tot} = h _{tot}
oberer Rand	95,0 mm	4,51E+07 mm ⁴	-44,35 N/mm ²	-44,35 N/mm ²	9,50E+05 mm ⁴
unterer Rand	95,0 mm	4,51E+07 mm ⁴	44,35 N/mm ²	44,35 N/mm ²	9,50E+05 mm ⁴



Anhang

C.2 Lasteinleitung Zugversuche

Datum: 11.05.2012

BV: Zugprüfung

Bauteil: Probekörper

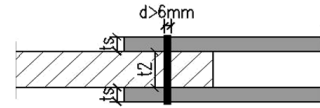
SDÜ Stahl-Holzverbindung-zweischnittig Bleche außen (EN 1995-1-1:2004)
d>6mm; dünne oder dickes Blech

Verbindungsmittel:

Stabdübel

Material/Typ

S235



$f_{u,k} = 360 \text{ N/mm}^2$

$Y_{M,Stahl} = 1,10$

$t_{s \text{ erf, dickes Blech}} =$

Durchmesser: 8,0 mm

8,0 mm

Gewindelänge: $l_{ef} = 0,0 \text{ mm}$ Eingabe bei Schraubverbindungen

Einschraubwinkel $\alpha = 90^\circ$ VM Winkel zur Faserrichtung

1,57079633

Holz:

Material

Sperrholz

Stahlblech

S235/ST 37

Nadelholz

$Y_{M,Holz} = 1,25$

$Y_{M,Stahl} = 1,10$

Dichte

$\rho_{k,2} = 600,0 \text{ kg/m}^3$

Breite

$t_2 = 22 \text{ mm}$

$t_s = 4 \text{ mm}$

Kraft-Faser-Winkel

$\alpha = 0^\circ$

dünnes Blech

0

Belastung:

$k_{mod} = 1$

$N_{vd} = 68,00 \text{ kN}$

Verbindungsmittelabstände:

VM-abstand untereinander (in Faserrichtung)

$a_{1,1} = 40 \text{ mm}$

Anzahl der VM in Faserrichtung (in einer Reihe)

2 Stk

Anzahl der Reihen

$r = 6 \text{ Reihen}$

Lochleibungsfestigkeiten:

$f_{h,2,k} = 60,72 \text{ N/mm}^2$

mit: $f_{h,k} = 0,11(1 - 0,01 \cdot d) \cdot p_k$

$k_{90,2} = 1,47$

$f_{h,\alpha,2,k} = 60,72 \text{ N/mm}^2$

Fließmoment:

$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_u \cdot k \cdot d^{2,6}$

$M_{y,k} =$

24068,98 Nmm

Ausziehverstand:

Ausziehparameter:

Herausziehen:

$f_{1,\alpha,k} = 0,00 \quad f_{1,\alpha,k} = 0,00$

$F_{ax,\alpha,Rk} = 0,00$

$n_{ef} = 0,00$

$F_{ax,\alpha,Rk} = 0,00 \text{ N/Stk}$

0,00 kN/Stk

$F_{ax,\alpha,Rk,ner} = 0,00 \text{ N}$ für die wirksame Anzahl

berücksichtigt **0,00 %**

Datum: 11.05.2012

BV: Zugprüfung

Bauteil: Probekörper

SDÜ Stahl-Holzverbindung-zweischnittg Bleche außen (EN 1995-1-1:2004)

d > 6mm; dünne oder dickes Blech

Charakteristische Widerstände
für ein Verbindungsmittel:

Lochleibung im Mittelholz 5343,4 N
LL Holz+2x Fließgelenk 5561,0 N

Designwerte der Widerstände:

4274,7 N mit $\gamma_m = 1,25$
5055,5 N mit $\gamma_m = 1,10$

$$F_{v,Rk} = \begin{cases} 0,5 f_{h,2,k} * t_2 * d \\ 2,3 * \sqrt{M_{y,Rk} * f_{h,2,k} * d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} \text{ für dickes Blech} \\ 1,15 * \sqrt{2 * M_{y,Rk} * f_{h,2,k} * d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} \text{ für dünnes Blech} \end{cases} F_{v,Rd} = \frac{k_{mod} * F_{v,Rk}}{\gamma_m}$$

EN 1995-1-1:2004 8.2.2

maßgebender Verbindungsmittelwiderstand:

$R_{vd} = 4274,69$ N/Scherfuge

$R_{vd} = 4,27$ kN/Scherfuge

Wirksame Verbindungsmittellanz.:

$n_{ef,1} = 1,47$

$$n_{ef} = \left[\min \left\{ n; n^{0,9} * \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \right\} \right] * \frac{90 - \alpha}{90} + n * \frac{\alpha}{90}$$

EN 1995-1-1:2004 8.5.1(4)

Tragfähigkeit pro Stück:

(pro Scherfuge)

$$R_{vd,VM} = \frac{R_{vd} * n_{ef}}{\text{Anz pro Reihe}}$$

$R_{vd,VM} = 3,14$ kN/VM

Tragfähigkeit der Verbindung:

$$\frac{N_d}{R_d} = \frac{N_{vd}}{2 * n_{ef} * r * R_{v,d}} \leq 1$$

$R_d = 75,38$ kN

$N_d = 68,00$ kN

0,90

< 1,00

Nachweis erbacht !

Ausnutzungsgrad: 90,21%

OK

C.3 Dokumentation Verklebung Zugversuche

Verklebung Zugversuche Roboter

26.05.2011

mit Herrn Pfeifer Fa. Purbond

Holzfeuchte

Kerto: ca 12%

BSP: ca 11%

Raumklima:

Temperatur: 21° (Werte in der Werkstatt)

Luftfeuchte: ca 41%

Alter der Oberfläche :

BSP Variante B und C: gefräst in Zeltweg HIZ 19 und 20.05 2011
Lagerung von 20-26.5 abgedeckt in der Halle
Lagerung vorher in der Klimakammer für 5 Monate

Variante A und D: gefräst in Zeltweg HIZ am 23.05 2011
Lagerung von 24-26.5 abgedeckt in der Halle
Lagerung vorher in der Klimakammer für 5 Monate

Kerto: Am 25.05. gehobelt Lagerung in der Klimakammer bei 20° und 65% LF

Proben:

Variante	Bezeichnung	Kleber	Beleimung	Verarbeiter
A	VA01	Purbond HBS 309	2g	Pfaller
A	VA02	Purbond HBS 309	2g	Pfaller
A	VA03	Purbond HBS 309	2g	Pfaller
A	VA04	Purbond HBS 309	2h	Pfaller
A	VA05	Purbond HBS 309	2h	Pfaller
A	VA06	Purbond HBS 309	2h	Pfaller
B	VB01	Purbond HBS 309	2h	Pfaller
B	VB02	Purbond HBS 309	2g	Pfaller
B	VB03	Purbond HBS 309	2g	Pfaller
B	VB04	Purbond HBS 309	2g	Pfaller
B	VB05	Purbond HBS 309	2g	Pfaller
B	VB06	Purbond HBS 709	2t	Pfeifer
C	VC01	Purbond CR421	verfüllt	Pfaller
C	VC02	Purbond CR421	verfüllt	Pfaller
C	VC03	Purbond CR421	verfüllt	Pfaller
C	VC04	Purbond CR421	verfüllt	Pfeifer
C	VC05	Purbond CR421	verfüllt	Pfeifer
C	VC06	Purbond CR421	verfüllt	Pfeifer
D	VD01	Purbond HBS 709	2g	Pfaller
D	VD02	Purbond HBS 709	2g	Pfaller
D	VD03	Purbond HBS 709	2g	Pfeifer
D	VD04	Purbond HBS 709	2g	Pfaller
D	VD05	Purbond HBS 709	2g	Pfaller
D	VD06	Purbond HBS 709	2g	Pfaller

Beleimungsarten:

2g	Lasche und Schlitz wurden mit feiner Zahnpachtel vollständig beleimt
2h	Lasche wurde vollständig beleimt, Schlitz nur von Unterkante bis ca. halbe Höhe
2t	Lasche wurde vollständig beleimt, Schlitz nur teilweise
verfüllt	ca. 490 ml CR421 wurde in den Schlitz eingegossen und dann die Lasche eingebracht. Bentzung der Lasche wurde durch nochmaliges Anheben kontrolliert

Planmässige erforderliche Klebermenge (Volumen)

Variante	geplantes Volumen der Klebefuge	
A	$V = ((3,6 * 1,65) * 2 + (0,525 + 0,435) * 0,5 * 1,65 * 2) * 0,0025 =$	0,0337 dm ³
	pro Lasche:	33,66 ml
B	$V = ((3,6 * 1,65) * 2 + (0,525 + 0,385) * 0,5 * 1,65 * 2) * 0,0025 =$	0,0335 dm ³
	pro Lasche:	33,45 ml
C	$V = (3,6 * 1,65 * 2 + 0,56 * 1,65 * 2) * 0,02 =$	0,2746 dm ³
	pro Lasche:	274,56 ml
D	$V = (3,6 * 1,65 * 2 + 0,46 * 1,65 * 2) * 0,005 =$	0,0670 dm ³
	pro Lasche:	66,99 ml

Planmässiger Verbrauch:

	Soll	Ist	
HBS 309	369,23 ml	1206,90 ml	entspricht 1 3/4 Flaschen
HBS 709	435,39 ml	862,07 ml	entspricht 1 1/4 Flaschen
CR421	1647,36 ml	2666,67 ml	entspricht 5 1/3 Gebinde

Flascheninhalt:

HBS309 und 709:	800g =	689,66 ml	1,16g/ml
CR421:	550g =	500,00 ml	1,10g/ml

C.4 Dokumentation Bruchursache Zugversuche

09.06.2011

Zugprüfung Zwick

Variante	Bezeichnung	Lasche	Kleber	Beleimung	Verarbeiter	Kraft	Versagen I/Ort	Versagen Z/Ort	Zustand Klebefuge vorher
A	VA01	o		2g	Pfaller	25,87 kN	Klebefuge schlecht	--	1/4 schlecht sonst gut
A	VA01	u				15,99 kN	Klebefuge schlecht	Klebefuge	1/4 schlecht sonst gut
A	VA02	o	Purbond HBS 309	2g	Pfaller	40,34 kN	Lasche Fichte+Kerto	--	gut
A	VA03	o	Purbond HBS 309	2g	Pfaller	38,68 kN	Lasche Fichte	Klebefuge	1/4 schlecht sonst gut
A	VA03	u				23,26 kN	Klebefuge schlecht	Klebefuge	gut
A	VA04	o	Purbond HBS 309	2h	Pfaller	21,59 kN	Klebefuge	--	mittel-gut
A	VA04	u				32,50 kN	Lasche Fichte + Klebefuge	--	gut
A	VA04	u				31,42 kN	Kerto fuge Holzbruch	--	gut
A	VA05	o	Purbond HBS 309	2h	Pfaller	33,60 kN	Lasche Fichte	--	gut
A	VA05	u				32,29 kN	Klebefuge	--	gut
A	VA06	o	Purbond HBS 309	2h	Pfaller	32,74 kN	Klebefuge	--	gut
A	VA06	u				25,68 kN	Klebefuge	--	gut/holz. Rissig
B	VB01	o	Purbond HBS 309	2h	Pfaller	36,05 kN	Klebefuge	--	gut
B	VB01	u				39,19 kN	Kerto Querzug	Lasche Fichte	gut
B	VB02	o	Purbond HBS 309	2g	Pfaller	38,67 kN	Klebefuge	--	gut
B	VB02	u				35,51 kN	Kerto Lasche Schub+Lasche Fichte	--	gut
B	VB03	o	Purbond HBS 309	2g	Pfaller	43,15 kN	Klebefuge	--	k.A
B	VB03	u				34,19 kN	Lasche Fichte Bruch (schlechte Qualität)	--	k.A
B	VB04	o	Purbond HBS 309	2g	Pfaller	42,56 kN	Kerto Lasche Querzug	Klebefuge, Lasche Fichte	gut
B	VB04	u				46,42 kN	Kerto Lasche + Klebefuge (Holzbruch?)	--	gut
B	VB05	o	Purbond HBS 309	2g	Pfaller	35,49 kN	Kerto Lasche Querzug	Kerto Schub	gut
B	VB05	u				30,77 kN	Klebefuge+Lasche Fichte	--	gut
B	VB06	o	Purbond HBS 709	2t	Pfeifer	30,18 kN	Klebefuge	--	gut
B	VB06	u				39,00 kN	Klebefuge (gut)	--	einefuge Schlecht sonst gut
C	VC01	o	Purbond CR421	verfüllt	Pfaller	26,46 kN	Klebefuge	--	einefuge Schlecht sonst gut
C	VC01	u				33,99 kN	Hirnholzverklebung dann Lasche Kerto	Lasche Fichte und Klebefuge	symmetrisch, eine Fuge schlecht, Blasen
C	VC02	o	Purbond CR421	verfüllt	Pfaller	30,36 kN	Hirnholzverklebung	Klebefuge	symmetrisch stark, sonst gut
C	VC02	u				36,90 kN	Hirnholzverklebung	Klebefuge	symmetrisch, eine Fuge schlecht, Blasen
C	VC03	o	Purbond CR421	verfüllt	Pfaller	36,37 kN	Lasche Fichte Verklebung - Bsp: 2mal	Klebefuge	symmetrisch, sonst gut
C	VC03	u				34,39 kN	Hirnholzverklebung dann Holz Lasche Fichte	Klebefuge	symmetrisch, kleine Blasen
C	VC04	o	Purbond CR421	verfüllt	Pfeifer	34,72 kN	Hirnholzverklebung	Kerto, Lasche Fichte	symmetrisch stark, sonst gut
C	VC04	u				37,12 kN	Hirnholzverklebung	Lasche Fichte Bruch	asymmetrisch stark, kleine Blasen
C	VC05	o	Purbond CR421	verfüllt	Pfeifer	33,89 kN	Hirnholzverklebung	Klebefuge schlecht	symmetrisch, eine Fuge schlecht, Blasen
C	VC05	u				31,89 kN	Hirnholzverklebung	Holz Lasche Fichte	symmetrisch, gut
C	VC06	o	Purbond CR421	verfüllt	Pfeifer	35,83 kN	Hirnholzverklebung	Kerto Querzug, Kerto im Bereich dleicht	asymmetrisch, sonst gut
C	VC06	u				32,80 kN	Hirnholzverklebung	Holz Lasche Fichte bei Fuge	symmetrisch, kleine Fehlstelle

D	VD01	o	Purbond HBS 709	2g	Pfaller	14,48 kN Klebefuge	Lasche Fichte	schlecht
D	VD01	u				16,18 kN Klebefuge	Klebefuge	schlecht
D	VD02	o	Purbond HBS 709	2g	Pfaller	32,13 kN Lasche Fichte	Klebefuge	1/4schlecht-sonst gut
D	VD02	u				13,49 kN Klebefuge	Klebefuge	schlecht
D	VD03	o	Purbond HBS 709	2g	Pfeifer	35,30 kN Querszug Kerto	Lasche Fichte	gut
D	VD03	u				37,78 kN Kerto	Klebefuge	gut
D	VD04	o	Purbond HBS 709	2g	Pfaller	12,96 kN Klebefuge	Lasche Fichte	1/4schlecht-sonst gut
D	VD04	u				12,07 kN Lasche Fichte(Querszug)(asymmetrische Last)	Lasche Fichte	1/4 Abbundfehler-sonst gut
D	VD05	o	Purbond HBS 709	2g	Pfaller	25,14 kN Lasche Fichte	Klebefuge	gut
D	VD05	u				29,60 kN Klebefuge	--	gut
D	VD06	o	Purbond HBS 709	2g	Pfaller	26,64 kN Lasche Fichte +Klebefuge	--	mittel-gut
D	VD06	u				25,13 kN Klebefuge und Lasche Fichte	--	schlecht

Beleimungsarten:

2g	Lasche und schlitz wurden mit feiner
2h	Lasche wurde vollständig beleimt,
2t	Lasche wurde vollständig beleimt,
verfüllt	ca. 490 ml CR421 wurde in den Schlitz Benzung der Lasche wurde durch

C.5 Delaminierungsprüfung Zugversuche (Firma Purbond)



Prüfbericht

Beurteilung der Verklebungsqualität von stahllosen Holzverbindungsmiteln

Gegenstand	Bauteil	Varianten
	<ul style="list-style-type: none"> • Mit Kerto-Feder längs verbundene Bohlen aus Fichte-Dreischichtplatten 	<ul style="list-style-type: none"> • A: Keilförmig flach • B: Keilförmig steil • C: Parallel Fuge 2 mm
Prüfdatum	21./22.07.2011	
Prüfstelle	Purbond AG CH-6203 Sempach Station Industriestrasse 17a Switzerland Tel +41 (0)41 469 6860 Fax +41 (0)41 469 6870 E-Mail: info@purbond.com	
Verfasser	Dario Salzgeber, Purbond Technik Thomas Roos, Purbond Entwicklung	
Datum	22.07.2011	

Adhesive systems for engineered wood

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	2
2	METHODIK	2
2.1	Normenverweis.....	2
2.2	Prüfkörper.....	2
	RESULTATE UND DISKUSSION	4
2.3	Maximale Fugendicken.....	4
2.4	Delaminierungsprüfung.....	5
3	FOTOS	7

Adhesive systems for engineered wood

1 Einleitung

Purbond hat von der TU Graz den Auftrag erhalten, drei Varianten von stahllosen Holz-Holz Verbindungen (Kerto-Feder) auf ihre Verklebungsqualität zu prüfen.

2 Methodik

2.1 Normenverweis

Die Delaminierungsprüfung wurde nach DIN EN 391, Verfahren B durchgeführt und ausgewertet. Abweichung von der Norm: Die Prüfkörper wurden als ganze Bauteile getestet, d.h. sie wurden nicht entlang der Klebstoffuge in 75 mm lange Stücke geschnitten, wie in der Norm vorgegeben. Nach der Prüfung, zur Bewertung, wurde jedes Bauteil in 5 Stücke à 70 mm geschnitten, wobei die Querschnitte der mittleren drei Prüfkörper auf Delaminierung hin bewertet wurden (vgl. Abbildung 2). In die Bewertung der Delaminierung wurden nur die Fugen einbezogen, bei welchen die Fasern der Fügeiteile in parallelen Ebenen verlaufen. D.h. Delaminierte Fugen, bei denen Hirnholz verklebt wurde, wurden nicht gewertet.

2.2 Prüfkörper

Getestet wurden insgesamt drei Varianten à drei Prüfkörper:

Tabelle 1: Prüfkörper

	Bezeichnung	Kurzbeschreibung Variante	Kleber
Variante A:	VA 01/m	Keilförmig flach	HBS 309
	VA 02/m		HBS 309
	VA 06/m		HBS 309
Variante B:	VB 04/m	Keilförmig steil	HBS 309
	VB 05/m		HBS 309
	VB 06/m		HBS 709
Variante C:	VC 03/m	Parallel Fuge 2mm	CR421
	VC 05/m		CR421
	VC 06/m		CR421

Die Prüfkörper bestehen aus zwei Dreischichtplatten, die in der Mitte (längs) gestossen und mit einer Art Feder aus Kerto miteinander verbunden sind.



Abbildung 1: Prüfkörper – Links: „VA“ 01, 02, 06; Mitte: „VB“ 04, 05, 06; Rechts: „VC“ 03, 05, 06

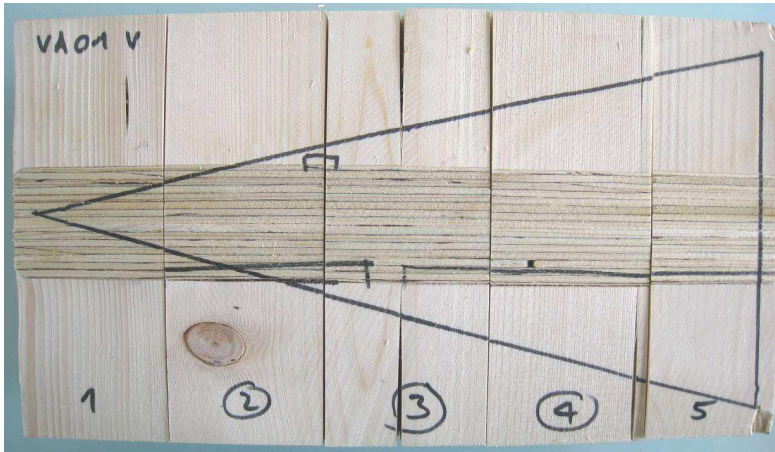


Abbildung 2: Aufgeschnittenes Bauteil VA 01 zur Bewertung der Delaminierung der Fugen im Querschnitt. Bewertet wurden die Fugen der Prüfkörper 2, 3 und 4.

Adhesive systems for engineered wood

Resultate und Diskussion

2.3 Maximale Fugendicken

Tabelle 2: Maximale Fugendicken vor der Delaminierungsprüfung

Prüfkörper	Maximale Fugendicke
VA 01/m	0.3 mm
VA 02/m	0.3 mm
VA 06/m	0.3 mm
VB 04/m	0.1 mm
VB 05/m	0.1 mm
VB 06/m	0.3 mm
VC 03/m	2.4 mm
VC 05/m	2.7 mm
VC 06/m	3.2 mm

Die Fugendicken wurden an den Längsfugen gemessen und nicht an den Querschnitten, wo die Bewertung der Delaminierung vorgenommen wurde.

Die Fugendicken sind vor allem da entscheidend, wo das 1-K PURBOND HB S Produkt zum Einsatz kam. Die Anforderungen an die Maximale Fugendicken (≤ 0.3 mm) wurden durchwegs erfüllt

2.4 Delaminierungsprüfung

Tabelle 3: Resultate der Delaminierungsprüfung

Prüfkörper Nr.	PURBOND Klebstoff Typ	Fugenlänge Total [mm]	Delaminierung		
			[mm]	[%]	
VA 01/m	HB S309	280	2	0	0
			3	0	0
			4	0	0
			Ø	0	0
VA 02/m			2	0	0
			3	0	0
			4	0	0
			Ø	0	0
VA 06/m			2	0	0
			3	0	0
			4	0	0
			Ø	0	0
VB 04/m	2	0	0		
	3	0	0		
	4	0	0		
	Ø	0	0		
VB 05/m	2	0	0		
	3	0	0		
	4	0	0		
	Ø	0	0		
VB 06/m	2	0	0		
	3	0	0		
	4	0	0		
	Ø	0	0		
VC 03/m	CR 421	280	2	0	0
			3	0	0
			4	0	0
			Ø	0	0
VC 05/m			2	0	0
			3	3	1
			4	0	0
			Ø	1	0.3
VC 06/m			2	0	0
			3	0	0
			4	0	0
			Ø	0	0

Der Prozentsatz der Delaminierung beträgt bei 26 von 27 Prüfkörpern 0% (Ausnahme VC 05-3).
 Delaminierung hat fast ausschliesslich dort stattgefunden, wo Stirnholz verklebt wurde (vgl. Abbildung 3 und 7-12). Dieser Anteil wurde nicht als Delaminierung gewertet.

Adhesive systems for engineered wood

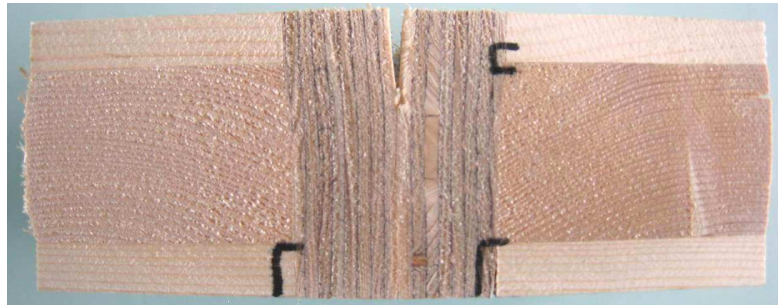


Abbildung 3: Markierte Delaminierungen (VA 01-2)

Die Kertoplatte hat den Spannungen oftmals nicht standgehalten und ist teilweise über die gesamte Länge aufgerissen (vgl. Abbildungen 3 und 7-12).

Stumpfe Verklebungen, bei denen mindestens eine Fügefläche Hirnholz ist, sind generell problematisch.

Vom Gesichtspunkt der Delaminierungsbeständigkeit her betrachtet, sind die geprüften Bauteile als sehr beständig einzustufen. Da Hirnholzverklebungen bei starker Beanspruchung durch Wasseraufnahme und Trocknung nicht beständig sind, müsste die Bemessung der Bauteile möglicherweise unter Ausschluss dieses Bereichs des Querschnitts erfolgen.

Ein Vergleich der unterschiedlichen Varianten ist aufgrund der vorliegenden Daten nicht möglich.

3 Fotos



Abbildung 4: Bauteile „VA“ vor der Delaminierungsprüfung



Abbildung 5: Bauteile „VB“ vor der Delaminierungsprüfung

Adhesive systems for engineered wood

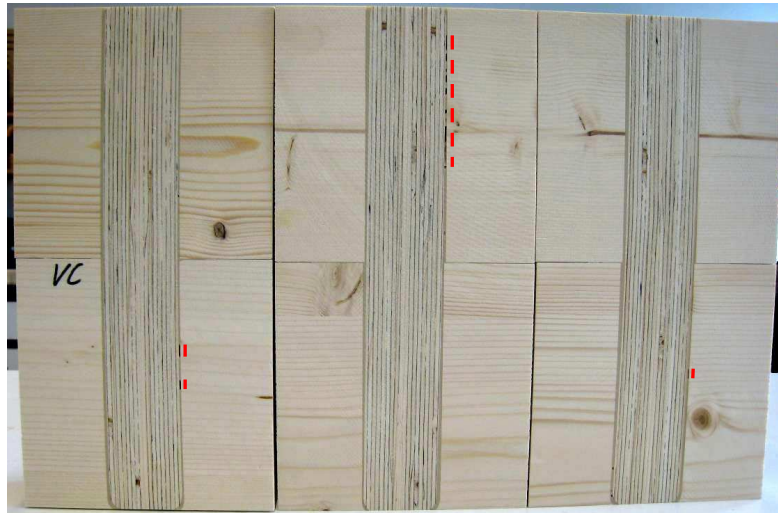


Abbildung 6: Bauteile „VC“ vor der Delaminierungsprüfung. Die roten Markierungen zeigen, wo sich vor der Delaminierung sichtbare Luftblasen im Klebstoff (CR 421) befinden.



Purbond AG



Abbildungen 7-12: Bauteile nach der Delaminierungsprüfung – Aufgerissene Kerto Platte, Markierte Delaminierung (nicht gewertet). „V“ = vorne, „H“ = Hinten.

Adhesive systems for engineered wood

C.6 Auswertung der Zugversuche

24.06.2011

Auswertung der Verbindung auf Schub

Schubfläche der Proben: $l_{vert}=170\text{ mm}$
 $l_{Lamelle}=39\text{ mm}$

Errechnete Schubkraft in der BSP Randlamelle

$$\tau_{BSP,d} = \frac{Z_{Lamelle,d}}{A_{Schub}} \quad \text{mit} \quad A_{Schub} = 2 * l_{Randlamelle} * l_{gew}$$

$$f_{t,BSP,d} * A_{Schub} = Z_{Lamelle}$$

$l_{Lamelle}=39\text{ mm}$
 $A_{Schub}=13260,0\text{ mm}^2$

Schubkennwerte Charakteristisch:

$f_{t,0.05,k}$	2,30 N/mm ²	$Z_{Lamelle,0.05,k}$	30,50 kN
mit $f_{t,0.24,0.05,k}$	2,70 N/mm ²	$Z_{Lamelle,0.05,k}$	35,80 kN
$f_{t,BSP,0.05,k}$	3,00 N/mm ²	$Z_{Lamelle,0.05,k}$	39,78 kN
$f_{t,BSP,0.95,k}$	4,48 N/mm ²	$Z_{Lamelle,0.95,k}$	59,35 kN

$COV_{t,d} = 0,12$
(angenommen)

		Spalte1		$Z_{Lamelle,0.05,vorn}$		$f_{t,0.05,vorn}$		Vergleich der Schubspannungen	
								$f_t=3,00\text{N/mm}^2$ $f_v=2,70\text{N/mm}^2$ $f_v=2,30\text{N/mm}^2$	
Variante A	oben	32,55 kN	2,45 N/mm ²	2,45 N/mm ²	81,8 %	90,9 %	106,7 %		
	unten	21,92 kN	1,65 N/mm ²	1,65 N/mm ²	55,1 %	61,2 %	71,9 %		
Variante B	oben	31,51 kN	2,38 N/mm ²	2,38 N/mm ²	79,2 %	88,0 %	103,3 %		
	unten	31,72 kN	2,39 N/mm ²	2,39 N/mm ²	79,7 %	88,6 %	104,0 %		
Variante C	oben	27,44 kN	2,07 N/mm ²	2,07 N/mm ²	69,0 %	76,6 %	90,0 %		
	unten	32,11 kN	2,42 N/mm ²	2,42 N/mm ²	80,7 %	89,7 %	105,3 %		
Variante D	oben	16,61 kN	1,25 N/mm ²	1,25 N/mm ²	41,8 %	46,4 %	54,5 %		
	unten	14,03 kN	1,06 N/mm ²	1,06 N/mm ²	35,3 %	39,2 %	46,0 %		

		Spalte1		$Z_{Lamelle,0.05,vorn}$		$f_{t,0.05,vorn}$		$f_t=4,48\text{N/mm}^2$	
Variante A	oben	40,01 kN	3,02 N/mm ²	3,02 N/mm ²	67,4 %	67,4 %			
	unten	32,12 kN	2,42 N/mm ²	2,42 N/mm ²	54,1 %	54,1 %			
Variante B	oben	43,00 kN	3,24 N/mm ²	3,24 N/mm ²	72,5 %	72,5 %			
	unten	44,97 kN	3,35 N/mm ²	3,35 N/mm ²	75,8 %	75,8 %			
Variante C	oben	38,26 kN	2,88 N/mm ²	2,88 N/mm ²	64,5 %	64,5 %			
	unten	37,07 kN	2,80 N/mm ²	2,80 N/mm ²	62,5 %	62,5 %			
Variante D	oben	34,45 kN	2,60 N/mm ²	2,60 N/mm ²	58,0 %	58,0 %			
	unten	36,14 kN	2,73 N/mm ²	2,73 N/mm ²	60,9 %	60,9 %			

Kurzbeschreibung der Varianten:

- Variante A Keilförmige Kerbtasche flach Winkel 1,6°
- Variante B Keilförmige Kerbtasche steil Winkel 2,4°
- Variante C Gerade Lasche mit 2mm Fubebreite
- Variante D Gerade Lasche passgenau mit Profilierung

Schubkraftauswertung

110623 Auswertung auf Schub ausgeschieden

Bez Var	Holzfeuchte [%] HF	Bruchkraft [N] Fmax	Bruchkraft [kN] Fmax	Dicke Randlamelle [mm] t	Länge Verklebung [mm] lv	Länge [mm] L	Scherfläche [mm ²] A	fvk [N/mm ²] fvk	
VA-e-01	12,421	25871,00 N	25,87 kN	39	39,015	170	13265,17	1,950	ausgeschieden
VA-e-01	11,639	15994,10 N	15,99 kN	39	39,015	170	13265,17	1,206	ausgeschieden
VA-e-02	11,553	40343,80 N	40,34 kN	39	39,015	170	13265,17	3,041	
VA-e-02	11,508	23263,60 N	23,26 kN	39	39,015	170	13265,17	1,754	
VA-e-03	11,336	38678,90 N	38,68 kN	39	39,015	170	13265,17	2,916	
VA-e-03	11,063	21590,70 N	21,59 kN	39	39,015	170	13265,17	1,628	
VA-e-04	11,138	32504,10 N	32,50 kN	39	39,015	170	13265,17	2,450	
VA-e-04	12,218	31420,30 N	31,42 kN	39	39,015	170	13265,17	2,369	
VA-e-05	11,609	33602,00 N	33,60 kN	39	39,015	170	13265,17	2,533	
VA-e-05	12,171	32287,70 N	32,29 kN	39	39,015	170	13265,17	2,434	
VA-e-06	11,518	32739,80 N	32,74 kN	39	39,015	170	13265,17	2,468	
VA-e-06	11,670	25678,60 N	25,68 kN	39	39,015	170	13265,17	1,936	
VB-e-01	12,653	36048,50 N	36,05 kN	39	39,034	170	13271,64	2,72	
VB-e-01	12,024	39188,20 N	39,19 kN	39	39,034	170	13271,64	2,95	
VB-e-02	11,559	38666,90 N	38,67 kN	39	39,034	170	13271,64	2,91	
VB-e-02	11,346	35511,30 N	35,51 kN	39	39,034	170	13271,64	2,68	
VB-e-03	11,174	43147,40 N	43,15 kN	39	39,034	170	13271,64	3,25	
VB-e-03	10,893	34191,00 N	34,19 kN	39	39,034	170	13271,64	2,58	ausgeschieden
VB-e-04	11,398	42556,20 N	42,56 kN	39	39,034	170	13271,64	3,21	
VB-e-04	10,821	46419,10 N	46,42 kN	39	39,034	170	13271,64	3,50	
VB-e-05	11,442	35493,30 N	35,49 kN	39	39,034	170	13271,64	2,67	
VB-e-05	10,997	30765,00 N	30,77 kN	39	39,034	170	13271,64	2,32	
VB-e-06	11,757	30181,60 N	30,18 kN	39	39,034	170	13271,64	2,27	
VB-e-06	11,589	38995,40 N	39,00 kN	39	39,034	170	13271,64	2,94	

VC-u-01	11,739	26464,10 N	26,46 kN	39	39,000	170	13260,00	2,00
VC-u-01	11,171	33989,80 N	33,99 kN	39	39,000	170	13260,00	2,56
VC-u-02	12,133	30361,10 N	30,36 kN	39	39,000	170	13260,00	2,29
VC-u-02	11,565	36899,40 N	36,90 kN	39	39,000	170	13260,00	2,78
VC-u-03	11,826	36360,60 N	36,36 kN	39	39,000	170	13260,00	2,74
VC-u-03	11,546	34393,00 N	34,39 kN	39	39,000	170	13260,00	2,59
VC-u-04	10,994	34720,70 N	34,72 kN	39	39,000	170	13260,00	2,62
VC-u-04	11,623	37116,10 N	37,12 kN	39	39,000	170	13260,00	2,80
VC-u-05	10,623	33888,60 N	33,89 kN	39	39,000	170	13260,00	2,56
VC-u-05	11,296	31880,30 N	31,88 kN	39	39,000	170	13260,00	2,40
VC-u-06	10,907	35827,80 N	35,83 kN	39	39,000	170	13260,00	2,70
VC-u-06	11,355	32790,90 N	32,79 kN	39	39,000	170	13260,00	2,47
VD-u-01	10,857	14482,10 N	14,48 kN	39	39,000	170	13260,00	1,09
VD-u-01	11,114	16180,60 N	16,18 kN	39	39,000	170	13260,00	1,22
VD-u-02	11,071	32131,70 N	32,13 kN	39	39,000	170	13260,00	2,42
VD-u-02	11,166	13492,80 N	13,49 kN	39	39,000	170	13260,00	1,02
VD-u-03	10,872	35032,20 N	35,03 kN	39	39,000	170	13260,00	2,64
VD-u-03	10,998	37777,40 N	37,78 kN	39	39,000	170	13260,00	2,85
VD-u-04	11,134	12955,50 N	12,96 kN	39	39,000	170	13260,00	0,98
VD-u-04	11,470	12069,60 N	12,07 kN	39	39,000	170	13260,00	0,91
VD-u-05	10,949	25136,00 N	25,14 kN	39	39,000	170	13260,00	1,90
VD-u-05	11,198	29601,30 N	29,60 kN	39	39,000	170	13260,00	2,23
VD-u-06	10,898	26643,40 N	26,64 kN	39	39,000	170	13260,00	2,01
VD-u-06	11,168	25130,50 N	25,13 kN	39	39,000	170	13260,00	1,90

Abbildungsverzeichnis

1	Einleitung	1
Abb. 1.1	Das Kunsthaus in Graz, Entwurf Peter Cook und Colin Fournier (Quelle: www.museum-joanneum.at [61])	2
Abb. 1.2	Prototyp: Entwurf „free_climber“ (Quelle: IAM-TU-Graz)	4
Abb. 1.3	Prototyp: Entwurf „Kobra“ (Quelle: IAM-TU-Graz)	5
2	Material	7
Abb. 2.1	Herstellungsschema von Brettsperrholz, aus [24].....	8
Abb. 2.2	Brettsperrholzplatte 5-schichtig.....	9
Abb. 2.3	Einsatz von BSP als Wand-, Dach- und Deckenbauteil im Bauzustand links: Bauvorhaben Volksschule Seiersberg, rechts: Bauvorhaben Sonneninsel Seekirchen (Quelle: ZT Büro Koppelhuber, Rottenmann)	9
Abb. 2.4	Standardplattenaufbauten der Firma KLH [52].....	10
Abb. 2.5	Standardplattenaufbauten Stora-Enso-CLT [58]	11
Abb. 2.6	Aufbau BSP-Platte 5-schichtig	13
Abb. 2.7	Spannungen bei BSP unter Querkraftbiegung ($E_{90}=0$)	16
Abb. 2.8	Querschnittstypen nach EN 1995-1-1, Anhang B.	17
Abb. 2.9	Allgemeine Formeln nach EN 1995-1-1 [2]	18
Abb. 2.10	Querschnittsanpassung für 3- und 5-schichtiges BSP.....	19
Abb. 2.11	BSP-Platte KLH-95-5s-DL.....	20
Abb. 2.12	BSP-Platte Stora-Enso-165-L5s.....	21
Abb. 2.13	Kerto-S-Furnierschichtholz, mit 27 mm Stärke.....	25
Abb. 2.14	Schematischer Herstellungsprozess von Kerto-Platten (Quelle Finnforest [60]).....	25
Abb. 2.15	Systematische Darstellung einer Holzverklebung (aus [35])	28
Abb. 2.16	Messung des Kontaktwinkels auf der Holzoberfläche (aus [35])	29
Abb. 2.17	Zusammenhang zwischen Kontaktwinkel und Benetzung der Oberfläche	30
Abb. 2.18	Herstellung von Verklebungen (aus [32]).....	31

Abb. 2.19	Einteilung von Klebstoffen nach dem Aushärtemechanismus (nach [36])	33
Abb. 2.20	Feuchtigkeitshärtung von 1 K-Polyurethanklebstoffen (aus [32])	34
Abb. 2.21	Gebinde und Handauftragsgerät mit Statikmischrohr für Purbond CR-421-Gießharz	37
Abb. 2.22	Aushärtecharakteristik des Purbond CR-421-Gießharzes [50]	39

3 Verbindung 41

Abb. 3.1	Übersicht Stahlverbindung	44
Abb. 3.2	Detail Holzschraube.....	44
Abb. 3.3	Holzverbindung mit fremder Feder, (Quelle: Die Schule des Tischlers; Schröder, Ch./1885)	45
Abb. 3.4	Herstellung der Verbindung: Abbund und Fügen der Einzelplatten	46
Abb. 3.5	Herstellung der Verbindung: Verkleben der Einzelplatten mit Kerto-S Holzverbindern	46
Abb. 3.6	Untersicht der fertigen Verbindung	46
Abb. 3.7	Verklebevariante „Kleberraupe“	48
Abb. 3.8	Verklebevariante „Keilleiste“	48
Abb. 3.9	Verklebevariante „Verbinder aufgetrennt“	49
Abb. 3.10	Verklebevariante „konisch“	49
Abb. 3.11	Verklebevariante „profiliert“	50
Abb. 3.12	profilierte Oberfläche des Verbinders	50

4 Bemessung 51

Abb. 4.1	Aufbau und Bezeichnungen einer 5-schichtigen Brettspertholzplatte	52
Abb. 4.2	Bezeichnungen für den 5-schichtigen Aufbau lt. BSP-Handbuch.....	54
Abb. 4.3	Systemische Darstellung der Brettspertholzplatte mit eingeklebten Kerto-Verbindern	56
Abb. 4.4	Qualitativer Spannungsverlauf einer BSP-Platte unter Biegebelastung	57
Abb. 4.5	BSP unter Biegebeanspruchung- Beanspruchung der Randlamelle	57
Abb. 4.6	Biegespannungsverteilung im Kertoverbinder	58
Abb. 4.7	Biegebemessung Verbindungsplatten-Übersicht	58
Abb. 4.8	Herstellung der Zugprüfkörper	63
Abb. 4.9	Zugprüfkörper	63

5 Versuchsprogramm Hauptversuche 67

Abb. 5.1	Plattenaufbau Stora-Enso-165-L5s	68
----------	--	----

Abb. 5.2	Verklebung der BSP-Platten für die Biegezugversuche.....	69	
Abb. 5.3	Verklebung Variante A.....	69	
Abb. 5.4	Verklebung Variante B.....	70	
Abb. 5.5	Verklebung Variante C	70	
Abb. 5.6	Verklebung Variante D	Detail: Profil des Verbinders Variante D..... 71	
Abb. 5.7	Kertoverbinder profiliert.....	71	
Abb. 5.8	Geometrie und Herstellungsschema der Zugprüfkörper	72	
Abb. 5.9	Bezeichnung der Zugprüfkörper	73	
Abb. 5.10	Geometrie der Zugprüfkörper	74	
Abb. 5.11	2-D CAD Abbundplan für die Prüfserie VA-x.....	78	
Abb. 5.12	3-D-Modell für Prüfserie VA-x	78	
Abb. 5.13	Plattenabbund im HIZ in Zeltweg	79	
Abb. 5.14	Der 7-Achs-Fräseboter im Einsatz	Das Ergebnis..... 79	
Abb. 5.15	Längsschnitt der Kertoverbinder.....	80	
Abb. 5.16	Hobellehre zur Herstellung des keilförmigen Kertoverbinders	81	
Abb. 5.17	Oberflächenprofilierung mit der Tischfräse.....	81	
Abb. 5.18	Zahnpachtel zur Beleimung der Schlitze.....	82	
Abb. 5.19	Beleimen von Schlitz und Verbinder mit der Zahnpachtel.....	83	
Abb. 5.20	Zentrisches Einbringen des Kerto-Verbinders, Einschlagen mit dem Gummihammer.....	83	
Abb. 5.21	Verklebevariante C: 2K-PU-Gießharz Purbond CR-421	84	
Abb. 5.22	Prüfserien für die Biegezugversuche nach dem Verkleben	85	
Abb. 5.23	Auftrennschema für die Zugversuche	85	
Abb. 5.24	Prüfaufbau Zugprüfung	86	
Abb. 5.25	Prüfaufbau-Zugversuche, Zwick-Universalprüfmaschine.....	87	
Abb. 5.26	Beispielhaftes Kraft-Weg-Diagramm für die Prüfserie VB-o.....	87	
Abb. 5.27	Montage der Stahlteile zur Lasteinleitung	88	
Abb. 5.28	Holzfeuchteverteilung der Zugversuche	89	
Abb. 5.29	Vorwiegende Bruchursache Schubversagen im Bereich der Klebefuge (meistens Holzbruch).	90	
Abb. 5.30	Mischbruch des Prüfkörpers VB-u-03 (Zug- und Schubversagen)	90	
Abb. 5.31	Bruchflächen des Prüfkörpers VB-u-03	Holzfaserverlauf auf der Bruchfläche	91
Abb. 5.32	a) Kerto-Querzugversagen.	b) Holzbruch an lokaler Fehlstelle (Ast) 91	

Abb. 5.33	Holzfaserbelag auf der Klebefläche- Beurteilung als Holzbruch	92
Abb. 5.34	Vorwiegend Kleberversagen- Beurteilung als Klebstoffversagen	93
Abb. 5.35	Klebefugenanalyse visuell	93
Abb. 5.36	Klebefugenstärke unter Mikroskop	94
Abb. 5.37	BOX Plot Darstellung	95
Abb. 5.38	Ergebnis der statistischen Auswertung der Zugversuche bezüglich der Schubfestigkeit.....	98
Abb. 5.39	Baustatisches Modell zur Vorbemessung der Biegeprüfplatten	101
Abb. 5.40	Plattenaufbau KLH-95-5s-DL	102
Abb. 5.41	Bemessungsergebnis für die Biegeprüfplatten für 1,0 m Breite	105
Abb. 5.42	Prüfserie V0-0-A-p-u-085 und V0-0-A-p-u-085-Rand	109
Abb. 5.43	Prüfserie V0-0-A-p-u-265	109
Abb. 5.44	Prüfserie V0-0-A-p-u-800	110
Abb. 5.45	Prüfserie V0-0-A-p-o-800	110
Abb. 5.46	Prüfserie V0-08-A-p-u-800	111
Abb. 5.47	Prüfserie V0-0-C-p-u-800	111
Abb. 5.48	Prüfserie V30-0-A-p-u-800	112
Abb. 5.49	Prüfserie V30-0-A-n-u-800	112
Abb. 5.50	CNC-Abbundanlage Tischlerei Freissling, Sebersdorf (Quelle: Tischlerei Freissling)	114
Abb. 5.51	Dokumentation der Verklebung für die Prüfkfiguration V0-A-p-o-800	116
Abb. 5.52	Lagerung der BSP-Platten in der Klimakammer Druckluftreinigung der Schlitze	117
Abb. 5.53	Winkelschnitt des Verbinders Fertige Verbinder für Konfiguration V-30	118
Abb. 5.54	Prüfen der Passgenauigkeit vor dem Verkleben (Verklebevariante A)	118
Abb. 5.55	Beileimen von Schlitz und Verbinder der Biegeprüfplatten mit der Zahnpachtel	119
Abb. 5.56	Zentrisches Einbringen des Kerto-Verbinders	119
Abb. 5.57	Konfiguration V30-0-A-n-u	120
Abb. 5.58	Konfiguration V30-0-A-p-u	120
Abb. 5.59	Auftrennschema der Probekörper	121
Abb. 5.60	Biegeprüfung 0° und angebrachte Messpunkte	123
Abb. 5.61	Biegeprüfung Konfiguration V0° mit 800 mm Breite	124
Abb. 5.62	Biegeprüfung Konfiguration V0° mit Breite 85 mm; Messlatte mit Wegaufnehmern und Dehnungsmessern	124
Abb. 5.63	Biegeprüfung V-30-0-A-p-u-800	125

Abb. 5.64	Bilder Biegeprüfung Konfiguration V30-0-A-p-u-800	125
Abb. 5.65	Bilder Biegeprüfung Konfiguration V30-0-A-p-u-800; Auflager und Lasteinleitung	126
Abb. 5.66	Biegeprüfung V-30-A-n-u-800	126
Abb. 5.67	Bilder Biegeprüfung Konfiguration V30-0-A-n-u-800	127
Abb. 5.68	Bilder Biegeprüfung Konfiguration V30-0-A-n-u-800; Untersicht, Wegaufnehmer	127
Abb. 5.69	Beispielhaftes Kraft-Zeit-Diagramm	128
Abb. 5.70	Vorbereiten der Prüfkörper (V30-0-A-p-u-800)	129
Abb. 5.71	Holzfeuchteverteilung der Verbindungsplatten	130
Abb. 5.72	Biegebruch Kertverbinder	132
Abb. 5.73	Querzugversagen Kertverbinder	132
Abb. 5.74	Wenig Holzfaserverbelag bei Querzugversagen des Kertverbinders	132
Abb. 5.75	Schubbruch der Kertverbinder	133
Abb. 5.76	Biegebruch BSP-Platte im Nettoquerschnitt	133
Abb. 5.77	Biegebruch BSP-Platte im Bruttoquerschnitt	133
Abb. 5.78	BSP Rollschubversagen	134
Abb. 5.79	Versagen der Klebefuge	134
Abb. 5.80	Verteilung der Bruchursachen für die Varianten V0° (für 187 bewertete Verbinder, lt. Tab. 5.9)	135
Abb. 5.81	Verteilung der Bruchursachen für die Varianten V30° (für 78 bewertete Verbinder, lt. Tab. 5.10)	136
Abb. 5.82	Kraft- Zeit Diagramm für V0-A-p-u-800-01	137
Abb. 5.83	Kraft Weg Diagramm bis Lastniveau 0,4* Fest (45kN) für WA10 und WA20 für Prüfkörper V0-0-A-p-u-800-01	138
Abb. 5.84	Idealisiertes Kraft-Weg-Diagramm in Anlehnung an EN 26891	138
Abb. 5.85	Graphische Darstellung der Steifigkeitswerte	141
Abb. 5.86	BOX Plot Darstellung	141
Abb. 5.87	Statisches System der Biegeprüfkongfiguration mit Drehfeder	142
Abb. 5.88	Geometrieverhältnisse der Biegeprüfkongfiguration mit Messpunkten	143
Abb. 5.89	Biegesteifigkeit Elcalc für Belastungsast 1 der Verbindungsplatten	148
Abb. 5.90	Drehfedersteifigkeit Kcalc für Belastungsast 1 der Verbindungsplatten	148
Abb. 5.91	Gesamtauswertung Verbindungsplatten Ast 1	149
Abb. 5.92	Biegesteifigkeit Elcalc für Belastungsast 2 der Verbindungsplatten	151
Abb. 5.93	Drehfedersteifigkeit Kcalc für Belastungsast 1 der Verbindungsplatten	151

Abb. 5.94	Gesamtauswertung Verbindungsplatten Ast 2.....	152
Abb. 5.95	Bruchkräfte der Verbindungsplatten (Prüfserien) für einen 1 m breiten Plattenstreifen....	154
Abb. 5.96	Baustatisches Modell zur Spannungsermittlung der Biegeprüfplatten.....	156
Abb. 5.97	Querschnitt des Verbinders.....	157
Abb. 5.98	Biegerandspannung im BSP-Bruttoquerschnitt.....	165
Abb. 5.99	Biegerandspannung im BSP-Nettoquerschnitt	166
Abb. 5.100	Biegerandspannung im Kertoverbinder	167
Abb. 5.101	Schubspannung im Kertoverbinder (Randlamelle)	168
Abb. 5.102	Zunehmende Homogenisierung bei steigender Anzahl von Verbindern	169
Abb. 5.103	Aufbau KLH-BSP-95-5s-DL.....	170
Abb. 5.104	Breitenvergleich der Brettlamellen	171
Abb. 5.105	Baustatisches Modell Biegeversuche Referenzplatten	172
Abb. 5.106	Prüfaufbau Referenzplatten	176
Abb. 5.107	Biegeprüfung der Referenzplatten: Wegaufnehmer zur Verformungsmessung; Prüfkörper unter Biegebeanspruchung (Breite 85 mm)	177
Abb. 5.108	Beispielhaftes Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfserie VO-R-800	178
Abb. 5.109	Holzfeuchteverteilung der Referenzplatten	180
Abb. 5.110	Biegebrüche an lokalen Fehlstellen: Kernast; Biegebruch im Bereich der Keilzinkung ...	181
Abb. 5.111	Rollschubbruch im Auflagerbereich	181
Abb. 5.112	Idealisiertes Kraft-Weg-Diagramm in Anlehnung an EN 26891	182
Abb. 5.113	Statisches System Biegeprüfung-Referenzplatten-global	183
Abb. 5.114	Statisches System Biegeprüfung Referenzplatten- lokal.....	184
Abb. 5.115	Biegesteifigkeit Elm,g,clt für Belastungsast 1 der Referenzplatten	188
Abb. 5.116	Biegesteifigkeit Elm,g,clt Für Belastungsast 1	188
Abb. 5.117	Biegesteifigkeit Elm,g,clt für Belastungsast 2 der Referenzplatten	189
Abb. 5.118	Biegesteifigkeit Elm,g,clt Für Belastungsast 2.....	189
Abb. 5.119	Aufbau und Bezeichnungen einer 5-schichtigen Brettsper Holzplatte	190
Abb. 5.120	Biegerandspannung Referenzplatten-Serienauswertung	193
Abb. 5.121	Biegerandspannung Referenzplatten-Gesamtauswertung.....	194

6 Schlussfolgerung auf Basis der Versuche 195

7 FWF-Prototyp „Kobra“ 197

Abb. 7.1	Entwurf des Prototypen als glatte Fläche (Quelle: IAM-TU-Graz)	197
Abb. 7.2	a) Symmetrieffläche der Struktur b) Hauptfugen zur Übertragung der Lasten (rot) (Quelle: IAM-TU-Graz)	198
Abb. 7.3	Kertverbinder in den Verbindungsfugen (Quelle: IAM-TU-Graz)	198
Abb. 7.4	Zerlegung der Struktur in Dach- Mittel- und Basisteil (von links nach rechts). (Quelle: IAM-TU-Graz)	199
Abb. 7.5	Abbund der Rüstung auf der CNC-Anlage, die fertige Rüstung. (Quelle: IAM-TU-Graz)	199
Abb. 7.6	Aussteifung der Rüstung vor der Verklebung des Bauteils (Quelle: IAM-TU-Graz)	200
Abb. 7.7	Zuordnung Schlitz-Verbinder auftragen des 1K-PU-Klebstoffs (Purbond HB-S709) (Quelle: IAM-TU-Graz)	200
Abb. 7.8	Die Verklebung des Basisteils (Quelle: IAM-TU-Graz).....	200
Abb. 7.9	Dach und Mittelteil Basisteil bei der Verladung auf den LKW (Quelle: IAM-TU-Graz)	201
Abb. 7.10	abladen der Teile Der Basisteil auf dem Stahlrahmen (Quelle: IAM-TU-Graz)	201
Abb. 7.11	einrichten und fixieren der beiden Teile in der Endlage (Quelle: IAM-TU-Graz)	201
Abb. 7.12	Durch Stahlstützen wurden die Bauwerksteile in der Sollage fixiert	202
Abb. 7.13	ableben der Fugen Einfüll- und Auslaufbohrungen	202
Abb. 7.14	Verbinder mit Entlastungsbohrungen mechanische Sicherung der Klebebänder .	203
Abb. 7.15	mechanische Sicherung der Klebebänder Messung der Holzfeuchte	203
Abb. 7.16	verkleben eines Verbinders	204
Abb. 7.17	verschließen der Kontrollbohrungen verschließen der Einfüllöffnungen.....	204
Abb. 7.18	herstellen der Baustellenverklebung	205
Abb. 7.19	„Kobra“ (Quelle: IAM-TU-Graz).....	205
Abb. 7.20	„Kobra“ (Quelle: IAM-TU-Graz).....	206
Abb. 7.21	„Kobra“ (Quelle: IAM-TU-Graz).....	206
Abb. 7.22	Detail Holz-Holzverbindung	207
Abb. 7.23	Detail Holz-Holzverbindungverbindung	207

8 Ausblick

209

Tabellenverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Material	7
Tab. 2.1	Steifigkeiten der verwendeten Brettsperrholzplatten lt. Zulassung [20] und [21]	13
Tab. 2.2	Tabellarische Ermittlung der Biegesteifigkeit einer 5-schichtigen BSP-Platte.....	14
Tab. 2.3	Schubkorrekturfaktoren k_{10} und $k_{14,4}$ von BSP mit gleichen Schichtstärken für verschiedene Schubmodulverhältnisse	15
Tab. 2.4	Steifigkeiten und Schubkorrekturfaktor für KLH-95-5s-DQ	20
Tab. 2.5	Steifigkeiten und Schubkorrekturfaktor für CLT-165-L5s.....	21
Tab. 2.6	Relevante Festigkeitskennwerte für BSP lt. [24]	21
Tab. 2.7	Relevante Festigkeitskennwerte lt. Produktzulassung [20] und [21].....	22
Tab. 2.8	Steifigkeiten der verwendeten Kerto-S Platten lt. Zulassung [19]	26
Tab. 2.9	Relevante Festigkeitskennwerte Kerto-S	26
Tab. 2.10	Technische Anforderungen an Holzklebstoffe [35].....	31
Tab. 2.11	Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe (Quelle: FA. Purbond, Technische Datenblätter)..	37
3	Verbindung	41
4	Bemessung	51
Tab. 4.1	Festigkeitswerte für die Biegebemessung der Prüfkörper	62
Tab. 4.2	Festigkeitswerte für die Biegebemessung der Prüfkörper	65
5	Versuchsprogramm Hauptversuche	67
Tab. 5.1	Prüfserien Zugversuche.....	74

Tab. 5.2	Zugversuche, Auswertung der Prüfserien, Bruchkräfte.....	95
Tab. 5.3	Zugversuche, Auswertung der Prüfserien, Schubspannung	96
Tab. 5.4	Zugversuche, Auswertung der Prüfserien, Schubspannungsvergleich	97
Tab. 5.5	Erwartete Kräfte für die Biegeprüfungen	106
Tab. 5.6	Fest Bruchwerte für die Verbindungsplatten lt. EN 26 891	106
Tab. 5.7	Biegeprüfkonfigurationen Übersicht	113
Tab. 5.8	Kostenaufstellung (Nettopreise) für den Abbund der Versuchsplatten	114
Tab. 5.9	Auswertung der Bruchursachen der Verbindungsplatten V0°.....	134
Tab. 5.10	Auswertung der Bruchursachen der Verbindungsplatten V30°.....	135
Tab. 5.11	Berechnung der Relativen Kräfte und der zugehörigen Verschiebungen für Prüfkörper 01 der Konfiguration V0-0-A-p-u-800	139
Tab. 5.12	ks-Werte nach EN 14358.....	140
Tab. 5.13	Geometrie Eingangswerte zur Ermittlung der Feder- und Biegesteifigkeit.....	144
Tab. 5.14	Steifigkeiten der KLH-Brettsperrholzblatten lt. Zulassung [20]	144
Tab. 5.15	Schubkorrekturfaktor und errechnete Schubsteifigkeit für die BSP-Platte	144
Tab. 5.16	Kräfte und Verschiebungen zur Ermittlung der Feder- und Biegesteifigkeit für Versuch V0-0-A-p-u-800-01	145
Tab. 5.17	Biegesteifigkeit und Federsteifigkeit errechnet	145
Tab. 5.18	Einfluss der Verformungsmessung auf die errechneten Steifigkeiten	146
Tab. 5.19	Einfluss der Verformungsmessung auf die errechneten Steifigkeiten	146
Tab. 5.20	Auswertung der Biegesteifigkeit EI und der Federsteifigkeit K für Varianten V0°; Belastungsast 1	147
Tab. 5.21	Auswertung der Biegesteifigkeit EI und der Federsteifigkeit K für Varianten V0°; Belastungsast 2	150
Tab. 5.22	Statistische Auswertung der Bruchkräfte	153
Tab. 5.23	Relevante Festigkeitskennwerte für BSP lt. [24].....	159
Tab. 5.24	Relevante Festigkeitskennwerte Kerto-S lt. [19].....	159
Tab. 5.25	Spannungsvergleich für Berechnungsbeispiel.....	159
Tab. 5.26	Spannungsauswertung der Prüfkfigurationen; 2-p-log-normalverteilt; Teil 1	161
Tab. 5.27	Spannungsauswertung der Prüfkfigurationen; 2-p-log-normalverteilt; Teil 2	162
Tab. 5.28	Spannungsauswertung der Prüfkfigurationen; t-verteilt nach EN 14358; Teil 1	163

Tab. 5.29	Spannungsauswertung der Prüfkfigurationen; t-verteilt nach EN14358; Teil 2	164
Tab. 5.30	Erwartete Kräfte für Biegeprüfung der Referenzplatten	173
Tab. 5.31	Berechnung der relativen Kräfte und der zugehörigen Verschiebungen für Prüfkörper 03 der Konfiguration V0-R-800	182
Tab. 5.32	Relative Kraft und zugehörige Verformungen für Prüfkörper V0-R-800-03	185
Tab. 5.33	Steifigkeiten nach Variante 1 für Prüfkörper V0-R-800-03.....	186
Tab. 5.34	Steifigkeiten nach Variante 2 für Prüfkörper V0-R-800-03.....	187
Tab. 5.35	Steifigkeitsermittlung für Prüfkörper V0-R-800-03-Variantenvergleich.....	187
Tab. 5.36	Biegefestigkeitskennwerte für Brettsperrholz	192
Tab. 5.37	Biegespannungsvergleich für Prüfkörper V0-R-800-03	193
6	Schlussfolgerung auf Basis der Versuche	195
7	FWF-Prototyp „Kobra“	197
8	Ausblick	209

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 | D – Diplomarbeiten | 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

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl