

Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des Holzwerkstoffproduktes Hohllamelle und dessen Anwendung im gesperrten Aufbau



M-4-6/2016

Raimund Sieder
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz



Raimund Sieder, BSc

Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des Holzwerkstoffproduktes Hohllamelle und dessen Anwendung im gesperrten Aufbau

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer
Institut für Holzbau und Holztechnologie

DI Manfred Augustin
holz.bau forschungs GmbH

Graz, März 2016

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanke, die mich im Laufe meines Ausbildungsweges begleitet haben und mir zur Seite gestanden sind.

Ich bedanke mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer für die interessanten Vorlesungen im Bereich Holzbau und der kritischen Begutachtung der vorliegenden Arbeit.

Ein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Manfred Augustin, der mich bei der Erstellung der Masterarbeit tatkräftig unterstützte und die Mitarbeit in der holz.bau forschungs gmbh ermöglichte.

Danke auch an meine Arbeitskollegen und die Mitarbeiter des Institutes für Holzbau und Holztechnologie für die gemeinsam verbrachten Stunden und die interessanten Diskussionen.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Freunden und meinen Kollegen vom Roten Kreuz bedanken. Durch sie gestaltete sich meine Studienzeit schön, kurzweilig und mit Sicherheit unvergesslich.

Der größte Dank gilt jedoch meinen Eltern, die mir diese Ausbildung ermöglicht haben und mir immer Rückhalt im Leben gegeben haben. Ihr habt mir von klein die Voraussetzungen für ein schönes und gesundes Leben gegeben und mir alle Möglichkeiten eröffnet um meinen eigenen Weg zu beschreiten. Danke.

Kurzfassung

Mit der zunehmenden Bedeutung des nachhaltigen Umgangs mit Rohstoffen gewann der Holzbau in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung. Einer der treibenden Faktoren ist die rasche und effiziente Bauweise in Brettsperrholz (BSP). Im Gegensatz zu den im Regelfall maßgebenden Gebrauchstauglichkeitsnachweisen, sind die Festigkeiten des Holzwerkstoffes nur zum Teil ausgenutzt. Überlegungen bezüglich einer ressourcenschonenderen Produktion von BSP führten bei der Firma Mayr-Melnhof Reuthe GmbH zur Entwicklung einer aufgelösten Lamelle. Der Querschnitt der sogenannten „Hohllamelle“ (HL) besitzt eine Hohlkastenform und deren Abmessungen gleichen jenen von „regulären“ Brettern zur Produktion von BSP. Die Hohlräume in den Lamellen resultieren in Materialeinsparungen von bis zu 20 %. Für den Aufbau der Querschnitte kommt schmale Fichtenseitenware aus kernfernen Zonen des Stammes zum Einsatz. Die HL lassen sich in weiterer Folge in konventionellen Brettsperrholz-Werken weiterverarbeiten.

Diese Arbeit befasst sich mit der Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der beiden Hohllamellenprototypen HL86 und HL112 und dessen Anwendung im gesperrten Aufbau. Es wurden insgesamt rund 320 Prüfungen an den Grundprodukten durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass trotz der Materialentnahmen am Bruttoquerschnitt vergleichbare Festigkeiten und Steifigkeiten wie bei Vollholz der Festigkeitsklasse C24 erzielt werden.

Des Weiteren wurden Untersuchungen zur Tragfähigkeit und dem Kriechverhalten von gesperrten Elementen aus Hohllamellen durchgeführt. Aus den gewonnenen mechanischen Eigenschaften bzw. Erkenntnissen wurde eine vergleichende Darstellung zwischen gesperrten Aufbauten aus Hohllamellen und konventionellem Brettsperrholz ausgearbeitet. Es zeigt sich, dass beim Einsatz als Deckenelement ähnliche Spannweiten zu erzielen sind und das bei Materialeinsparungen von bis zu 20 %.

Hohllamellen im gesperrten Aufbau stellen ein leistungsfähiges Produkt für den konstruktiven Einsatz dar und fördern zusätzlich einen ressourcenschonenderen Umgang mit dem natürlichen Werkstoff Holz.

Abstract

The increasing demand in sustainable use of natural resources over the last years was a boost for constructions in timber. Especially the development of cross laminated timber (CLT) pushed this process, due to the rapid and efficient application of CLT-panels. The design of CLT is mostly governed by the serviceability limit state. Hence the strength properties are not at their limits. To increase the material efficiency a composite lamella was developed by the company Mayr-Melnhof Reuthe GmbH. This lamella with a hollow cross section is built up with small spruce sideboards. Due to the cavities inside the hollow-lamella (HL) a material reduction up to 20 % is accomplished and they can be processed afterwards into structural elements in conventional CLT factories.

The aim of this work was to determine the mechanical properties of the HL and structural elements built up with them. Approximately 320 tests were carried out to define the mechanical characteristics. The achievable strength and stiffness of the hollow-lamella in respect to its gross cross section are comparable with timber of strength class C24.

Also the load carrying capability and the creep behaviour of structural elements built up with HL were investigated. Based on test results and the gained knowledge, the examined elements were compared with conventional CLT slabs. Despite the reduction of material up to 20 % almost the same spans are achievable, due to the higher stiffness of the HL.

Structural elements built up with hollow-lamellas represent an efficient product for constructional purposes and facilitate a more sustainable use of the natural material wood.

Inhaltsverzeichnis

KAPITEL 1: EINLEITUNG	1
1-1 MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT	1
1-2 GLIEDERUNG DER ARBEIT	2
KAPITEL 2: ALLGEMEINES	3
2-1 HOLZ ALLGEMEINER AUFBAU UND EIGENSCHAFTEN.....	3
2-2 VOLLHOLZ.....	6
2-3 HOLZWERKSTOFFE	7
2-3.1 Brettschichtholz.....	7
2-3.2 Brettsperrholz	9
2-4 OPTIMIERUNGSPOTENTIALE	13
2-4.1 Möglichkeiten zur Optimierung	14
2-4.2 Anwendungen.....	17
KAPITEL 3: HOHELLAMELLE - ANALYTISCHE BETRACHTUNG	19
3-1 MATERIAL UND GEOMETRIE.....	19
3-2 ZUG.....	20
3-3 BIEGUNG	21
3-4 QUERDRUCK	22
3-4.1 Mehrschichtiger Aufbau	22
3-5 SCHUB.....	23
3-5.1 Schub parallel zur Faser	24
3-5.2 Schub quer zur Faser – Rollschub	25
3-6 KEILZINKENVERBINDUNG.....	35
3-6.1 Geometrie	35
3-6.2 Festigkeit	35
3-7 LANGZEITVERHALTEN – KRIECHEN	37
3-7.1 Stand des Wissens	37
3-7.2 Umlegung vorliegender Ergebnisse auf die Hohllamelle.....	41
KAPITEL 4: MATERIAL UND METHODEN	43
4-1 ALLGEMEINES	43
4-2 PRÜFKONZEPT	43
4-2.1 Prüfungen der Grundprodukte.....	44
4-2.2 Prüfungen an Produkten hergestellt aus Hohllamellen.....	44
4-2.3 Prüfungen an Verbindungsmitteln.....	44
4-3 PRÜFKÖRPERBEZEICHNUNG	45
4-3.1 Prüfungen des Grundmaterials	45

4-3.2	Prüfungen an Produkten hergestellt aus Hohllamellen	45
4-3.3	Prüfungen an Verbindungsmitteln	46
4-4	PRÜFKÖRPER.....	47
4-4.1	Produktionsablauf	47
4-4.2	Hohllamelle HL86	48
4-4.3	Hohllamelle HL112	49
4-4.4	Hohllamellen im gesperrten Aufbau	50
4-5	PRÜFKONFIGURATIONEN	53
4-5.1	Prüfungen des Grundproduktes.....	53
4-5.2	Prüfungen an Produkten hergestellt aus Hohllamellen	59
4-5.3	Prüfungen an Verbindungsmitteln	65
4-6	ERMITTLUNG DER PRÜFDATEN	66
4-6.1	Holzfeuchte	66
4-6.2	Geometrische Abmessungen.....	66
4-6.3	Rohdichte	66
4-6.4	Querschnitt.....	67
4-6.5	Biegefestigkeit	68
4-6.6	Biegeelastizitätsmodul	68
4-6.7	Schub- und Rollschubfestigkeit	69
4-6.8	Querdruck	70
4-6.9	Kriechbeiwert.....	71
4-6.10	Schraubenausziehparameter	73
4-6.11	Prüfauswertung	73
KAPITEL 5: PRÜFERGEBNISSE.....		75
5-1	PRÜFUNGEN DES GRUNDPRODUKTES HOHLLAMELLE.....	75
5-1.1	Zug	75
5-1.2	Biegung.....	79
5-2	PRÜFUNGEN AN HOHLLAMELLEN IM GESPERRTEN AUFBAU.....	85
5-2.1	Biegung.....	85
5-2.2	Schub Rollschub	87
5-2.3	Querdruck	88
5-2.4	Kriechen.....	93
5-3	PRÜFUNGEN AN VERBINDUNGSMITTELN.....	98
5-3.1	Schrauben.....	98
KAPITEL 6: INTERPRETATION DER PRÜFERGEBNISSE		105
6-1	GRUNDPRODUKT HOHLLAMELLE.....	105
6-1.1	Zusammenfassung der Prüfergebnisse.....	105

6-1.2	Umlegung auf Bruttoquerschnitt	107
6-2	KEILZINKENVERBINDUNG.....	108
6-3	PRODUKTE HERGESTELLT AUS HOHLLAMELLEN.....	111
6-3.1	Zusammenfassung der Prüfergebnisse	111
6-3.2	Biegefestigkeit.....	112
6-3.3	Rollschub.....	114
6-3.4	Querdruck.....	115
6-3.5	Schubnachgiebigkeit.....	118
6-3.6	Langzeitverhalten – Kriechen.....	121
6-4	PRÜFUNGEN AN VERBINDUNGSMITTELN	125
KAPITEL 7: VERGLEICHSRECHNUNG.....		129
7-1	DECKE.....	129
7-1.1	einfeldriges Deckensystem.....	129
7-2	WAND.....	134
7-2.1	Abtragung Vertikaler Lasten	134
7-2.2	Abtragung Vertikaler Lasten und Windbeanspruchung	135
KAPITEL 8: RESÜMEE.....		137
ANHANG A: VERZEICHNISSE.....		A-2
ANHANG B: GLEICHUNGEN VERGLEICHSRECHNUNG.....		B-12
ANHANG C: DETAILIERTE PRÜFERGEBNISSE.....		C-19
ANHANG D: DIAGRAMME		D-27
ANHANG E: BRUCHBILDER		E-48

KAPITEL 1: EINLEITUNG

1-1 MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT

Der Holzbau gewann in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung und ist aus dem Bauwesen nicht mehr wegzudenken. Das zunehmende Bewusstsein bzw. Streben der Gesellschaft nach einem nachhaltigen und ökologischen Umgang mit Ressourcen treibt diesen Prozess in letzter Zeit stark voran. Zusätzlich zu diesen Aspekten kommt, dass die Verwendung von Holz als nachhaltigen Brennstoff stetig wächst. Mit der steigenden Nutzung der Rohstoffe sind neue Strategien gefragt, da Fichtenholz in Österreich die hauptsächlich verwendete Holzart im Bausektor ist.

Der Absatz von Brettspertholz (BSP), einem flächigen Holzwerkstoff, stieg in den vergangenen Jahren, aufgrund der raschen Bauweise in BSP, rasant an. Einer der Grundgedanken bei der Entwicklung von Brettspertholz lag dabei, aus Seitenwarenbrettern mit niedriger Qualität ein einfach aufzubauendes und flächiges Produkt für den Holzbau zu schaffen. Zuzolge der hohen Nachfrage muss mittlerweile auch Hauptware für die Produktion herangezogen werden.

Bei der statischen Bemessung von BSP ist zu erkennen, dass in der Regel das Verformungsverhalten (Durchbiegung, Schwingung) für die erforderlichen Querschnittsabmessungen maßgebend ist. Die Festigkeiten des Holzwerkstoffes sind im Gegensatz dazu nicht vollständig ausgenutzt. Mit dem Zuwachs des Bedarfs an BSP und dem damit verbunden Rohmaterialeinsatz, ist es aus ökologischer sowie ökonomischer Sicht sinnvoll, jenes Ungleichgewicht zwischen der Auslastung der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit auszugleichen um effiziente Tragstrukturen zu schaffen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes FFG COMET K-focus_sts 2.1.1_1 an der holz.bau forschungs gmbh wurden Möglichkeiten zur ressourcenschonenden Produktion für Brettspertholzelemente untersucht. Unter anderem wurde die Möglichkeit aufgezeigt, BSP-Element mit aufgelösten Querlagen (jedes zweite Brett ausgelassen) zu produzieren und damit Material einzusparen. Durchgeführte Berechnungen zeigen, dass die verbleibende Rollschubfestigkeit ausreichend ist und die Biegesteifigkeit in Haupttragrichtung durch die Materialentnahme nur gering beeinflusst wird.

Die Firma Mayr-Melnhof Reuthe Gmbh verfolgte diese Ansätze zur Effizienzsteigerung und entwickelte einen Prototyp einer aufgelösten Lamelle. Der Querschnitt der sogenannten „Hohllamelle“ (kurz: HL) besitzt eine Hohlkastenform und deren Abmessungen gleichen jenen von „regulären“ Brettern zur Produktion von BSP. Die HL lassen sich in weiterer Folge in konventionellen Brettspertholz-Werken weiterverarbeiten.

Ziel dieser Arbeit ist es, die mechanischen Eigenschaften der Hohllamellen und daraus aufgebauten Produkten zu ermitteln sowie das Aufzeigen deren Leistungspotenzial.

1-2 GLIEDERUNG DER ARBEIT

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in acht Kapitel, deren Inhalt im Folgenden kurz erläutert wird:

Kapitel 1 – Einleitung

Kapitel 1 beinhaltet die Zielsetzung sowie den Aufbau dieser Arbeit.

Kapitel 2 – Holz und Holzwerkstoffe

Kapitel 2 liefert einen kurzen Einblick in den Aufbau und den Eigenschaften von Holz und gängigen Holzwerkstoffen. Des Weiteren werden mögliche Optimierungspotentiale aufgezeigt.

Kapitel 3 – Hohllamelle - Analytische Betrachtung

In Kapitel 3 wird die Hohllamelle analytisch betrachtet und auf deren erforderliches Leistungsprofil eingegangen.

Kapitel 4 – Material und Methoden

In Kapitel 4 sind die Herstellung, die Prüfkörpergeometrie, der Prüfablauf und die Auswertung der durchgeführten Prüfungen erläutert.

Kapitel 5 – Prüfergebnisse

In Kapitel 5 sind die Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen zusammengefasst.

Kapitel 6 – Interpretation der Prüfergebnisse

Kapitel 6 befasst sich mit der Diskussion der ermittelten mechanischen Eigenschaften.

Kapitel 7 – Vergleich BSP

Kapitel 7 umfasst praxisrelevante Vergleichsrechnungen zwischen konventionellem Brettsperrholz und gesperrten Tragelementen, hergestellt aus Hohllamellen.

Kapitel 8 – Schlussbetrachtung

Kapitel 8 beinhaltet eine zusammenfassende Darstellung der, aus den Prüfungen gewonnenen, Erkenntnisse.

KAPITEL 2: ALLGEMEINES

2-1 HOLZ ALLGEMEINER AUFBAU UND EIGENSCHAFTEN

Makroskopischer Aufbau

Holz ist ein anisotroper und inhomogener Werkstoff. Dies erkennt man bereits mit freiem Auge beim Betrachten eines Holzstammes (siehe Abbildung 2-1). Die außenliegende Rinde, bestehend aus Bast und Borke, schützt den Baum vor äußeren Einwirkungen. Das Kambium ist eine dünne Schicht zwischen der Rinde und dem Holzkörper, welche mit freiem Auge nicht zu erkennen ist. In dieser Schicht findet der Wachstumsprozess des Baumes statt. Das Kambium bildet nach innen Holzzellen und nach außen die Rinde. Der innenliegende Holzkörper lässt sich bei vielen Holzarten wiederum in Kern- und Splintholz unterteilen. Das außenliegende Splintholz ist für den Transport von Wasser und Nährstoffen verantwortlich. Das Kernholz ist vom Wasserkreislauf des Baumes ausgeschlossen und dient im Wesentlichen als Tragstruktur des Baumes.

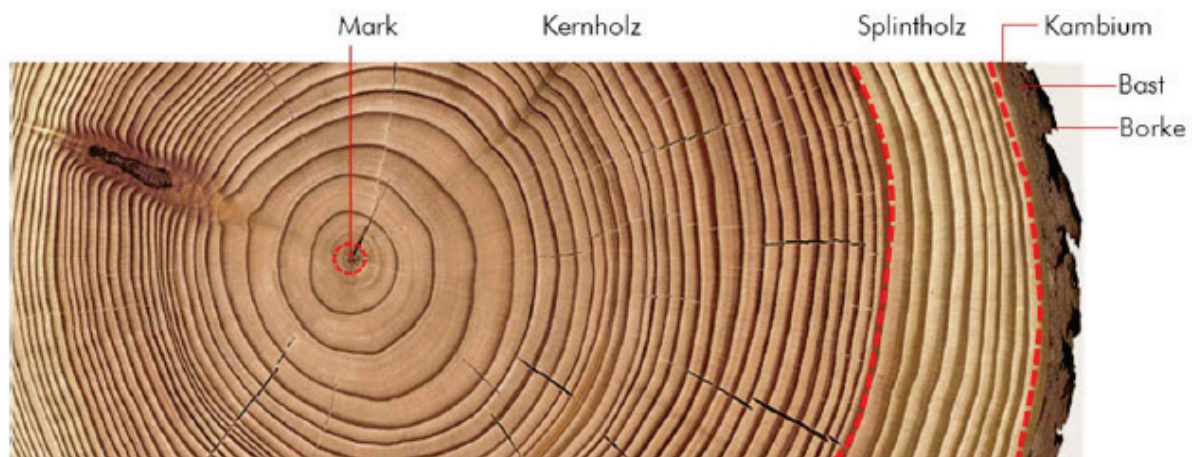


Abbildung 2-1: Querschnitt eines Holzstammes (Lärche), [1], [2]

Die für Holz typischen Jahrringe entstehen dadurch, dass im Frühjahr bzw. Sommer viel Sonnenlicht zur Verfügung steht und für ein rasches Holzwachstum Wasser benötigt wird. Für den Wassertransport sind großlumige Zellen notwendig. Am Ende der Wachstumsperiode (Herbst), wenn das Angebot an Sonnenlicht geringer ist, bildet das Kambium kleinlumige Zellen mit dickeren Zellwänden. Diese sorgen für eine ausreichende Tragfähigkeit und Steifigkeit des Baumes.

Während des Wachstums des Baumes geschieht eine laufende Anpassung an die vorliegenden Einwirkungen bzw. Anforderungen. Dies führt zu veränderlichen Eigenschaften über den Stammquerschnitt. Im Groben kann zwischen „juvenilem“ und „adultem“ Holz unterschieden werden. Der Übergang des Baumes zur Bildung adulten Holzes beginnt im Alter von rund 5 bis 20 Jahren. Bei einem durchschnittlichen Wachstum von rund 5 mm (Jahrringbreite) pro Jahr, beginnt der Baum ab einem Durchmesser von 5 cm bis 20 cm mit der Bildung adulten Holzes. Dieser Übergang findet meist langsam

und kontinuierlich statt (vgl. [3]). Folglich ist die Holzqualität der gewonnenen Produkte auch von der Lage im Stamm bzw. vom Einschnitt abhängig (siehe Abbildung 2-2).

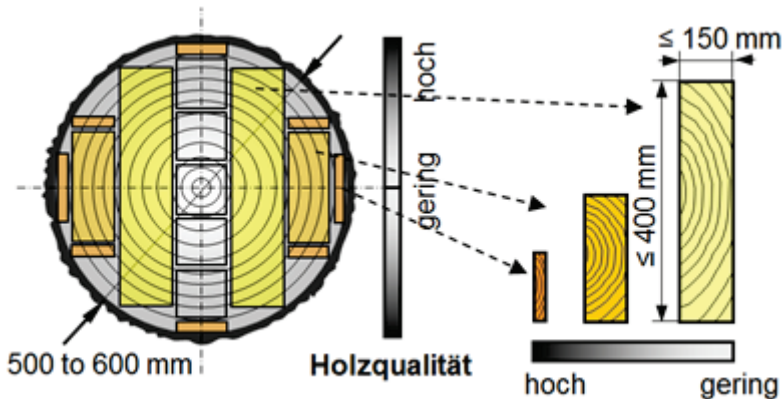


Abbildung 2-2: Holzqualität Stamm, [4]

BRANDNER [3] fasste die Veränderung wichtiger holztechnologischer Eigenschaften aus durchgeführten Untersuchungen in Bezug auf juveniles und adultes Holz zusammen (siehe Tabelle 2-1). Es ist ersichtlich, dass adultes Holz aus kernfernen Bereichen deutlich höhere Eigenschaften erzielen kann als Produkte aus dem Kernbereich des Stammes.

Tabelle 2-1: Vergleich juveniles/adultes Holz

Eigenschaft	Einheit	Zunahme bei adulten Holz
Rohdichte	[kg/m ³]	+ 10 %
E-Modul	[N/mm ²]	~ 20 ÷ 25 %
Festigkeit	[N/mm ²]	~ 20 ÷ 30 %

Einteilung von Holzarten

In erster Ebene kann man zwischen Nadel- und Laubhölzer unterscheiden. Nadelhölzer sind entwicklungsgeschichtlich älter als Laubhölzer und im Vergleich zu den deutlich jüngeren Laubhölzern einfacher aufgebaut.

Bei Nadelhölzern sind die Tracheiden (Holzzellen) sowohl für die Festigung des Baumes als auch den Wassertransport zuständig. Bei Laubhölzern ist im Gegensatz dazu eine deutlich höhere Spezialisierung der einzelnen Zellen zu beobachten. Für den Transport von Wasser sind eigene großlumige Zellen verantwortlich. In der Regel sind jene Gefäße mit freiem Auge erkennbar. Je nach Verteilung dieser Gefäße im Jahrring, können Laubhölzer in weiterer Folge in ringporig (Konzentration der Leitungsgefäße entlang der Jahrringgrenzen) und zerstreutporig (willkürliche Verteilung) unterschieden werden.

Anisotropie

Aus dem inhomogenen Aufbau von Holz ergeben sich aus Sicht der Mechanik richtungsabhängige (orthotrope) Eigenschaften (siehe Abbildung 2-3).

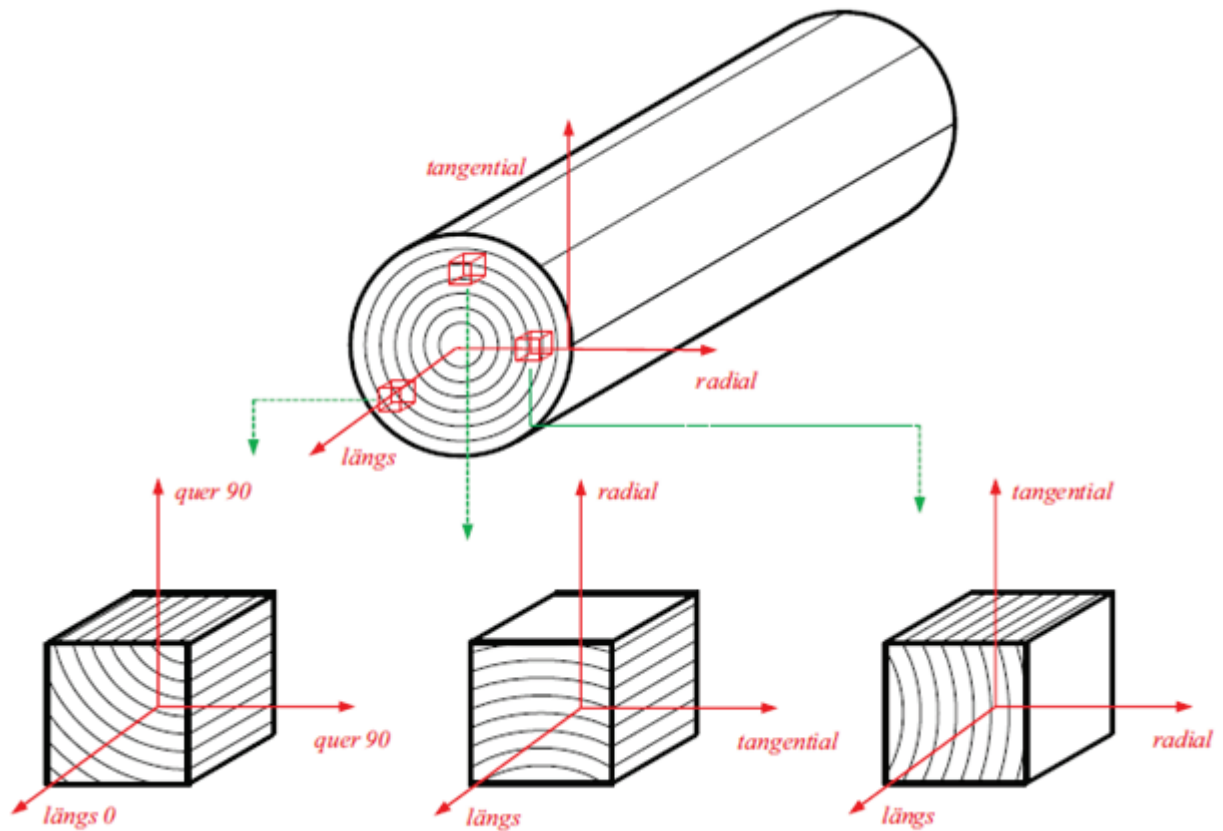


Abbildung 2-3: Ingenieurmäßige Betrachtung von Holz, [5]

Bedingt durch die Form eines Baumstammes eignet sich ein zylindrisches Koordinatensystem am besten zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von Holz. Dies ist jedoch für die ingenieurmäßige Berechnung im Regelfall zu aufwendig. Üblicherweise wird daher bei Holz und Holzwerkstoffen in der statischen Bemessung vereinfacht zwischen mechanischen Eigenschaften parallel und quer zum Faserverlauf unterschieden (siehe Abbildung 2-3 links unten).

Holz ist ein hygroskopischer Werkstoff. Das bedeutet, dass es Wasser absorbiert. Mit der Einlagerung von Wasser in den Holzzellen geht eine Änderung des Volumens einher. Dieser Vorgang wird als Quellen und Schwinden des Holzes bezeichnet. Bei einer Holzfeuchtigkeit von rund $u = 30\%$ sind die Fasern gesättigt und können keine Wasser mehr aufnehmen. Aufgrund der Anisotropie ändert sich das Schwindverhalten ja nach Richtung (Verhältnis längs/radial/tangential: 1/10/20). Für Fichte liegen die Schwindmaße (Trocknung vom Fasersättigungsbereich bis zu einer Holzfeuchte $u = 12\%$) längs bei rund $\beta_l = 0,2\%$ radial bei rund $\beta_r = 2,0\%$ und tangential bei $\beta_t = 4,0\%$.

Auch die Festigkeit und Steifigkeit von Holz unterliegt der Anisotropie. Auf die richtungsabhängigen mechanischen Eigenschaften und Verhältnisse wird bei den unterschiedlichen Holzwerkstoffen näher eingegangen.

Bedingt durch das natürliche Wachstum des Holzes und Umwelteinflüssen treten Holzanomalien auf. Diese Anomalien wie Äste, Harzgallen, Reaktionsholz oder Faserabweichungen beeinflussen die mechanischen Eigenschaften von Holz stark. Die Beurteilung der genannten Einflussfaktoren auf die Festigkeit und Steifigkeit sind in Sortiernormen z.B. ÖNORM DIN 4074 Teil 1 bis 5 [6] geregelt. Die Zuteilung visueller Sortierklassen auf die, in EN 338 [7] geregelten Festigkeitsklassen erfolgt in EN 1912 [8].

2-2 VOLLHOLZ

Holz für tragende Bauteile muss den Anforderungen nach EN 14081-1 [9] entsprechen und wird im Allgemeinen als Vollholz bezeichnet. Die Festigkeitssortierung erfolgt visuell oder maschinell. Vorrangige Sortiermerkmale sind unter anderem Äste bzw. Astansammlungen. Es erfolgt eine Zuordnung in die Festigkeitsklassen der EN 338 [7]. Ein Auszug der Festigkeitsklassen und deren charakteristische Kennwerte können der Tabelle 2-2 entnommen werden.

Tabelle 2-2: Auszug Festigkeitsklassen Holz für tragende Zwecke lt. EN 338

Merkmal	Einheit	C20	C24	C30
$f_{m,k}$	[N/mm ²]	20,0	24,0	30,0
$f_{t,0,k}$	[N/mm ²]	12,0	14,0	18,0
$f_{t,90,k}$	[N/mm ²]	0,40	0,40	0,40
$f_{c,0,k}$	[N/mm ²]	19,0	21,0	23,0
$f_{c,90,k}$	[N/mm ²]	2,30	2,50	2,70
$f_{v,k}$	[N/mm ²]	3,60	4,00	4,00
$E_{0,mean}$	[N/mm ²]	9.500	11.000	12.000
$E_{90,mean}$	[N/mm ²]	320	370	400
G_{mean}	[N/mm ²]	590	690	750
ρ_k	[kg/m ³]	330	350	380

Betrachtet man die mechanischen Kennwerte in Tabelle 2-2, ist die Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) des Holzes zu erkennen. Die Eigenschaften von Holz quer zur Faser liegen deutlich unter jenen in Faserrichtung.

Die Zugfestigkeit ist bei fehlerfreiem Holz rund doppelt so hoch wie die Druckfestigkeit. Jene wird jedoch durch Äste erheblich beeinflusst. Es ist zu erkennen, dass die Zugfestigkeit im Gegensatz zur Druckfestigkeit durch das Vorhandensein von Ästen und anderen Holzanomalien erheblich reduziert wird.

2-3 HOLZWERKSTOFFE

Als Holzwerkstoffe werden im Allgemeinen Produkte bezeichnet, welche aus Holzbestandteilen und geeigneten Bindemitteln aufgebaut sind. Eine Einteilung der Werkstoffe kann nach dem Ausgangsmaterial bzw. Zerlegungsgrad des Holzes wie folgt getroffen werden (siehe Abbildung 2-4).

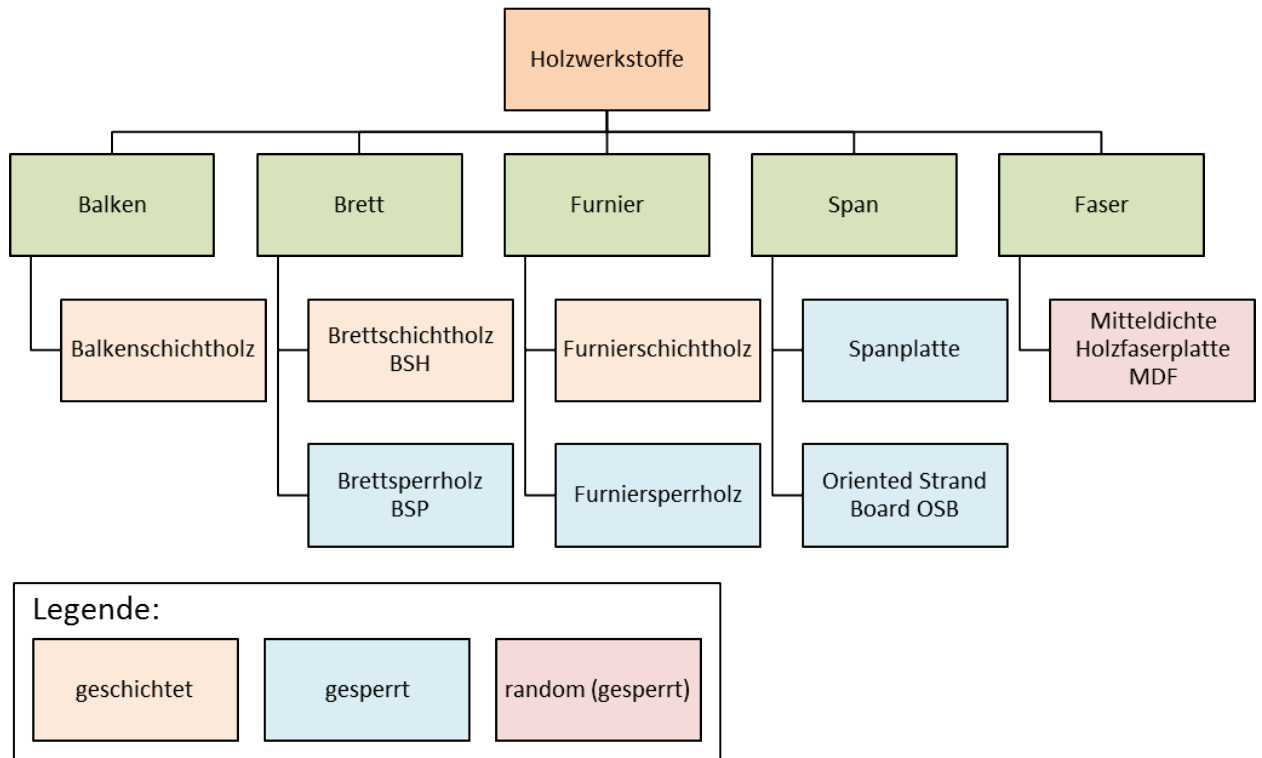


Abbildung 2-4: Übersicht Holzwerkstoffe

Die Charakteristiken der Holzwerkstoffe (geschichtet, gesperrt und „random“) beschreiben die Orientierung der Ausgangsmaterialien zueinander.

- geschichtet: parallele Orientierung des Faserverlaufs der Komponenten
- gesperrt: orthogonale Orientierung des Faserverlaufs der Komponenten
- „random“: zufälliger Orientierung des Faserverlaufs

Durch den gesperrten Aufbau von Holzwerkstoffen verbessert sich neben den mechanischen Eigenschaften im Allgemeinen auch das Quell- und Schwindverhalten des Werkstoffes im Vergleich zu Vollholz. Je nach Zerlegungsgrad des Grundmaterials kommt es zusätzlich zu einer Homogenisierung der Eigenschaften.

Im Weiteren wird auf ausgewählte Holzwerkstoffe auf Basis von Brettern eingegangen.

2-3.1 BRETTSCHICHTHOLZ

Brettschichtholz besteht aus mindestens zwei, in derselben Richtung orientierten und an den Breitseiten miteinander verklebten, Lamellen. Die einzelnen Lamellen können mittels Keilzinkenverbindung längs gestoßen sein. Es können BSH-Träger mit Dimensionen bis zu einer Breite von bis zu 240 mm, einer Höhe von 3 m und einer Länge von 50 m produziert werden. Die Anforderungen an Brettschichtholz sind in EN 14080 [10] geregelt.

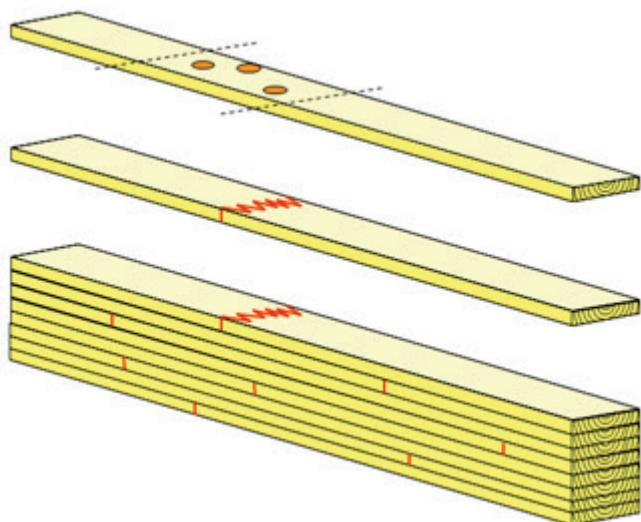


Abbildung 2-5: Aufbau Brettschichtholz, [4]

Durch die Möglichkeit Bretter mittels Keilzinken in Längsrichtung kraftschlüssig zu stoßen, besteht zusätzlich die Option „Fehlstellen“ entfernen zu können (siehe Abbildung 2-5). Anschließend werden die einzelnen Lamellen miteinander zu Träger verklebt. Durch das Aufsichten der Lamellen ist es möglich, unterschiedliche Qualitäten zu verwenden. So kann zum Beispiel in den Randzonen, die einer höheren Beanspruchung unterliegen, ein höherwertiges Material eingesetzt werden.

So wie bei Bauholz gibt es auch bei Brettschichtholz definierte Festigkeitsklassen (lt. EN 14080 [10]), die auszugsweise in Tabelle 2-3 angeführt sind, wobei h für einen homogenen und c für einen kombinierten Aufbau (verschiedene Festigkeitsklassen der Lamellen) stehen.

Tabelle 2-3: Auszug Festigkeitsklassen Brettschichtholz lt. EN 14080

Merkmals	Einheit	GL24h	GL24c	GL32h	GL32c
$f_{m,k}$	[N/mm ²]	24,0	24,0	32,0	30,0
$f_{t,0,k}$	[N/mm ²]	19,2	17,0	25,6	19,5
$f_{t,90,k}$	[N/mm ²]	0,50	0,50	0,50	0,50
$f_{c,0,k}$	[N/mm ²]	24,0	21,5	32,0	24,5
$f_{c,90,k}$	[N/mm ²]	2,50	2,50	2,50	2,50
$f_{v,k}$	[N/mm ²]	3,50	3,50	3,50	3,50
$E_{0,mean}$	[N/mm ²]	10.500	11.000	14.200	13.500
G_{mean}	[N/mm ²]	650	650	650	650
ρ_k	[kg/m ³]	385	365	440	400

Das Fügen mehrere Lamellen zu Brettschichtholzträger resultiert in einen „Homogenisierungseffekt“ mit erhöhten mechanischen Eigenschaften.

Für den Aufbau von BSH der Festigkeitsklasse GL24h werden in der Regel als Grundmaterial C24 verwendet. In Tabelle 2-3 ist ersichtlich, dass die Zugfestigkeit von BSH über jener des Grundmaterials liegt. Weiters steigen der E-Modul und die Rohdichte durch die Homogenisierung an.

2-3.2 BRETTSPERRHOLZ

Brettsperrholz besteht aus mehrschichtig verklebten Brettlagen (siehe Abbildung 2-6). Im Regelfall sind die verklebten Schichten zueinander orthogonal orientiert [5], können aber prinzipiell unter einem beliebigen Winkeln angeordnet werden.

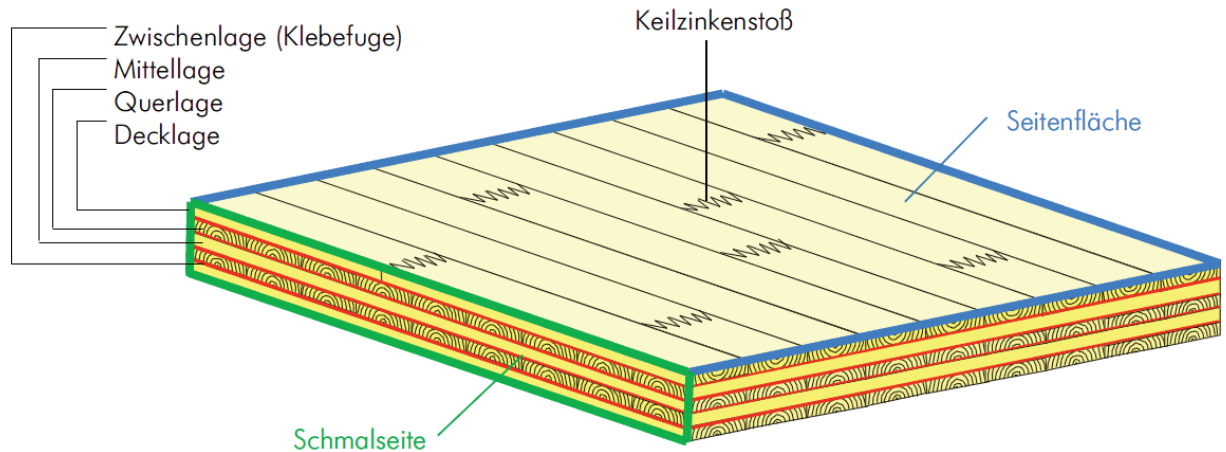


Abbildung 2-6: Aufbau Brettsperrholz, [11]

Durch den gekreuzten orthogonalen Aufbau ergeben sich folgende Vorteile (vgl. [4]):

- Lastabtragung in zwei Richtungen (prinzipiell)
- Homogenisierung der mechanischen Kenngrößen (Systemeffekt)
- Reduktion des Quells und Schwinden in der Elementebene

Für Brettsperrholz, als flächigen Holzwerkstoff und in Kombination mit einer zweidimensionalen Lastabtragung, ergeben sich folgende Einsatzbereiche:

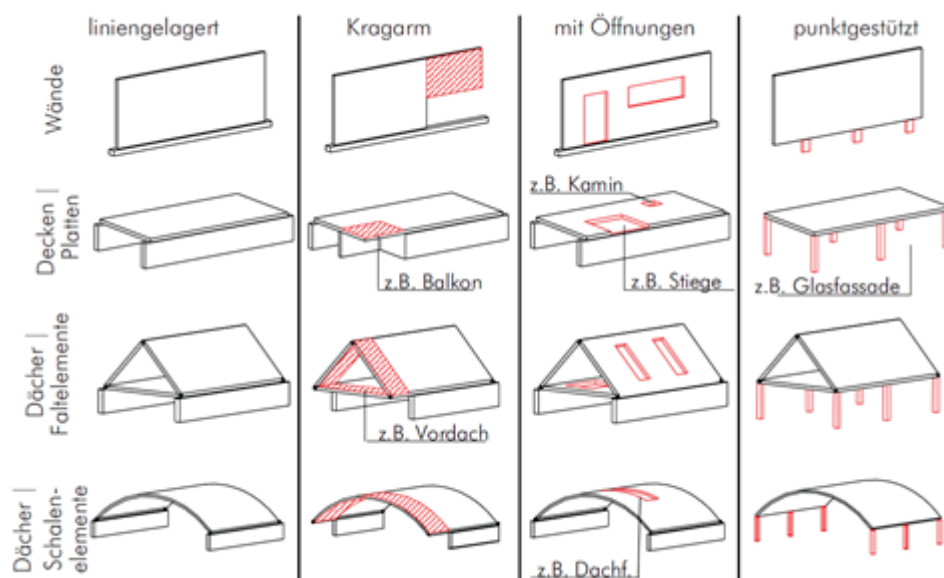


Abbildung 2-7: Überblick: Einsatzbereiche Brettsperrholz, [4]

Die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von Brettsperrholz (siehe Abbildung 2-7) und die rasche Bauweise, bedingt durch hohe erreichbare Vorfertigungsgrade, führten zu einem stetig wachsenden

Interesse an diesem Bauprodukt. Aufgrund dieser Gesichtspunkte und der verstärkten Forcierung nachhaltiger Baustoffe wurde in den letzten Jahrzehnten die weltweiten Produktionskapazitäten kontinuierlich ausgebaut (siehe Abbildung 2-8).

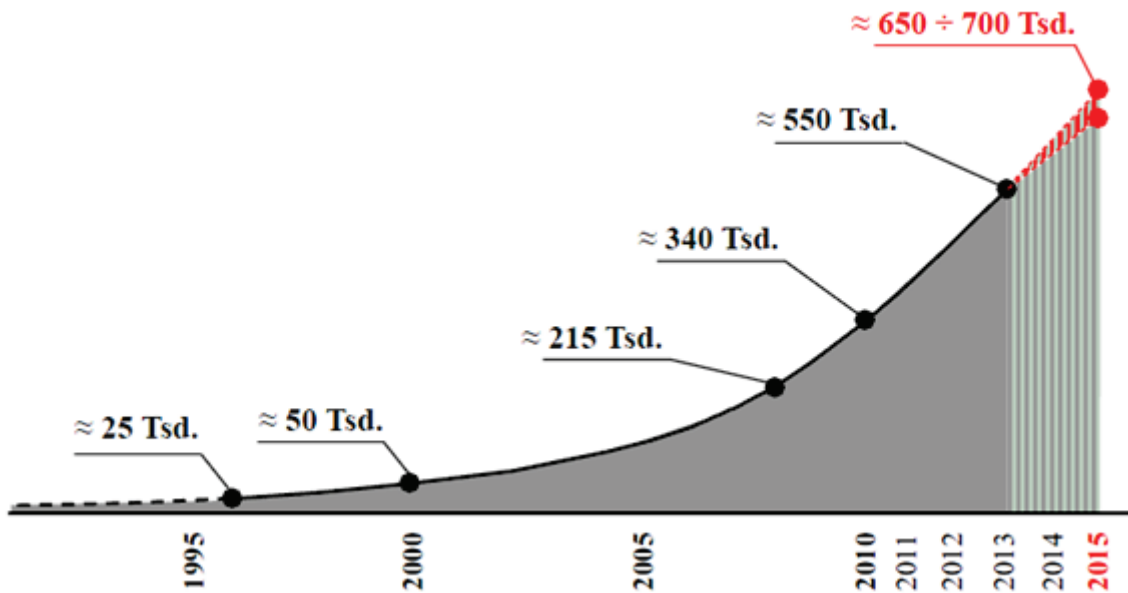


Abbildung 2-8: weltweiter Absatz BSP, [12]

Berechnungsgrundlagen

Die Berechnung von Brettspertholz weist auf Grund seines gekreuzten Aufbaus Besonderheiten auf. Durch den gesperrten Aufbau kommt es zu unterschiedlichen Materialeigenschaften (Steifigkeit, Festigkeit) in den einzelnen Schichten. Dies führt aufgrund der schubweichen Querlagen zu höheren Schubverformungsanteilen an der Gesamtverformung im Vergleich zu geschichteten Holzwerkstoffen. Der Anteil der Schubverformung an der gesamten Durchbiegung beträgt rund 10 % bei einem L/H-Verhältnis von 20 (vgl. [5]), welche aufgrund ihrer Größe in der Bemessung berücksichtigt werden müssen. Zusätzlich liegt die Rollschubfestigkeit in den Querlagen deutlich unter der Schubfestigkeit parallel zum Faserverlauf.

Zur Berechnung von Brettspertholz haben sich in den letzten Jahren folgende Verfahren etabliert:

- Timoshenko-Balken
- Schubanalogie-Verfahren
- Gamma-Verfahren
- FEM-Berechnungen

Im Zuge dieser Arbeit erfolgen die Berechnungen von biegebeanspruchten Bauteilen auf Basis des Timoshenko-Balkens (transversal-schubnachgiebiger Balken). Deren Grundzüge sind im Folgenden kurz erläutert.

Biegesteifigkeit K_{CLT}

Zur Berechnung der Biegesteifigkeit wird davon ausgegangen, dass die Lagen, welche quer zur Faser beansprucht werden, unberücksichtigt bleiben ($E_{90} = 0 \text{ N/mm}^2$). Dies kann durch eine fehlende Schmalseitenverklebung bzw. durch eine mögliche Rissbildung gerechtfertigt werden. Damit ergibt sich die Biegesteifigkeit zu:

$$K_{CLT} = \sum (I_i \cdot E_i) + \sum (A_i \cdot e_i^2 \cdot E_i) \quad (2.1)$$

Dabei sind:

- I_iTrägheitsmoment der i-ten Brettlage [mm^4]
- A_iFläche der i-ten Brettlage [N/mm^2]
- e_iSchwerpunktsabstand der i-ten Brettlage [mm]
- E_iE-Modul der i-ten Brettlage [N/mm^2]

Schubsteifigkeit S_{CLT}

Die Schubsteifigkeit wird mithilfe des Schubkorrekturfaktors κ berechnet, der wie folgt definiert ist:

$$S_{CLT} = \frac{S_{ges}}{\kappa} = \frac{\sum (A_i \cdot G_i)}{\kappa} \quad (2.2)$$

$$\kappa = \frac{S_{ges}}{K_{CLT}^2} \cdot \int_h \left(\frac{S^2(z, E(z))}{G(z) \cdot b(z)} \right) dz \quad (2.3)$$

Dabei sind:

- A_iFläche der Schicht [N/mm^2]
- G_iSchubmodul der Schicht [N/mm^2]
- E_iE-Modul der Schicht [N/mm^2]
- $S(z, E(z))$...statisches Moment in Abhängigkeit von z [N]
- $b(z)$ Breite in Abhängigkeit von z [mm]

Spannungsverläufe BSP:

Bei Brettsperrholz weisen die Spannungsverläufe aufgrund der Querlagen bzw. der Bedingung $E_{90} = 0 \text{ N}/\text{mm}^2$ einen unstetigen Verlauf auf. In Abbildung 2-9 sind qualitativ der Normalspannungsverlauf in Rot und der Schubspannungsverlauf in Blau infolge einer Biegebeanspruchung dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die maßgebende Schubspannung meistens in der Querlage auftritt, da die Rollschubfestigkeit nur rund ein Drittel der Schubfestigkeit in Faserrichtung beträgt.

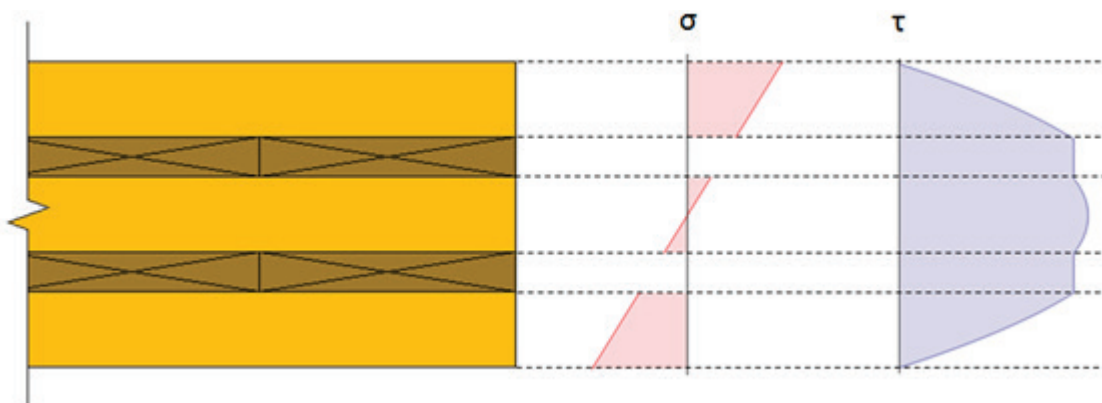


Abbildung 2-9: Spannungsverlauf BSP

Durchbiegung w

Die Durchbiegung eines Einfeldträgers unter Gleichlast unter Berücksichtigung der Schubnachgiebigkeit berechnet sich wie folgt:

$$w = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot K_{CLT}} + \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot S_{CLT}} \quad (2.4)$$

Dabei sind:

- q Einwirkung [N/mm]
- L Spannweite des Einfeldträgers [mm]
- K_{CLT} Biegesteifigkeit [Nmm²]
- S_{CLT} Schubsteifigkeit [N]

Der zweite Term in (2.4) beschreibt den Durchbiegungsanteil zufolge der Schubverformung des Querschnittes. Dieser Anteil an der Gesamtverformung nimmt mit zunehmender Stützweite ab (siehe Abbildung 2-10).

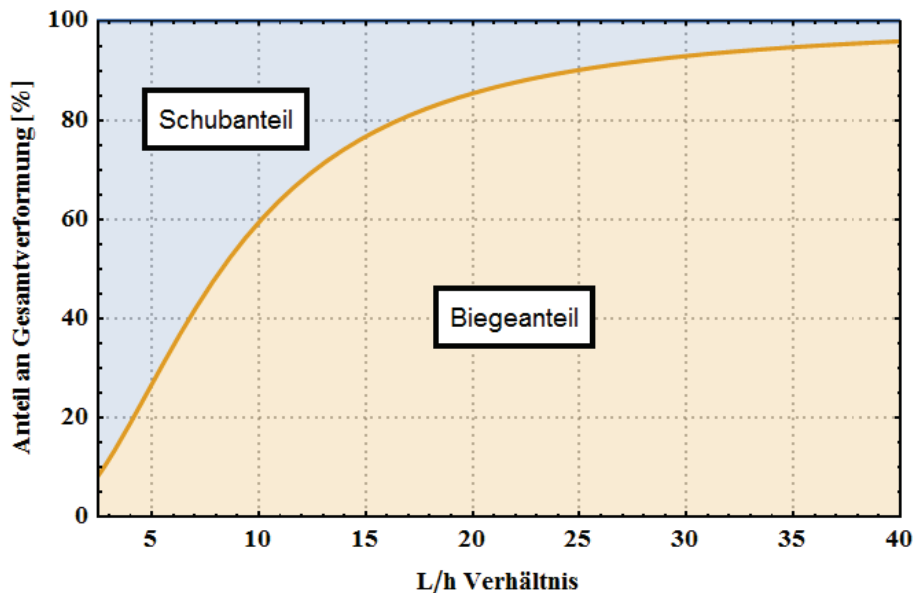


Abbildung 2-10: Anteile der Gesamtverformung bei biegebeanspruchtem BSP

Im Gegensatz zu Bauholz und Brettschichtholz existiert für Brettspertholz im europäischen Raum derzeit noch keine harmonisierte Norm und damit liegen auch keine definierten Festigkeitsklassen vor. Die mechanischen Eigenschaften von BSP sind in den jeweiligen bauaufsichtlichen Zulassungen der Hersteller zu entnehmen.

2-4 OPTIMIERUNGSPOTENTIALE

Für die statische Berechnung und Dimensionierung von Holztragwerken sind Nachweise der Tragfähigkeit (ULS) und Gebrauchstauglichkeit (SLS) zu erbringen. Bei der Bemessung von Brettspertholz sind in der Regel die SLS-Nachweise (Durchbiegung und/oder Schwingung) maßgebend. Die Baustofffestigkeiten des Holzwerkstoffes sind im Gegensatz dazu nur teilweise ausgereizt.

Im Folgenden werden die Ausnutzungsgrade der einzelnen Nachweise anhand der Bemessung einer Wohnungsdecke aufgezeigt. Dabei wurde als statisches System ein Einfeldträger zugrunde gelegt. Die Berechnung erfolgte nach EN 1995-1-1 [13] bzw. sind die verwendeten Gleichungen im Anhang B ersichtlich.

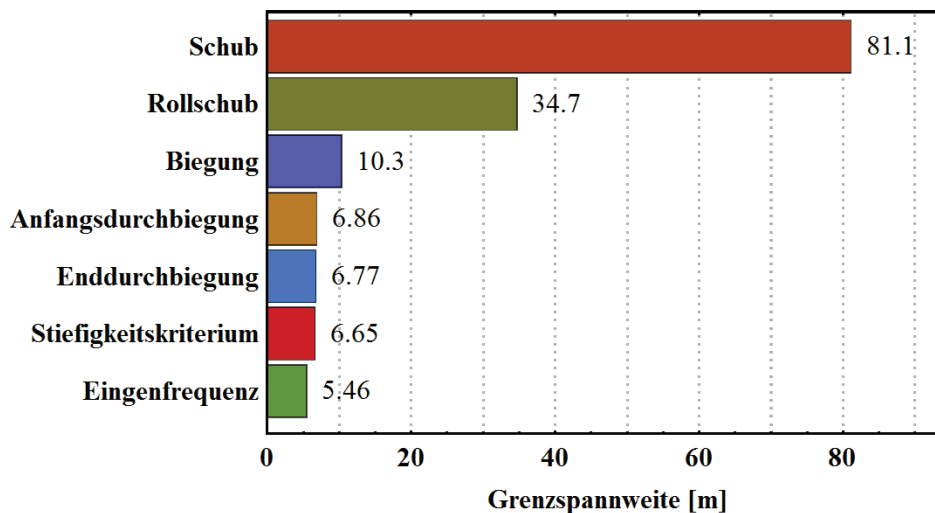


Abbildung 2-11: Grenzspannweiten eines Einfeldträgers für die einzelnen Nachweise

In Abbildung 2-11 sind die Grenzspannweiten der einzelnen Nachweise dargestellt. Der maßgebende Nachweis für die Bemessung der Decke ist die erforderliche Eigenfrequenz der Deckenkonstruktion. Die Spannweiten, bei denen die Nachweise der Tragfähigkeit vollständig ausgelastet sind, kommen deutlich über jenen der Gebrauchstauglichkeit zu liegen.

Daraus kann für Bauteile zur Abtragung von Biegebeanspruchungen (z. B.: Deckensysteme) abgeleitet werden, dass vor allem eine hohe Biegesteifigkeit für die Einhaltung der erlaubten Durchbiegungen bzw. für die Erfüllung der geforderten Schwingungsnachweise erforderlich ist.

Eine maximale Ausnutzung aller mechanischen Eigenschaften ist aus ökonomischer Sicht sowie aus ökologischen Gedanken anzustreben.

2-4.1 MÖGLICHKEITEN ZUR OPTIMIERUNG

Die Randzonen sind bei biegebeanspruchten Bauteilen höheren Belastungen ausgesetzt als die Kernbereiche des Querschnitts. Mit den Fortschritten in der Herstellung leistungsfähiger Klebstoffe bieten sich zahlreiche Möglichkeiten, Querschnitte effizienter zu gestalten, an.

Legt man einen starren Verbund zugrunde, so ergeben sich die Randspannung und die Biegesteifigkeit zu:

$$\sigma_{m,u,o} = \frac{M}{E \cdot I} \cdot E(z_{u,o}) \cdot z_{u,o} \quad (2.5)$$

$$\text{mit } E \cdot I = \int_A E(z) \cdot z^2 \cdot dA \quad (2.6)$$

Dabei sind:

- $\sigma_{m,u,o}$ Randspannung [N/mm²]
- $E \cdot I$ Biegesteifigkeit [Nmm²]
- $E(z)$ E-Modul in Abhängigkeit von z [N/mm²]

Abgeleitet aus (2.5) und (2.6) kann zur Erreichung eines optimierten Querschnittaufbaus auf zwei Ansätze rückgeschlossen werden, um die Normalspannungen zu reduzieren bzw. die Biegesteifigkeit zu erhöhen.

- Anordnung von zusätzlichem Material in den Randzonen
- Einsatz von Lagen mit höherer Steifigkeit

2-4.1.1 Geometrische Optimierung

Ziel der geometrischen Optimierung ist es, den Querschnitt so zu gestalten, dass es zu einer optimalen Spannungsverteilung und zu einer hohen Ausnutzung jedes Querschnittsteils kommt.

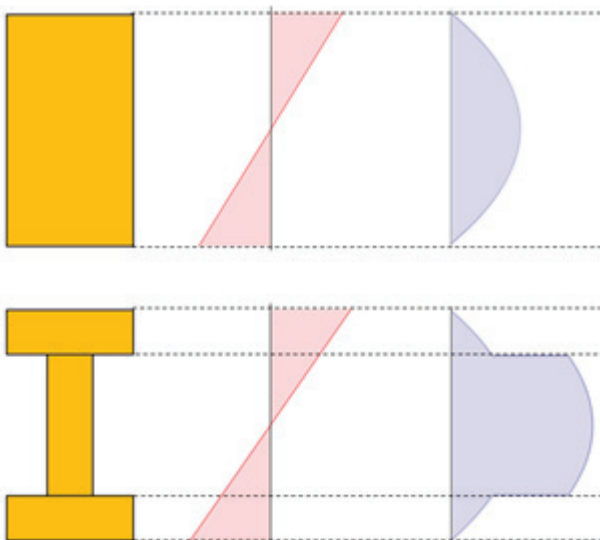


Abbildung 2-12 Spannungsverteilung Vollquerschnitt und I-Profil

Betrachtet man die Spannungsverteilung in Abbildung 2-12, kann man erkennen, dass bei gleicher Belastung die Randnormalspannungen beim I-Profil nur geringfügig größer sind als jene des Vollquerschnitts, obwohl Material entnommen wurde. Durch die Verjüngung nehmen jedoch die

Schubspannungen zu. Da in der Regel bei Vollquerschnitten die Schubtragfähigkeit nicht ausgenutzt ist, kann durch eine geometrische Optimierung die Gesamtausnutzung des Querschnittes gesteigert und das verwendete Material effizienter genutzt werden.

Tabelle 2-4: Querschnittsvergleich Geometrie

	Einheit	Rechteck	I-Träger	
Breite	[mm]	100	100	
Höhe	[mm]	200	200	
Breite Steg	[mm]	-	40	
Höhe Flansch	[mm]	-	40	
A	[mm ²]	200	128	-36,0 %
I	[mm ⁴]	6667	5803	-13,0 %

Trotz der Reduzierung des eingesetzten Materials um 36 % verringert sich das Trägheitsmoment und folglich die Biegesteifigkeit des I-Trägers lediglich um nur rund 13 %. Im Stahlbau sind I-Querschnitte zur Abtragung von Biegelasten Standard. Im Bereich des „Holzbaus“ kommen sie vorrangig bei Schalungsträgern zum Einsatz. Die Gurte bestehen meistens aus Fichtenholz, die Stege sind aus Vollholz, Dreischichtplatten, Spanplatten oder OSB (siehe Abbildung 2-13).



Abbildung 2-13: mögliche Ausführungen von Schalungsträger (links: Vollholz, rechts: Gittersteg), [14]

2-4.1.2 Materialtechnische Optimierung

Unter materialtechnischer Optimierung wird der optimale Einsatz von Materialien bzw. Baustoffe mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften verstanden.



Holz und Holzwerkstoffe unterscheiden sich in Bezug auf:

- Festigkeit
 - Biegung
 - Zug
 - Druck
 - Schub/Rollschub
- Steifigkeit
 - Elastizitätsmodul
 - Schubmodul

Ziel ist es, je nach Belastungsart und Anforderung, die optimale Holzart bzw. den optimalen Holzwerkstoff einzusetzen.

So kann zum Beispiel bei Brettsperrholz, durch die Kombination unterschiedlicher Festigkeitsklassen, eine Steigerung der Biegesteifigkeit bzw. der Biegefestigkeit erzielt werden. AUGUSTIN et. al. [15] führten diesbezüglich theoretische Berechnungen durch und kamen zu dem Ergebnis, dass durch die Verwendung von C40 in den Decklagen bei dem betrachteten BSP-Element eine Steigerung der Biegesteifigkeit von rund 20 % möglich ist (siehe Tabelle 2-5).

Tabelle 2-5: Querschnittsvergleich Materialeigenschaften, (Quelle: [15])

	Material innen	Material außen	K_{CLT} [Nm ²]
	C24	C24	2.583.900
	C24	C40	3.113.100
Vergleich			+20,5 %

Für Brettschichtholz sind in EN 14080 [10] kombinierte Aufbauten mit unterschiedlichen Festigkeitsklassen definiert (siehe Abschnitt 2-3.1). In den Randzonen kommen höherfeste Lamellen zum Einsatz als in den mittleren Lagen. Dies führt zu einer wirtschaftlicheren Herstellung von BSH mit höheren mechanischen Eigenschaften.

In den letzten Jahren rücken Laubhölzer immer weiter in den Focus der Forschung, da sie im Vergleich zu Nadelhölzern durchaus höhere Festigkeits- und Steifigkeitswerte aufweisen. Laubhölzer spielen im Bauwesen derzeit noch eine untergeordnete Rolle. Es gibt jedoch bereits Hersteller die Brettschichtholz aus z.B. Birke, Buche, Esche und Eiche produzieren, welche auch eine bauaufsichtliche Zulassung besitzen (siehe Abbildung 2-14) und somit dieses mögliche Potential nutzen.




Abbildung 2-14: Buchen-Fichten BSH (links) Buchen BSH (rechts), [16]

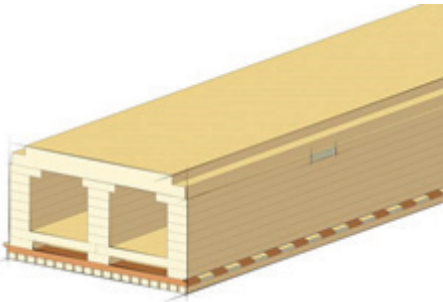
Beim Aufbau von Brettsperrholz können zum Beispiel durch die Verwendung alternativer Holzarten in den Querlagen mit einer höheren Rollschubfestigkeit und Rollschubmodul eingesetzt werden (vgl. EHRHART [1]). Der bessere Rollschubmodul führt zu einer geringeren Schubnachgiebigkeit und damit zu verminderten Durchbiegungen, womit die im Allgemeinen maßgebenden Gebrauchstauglichkeitseigenschaften leichter erreicht werden können.


2-4.2 ANWENDUNGEN

Aus den vorangegangenen Überlegungen der Querschnittsoptimierung entwickelten sich unter anderem Lösungen wie Hohlkastenelemente und Rippendecken. Im Folgenden sind am Markt erhältliche Produkte überblicksmäßig dargestellt.

Mit den aufgelisteten Produkten können trotz des geringen Materialeinsatzes im Vergleich zu Vollquerschnitten (wie BSH und BSP) beträchtliche Spannweiten von bis zu 9 m erzielt werden.

Lignatur Flächenelement	
	<ul style="list-style-type: none">• Festigkeit C24• Spannweiten bis 9.0 m• max. Länge 16 m• Elementhöhen: 120 – 320 mm• Füllung mit Dämmung oder Schüttung optional
<i>Abbildung 2-15: Lignatur Flächenelement, [17]</i>	

Lignotrend	
	<ul style="list-style-type: none">• Festigkeit C24• Spannweiten bis 8.0 m• max. Länge 16 m• Elementhöhen: 140 – 440 mm• Füllung mit Dämmung oder Schüttung optional
<i>Abbildung 2-16: Lignotrend Hohlkastenelement, [18]</i>	

Kielstegträger	
	<ul style="list-style-type: none">• Festigkeit C24• Spannweiten bis 27 m• max. Länge 35 m• Elementhöhen: 228 – 800 mm• Füllung mit Dämmung oder Schüttung optional
<i>Abbildung 2-17: Kielstegträger Fa. Kulmer, [19]</i>	

KAPITEL 3: HOHLLAMELLE - ANALYTISCHE BETRACHTUNG

Im folgenden Kapitel wird für das Grundprodukt Hohllamelle (kurz HL) ein Profil der erforderlichen bzw. zu erwartenden mechanischen Eigenschaften der HL erstellt und einem Querschnitt aus konventionellem Vollholz gegenübergestellt. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die Rollschubeigenschaften und das Langzeitverhalten (Kriechen) gelegt.

3-1 MATERIAL UND GEOMETRIE

Das als „Hohllamelle“ bezeichnete Produkt besteht aus drei Lagen Fichtenholz. Die Lagen weisen zueinander dieselbe Orientierung des Faserverlaufs auf, wobei die mittlere Lage, zur Optimierung des Rohstoffeinsatzes, in einzelne Stege unterteilt ist (siehe Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2). Das Produkt ist hauptsächlich aus schmalen Seitenwarenbrettern mit einer Stärke $t = 14$ mm aufgebaut. Aufgrund der Verwendung von Material aus kernfernen Zonen (adultes Holz) kann in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften von einer hohen Holzqualität ausgegangen werden (vgl. Abbildung 2-2).

Im Zuge dieser Masterarbeit wurden zwei unterschiedliche Produktprototypen (HL86 und HL112) mit unterschiedlichen Abmessungen untersucht (siehe Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2 bzw. Tabelle 3-1).

Die Dimensionen der Ausgangsprodukte der „Hohllamellen“ ergeben sich aus dem Abstand der Stege. Die seitenverklebten Decklagen der HL sind jeweils bei den Stegen gestoßen. Dadurch ergibt sich für den Prototyp HL86 bei einem Stegabstand $e = 86$ mm eine Brettbreite $b = 86$ mm und für den Typ HL112 eine Brettbreite $b = 112$ mm des Ausgangsmaterials.

Tabelle 3-1: Abmessungen Hohllamellenprototypen HL86 und HL112

	Einheit	HL86	HL112
Breite	[mm]	258	224
Höhe	[mm]	42	42
Anzahl Stege	[-]	4	3
Stegbreite	[mm]	42	42
A_{Netto}	[mm ²]	8988	7448
Materialeinsparung gegenüber Vollquerschnitt	[%]	17,1	20,8

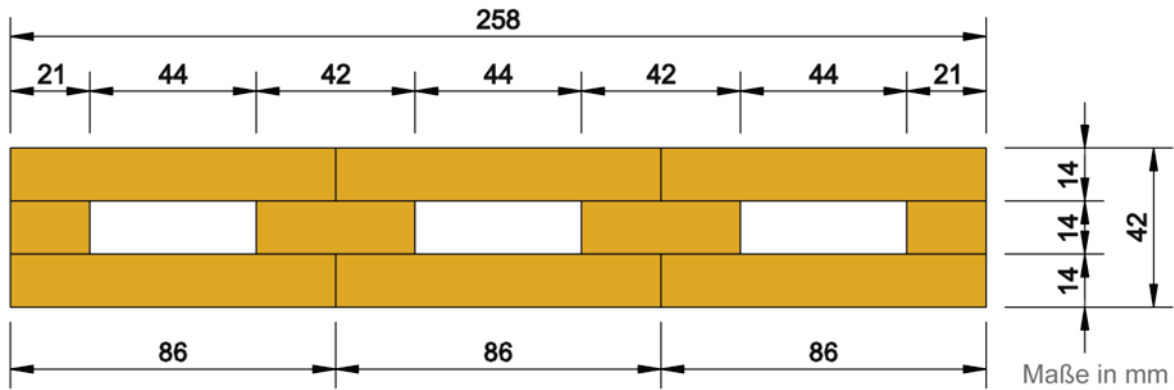


Abbildung 3-1: Geometrie HL86

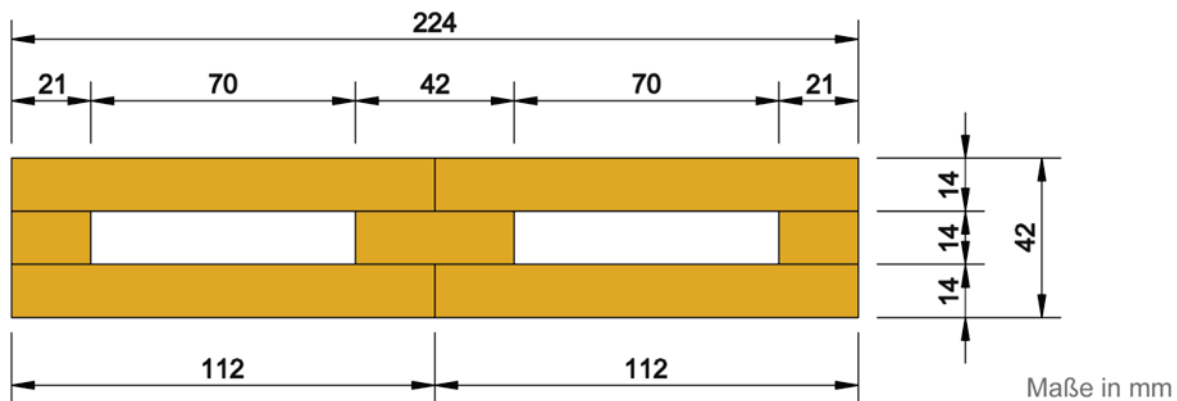


Abbildung 3-2: Geometrie HL112

Durch die Aussparungen im Querschnitt ändern sich die mechanischen Eigenschaften bezogen auf den Bruttoquerschnitt. Im Folgenden werden die Auswirkungen auf die erforderlichen Materialeigenschaften von Hohllamellen analysiert bzw. mögliche Problemzonen aufgezeigt. Als Basis für den Vergleich der mechanischen Kenngrößen (insbesondere Festigkeit und Steifigkeit) wird ein homogener Bauholzquerschnitt herangezogen.

3-2 ZUG

Die Zugtragfähigkeit und die Dehnsteifigkeit der HL im Bezug zu Vollholz sind vom Verhältnis zwischen Brutto- und Nettoquerschnittsfläche abhängig. Um am Bruttoquerschnitt dieselben mechanischen Eigenschaften wie C24 (lt. EN 338 [7]) zu erhalten, sind dadurch höhere mechanische Eigenschaften des Grundmaterials notwendig. Die Berechnung erfolgt nach (3.1) und (3.2). Die Ergebnisse für die beiden HL-Typen sind in Tabelle 3-2 tabellarisch zusammengestellt.

$$f_{t,HL} = f_{t,C24} \cdot \frac{A_{Brutto}}{A_{Netto}} \quad (3.1)$$

$$E_{t,0,HL} = E_{t,0,C24} \cdot \frac{A_{Brutto}}{A_{Netto}} \quad (3.2)$$

Dabei sind:

- f_t Zugfestigkeit [N/mm²]
- E_t Zug-E-Modul [N/mm²]
- A Querschnittsfläche (Netto/Brutto) [mm²]

Tabelle 3-2: Anforderung an die Grundprodukte HL86 und HL112 für die Zugkennwerte eines vergleichbaren homogenen Querschnitts

	Einheit	C24	HL86	HL112
$A_{\text{Netto}} / A_{\text{Brutto}}$	[%]	100	82,9	79,2
f_t bzw. $f_{t,\text{erf.}}$	[N/mm ²]	14,0	16,9 ¹⁾	17,7 ¹⁾
$E_{t,0}$ bzw. $E_{t,0,\text{erf.}}$	[N/mm ²]	11.000	13.300 ¹⁾	13.900 ¹⁾

Anmerkung:

¹⁾ erforderliche/er Festigkeit/E-Modul des Grundmaterials zum Erreichen der mechanischen Eigenschaften der Festigkeitsklasse C24 im Brutto-Querschnitt

Für den weiteren Einsatz der Hohllamelle zum Aufbau gesperrter Bauteile sind die mechanischen Zugeigenschaften von großer Bedeutung, da die vorhandenen Tragmodelle von Holzwerkstoffen wie Brettsperrholz vorrangig über die Zugeigenschaften der verwendeten Lamellen bzw. des Ausgangsproduktes „Brett“ definiert sind. Der erforderliche E-Modul des Grundmaterials der HL, um am Bruttoquerschnitt die mechanischen Eigenschaften von C24 zu erlangen, liegt bei rund 13.900 N/mm². Angesichts der Verwendung von Material aus kernfernen Zonen ($E_t \sim +25\%$; vgl. BRANDNER [3]) zur Produktion der Hohllamellen ist es durchaus realistisch diese Kenngröße zu erreichen.

3-3 BIEGUNG

Die Biegefestigkeit und die Biegesteifigkeit der HL sind im Gegensatz zu den Zugkennwerten vom Verhältnis der Trägheitsmomente abhängig. Der Einfluss der Querschnittsreduktion ist in Bezug auf die Biegekennwerte vergleichsweise gering (siehe Tabelle 3-3).

$$f_{m,HL} = f_{m,C24} \cdot \frac{I_{\text{Brutto}}}{I_{\text{Netto}}} \quad (3.3)$$

$$E_{m,HL} = E_{m,C24} \cdot \frac{I_{\text{Brutto}}}{I_{\text{Netto}}} \quad (3.4)$$

Dabei sind:

- f_m Biegefestigkeit [N/mm²]
- E_m Biege-E-Modul [N/mm²]
- I Trägheitsmoment (Netto/Brutto) [mm⁴]

Tabelle 3-3: Anforderung an die Grundprodukte HL86 und HL112 für die Biegekennwerte eines vergleichbaren homogenen Querschnitts

	Einheit	C24	HL86	HL112
$I_{\text{Netto}} / I_{\text{Brutto}}$	[%]	100	98,1	99,8
f_m bzw. $f_{m,\text{erf.}}$	[N/mm ²]	24,0	24,5 ¹⁾	24,0 ¹⁾
E_m bzw. $E_{m,\text{erf.}}$	[N/mm ²]	11.000	11.200 ¹⁾	11.000 ¹⁾

Anmerkung:

¹⁾ erforderliche/er Festigkeit/E-Modul des Grundmaterials zum Erreichen der mechanischen Eigenschaften der Festigkeitsklasse C24 im Brutto-Querschnitt

3-4 QUERDRUCK

Bei Belastungen quer zur Hohllamelle kommt es zur Ausbildung von „Drucksäulen“ im Bereich der Stege, der restliche Querschnitt kann keine Kräfte aufnehmen. Diese Verteilung der Querdruckspannung führt dazu, dass bezogen auf die Bruttofläche eine geringere Querdruckfestigkeit erreichbar ist.

$$f_{c,90,HL,Brutto} = f_{c,90,C24} \cdot \frac{A_{Netto}}{A_{Brutto}} \quad (3.5)$$

$$E_{c,90,HL,Brutto} = E_{c,90,C24} \cdot \frac{A_{Netto}}{A_{Brutto}} \quad (3.6)$$

Dabei sind:

- f_c Druckfestigkeit [N/mm²]
- E_c Druck-E-Modul quer zur Faser [N/mm²]
- A Querschnittsfläche (Netto/Brutto) [mm²]

Tabelle 3-4: Anforderung an die Grundprodukte HL86 und HL112 für die Querdrucktragfähigkeit eines vergleichbaren homogenen Querschnitts

	Einheit	C24	HL86	HL112
A_{Netto} / A_{Brutto}	[%]	100	48,8	37,5
$f_{c,90,Brutto}$	[N/mm ²]	2,50	5,12 ¹⁾	6,67 ¹⁾
$E_{c,90}$	[N/mm ²]	370	758 ¹⁾	987 ¹⁾

Anmerkung:

¹⁾ erforderliche/er Festigkeit/E-Modul des Grundmaterials zum Erreichen der mechanischen Eigenschaften der Festigkeitsklasse C24 im Brutto-Querschnitt

Die errechneten Anforderungen an das Grundmaterial kann in der Realität von mit Fichtenholz aufgebauten Produkten nicht erreicht werden. Es ist davon auszugehen, dass die erzielbare Querdruckfestigkeit (bezogen auf den Brutto-Querschnitt) der Hohllamelle deutlich unter jener von C24 zu liegen kommt. Dies kann vor allem bei lokalen Lasteinleitungen die Leistungsfähigkeit des Produktes einschränken.

3-4.1 MEHRSCHICHTIGER AUFBAU

Im geschichteten Aufbau wirken die Decklagen der Hohllamelle stabilisierend auf die Drucksäulen gegen ein eventuelles Ausknicken (geschichteter Aufbau: siehe Abbildung 3-3).

Mit gesperrten Lagen kommt es zu einer besseren Stabilisierung der Drucksäulen auf Grund der höheren Dehnsteifigkeit parallel zur Faser und somit zu einer höheren Querdruckfestigkeit. HALILI [20] stellte versuchstechnisch fest, dass BSP aufgrund des gekreuzten Aufbaus eine höhere Querdruckfestigkeit als BSH aufweist.

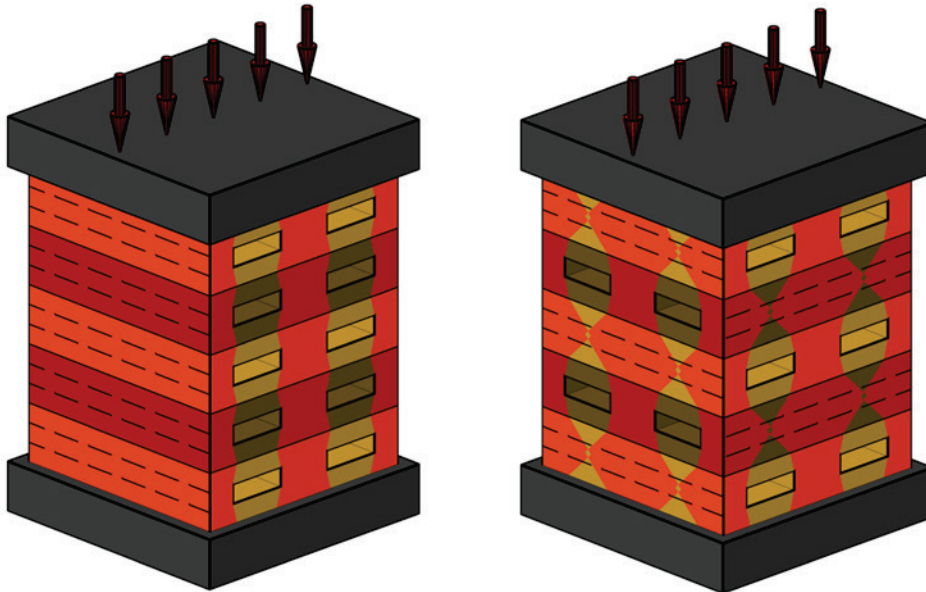


Abbildung 3-3: *Querdruckverteilung Hohllamelle (links:-geschichtet, rechts: gesperrt)*

3-5 SCHUB

Die Schubeigenschaften unterscheiden sich je nach Wirkungsebene. Die möglichen Schubebenen von Holz sind in Abbildung 3-4 dargestellt.

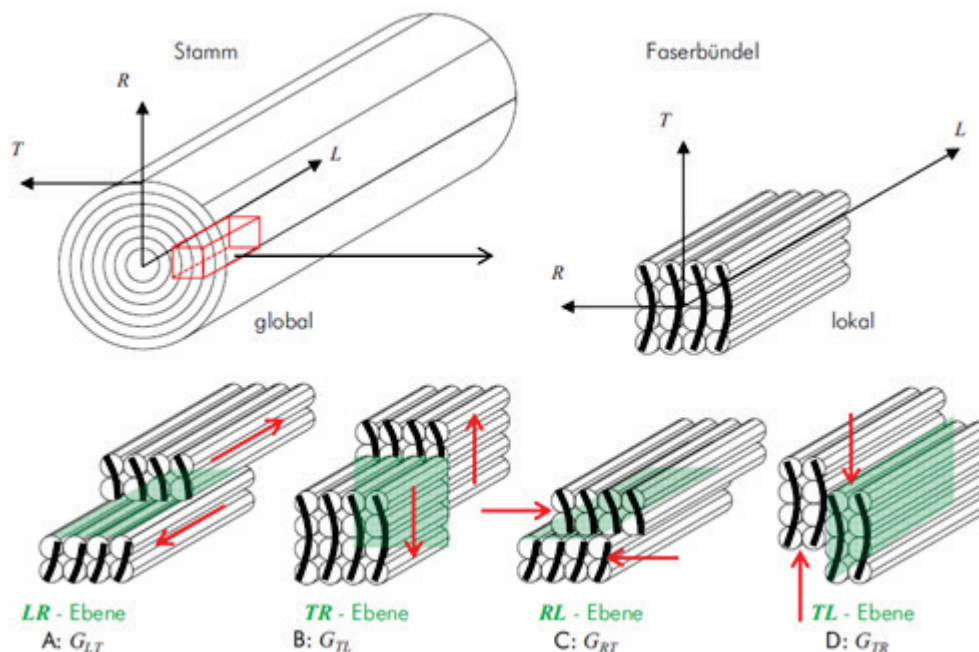


Abbildung 3-4: *Übersicht Schubebenen im Werkstoff Holz (A & B: Schub parallel zur Faser, C & D: Schub quer zur Faser – Rollschub), [1]*

Die Rollschubfestigkeit und der Rollschubmodul liegen deutlich unter jenen längs zur Faser. Eine zusammenfassende Auflistung zur Veranschaulichung des richtungsabhängigen Verhaltens der Schubkenngrößen kann der Tabelle 3-5 entnommen werden.

Tabelle 3-5 Richtungsabhängige Schubkenngrößen von Holz

Festigkeitsklasse lt. EN 338	$f_{v,0,90,k}$ ²⁾ [N/mm ²]	$G_{0,90}$ [N/mm ²]	$f_{v,90,0,k}$ ¹⁾ [N/mm ²]	$G_{90,90}$ ¹⁾ [N/mm ²]
C24	4,00	690	1,00	69,0

Anmerkung:

¹⁾ Richtwerte aus Zulassungen von BSP (Werte in der EN 338 nicht definiert)

²⁾ gilt für Vollholz ohne Schwindrisse

3-5.1 SCHUB PARALLEL ZUR FASER

Die Schubtragfähigkeit der HL ist im Gegensatz zu einem Vollquerschnitt aufgrund der schmälere Stege verhältnismäßig gering (siehe Tabelle 3-6).

$$f_{v,HL} = f_{v,C24} \cdot \frac{B_{Brutto}}{\sum b_{Steg}} \cdot \frac{I_{Brutto}}{I_{Netto}} \cdot \frac{S_{Netto}}{S_{Brutto}} \quad (3.7)$$

Dabei sind:

- f_v Schubfestigkeit [N/mm²]
- B_{Netto} Breite einer HL [mm]
- $\sum b_{Steg}$ Summe der Stegbreiten einer HL [mm]
- I Trägheitsmoment (Netto/Brutto) [mm⁴]
- S statisches Moment (Netto/Brutto) [mm³]

Tabelle 3-6: Anforderung an die Grundprodukte HL86 und HL112 für die Schubtragfähigkeit eines vergleichbaren homogenen Querschnitts

	Einheit	C24	HL86	HL112
B_{Brutto} / b_{Steg}	[%]	100	205	267
S_{Netto} / S_{Brutto}	[%]	100	139	138
I_{Brutto} / I_{Netto}	[%]	100	102	102
f_v bzw. $f_{v,erf.}$	[N/mm ²]	4,00	7,87 ¹⁾	10,2 ¹⁾

Anmerkung:

¹⁾ erforderliche/er Festigkeit/E-Modul des Grundmaterials zum Erreichen der mechanischen Eigenschaften der Festigkeitsklasse C24 im Brutto-Querschnitt

Aufgrund der Hohlräume in der Hohllamelle kommt es zu höheren Schubspannungen in den Stegen des Querschnitts. Für die Berechnung der Schubspannungen in Abbildung 3-5 wurde ein starrer Verbund zugrunde gelegt. Die auftretenden Schubspannungen ergeben sich aus:

$$\tau_v = \frac{V \cdot S(z)}{I \cdot b(z)} \quad (3.8)$$

Dabei sind:

- V Querkraft [N]
- $S(z)$ statisches Moment in Abhängigkeit von z [mm³]
- I Trägheitsmoment [mm⁴]
- $b(z)$ Breite in Abhängigkeit von z [mm]

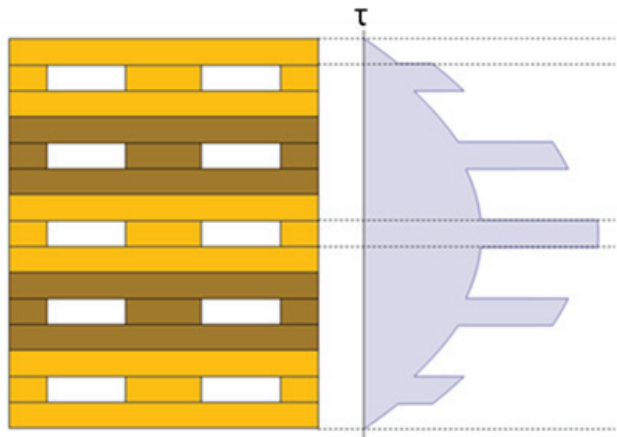


Abbildung 3-5: qualitativer Schubspannungsverlauf für fünfschichtiges HL-BSH nach Gleichung (3.8)

Die vorhandenen Schubspannungen im, aus Hohllamellen aufgebauten, Schichtholzprodukt berechnen sich nach Gleichung (3.8). Aufgrund der reduzierten Breite im Bereich der Stege auf rund die Hälfte der gesamten Breite, verdoppeln sich die Schubspannungen im Bereich der Stege (siehe Abbildung 3-5).

3-5.2 SCHUB QUER ZUR FASER – ROLLSCHUB

3-5.2.1 Stand des Wissens

Die Rollschubkennwerte von Holz hängen von mehreren Parametern ab. Die wichtigsten Einflussgrößen werden im Folgenden kurz erläutert:

Rohdichte / Holzart

Der Einfluss der Rohdichte auf die Rollschubkenngrößen von insgesamt neun verschiedenen Nadelhölzern wurde von BENDTSEN [21] untersucht. Die Prüfkörper wiesen dabei ein b/h-Verhältnis von 12 auf. Die Zusammenhänge zwischen der Rollschubfestigkeit bzw. des Rollschubmoduls und der Rohdichte sind in Abbildung 3-6 dargestellt.

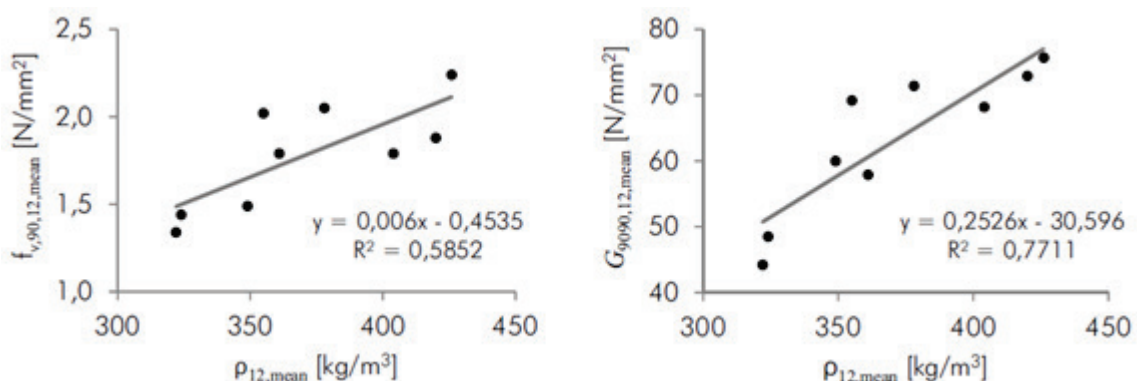


Abbildung 3-6: Zusammenhang der Rollschubkenngrößen und der Rohdichte nach [21], aus [1]

Die Untersuchungen von EHRHART [1] führten zu ähnlich stark korrelierenden Zusammenhängen bei der Betrachtung innerhalb einzelner Holzarten. Die Analyse des Zusammenhangs der Rohdichte und den mechanischen Eigenschaften für unterschiedliche Holzarten führte zu den in Abbildung 3-7 gezeigten Ergebnissen.

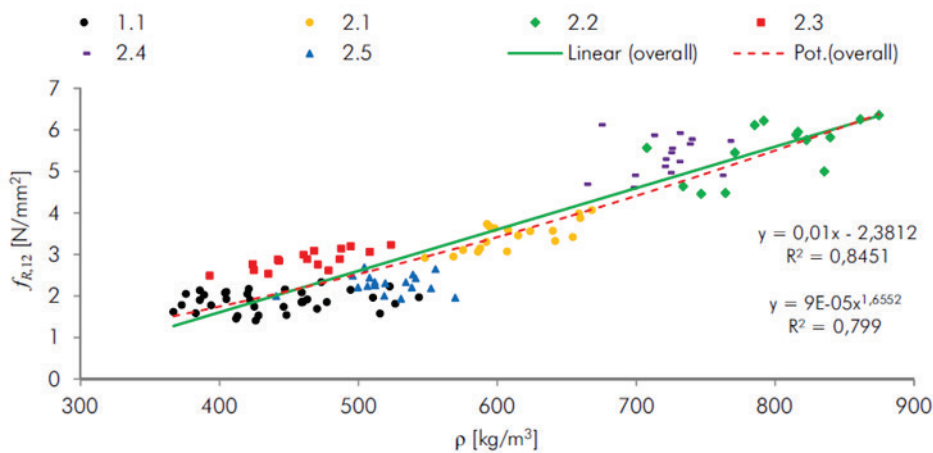


Abbildung 3-7: Zusammenhang zwischen Rollschubfestigkeit und der Rohdichte (1.1-Fichte, 2.1-Birke, 2.2-Esche, 2.3-Pappel, 2.4-Buche, 2.5-Kiefer) aus [1]

Es ist ersichtlich, dass die, von BENDTSEN [21] ermittelten, Festigkeiten höher liegen als in [1]. Dies kann auf die unterschiedliche Geometrie der Prüfkörper zurückzuführen sein. Das Verhältnis zwischen der Brettbreite und -höhe (h/b -Verhältnis) lag in [21] bei $h/b = 12$ und bei den Untersuchungen von EHRHART bei $h/b = 4$.

Geometrische Einflüsse

JAKOBS [22] führte Untersuchungen an dreischichtigen Plattenstreifen mit unterschiedlichen Abmessungen der Einzelbretter in aufgelösten Querlagen durch und ermittelte „scheinbare“ Rollschubmoduln in Abhängigkeit vom Verhältnis „ h/b “. Die Ergebnisse seiner Untersuchungen sind in Abbildung 3-8 dargestellt. Für die Berechnung des „scheinbaren“ Rollschubmoduls wird in [22] der in (3.9) beschriebene Zusammenhang postuliert. Der Faktor „uprozent“ beschreibt dabei die nichtlinearen Schubverformungen, welche sich aus der Geometrie des Querlagen (h/b -Verhältnis) und den Randbedingungen (schubspannungsfreie Brettschmalseiten) ergeben.

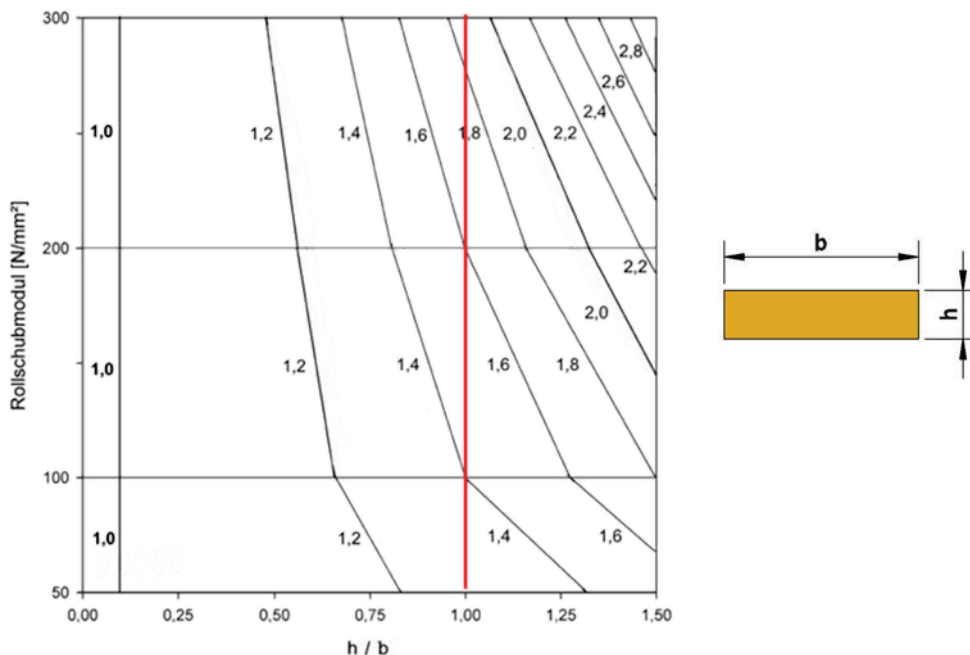


Abbildung 3-8: Nomogramm Faktor „uprozent“ in Abhängigkeit von h/b ($h=d$ =Dicke, b =Breite) aus [22]

$$G_{r,Brettlage} = \frac{1}{\text{uprozent}} \cdot \frac{\left(\sum_{i=1}^n b_i \right)}{b_{\text{Abschnitt}}} \cdot G_{r,mean} \quad (3.9)$$

Dabei sind:

- $G_{r,Brettlage}$ resultierender Rollschubmodul [N/mm²]
- b_i Breite der einzelnen Bretter [mm]
- $b_{\text{Abschnitt}}$ Breite des betrachteten Bereiches [mm]
- $G_{r,mean}$ Rollschubmodul Grundmaterial [N/mm²]
- uprozent Faktor zur Berücksichtigung nichtlinearer Schubverformungen in Abhängigkeit des d/b-Verhältnisses [-]

Die Untersuchungen von EHRHART [1] zeigten, dass je kleiner das b/d-Verhältnis (oder auch b/h) wird, umso geringer ist die zu erwartende Rollschubfestigkeit bzw. der effektive Rollschubmodul. Hierbei ist anzumerken, dass die Lage der Jahrringe innerhalb der Bretter ebenfalls einen Einfluss hat und in der Regel bei größeren Brettbreiten vorteilhafter ist (siehe Abbildung 3-9).

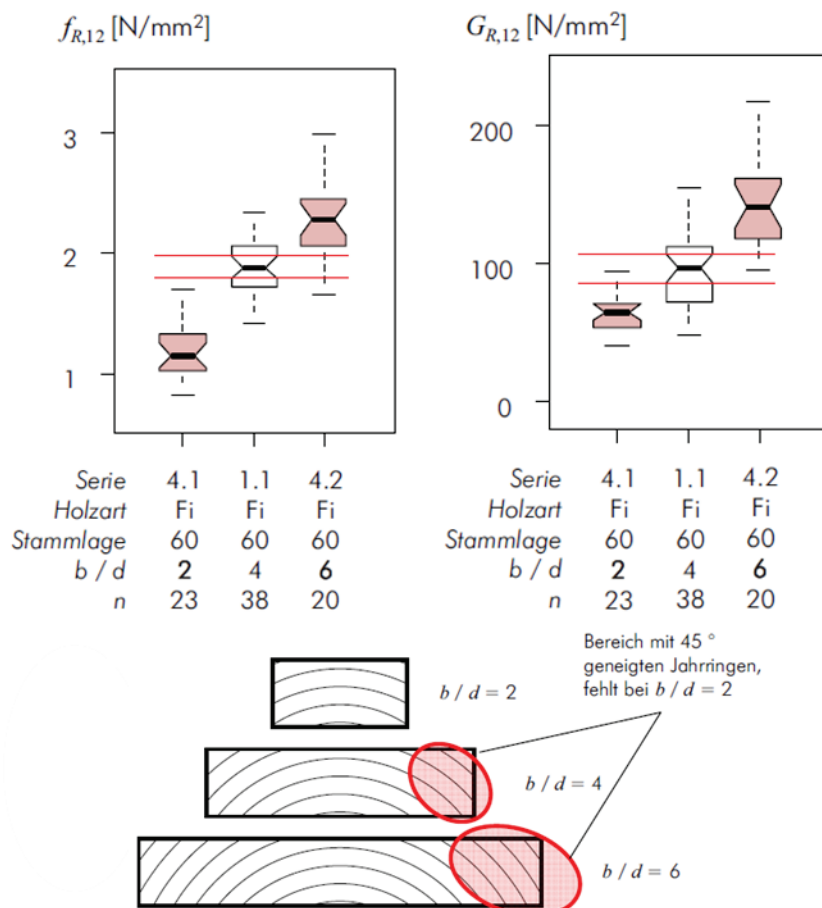


Abbildung 3-9: Rollschubkenngrößen in Abhängigkeit vom h/b-Verhältnis aus [1]

Lage der Jahrringe

Die Lage bzw. die Verteilung der Jahrringe im Brett beeinflussen dessen effektiven Rollschubmodul. FE-Studien in [22], [23] und [24] zeigen jenen Einfluss (siehe Abbildung 3-10).

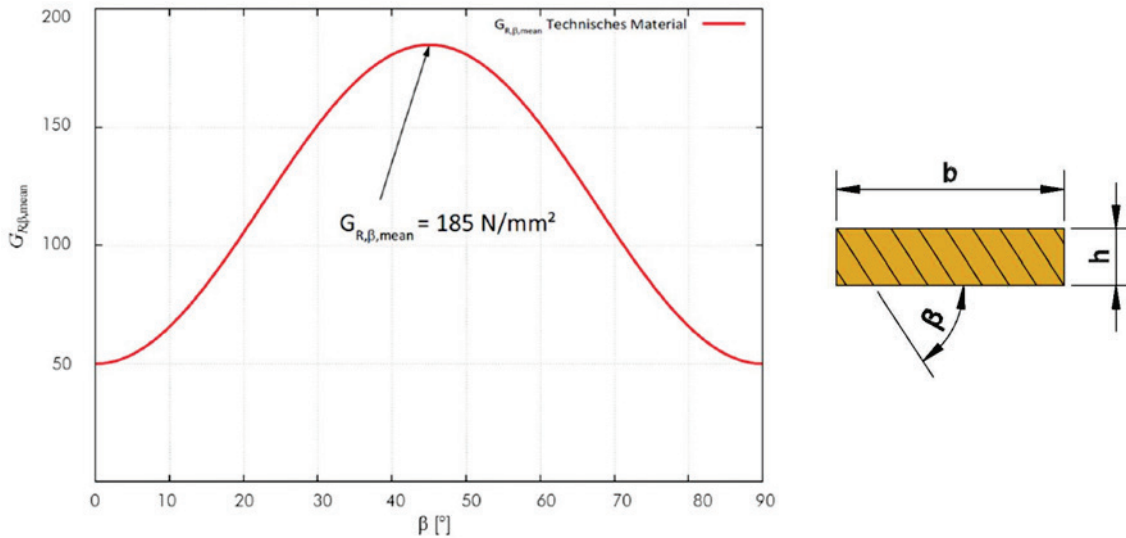


Abbildung 3-10: theoretischer Rollschubmodul in Abhängigkeit der Jahrringneigung (β) aus [24]

Dieser Einfluss der Jahrringlage konnte auch von GÖRLACHER in [25] festgestellt werden. Der Autor ermittelte über Eigenfrequenzen der Biegeschwingung (in Richtung 1 und 2 siehe Abbildung 3-11) den Rollschubmodul der Probekörper und stellte folgenden Zusammenhang fest:

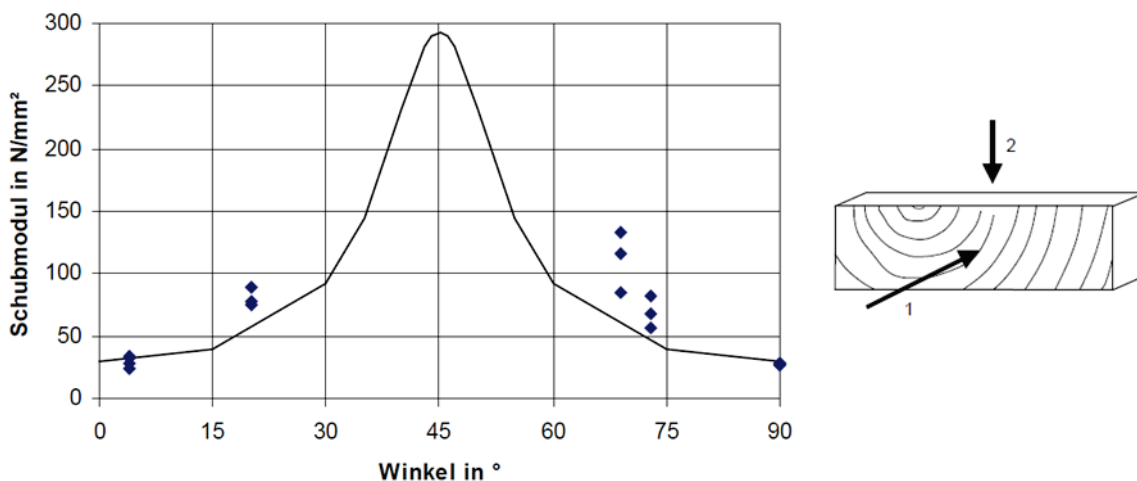


Abbildung 3-11: Rollschubmodul in Abhängigkeit der Jahrringneigung aus [25]

Die Kurve in Abbildung 3-11 beschreibt lt. [25] den theoretischen Zusammenhang zwischen dem Rollschubmodul und der Jahrringneigung und die Datenpunkte stellen ermittelte Prüfwerte dar. Aufgrund von Messungenauigkeit liefert das in [25] angewandte Verfahren für Jahrringneigungen zwischen 35° und 55° keine exakten Werte, da in jenen Bereichen die Schubverformungen zu gering sind.

Untersuchungen von EHRHART [1] zeigen ebenfalls den Einfluss der Jahrringlage auf den effektiven Rollschubmodul des einzelnen Brettes. Der Autor ermittelte dabei den Rollschubmodul mittels Scherprüfungen. In Abbildung 3-12 sind die Versuchsergebnisse aus [1] dargestellt. Dabei beschreibt die X-Achse den Abstand des Brettes von der Markröhre. Es ist zu erkennen, dass bei größeren Entfernungen (Jahrringlage tendenziell parallel zur Brettunterkante $\beta = 0^\circ$) der Rollschubmodul stark abnimmt.

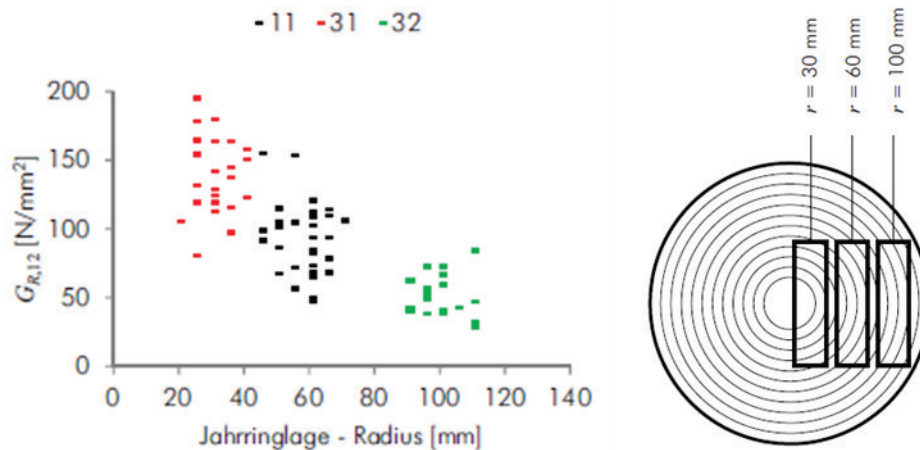


Abbildung 3-12: Rollschubmodul in Abhängigkeit von der Jahrringlage aus [1]

Es ist zu erkennen, dass Bretter mit einem höheren Anteil an liegenden Jahrringen (JR) einen niedrigeren Rollschubmodul aufweisen. Bei einem Abstand von 30 mm vom Kern weist ein Großteil der JR eine Neigung von 45° zur Brettkante auf und die ermittelten Rollschubmoduln liegen rund drei Mal so hoch wie bei liegenden Jahrringen.

3-5.2.2 Umlegung auf das Produkt Hohllamelle

Im Folgenden werden die in der Literatur gefunden Zusammenhänge der Rollschubeigenschaften auf die Grundprodukte HL86 und HL112 umzulegen.

Rollschubfestigkeit

Bei der Verwendung von Hohllamellen in der Querlage ist aufgrund der Geometrie mit geringeren Rollschubfestigkeiten zu rechnen, da gerade bei b/d -Verhältnissen die Rollschubfestigkeit abnimmt und die Querspannungen in der Querlage zunehmen (siehe Abbildung 3-13).

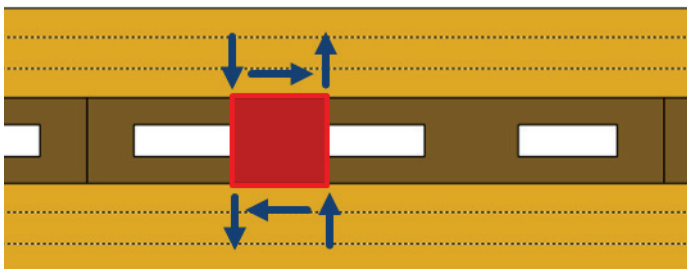


Abbildung 3-13: Rollschub Hohllamelle in Querlage

FEICHTER [24] führte FE-Untersuchungen mit BSP-Querschnitten, welche Aussparungen in der Querlage aufwiesen (siehe Abbildung 3-14), durch.

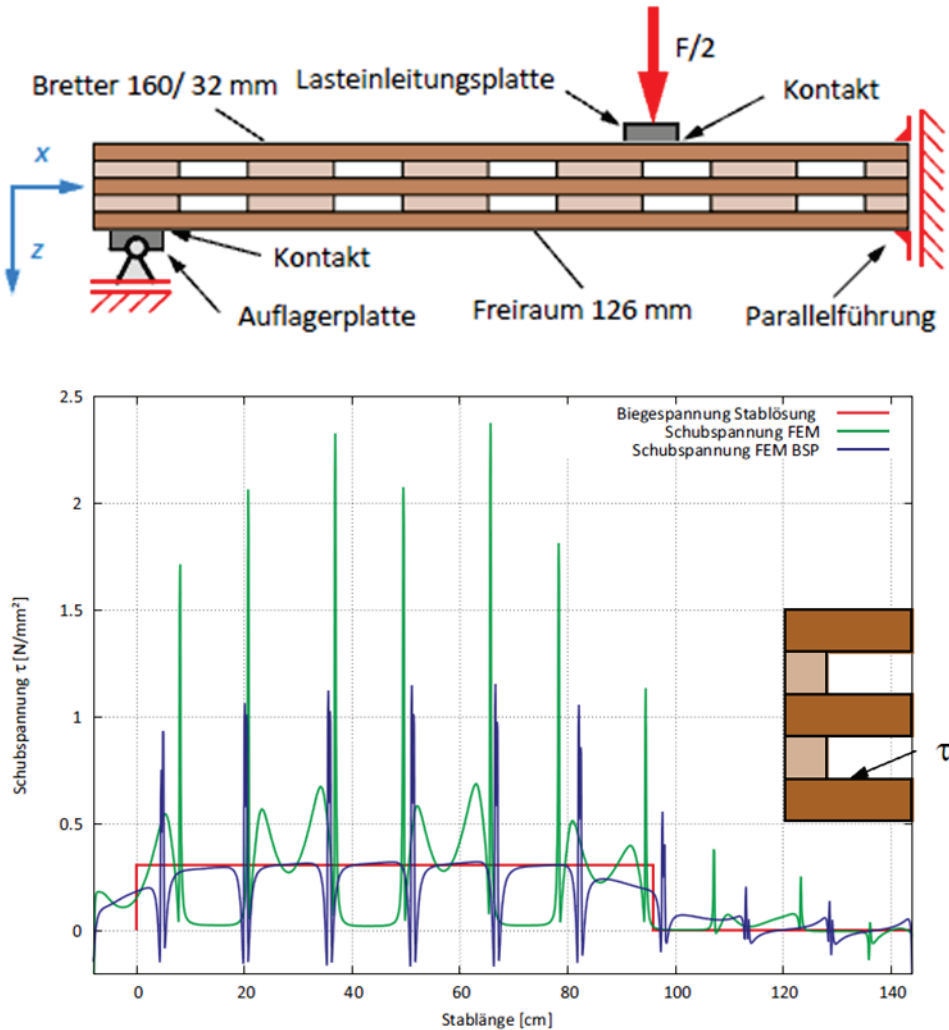


Abbildung 3-14: Schubspannungsverlauf eines BSP-Querschnitts mit aufgelöster Querlage aus [24]

Die in Abbildung 3-14 ersichtlichen Spannungsspitzen durch die kontinuierliche Ein- bzw. Ausleitung der Schubspannungen in die Querlage für den in [24] untersuchten BSP-Querschnitt liegen deutlich über jenen von konventionellem BSP. Für die Hohlramelle kann erwartet werden, dass die auftretenden Schubspannungen im Bereich dazwischen liegen werden, da ein Querschnitt mit Hohlramellen in der Querlage „homogener“ ist, als jener beim BSP-Querschnitt mit aufgelöster Querlage.

Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die **Rollschubfestigkeit** der Hohlramellenprototypen aufgrund deren Geometrie deutlich **unter $f_{r,k} = 1,0 \text{ N/mm}^2$** zu liegen kommen wird.

Rollschubsteifigkeit

Adaptiert man die von JAKOBS [22] postulierte Gleichung (3.9) für die Anwendung auf die Querschnittsgeometrie der Hohllamelle ergibt sich (3.10):

$$G_{r,Brettlage} = \frac{1}{uprozent} \cdot \frac{b_{Steg}}{b} \cdot G_{r,mean} \quad (3.10)$$

Dabei sind:

- $G_{r,Brettlage}$ resultierender Rollschubmodul [N/mm²]
- b_{Steg} Breite der Stege einer Hohllamelle [mm]
- b Breite einer Hohllamelle [mm]
- $G_{r,mean}$ Rollschubmodul Grundmaterial [N/mm²]
- $uprozent$...Faktor zur Berücksichtigung nichtlinearer Schubverformung in Abhängigkeit des d/b-Verhältnisses [-]

Mit Gleichung (3.10) wurden effektive Rollschubmoduln für die beiden untersuchten Hohllamellentypen und verschiedenen Rollschubmoduln berechnet (siehe Tabelle 3-7). Es ist anzumerken, dass in Anlehnung an den konservativen Ansatz in Abbildung 3-13 ein d/b-Verhältnis von 1,0 angenommen wurde.

Tabelle 3-7: scheinbarer Rollschubmodul bei der Verwendung von HL in der Querlage nach [22]

	$G_{r,mean}$ [N/mm ²]	b_{Steg} [mm]	b [mm]	d/b [-]	$uprozent$ [-]	$G_{r,Brettlage}$ [N/mm ²]	$\frac{G_{r,HL}}{G_{r,mean}}$ [%]
HL86	50	126	258	1,00	1,25	19,5	38,9
	69	126	258	1,00	1,31	25,7	37,2
	72	126	258	1,00	1,32	26,6	37,0
	81	126	258	1,00	1,35	29,4	36,2
HL112	50	84	224	1,00	1,25	14,9	29,9
	69	84	224	1,00	1,31	19,7	28,6
	72	84	224	1,00	1,32	20,4	28,4
	81	84	224	1,00	1,35	22,5	27,8

Der effektive Rollschubmodul der Hohllamelle liegt somit deutlich unter dem einer Vollholzlage. Es kann davon ausgegangen werden, dass es aufgrund der schubnachgiebigeren Querlage im Vergleich zu konventionellem Brettsperholz zu größeren Schubverformungen kommen wird.

FE-Analyse

Bei der vorhergehenden Berechnung des scheinbaren Rollschubmoduls nach JAKOBS [22] werden die breiteren Decklagen und die schmälere Stege an den Schmalseiten der Hohllamelle nicht berücksichtigt. Um jene Einflüsse abzuschätzen bzw. zu berücksichtigen, wurden FE-Berechnungen durchgeführt. Dabei wurde zur Berechnung des effektiven Rollschubmoduls folgendes Modell angenommen:

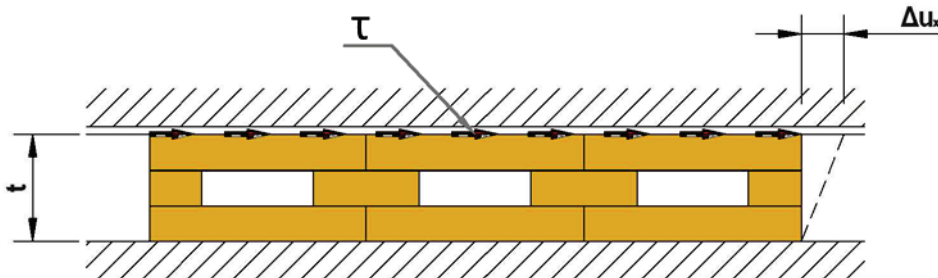


Abbildung 3-15: FE-Modell zur Ermittlung des effektiven Rollschubmoduls des Prototypen HL86

Der effektive Rollschubmodul der Hohllamellen kann in weiterer Folge über die Verschiebung der Brettoberkante ermittelt werden.

$$G_{r,eff} = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\tau}{\frac{\Delta u_x}{t}} \quad (3.11)$$

Dabei sind:

- $G_{r,eff}$ effektiver Rollschubmodul [N/mm²]
- τ Schubspannung an der Brettoberkante (hier mit $\tau = 0,50$ N/mm²) [N/mm²]
- γ Schubverzerrung [-]
- t Gesamtdicke der HL (hier mit $t = 42$ mm) [mm]
- Δu_x Verschiebung an der Brettoberkante in X-Richtung [mm]

Die Modellierung im FE-Programm RFEM 5.04 [26] erfolgte über orthotrope Scheibenelemente mit den Kennwerten aus Tabelle 3-8.

Tabelle 3-8: Materialkennwerte FE-Modell

	Einheit	Wert
E_x	[N/mm ²]	0,01 ¹⁾ / 370
E_y	[N/mm ²]	370
G_{xy} ²⁾	[N/mm ²]	69,0 / 72,0 / 81,0

Anmerkung:

¹⁾ Eingabe von $E_x = 0$ N/mm² im verwendeten Programm RFEM 5.04 nicht möglich

²⁾ mittlerer Rollschubmodul des Grundmaterials

In Abbildung 3-16 sind Spannungsverläufe einer Hohllamelle des Typs HL86 unter reiner Rollschubbeanspruchung dargestellt.

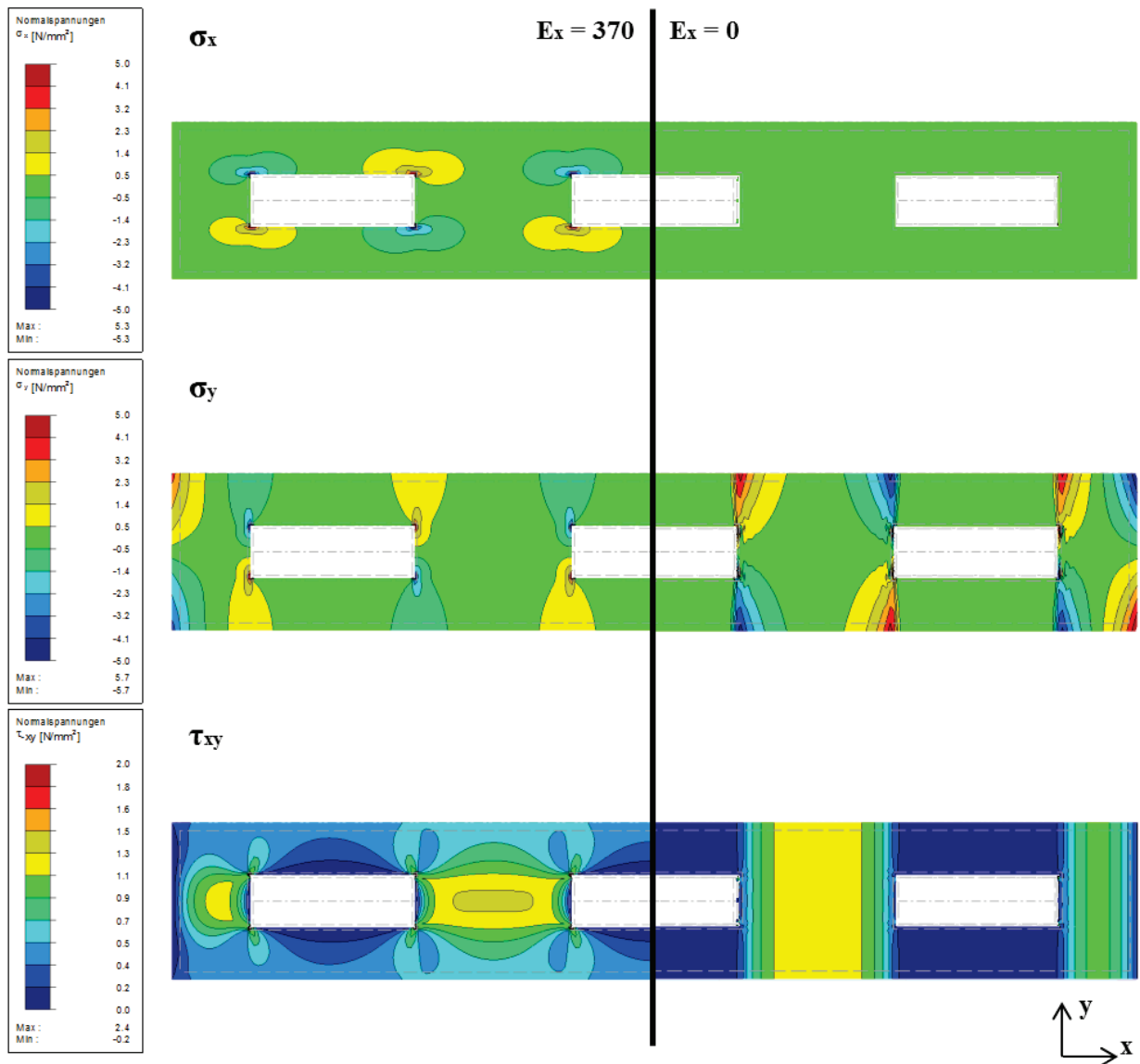


Abbildung 3-16: Qualitative Spannungsverlauf Hohllamelle unter Rollschub
(links: $E_x = 370 \text{ N/mm}^2$, rechts: $E_x = 0 \text{ N/mm}^2$)

Die Schubspannungen konzentrieren sich vorwiegend in den Stegbereichen, wobei zu erkennen ist, dass es im Falle $E_x = 370 \text{ N/mm}^2$ zu einer Verteilung der Rollschubspannungen in der Decklage kommt. Die Betrachtung mit $E_x = 0 \text{ N/mm}^2$ entspricht der zuvor getroffenen Betrachtung nach JAKOBS. Zusätzlich werden hier jedoch die schmälere Stege an den Rändern der Querschnitte berücksichtigt.

In beiden Fällen kommt es aufgrund der Schubbeanspruchung zu Spannungskonzentrationen (Querzug- bzw. Querdruckspannungen) an den Stegrändern.

Die Berechnung der mittleren Verschiebung an der Oberkante der Hohllamelle erfolgte mit dem Programm RFEM 5.04 [26]. Die Ergebnisse der FE-Untersuchungen sind in Tabelle 3-9 und Tabelle 3-10 angeführt und den effektiven Rollschubmoduln nach JAKOBS [22] gegenübergestellt.

Tabelle 3-9: effektiver Rollschubmodul aus FE-Berechnung ($E_x = 0 \text{ N/mm}^2$)

	$G_{r,\text{mean}}$ [N/mm ²]	Δu_x [mm]	$G_{r,\text{eff}}$ [N/mm ²]	$\frac{G_{r,\text{eff,FE}}}{G_{r,\text{mean}}}$ [%]	$G_{r,\text{eff}}$ nach (3.10) [N/mm ²]	Δ [%]
HL86	69,0	0,893	23,5	34,1	25,7	-9,27
	72,0	0,865	24,3	33,7	26,6	-9,69
	81,0	0,789	26,6	32,9	29,4	-10,3
HL112	69,0	1,229	17,1	24,8	19,7	-15,5
	72,0	1,192	17,6	24,5	20,4	-16,1
	81,0	1,093	19,2	23,7	22,5	-17,3

Die Ergebnisse der FE-Berechnungen zeigen, dass bei der Ermittlung des effektiven Rollschubmoduls nach (3.10) die Schubnachgiebigkeit um rund 10 ÷ 17 % überschätzt wird. Dies kann auf die Vernachlässigung der schmäleren Stege in den Randzonen zurückgeführt werden (vgl. Abbildung 3-16).

Tabelle 3-10: effektiver Rollschubmodul aus FE-Berechnung ($E_x = 370 \text{ N/mm}^2$)

	$G_{r,\text{mean}}$ [N/mm ²]	Δu_x [mm]	$G_{r,\text{eff}}$ [N/mm ²]	$\frac{G_{r,\text{eff,FE}}}{G_{r,\text{mean}}}$ [%]	$G_{r,\text{eff}}$ nach (3.10) [N/mm ²]	Δ [%]
HL86	69,0	0,590	35,6	51,6	25,7	+27,8
	72,0	0,571	36,8	51,1	26,6	+27,6
	81,0	0,521	40,3	49,8	29,4	+27,2
HL112	69,0	0,787	26,7	38,7	19,7	+26,1
	72,0	0,763	27,5	38,2	20,4	+25,7
	81,0	0,700	30,0	37,0	22,5	+24,9

Entgegen der zuvor getroffenen Betrachtungsweise mit $E_x = 0 \text{ N/mm}^2$ wird es in der Realität jedoch zu einer Verteilung der Rollschubspannungen in den Decklagen kommen.

Folglich wird der effektive Rollschubmodul des Prototyps HL86 aufgrund der geometrischen Einflüsse bei rund **50 % des Grundmaterials** liegen und für den Hohllamellentyp HL112 bei rund **38 %**.

Bei Brettsperrholz liegt der Anteil der Schubverformung an der gesamten Durchbiegung bei rund 10 bis 15 %. Demnach kann bei der Verwendung von **Hohllamellen** in den **Querlagen** von gesperrt aufgebauten Elementen, eine rund **10 bis 15 % höhere Gesamtverformung** erwarten zu sein.

3-6 KEILZINKENVERBINDUNG

3-6.1 GEOMETRIE

Für den Aufbau von BSH und BSP ist das Fügen von Lamellen in Längsrichtung mittels Keilzinkenverbindung erforderlich. Durch die Keilzinkenverbindung wird der Querschnitt geschwächt. In der Produktion von BSH und BSP sind folgende Geometrien gängig (siehe Tabelle 3-11).

Tabelle 3-11: Auszug gängige Keilzinkengeometrien, [27]

Zinkenlänge l_j [mm]	Zinkenteilung p [mm]	Breite Zinkenspitze b_t [mm]	Schwächungsgrad v [-]
15	3,8	0,42	0,11
20	5,0	0,50	0,10

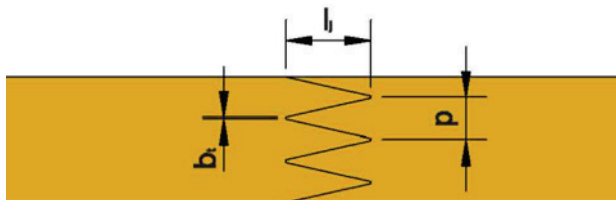


Abbildung 3-17: Parameter Keilzinkengeometrie

Der Bereich im Abstand von $3 \cdot d$ um die Keilzinkenverbindung muss frei von Ästen sein (vgl. EN 14080 [10]), wobei d den Durchmesser des Astes beschreibt. Dies kann zu Problemen führen, da bei der Hohllamelle die Stege nicht sichtbar sind und somit nicht festgestellt werden kann, ob die Stegelemente in diesem Bereich frei von Ästen sind. Dieser Umstand kann jedoch über eine betriebsinterne Qualitätskontrolle gesteuert bzw. geregelt werden.

3-6.2 FESTIGKEIT

Die Festigkeit der Keilzinkenverbindung soll laut EN 15497 [27] für keilgezinktes Bauholz mindestens jener der zu verbindenden Bretter entsprechen. Für den Aufbau von BSH sind in der EN 14080 [10] strengere Grenzwerte festgelegt. Die minimale Keilzinkenbiegefestigkeit ist in der Tabelle 3 in der EN 14080 [10] definiert. Ein Auszug der Grenzwerte dieser Norm ist in Tabelle 3-12 zusammengestellt. Die minimale Zugfestigkeit der Keilzinke ist nach (3.12) aus der Flachkant-Biegefestigkeit zu berechnen.

$$f_{t,j,k} \geq \frac{f_{m,j,k}}{1,4} \quad (3.12)$$

Dabei sind:

- $f_{t,j,k}$ Zugfestigkeit der Keilzinke [N/mm²]
- $f_{m,j,k}$ Flachkant-Biegefestigkeit der Keilzinke [N/mm²]

Tabelle 3-12: erforderliche Keilzinkenfestigkeiten lt. EN 14080 [10]

Festigkeitsklasse lt. EN 14080	zuteilbare Festigkeitsklasse lt. EN 338	$f_{t,l,k}$ ¹⁾ [N/mm ²]	$f_{m,j,k}$ ²⁾ [N/mm ²]	$f_{t,j,k}$ ³⁾ [N/mm ²]
T10	C16	10,0	25,0	17,9
T14	C24	14,0	30,0	21,4
T18	C30	18,0	36,0	25,7

Anmerkung:

¹⁾ Zugfestigkeit der Lamelle

²⁾ Biegefestigkeit (flachkant) der Keilzinke

³⁾ Zugfestigkeit der Keilzinke

Im Normenentwurf für BSP EN 16351 [28] muss die Keilzinkenverbindung die Bedingung (3.13) oder (3.14) erfüllen. In Tabelle 3-13 sind die genannten Grenzwerte für eine Auswahl an Festigkeitsklassen lt. EN 338 [7] aufgelistet.

$$f_{t,j,k} \geq 5,0 + f_{t,0,l,k} \quad (3.13)$$

$$f_{m,j,k} \geq 8,0 + 1,4 \cdot f_{t,0,l,k} \quad (3.14)$$

Dabei sind:

- $f_{t,j,k}$ Zugfestigkeit der Keilzinke [N/mm²]
- $f_{m,j,k}$ Flachkant-Biegefestigkeit der Keilzinke [N/mm²]
- $f_{t,0,l,k}$ Zugfestigkeit der Lamelle [N/mm²]

Tabelle 3-13: erforderliche Keilzinkenfestigkeiten lt. EN 16351 [28]

Festigkeitsklasse lt. EN 338	$f_{t,l,k}$ [N/mm ²]	$f_{m,j,k}$ [N/mm ²]	$f_{t,j,k}$ [N/mm ²]
C16	10,0	22,0	15,0
C24	14,0	27,6	19,0
C30	18,0	33,2	23,0

3-7 LANGZEITVERHALTEN – KRIECHEN

3-7.1 STAND DES WISSENS

Allgemein versteht man unter dem Kriechen die zeitabhängige Zunahme von Deformationen bei konstanter Belastung. Holz ist als viskoelastischer Werkstoff einzustufen. Das bedeutet seine Eigenschaften sind von der Zeit abhängig (vgl. [29]).

Die Deformation von Holz unter Belastung kann in drei Anteile unterteilt werden (siehe Abbildung 3-18): Einerseits der rein elastische Teil, welcher sich unmittelbar nach Aufbringen der Last einstellt, konstant ist und beim Entfernen der Last wieder vollständig verschwindet.

Der verzögerte elastische Anteil, welcher mit der Belastungsdauer zunimmt und nach der Entlastung verzögert wieder abnimmt und mit der Zeit wieder auf null zurückgeht.

Der plastische Deformationsanteil nimmt mit der Belastungsdauer zu und bleibt nach der Entlastung erhalten, wobei zu Beginn die Verformungen stark zunehmen und mit der Zeit die Zuwachsraten kontinuierlich abnehmen. Der plastische und der verzögerte elastische Anteil werden als Kriechen bezeichnet (vgl. [30]).

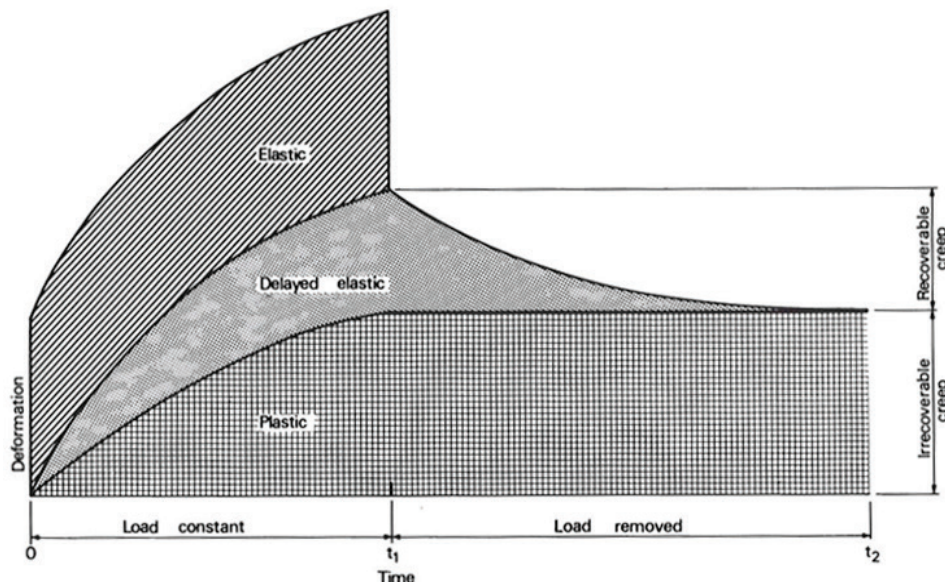


Abbildung 3-18: Verformung von Holz unter Belastung, [30]

Als Maßzahl für das Kriechverhalten dient das Verhältnis zwischen der Zunahme der Verformung bezogen auf die elastische Anfangsverformung (siehe (3.15) und vgl. EN 1156 [31]).

$$k_c = \frac{w_T - w_{el}}{w_{el}} \quad (3.15)$$

Dabei sind:

- k_c Kriechzahl [-]
- w_T Deformation zum Zeitpunkt T [mm]
- w_{el} elastische Deformation bei Belastung [mm]

Das Kriechverhalten von Holz kann in drei Phasen eingeteilt werden (vgl. [29] bzw. Abbildung 3-19).

NIEMZ [29] beschreibt die Phasen wie folgt:

„In der Primärphase steigt die Kriechverformung zunächst stetig an. In der Sekundärphase kommt es zu einer Stabilisierung der Kriechverformung. Wird die Spannung erhöht, kommt es zum Tertiärkriechen und schließlich zum Bruch.“

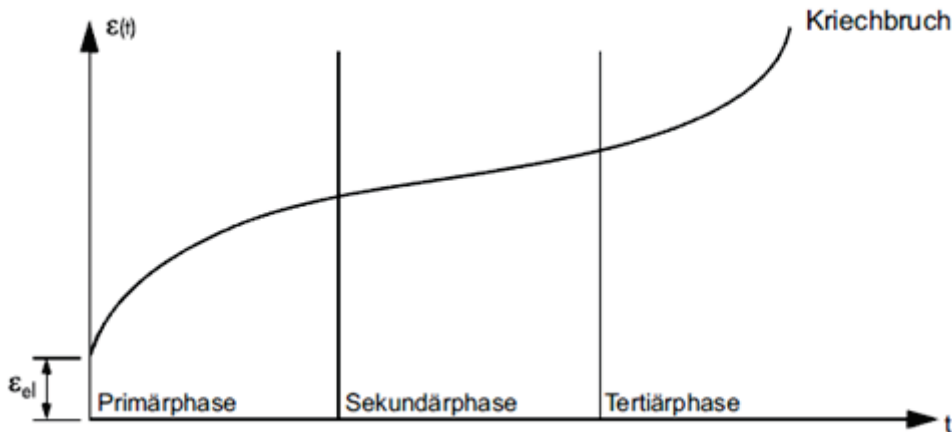


Abbildung 3-19: Phasen der Kriechverformung, [29]

Die Kriechverformungen von Holz sind nicht nur von der Zeit abhängig, sondern auch von den vorherrschenden Umgebungsbedingungen. Die wesentlichen Parameter werden nachfolgend angeführt:

Grenzen der linearen viskoelastischen Eigenschaften [32]

Holz zeigt ein nichtlineares Kriechverhalten über alle Belastungsniveaus. Bis zu einem Spannungsniveau von rund 40 % der Kurzzeitfestigkeit kann das Verhalten jedoch mit einem linearen Zusammenhang gut angenähert werden. In diesem Bereich liegen in der Regel auch Ausnutzungsgrade der Tragfähigkeit bei den Nachweisen der Gebrauchstauglichkeit nach EN 1995-1-1 [13].

Einfluss der Temperatur

Ein Anstieg der Temperatur bedingt eine Reduzierung der Steifigkeit. Besonders ab Temperaturen von über 55 °C kriecht Holz schneller, da bei diesen Temperaturen Holzbestandteile (Lignin und Hemizellulose) „weich“ werden (vgl. [33], [34]).

Der Zusammenhang zwischen dem Kriechverhalten und variablen Temperatur ist nichtlinear. So bewirkt zum Beispiel ein Temperaturanstieg von 20 °C auf 90 °C einen stärkeren Zuwachs der Deformationen als bei konstant hohen Temperaturen (vgl. [35]).

Einfluss der Holzfeuchte

Das Kriechverhalten wird ebenfalls von der Holzfeuchtigkeit beeinflusst. Mit zunehmender Holzfeuchte steigen die Kriechverformungen (siehe Abbildung 2 18). Dies spiegelt sich auch in der Bemessungsnorm EN 1995-1-1 [13] für Holz wieder. In jener sind die Verformungsbeiwerte zur Berechnung der Langzeitverformung von der Nutzungsklasse des Bauteils abhängig. Laut [13] (siehe auch Tabelle 3-15) liegen die k_{der} -Beiwerte für NK 2 ($u \approx 18\%$) rund 30% über jenen der Nutzungsklasse 1 ($u \approx 12\%$).

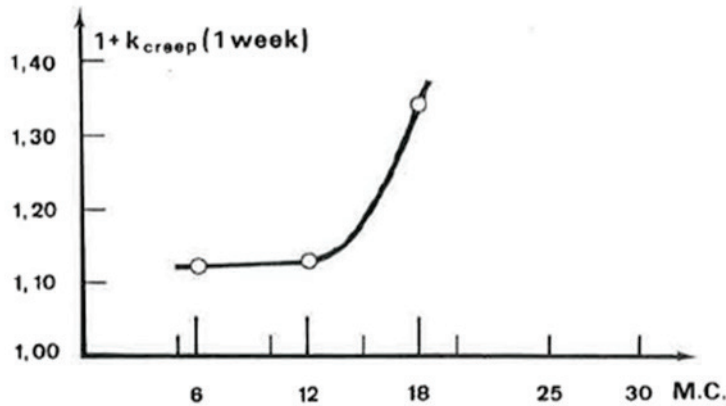


Abbildung 3-20: Zusammenhang zwischen der Kriechverformung und der Holzfeuchte bei Fichtenholz unter Biegung aus [35]

Richtungsabhängige bzw. belastungsabhängige Eigenschaften

Das Kriechverhalten von Holz ist ebenfalls von der Richtung der Belastung in Bezug auf die Faserrichtung abhängig. NIEMZ gibt in [29] für Vollholz im Normklima (NK 1) nach einer Belastungsdauer von 140 Tagen eine Kriechzahl von 0,1 bis 0,3 in Faserrichtung und 0,8 bis 1,6 quer zur Faserrichtung an. Auch MADSEN weist in [36] auf die richtungsabhängigen Kriecheigenschaften von Holz in qualitativen Diagrammen hin. Dabei ist die Kriechverformung quer zur Faser rund 50% höher als jene parallel zur Faserrichtung und das bereits nach einem fünfzigstel der Zeit. In Abbildung 3-21 ist das Kriechverhalten für verschiedene Belastungsrichtungen und Arten dargestellt.

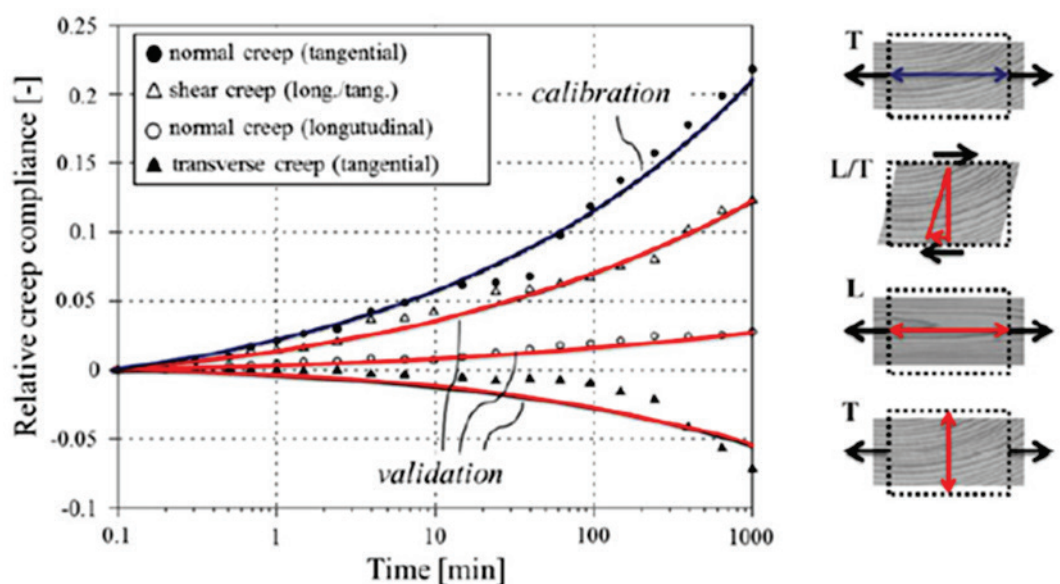


Abbildung 3-21: Kriechverhalten in Abhängigkeit von der Belastungsart aus [37]

JÖBSTL führte in [38] Untersuchungen zum Kriechverhalten von Brettsper Holz durch, verglich deren Langzeitverhalten mit Brettschichtholz und schlug einen k_{def} -Wert von 0,85 für fünfschichtiges BSP aus Fichtenholz in der Nutzungsklasse 1 (C1-1) und $k_{def} = 1,10$ für NK 2 (CL-2) vor. Es ist anzumerken, dass es sich bei den ermittelten Werten um „verschmierte“ k_{def} -Werte handelt, welche nur für den in [38] untersuchten Aufbau gelten.

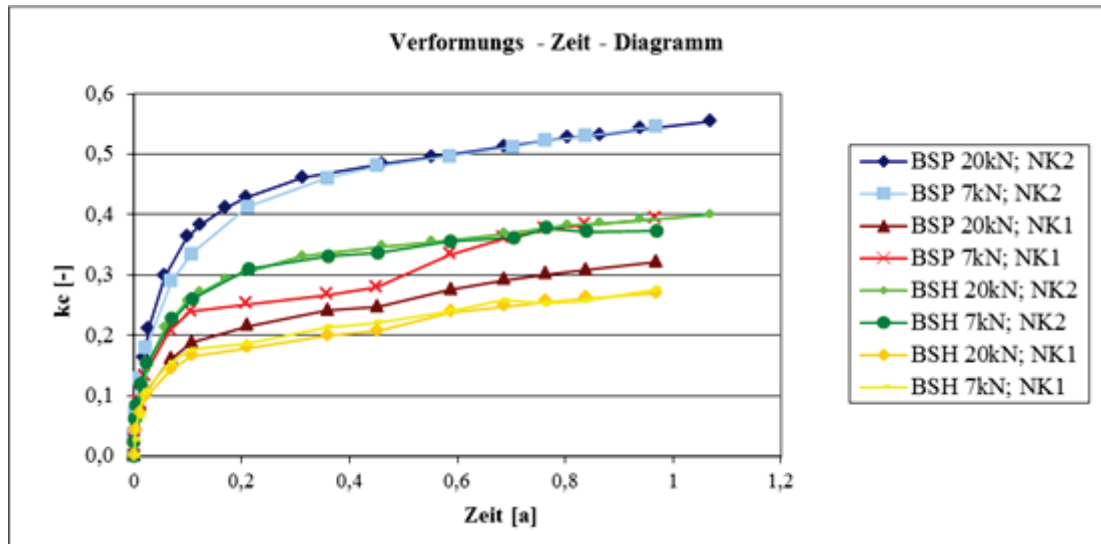


Abbildung 3-22: Kriechverhalten von BSP und BSH in verschiedenen Nutzungsklassen und Belastungsniveaus über den Zeitraum eines Jahres aus [38]

JÖBSTL rechnete anhand der Ergebnisse auf Kriechzahlen des Rollschubmoduls zurück und ermittelt folgende Werte:

Tabelle 3-14: k_{def} -Werte für BSP, [38]

	NK 1	NK 2
$k_{def,BSP}$	0,85	1,10
$k_{def,0}$	0,60	0,80
$k_{def,90,90} (G_{0,90}/G_{90,90} = 10)$	2,27	2,80
$k_{def,90,90} (G_{90,90} = 50)$	1,88	2,33

NAKAJIMA [39] führte, ähnlich wie JÖBSTL, Versuche zum Langzeitverhalten von BSP durch. Es wurden fünfschichtige Brettsper Holzplatten aus japanischer Zeder bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit (NK 1) auf ihr Kriechverhalten untersucht. Es konnte im Mittel ein k_{def} -Wert von 0,86 festgestellt werden.

SILLY [40] wertete Langezeitversuche zum Schubkriechverhalten quer zur Faser aus und ermittelte einen $k_{def,90,90}$ -Wert von 3,58 für Rollschub in der NK 2. Damit liegt dieser Wert rund 50 % über dem in [38] angegebenen Werten.

aktuelle Normung

Die Berechnung der Langzeitverformung erfolgt lt. EN 1995-1-1 [13] mittels k_{def} -Werten. Diese entsprechen der Verformungszunahme bezogen auf die elastische Anfangsverformung für die Lasteinwirkungsdauer von 50 Jahren. Die in Tabelle 3-15 angegebene Werte beschreiben das Kriechverhalten parallel zur Faserrichtung in Abhängigkeit von der Nutzungsklasse.

Tabelle 3-15: k_{def} -Werte lt. EN 1995-1-1 [13]

Baustoff	NK 1	NK 2	NK 3
Vollholz / BSH	0,60	0,80	2,00
BSP	0,80	1,00	-
Sperrholz	0,80	1,00	2,50

3-7.2 UMLEGUNG VORLIEGENDER ERGEBNISSE AUF DIE HOHLLAMELLE

Wenn Hohllamellen in der Querlage von gesperrten Bauteilen eingesetzt werden, führt die höhere Schubnachgiebigkeit und somit zu einer größeren Durchbiegung aufgrund der Schubverformungen (rund 10 bis 15 %). Da die Kriechverformung von der elastischen Deformation abhängig ist, kommt es zu einer Zunahme des Rollschubkriechanteils. Es kann aufgrund der vorliegenden Forschungsergebnisse davon ausgegangen werden, dass sich für gesperrte Aufbauten aus Hohllamellen im Vergleich zu Brettsperholz bzw. für Brettschichtholz ein **höherer k_{def} -Wert** einstellen wird.

KAPITEL 4: MATERIAL UND METHODEN

4-1 ALLGEMEINES

Im ersten Teil des Kapitels werden die durchgeführten Prüfungen und deren Bezeichnung dargelegt. Im Anschluss wird der Herstellungsprozess der Hohllamellen erläutert und es wird auf die geometrischen Abmessungen der Prüfkörper eingegangen. Weiters folgt eine Darstellung der Prüfkonfigurationen inklusive der verwendeten Messeinrichtungen und eine Zusammenstellung der, für die Auswertung der Prüfungen, verwendeten Gleichungen und Normenwerke.

4-2 PRÜFKONZEPT

Im Zuge dieser Arbeit wurden für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften wurden folgende Punkt abgehandelt:

- Grundprodukt Hohllamelle
 - Zug
 - Biegung
 - Schub
 - Keilzinkenverbindung

- Hohllamelle im gesperrten Aufbau
 - Biegung
 - Rollschub
 - Querdruck
 - Langzeitverhalten

- Verbindungsmittel
 - Schrauben

In den nachfolgenden Unterpunkten befindet sich eine detaillierte Auflistung aller durchgeführten Prüfungen.

4-2.1 PRÜFUNGEN DER GRUNDPRODUKTE

Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Hohllamellen bzw. deren Grundmaterial wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

Tabelle 4-1: durchgeführte Prüfungen an den Grundprodukten

	HL86	HL112	Summe
Biegung flachkant	35	20	55
Biegung hochkant	19	-	19
Biegung – Keilzinken	20	10	30
Zug	39	20	59
Zug – Keilzinken	39	18	57
Summe	152	68	220

4-2.2 PRÜFUNGEN AN PRODUKTEN HERGESTELLT AUS HOHLLAMELLEN

Eine Übersicht der Prüfungen an gesperrt aufgebauten Bauteilen bestehend aus Hohllamellen zeigt Tabelle 4-2.

Tabelle 4-2: durchgeführte Prüfungen – Hohllamelle im gesperrten Aufbau

	3s	5s	Summe
Querdruck	-	27	27
Biegung	15	10	25
Rollschub	-	8	8
Kriechversuch	3	2	5
Summe	18	47	65

4-2.3 PRÜFUNGEN AN VERBINDUNGSMITTELN

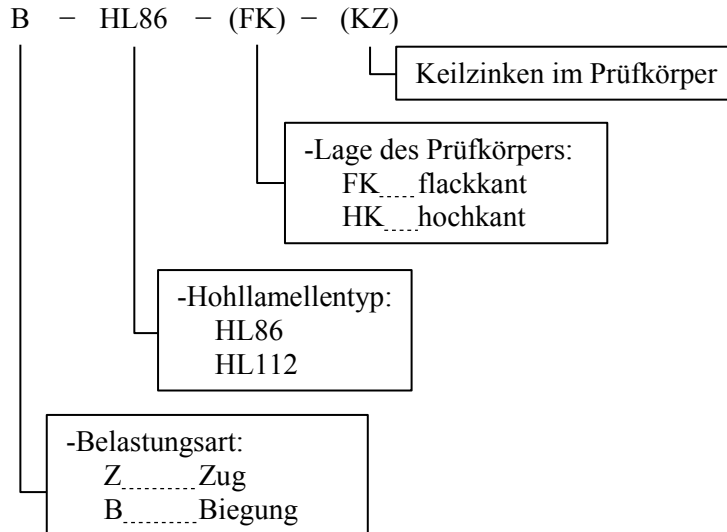
Zur Bestimmung des Einflusses der Hohlräume auf die Tragfähigkeit von Holzschrauben wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

Tabelle 4-3: durchgeführte Prüfungen an Verbindungsmitteln (Schrauben)

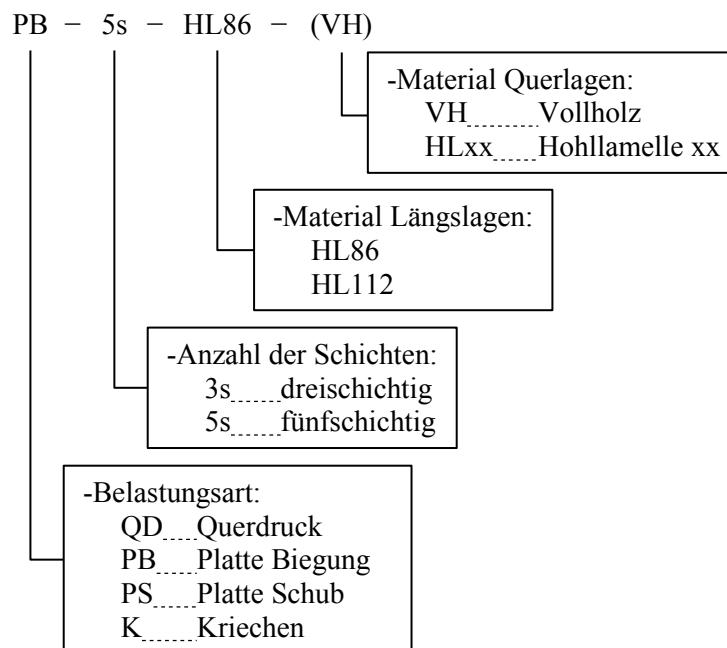
	Hohlraum	Steg	Summe
Eindringtiefe 60 mm	20	20	40
Eindringtiefe 115 mm	20	20	40
Summe	20	20	40

4-3 PRÜFKÖRPERBEZEICHNUNG

4-3.1 PRÜFUNGEN DES GRUNDMATERIALS

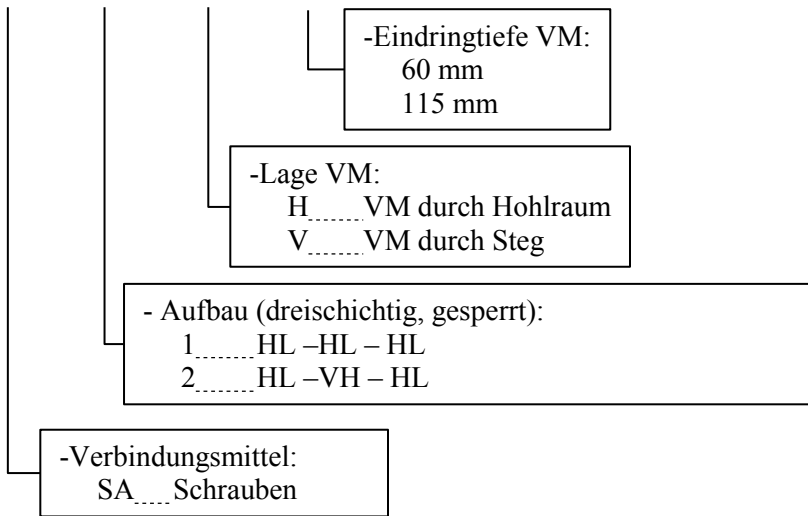


4-3.2 PRÜFUNGEN AN PRODUKTEN HERGESTELLT AUS HOHLLAMELLEN



4-3.3 PRÜFUNGEN AN VERBINDUNGSMITTELN

SA - X - Y - zzz



4-4 PRÜFKÖRPER

4-4.1 PRODUKTIONSABLAUF

4-4.1.1 Hohllamellen

Die Produktion der Hohllamelle erfolgte in folgenden Schritten (siehe Abbildung 4-1):

Es wurden einschichtige Massivholzplatten mit den Abmessungen 2x4 m produziert. Auf diese Platten erfolgte der Klebstoffauftrag. Anschließend wurden die einzelnen Stege aufgelegt und mittels Aluminium-Klammern fixiert. Danach erfolgten ein erneuter Klebstoffauftrag, das Auflegen der Decklage und der abschließende Pressvorgang. Nach dem Aushärten des Klebstoffes wurden die Platten zu einzelnen Hohllamellen aufgetrennt.

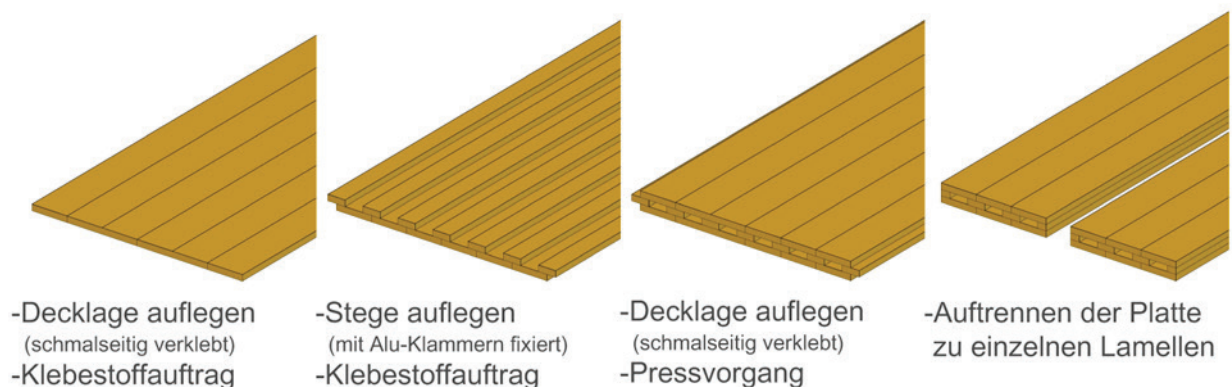


Abbildung 4-1: Produktionsablauf Hohllamelle

4-4.1.2 mehrschichtige gesperrte Tragelemente aus Hohllamellen

Die Herstellung der mehrschichtig gesperrten Platten aus Hohllamellen erfolgte in folgenden Schritten: Zunächst wurden die einzelnen Hohllamellen (Länge $L = 4$ m) längs mittels Keilzinkung gestoßen und auf die erforderliche Länge zugeschnitten. Der weitere Herstellungsablauf gleicht dem von konventionellem Brettsperholz. Zunächst wurden Lagen aus Hohllamellen gebildet. Diese Lagen wurden im Anschluss orthogonal zueinander verklebt. Es können auch einzelne Lagen aus Vollholz ausgeführt sein und somit Hybridquerschnitte hergestellt werden.

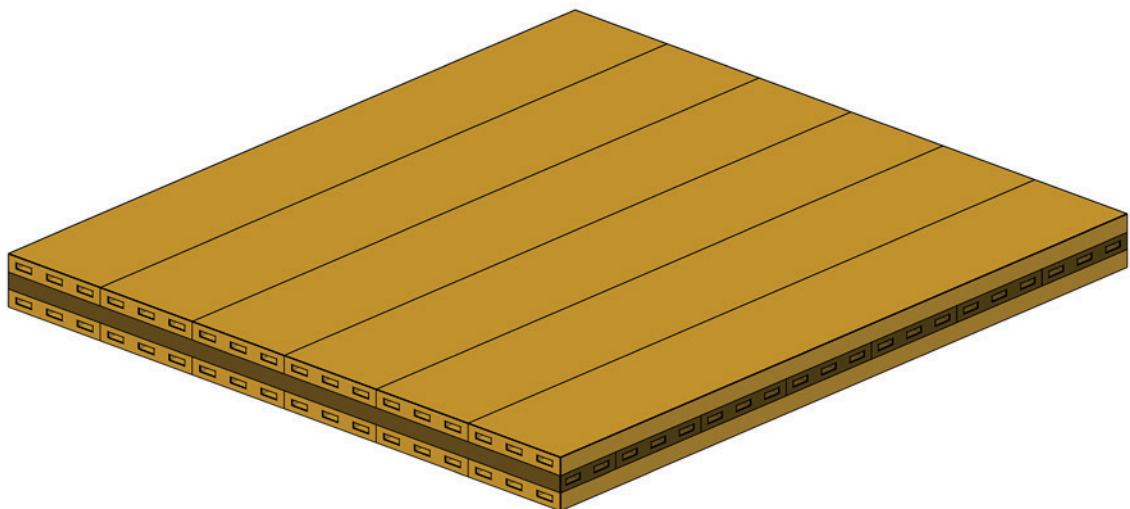


Abbildung 4-2: aus Hohllamellen aufgebaute Tragstruktur

4-4.2 HOHELLAMELLE HL86

Die geometrischen Abmessungen der Hohllamellen des Typs HL86 sind in Abbildung 4-3 ersichtlich.

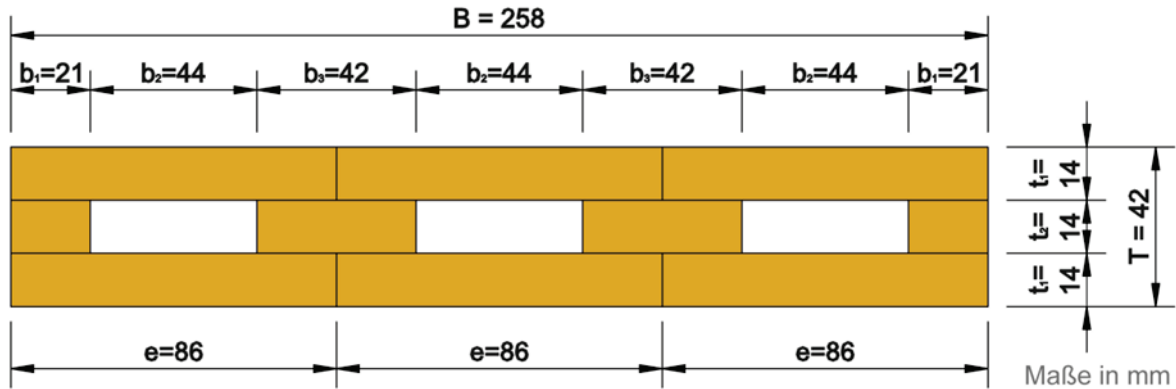


Abbildung 4-3: Geometrie Hohllamelle HL86

Da es sich bei dem untersuchten Produkt um einzeln gefertigte Prototypen handelte, war mit Maßabweichungen zu rechnen. Für die zur Querschnittsberechnung notwendigen Abmessungen B , b_1 , b_2 , T , t_1 und t_2 (siehe Abbildung 4-3) wurde ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4-4 angeführt.

Tabelle 4-4: Soll-Ist-Vergleich Geometrie HL86

	B [mm]	b_1 [mm]	b_3 [mm]	$\sum b_i$ [mm]	T [mm]	t_1 [mm]	t_2 [mm]
Nennmaß	258	21	42	126	42	14	14
Ist-Maß							
Anzahl	150	300	300	150	150	300	150
Min	251,3	0,00	35,3	102,6	35,1	13,5	7,16
Max	259,2	42,5	44,4	161,6	41,9	14,5	13,9
Mittelwert	255,8	21,9	41,9	127,6	41,1	14,0	13,1
Standardabweichung	0,857	9,58	0,643	9,90	0,732	0,079	0,722
COV	0,335%	43,8%	1,53%	7,76%	1,78%	0,56%	5,52%

Wie Tabelle 4-4 zu entnehmen ist, kam es aufgrund des Produktionsablaufes bei der Lage der Stege in den Randbereichen zu starken Streuungen der Breite bzw. der Summe der Stegbreiten. In einzelnen Fällen fehlte einer der seitlichen Stege.

4-4.3 HOHLLAMELLE HL112

Die geometrischen Abmessungen der Hohllamellen des Typs HL112 sind in Abbildung 4-4 ersichtlich.

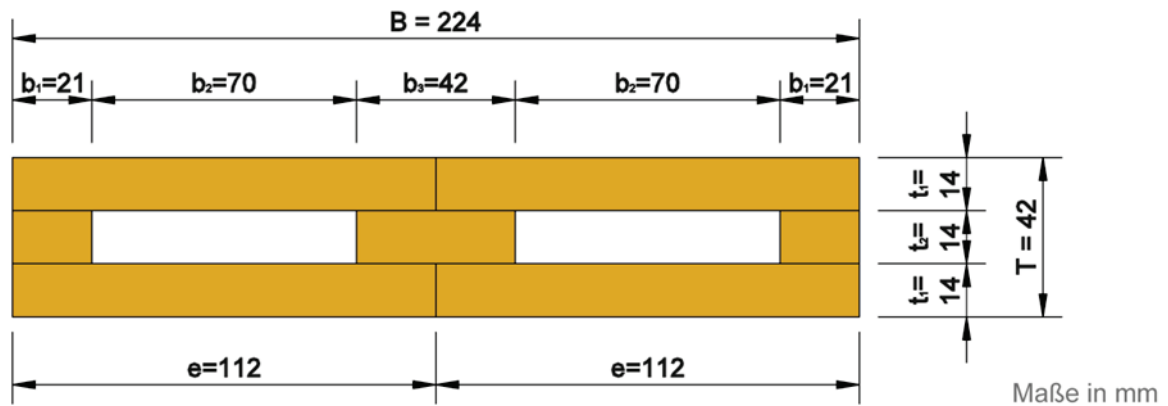


Abbildung 4-4: Geometrie Hohllamelle HL112

Da es sich bei dem untersuchten Produkt um einzeln gefertigte Prototypen handelte, war mit Maßabweichungen zu rechnen. Für die zur Querschnittsberechnung notwendigen Abmessungen B , b_1 , b_2 , T , t_1 und t_2 (siehe Abbildung 4-4) wurde ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4-5 angeführt.

Tabelle 4-5: Soll-Ist-Vergleich Geometrie HL112

	B [mm]	b_1 [mm]	b_2 [mm]	$\sum b_i$ [mm]	T [mm]	t_1 [mm]	t_2 ¹⁾ [mm]
Nennmaß	224	21	42	84	42	14	14
Ist-Maß							
Anzahl	88	176	88	88	88	176	88
Min	222,5	0,00	41,0	63,6	35,1	13,9	6,95
Max	241,1	43,2	44,2	109,5	39,0	14,3	11,0
Mittelwert	223,9	22,4	42,4	87,3	37,1	14,0	8,99
Standardabweichung	1,91	10,1	0,654	9,40	0,966	0,064	0,955
COV	0,853%	45,0%	1,54%	10,8%	2,60%	0,456%	10,6%

Anmerkung:

¹⁾ zu hoher Pressdruck bei Produktion (erkennbar an Verwölbungen des Querschnitts)

Wie Tabelle 4-5 zu entnehmen ist, kam es aufgrund des Produktionsablaufes bei der Lage der Stege in den Randbereichen zu starken Streuungen der Breite bzw. der Summe der Stegbreiten. In einzelnen Fällen fehlte einer der seitlichen Stege. Zusätzlich kam es dazu, dass während der Produktion der HL112 der Pressdruck zu hoch gewählt wurde, wodurch die mittlere Lage (Stege) der Hohllamelle größere Abweichungen zu den Nennmaßen aufweist.

4-4.4 HOHELLAMELLEN IM GESPERRTEN AUFBAU

4-4.4.1 fünfschichtiger gesperrter Aufbau

Aus Hohllamellen des Typs HL86 und Vollholzquerlagen wurden fünfschichtige Prüfkörper hergestellt. Der Aufbau ist in der Abbildung 4-5 sowie in der Tabelle 4-6 angeführt.

Tabelle 4-6: Geometrie 5s-HL86-VH

	Material	Orientierung	Breite ¹⁾ [mm]	Dicke ¹⁾ [mm]
Lage 1	HL86	0°	258	38 ²⁾
Lage 2	Vollholz C24	90°	120	20
Lage 3	HL86	0°	258	38 ²⁾
Lage 4	Vollholz C24	90°	120	20
Lage 5	HL86	0°	258	38 ²⁾
Gesamt			~500 ³⁾	154

Anmerkung:

¹⁾ Dimensionen der Bretter/Hohllamellen zum Aufbau des gesperrten Produkt

²⁾ Abweichung der Dicke vom Nennmaß (h = 42 mm) durch Hobelvorgang nach Keilzinkung

³⁾ Die Breite der einzelnen Prüfkörper variierte

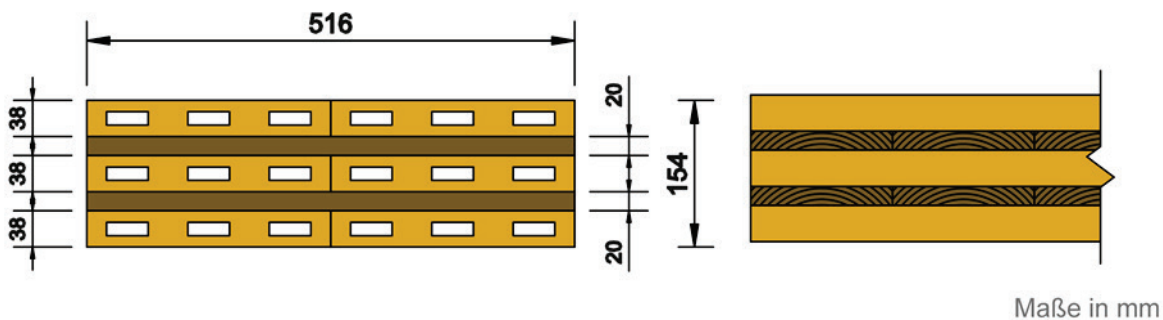


Abbildung 4-5: Geometrie fünfschichtiger gesperrter Aufbau (5s-HL86-VH)

In Abbildung 4-6 sind die beiden Stirnseiten eines Prüfkörpers (l = 3 m) abgebildet. Es ist zu erkennen, dass signifikante Unterschiede in den Abmessungen auftreten. Diese Abweichungen können auf die Fertigungsgenauigkeit der einzelnen Hohllamellen und den Längsstoß mittels Keilzinkung der HL zurückgeführt werden. Aufgrund der geometrischen Abweichungen wurde darauf verzichtet die Prüfkörper auf eine einheitliche Breite zuzuschneiden.

Für die Berechnung der Querschnittswerte wurden jeweils beide Stirnseiten vermessen und im Anschluss die Kennwerte gemittelt.



Abbildung 4-6: geometrische Unterschiede in den Stirnseiten

4-4.4.2 dreischichtiger gesperrter Aufbau

Aus Hohllamellen des Typs HL86 wurden dreischichtige Prüfkörper hergestellt. Der Aufbau ist in der Abbildung 4-7 sowie in der Tabelle 4-7 angeführt.

Tabelle 4-7: Geometrie 3s-HL86

	Material	Orientierung	Breite ¹⁾ [mm]	Dicke ¹⁾ [mm]
Lage 1	HL86	0°	258	38 ²⁾
Lage 2	HL86	90°	258	40 ²⁾
Lage 3	HL86	0°	258	38 ²⁾
Gesamt			~500 ³⁾	118

Anmerkung:

¹⁾ Dimensionen der benutzen Bretter/Hohllamellen zum Aufbau des gesperrten Produkt

²⁾ Abweichung der Dicke vom Nennmaß (h = 42 mm) durch den Hobelvorgang nach der Keilzinkung

³⁾ Die Breite der einzelnen Prüfkörper variierte

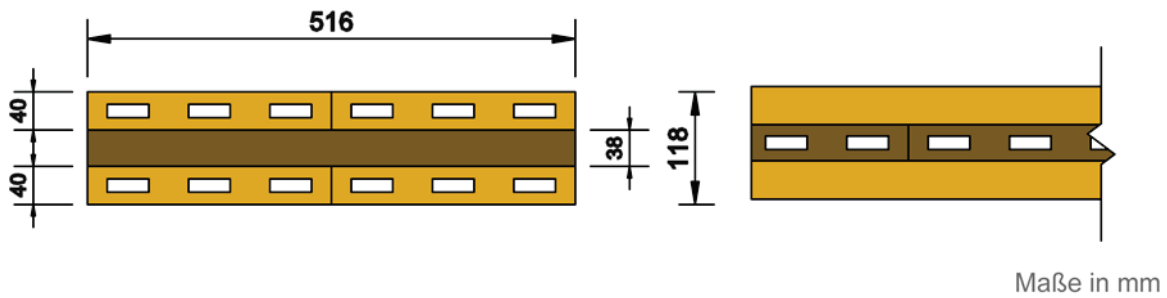


Abbildung 4-7: Geometrie dreischichtiger gesperrrter Aufbau (3s-HL86)

Wie bei den fünfschichtigen gesperrrten Elementen traten signifikante Unterschiede in den Querschnittsabmessungen auf (siehe Abschnitt 4-4.4.1).

Für die Berechnung der Querschnittswerte wurden jeweils beide Stirnseiten vermessen und im Anschluss die Kennwerte gemittelt.

4-5 PRÜFKONFIGURATIONEN

4-5.1 PRÜFUNGEN DES GRUNDPRODUKTES

4-5.1.1 Zugprüfungen

Die Prüfungen erfolgten an der Zugprüfmaschine LIGNUM_Z_850, die eine mittels Öldruck stufenlose und steuerbare Aufbringung von Kräften bis maximal 850 kN erlaubt. Die verwendete Belastungsvorrichtung stellte sicher, dass die auf den Prüfkörper aufgebrachte Last mit einer Fehlergrenze von weniger als 1 % gemessen werden konnte. Die lokale Verformungsmessung der Referenzbereiche erfolgte mit induktiven Wegaufnehmern des Typs WA 10, WA 50 und dem Messverstärker Quantum MX810 der Fa. HBM.

Prüfserie Z-HL86 und Z-HL112

Die Zugprüfungen an den Prüfkörpern der Prüfserie Z-HL86 und Z-HL112 erfolgten gemäß EN 408 [41] mit einer freien Einspannlänge von $l = 1980 \text{ mm}$. Die Abmessungen der Prüfkfiguration sind in der Tabelle 4-8 zusammengefasst (siehe auch Abbildung 4-8).

Tabelle 4-8: *Abmessung und Prüfkfiguration der Prüfserie Z-HL86 und Z-HL112*

Bezeichnung	Abkürzung [-]	Wert [mm]	Bemerkung [-]
freie Einspannlänge	l	1980	$\geq 9 \cdot b$
Messlänge E-Modul global	l_1	2193	
Messlänge E-Modul lokal	l_1	850 ¹⁾ / 1100 ²⁾	$5 \cdot h$
Nennbreite	b	170 ¹⁾ / 220 ²⁾	
Nenndicke	d	42	
Gesamtlänge	L	2800	
Klemmbackenbreite	b_a	320	

Anmerkung:

- 1) Prüfserie Z-HL86 (Die Prüfkörper wurden aufgrund der max. Abmessungen der Prüfmaschine und der Messeinrichtung auf eine Breite 170 mm gesäimt.)
- 2) Prüfserie Z-HL112

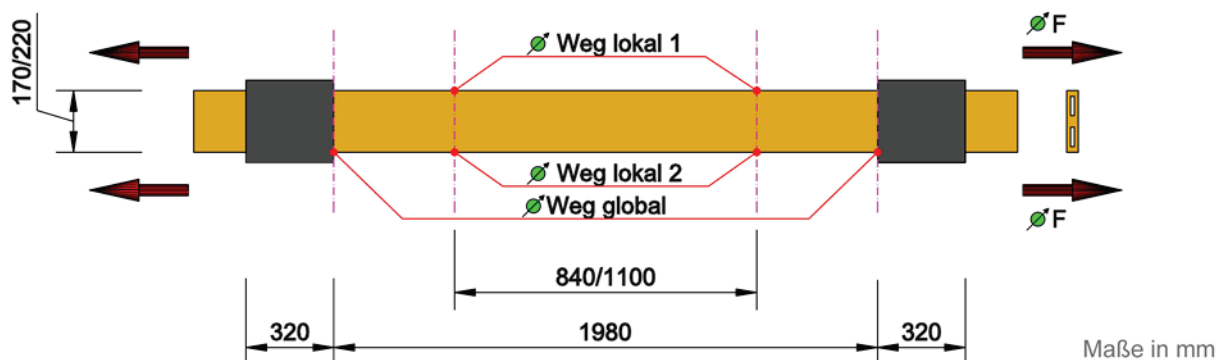


Abbildung 4-8: *Prüfkfiguration Z-HL86 und Z-HL112*

Prüfserie Z-HL86-KZ und Z-HL112-KZ

Die Zugprüfungen an den Prüfkörpern der Prüfserie Z-HL86-KZ und Z-HL112-KZ erfolgten in Anlehnung an EN 408 [41] und EN 14080 [10] mit einer freien Einspannlänge von $l = 200 \text{ mm}$. Die Abmessungen der Prüfkonfiguration sind in der Tabelle 4-9 aufgelistet (siehe auch Abbildung 4-9).

Tabelle 4-9: *Abmessung und Prüfkonfiguration der Prüfserie Z-HL86-KZ und Z-HL112-KZ*

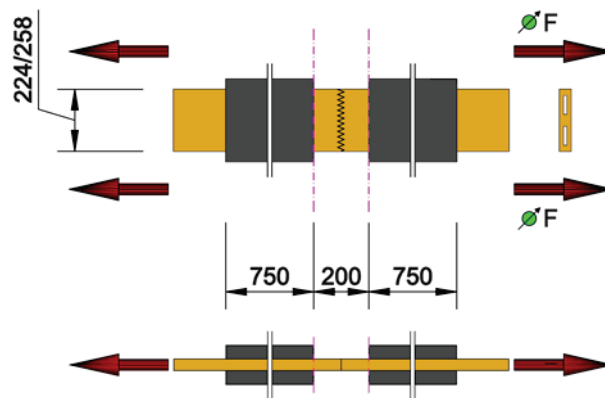
Bezeichnung	Abkürzung [-]	Wert [mm]	Bemerkung [-]
freie Einspannlänge	l	200	
Nennbreite	b	258 ¹⁾ / 224 ²⁾	
Nenndicke	d	42	
Gesamtlänge	L	2000	
Klemmbackenbreite	b_a	750	

Anmerkung:

¹⁾ Prüfserie Z-HL86-KZ

²⁾ Prüfserie Z-HL112-KZ

Die Prüfungen erfolgten an der Holzforschung Austria in Wien mit der Zugprüfmaschine ZWICK_LZED_100. Die verwendete Belastungsvorrichtung erlaubte es, die auf den Prüfkörper aufgebrauchte Last mit einer Fehlergrenze von weniger als 1 % zu messen.



Maße in mm

Abbildung 4-9: *Prüfkonfiguration Z-HL86-KZ und Z-HL112-KZ*

4-5.1.2 Biegeprüfungen

Die Biegeprüfungen erfolgten an der Universalprüfmaschine LIGNUM_UNI_275, die eine stufenlos steuerbare weg- und/oder kraftgesteuerte Aufbringung von Kräften bis maximal 275 kN erlaubt. Die Fehlergrenze der Kraftmessung liegt unter 1 %. Die Verformungsmessung in der Mitte der Referenzbalken wurde mit induktiven Wegaufnehmern der Fa. HBM realisiert. Dabei kamen für die Verformungsmessung Wegaufnehmer des Typs WA-10 und der Messverstärker Quantum MX810 zum Einsatz.

Prüfserie B-HL86-FK und B-HL112-FK

Die Biegeprüfungen an den Prüfkörpern der Prüfserie B-HL86-FK und B-HL112-FK erfolgten gemäß EN 408 [41] mit einer freien Spannweite von $l = 714 \text{ mm}$. Die Abmessungen der Prüfkonfiguration sind in Tabelle 4-10 zusammengefasst (siehe auch Abbildung 4-10).

Tabelle 4-10: Abmessung und Prüfkonfiguration der Prüfserie B-HL86-FK und B-HL112-FK

Bezeichnung	Abkürzung [-]	Wert [mm]	Bemerkung [-]
freie Einspannlänge	l	714	$17 \cdot h$
Abstand Auflager – Lasteinleitung	a_1	231	$5,5 \cdot h$
Abstand der Lasteinleitung	a_2	252	$6 \cdot h$
Messlänge E-Modul lokal	l_1	210	$5 \cdot h$
Nennbreite	b	258 ¹⁾ / 224 ²⁾	
Nennstärke	d	42	
Gesamtlänge	L	750	$\geq 18 \cdot h$
Auflagerbreite	b_a	20	$\leq h/2$

Anmerkung:

1) Prüfserie B-HL86-FK

2) Prüfserie B-HL112-FK

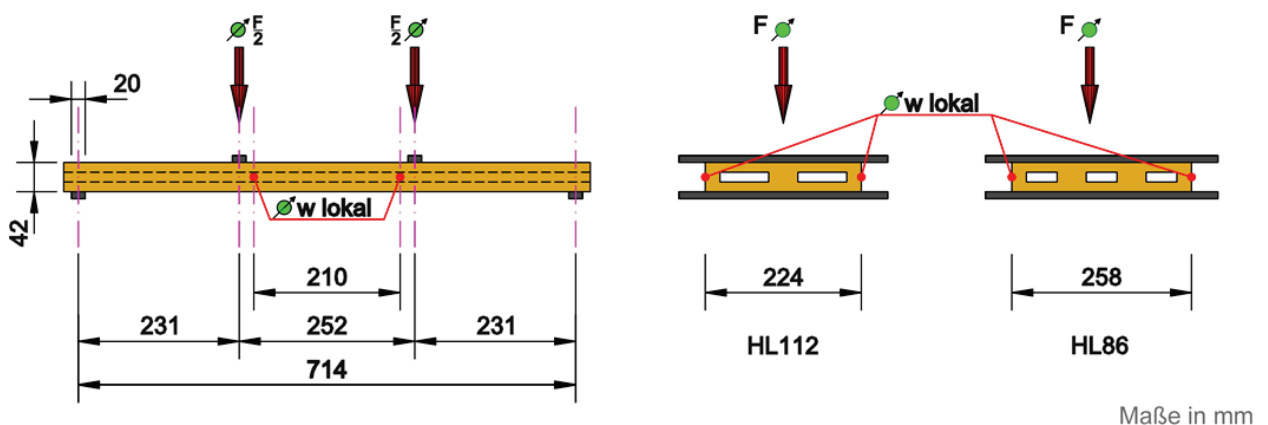


Abbildung 4-10: Prüfkonfiguration B-HL86-FK und B-HL112-FK

Maße in mm

Prüfserie B-HL86-FK-KZ und B-HL112-FK-KZ

Die Biegeprüfungen an den Prüfkörpern der Prüfserie B-HL86-FK-KZ und B-HL112-FK-KZ erfolgten gemäß EN 408 [41] mit einer freien Spannweite von $l = 882 \text{ mm}$. Die Keilzinkenverbindung ist dabei auf der Breitseite der Hohllamellen sichtbar („stehende“ Keilzinken). Die Abmessungen der Prüfkongfiguration sind in Tabelle 4-11 aufgelistet (siehe auch Abbildung 4-11).

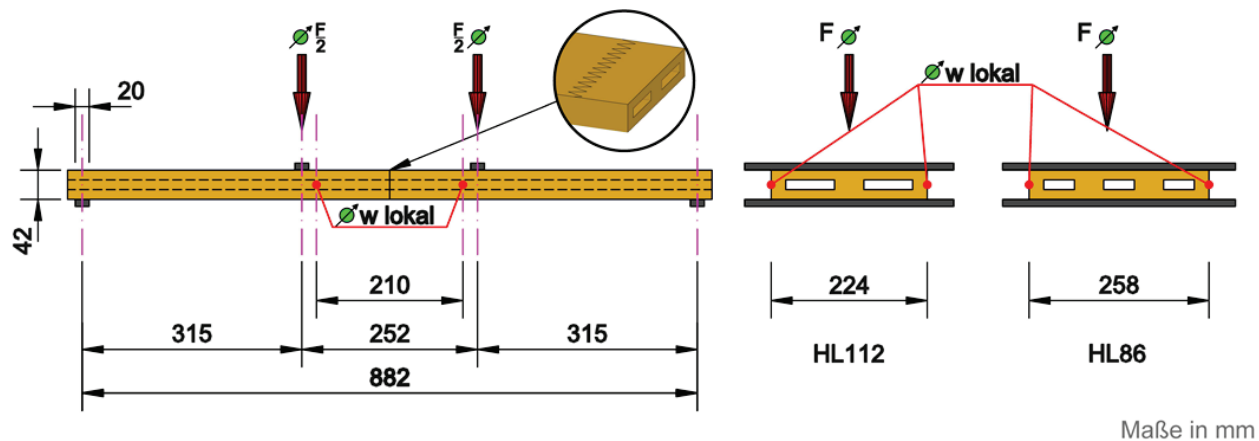
Tabelle 4-11: Abmessung und Prüfkongfiguration der Prüfserie B-HL86-FK-KZ und B-HL112-FK-KZ

Bezeichnung	Abkürzung [-]	Wert [mm]	Bemerkung [-]
freie Einspannlänge	l	882	$21 \cdot h$
Abstand Auflager – Lasteinleitung	a_1	315	$7,5 \cdot h$
Abstand der Lasteinleitung	a_2	252	$6 \cdot h$
Messlänge E-Modul lokal	l_1	210	$5 \cdot h$
Nennbreite	b	258 ¹⁾ / 220 ²⁾	
Nennstärke	d	42	
Gesamtlänge	L	1000	$\geq 22 \cdot h$
Auflagerbreite	b_a	20	$\leq h/2$

Anmerkung:

¹⁾ Prüfserie B-HL86-FK-KZ

²⁾ Prüfserie B-HL112-FK-KZ



Maße in mm

Abbildung 4-11: Prüfkongfiguration B-HL86-FK-KZ und B-HL112-FK-KZ

Prüfserie B-HL86-FK-II

Die Biegeprüfungen an den Prüfkörpern der Prüfserie B-HL86-FK-II erfolgten in Anlehnung an EN 408 [41] mit einer freien Spannweite von $l = 1050 \text{ mm}$. Die Abmessungen der Prüfkonfiguration sind in Tabelle 4-12 zusammengefasst (siehe auch Abbildung 4-12).

Tabelle 4-12: *Abmessung und Prüfkonfiguration der Prüfserie B-HL86-FK-II*

Bezeichnung	Abkürzung [-]	Wert [mm]	Bemerkung [-]
freie Einspannlänge	l	1050	$25 \cdot h$
Abstand Auflager – Lasteinleitung	a_1	399	$9,5 \cdot h$
Abstand der Lasteinleitung	a_2	252	$6 \cdot h$
Messlänge E-Modul lokal	l_1	210	$5 \cdot h$
Nennbreite	b	258	
Nennstärke	d	42	
Gesamtlänge	L	1200	$\geq 26 \cdot h$
Auflagerbreite	b_a	20	$\leq h/2$

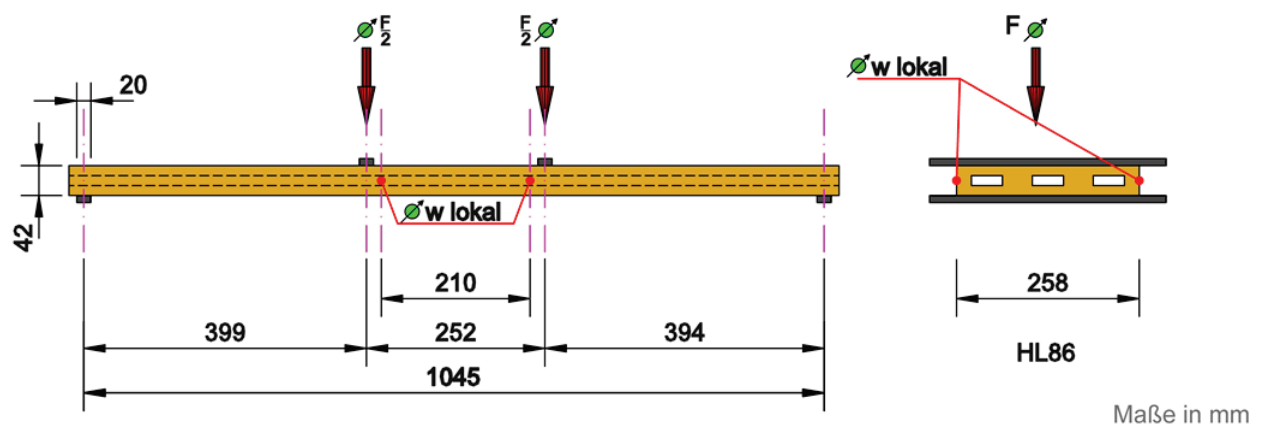


Abbildung 4-12: *Prüfkonfiguration B-HL86-FK-II*

Prüfserie B-HL86-HK

Die Biegeprüfungen an den Prüfkörpern der Prüfserie B-HL86-HK erfolgten gemäß EN 408 [41] mit einer freien Spannweite von $l = 3825 \text{ mm}$. Die Abmessungen der Prüfkonfiguration sind in Tabelle 4-13 aufgelistet (siehe auch Abbildung 4-13).

Tabelle 4-13: Abmessung und Prüfkonfiguration der Prüfserie B-HL86-HK

Bezeichnung	Abkürzung [-]	Wert [mm]	Bemerkung [-]
freie Einspannlänge	l	3825	$15 \cdot h$
Abstand Auflager – Lasteinleitung	a_1	1147,5	$4,5 \cdot h$
Abstand der Lasteinleitung	a_2	1530	$6 \cdot h$
Messlänge E-Modul lokal	l_1	1275	$5 \cdot h$
Nennbreite	b	42	
Nennstärke	d	255	
Gesamtlänge	L	4000	$\geq 16 \cdot h$
Auflagerbreite	b_a	100	$\leq h/2$

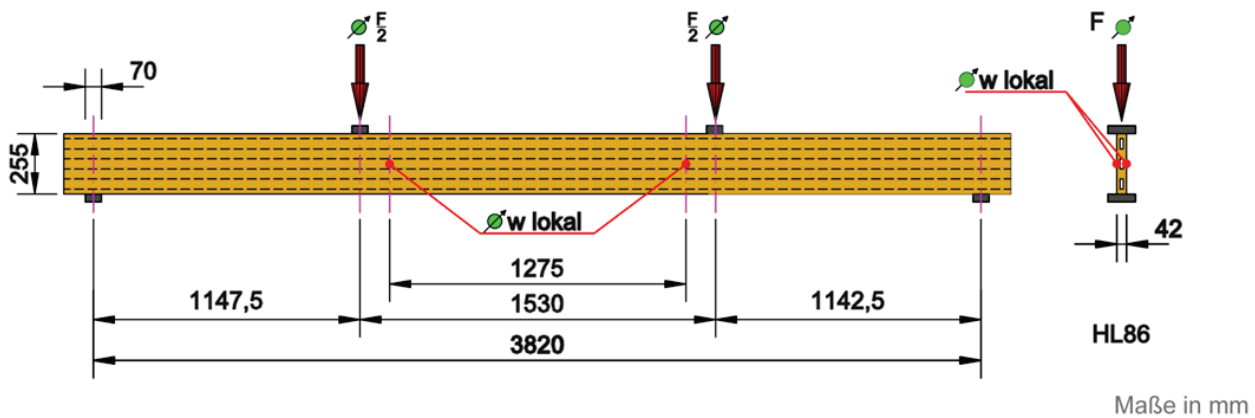


Abbildung 4-13: Prüfkonfiguration B-HL86-HK

4-5.2 PRÜFUNGEN AN PRODUKTEN HERGESTELLT AUS HOHELLAMELLEN

4-5.2.1 Biegeprüfungen

Die Prüfungen erfolgten an der Universalprüfmaschine LIGNUM_UNI_275, die eine stufenlos steuerbare weg- und/oder kraftgesteuerte Aufbringung von Kräften bis maximal 275 kN erlaubt. Die Fehlergrenze der Kraftmessung liegt unter 1 %. Die Verformungsmessung in der Mitte der Referenzbalken wurde mit induktiven Wegaufnehmern und dem Messverstärker Quantum MX810 der Fa. HBM realisiert. Dabei kamen für die Verformungsmessung Wegaufnehmer des Typs WA-10 (lokale Messung) und WA-20 (globale Messung) zu Einsatz.

Prüfserie PB-5s-HL86-VH

Die Biegeprüfungen an den Prüfkörpern der Prüfserie PB-5s-HL86-VH erfolgten gemäß EN 408 [41] mit einer freien Spannweite von $l = 2772 \text{ mm}$. Die Abmessungen der Prüfkonfiguration sind in Tabelle 4-14 zusammengefasst (siehe auch Abbildung 4-14).

Tabelle 4-14: Abmessung und Prüfkonfiguration der Prüfserie PB-5s-HL86-VH

Bezeichnung	Abkürzung [-]	Wert [mm]	Bemerkung [-]
freie Spannweite	l	2772	$18 \cdot h$
Abstand Auflager – Lasteinleitung	a_1	924	$6 \cdot h$
Abstand der Lasteinleitung	a_2	924	$6 \cdot h$
Messlänge MOE lokal	l_1	770	$5 \cdot h$
Nennbreite	b	500	
Nennstärke	h	154	
Gesamtlänge	L	3000	$\geq 19 \cdot h$
Auflagerbreite	b_a	70	$\leq h/2$

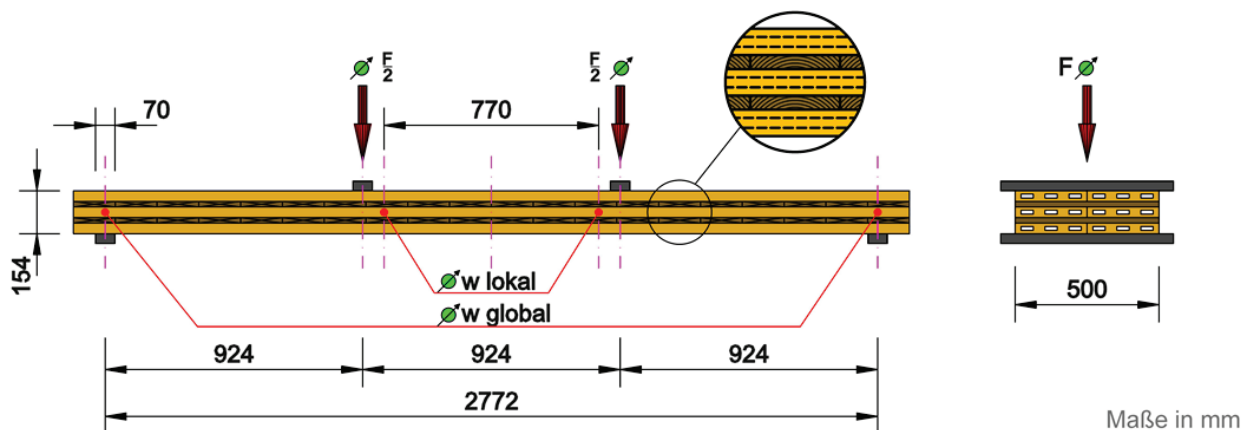


Abbildung 4-14: Prüfkonfiguration PB-5s-HL86-VH

Prüfserie PB-3s-HL86

Die Biegeprüfungen an den Prüfkörpern der Prüfserie PB-3s-HL86 erfolgten in Anlehnung an die EN 408 [41] mit einer freien Spannweite von $l = 2823 \text{ mm}$. Die Abmessungen der Prüfkongfiguration sind in Tabelle 4-15 aufgelistet (siehe auch Abbildung 4-15).

Tabelle 4-15: Abmessung und Prüfkongfiguration der Prüfserie PB-3s-HL86

Bezeichnung	Abkürzung [-]	Wert [mm]	Bemerkung [-]
freie Spannweite	l	2832	$24 \cdot h$
Abstand Auflager – Lasteinleitung	a_1	1062	$9 \cdot h$
Abstand der Lasteinleitung	a_2	708	$6 \cdot h$
Messlänge MOE lokal	l_1	590	$5 \cdot h$
Nennbreite	b	500	
Nennstärke	h	118	
Gesamtlänge	L	3000	$\geq 25 \cdot h$
Auflagerbreite	b_a	70	$\leq h/2$

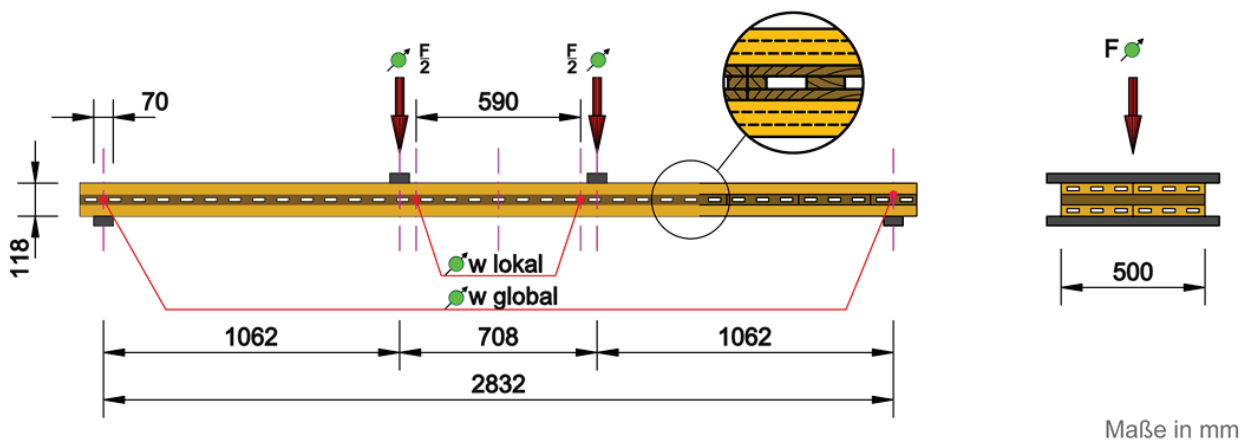


Abbildung 4-15: Prüfkongfiguration PB-3s-HL86

4-5.2.2 Rollschubprüfungen

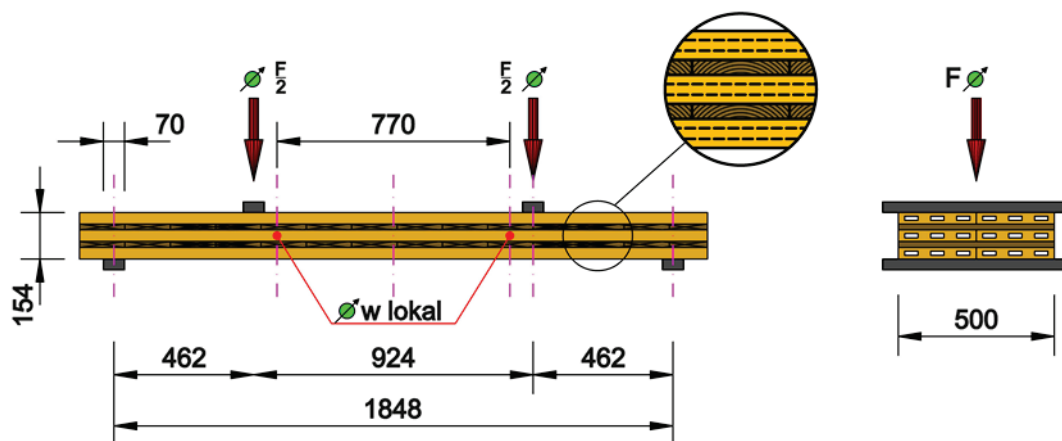
Die Prüfungen erfolgten an der Universalprüfmaschine LIGNUM_UNI_275, die eine stufenlos steuerbare weg- und/oder kraftgesteuerte Aufbringung von Kräften bis maximal 275 kN erlaubt. Die Fehlergrenze der Kraftmessung liegt unter 1 %. Die Verformungsmessung in der Mitte der Referenzbalken wurde mit induktiven Wegaufnehmern und des Messverstärkers Quantum MX810 der Fa. HBM realisiert. Dabei kamen für die Verformungsmessung Wegaufnehmer des Typs WA-10 (lokale Messung) und WA-20 (globale Messung) zu Einsatz.

Prüfserie PS-5s-HL86-VH

Die Biegeprüfungen an den Prüfkörpern der Prüfserie PS-5s-HL86-VH erfolgten in Anlehnung an die EN 408 [41] mit einer freien Spannweite von $l = 1848 \text{ mm}$. Die Abmessungen der Prüfkonfiguration sind in Tabelle 4-16 ersichtlich (siehe auch Abbildung 4-16).

Tabelle 4-16: Abmessung und Prüfkonfiguration der Prüfserie PS-5s-HL86-VH

Bezeichnung	Abkürzung [-]	Wert [mm]	Bemerkung [-]
freie Spannweite	l	1848	$12 \cdot h$
Abstand Auflager – Lasteinleitung	a_1	462	$3 \cdot h$
Abstand der Lasteinleitung	a_2	924	$6 \cdot h$
Messlänge MOE lokal	l_1	770	$5 \cdot h$
Nennbreite	b	500	
Nennstärke	h	154	
Gesamtlänge	L	2010	$\geq 13 \cdot h$
Auflagerbreite	b_a	70	$\leq h/2$



Maße in mm

Abbildung 4-16: Prüfkonfiguration PS-5s-HL86-VH

4-5.2.3 Querdruckprüfungen

Die Querdruckprüfungen erfolgten in Anlehnung an EN 408 [41]. Entgegen der Bestimmungen dieser Norm wurde die Verformung über die gesamte Prüfkörperhöhe gemessen anstatt der festgelegten 60 % der Höhe. Die Abmessungen der Prüfkonfiguration sind in Abbildung 4-17 ersichtlich. Die verschiedenen Prüfvariationen sind in Abbildung 4-18 abgebildet.

Die Prüfung erfolgte an der Universalprüfmaschine LIGNUM_UNI_275, die eine stufenlos steuerbare weg- und/oder kraftgesteuerte Aufbringung von Kräften bis maximal 275 kN erlaubt. Die Fehlergrenze der Kraftmessung liegt unter 1 %. Die Verformungsmessung der Stahlplatte wurde mittels vier induktiven Wegaufnehmern des Typs WA-20 der Fa. HBM realisiert.

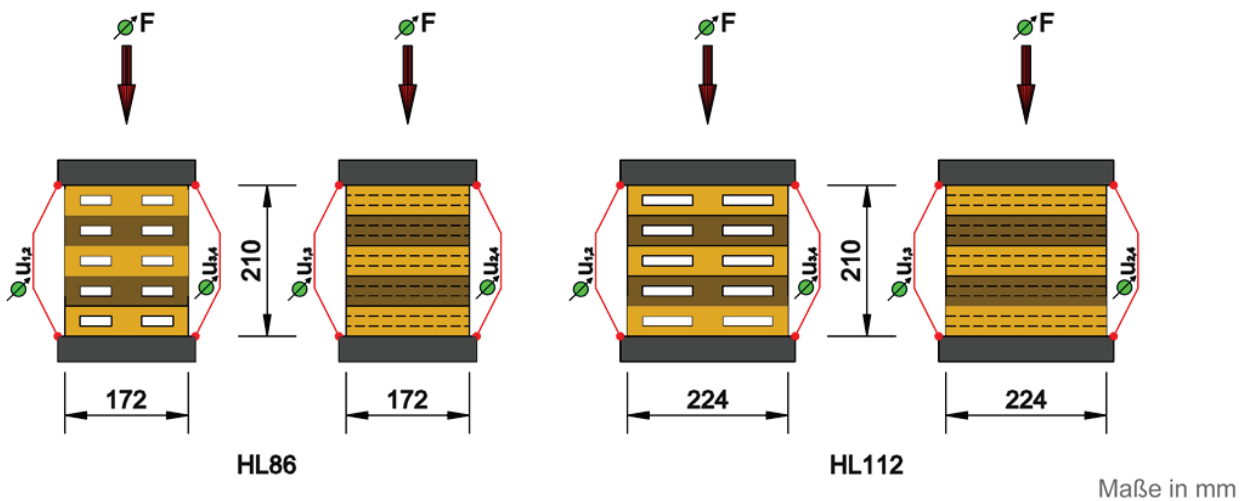


Abbildung 4-17: Prüfkonfiguration Querdruck

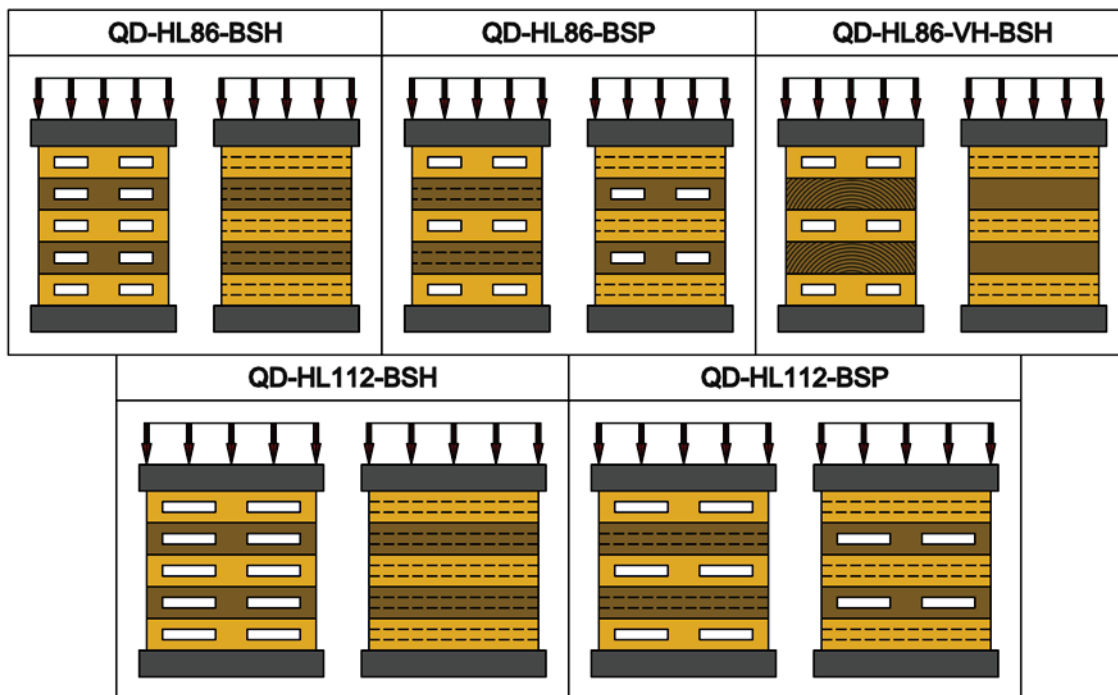


Abbildung 4-18: Prüfvariationen Querdruck

4-5.2.4 Kriechbeiwert

Die Durchführung der Kriechversuche erfolgten in Anlehnung an EN 1156 [31] und EN 408 [41]. Die Langzeit-Vier-Punkt-Biegeversuche wurden unter konstanten Klimabedingungen (Normklima 20°C / 65 %r.L.) durchgeführt. Alle Prüfkörper standen unter der gleichen konstant gehaltenen Last von rund 700 kg. Der Versuchsaufbau („Turm“) ist in Abbildung 4-19 ersichtlich. Der Turm wurde in einer Klimakammer des Bautechnikzentrums an der TU-Graz aufgebaut. Das gewählte Klima von 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte entspricht der NK 1 laut EN 1995 [13].

Die Belastung der Prüfkörper erfolgte in den Drittelpunkten der freien Spannweite von $l = 18 \cdot h$. Die Abmessungen der Vier-Punkt-Biegeprüfungen sind in Tabelle 4-17 und Tabelle 4-18 dargestellt.

Tabelle 4-17: *Abmessung und Prüfkonfiguration der Prüferserie Kriechen 5s-BSP*

Bezeichnung	Abkürzung [-]	Wert [mm]	Bemerkung [-]
freie Spannweite	l	2772	$18 \cdot h$
Abstand Auflager – Lasteinleitung	a_1	924	$6 \cdot h$
Abstand der Lasteinleitung	a_2	924	$6 \cdot h$
Messlänge MOE lokal	l_1	770	$5 \cdot h$
Nennbreite	b	500	
Nenndicke	h	154	
Gesamtlänge	L	2926	$\geq 19 \cdot h$
Auflagerbreite	b_a	50	$\leq h/2$

Tabelle 4-18: *Abmessung und Prüfkonfiguration der Prüferserie Kriechen 3s-BSP*

Bezeichnung	Abkürzung [-]	Wert [mm]	Bemerkung [-]
freie Spannweite	l	2124	$18 \cdot h$
Abstand Auflager – Lasteinleitung	a_1	708	$6 \cdot h$
Abstand der Lasteinleitung	a_2	708	$6 \cdot h$
Messlänge MOE lokal	l_1	590	$5 \cdot h$
Nennbreite	b	500	
Nenndicke	h	118	
Gesamtlänge	L	2242	$\geq 19 \cdot h$
Auflagerbreite	b_a	50	$\leq h/2$

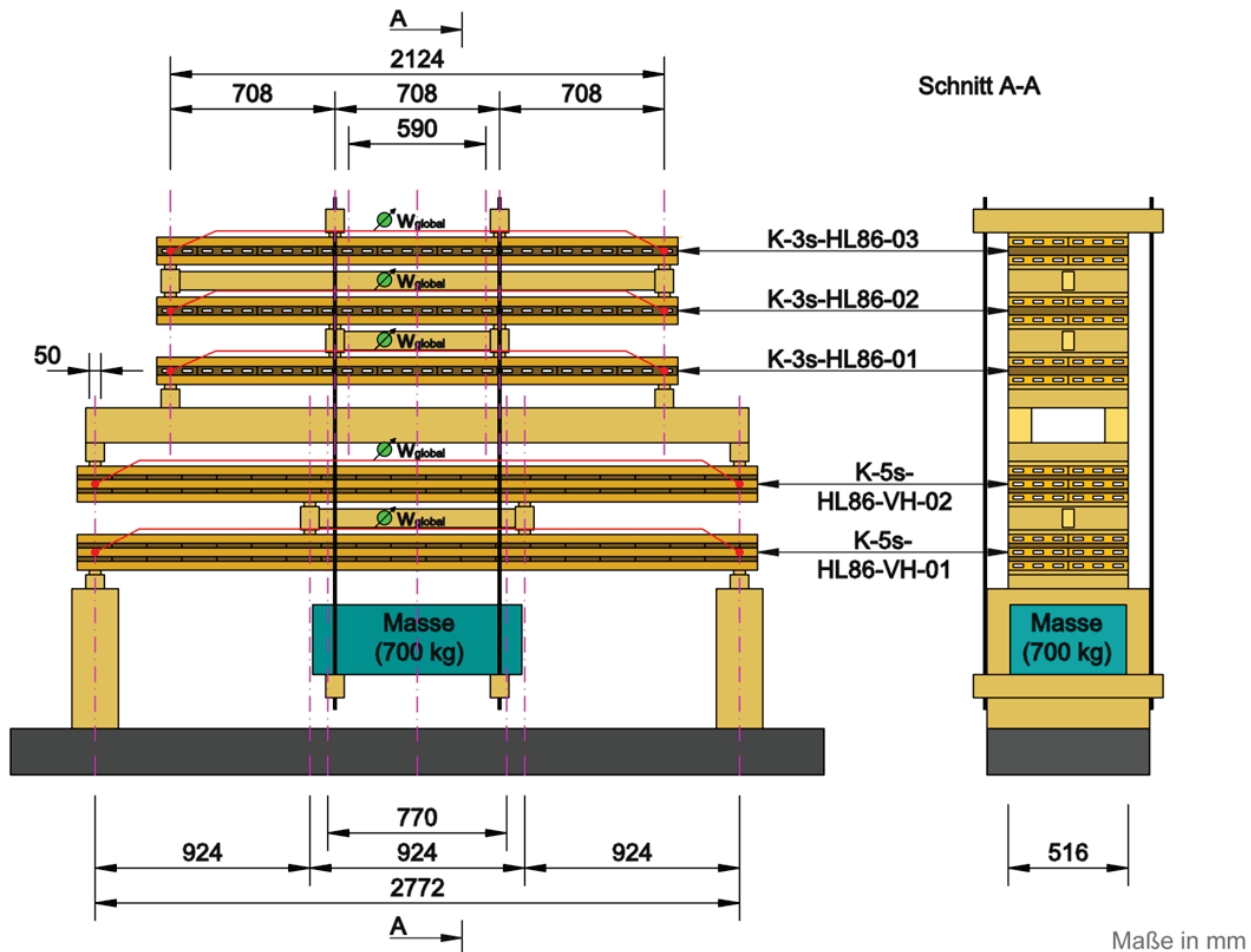


Abbildung 4-19: Prüfkongfiguration Kriechen

Die Belastung der einzelnen Prüfkörper variierte auf Grund der von oben nach unten zunehmenden Eigengewichte. Eine Aufstellung der aufgebrachtten Lasten und die rechnerisch ermittelten Auslastungsgrade sind der Tabelle 4-19 zu entnehmen.

Tabelle 4-19: Last und Ausnutzungsgrade Kriechversuche

Prüfkörper	F [kN]	σ_m / f_m [%]	τ_v / f_v [%]	τ_r / f_r [%]
K-3s-HL86-03	6,41	11,2	3,92	18,0
K-3s-HL86-02	7,03	12,7	5,25	20,3
K-3s-HL86-01	7,64	13,9	6,82	22,0
K-5s-HL86-VH-02	8,90	13,5	3,48	8,00
K-5s-HL86-VH-01	9,94	14,8	3,75	8,64

Die Messung der Durchbiegung erfolgte mittels Referenzbalken und digitalen Messuhren der Fa. Käfer, welche ein Ablesen der Wege mit einer Genauigkeit von 0,001 mm ermöglichen.

4-5.3 PRÜFUNGEN AN VERBINDUNGSMITTELN

4-5.3.1 Schraubenausziehprüfungen

Die Schraubenausziehprüfungen erfolgten in Anlehnung an EN 1382 [42] bzw. an CUAP 06.03/08 [43]. Die Prüfkonfigurationen sind in Abbildung 4-20 dargestellt. Die geprüften Schraubendurchmesser und Einbindetiefen sind in Tabelle 4-20 aufgelistet. Bei der verwendeten Schraube handelte es sich um eine Vollgewindeschraube mit Halbspitze des Typs „Stardrive“ der Fa. Schmid-Schrauben mit den Abmessungen $\varnothing 8 \text{ mm} \mid l = 180 \text{ mm}$.

Die Prüfung erfolgte an der Universalprüfmaschine LIGNUM_UNI_275, die eine stufenlos steuerbare weg- und/oder kraftgesteuerte Aufbringung von Kräften bis maximal 275 kN erlaubt. Die Fehlergrenze der Kraftmessung liegt unter 1 %.

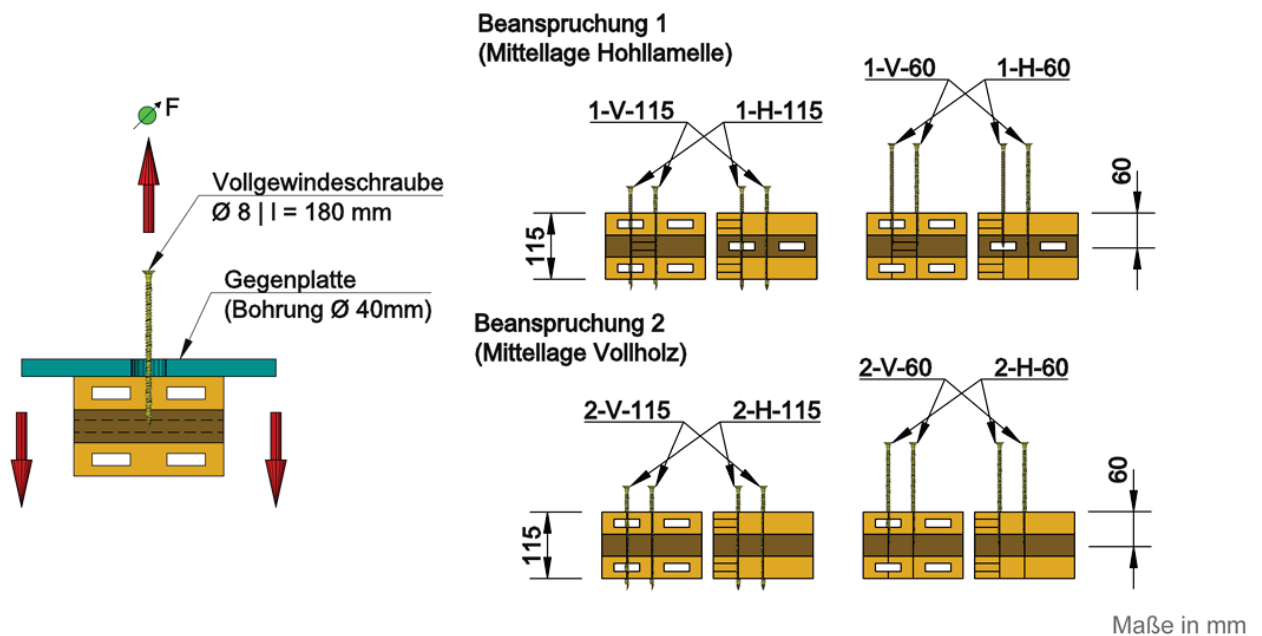


Abbildung 4-20: Prüfkonfiguration Schraubenausziehwiderstand

Tabelle 4-20: Eindringtiefen bzw. effektive Gewindelängen der einzelnen Prüfserien

Prüfserie	$l_{\text{emb}}^{1)}$ [mm]	$l_{\text{eff}}^{2)}$ [mm]
SA-1-V-60	60,0	50,6
SA-1-H-60	60,0	36,6
SA-1-V-115	115	115
SA-1-H-115	115	73,0
SA-2-V-60	60,0	50,6
SA-2-H-60	60,0	36,6
SA-2-V-115	115	115
SA-2-H-115	115	87,0

Anmerkung:

¹⁾ Eindringtiefe der Schraube

²⁾ effektive Gewindelänge im Holz (Abzug der Schraubenspitze $\sim 1,17 \cdot d$)

4-6 ERMITTLUNG DER PRÜFDATEN

Die ermittelten Prüfdaten wurden nach den in diesem Abschnitt erläuterten Gleichungen, mithilfe der Softwareprogramme Microsoft Excel [44] und Mathematica [45] berechnet.

4-6.1 HOLZFEUCHTE

Die Bestimmung der Holzfeuchte erfolgte mittels (4.1) gemäß EN 13183-1 [46].

$$u = \frac{m_u - m_o}{m_o} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Dabei sind:

- u Holzfeuchtigkeit [%]
- m_u Probenmasse bei Holzfeuchtigkeit u [g]
- m_o Probenmasse im darrtrockenen Zustand [g]

4-6.2 GEOMETRISCHE ABMESSUNGEN

Die geometrischen Abmessungen der Prüfkörper wurden bis zu einer Länge von 1000 mm mittels digitaler Schiebelehren bestimmt, welche ein Ablesen mit einer Genauigkeit von 0,01 mm ermöglichen. Abmessungen, welche die Länge von 1000 mm überschritten, wurden mithilfe von Maßbänder (Teilung: 1 mm) aufgenommen.

4-6.3 ROHDICHTE

Die Ermittlung der Rohdichte erfolge nach ISO 3131 [47] an Proben, die möglichst nahe der Bruchstelle entnommen wurden. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Rohdichteproben den gesamten Querschnitt repräsentieren.

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad (4.2)$$

Dabei sind:

- ρ_u Rohdichte bei Holzfeuchtigkeit u [kg/m³]
- m_u Probenmasse bei Holzfeuchtigkeit u [kg]
- V_u Probenvolumen bei Holzfeuchtigkeit u [m³]

Um die Rohdichte unterschiedlicher Prüfkörper bzw. Prüferien vergleichen zu können, wurde die ermittelten Rohdichten nach EN 384 [48] auf eine Referenzholzfeuchte von $u = 12\%$ korrigiert.

$$\rho_{12} = \rho_u \left(1 + (12 - u) \frac{0,5}{100} \right) \quad (4.3)$$

Dabei sind:

- ρ_u Rohdichte bei Holzfeuchtigkeit u [kg/m³]
- ρ_{12} Rohdichte bei Referenzholzfeuchtigkeit 12 % [kg/m³]
- u Holzfeuchtigkeit der Probe [%]

4-6.4 QUERSCHNITT

Bei der Berechnung der vorhandenen Querschnittswerte wurden alle Aussparungen der Hohl lamellen in Abzug gebracht.

4-6.4.1 Biegesteifigkeit K_{HL}

Die Ermittlung der Biegesteifigkeit der Prüfkörper erfolgte nach (4.4). In

Tabelle 4-21 sind die verwendeten Materialeigenschaften aufgelistet. Es wurde dabei für alle Querlagen der E-Modul mit $E_{90} = 0$ angenommen. Dies kann durch eine fehlende Schmalseitenverklebung bzw. durch eine mögliche Rissbildung gerechtfertigt werden.

$$K_{HL} = \sum (I_i \cdot E_i) + \sum (A_i \cdot e_i^2 \cdot E_i) \quad (4.4)$$

Dabei sind:

- I_i Trägheitsmoment der Schicht [mm^4]
- A_i Fläche der Schicht [N/mm^2]
- e_i Schwerpunktsabstand der Schicht [mm]
- E_i E-Modul der Schicht [N/mm^2]

Tabelle 4-21: Materialeigenschaften – Berechnung K_{CLT}

	Wert
E_0 [N/mm^2]	13.500
E_{90} [N/mm^2]	0

4-6.4.2 Schubsteifigkeit S_{HL} | Schubkorrekturfaktor κ

Der Schubkorrekturfaktor wurde mittels (4.5) und (4.6) ermittelt, es wurden bei der Verwendung der Hohl lamelle als Querlage die in Abschnitt 3-5.2 *Schub quer zur Faser – Rollschub* beschriebenen Ansätze angewandt.

$$S_{HL} = \frac{S_{ges}}{\kappa} = \frac{\sum (A_i \cdot G_i)}{\kappa} \quad (4.5)$$

$$\kappa = \frac{S_{ges}}{K_{HL}^2} \cdot \int_h \left(\frac{S^2(z, E(z))}{G(z) \cdot b(z)} \right) dz \quad (4.6)$$

Dabei sind:

- A_i Fläche der Schicht [N/mm^2]
- G_i Schubmodul der Schicht [N/mm^2]
- E_i E-Modul der Schicht [N/mm^2]
- $S(z, E(z))$... statisches Moment in Abhängigkeit von z [N]
- $b(z)$ Breite in Abhängigkeit von z [mm]

Die zur Berechnung erforderlichen Materialparameter sind in Tabelle 4-22 aufgelistet.

Tabelle 4-22: Materialeigenschaften – Berechnung S_{CLT}

	Hohllamelle in Längslage	Hohllamelle in Querlage
E_0 [N/mm ²]	13.500	13.500
E_{90} [N/mm ²]	0	0
G_{090} [N/mm ²]	690	810 ¹⁾
G_{9090} [N/mm ²]	69	40,3 ²⁾

Anmerkung:

¹⁾ lt. EN338

²⁾ Werte aus FE-Berechnung (siehe Abschnitt 3-5.2)

4-6.5 BIEGEFESTIGKEIT

Die Biegefestigkeit wurde über die Maximalkraft der Prüfung berechnet und ergibt sich aus (4.7).

$$f_m = \frac{a_1 \cdot F_{\max} \cdot E_{ref} \cdot t}{4 \cdot K_{HL}} \quad (4.7)$$

Dabei sind:

- f_m Biegefestigkeit [N/mm²]
- F_{\max} maximale Kraft [N]
- a_1 Abstand zwischen Auflager - Lasteinleitung [mm]
- t Plattendicke [mm]
- E_{ref} Bezugs-E-Modul (siehe Tabelle 4-22) [N/mm²]
- K_{HL} Biegesteifigkeit [Nmm²]

4-6.6 BIEGEELASTIZITÄTSMODUL

4-6.6.1 Lokaler E-Modul

Die Ermittlung des lokalen Biege-E-Moduls erfolgte nach (4.8). Der Auswertung des E-Moduls wurde nach EN 408 [41] im Bereich zwischen 10 und 40 % der maximalen Kraft mittels einer Regressionsanalyse durchgeführt.

$$E_{m, \text{lokal}} = \frac{a_1 \cdot l_1^2 \cdot E_{ref}}{16 \cdot K_{HL}} \cdot \frac{dF}{dw} \quad (4.8)$$

Dabei sind:

- $E_{m, \text{lokal}}$ Biege-E-Modul [N/mm²]
- $\frac{dF}{dw}$ Steigung Kraft-Durchbiegung (im Bereich von 10 bis 40 % von F_{\max}) [N]
- a_1 Abstand zwischen Auflager - Lasteinleitung [mm]
- l_1 Messlänge lokaler E-Modul [mm]
- E_{ref} Bezugs-E-Modul (siehe Tabelle 4-22) [N/mm²]
- K_{HL} Biegesteifigkeit [Nmm²]

4-6.6.2 Globaler E-Modul

Die Bestimmung des globalen Biegeelastizitätsmoduls erfolgte analog zum lokalen E-Modul.

$$E_{m,global} = \frac{S_{HL} \cdot a_1 \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot a_1^2)}{48 \cdot \frac{K_{HL}}{E_{ref}} \cdot \left(S_{HL} \cdot \frac{dw}{dF} - \frac{a_1}{2} \right)} \quad (4.9)$$

Dabei sind:

- $E_{m,global}$ Biege-E-Modul [N/mm²]
- $\frac{dF}{dw}$ Steigung Kraft-Durchbiegung (im Bereich von 10 bis 40 % von F_{max}) [N]
- a_1 Abstand zwischen Auflager - Lasteinleitung [mm]
- l Spannweite [mm]
- E_{ref} Bezugs-E-Modul (siehe Tabelle 4-22) [N/mm²]
- K_{HL} Biegesteifigkeit [Nmm²]
- S_{HL} Schubsteifigkeit [N]

4-6.6.3 Holzfeuchtekorrektur – E-Modul

Um die E-Moduln unterschiedlicher Prüfkörper bzw. Prüfserien vergleichen zu können, wurde die ermittelten E-Moduln nach EN 384 [48] auf eine Referenzholzfeuchte von $u = 12$ % korrigiert.

$$E_{12} = E_u \left(1 - (12 - u) \frac{1}{100} \right) \quad (4.10)$$

Dabei sind:

- E_u E-Modul bei Holzfeuchtigkeit u [kg/m³]
- E_{12} E-Modul bei Referenzholzfeuchtigkeit 12 % [kg/m³]
- u Holzfeuchtigkeit der Probe [%]

4-6.7 SCHUB- UND ROLLSCHUBFESTIGKEIT

Die Schubspannungen im Querschnitt berechnen sich nach (4.11).

$$\tau_v(z) = \frac{V \cdot \int_{-t/2}^z (b(z_1) \cdot E(z_1) \cdot z_1) dz_1}{K_{HL} \cdot b(z)} \quad (4.11)$$

Dabei sind:

- $\tau_v(z)$ Schubspannung an der Stelle z [N/mm²]
- t Elementdicke [mm]
- $b(z)$ Querschnittsbreite an der Stelle z [mm]
- E_{ref} Bezugs-E-Modul (siehe Tabelle 4 22) [N/mm²]
- K_{HL} Biegesteifigkeit [Nmm²]

Im Zuge der Auswertung wurden je nach Versagensart die zugehörige Spannung ermittelt. Wenn ein Prüfkörper ein Rollschubversagen aufwies, wurde die maximale Rollschubspannung angegeben. Bei der Verwendung von Hohlblechen als Querlage wurde zusätzlich die Netto-Rollschubspannung nach (4.12) berechnet.

$$f_{r,Netto} = f_{r,Brutto} \cdot \frac{b_{ges}}{b_{Steg}} \quad (4.12)$$

Dabei sind:

- $f_{r,Netto}$ Netto-Rollschubfestigkeit bei HL als Querlage [N/mm²]
- $f_{r,Brutto}$ Brutto-Rollschubfestigkeit bei HL als Querlage [N/mm²]
- b_{ges} Breite HL [mm]
- b_{Steg} Breite Steg HL [mm]

4-6.8 QUERDRUCK

Die Auswertung der Querdruckversuche erfolgte in Anlehnung an EN 408 [41]. Abweichend von der genannten Norm wurde die gesamte Prüfkörperhöhe, anstelle der 60 % der Höhe, für die Ermittlung der Stauchung verwendet. Die Berechnung der Querdruckfestigkeit und des E-Moduls quer zur Faser erfolgten nach folgenden Gleichungen:

$$f_{c,90} = \frac{F_{c,90,max}}{A} \quad (4.13)$$

$$E_{c,90} = \frac{h \cdot \Delta F}{A \cdot \Delta w} \quad (4.14)$$

Dabei sind:

- $f_{c,90}$ Querdruckfestigkeit [N/mm²]
- $F_{c,90,max}$ maximale Kraft (siehe Abbildung 4-21) [N]
- A Querschnittsfläche (Brutto- oder Nettofläche) [mm²]
- h Messlänge (hier: h = Prüfkörperhöhe) [mm]
- ΔF Laststeigerung zw. 10 und 40 % von $F_{c,90,max}$ [N]
- Δw Zunahme der Stauchung zw. 10 und 40 % von $F_{c,90,max}$ [mm]

Die Ermittlung von $F_{c,90,max}$ erfolgte dabei in mehreren Iterationsschritten. Zu Beginn muss ein Schätzwert für $F_{c,90,max,est}$ angenommen werden und eine Gerade durch die Punkte $0,1 \cdot F_{c,90,max,est}$ und $0,4 \cdot F_{c,90,max,est}$ gelegt werden (Gerade 1 in Abbildung 4-21). Durch paralleles Verschieben in den Punkt $0,1 \cdot h_t$ erhält man am Schnittpunkt dieser Gerade mit der Versuchskurve $F_{c,90,max}$. Dieser Wert muss innerhalb von ± 5 % von $F_{c,90,max,est}$ liegen, sonst muss der Vorgang mit einem neuen Schätzwert wiederholt werden.

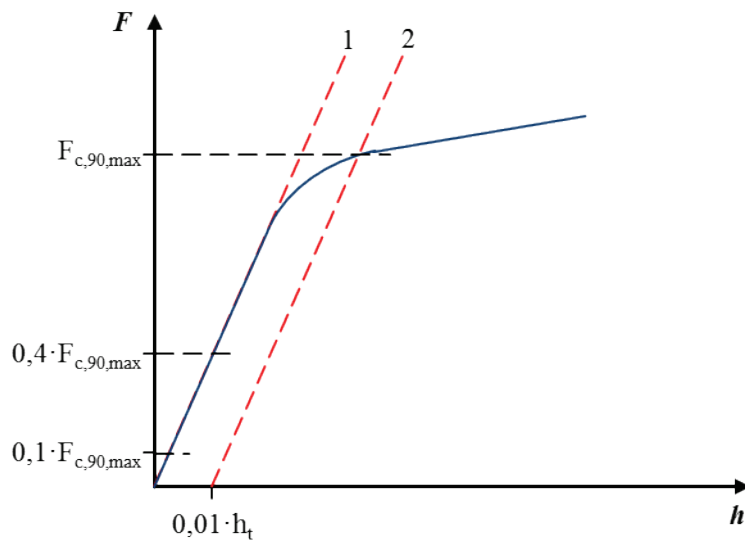


Abbildung 4-21: Ermittlung $F_{c,90,max}$

4-6.9 KRIECHBEIWER

Die Auswertung der Kriechversuche erfolgte in Anlehnung an die EN 1156 [31]. Die Kriechzahl beschreibt die Verformungszunahme mit Zeit bezogen auf die elastische Anfangsverformung. Sie ergibt sich daraus zu:

$$k_c = \frac{a_T - a_1}{(a_1 - a_0)} \quad (4.15)$$

Dabei sind:

- k_c Kriechzahl [-]
- a_T Verformung beim Zeitpunkt T [mm]
- a_0 Verformung beim Zeitpunkt T = 0 (vor Belastung) [mm]
- a_1 Verformung beim Zeitpunkt T = 1 min (nach Belastung) [mm]

Um das Kriechverhalten, über die Versuchsdauer hinaus, genau vorherzusagen, sind in [31] die zwei folgenden rheologischen Modelle angegeben:

Modell 1:
$$k_c(T) = \beta_1 \cdot (1 - e^{(-\beta_2 \cdot T)}) + \beta_3 \cdot T^{\beta_4} + \beta_5 \quad (4.16)$$

Modell 2:
$$k_c(T) = \beta_1 \cdot T^{\beta_2} \quad (4.17)$$

Dabei sind:

- $k_c(T)$ Funktion der Kriechzahl in Abhängigkeit von T [-]
- T Zeit [h]
- $\beta_1 \div \beta_5$ Modellparameter [-]

(Modell 1: mit $\beta_5 = 0$, da Kriechzahl $k_c(t = 0) = 0$)

Bei Modell 1 wurde der konstante Funktionsanteil mit $\beta_5 = 0$ angenommen, um die Bedingung zu erfüllen, dass zu Versuchsbeginn keine Kriechverformung vorhanden ist.

Die Bestimmung der Koeffizienten und die Anpassung des Modells an die Versuchsdaten erfolgte mithilfe des Programms Mathematica [45]. Anhand der berechneten Modellparameter wurde auf eine Nutzungsdauer von 50 Jahren (vgl. EN 1995 [13]) hochgerechnet.

$$k_{def} = k_c(50 \text{ Jahre}) \quad (4.18)$$

Des Weiteren wurden zum Vergleich mit den Ergebnissen von JÖBSTL [38] und SILLY [40], aus den errechneten k_{def} -Werten die Kriechzahlen von Brettlagen quer zur Faser ermittelt. Die Vorgehensweise ist (3.18) bis (3.22) dargestellt.

Die Biegelinie für einen schubweichen Balken nach Timoshenko bei einer Vier-Punkt-Biegeprüfung mit Kraftangriff in den Drittelpunkten ist in (4.19) angegeben.

$$w(x) = \begin{cases} \frac{F \cdot (2 \cdot l^2 \cdot x - 3 \cdot x^3)}{36 \cdot K_{HL}} + \frac{F \cdot x}{2 \cdot S_{HL}} & \text{für } 0 \leq x \leq \frac{l}{3} \\ \frac{F \cdot l \cdot (-l^2 + 27 \cdot l \cdot x - 27 \cdot x^2)}{324 \cdot K_{HL}} + \frac{F \cdot l}{6 \cdot S_{HL}} & \text{für } \frac{l}{3} \leq x \leq \frac{2}{3} \cdot l \\ \frac{F \cdot (l-x) \cdot (l^2 - 6 \cdot l \cdot x + 3 \cdot x^2)}{36 \cdot K_{HL}} + \frac{F \cdot (l-x)}{2 \cdot S_{HL}} & \text{für } \frac{2}{3} \cdot l \leq x \leq l \end{cases} \quad (4.19)$$

Die Durchbiegung in Feldmitte zum Zeitpunkt $t = 0$ bzw. $t = 50$ Jahre ist in (4.20) und (4.21) angeführt.

$$w\left(\frac{l}{2}\right)_{t=0} = \frac{23 \cdot F \cdot l^3}{1296 \cdot K_{HL}(E_0)} + \frac{F \cdot l}{6 \cdot S_{HL}(E_0, G_{090}, G_{9090})} \quad (4.20)$$

$$w\left(\frac{l}{2}\right)_{t=50 \text{ Jahre}} = \frac{23 \cdot F \cdot l^3}{1296 \cdot K_{HL}\left(\frac{E_0}{1+k_{def,0}}\right)} + \frac{F \cdot l}{6 \cdot S_{HL}\left(\frac{E_0}{1+k_{def,0}}, \frac{G_{090}}{1+k_{def,0}}, \frac{G_{9090}}{1+k_{def,90}}\right)} \quad (4.21)$$

Dabei sind:

- K_{HL} Biegesteifigkeit [Nmm²]
- S_{HL} Schubsteifigkeit [N]
- l Spannweite [mm]
- E_0 E-Modul der Lagen parallel zu Spannweite [Nmm²]
- G_0 Schubmodul in Faserrichtung [Nmm²]
- G_{90} Rollschubmodul der Querlage [Nmm²]
- $k_{def,0}$ Kriechbeiwert für Biegung und Schub in Faserrichtung [Nmm²]
- $k_{def,90}$ Kriechbeiwert der auf Rollschub beanspruchten Querlage [Nmm²]

Über die Gleichungen (4.22) bzw. (4.23) wurde der Kriechbeiwert $k_{def,90}$ iterativ für eine ausschließliche Rollschubbeanspruchung wie folgt ermittelt:

$$w\left(\frac{l}{2}\right)_{t=0} \cdot (1 + k_{def}) = w\left(\frac{l}{2}\right)_{t=50 \text{ Jahre}} \quad (4.22)$$

$$k_{def} = \left(w\left(\frac{l}{2}\right)_{t=\infty} / w\left(\frac{l}{2}\right)_{t=0} \right) - 1 \quad (4.23)$$

4-6.10 SCHRAUBENAUSZIEHPARAMETER

Der Ausziehparameter f_{ax} wurde in Anlehnung an EN 1382 [42] berechnet. Die Rohdichtekorrektur der einzelnen Prüfwerte erfolgte nach dem in RINGHOFER [12] publizierten Modell. Die verwendeten Gleichungen sind in (4.24) und (4.25) angeführt.

$$f_{ax,ref} = k_p \cdot \frac{F_{max}}{d \cdot l_p} \quad (4.24)$$

Dabei sind:

- $f_{ax,ref}$ Ausziehtragfähigkeit [N/mm²]
- F_{max} maximale Kraft [N]
- k_p Rohdichtekorrekturfaktor [-]
- d Nenndurchmesser Schraube [mm]
- l_p effektive Gewindelänge mit $l_p = l_{emb} - 1,17 \cdot d$ [mm]
- l_{emb} Gewindelänge im Holz inkl. Schraubenspitze [mm]

$$k_p = \left(\frac{\rho_{ref}}{\rho_i} \right)^{1,1} \quad (4.25)$$

Dabei sind:

- k_p Rohdichtekorrekturfaktor [-]
- ρ_{ref} Bezugsrohddichte (charakteristisches Niveau) [kg/m³]
- ρ_i Rohddichte des i-ten Prüfkörpers [kg/m³]

4-6.11 PRÜFAUSWERTUNG

Die Ermittlung der charakteristischen Werte erfolgte nach den Festlegungen aus EN 14358 [49]. Es wird von einer homogenen Grundgesamtheit ausgegangen und angenommen, dass die Prüfergebnisse einer logarithmischen Normalverteilung unterliegen. Die in der Norm beschriebene Vorgehensweise ist in den Formeln (4.26) bis (4.28) angeführt.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln(m_i) \quad (4.26)$$

Dabei sind:

- \bar{y} Mittelwert
- n Anzahl der Prüfungen [-]
- m_i Prüfwert [N/mm²]

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n [\ln(m_i) - \bar{y}]^2} \quad (4.27)$$

Dabei sind:

- s_y Standardabweichung der Prüfungen
- \bar{y} logarithmischer Mittelwert

- n Anzahl der Prüfungen [-]
- m_i Prüfwert [N/mm²]

$$m_k = \exp(\bar{y} - k_s \cdot s_y) \quad (4.28)$$

Dabei sind:

- m_k charakteristischer Wert der Kenngröße
- s_y Standardabweichung der logarithmierten Prüfwerte
- \bar{y} logarithmischer Mittelwert
- k_s Faktor zur Berücksichtigung der Anzahl der Prüfungen (siehe Tabelle 4-23)

Tabelle 4-23: Auszug k_s -Werte lt. EN 14358 [49] bzw. berechnete Werte

k _s – Werte							
n	k _s	n	k _s	n	k _s	n	k _s
2	5,12	17	1,96	32	1,86	47	1,82
3	3,15	18	1,95	33	1,86	48	1,81
4	2,68	19	1,94	34	1,85	49	1,81
5	2,46	20	1,93	35	1,85	50	1,81
6	2,34	21	1,92	36	1,85	51	1,81
7	2,25	22	1,92	37	1,84	52	1,81
8	2,19	23	1,91	38	1,84	53	1,81
9	2,14	24	1,90	39	1,84	54	1,80
10	2,10	25	1,89	40	1,83	55	1,80
11	2,07	26	1,89	41	1,83	56	1,80
12	2,05	27	1,88	42	1,83	57	1,80
13	2,03	28	1,88	43	1,83	58	1,80
14	2,01	29	1,87	44	1,82	59	1,80
15	1,99	30	1,87	45	1,82	60	1,79
16	1,98	31	1,86	46	1,82	61	1,79

KAPITEL 5: PRÜFERGEBNISSE

5-1 PRÜFUNGEN DES GRUNDPRODUKTES HOHLLAMELLE

5-1.1 ZUG

5-1.1.1 Prüfserie Z-HL86

Die Prüfung erfolgte am 25. September 2013 (Vorversuche) bzw. am 27. Mai 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Prüfserie Z-HL86 betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 9,31$ % (COV = 9,90 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte und des E-Moduls gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 498$ kg/m³ (COV = 6,70 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 443$ kg/m³ ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei allen Prüfkörpern ein Versagen auf Zug festgestellt.

Die mittlere Zugfestigkeit wurde mit $f_{t,mean} = 33,2$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 18,9 % ermittelt. Die charakteristische Zugfestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $f_{t,k} = 22,9$ N/mm². Der mittlere lokale Zug-E-Modul wurde zu $E_{t,lokal,mean} = 13.880$ N/mm² (COV = 9,01 %) errechnet.

In der Tabelle 5-1 sind die Ergebnisse der Zugprüfungen der Prüfserie Z-HL86 sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Prüfergebnisse der Prüfserie Z-HL86

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	Netto-Querschnitt		Brutto-Querschnitt	
			$E_{t,lokal,12}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$E_{m,lokal,12}^{1)}$ [N/mm ²]	$f_t^{1)}$ [N/mm ²]
Anzahl	39	39	39	39	39	39
Min	7,56	444	11.666	22,5	9.789	18,8
Max	10,3	576	16.877	46,3	14.187	38,4
Mittelwert	9,31	498	13.880	33,2	11.650	27,9
Stabw.	0,922	33,4	1.251	6,28	1.085	5,26
COV	9,90%	6,70%	9,01%	18,9%	9,31%	18,9%
k_s				1,84		1,84
charakteristischer Wert lt. EN 14358		443²⁾		22,9		19,2

Anmerkung:

¹⁾ auf den Bruttoquerschnitt bezogen

²⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Zugprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-1.1.2 Prüferie Z-HL86-KZ

Die Prüfung erfolgte am 01. Juni 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei sechs Prüfungen überschritten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Prüferie Z-HL86-KZ betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 9,45$ % (COV = 4,21 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte und des E-Moduls gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 480$ kg/m³ (COV = 4,27 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 447$ kg/m³ ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei allen Prüfkörpern ein Versagen der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung festgestellt.

Es ist anzumerken, dass bei den Prüfungen die Lage der Stege in der Hohllamelle nicht aufgenommen wurde. Als Bezugsfläche für die Berechnung der Spannungen wurde die kleinere Querschnittsfläche der beiden Fügeiteile herangezogen.

Die mittlere Zugfestigkeit wurde mit $f_{t,mean} = 27,2$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 15,3 % ermittelt. Die charakteristische Zugfestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $f_{t,k} = 20,1$ N/mm² und liegt somit unter der Festigkeit des Grundmaterials.

In der Tabelle 5-2 sind die Ergebnisse der Zugprüfungen der Prüferie Z-HL86-KZ sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Prüfergebnisse der Prüferie Z-HL86-KZ

	u_1 [%]	u_2 [%]	$\rho_{12,1}$ [kg/m ³]	$\rho_{12,2}$ [kg/m ³]	Netto-QS		Brutto-QS
					f_t [N/mm ²]	$f_{t,Netto}^{1)}$ [N/mm ²]	$f_{t,Brutto}^{2)}$ [N/mm ²]
Anzahl	39	39	39	39	39	39	39
Min	8,66	8,62	447	444	19,5	20,1	16,5
Max	10,2	10,1	524	525	34,2	35,8	28,1
Mittelwert	9,44	9,47	484	477	27,2	27,7	22,9
Stabw.	0,469	0,316	19,6	21,2	4,17	4,23	3,44
COV	4,97%	3,34%	4,05%	4,44%	15,3%	15,3%	15,0%
k_s					1,84	1,84	1,84
charakteristischer Wert lt. EN 14358			451³⁾	442³⁾	20,1	20,5	17,0

Anmerkung:

¹⁾ Höhenversatz der Keilzinkenverbindung in Abzug gebracht

²⁾ auf den Bruttoquerschnitt bezogen

³⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Zugprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-1.1.3 Prüferserie Z-HL112

Die Prüfung erfolgte am 03. Juni 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde von allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Prüferserie Z-HL112 betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 10,2$ % (COV = 4,05 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte und des E-Moduls gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 490$ kg/m³ (COV = 4,98 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 450$ kg/m³ ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei allen Prüfkörpern ein Versagen auf Zug festgestellt.

Die mittlere Zugfestigkeit wurde mit $f_{t,mean} = 34,2$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 23,9 % ermittelt. Die charakteristische Zugfestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $f_{t,k} = 20,7$ N/mm². Der mittlere lokale Zug-E-Modul wurde zu $E_{t,lokal,mean} = 14.052$ N/mm² (COV = 12,1 %) errechnet.

In der Tabelle 5-3 sind die Ergebnisse der Zugprüfungen der Prüferserie Z-HL112 sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-3: Prüfergebnisse der Prüferserie Z-HL112

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	Netto-QS			Brutto-QS	
			$E_{t,lokal,12}$ [N/mm ²]	$E_{t,global,12}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$E_{m,lokal,12}^{1)}$ [N/mm ²]	$f_t^{1)}$ [N/mm ²]
Anzahl	20	20	20	20	20	39	39
Min	9,41	441	11.102	10.835	22,1	9.789	18,8
Max	10,9	525	16.361	15.691	49,2	14.187	38,4
Mittelwert	10,2	490	14.052	13.562	34,2	11.650	27,9
Stabw.	0,412	24,4	1.701	1.467	8,16	1.085	5,26
COV	4,05%	4,98%	12,1%	10,8%	23,9%	9,31%	18,9%
k_s					1,93		1,84
charakteristischer Wert lt. EN 14358		450²⁾			20,7		19,2

Anmerkung:

¹⁾ auf den Bruttoquerschnitt bezogen

²⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die Differenz zwischen lokalem und globalem E-Modul ist auf die Annäherung der Bezugslänge des globalen E-Moduls in den Drittelpunkten der Klemmbanken und die zum Teil unregelmäßig verlaufende Querschnittsabmessungen zurückzuführen.

Die detaillierten Ergebnisse der Zugprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-1.1.4 Prüfsreihe Z-HL112-KZ

Die Prüfung erfolgte am 01. Juni 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde von acht Prüfungen überschritten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Prüfsreihe Z-HL112-KZ betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 9,92$ % (COV = 2,59 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte und des E-Moduls gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 475$ kg/m³ (COV = 4,18 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 443$ kg/m³ ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei 18 von 19 Prüfkörpern ein Versagen der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung festgestellt. Ein Prüfkörper brach im Bereich der Klemmbacken und wurde in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Es ist anzumerken, dass bei den Prüfungen die Lage der Stege in der Hohllamelle nicht aufgenommen wurde. Als Bezugsfläche für die Berechnung der Spannungen wurde die kleinere Querschnittsfläche der beiden Fügeiteile herangezogen.

Die mittlere Zugfestigkeit wurde mit $f_{t,mean} = 30,3$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 12,4 % ermittelt. Die charakteristische Zugfestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $f_{t,k} = 23,7$ N/mm².

In der Tabelle 5-4 sind die Ergebnisse der Zugprüfungen der Prüfsreihe Z-HL112-KZ sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-4: Prüfergebnisse der Prüfsreihe Z-HL112-KZ

	u_1 [%]	u_2 [%]	$\rho_{12,1}$ [kg/m ³]	$\rho_{12,2}$ [kg/m ³]	Netto-QS		Brutto-QS
					f_t [N/mm ²]	$f_{t,Netto}^{1)}$ [N/mm ²]	$f_{t,Brutto}^{2)}$ [N/mm ²]
Anzahl	18	18	18	18	18	18	18
Min	9,41	9,58	447	444	24,6	26,7	21,4
Max	10,3	10,4	522	520	37,7	40,4	32,8
Mittelwert	9,80	10,0	476	474	30,3	31,9	25,9
Stabw.	0,235	0,225	18,7	21,5	3,75	3,97	3,30
COV	2,40%	2,24%	3,93%	4,52%	12,4%	12,4%	12,7%
k_s					1,95	1,95	1,95
charakteristischer Wert lt. EN 14358			445³⁾	439³⁾	23,7	25,1	20,2

Anmerkung:

- ¹⁾ Höhenversatz der Keilzinkenverbindung in Abzug gebracht
- ²⁾ auf den Bruttoquerschnitt bezogen
- ³⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Zugprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-1.2 BIEGUNG

5-1.2.1 Prüfserie B-HL86-FK

Die Prüfung erfolgte am 12. Mai 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei zwei Prüfungen überschritten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Probe B-HL86-FK betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 10,1$ % (COV = 4,99 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte und des E-Moduls gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 485$ kg/m³ (COV = 5,49 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 441$ kg/m³ ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei 18 von 21 Prüfkörpern ein Schubversagen festgestellt. Aufgrund dieser Tatsache handelt es sich bei dem charakteristischen Wert der Biegefestigkeit um eine „Mindestfestigkeit“.

Die mittlere „Biegefestigkeit“ wurde mit $\sigma_{m,mean} = 46,2$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 15,8 % ermittelt. Die charakteristische „Biegefestigkeit“ wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $\sigma_{m,k} = 33,9$ N/mm². Der mittlere lokale Biege-E-Modul wurde zu $E_{m,lokal,mean} = 12.987$ N/mm² (COV = 11,8 %) errechnet.

In der Tabelle 5-5 sind die Ergebnisse der Biegeprüfung der Probe B-HL86-FK sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-5: Prüfergebnisse der Prüfserie B-HL86-FK

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	Netto-QS			Brutto-QS		
			$E_{m,lokal,12}$ [N/mm ²]	f_v [N/mm ²]	$\sigma_m^{1)}$ [N/mm ²]	$E_{m,lokal,12}^{2)}$ [N/mm ²]	$f_v^{1)2)}$ [N/mm ²]	$\sigma_m^{2)}$ [N/mm ²]
Anzahl	21	21	20	18	21	19	21	21
Min	9,15	406	9.457	4,88	35,0	10.212	1,53	34,4
Max	11,2	521	15.571	7,66	62,8	15.292	2,66	62,1
Mittelwert	10,1	485	12.987	5,87	46,2	12.956	2,01	45,4
Stabw.	0,506	26,6	1.529	0,759	7,31	1.307	0,309	7,25
COV	4,99%	5,49%	11,8%	12,9%	15,8%	10,1%	15,4%	16,0%
k_s				1,95	1,92		1,92	1,92
char. Wert lt. EN 14358		441⁴⁾		4,57	33,9³⁾		1,49	33,3

Anmerkung:

¹⁾ Die angegebenen Spannungen sind zum Vergleich mit anderen Prüfserien angegeben und besitzen rein informellen Charakter

²⁾ auf den Bruttoquerschnitt bezogen

³⁾ „Mindestfestigkeit“

⁴⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Biegeprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-1.2.2 Prüferserie B-HL86-FK-II

Da bei der Prüferserie B-HL86-FK nur eine geringe Anzahl an Biegebrüchen auftrat, wurden weiter Biegeprüfungen mit einem größeren Abstand $a_l = 399$ mm zwischen dem Auflager und der Lasteinleitung durchgeführt. Diese Adaptierung der Prüfkongfiguration begünstigt das Auftreten des Erreichens der Biegefestigkeit.

Die Prüfung erfolgte am 12. Mai 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei drei Prüfungen überschritten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Probe B-HL86-FK-II betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 10,6$ % (COV = 5,76 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte und des E-Moduls gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 480$ kg/m³ (COV = 3,18 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 455$ kg/m³ ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei 7 von 14 Prüfkörpern ein Schubversagen festgestellt.

Die mittlere Biegefestigkeit wurde mit $f_{m,mean} = 60,0$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 11,6 % ermittelt. Die charakteristische Biegefestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $f_{m,k} = 47,3$ N/mm². Der mittlere lokale Biege-E-Modul wurde zu $E_{m,lokal,mean} = 13.216$ N/mm² (COV = 11,0 %) errechnet.

In der Tabelle 5-6 sind die Ergebnisse der Biegeprüfung der Probe B-HL86-FK-II sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-6: Prüfergebnisse der Prüferserie B-HL86-FK-II

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	Netto-QS			Brutto-QS		
			$E_{m,lokal,12}$ [N/mm ²]	f_v [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$E_{m,lokal,12}^{2)}$ [N/mm ²]	$f_v^{1)}$ [N/mm ²]	$f_m^{1)}$ [N/mm ²]
Anzahl	14	14	14	7	7	14	7	7
Min	10,1	464	10.277	3,96	51,7	10.105	1,28	50,9
Max	12,1	519	15.063	5,27	63,4	14.835	1,89	62,5
Mittelwert	10,6	480	13.216	4,68	58,2	12.988	1,59	57,2
Stabw.	0,612	15,3	1.458	0,429	4,16	1.435	0,230	4,12
COV	5,76%	3,18%	11,0%	9,16%	7,16%	11,1%	14,5%	7,20%
k_s				2,25	2,25		2,25	2,25
char. Wert lt. EN 14358		455²⁾		3,78	49,3		1,13	48,5

Anmerkung:

¹⁾ auf den Bruttoquerschnitt bezogen

²⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Biegeprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-1.2.3 Prüfserie B-HL86-FK-KZ

Die Prüfung erfolgte am 13. Mai 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Probe B-HL86-FK-KZ betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 9,93$ % (COV = 5,49 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte und des E-Moduls gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 482$ kg/m³ (COV = 5,18 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 441$ kg/m³ ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei allen Prüfkörpern ein Versagen der Keilzinkenverbindung festgestellt.

Es ist anzumerken, dass bei den Prüfungen die Lage der Stege in der Hohllamelle nicht aufgenommen wurde. Als Bezugsquerschnitt für die Berechnung der Spannungen wurde daher das kleinere Flächenwiderstandsmoment der beiden Fügeiteile herangezogen.

Die mittlere Biegefestigkeit wurde mit $f_{m,mean} = 45,5$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 11,3 % ermittelt. Die charakteristische Biegefestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $f_{m,k} = 36,0$ N/mm². Der mittlere lokale Biege-E-Modul wurde mit zu $E_{m,lokal,mean} = 12.726$ N/mm² (COV = 12,0 %) errechnet.

In der Tabelle 5-7 sind die Ergebnisse der Biegeprüfung der Probe B-HL86-FK-KZ sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-7: Prüfergebnisse der Prüfserie B-HL86-FK-KZ

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	Netto-QS			Brutto-QS		
			$E_{m,lokal,12}$ [N/mm ²]	$\tau_v^{1)}$ [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$E_{m,lokal,12}^{2)}$ [N/mm ²]	$\tau_v^{1)2)}$ [N/mm ²]	$f_m^{2)}$ [N/mm ²]
Anzahl	20	20	20	20	20	20	20	20
Min	9,15	433	10.545	3,16	34,2	10.347	1,09	33,5
Max	11,1	516	16.205	5,58	54,8	15.929	1,75	53,6
Mittelwert	9,93	482	12.726	3,99	45,5	12.499	1,45	44,7
Stabw.	0,545	24,9	1.528	0,559	5,14	1.504	0,164	5,04
COV	5,49%	5,18%	12,0%	14,0%	11,3%	12,0%	11,3%	11,3%
k_s				1,93	1,93		1,93	1,93
char. Wert lt. EN 14358		441³⁾		3,05	36,0		1,15	35,4

Anmerkung:

¹⁾ Die angegebenen Spannungen sind zum Vergleich mit anderen Prüfserien angegeben und besitzen informellen Charakter

²⁾ auf den Bruttoquerschnitt bezogen

³⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Biegeprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-1.2.4 Prüferie B-HL86-HK

Die Prüfung erfolgte am 14. Mai 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei drei Prüfungen überschritten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Probe B-HL86-HK betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 9,17\%$ (COV = 9,08 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte und des E-Moduls gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 490 \text{ kg/m}^3$ (COV = 4,20 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 456 \text{ kg/m}^3$ ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei 12 von 19 Prüfkörpern ein Biegeversagen festgestellt. Bei der Bestimmung der Querschnittsabmessungen wurde die Lage der mittleren Stege nicht ermittelt. Für die Berechnung der Querschnittswerte wurden die Stege gleichmäßig über die Höhe verteilt angenommen.

Die mittlere Biegefestigkeit wurde mit $f_{m,mean} = 45,2 \text{ N/mm}^2$, verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 13,5 % ermittelt. Die charakteristische Biegefestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $f_{m,k} = 34,2 \text{ N/mm}^2$. Der mittlere lokale Biege-E-Modul wurde zu $E_{m,lokal,mean} = 14.402 \text{ N/mm}^2$ (COV = 8,34 %) errechnet.

In der Tabelle 5-8 sind die Ergebnisse der Biegeprüfung der Probe B-HL86-HK sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-8: Prüfergebnisse der Prüferie B-HL86-HK

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	Netto-QS			Brutto-QS		
			$E_{m,lokal,12}$ [N/mm ²]	$\tau_v^{1)}$ [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$E_{m,lokal,12}^{2)}$ [N/mm ²]	$\tau_v^{1)2)}$ [N/mm ²]	$f_m^{2)}$ [N/mm ²]
Anzahl	19	19	19	19	19	19	19	19
Min	7,87	458	11.929	2,36	34,7	10.178	1,57	28,4
Max	10,9	525	17.384	3,88	55,4	15.273	2,70	48,7
Mittelwert	9,17	490	14.402	3,14	45,2	12.310	2,15	38,7
Stabw.	0,832	20,6	1.202	0,43	6,12	1.078	0,31	5,53
COV	9,08%	4,20%	8,34%	13,8%	13,5%	8,76%	14,3%	14,3%
k_s				1,94	1,94		1,94	1,94
char. Wert lt. EN 14358		456³⁾		2,36	34,2		1,60	28,8

Anmerkung:

- ¹⁾ Die angegebenen Spannungen sind zum Vergleich mit anderen Prüferien angegeben und besitzen rein informellen Charakter
- ²⁾ auf den Bruttoquerschnitt bezogen
- ³⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Biegeprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-1.2.5 Prüfsreihe B-HL112-FK

Die Prüfung erfolgte am 14. Mai 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei acht Prüfungen überschritten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Probe B-HL112-FK betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 11,0$ % (COV = 2,78 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte und des E-Moduls gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 494$ kg/m³ (COV = 4,84 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 455$ kg/m³ ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei 18 von 20 Prüfkörpern ein Schubversagen festgestellt. Aufgrund dieser Tatsache handelt es sich bei dem charakteristischen Wert der Biegefestigkeit um eine „Mindestfestigkeit“.

Die mittlere „Biegefestigkeit“ wurde mit $\sigma_{m,mean} = 42,3$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 14,2 % ermittelt. Die charakteristische „Biegefestigkeit“ wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $\sigma_{m,k} = 32,0$ N/mm². Der mittlere lokale Biege-E-Modul wurde zu $E_{m,lokal,mean} = 13.317$ N/mm² (COV = 13,2 %) errechnet.

In der Tabelle 5-9 sind die Ergebnisse der Biegeprüfung der Probe B-HL112-FK sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-9. Prüfergebnisse der Prüfsreihe B-HL112-FK

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	Netto-QS			Brutto-QS		
			$E_{m,lokal,12}$ [N/mm ²]	f_v [N/mm ²]	$\sigma_m^{1)}$ [N/mm ²]	$E_{m,lokal,12}^{2)}$ [N/mm ²]	$f_v^{2)}$ [N/mm ²]	$\sigma_m^{1)2)}$ [N/mm ²]
Anzahl	20	20	19	20	20	20	20	20
Min	10,3	462	10.463	4,67	32,1	5.857	1,30	31,8
Max	11,7	547	16.698	7,05	57,3	16.553	2,26	56,9
Mittelwert	11,0	494	13.317	5,69	42,3	12.840	1,68	42,0
Stabw.	0,305	23,9	1.764	0,620	6,01	2.368	0,234	5,99
COV	2,78%	4,84%	13,2%	10,9%	14,2%	18,4%	13,9%	14,3%
k_s				1,93	1,93		1,93	1,93
char. Wert lt. EN 14358		455⁴⁾		4,60	32,0³⁾		1,28	31,7³⁾

Anmerkung:

- ¹⁾ Die angegebenen Spannungen sind zum Vergleich mit anderen Prüfsreihen angegeben und besitzen rein informellen Charakter
- ²⁾ auf den Bruttoquerschnitt bezogen
- ³⁾ „Mindestfestigkeit“
- ⁴⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Biegeprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-1.2.6 Prüferserie B-HL112-FK-KZ

Die Prüfung erfolgte am 15. Mai 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Probe B-HL112-FK-KZ betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 11,1$ % (COV = 1,91 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte und des E-Moduls gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 489$ kg/m³ (COV = 3,22 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 463$ kg/m³ ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei allen Prüfkörpern ein Versagen der Keilzinkenverbindung festgestellt.

Es ist anzumerken, dass bei den Prüfungen die Lage der Stege in der Hohllamelle nicht aufgenommen wurde. Als Bezugsquerschnitt für die Berechnung der Spannungen wurde daher das kleinere Flächenwiderstandsmoment der zwei Fügeiteile herangezogen.

Die mittlere Biegefestigkeit wurde mit $f_{m,mean} = 40,2$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 12,7 % ermittelt. Die charakteristische Biegefestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $f_{m,k} = 30,3$ N/mm². Der mittlere lokale Biege-E-Modul wurde zu $E_{m,lokal,mean} = 11.734$ N/mm² errechnet.

In der Tabelle 5-10 sind die Ergebnisse der Biegeprüfung der Probe B-HL112-FK-KZ sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-10: Prüfergebnisse der Prüferserie B-HL112-FK-KZ

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	Netto-QS			Brutto-QS		
			$E_{m,lokal,12}$ [N/mm ²]	$\tau_v^{1)}$ [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$E_{m,lokal,12}^{2)}$ [N/mm ²]	$\tau_v^{1)2)}$ [N/mm ²]	$f_m^{2)}$ [N/mm ²]
Anzahl	10	10	10	10	10	10	10	10
Min	10,8	453	8.957	3,17	29,7	8.902	0,84	29,6
Max	11,5	514	16.553	4,72	50,3	16.414	1,50	49,9
Mittelwert	11,1	489	11.734	3,97	40,2	11.641	1,17	39,9
Stabw.	0,212	15,7	2.309	0,527	5,11	2.288	0,163	5,05
COV	1,91%	3,22%	19,7%	13,3%	12,7%	19,7%	13,9%	12,7%
k_s				2,10	2,10		2,10	2,10
char. Wert lt. EN 14358		463³⁾		2,96	30,3		0,86	30,1

Anmerkung:

¹⁾ Die angegebenen Spannungen sind zum Vergleich mit anderen Prüferserien angegeben und besitzen informellen Charakter

²⁾ Auf Bruttoquerschnitt bezogen

³⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Biegeprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-2 PRÜFUNGEN AN HOHLLAMELLEN IM GESPERRTEN AUFBAU

5-2.1 BIEGUNG

5-2.1.1 Prüfserie PB-5s-HL86-VH

Die Prüfung erfolgte am 9. September 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei zwei Prüfungen unterschritten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Prüfserie PB-5S-HL86-VH betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 11,2$ % (COV = 3,09 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte und des E-Moduls gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 464$ kg/m³ (COV = 1,25 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 418$ kg/m³ ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei allen Prüfkörpern ein Biegeversagen festgestellt. Bei fünf Versuchen trat das Versagen des Prüfkörpers im Bereich einer Keilzinkung auf.

Die mittlere Biegefestigkeit wurde mit $f_{m,mean} = 35,9$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 18,5 % ermittelt. Die charakteristische Biegefestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $f_{m,k} = 23,6$ N/mm². Der mittlere lokale Biege-E-Modul wurde zu $E_{m,lokal,mean} = 13.943$ N/mm² (COV = 3,65 %) berechnet.

In Tabelle 5-11 sind die Ergebnisse der Biegeprüfung der Prüfserie PB-5S-HL86-VH sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-11: Prüfergebnisse der Prüfserie PB-5s-HL86-VH

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{m,lok,12}$ [N/mm ²]	$E_{m,glob,12}$ [N/mm ²]	$\tau_{v,0,90}$ ¹⁾ [N/mm ²]	$\tau_{v,90,90}$ ¹⁾ [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]
Anzahl	10	10	10	10	10	10	10
Min	10,4	450	13.226	13.569	1,45	0,651	25,3
Max	11,6	471	14.599	15.476	2,60	1,12	44,0
Mittelwert	11,2	464	13.943	14.333	2,08	0,919	35,9
Stabw.	0,345	5,79	509	584	0,436	0,172	6,63
COV	3,09%	1,25%	3,65%	4,07%	20,9%	18,7%	18,5%
k_s					2,10	2,10	2,10
char. Wert lt. EN 14358		455 ²⁾			1,30	0,601	23,6

Anmerkung:

¹⁾ Die angegebenen Spannungen sind zum Vergleich mit anderen Prüfserien angegeben und besitzen informellen Charakter

²⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Biegeprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-2.1.2 Prüferserie PB-3s-HL86

Die Prüfung erfolgte am 11. September 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Prüferserie PB-3S-HL86 betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 11,6$ % (COV = 2,39 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte und des E-Moduls gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 483$ kg/m³ (COV = 2,17 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 466$ kg/m³ ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei elf Prüfkörpern ein Versagen auf Rollschub festgestellt. Vier Prüfkörpern, die eine Keilzinkenverbindung im Zugbereich aufwiesen, versagten auf Biegung.

Die mittlere Rollschubfestigkeit wurde mit $f_{v,90,90,mean} = 0,465$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 6,02 % ermittelt. Die charakteristische Rollschubfestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $f_{v,90,90,k} = 0,410$ N/mm². Der mittlere lokale Biege-E-Modul wurde zu $E_{m,lokal,mean} = 12.723$ N/mm² berechnet.

In Tabelle 5-12 sind die Ergebnisse der Biegeprüfung der Prüferserie PB-3S-HL86 sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-12: Prüfergebnisse der Prüferserie PB-3s-HL86

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{m,lok,12}$ [N/mm ²]	$E_{m,glob,12}$ [N/mm ²]	σ_m¹⁾ [N/mm ²]	$\tau_{v,0,90}$¹⁾ [N/mm ²]	$f_{v,90,90}$²⁾ [N/mm ²]
Anzahl	15	15	15	15	15	15	15
Min	11,1	468	11.703	11.833	18,9	0,587	0,392
Max	12,1	503	14.495	13.990	24,1	0,822	0,497
Mittelwert	11,6	483	12.992	12.927	22,3	0,707	0,465
Stabw.	0,278	10,5	816	738	1,36	0,0636	0,0280
COV	2,39%	2,17%	6,28%	5,71%	6,09%	9,00%	6,02%
k_s					1,99	1,99	1,99
char. Wert lt. EN 14358		466³⁾			19,7	0,587	0,410

Anmerkung:

- ¹⁾ Die angegebenen Spannungen sind zum Vergleich mit anderen Prüferserien angegeben und besitzen informellen Charakter
- ²⁾ Rollschubspannung bezogen auf homogenen Querlage (Bruttoquerschnitt)
- ³⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Biegeprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-2.2 SCHUB | ROLLSCHUB

5-2.2.1 Prüfserie PS-5s-HL86-VH

Die Prüfung erfolgte am 10. September 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Prüfserie PS-5S-HL86-VH betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 11,5$ % (COV = 1,86 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte und des E-Moduls gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 482$ kg/m³ (COV = 2,04 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 432$ kg/m³ ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei fünf Prüfkörpern ein Versagen auf Rollschub festgestellt. Drei Prüfkörpern, die eine Keilzinkenverbindung im Zugbereich aufwiesen, versagten auf Biegung.

Die mittlere Rollschubfestigkeit wurde mit $f_{v,90,90,mean} = 1,26$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 13,9 % ermittelt. Die charakteristische Rollschubfestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $f_{v,90,90,k} = 0,92$ N/mm². Der mittlere lokale Biege-E-Modul wurde zu $E_{m,lokal,mean} = 14.489$ N/mm² (COV = 5,34 %) berechnet.

In Tabelle 5-13 sind die Ergebnisse der Biegeprüfung der Prüfserie PS-5S-HL86-VH sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-13: Prüfergebnisse der Prüfserie PS-5s-HL86-VH

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{m,lok,12}$ [N/mm ²]	σ_m¹⁾ [N/mm ²]	$\tau_{v,0,90}$¹⁾ [N/mm ²]	$f_{v,90,90}$ [N/mm ²]
Anzahl	8	8	8	8	8	8
Min	11,1	467	13.502	19,1	2,37	0,982
Max	11,7	493	15.782	30,8	3,27	1,58
Mittelwert	11,5	482	14.489	24,5	2,86	1,26
Stabw.	0,214	9,82	774	3,32	0,305	0,175
COV	1,86%	2,04%	5,34%	13,6%	10,7%	13,9%
k_s				2,19	2,19	2,19
char. Wert lt. EN 14358		466²⁾		18,1	2,25	0,921

Anmerkung:

¹⁾ Die angegebenen Spannungen sind zum Vergleich mit anderen Prüfserien angegeben und besitzen informellen Charakter

²⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Biegeprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-2.3 QUERDRUCK

5-2.3.1 Prüfserie QD-HL86-BSH (geschichteter Aufbau)

Die Prüfung erfolgte am 31. Juli 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Prüfserie QD-HL86-BSH betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 11,9$ % (COV = 3,42 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte, des E-Moduls und der Querdruckfestigkeit gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 453$ kg/m³ (COV = 3,93 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 413$ kg/m³ ermittelt.

Die mittlere Querdruckfestigkeit am Bruttoquerschnitt wurde mit $f_{c,90,mean} = 1,06$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 16,2 % ermittelt. Die charakteristische Querdruckfestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $f_{c,90,k} = 0,719$ N/mm².

Bezieht man die Druckspannung auf den Nettoquerschnitt errechnet sich die mittlere Querdruckfestigkeit mit $f_{c,90,mean} = 2,34$ N/mm² (COV = 11,2 %) und die charakteristische Querdruckfestigkeit mit $f_{c,90,k} = 1,78$ N/mm².

In Tabelle 5-14 sind die Ergebnisse der Querdruckprüfungen der Prüfserie QD-HL86-BSH sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-14: Prüfergebnisse der Prüfserie QD-HL86-BSH (geschichteter Aufbau)

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{c,90,Brutto}$ [N/mm ²]	$f_{c,90,Brutto}$ [N/mm ²]	$f_{c,90,Netto}$ [N/mm ²]
Anzahl	6	6	6	6	6
Min	11,4	435	64,2	0,840	1,93
Max	12,6	476	85,4	1,32	2,72
Mittelwert	11,9	453	72,5	1,06	2,34
Stabw.	0,407	17,8	8,12	0,172	0,262
COV	3,42%	3,93%	11,2%	16,2%	11,2%
k_s				2,34	2,34
char. Wert lt. EN 14358		424¹⁾		0,719	1,78

Anmerkung:

¹⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Biegeprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-2.3.2 Prüfsérie QD-HL86-BSP (gesperrter Aufbau)

Die Prüfung erfolgte am 31. Juli 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei einem Prüfkörper überschritten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Prüfsérie QD-HL86-BSP betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 12,1$ % (COV = 3,95 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte, des E-Moduls und der Querdruckfestigkeit gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 448$ kg/m³ (COV = 2,34 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 424$ kg/m³ ermittelt.

Die mittlere Querdruckfestigkeit am Bruttoquerschnitt wurde mit $f_{c,90,mean} = 1,20$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 10,5 % ermittelt. Die charakteristische Querdruckfestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $f_{c,90,k} = 0,932$ N/mm².

Bezieht man die Druckspannung auf den Nettoquerschnitt errechnet sich die mittlere Querdruckfestigkeit mit $f_{c,90,mean} = 2,74$ N/mm² (COV = 11,7 %) und die charakteristische Querdruckfestigkeit mit $f_{c,90,k} = 2,04$ N/mm².

In Tabelle 5-15 sind die Ergebnisse der Querdruckprüfungen der Prüfsérie QD-HL86-BSP sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-15: Prüfergebnisse der Prüfsérie QH-HL86-BSP (gesperrter Aufbau)

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{c,90,Brutto}$ [N/mm ²]	$f_{c,90,Brutto}$ [N/mm ²]	$f_{c,90,Netto}$ [N/mm ²]
Anzahl	6	6	6	6	6
Min	11,5	434	65,7	1,01	2,22
Max	12,6	460	97,7	1,34	3,07
Mittelwert	12,1	448	82,0	1,20	2,74
Stabw.	0,476	10,5	12,3	0,126	0,321
COV	3,95%	2,34%	15,0%	10,5%	11,7%
k_s				2,34	2,34
char. Wert lt. EN 14358		430¹⁾		0,932	2,04

Anmerkung:

¹⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Biegeprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-2.3.3 Prüferserie QD-HL86-VH (alternierender Aufbau VH-HL)

Die Prüfung erfolgte am 31. Juli 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Prüferserie QD-HL86-VH-BSH betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 12,3$ % (COV = 4,51%). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte, des E-Moduls und der Querdruckfestigkeit gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 444$ kg/m³ (COV = 7,85 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 365$ kg/m³ ermittelt.

Die mittlere Querdruckfestigkeit am Bruttoquerschnitt wurde mit $f_{c,90,mean} = 1,34$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 4,83 % ermittelt. Die charakteristische Querdruckfestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $f_{c,90,k} = 1,18$ N/mm².

Bezieht man die Druckspannung auf den Nettoquerschnitt errechnet sich die mittlere Querdruckfestigkeit mit $f_{c,90,mean} = 2,84$ N/mm² (COV = 3,33 %) und die charakteristische Querdruckfestigkeit mit $f_{c,90,k} = 2,62$ N/mm².

In Tabelle 5-16 sind die Ergebnisse der Querdruckprüfungen der Prüferserie QD-HL86-VH-BSH sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-16: Prüfergebnisse der Prüferserie QH-HL86-VH (alternierender Aufbau Vollholz - Hohllamelle)

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{c,90,Brutto}$ [N/mm ²]	$f_{c,90,Brutto}$ [N/mm ²]	$f_{c,90,Netto}$ [N/mm ²]
Anzahl	5	5	5	5	5
Min	11,5	398	83,3	1,24	2,69
Max	12,8	492	122	1,40	2,92
Mittelwert	12,3	444	110	1,34	2,84
Stabw.	0,554	34,8	16,3	0,065	0,095
COV	4,51%	7,85%	14,8%	4,83%	3,33%
k_s				2,46	2,46
char. Wert lt. EN 14358		386¹⁾		1,18	2,62

Anmerkung:

¹⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Biegeprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-2.3.4 Prüfsérie QD-HL112-BSH (geschichteter Aufbau)

Die Prüfung erfolgte am 31. Juli 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Prüfsérie QD-HL112-BSH betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 11,9\%$ (COV = 3,62 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte, des E-Moduls und der Querdruckfestigkeit gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 488 \text{ kg/m}^3$ (COV = 1,01 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 476 \text{ kg/m}^3$ ermittelt.

Die mittlere Querdruckfestigkeit am Bruttoquerschnitt wurde mit $f_{c,90,mean} = 0,566 \text{ N/mm}^2$, verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 17,9 % ermittelt. Die charakteristische Querdruckfestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt sich zu $f_{c,90,k} = 0,351 \text{ N/mm}^2$.

Bezieht man die Druckspannung auf den Nettoquerschnitt errechnet sich die mittlere Querdruckfestigkeit mit $f_{c,90,mean} = 1,68 \text{ N/mm}^2$ (COV = 11,4 %) und die charakteristische Querdruckfestigkeit mit $f_{c,90,k} = 1,25 \text{ N/mm}^2$.

In Tabelle 5-17 sind die Ergebnisse der Querdruckprüfungen der Prüfsérie QD-HL112-BSH sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-17: Prüfergebnisse der Prüfsérie QD-HL112-BSH (geschichteter Aufbau)

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{c,90,Brutto}$ [N/mm ²]	$f_{c,90,Brutto}$ [N/mm ²]	$f_{c,90,Netto}$ [N/mm ²]
Anzahl	5	5	5	5	5
Min	11,9	483	18,6	0,422	1,42
Max	12,8	494	23,1	0,675	1,91
Mittelwert	12,4	488	20,5	0,566	1,68
Stabw.	0,451	4,95	1,81	0,101	0,191
COV	3,62%	1,01%	8,84%	17,9%	11,4%
k_s				2,46	2,46
char. Wert lt. EN 14358		480¹⁾		0,351	1,25

Anmerkung:

¹⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Biegeprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-2.3.5 Prüferie QD-HL112-BSP (gesperrter Aufbau)

Die Prüfung erfolgte am 31. Juli 2014. Die in EN 408 [41] geforderte Prüfzeit von 300 ± 120 s wurde bei einem Prüfkörper überschritten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Prüferie QD-HL112-BSP betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 12,7\%$ (COV = 2,55 %). Es erfolgte eine Holzfeuchteanpassung der Rohdichte, des E-Moduls und der Querdruckfestigkeit gemäß EN 384 [48]. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 476 \text{ kg/m}^3$ (COV = 1,06 %) und der charakteristische Kennwert nach EN 384 [48] mit $\rho_k = 463 \text{ kg/m}^3$ ermittelt.

Die mittlere Querdruckfestigkeit am Bruttoquerschnitt wurde mit $f_{c,90,mean} = 0,534 \text{ N/mm}^2$, verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 8,20 % ermittelt. Die charakteristische Querdruckfestigkeit wurde nach EN 14358 [49] berechnet und ergibt $f_{c,90,k} = 0,432 \text{ N/mm}^2$.

Bezieht man die Druckspannung auf den Nettoquerschnitt errechnet sich die mittlere Querdruckfestigkeit mit $f_{c,90,mean} = 2,19 \text{ N/mm}^2$ (COV = 18,3 %) und die charakteristische Querdruckfestigkeit mit $f_{c,90,k} = 1,37 \text{ N/mm}^2$.

In Tabelle 5-18 sind die Ergebnisse der Querdruckprüfungen der Prüferie QD-HL112-BSP sowie die zugehörigen Holzfeuchte- und Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-18: Prüfergebnisse der Prüferie QD-HL112-BSP (gesperrter Aufbau)

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{c,90,Brutto}$ [N/mm ²]	$f_{c,90,Brutto}$ [N/mm ²]	$f_{c,90,Netto}$ [N/mm ²]
Anzahl	5	5	5	5	5
Min	12,3	467	18,4	0,463	1,75
Max	13,0	481	22,6	0,578	2,68
Mittelwert	12,7	476	20,5	0,534	2,19
Stabw.	0,324	5,03	1,91	0,044	0,402
COV	2,55%	1,06%	9,36%	8,20%	18,3%
k_s				2,46	2,46
char. Wert lt. EN 14358		467¹⁾		0,432	1,37

Anmerkung:

¹⁾ 5 %-Quantil der Normalverteilung

Die detaillierten Ergebnisse der Biegeprüfungen nach EN 408 [41] befinden sich im Anhang C, die Versuchsdiagramme im Anhang D und die Bruchbilder im Anhang E.

5-2.4 KRIECHEN

5-2.4.1 Allgemeines

Die Durchführung der Kriechversuche erfolgte in einer Klimakammer unter konstanten Klimabedingung ($T = 20\text{ °C}$ und $\varphi = 65\%$), welches der Nutzungsklasse NK1 lt. EN 1995-1-1 [13] entspricht. Der Verlauf der Klimadaten über die gesamte Prüfdauer ist in Abbildung 5-1 ersichtlich.

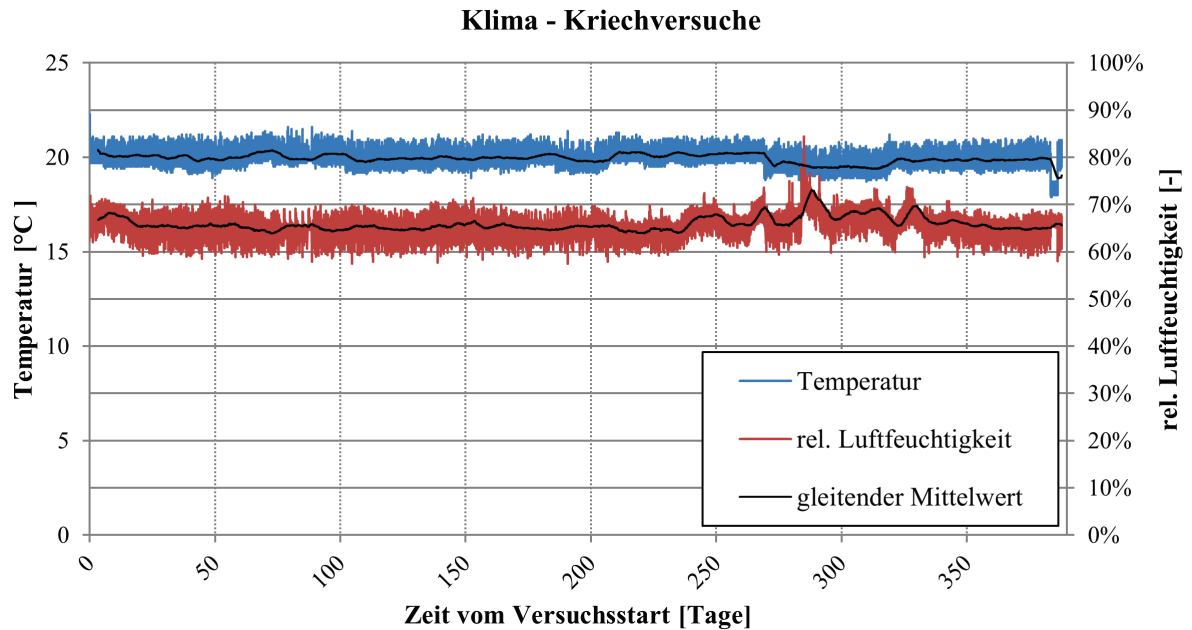


Abbildung 5-1: Temperatur- und Luftfeuchteverlauf

Tabelle 5-19: Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit Klimakammer

	Temperatur [°C]	rel. Luftfeuchtigkeit [-]
Min	18,9	57,5%
Max	22,3	71,9%
Mittelwert	20,0	65,3%
Stabw.	0,433	2,24%
COV	2,16%	3,43%

5-2.4.2 Prüfserie K-5s-HL86-VH

Die Belastung der Prüfkörper erfolgte am 10. Oktober 2014 und sie wurden am 2. November 2016 wieder entlastet. Damit betrug die Prüfdauer der Kriechversuche 388 Tage.

Die Prüfkörper wurden vor Prüfbeginn rund zwei Monate lang bei Normklima gelagert. Der mittlere Feuchtegehalt der Prüfserie K-5s-HL86-VH betrug zu Beginn des Langzeitversuches im Mittel rund $u = 12,5\%$. Das Klima, sowie die Holzfeuchte, konnte über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten werden.

Die ermittelten k_c -Werte der Prüfserie K-5s-HL86-VH sind in Abbildung 5-2 dargestellt.

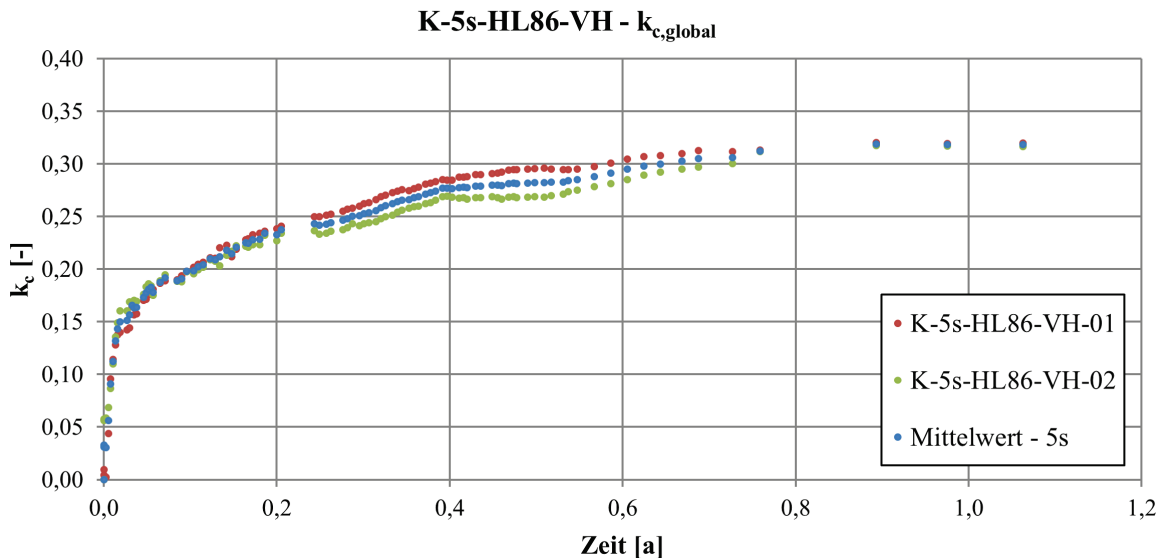


Abbildung 5-2 k_c -Werte der Serie K-5s-HL86-VH

Für die Berechnung der Kriechzahl zum Zeitpunkt $t=50$ Jahre wurden verschiedene Modelle herangezogen (siehe Abschnitt 4-6.9). Für die gemittelten k_c -Werte der einzelnen Prüfungen wurde ein Vorhersagemodell erstellt. Die ermittelten Parameter sind in Tabelle 5-20 angeführt. Die Auswertung erfolgte mit dem Programmpaket Mathematica [45].

Tabelle 5-20: Modellparameter K-5s-HL86-VH

Modell 1:

$$k_c = \beta_1 \cdot [1 - e^{-\beta_2 \cdot T}] + \beta_3 \cdot T^{\beta_4}$$

	β_1	β_2	β_3	β_4
K-5s-HL86-VH-1	$9,360 \cdot 10^{-2}$	$6,797 \cdot 10^{-3}$	$1,225 \cdot 10^{-2}$	$3,310 \cdot 10^{-1}$
K-5s-HL86-VH-2	$5,439 \cdot 10^{-2}$	$1,088 \cdot 10^{-2}$	$2,700 \cdot 10^{-2}$	$2,502 \cdot 10^{-1}$
K-5s-HL86-VH-Mean	$8,034 \cdot 10^{-2}$	$9,595 \cdot 10^{-3}$	$1,571 \cdot 10^{-2}$	$3,047 \cdot 10^{-1}$

Modell 2:

$$k_c = \beta_1 \cdot T^{\beta_2}$$

	β_1	β_2
K-5s-HL86-VH-1	$3,917 \cdot 10^{-2}$	$2,398 \cdot 10^{-1}$
K-5s-HL86-VH-2	$4,886 \cdot 10^{-2}$	$2,063 \cdot 10^{-1}$
K-5s-HL86-VH-Mean	$4,328 \cdot 10^{-2}$	$2,246 \cdot 10^{-1}$

Die, anhand der Modelle, ermittelten k_{det} -Beiwerte sind in Tabelle 5-21 aufgelistet. Aufgrund der Tatsache, dass anhand von Daten, aus rund einem Jahr Beobachtungszeit, das Verformungsverhalten nach 50 Jahre prognostiziert wird, wurden zusätzlich Konfidenzbereiche für die Modelle berechnet. Sie beschreiben die Vorhersagegenauigkeit des jeweiligen Modells anhand der vorliegenden Daten, jedoch nicht ob das Verformungsverhalten des Holzes tatsächlich durch sie beschrieben werden kann.

Tabelle 5-21: Ergebnisse - $k_{C,50Y,NK1}$ -Werte nach Modellen aufgeschlüsselt

Modell 1	$k_{C,50Y,NK1}$	Konfidenzbereich 50%			Konfidenzbereich 95%		
		von	bis	Delta/(2*k _c) ¹⁾	von	bis	Delta/(2*k _c) ¹⁾
K-5s-HL86-VH-01	0,942	0,900	0,98	4,47%	0,818	1,07	13,1%
K-5s-HL86-VH-02	0,754	0,738	0,770	2,18%	0,706	0,802	6,39%
Mittelwert	0,848	0,819	0,877	3,45%	0,762	0,934	10,1%
K-5s-HL86-VH-Mean	0,883	0,853	0,912	3,36%	0,796	0,969	9,79%

Modell 2	$k_{C,50Y,NK1}$	Konfidenzbereich 50%			Konfidenzbereich 95%		
		von	bis	Delta/(2*k _c) ¹⁾	von	bis	Delta/(2*k _c) ¹⁾
K-5s-HL86-VH-01	0,861	0,842	0,880	2,21%	0,805	0,917	6,49%
K-5s-HL86-VH-02	0,713	0,703	0,723	1,37%	0,684	0,742	4,01%
Mittelwert	0,787	0,773	0,801	1,83%	0,745	0,829	5,37%
K-5s-HL86-VH-Mean	0,792	0,780	0,804	1,52%	0,757	0,827	4,43%

Anmerkung:

¹⁾ Wert zur Beurteilung der Vorhersagemodellgenauigkeit bei entsprechenden Konfidenzintervalls (mit Delta = (oberer Grenzwert) – (unterer Grenzwert))

5-2.4.3 Prüfserie K-3s-HL86

Die Belastung der Prüfkörper erfolgte am 10. Oktober 2014 und sie wurden am 2. November 2016 wieder entlastet. Damit betrug die Prüfdauer der Kriechversuche 388 Tage.

Die Prüfkörper wurden vor Prüfbeginn rund zwei Monate lang bei Normklima gelagert. Der mittlere Feuchtegehalt der Prüfserie K-3s-HL86 betrug zu Beginn des Langzeitversuches im Mittel rund $u = 12,7\%$. Das Klima, sowie die Holzfeuchte, konnte über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten werden.

Die ermittelten k_c -Werte der Prüfserie K-3s-HL86-VH sind in Abbildung 5-3 dargestellt.

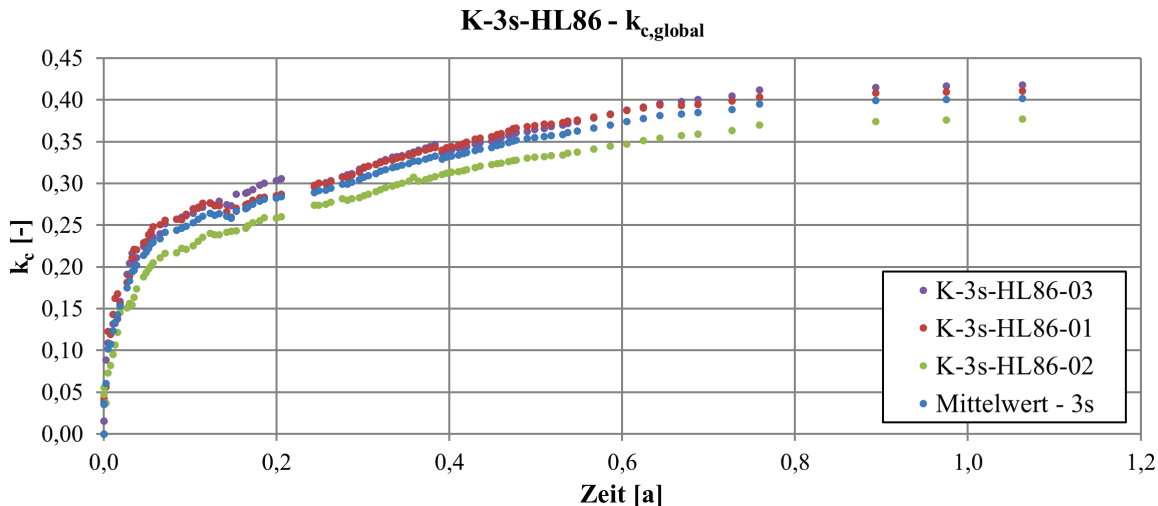


Abbildung 5-3: k_c -Werte der Serie K-3s-HL86

Für die Berechnung der Kriechzahl zum Zeitpunkt $t=50$ Jahre wurden verschiedene Modelle herangezogen (siehe Abschnitt 4-6.9). Für die gemittelten k_c -Werte der einzelnen Prüfungen wurde ein Vorhersagemodell erstellt. Die ermittelten Parameter sind in Tabelle 5-22 angeführt. Die Auswertung erfolgte mit dem Programmpaket Mathematica [45].

Tabelle 5-22: Modellparameter K-3s-HL86

Modell 1:

$$k_c = \beta_1 \cdot \left[1 - e^{-\beta_2 \cdot T} \right] + \beta_3 \cdot T^{\beta_4}$$

	β_1	β_2	β_3	β_4
K-3s-HL86-1	$8,792 \cdot 10^{-2}$	$9,469 \cdot 10^{-3}$	$2,435 \cdot 10^{-2}$	$2,883 \cdot 10^{-1}$
K-3s-HL86-2	$7,076 \cdot 10^{-2}$	$4,614 \cdot 10^{-3}$	$2,006 \cdot 10^{-2}$	$3,039 \cdot 10^{-1}$
K-3s-HL86-3	$1,013 \cdot 10^{-1}$	$7,546 \cdot 10^{-3}$	$2,033 \cdot 10^{-2}$	$3,045 \cdot 10^{-1}$
K-3s-HL86-Mean	$8,308 \cdot 10^{-2}$	$7,032 \cdot 10^{-3}$	$2,233 \cdot 10^{-2}$	$2,961 \cdot 10^{-1}$

Modell 2:

$$k_c = \beta_1 \cdot T^{\beta_2}$$

	β_1	β_2
K-3s-HL86-1	$5,563 \cdot 10^{-2}$	$2,237 \cdot 10^{-1}$
K-3s-HL86-2	$3,862 \cdot 10^{-2}$	$2,555 \cdot 10^{-1}$
K-3s-HL86-3	$5,305 \cdot 10^{-2}$	$2,300 \cdot 10^{-1}$
K-3s-HL86-Mean	$4,855 \cdot 10^{-2}$	$2,365 \cdot 10^{-1}$

Die, anhand der Modelle, ermittelten k_{def} -Beiwerte sind in Tabelle 5-23 aufgelistet. Aufgrund der Tatsache, dass anhand von Daten, aus rund einem Jahr Beobachtungszeit, das Verformungsverhalten nach 50 Jahre prognostiziert wird, wurden zusätzlich Konfidenzbereiche für die Modelle berechnet. Sie beschreiben die Vorhersagegenauigkeit der einzelnen Modelle anhand der vorliegenden Daten, jedoch nicht ob das Verformungsverhalten des Holzes tatsächlich durch sie beschrieben werden kann.

Tabelle 5-23: Ergebnisse - $k_{C,50Y,NKI}$ -Werte nach Modellen aufgeschlüsselt

Modell 1		Konfidenzbereich 50%			Konfidenzbereich 95%		
	$k_{C,50Y,NKI}$	von	bis	Delta/(2*k _c) ¹⁾	von	bis	Delta/(2*k _c) ¹⁾
K-3s-HL86-01	1,10	1,07	1,13	2,61%	1,01	1,18	7,67%
K-3s-HL86-02	1,09	1,07	1,11	2,11%	1,02	1,16	6,20%
K-3s-HL86-03	1,15	1,12	1,18	2,36%	1,07	1,23	6,91%
Mittelwert	1,11	1,09	1,14	2,36%	1,03	1,19	6,93%
K-3s-HL86-Mean	1,11	1,08	1,15	3,14%	1,01	1,22	9,15%

Modell 2		Konfidenzbereich 50%			Konfidenzbereich 95%		
	$k_{C,50Y,NKI}$	von	bis	Delta/(2*k _c) ¹⁾	von	bis	Delta/(2*k _c) ¹⁾
K-3s-HL86-01	1,01	0,992	1,02	1,49%	0,962	1,05	4,37%
K-3s-HL86-02	1,05	1,04	1,07	1,46%	1,01	1,10	4,29%
K-3s-HL86-03	1,04	1,03	1,06	1,50%	0,998	1,09	4,41%
Mittelwert	1,03	1,02	1,05	1,49%	0,989	1,08	4,36%
K-3s-HL86-Mean	1,04	1,02	1,06	1,51%	0,994	1,09	4,41%

Anmerkung:

¹⁾ Wert zur Beurteilung der Modellgenauigkeit bei entsprechenden Konfidenzintervall (mit Delta = (oberer Grenzwert) – (unterer Grenzwert))

5-3 PRÜFUNGEN AN VERBINDUNGSMITTELN

5-3.1 SCHRAUBEN

5-3.1.1 Prüfserie SA-1-V-60 (Steg, Eindringtiefe 60 mm)

Die Prüfung erfolgte am 28. August 2013. Die in der EN 1382 geforderte Prüfzeit von 90 ± 30 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Probekörper betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 9,17\%$ (COV = 0,749 %). Es erfolgte eine Rohdichtekorrektur nach [50] auf eine charakteristische Rohdichte $\rho_k = 440$ kg/m³. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 519$ kg/m³ (COV = 6,59 %) ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei allen Prüfkörpern ein Ausziehen der Schraube festgestellt.

Der mittlere Schraubenausziehfestigkeit wurde mit $f_{ax,mean} = 16,0$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 14,0 % ermittelt. Aufgrund der geringen Prüfkörperanzahl kann nur ein Schätzwert für die charakteristische Ausziehfestigkeit mit $f_{ax,k} = 11,4$ N/mm² angegeben werden.

In Tabelle 5-24 sind die Ergebnisse der Schraubenausziehprüfungen der Probe SA-1-V-60 sowie die zugehörigen Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-24: Prüfergebnisse der Prüfserie SA-1-V-60 (Steg, Ø 8 mm | Eindringtiefe 60 mm)

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	l_{eff} [mm]	f_{ax} [N/mm ²]	$f_{ax,ref}$ [N/mm ²]
Anzahl	5	5	5	5	5
Min	9,07	486	50,6	17,6	13,4
Max	9,26	568	50,6	24,2	19,6
Mittelwert	9,17	519	50,6	19,2	16,0
Stabw.	0,069	34,2	0	2,81	2,24
COV	0,749%	6,59%	0%	14,6%	14,0%
k_s					2,46
Schätzwert $\tilde{f}_{ax,k}$					11,4

5-3.1.2 Prüfserie SA-1-H-60 (Hohlraum, Eindringtiefe 60 mm)

Die Prüfung erfolgte am 28. August 2013. Die in der EN 1382 geforderte Prüfzeit von 90 ± 30 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Probekörper betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 9,16\%$ (COV = 0,895 %). Es erfolgte eine Rohdichtekorrektur nach [50] auf eine charakteristische Rohdichte $\rho_k = 440$ kg/m³. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 466$ kg/m³ (COV = 2,03 %) ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei allen Prüfkörpern ein Ausziehen der Schraube festgestellt.

Der mittlere Schraubenausziehfestigkeit wurde mit $f_{ax,mean} = 15,9$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 6,53 % ermittelt. Aufgrund der geringen Prüfkörperanzahl kann nur ein Schätzwert für die charakteristische Ausziehfestigkeit mit $f_{ax,k} = 14,7$ N/mm² angegeben werden.

In Tabelle 5-25 sind die Ergebnisse der Schraubenausziehprüfungen der Probe SA-1-H-60 sowie die zugehörigen Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-25: Prüfergebnisse der Prüferserie SA-1-H-60 (Hohlraum, Ø 8 mm | Eindringtiefe 60 mm)

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	l_{eff} [mm]	f_{ax} [N/mm ²]	$f_{\text{ax,ref}}$ [N/mm ²]
Anzahl	5	5	5	5	5
Min	9,06	459	37,9	16,1	15,0
Max	9,29	481	39,3	18,5	17,7
Mittelwert	9,16	466	38,5	16,9	15,9
Stabw.	0,082	9,43	0,571	0,951	1,04
COV	0,895%	2,03%	1,48%	5,63%	6,53%
k_s					2,46
Schätzwert $\tilde{f}_{\text{ax,k}}$					14,7

5-3.1.3 Prüferserie SA-1-V-115 (Steg, Eindringtiefe 115 mm)

Die Prüfung erfolgte am 28. August 2013. Die in der EN 1382 geforderte Prüfzeit von 90 ± 30 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Probekörper betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 9,03$ % (COV = 1,49 %). Es erfolgte eine Rohdichtekorrektur nach [50] auf eine charakteristische Rohdichte $\rho_k = 440$ kg/m³. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{\text{mean}} = 516$ kg/m³ (COV = 3,11 %) ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei allen Prüfkörpern ein Ausziehen der Schraube festgestellt.

Der mittlere Schraubenausziehfestigkeit wurde mit $f_{\text{ax,mean}} = 18,6$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 13,1 % ermittelt. Aufgrund der geringen Prüfkörperanzahl kann nur ein Schätzwert für die charakteristische Ausziehfestigkeit mit $f_{\text{ax,k}} = 13,6$ N/mm² angegeben werden.

In Tabelle 5-26 sind die Ergebnisse der Schraubenausziehprüfungen der Probe SA-1-V-115 sowie die zugehörigen Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-26: Prüfergebnisse der Prüferserie SA-1-V-115 (Steg, Ø 8 mm | Eindringtiefe 115 mm)

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	l_{eff} [mm]	f_{ax} [N/mm ²]	$f_{\text{ax,ref}}$ [N/mm ²]
Anzahl	5	5	5	5	5
Min	8,90	491	115	20,2	16,4
Max	9,20	532	115	25,5	22,6
Mittelwert	9,03	516	115	22,1	18,6
Stabw.	0,135	16,0	0,171	2,07	2,44
COV	1,49%	3,11%	0,148%	9,39%	13,1%
k_s					2,46
Schätzwert $\tilde{f}_{\text{ax,k}}$					13,6

5-3.1.4 Prüferie SA-1-H-115 (Hohlraum, Eindringtiefe 115 mm)

Die Prüfung erfolgte am 28. August 2013. Die in der EN 1382 geforderte Prüfzeit von 90 ± 30 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Probekörper betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 10,3$ % (COV = 1,68 %). Es erfolgte eine Rohdichtekorrektur nach [50] auf eine charakteristische Rohdichte $\rho_k = 440$ kg/m³. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 470$ kg/m³ (COV = 4,49 %) ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei allen Prüfkörpern ein Ausziehen der Schraube festgestellt.

Der mittlere Schraubenausziehfestigkeit wurde mit $f_{ax,mean} = 16,0$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 5,24 % ermittelt. Aufgrund der geringen Prüfkörperanzahl kann nur ein Schätzwert für die charakteristische Ausziehfestigkeit mit $f_{ax,k} = 14,1$ N/mm² angegeben werden.

In Tabelle 5-27 sind die Ergebnisse der Schraubenausziehprüfungen der Probe SA-1-H-115 sowie die zugehörigen Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-27: Prüfergebnisse der Prüferie SA-1-H-115 (Hohlraum, Ø 8 mm | Eindringtiefe 115 mm)

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	l_{eff} [mm]	f_{ax} [N/mm ²]	$f_{ax,ref}$ [N/mm ²]
Anzahl	5	5	5	5	5
Min	8,89	442	78,6	16,0	15,3
Max	9,29	496	80,1	18,0	17,4
Mittelwert	9,03	470	79,4	17,1	16,0
Stabw.	0,152	21,1	0,679	0,848	0,836
COV	1,68%	4,49%	0,856%	4,95%	5,24%
k_s					2,46
Schätzwert $\tilde{f}_{ax,k}$					14,1

5-3.1.5 Prüferie SA-2-V-60 (Steg, Eindringtiefe 60 mm)

Die Prüfung erfolgte am 28. August 2013. Die in der EN 1382 geforderte Prüfzeit von 90 ± 30 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Probekörper betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 10,2$ % (COV = 0,635 %). Es erfolgte eine Rohdichtekorrektur nach [50] auf eine charakteristische Rohdichte $\rho_k = 440$ kg/m³. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 470$ kg/m³ (COV = 9,48 %) ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei allen Prüfkörpern ein Ausziehen der Schraube festgestellt. Ein Prüfkörper wurde aus der Auswertung aufgrund eines Astes im Schraubenkanal ausgeschlossen.

Der mittlere Schraubenausziehfestigkeit wurde mit $f_{ax,mean} = 20,9$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 10,7 % ermittelt. Aufgrund der geringen Prüfkörperanzahl kann nur ein Schätzwert für die charakteristische Ausziehfestigkeit mit $f_{ax,k} = 15,7$ N/mm² angegeben werden.

In Tabelle 5-28 sind die Ergebnisse der Schraubenausziehprüfungen der Probe SA-2-V-60 sowie die zugehörigen Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-28: Prüfergebnisse der Prüferserie SA-2-V-60 (Steg, Ø 8 mm | Eindringtiefe 60 mm)

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	l_{eff} [mm]	f_{ax} [N/mm ²]	$f_{\text{ax,ref}}$ [N/mm ²]
Anzahl	4	4	4	4	4
Min	10,1	427	50,6	19,8	18,9
Max	10,2	536	50,6	24,7	23,6
Mittelwert	10,2	470	50,6	22,4	20,9
Stabw.	0,065	46,3	0	2,28	2,24
COV	0,635%	9,84%	0%	10,2%	10,7%
k_s					2,68
Schätzwert $\tilde{f}_{\text{ax,k}}$					15,7

5-3.1.6 Prüferserie SA-2-H-60 (Hohlraum, Eindringtiefe 60 mm)

Die Prüfung erfolgte am 28. August 2013. Die in der EN 1382 geforderte Prüfzeit von 90 ± 30 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Probekörper betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 10,2\%$ (COV = 2,29 %). Es erfolgte eine Rohdichtekorrektur nach [50] auf eine charakteristische Rohdichte $\rho_k = 440$ kg/m³. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{\text{mean}} = 471$ kg/m³ (COV = 4,39 %) ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei allen Prüfkörpern ein Ausziehen der Schraube festgestellt.

Der mittlere Schraubenausziehfestigkeit wurde mit $f_{\text{ax,mean}} = 19,4$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 9,93 % ermittelt. Aufgrund der geringen Prüfkörperanzahl kann nur ein Schätzwert für die charakteristische Ausziehfestigkeit mit $f_{\text{ax,k}} = 15,0$ N/mm² angegeben werden.

In Tabelle 5-29 sind die Ergebnisse der Schraubenausziehprüfungen der Probe SA-2-H-60 sowie die zugehörigen Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-29: Prüfergebnisse der Prüferserie SA-2-H-60 (Hohlraum, Ø 8 mm | Eindringtiefe 60 mm)

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	l_{eff} [mm]	f_{ax} [N/mm ²]	$f_{\text{ax,ref}}$ [N/mm ²]
Anzahl	5	5	5	5	5
Min	9,85	448	37,9	17,0	16,6
Max	10,5	499	37,9	24,8	21,6
Mittelwert	10,2	471	37,9	21,0	19,4
Stabw.	0,232	20,7	0	3,06	1,92
COV	2,29%	4,39%	0%	14,6%	9,93%
k_s					2,46
Schätzwert $\tilde{f}_{\text{ax,k}}$					15,0

5-3.1.7 Prüfsreihe SA-2-V-115 (Steg, Eindringtiefe 115 mm)

Die Prüfung erfolgte am 28. August 2013. Die in der EN 1382 geforderte Prüfzeit von 90 ± 30 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Probekörper betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 9,74$ % (COV = 0,893 %). Es erfolgte eine Rohdichtekorrektur nach [50] auf eine charakteristische Rohdichte $\rho_k = 440$ kg/m³. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 498$ kg/m³ (COV = 3,40 %) ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei allen Prüfkörpern ein Ausziehen der Schraube festgestellt.

Der mittlere Schraubenausziehfestigkeit wurde mit $f_{ax,mean} = 19,6$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 5,98 % ermittelt. Aufgrund der geringen Prüfkörperanzahl kann nur ein Schätzwert für die charakteristische Ausziehfestigkeit mit $f_{ax,k} = 15,7$ N/mm² angegeben werden.

In Tabelle 5-30 sind die Ergebnisse der Schraubenausziehprüfungen der Probe SA-2-V-115 sowie die zugehörigen Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-30: Prüfergebnisse der Prüfsreihe SA-2-V-115 (Steg, Ø 8 mm | Eindringtiefe 115 mm)

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	l_{eff} [mm]	f_{ax} [N/mm ²]	$f_{ax,ref}$ [N/mm ²]
Anzahl	5	5	5	5	5
Min	9,66	486	114	21,5	17,8
Max	9,88	524	115	23,1	20,7
Mittelwert	9,74	498	114	22,4	19,6
Stabw.	0,087	16,9	0,203	0,662	1,17
COV	0,893%	3,40%	0,178%	2,95%	5,98%
k_s					2,46
Schätzwert $\tilde{f}_{ax,k}$					15,7

5-3.1.8 Prüfsreihe SA-2-H-115 (Hohlraum, Eindringtiefe 115 mm)

Die Prüfung erfolgte am 28. August 2013. Die in der EN 1382 geforderte Prüfzeit von 90 ± 30 s wurde bei allen Prüfungen eingehalten.

Der mittlere Feuchtegehalt der Probekörper betrug zum Zeitpunkt der Prüfung $u = 9,55$ % (COV = 2,73 %). Es erfolgte eine Rohdichtekorrektur nach [50] auf eine charakteristische Rohdichte $\rho_k = 440$ kg/m³. Die mittlere Rohdichte wurde mit $\rho_{mean} = 460$ kg/m³ (COV = 8,96 %) ermittelt.

Als Bruchursache wurde bei allen Prüfkörpern ein Ausziehen der Schraube festgestellt.

Der mittlere Schraubenausziehfestigkeit wurde mit $f_{ax,mean} = 18,4$ N/mm², verbunden mit einem Variationskoeffizienten von COV = 6,28 % ermittelt. Aufgrund der geringen Prüfkörperanzahl kann nur ein Schätzwert für die charakteristische Ausziehfestigkeit mit $f_{ax,k} = 15,7$ N/mm² angegeben werden.

In Tabelle 5-31 sind die Ergebnisse der Schraubenausziehprüfungen der Probe SA-2-H-115 sowie die zugehörigen Rohdichtekennwerte ersichtlich.

Tabelle 5-31: Prüfergebnisse der Prüferserie SA-2-H-115 (Hohlraum, Ø 8 mm | Eindringtiefe 115 mm)

	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	l_{eff} [mm]	f_{ax} [N/mm ²]	$f_{\text{ax,ref}}$ [N/mm ²]
Anzahl	5	5	5	5	5
Min	9,19	410	89,8	16,8	17,5
Max	9,84	509	90,4	22,9	20,3
Mittelwert	9,55	460	90,1	19,3	18,4
Stabw.	0,261	41,2	0,282	2,41	1,15
COV	2,73%	8,96%	0,313%	12,5%	6,28%
k_s					2,46
Schätzwert $\tilde{f}_{\text{ax,k}}$					15,7

KAPITEL 6: INTERPRETATION DER PRÜFERGEBNISSE

6-1 GRUNDPRODUKT HOHLLAMELLE

6-1.1 ZUSAMMENFASSUNG DER PRÜFERGEBNISSE

In der Tabelle 6-1 und der Tabelle 6-2 sind die Ergebnisse der Prüfungen des Grundprodukt Hohllamelle angeführt. Sämtliche mechanische Eigenschaften sind auf den Nettoquerschnitt bezogen und spiegeln somit das Potential des Grundprodukts wieder.

Tabelle 6-1: Zusammenfassung der Prüfergebnisse HL86

	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	E_m [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,KZ}$ [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$f_{m,KZ}$ [N/mm ²]	f_v [N/mm ²]
Anzahl	150	39	20	39	39	7	20	21
Min	429	11.666	9.457	22,5	19,5	51,7	34,2	4,88
Max	521	16.877	15.571	46,3	34,2	63,4	54,8	7,66
Mittelwert	477	13.880	12.987	33,2	27,2	58,2	45,5	5,87
Stabw.	21,0	1.251	1.529	6,28	4,17	4,16	5,14	0,759
COV	4,40%	9,01%	11,8%	18,9%	15,3%	7,16%	11,3%	12,9%
char. Wert	442¹⁾			22,9	20,1	49,3	36,0	4,57

Anmerkung:

Die angegebenen Werte beziehen sich auf den Nettoquerschnitt

¹⁾ 5 % - Quantil (Normalverteilung)

Tabelle 6-2: Zusammenfassung der Prüfergebnisse HL112

	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	E_m [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,KZ}$ [N/mm ²]	$f_m^{1)}$ [N/mm ²]	$f_{m,KZ}$ [N/mm ²]	f_v [N/mm ²]
Anzahl	85	20	19	20	18	20	10	20
Min	429	11.102	10.463	22,1	24,6	32,1	29,7	4,67
Max	536	16.361	16.698	49,2	37,7	57,3	50,3	7,05
Mittelwert	480	14.052	13.317	34,2	30,3	42,3	40,2	5,69
Stabw.	20,8	1.701	1.764	8,16	3,75	6,01	5,11	0,620
COV	4,34%	12,1%	13,2%	23,9%	12,4%	14,2%	12,7%	10,9%
char. Wert	450²⁾			20,7	23,7	32,0	30,3	4,60

Anmerkung:

Die angegebenen Werte beziehen sich auf den Nettoquerschnitt

¹⁾ Mindestwert, reale Festigkeit kann höher liegen

²⁾ 5 % - Quantil (Normalverteilung)

Die Ergebnisse der beiden Prototypen Serien HL86 und HL112 wurden miteinander verglichen und statistisch geprüft, ob jene aus demselben Grundmaterial kommen.

Tabelle 6-3: Ergebnis Stichprobenvergleich Prototypenserien HL86 und HL112

	ρ_{12}	$E_{t,0}$	E_m	f_t	$f_{t,KZ}$	f_m	$f_{m,KZ}$	f_v
p-Value F-Test (Varianz)	0,60	0,11	0,54	0,17	0,65	- ¹⁾	0,96	0,33
$s_1 = s_2$	ja	ja	ja	ja	ja	- ¹⁾	ja	ja
p-Value t-Test (Mittelwert)	0,15	0,66	0,54	0,61	0,01	- ¹⁾	0,01	0,41
$\bar{x}_1 = \bar{x}_2$	ja	ja	ja	ja	nein	- ¹⁾	nein	ja

Anmerkung:

Ablehnung der Nullhypothese bei p-Value <0,05

¹⁾ kein Vergleich möglich, da bei der Serie B-HL112-FK kein Biegeversagen auftrat (siehe Prüfergebnisse HL112)

In der Tabelle 6-3 sind die Ergebnisse des Stichprobenvergleichs angeführt. Das Signifikanzniveau der Test betrug dabei 5 %. Es wurde sowohl die Streuung (Fisher-Test) als auch der Mittelwert (t-Test) beurteilt. Die Nullhypothese, dass die Prototypen demselben Grundmaterial entspringen, muss lediglich bei den Festigkeiten der Keilzinkenverbindung verworfen werden. In weiterer Folge wurde eine gemeinsame statistische Auswertung der mechanischen Eigenschaften beiden Prototypenserien durchgeführt. Die Ergebnisse der gesamtheitlichen Auswertung sind in Tabelle 6-3 aufgelistet.

Tabelle 6-4: mechanische Eigenschaften des Grundmaterials (Prüfserien HL86 & HL112)

	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	E_m [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	f_v [N/mm ²]
Anzahl	235	59	39	59	7	40
Min	429	11.102	9.456	22,1	51,7	4,67
Max	536	16.876	16.698	49,2	63,4	7,66
Mittelwert	480	13.938	13.147	33,6	58,2	5,79
Stabw.	20,8	1.407	1.634	6,92	4,16	0,700
COV	4,34%	10,9%	12,4%	20,6%	7,16%	12,1%
char. Wert	445¹⁾			22,6	49,3	4,63
Zuteilung²⁾	C45	C40	C35	C35	C45	-

Anmerkung:

Die angegebenen Werte beziehen sich auf den Nettoquerschnitt

¹⁾ 5 % - Quantil (Normalverteilung)

²⁾ theoretische Zuteilung in EN 338

Für eine gedankliche Zuteilung in eine Festigkeitsklasse laut EN 338 [7] müssen die charakteristischen Werte der Biegefestigkeit und der Rohdichte mindestens der jeweiligen Klasse entsprechen bzw. höher liegen. Der Mittelwert des Elastizitätsmoduls darf maximal um fünf Prozent unterschritten sein. Daraus ergibt sich, dass das Grundprodukt Hohllamelle theoretisch der **Festigkeitsklasse C 35** zugeteilt werden kann. Dieser Vergleich dient lediglich zur Darstellung des Leistungspotentials im Vergleich zu konventionellem Vollholz.

6-1.2 UMLEGUNG AUF BRUTTOQUERSCHNITT

Im folgenden Abschnitt werden die ermittelten mechanischen Eigenschaften der Hohllamelle auf den Bruttoquerschnitt umgerechnet um eine Vergleichbarkeit mit konventionellen Lamellen herstellen zu können. Die Umrechnung erfolgte nach den verwendeten Gleichungen in *Kapitel 3*.

Tabelle 6-5: mechanische Eigenschaften des Grundproduktes bezogen auf den Bruttoquerschnitt

Eigenschaft		Nettoquerschnitt ¹⁾	HL86 ²⁾	HL112 ²⁾
Zug	Zugfestigkeit [N/mm ²]	22,6	19,0	18,1
	Zug-E-Modul [N/mm ²]	13.938	11.561	11.034
Biegung	Biegefestigkeit [N/mm ²]	47,3	46,4	46,2
	Biege-E-Modul [N/mm ²]	13.147	12.897	12.843
Schub	Schubfestigkeit [N/mm ²]	4,63	2,35	1,82
Materialeinsparung	[%]	-	17,1	20,8
Vergleichbar mit Bretter nach EN 338		-	C27	C24

Anmerkung:

Für die Berechnung der Eigenschaften am Bruttoquerschnitt wurden die Nennmaße der Hollamellenprototypen herangezogen.

¹⁾ mechanische Eigenschaften am Nettoquerschnitt (siehe Tabelle 6-4)

²⁾ mechanische Eigenschaften des Hohllamellentyps am Bruttoquerschnitt (Nominalquerschnitt)

Es zeigt sich, dass die mechanischen Eigenschaften der beiden Hohllamellentypen, selbst wenn diese auf den Bruttoquerschnitt bezogen werden (Vernachlässigung der Hohlräume) mit konventionellen Lamellen der Festigkeitsklasse C24 vergleichbar sind.

Die vorliegenden Tragmodelle für geschichtete Holzwerkstoffe wie Brettschichtholz und Brettsperrholz beruhen in der Regel auf der Zugfestigkeit bzw. dem Zug-E-Modul der einzelnen Lamellen. Demnach wurde hier als ausschlaggebendes Kriterium für die Einteilung der Hohllamellen der Zug-E-Modul bzw. die Zugfestigkeit herangezogen. Der Hohllamellentyp **HL86** besitzt somit dieselbe Dehnsteifigkeit wie ein homogener rechteckiger Querschnitt der **Festigkeitsklasse C27** und jene des Typs **HL112** entsprechen der **Festigkeitsklasse C24**.

Bei der durchgeführten Betrachtung wurde die Schubtragfähigkeit der Hohllamellen nicht berücksichtigt. Hier gilt es anzumerken, dass sich diese durch die Aussparungen (reduzierte Querschnittsbreite) in den Lamellen erheblich reduziert (siehe Vergleichsrechnung in *Kapitel 7*).

6-2 KEILZINKENVERBINDUNG

Für den Aufbau von Produkten hergestellt aus Hohllamellen ist das Fügen von Lamellen in Längsrichtung mittels Keilzinkenverbindung erforderlich. In Tabelle 6-1 bzw. Abbildung 6-1 sind die ermittelten Festigkeiten des Grundproduktes und der Keilzinkenverbindung angeführt.

Tabelle 6-6: Gegenüberstellung Biege- und Zugfestigkeit des Grundproduktes und der Keilzinkenverbindung

	HL 86				HL112			
	f_t [N/mm ²]	$f_{t,KZ}$ [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$f_{m,KZ}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,KZ}$ [N/mm ²]	$f_m^{1)}$ [N/mm ²]	$f_{m,KZ}$ [N/mm ²]
Anzahl	39	39	14	20	20	18	-	10
Min	22,5	19,5	50,2	34,2	22,1	24,6	-	29,7
Max	46,3	34,2	73,8	54,8	49,2	37,7	-	50,3
Mittelwert	33,2	27,2	60,0	45,5	34,2	30,3	-	40,2
Stabw.	6,28	4,17	6,96	5,14	8,16	3,75	-	5,11
COV	18,9%	15,3%	11,6%	11,3%	23,9%	12,4%	-	12,7%
char. Wert	22,9	20,1	47,3	36,0	20,7	23,7	-	30,3

Anmerkung:

Die angegebenen Werte beziehen sich auf den Nettoquerschnitt

¹⁾ Festigkeit nicht ermittelt (siehe Prüfergebnisse HL112)

²⁾ 5 % - Quantil (Normalverteilung)

Beim Vergleich auf Mittelwertniveau (95% Konfidenzbereich) ist zu erkennen, dass zwischen den Biege- und Zugfestigkeiten des Grundproduktes und der Keilzinkenverbindung signifikante Unterschiede auftreten (siehe Abbildung 6-1).

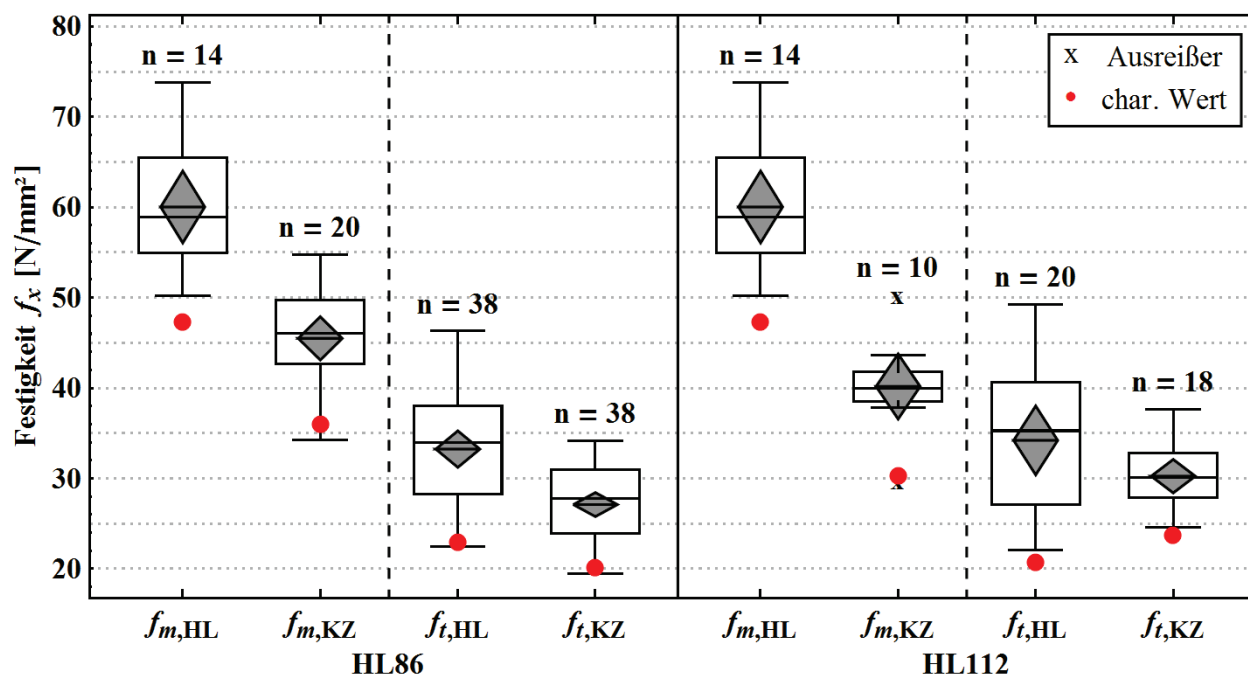


Abbildung 6-1: Boxplot Keilzinkenfestigkeit des Grundproduktes

Die Anforderungen an Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindung für unterschiedliche Holzwerkstoffe wurde bereits im Abschnitt 3-6 behandelt. Für Brettspertholz wurde festgehalten, dass die Keilzinkenverbindung die Bedingung (6.1) oder (6.2) erfüllen muss.

$$f_{t,j,k} \geq 5,0 + f_{t,0,l,k} \quad (6.1)$$

$$f_{m,j,k} \geq 8,0 + 1,4 \cdot f_{t,0,l,k} \quad (6.2)$$

Für die beiden Hohllamellenprototypenserien ergeben sich demnach folgende Grenzwerte:

Tabelle 6-7: erforderliche Biege- und Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung lt. EN 16351 [28]

	HL 86			HL112		
	$f_{t,l,k}$ [N/mm ²]	$f_{m,j,k}$ [N/mm ²]	$f_{t,j,k}$ [N/mm ²]	$f_{t,l,k}$ [N/mm ²]	$f_{m,j,k}$ [N/mm ²]	$f_{t,j,k}$ [N/mm ²]
$f_{x,k,vorh.}$	22,9	36,0	20,1	20,7	30,3	23,7
$f_{x,k,erf.}$	-	40,1	27,9	-	37,0	25,7
Differenz	-	-4,10	-7,10	-	-6,70	-2,00

Anmerkung:

Die angegebenen Werte beziehen sich auf den Nettoquerschnitt

In Abbildung 6-1 und in Tabelle 6-7 ist ersichtlich, dass die Festigkeit der Keilzinkenverbindung unter jener des Grundmaterials bzw. der Anforderung lt. EN16351 [28] liegt. Dies ist auf mehrere Ursachen zurückzuführen, welche nachfolgend erläutert werden:

• **Äste im Bereich Keilzinkenverbindung:**

Die Bereiche in der Nähe der Keilzinkenverbindung sollten frei von festigkeitsmindernden Holzmerkmalen, wie Ästen sein. In den gültigen Produktnormen für Brettschichtholz und Brettspertholz, welche auf eine Keilzinkenverbindung verweisen, müssen Äste einen Mindestabstand von 3·d (d beschreibt dabei den maximaler Astdurchmesser) von der Verbindung aufweisen. Aufgrund der Anzahl der Fügeiteile der Hohllamelle (HL86: 10 Teile, HL112: 7 Teile) ist es produktionstechnisch schwer zu erreichen, dass die Endbereiche der Lamellen frei von Ästen sind. Im Zuge der Prüfungen wurde beobachtet, dass sich in einigen Fällen Äste unmittelbar neben oder sogar in der der Keilzinkenverbindung befanden.

• **Abweichungen in den Abmessungen der Hohllamellen:**

Für die Berechnung der Keilzinkenfestigkeit wurde als Bezugsfläche die kleinere gemessene Querschnittsfläche der beiden Fügeiteile herangezogen. Durch die Abweichungen der Abmessungen der beiden Prototypen (siehe Abschnitt 4-4 Prüfkörper) kam es zu Versätzen in horizontaler Richtung (siehe Abbildung 6-2). Die Lage der Stege zueinander wurde bei der Durchführung der Prüfungen nicht festgehalten.

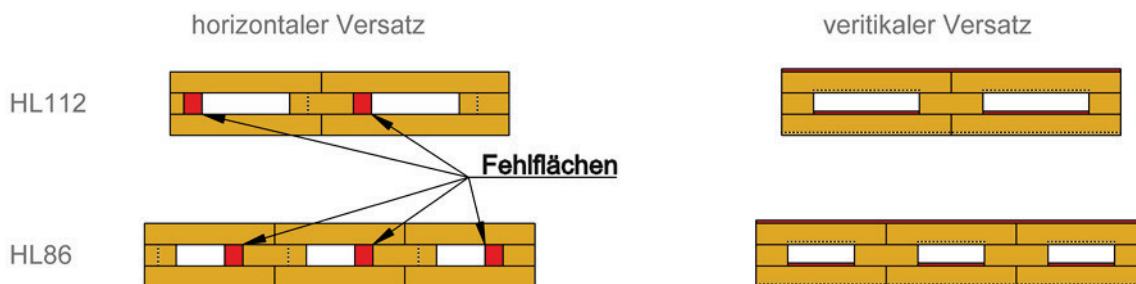


Abbildung 6-2: Fehlfächen in Keilzinke durch Versatz in Stegen

Die vertikalen Abweichungen wurden bei der Prüfung aufgenommen und im Anschluss bei der Auswertung in Abzug gebracht. Die theoretische Flächenreduktion durch den Versatz der Stege berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$\Delta A = \frac{A_{eff}}{A_{nom}} = \frac{(A_{nom} - t_2 \cdot \Delta \cdot (2 \cdot n - 2))}{A_{nom}} \quad (6.3)$$

Dabei sind:

- ΔA Flächenreduktion [%]
- A_{eff} tatsächliche Fläche der Keilzinkenverbindung [mm]
- t_2 Dicke der mittleren Lage [mm]
- Δ Versatz der Stege in horizontaler Richtung [mm]
- n Anzahl der Stege [-]

Tabelle 6-8: theoretische Flächenreduktion nach Gleichung (6.3)

Δ [mm]	ΔA_{HL86} [%]	ΔA_{HL112} [%]
5	95,3	96,2
10	90,7	92,5
15	86,0	88,7

Bei einem mittleren Versatz der Stege von 15 mm ergibt sich demnach eine theoretische Reduktion der keilgezinkten Fläche von 86,0 % beim Hohllamellentyp HL86 und 88,7 % bei HL112 gegenüber der nominellen Querschnittsfläche. In Abbildung 6-3 sind die beiden Stirnseiten, der zwei Fügeteile einer Keilzinkenverbindung beim Typ HL86 abgebildet. Die Abweichungen bezüglich der Lage der Stege sind eindeutig ersichtlich.

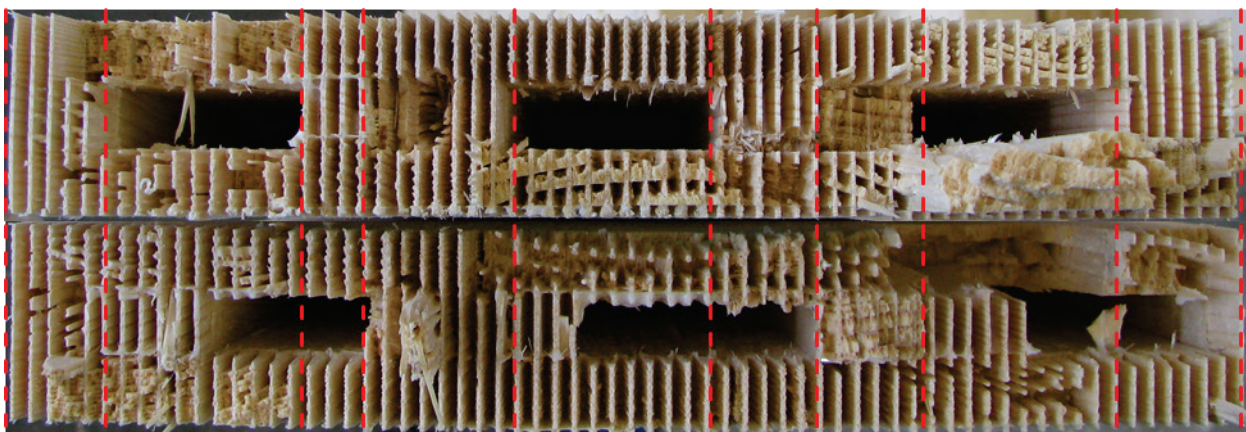


Abbildung 6-3: Stegversatz in Keilzinkenverbindung (HL86)

Unter Berücksichtigung des Einflusses der geometrischen Abweichungen steigt somit die Keilzinkenfestigkeit in Bezug auf den tatsächlichen Nettoquerschnitt. Folglich ist zur Nutzung des vorhandenen Potentials und für den Einsatz von Keilzinkenverbindung als Fügetechnik eine Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit der Hohllamellen erforderlich und zielführend.

6-3 PRODUKTE HERGESTELLT AUS HOHLLAMELLEN

6-3.1 ZUSAMMENFASSUNG DER PRÜFERGEBNISSE

In der Tabelle 6-9 und der Tabelle 6-10 sind die Ergebnisse der Prüfungen der, aus Hohllamellen hergestellten, Aufbauten angeführt. Sämtliche in den Tabellen ausgewiesenen mechanischen Eigenschaften sind auf den Nettoquerschnitt bezogen.

Tabelle 6-9: Zusammenfassung der Prüfergebnisse PB-5s-HL86-VH

	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{m,lokal}$ [N/mm ²]	$E_{m,global}$ [N/mm ²]	f_m Gesamt [N/mm ²]	f_m ohne KZ-Brüche [N/mm ²]	$f_{v,90,90}$ ¹⁾ [N/mm ²]
Anzahl	10	10	10	10	5	8
Min	450	13.226	13.569	25,3	39,2	0,982
Max	471	14.599	15.476	44,0	44,0	1,58
Mittelwert	464	13.943	14.333	35,9	41,7	1,26
Stabw.	5,79	509	584	6,63	2,07	0,175
COV	1,25%	3,65%	4,07%	18,5%	4,96%	13,9%
char. Wert	418²⁾			23,6	36,9	0,921

Anmerkung:

¹⁾ Rollschubfestigkeit der Vollholzquerlage

²⁾ 5 % - Quantil (Normalverteilung)

Tabelle 6-10: Zusammenfassung der Prüfergebnisse PB-3s-HL86

	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{m,lokal}$ [N/mm ²]	$E_{m,global}$ [N/mm ²]	σ_m ¹⁾ [N/mm ²]	$f_{v,90,90}$ ²⁾ [N/mm ²]
Anzahl	15	15	15	15	15
Min	468	11.703	11.833	18,9	0,392
Max	503	14.495	13.990	24,1	0,497
Mittelwert	483	12.992	12.927	22,3	0,465
Stabw.	10,5	816	738	1,36	0,0280
COV	2,17%	6,28%	5,71%	6,09%	6,02%
char. Wert	437³⁾		15	19,7	0,410

Anmerkung:

¹⁾ Die angegebenen Spannungen sind zum Vergleich mit anderen Prüfserien angegeben und besitzen informellen Charakter.

²⁾ Rollschubfestigkeit auf „homogene“ Querlage bezogen (Bruttoquerschnitt)

³⁾ 5 % - Quantil (Normalverteilung)

6-3.2 BIEGEFESTIGKEIT

Bei den Biegeprüfungen der fünfschichtigen Aufbauten befand sich bei der Hälfte der Prüfkörper eine Keilzinkenverbindung im Biegezugbereich. Bei diesen Prüfkörpern trat auch das Versagen im Bereich der Keilzinke auf. Biegebrüche, aufgrund der Keilzinkenverbindung, wurden auch in den anderen Prüfserien beobachtet. Die erzielten Biegefestigkeiten, getrennt nach Bruchursache, sind in Abbildung 6-4 gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass zwischen den Festigkeiten der unterschiedlichen Versagensursachen signifikante Unterschiede auftreten.

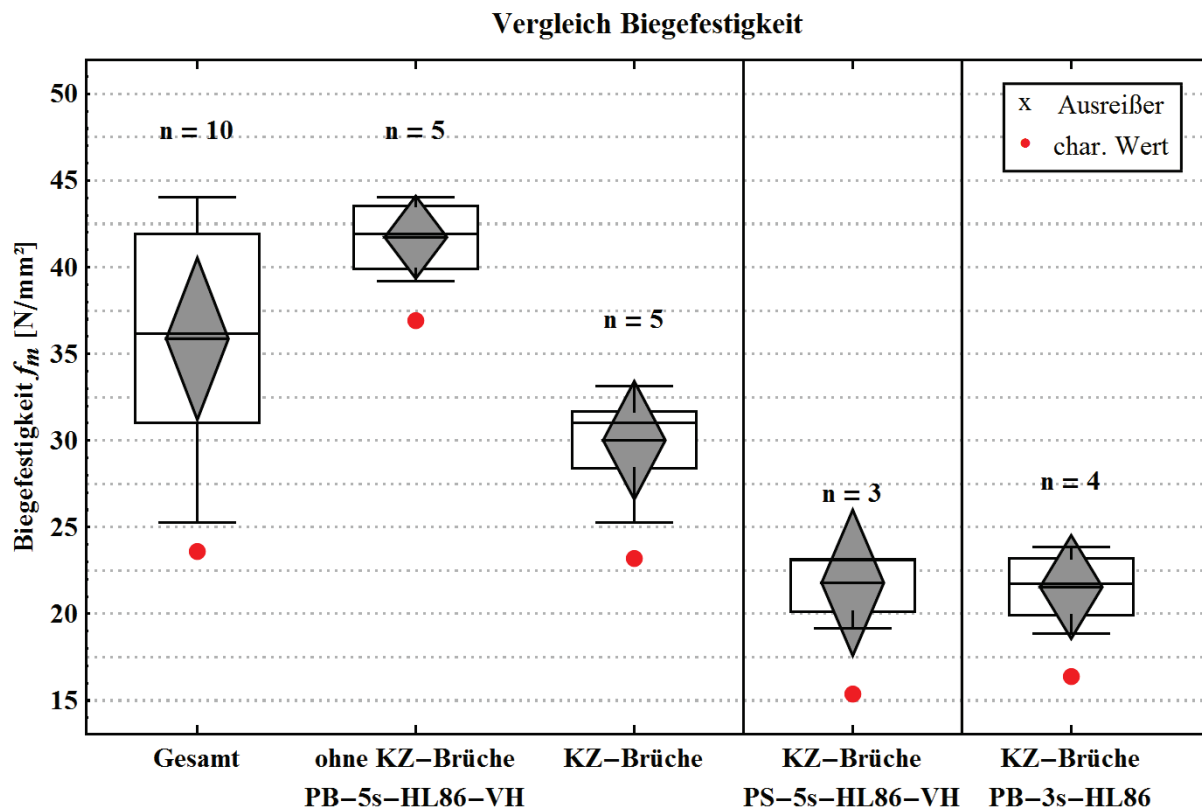


Abbildung 6-4: Boxplot Biegefestigkeit Hohllamelle im gesperrten Aufbau nach Bruchursache aufgeteilt

Die verringerte Tragfähigkeit aufgrund der Keilzinkenverbindung kann anhand der auftretenden Abweichungen der geometrischen Abmessungen (siehe 6-2 Keilzinkenverbindung) erklärt werden. Zusätzlich zu diesem Effekt kommt, dass es anscheinend Probleme bei der Fertigung der Keilzinken auftraten (siehe Abbildung 6-5).



Abbildung 6-5: Bruchbilder Keilzinken im Biegezugbereich
 (links: Ausziehen der Keilzinken, rechts: nicht vollständig gefrägte Keilzinke)

Die Biegefestigkeit von Brettsper Holz errechnet sich nach dem in [5] angegebenen Trägermodell zu:

$$f_{m,clt,k} = m_c \cdot f_{t,0,l,k}^{0,8} \quad (6.4)$$

Dabei sind:

- $f_{m,clt,k}$ charakteristische Biegetragfähigkeit [N/mm²]
- $f_{t,0,l,k}$ charakteristische Zugtragfähigkeit der einzelnen Lamelle [N/mm²]
- m_c Faktor zur Berücksichtigung der Streuung der Zugfestigkeit des Grundmaterials [-]
 $m_c = 3,0$ für COV = 25 % ± 5 %
 $m_c = 3,5$ für COV = 35 % ± 5 %

In den Faktor m_c ist zusätzlich ein Systembeiwert ($k_{sys}=1,10$), für die Anordnung von 4 parallel wirkenden Lamellen, eingerechnet. Da sich bei den fünfschichtigen Elementen nur zwei Hohllamellen nebeneinander in den Decklagen befanden, wurde ein adaptierter Systemeffekt berücksichtigt:

$$f_{m,clt,k} = m_c \cdot \frac{k_{sys,n=2}}{k_{sys,n=4}} \cdot f_{t,0,l,k}^{0,8} = m_c \cdot \frac{1,05}{1,10} \cdot f_{t,0,l,k}^{0,8} \quad (6.5)$$

Tabelle 6-11: Vergleich Tragfähigkeit Modell – Prüfungen

	Modell [N/mm ²]	Prüfwert [N/mm ²]	Abweichung [%]
$f_{t,0,l,k}$	-	22,6	-
COV _{HL86}	-	~ 20 %	-
$f_{m,k,5s}$	34,7	36,9 ¹⁾	+ 6,34 %

Anmerkung:

¹⁾ char. Biegefestigkeit ohne Keilzinkenbrüche

Die Biegefestigkeit der fünfschichtigen Elemente, ohne Berücksichtigung der Keilzinkenbrüche, errechnet sich zu $f_{m,k} = 36,9$ N/mm² und lt. Modell zu $f_{m,k,modell} = 34,7$ N/mm². Das Modell unterschätzt die Biegefestigkeit demnach um 6,34 %. Hier gilt jedoch anzumerken, dass die Streuung der Prüfergebnisse (COV = 4,96 %) auf einem sehr niedrigen Niveau liegt und die Prüfkörperanzahl ($n = 5$) zu gering ist um eine Gültigkeit des Trägermodells zu überprüfen.

6-3.3 ROLLSCHUB

Bei der Verwendung von Hohllamellen als Querlage in gesperrt aufgebauten Bauteilen verringert sich die Rollschubtragfähigkeit des Elementes erheblich. Der bekannte Einfluss des Verhältnisses zwischen Brettbreite und -höhe auf die Rollschubfestigkeit konnte auch in dieser Arbeit festgestellt werden. Die Hohllamelle weist, bedingt durch ihre Hohlräume, im Bereich der Stege ein h/b-Verhältnis von rund 1,0 auf. In Tabelle 6-12 sind die ermittelten Rollschubfestigkeiten aufgelistet. Die Umrechnung der Festigkeit erfolgte linear über das Verhältnis zwischen der Gesamtbreite einer Lamelle und der Summe der Stegbreiten der nominellen Querschnittsabmessungen.

Tabelle 6-12: Rollschubfestigkeit HL86 – Prüfsérie PB-3s-HL86

	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{v,90,90}$ ¹⁾ [N/mm ²]	$f_{v,90,90}$ ²⁾ [N/mm ²]
Anzahl	15	15	15
Min	468	0,392	0,803
Max	503	0,497	1,02
Mittelwert	483	0,465	0,952
Stabw.	10,5	0,0280	0,0573
COV	2,17%	6,02%	6,02%
char. Wert	437	0,410	0,840

Anmerkung:

¹⁾ bezogen auf „homogene“ Querlage – Bruttoquerschnitt

²⁾ bezogen auf Stegbreite – „Nettoquerschnitt“

Bei allen Prüfkörpern, mit Hohllamellen als Querlage, zeigte sich das, in Abbildung 6-6 ersichtliche, Bruchverhalten. Die reduzierte Tragfähigkeit bei einer Rollschubbeanspruchung der Elemente ist auf das kleine h/b-Verhältnis zurückzuführen, da sich höhere Querkzug- bzw. Querkdruckspannungen bilden, welche in weiterer Folge zu einem vorzeitigen Versagen der Querlage führen.



Abbildung 6-6: Rollschubversagen der Querlage

6-3.4 QUERDRUCK

Die Ergebnisse der Querdruckprüfungen verschiedener Aufbauten sind in Tabelle 6-13 zusammengefasst.

Tabelle 6-13: Zusammenfassung Querdruckfestigkeit

Bezeichnung	HL86-VH-BSH	HL86-BSH	HL86-BSP	HL112-BSH	HL112-BSP
Lagenanzahl	3	3	3	3	3
Decklagen	HL86	HL86	HL86	HL112	HL112
Mittellage	VH	HL86	HL86	HL112	HL112
Orientierung der Lagen	parallel	parallel	orthogonal	parallel	orthogonal
Bruttoquerschnitt	$f_{c,90,Brutto}$ [N/mm ²]				
Anzahl	5	6	6	5	5
Min	1,24	0,840	1,01	0,422	0,463
Max	1,40	1,32	1,34	0,675	0,578
Mittelwert	1,34	1,06	1,20	0,566	0,534
Stabw.	0,065	0,172	0,126	0,101	0,044
COV	4,83%	16,2%	10,5%	17,9%	8,20%
k_s	2,46	2,34	2,34	2,46	2,46
char. Wert lt. EN 14358	1,18	0,719	0,932	0,351	0,432
Nettoquerschnitt	$f_{c,90,Netto}$ [N/mm ²]				
Anzahl	5	6	6	5	5
Min	2,69	1,93	2,22	1,42	1,75
Max	2,92	2,72	3,07	1,91	2,68
Mittelwert	2,84	2,34	2,74	1,68	2,19
Stabw.	0,095	0,262	0,321	0,191	0,402
COV	3,33%	11,2%	11,7%	11,4%	18,3%
k_s	2,46	2,34	2,34	2,46	2,46
char. Wert lt. EN 14358	2,62	1,78	2,04	1,25	1,37

Die Druckfestigkeit von Vollholz quer zur Faser der Festigkeitsklasse C35 (Grundprodukt) ist in EN 338 [7] mit $f_{c,90,k} = 2,8 \text{ N/mm}^2$ festgelegt. Es zeigt sich, dass die ermittelten Querdruckfestigkeiten der unterschiedlichen Aufbauten niedriger liegen. Dies ist unter anderem auf die Definition der Querdruckfestigkeit in der EN 408 [41] über eine fixe Grenzverformung in Abhängigkeit von der Prüfkörperhöhe ($0,01 \cdot h_t$) zurückzuführen. Durch die Hohlräume in den Lamellen verringert sich die Dehnsteifigkeit der Elemente. Dies führt zu einer „flacheren“ Last-Verschiebungskurve und in weiterer Folge zu einer geringeren Querdruckfestigkeit (siehe Abbildung 6-7).

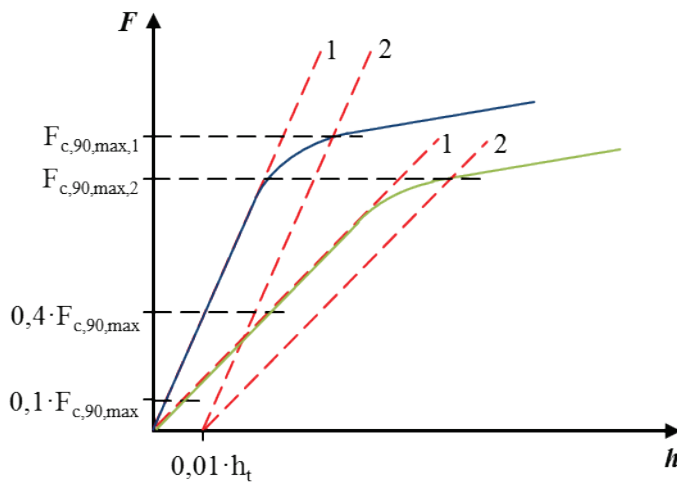


Abbildung 6-7: Einfluss der Steifigkeit auf die Querdruckfestigkeit

Zusätzlich kommt es durch die geometrischen Abweichungen zu einer Einleitung von Momenten in die Decklagen, welche in weiterer Folge, aufgrund der geringen Festigkeiten quer zur Faser, zum Versagen führten. Ebenfalls wurde bei einigen Prüfkörpern ein Ausknicken der Stege in den Randzonen beobachtet.



Abbildung 6-8: Bruchbilder Querdruckprüfungen (links: QD-HL86-BSH, rechts: QD-HL86-BSP)

In Abbildung 6-9 ist die Querdruckfestigkeit (Nettoquerschnitt), dem „scheinbaren“ E-Modul ($E_{c,90,Brutto}$) gegenübergestellt. Die charakteristischen Werte sind beim Mittelwert des E-Moduls, der entsprechenden Prüfserie, aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass sich mit abnehmender Dehnsteifigkeit der Elemente die Querdruckfestigkeit, ermittelt nach EN 408 [41], reduziert. Aus diesem Grund kann am Nettoquerschnitt nicht die Festigkeit C35 des Grundmaterials erreicht werden.

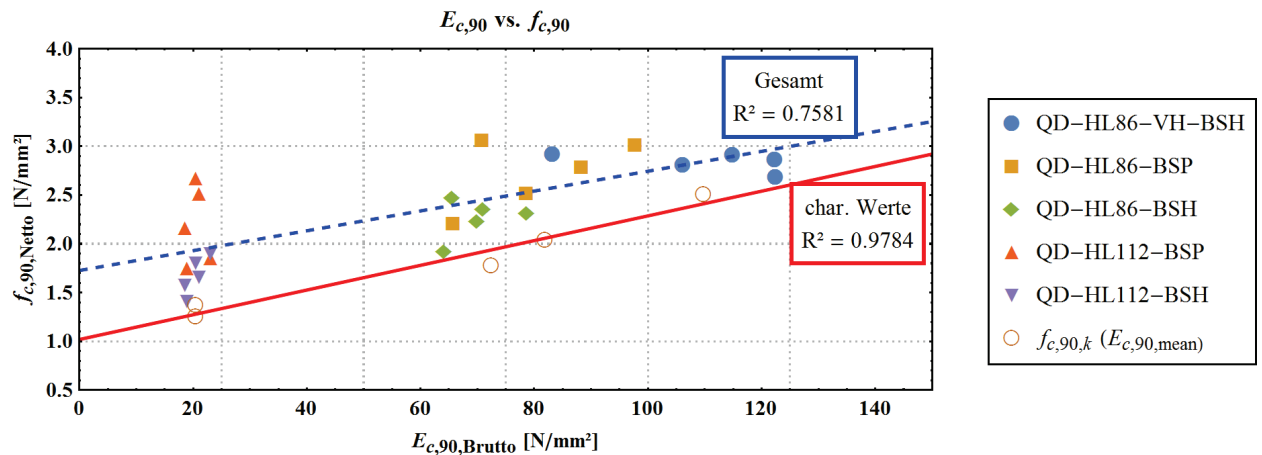


Abbildung 6-9: Zusammenhang zwischen E-Modul und Querdruckfestigkeit

Weiters ist der Einfluss der Lagenorientierung (gesperrt oder geschichtet) auf die Querdruckfestigkeit bereits aus vorangegangenen Untersuchungen an Brettsperrholzelement bzw. Brettschichtholz bekannt. Dieser Effekt wurde tendenziell auch dieser Arbeit festgestellt werden (siehe Abbildung 6-10).

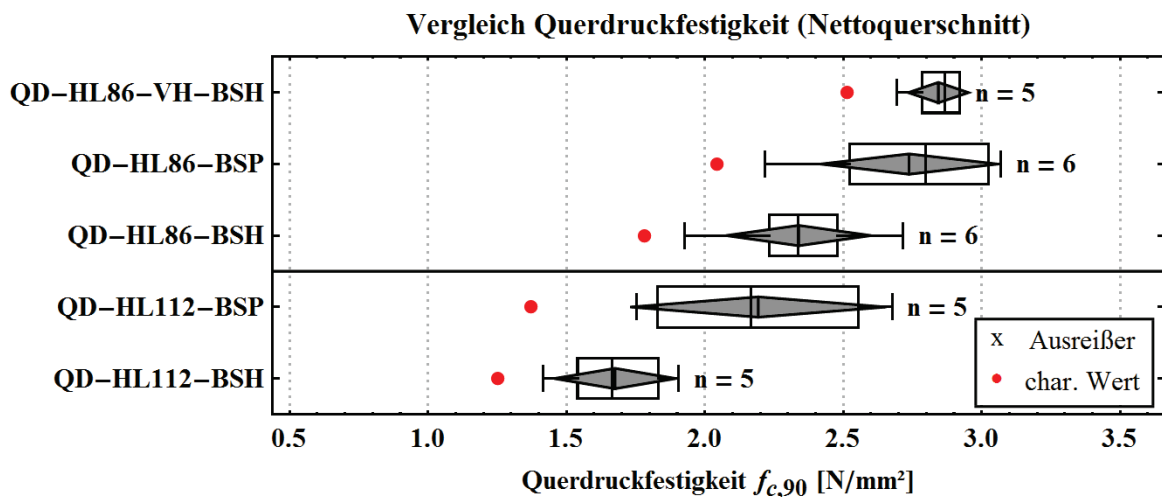


Abbildung 6-10. Boxplot Querdruckfestigkeit bezogen auf Nettoquerschnitt

Zusammenfassend ist festzustellen, dass es durch die Hohlräume in den Hohlramellen zu einer Reduzierung der Querdrucktragfähigkeit kommt und dies zu Problemen bei konzentrierten Lastenleitungen führen kann. Weitere Untersuchungen bezüglich des Einflusses von teilflächigen Beanspruchungen ($k_{c,90}$ -Beiwerte lt. EN 1995-1-1 [13]) sind noch durchzuführen.

6-3.5 SCHUBNACHGIEBIGKEIT

Die Berechnung der Schubnachgiebigkeit von gesperrt aufgebauten Querschnitten mit Hohllamellen in den Querlagen stellt aufgrund der Geometrie einen komplexen Sachverhalt dar. Die Schubsteifigkeit (hier: S_{HL}) und der Schubkorrekturfaktor κ berechnen sich nach folgenden Gleichungen:

$$S_{HL} = \frac{S_{ges}}{\kappa} = \frac{\sum (A_i \cdot G_i)}{\kappa} \quad (6.6)$$

$$\kappa = \frac{S_{ges}}{K_{HL}^2} \cdot \int_h \left(\frac{S^2(z, E(z))}{G(z) \cdot b(z)} \right) dz \quad (6.7)$$

Dabei sind:

- K_{HL} Biegesteifigkeit [Nmm²]
- S_{HL} Schubsteifigkeit [N]
- A_i Fläche der Schicht [N/mm²]
- G_i Schubmodul der Schicht [N/mm²]
- E_i E-Modul der Schicht [N/mm²]
- $S(z, E(z))$... statisches Moment in Abhängigkeit von z [N]
- $b(z)$ Breite in Abhängigkeit von z [mm]

Durch Lösen des Integrals in (6.9) über einzelnen Schichten ergibt sich der Schubkorrekturfaktor zu:

$$\kappa = \frac{\sum G_i \cdot t_i}{\left(E_i \cdot \frac{t_i^3}{12} + E_i \cdot t_i \cdot e_i^2 \right)^2} \cdot \sum_i \left(\frac{t_i}{60 \cdot G_i} \cdot \left[60 \cdot S_0^2 + 20 \cdot E_i \cdot S_0 \cdot t_i \cdot (t_i + 3 \cdot z_0) + E_i^2 \cdot t_i^2 \cdot (3 \cdot t_i^2 + 15 \cdot t_i \cdot z_0 + 20 \cdot z_0^2) \right] \right) \quad (6.8)$$

Dabei sind:

- t_i Schichtdicke [mm]
- G_i Schubmodul der Schicht [N/mm²]
- E_i E-Modul der Schicht [N/mm²]
- S_0 statisches Moment an der Oberkante der i-ten Schicht unter Berücksichtigung des E-Moduls der Schichten [N]
- z_0 Abstand der Schichtoberkante vom Schwerpunkt (gesamter Querschnitt) [mm]
- e_i Abstand des Schichtschwerpunkts vom Schwerpunkt (gesamter Querschnitt) [mm]

Im Folgenden ist der Berechnungsvorgang zur Ermittlung der Schubsteifigkeit anhand eines dreischichtigen gesperrten Querschnitts aufgebaut mit dem Hohllamellenprototyp HL86 erläutert.

Abbildung 6-11 zeigt den untersuchten Querschnitt und dessen Aufteilung in einzelnen Schichten. Dabei wurden Hohllamellen in den Längslagen in drei und die Querlagen in eine Schicht aufgeteilt.

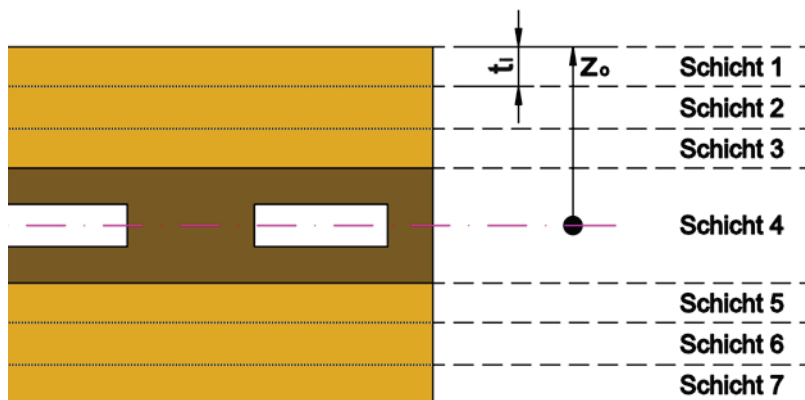


Abbildung 6-11: Hohllamellen im gesperrten Aufbau (HL 86)

Für die Querschnittsberechnungen wurde ein E-Modul in Faserrichtung von $E_0 = 13.500 \text{ N/mm}^2$ angesetzt. Die Querlagen blieben bei der Berechnung der Biegesteifigkeit unberücksichtigt ($E_{90} = 0$). Aufgrund der ähnlichen mechanischen Eigenschaften des Grundmaterials der Hohllamellen und der Festigkeitsklasse C 35 nach EN 338 [7] wurde der Schubmodul in Faserrichtung mit $G_0 = 810 \text{ N/mm}^2$ angenommen. Für den Rollschubmodul des Grundmaterials ergibt sich mit dem Verhältnis $G_0/G_{90} = 10$ zu $G_{90} = 81,0 \text{ N/mm}^2$. Damit ergibt sich für den Prototyp HL86 ein effektiver Rollschubmodul von $G_{90,eff} = 40,3 \text{ N/mm}^2$ (vgl. Abschnitt 3-5.2).

Die unterschiedlichen Breiten (Stege bzw. Decklagen) wurden über eine Reduzierung des E-Moduls bzw. Schubmoduls berücksichtigt (siehe Tabelle 6-14).

Tabelle 6-14: Kennwerte der einzelnen Schichten zur Bestimmung des Schubkorrekturfaktors

	Orientierung	t_i [mm]	b_{eff}/b_{ges} [-]	E_i [mm]	G_i [mm]
Schicht 1	längs	14,0	1,0	13.500	810
Schicht 2	längs	14,0	0,488	6.593	396
Schicht 3	längs	14,0	1,0	13.500	810
Schicht 4	quer	42,0	-	0	40,3 ¹⁾
Schicht 5	längs	14,0	1,0	13.500	810
Schicht 6	längs	14,0	0,488	6.593	396
Schicht 7	längs	14,0	1,0	13.500	810

Anmerkung:

¹⁾ effektiver Rollschubmodul für HL86 bei $G_{r,mean} = 81,0 \text{ N/mm}^2$ (siehe Abschnitt 3-5.2)

Durch Auswerten der Gleichung (6.8) mit den definierten Schichten nach Tabelle 6-14 ergeben sich die Querschnittswerte des dreischichtigen gesperrten Querschnitt bei einer Breite von $B = 1000 \text{ mm}$ zu:

Tabelle 6-15: Querschnittskennwerte

	K_{HL} [Nmm ²]	S_{HL} [N]	κ [-]
3s-HL86	$1,823 \cdot 10^{12}$	$7,730 \cdot 10^6$	7,520

Um eine Einschätzung treffen zu können, ob die vorangegangenen Berechnung der Schubnachgiebigkeit bzw. des Schubkorrekturfaktors zutreffen, wurden die Biegeprüfungen der Prüfserie PB-3s-HL86 herangezogen. Bei der Ermittlung des globalen E-Moduls aus Vier-Punkt-Biegeversuchen muss die Schubnachgiebigkeit des Querschnitts berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 4-6.6.2). Somit sollten der globale und der lokale Biege-E-Modul in ähnlichen Bereichen zu liegen kommen.

In Abbildung 6-12 sind die ermittelten E-Moduln der Serie PB-3s-HL86 einander gegenübergestellt. Die maximalen Abweichungen liegen mit rund $\pm 5\%$ in sehr kleinen Bereich. Dies kann als Indiz gesehen werden, dass die durchgeführte Querschnittsberechnung eine guten Näherung der tatsächlichen Verformungen liefern.

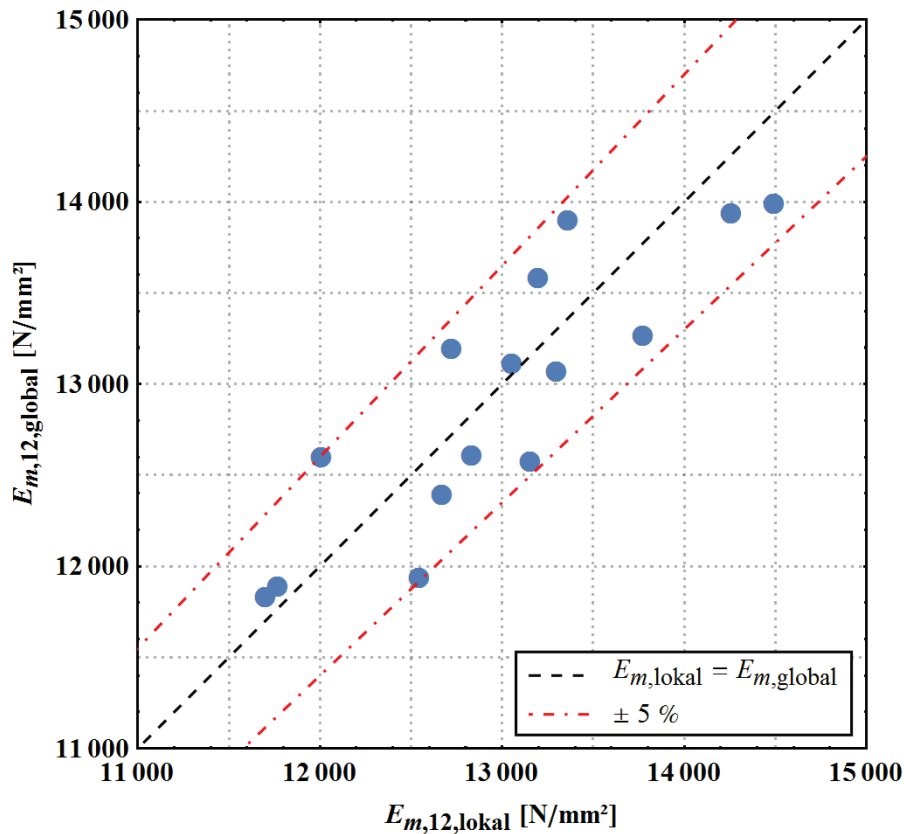


Abbildung 6-12: Vergleich zwischen lokalem und globalem E-Modul der Prüfserie PB-3s-HL86

6-3.6 LANGZEITVERHALTEN – KRIECHEN

6-3.6.1 Verschmierter Verformungsbeiwert

Die Kriechbeiwerte k_{def} wurden für beide Modelle lt. EN 1156 [31] berechnet. Dabei handelt es sich um „verschmierte“ Kriechbeiwerte (Biege- und Schubanteil). Sie gelten nur für die hier untersuchten Aufbauten und Spannweiten (L/H-Verhältnis).

Modell 2 (Potenzfunktion) führt in beiden Fällen zu kleineren Werten als Modell 1. Bei der Analyse verschiedener Vorhersagemodelle, des Kriechverhaltens aus Kurzzeitversuchen, stellte GRESSEL [51] fest, dass Modelle, welche auf reinen Potenzfunktionen (hier: Modell 2) beruhen, dazu neigen die Kriechverformung zu unterschätzen. Eine bessere Vorhersagegenauigkeit kann durch mehrparametrische Modelle (hier: Modell 1) erzielt werden. Damit ergibt sich für die fünfschichtigen Elemente im Mittel ein Kriechbeiwert von $k_{def,5s} = 0,883$ und für die drei-schichtigen Prüfkörper von $k_{def,3s} = 1,11$.

Tabelle 6-16: Ergebnisse - k_{def} ($k_{c,50Y,NKI}$)

	K-5s-HL86-VH		K-3s-HL86	
	Modell 1	Modell 2	Modell 1	Modell 2
Anzahl	2	2	3	3
k_{def}¹⁾	0,883	0,792	1,11	1,03
Modellfehler	± 9,79%	± 4,43%	± 9,15%	± 4,41%

Anmerkung:

¹⁾ verschmierte Kriechbeiwerte für untersuchte Querschnitte

²⁾ Fehler (95%-Konfidenzbereich) des Modells durch die Prognose auf 50 Jahre
 (kein Maß zur Beurteilung, ob Modell dem tatsächlichen Kriechverhalten entspricht)

Die „verschmierten“ Kriechbeiwerte, der fünfschichtigen Elemente kommen in einem ähnlichen Bereich zu liegen, wie in Untersuchungen von JÖBSTL [38] und NAKAJIMA [39]. Beide geben für Brettsperrholz, mit fünf Lagen und konstanter Schichtstärke, einen k_{def} -Beiwert von 0,85 an. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die ermittelten Deformationsbeiwerte vom Querschnittsaufbau abhängig sind und somit kein direkter Vergleich stattfinden kann.

6-3.6.2 Rückrechnen auf den Verformungsbeiwert der Querlagen

Die ermittelten Kriechbeiwerte sind nur für die untersuchten Aufbauten bzw. Spannweiten gültig. In weitere Folge wird, wie durch JÖBSTL [38], auf Kriechbeiwerte für die rollschubbeanspruchte Querlage rückgerechnet.

Die Zunahme der Durchbiegung mit der Zeit kann auch als eine Reduktion der Steifigkeit betrachtet werden. Unter Annahme, dass das Kriechverhalten von Schub längs zur Faser und Biegung ident ist, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$w(E_0, G_0, G_{90})_{t=0} \cdot (1 + k_{def}) = w\left(\frac{E_0}{1 + k_{def,090}}, \frac{G_0}{1 + k_{def,090}}, \frac{G_{90}}{1 + k_{def,9090}}\right)_{t=\infty} \quad (6.9)$$

Dabei sind:

- $w_{t=0}$ Durchbiegung zum Zeitpunkt $t = 0$ [mm]
- $w_{t=\infty}$ Durchbiegung zum Zeitpunkt $t = \infty$ [mm]
- $k_{def,090}$ Verformungsbeiwert für Beanspruchung in Faserrichtung (hier: $k_{def,090} = 0,6$) [-]
- $k_{def,9090}$ Verformungsbeiwert für Beanspruchung quer zur Faserrichtung (Rollschub) [-]

Aufgrund der Komplexität des Gleichungssystems, erfolgte die Ermittlung der $k_{def,9090}$ -Beiwerte iterativ. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-17 aufgelistet.

Tabelle 6-17: Kriechfaktor Rollschub $k_{def,9090}$ aus Versuchen rückgerechnet

Modell 1	k_{def}	$k_{def,9090}$	$k_{def,9090}$ JÖBSTL
K-5s-HL86-VH-01	0,942	2,71	
K-5s-HL86-VH-02	0,754	1,57	
K-3s-HL86-01	1,10	2,38	
K-3s-HL86-02	1,09	2,35	
K-3s-HL86-03	1,15	2,59	
Anzahl		5	
Min		1,57	
Max		2,71	
Mittelwert		2,32	2,27
Stabw.		0,445	
COV		19,2%	

Der mittlere Verformungsbeiwert für die Rollschubbeanspruchung der Querlage wurde mit $k_{def,9090} = 2,32$ festgestellt und liegt auf demselben Niveau, wie der von JÖBSTL [38] ermittelte Wert von $k_{def,9090} = 2,27$ für Querlagen aus Vollholz. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass die Verwendung von Hohllamellen in der Querlage keinen Einfluss auf den Verformungsbeiwert $k_{def,9090}$ hat.

6-3.6.3 Ermittlung verschmierter k_{def} -Beiwerte

Um die Bemessung von Hohllamellen praktikabel zu halten, werden in weiterer Folge „verschmierte“ Deformationsbeiwerte für weitere Querschnittsaufbauten berechnet. Dabei werden die, in Tabelle 6-18 ersichtlichen, Materialparameter zugrunde gelegt.

Tabelle 6-18: Materialparameter

	HL86	HL112	Vollholz C24	Bemerkung
E_0	13.500	13.500	11.600	
E_{90}	0	0	0	
G_0	810	810	690	
G_{90}	40,3	30,0	50,0	
$k_{def,090}$	0,60	0,60	0,60	für E_0 und G_0
$k_{def,9090}$	2,32	2,32	2,32	für G_{90}

Einflüsse auf verschmierte k_{def} -Beiwerte

Die Durchbiegung in Trägermitte (Timoshenko-Balken) für eine konstante Gleichlast ist über folgende Gleichung definiert:

$$w(L/2) = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot K_{HL}} + \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot S_{HL}} \quad (6.10)$$

Der Zweite Term beschreibt die Durchbiegung zufolge der Schubverzerrung des Querschnittes. Wie bereits festgestellt wurde, nimmt dieser Anteil an der Gesamtverformung nimmt zunehmender Stützweite ab (siehe Abbildung 2-10). Daraus kann geschlossen werden, dass „verschmierte“ k_{def} -Beiwerte mit steigender Spannweite bzw. L/H-Verhältnis abnimmt.

Zusätzlich kommt es, durch die unterschiedlichen Deformationsbeiwerte der Schubmoduln G_0 und G_{90} , zu einer Änderung des Verhältnisses der Schubmoduln und in weiterer Folge zur Beeinflussung der Schubsteifigkeit bzw. des Schubkorrekturfaktors. Ein weiterer Einflussparameter auf den Schubkorrekturfaktor ist die Anzahl der Lagen (vgl. BSP-Handbuch [5]).

Die Einflüsse auf den verschmierten Deformationsbeiwert, durch die Schichtanzahl und dem L/H-Verhältnis des Elements, ist in Abbildung 6-13 ersichtlich. Es handelt sich dabei um fiktive Querschnitte, aufgebaut aus Hohllamellen des Typs HL86.

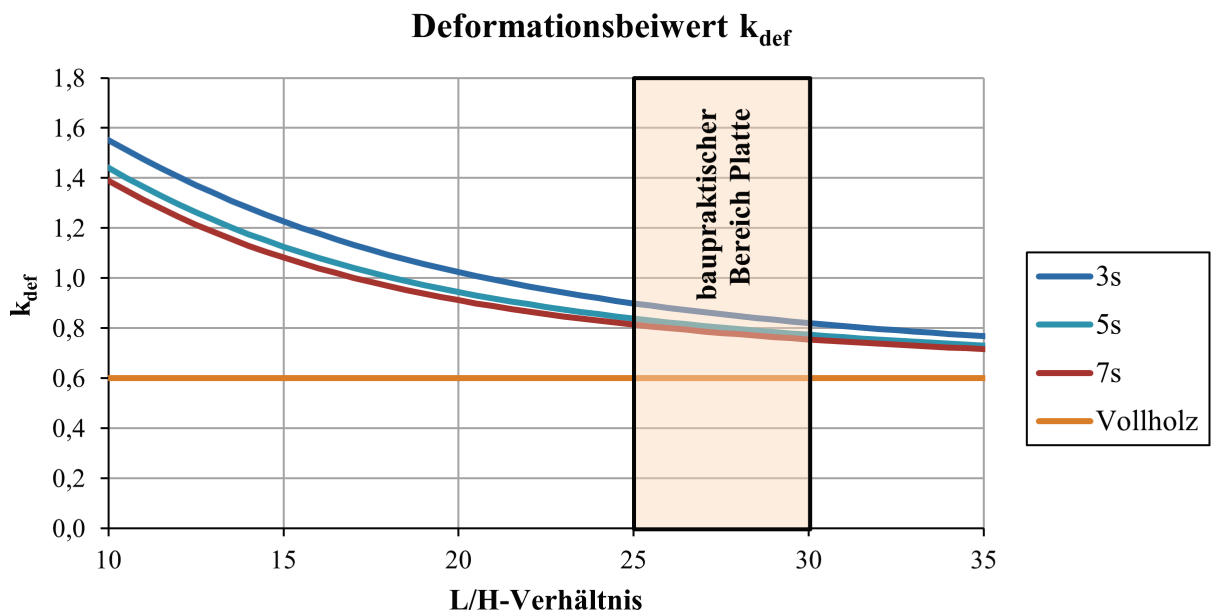


Abbildung 6-13: verschmierter Deformationsbeiwert k_{def} in Abhängigkeit von Schichtanzahl und L/H-Verhältnis

Die hauptsächlichen Einsatzbereiche, für gesperrte Elemente aus Hohllamellen, stellen wie für Brettsperrholz Decken und Dächer dar. In diesen Anwendungsbereichen sind in der Regel Schlankheitsgrade L/H von rund 25 bis 30 üblich.

verschmierte k_{def} -Beiwerte für Querschnitte

Es wurden für verschiedene Querschnittsaufbauten (siehe Tabelle 6-19) k_{def} -Beiwerte errechnet. Da jene mit steigender Schlankheit L/H abnehmen, wurde konservativ ein L/H -Verhältnis von 18 festgelegt. Dasselbe Verhältnis kann aus den Versuchsdaten von JÖBSTL [38], bzw. der Festlegung des k_{def} -Beiwerts mit 0,85 für Brettsperrholz in der EN 1995-1-1 [13], abgeleitet werden. Bei den Querschnitten handelt es sich um fünfschichtige Elemente, welche aus Hohllamellen bzw. in Kombination mit Vollholzlagen aufgebaut sind.

Tabelle 6-19: Aufbauten – k_{def} – Berechnung Hohllamelle

	Anzahl der Lagen [-]	Dicke [mm]	Grundmaterial [-]	E_0 [N/mm ²]	G_0 [N/mm ²]	G_{90} ¹⁾ [N/mm ²]
5s-HL86	5 – 40/ <u>40</u> /40/ <u>40</u> /40	200	HL86	13.500	810	40,3
5s-HL112	5 – 40/ <u>40</u> /40/ <u>40</u> /40	200	HL112	13.500	810	30,0
5s-HL86-VH ²⁾	5 – 40/ <u>20</u> /40/ <u>20</u> /40	160	HL86	13.500	810	50,0
5s-HL112-VH ²⁾	5 – 40/ <u>20</u> /40/ <u>20</u> /40	160	HL112	13.500	810	50,0

Anmerkung:

Die Abmessung der Querlagen sind mit Unterstrich gekennzeichnet.

¹⁾ effektiver Rollschubmodul der Querlage

²⁾ Querlagen aus Vollholz

Die Ermittlung der k_{def} -Beiwerte erfolgte über das Verhältnis der Durchbiegungen zum Zeitpunkt $t = 0$ und $t = 50$ Jahre.

$$k_{def} = \frac{w(E_0, G_0, G_{90})_{t=0}}{w\left(\frac{E_0}{1+k_{def,090}}, \frac{G_0}{1+k_{def,090}}, \frac{G_{90}}{1+k_{def,9090}}\right)_{t=\infty}} - 1 \quad (6.11)$$

Demnach ergeben sich nach (6.12) folgende „verschmierte“ k_{def} -Beiwerte:

Tabelle 6-20: verschmierte k_{def} – Beiwerte Hohllamelle

	k_{def} [-]
5s-HL86	1,01
5s-HL112	1,08
5s-HL86-VH ¹⁾	0,87
5s-HL112-VH ¹⁾	0,86

Anmerkung:

¹⁾ Querlagen aus Vollholz

Aufgrund der schubweicheren Querlagen verbunden mit dem stärker ausgebildeten Kriechverhalten auf Rollschub, liegen die verschmierten Deformationsbeiwerte, bei dem Einsatz von Hohllamellen in der Querlage, deutlich über jenen von Brettsperrholz.

6-4 PRÜFUNGEN AN VERBINDUNGSMITTELN

Der Einsatz von Schrauben ist aus dem konstruktiven Holzbau, aufgrund der schnellen und wirtschaftlichen Montage, nicht mehr wegzudenken. Im Folgenden wird auf den Einfluss der Hohlräume in den Lamellen und dessen Auswirkung auf die Anwendung von selbstbohrenden Holzschrauben eingegangen.

6-4.1.1 Ausziehfestigkeit von Schrauben in Hohllamellen

Zum Vergleich der Prüfdaten mit, den in der Zulassung [52] definierten Werten der verwendeten Schraube, wurden die Prüfwerte nach dem in RINGHOFER [50] postulierten Modell, auf eine charakteristische Rohdichte von $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ korrigiert (siehe Gleichung (6.12)).

$$f_{ax,korr} = f_{ax,test} \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_i} \right)^{1,10} \cdot \frac{1}{k_{sys}} \quad (6.12)$$

Dabei sind:

- $f_{ax,test}$ ermittelte Ausziehfestigkeit [N/mm²]
- ρ_k char. Rohdichte (hier mit $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$) [kg/m³]
- ρ_i Rohdichte des i-ten Prüfkörpers [kg/m³]
- k_{sys} Systemeffekt zur Berücksichtigung der durchdrungen Lagen (hier mit $k_{sys} = 1,10$) [-]

Bei der Ermittlung der Ausziehfestigkeit wurde nur die tatsächliche Einbindelänge der Schraube berücksichtigt (Abzug der Hohlräume und der Schraubenspitze). Die Kennwerte, der verwendeten Vollgewindeschraube mit Halbspitze, sind in Tabelle 6-21 aufgelistet.

Tabelle 6-21: Kennwerte der verwendeten Schraube

	Einheit	Bemerkung
Bezeichnung	[-]	Stardrive
Nenndurchmesser	[mm]	8,0
Länge	[mm]	180
f_{ax,k}	[N/mm ²]	3,47
f_{ax,mean}	[N/mm ²]	4,25 Abschätzung nach RINGHOFER [50]

Die Ausziehfestigkeiten der einzelnen Serien, bezogen auf eine charakteristischen Rohdichte von $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$, sind in Abbildung 6-14 dargestellt.

Beim Vergleich der Prüfserien „H“ (Schraube durchdringt Hohlraum) und der Serie „V“ (Schraube im Stegbereich) konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Es konnte somit kein Einfluss der Einbindelänge auf die Ausziehfestigkeit der Holzschraube festgestellt werden. Daraus folgt, dass die Zugtragfähigkeit einer Schraube, bei der Applikation in Hohllamellen, über die tatsächliche Verbundlänge zwischen Holz und dem Schraubengewinde ermittelt werden kann.

Aufgrund des geringen Prüfumfanges der einzelnen Serien, wurde auf eine Berechnung der charakteristischen Festigkeit verzichtet. Bei der gemeinsamen Auswertung aller Prüfdaten, errechnet sich die char. Ausziehfestigkeit zu $f_{ax,k} = 3,50 \text{ N/mm}^2$ und liegt auf demselben Niveau wie jene der Zulassung.

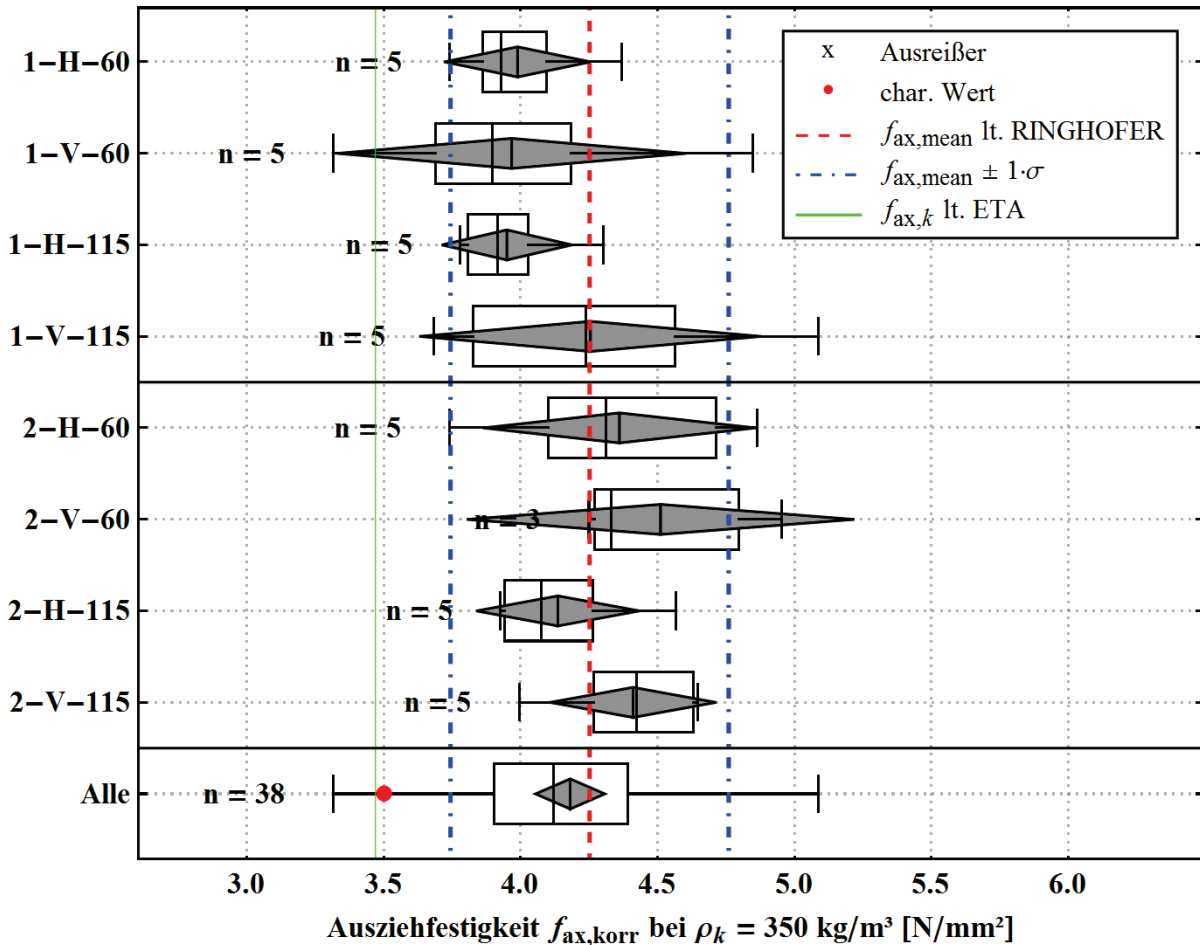


Abbildung 6-14: Boxplot Ausziehfestigkeit $f_{ax,korr}$ bei $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$

6-4.1.2 Tragfähigkeit von Schrauben in Hohllamellen

Für die Berechnung der Tragfähigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben erfolgt mittels folgender Gleichung (vgl. RINGHOFER [50]):

$$R_{ax} = \pi \cdot l_{eff} \cdot f_{ax,ref,k} \cdot k_{sys} \cdot k_{ax} \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_{ref,k}} \right)^{1,10} \quad (6.13)$$

Dabei sind:

- $f_{ax,ref}$ char. Ausziehfestigkeit der Schraube bei $\rho_{ref,k}$ [N/mm²]
- $\rho_{ref,k}$ Referenzrohndichte für Ausziehfestigkeit (hier mit $\rho_{ref,k} = 350 \text{ kg/m}^3$) [kg/m³]
- ρ_k char. Rohndichte [kg/m³]
- k_{sys} Systemeffekt zur Berücksichtigung der durchdrungen Lagen (hier mit $k_{sys} = 1,10$) [-]
- k_{ax} Beiwert zur Berücksichtigung des Winkels zw. Schraube und Faserverlauf (hier mit $k_{ax} = 1,0$ für 45° bis 90°) [-]
- l_{eff} effektive Gewindelänge im Holz bzw. Holzwerkstoff [mm]

Bei der Einbringung von selbstbohrenden Holzschrauben senkrecht zur Breite bzw. Plattenebene ergibt sich durch die Hohlräume eine Reduktion der effektiven Einbindelänge auf rund 65 % im Vergleich zu einer voll eingebunden Schraube (siehe Tabelle 6-22). Diesem Verlust an Tragfähigkeit wirkt die höhere Rohdichte der Hohl lamellenprototypen zum Teil entgegen. Folglich liegt die maximale Traglast in Hohl lamellen bei rund **75 % der Tragfähigkeit** von Schrauben in konventionellem Brettsper Holz.

Tabelle 6-22: Vergleich der Tragfähigkeit von selbstbohrenden Holzschraube (Schraube senkrecht zur Breite bzw. Plattenebene)

	HL86	HL112	BSP
$l_{eff}^{1)}$	65,0%	65,0%	100%
ρ_k	440	440	385
Einfluss $\rho^{2)}$	1,29	1,29	1,11
$\Delta VH^{3)}$	83,6%	83,6%	111%
$\Delta BSP^{3)}$	75,3%	75,3%	100%

Anmerkung:

- ¹⁾ bezogen auf voll eingebunden Schraube
- ²⁾ Rohdichtekorrektur von $f_{ax,ref,k}$
- ³⁾ Tragfähigkeit im Vergleich zu Vollholz C24 ($\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$)
- ⁴⁾ Tragfähigkeit im Vergleich zu konventionellen BSP

Beim Einbringen der Holzschraube in die Schmalseite der Hohl lamelle ergibt sich durch die Hohlräume für den Prototyp HL86 eine Reduktion der effektiven Einbindelänge auf rund 49 % und für den Typ HL112 auf rund 38 %. Unter Berücksichtigung der höheren Rohdichte liegt die **Tragfähigkeit** von Holzschrauben in der Schmalseite somit bei rund **56 % (HL86)** bzw. **43 % (HL112)** im Vergleich zu voll eingebunden Schrauben in konventionellem Brettsper Holz.

Tabelle 6-23: Vergleich der Tragfähigkeit von selbstbohrenden Holzschraube (Schraube in Schmalseite eingedreht)

	HL86	HL112	BSP
$l_{eff}^{1)}$	48,8%	37,5%	100%
ρ_k	440	440	385
Einfluss $\rho^{2)}$	1,29	1,29	1,11
$\Delta VH^{3)}$	62,8%	48,2%	111%
$\Delta BSP^{3)}$	56,6%	43,4%	100%

Anmerkung:

- ¹⁾ bezogen auf voll eingebunden Schraube
- ²⁾ Rohdichtekorrektur von $f_{ax,ref,k}$
- ³⁾ Tragfähigkeit im Vergleich zu Vollholz C24 ($\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$)
- ⁴⁾ Tragfähigkeit im Vergleich zu konventionellen BSP

Bei der Anwendung von selbstbohrenden Holzschrauben in Hohl lamellen können sich bei der **Tragfähigkeit Verluste** bis zu **55 %** im Vergleich zu konventionellem Brettsper Holz ergeben. Besondere Vorsicht gilt bei der Applikation von Schrauben in den Schmalseiten von gesperrten Bauteilen aus Hohl lamellen gegeben, da die Möglichkeit besteht, dass die Schrauben gänzlich im Hohlraum zu liegen kommen. Aus diesem Grund wird für Verschraubungen in den Schmalseiten eine Neigung der Schraubenachse von 45° empfohlen. Weitere Untersuchungen in Bezug auf erforderliche Rand- bzw. Schraubenabstände sind noch durchzuführen.

KAPITEL 7: VERGLEICHSRECHNUNG

Im folgenden Punkt werden die aus Kapitel 4 gewonnen Baustoffkennwerte und Erkenntnisse auf baupraktische Anwendungen umgelegt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Verwendung der Hohllamelle als plattenförmiges Tragelement mit gesperrtem Aufbau gelegt. Die Berechnung erfolgte nach EN 1995-1-1 [13] bzw. sind die verwendeten Gleichungen sich im Anhang B ersichtlich. Zur Berechnung der Langzeitverformung wurden die k_{def} -Beiwerte nach Tabelle 6-20 verwendet.

Tabelle 7-1: Zusammenstellung Baustoffkennwerte – gesperrter Aufbau

	HL86	HL112	BSP
$f_{m,k}$	35,0	35,0	28,8
$f_{v,k}$ ¹⁾	2,50	2,50	2,50
$f_{r,k}$	0,41 ²⁾	0,31 ²⁾³⁾	1,00
$f_{c,0,k}$ ⁴⁾	30,0	30,0	25,2
E_0	13.500	13.500	11.600
G_0	810	810	690
$G_{90,eff}$	40,3 ⁵⁾	30,0 ⁵⁾	50,0

Anmerkung:

- ¹⁾ Rissfaktor lt. EN 1995-1-1 [13] inkludiert
- ²⁾ Rollschubfestigkeit auf „homogene“ Querlage bezogen (Bruttoquerschnitt)
- ³⁾ aus Versuchsergebnissen interpoliert
- ⁴⁾ Abschätzung nach Festigkeitsklasse bzw. Anhang K EN 1995-1-1 [13]
- ⁵⁾ effektiver Rollschubmodul der Querlage (siehe Abschnitt 3-5.2)

7-1 DECKE

7-1.1 EINFELDRIGES DECKENSYSTEM

Als Beispiel wurde eine Wohnungsdecke eines Einfamilienhauses herangezogen. Der Vergleich erfolgte dabei über die erzielbaren Spannweiten des Systems, bei vollständiger Ausnutzung der jeweiligen Nachweise. Die zugrunde gelegten Einwirkungen sind in Tabelle 7-2 aufgelistet.

Tabelle 7-2: Einwirkungen – Vergleichsrechnung Decke

Belastung	Abkürzung [-]	Wert [kN/m ²]	Bemerkung [-]
Eigenlast	$g_{1,k}$	-	nach Aufbau
Estrich	$g_{2,k}$	0,88	60 mm Estrich
Nutzlast	q_k	2,00	Wohnfläche Kat. A1

7-1.1.1 Hohllamelle im gesperrten Aufbau

Die untersuchten Aufbauten sind in Tabelle 7-3 aufgelistet. Hierbei wurde konventionelles Brettsperrholz mit gesperrt verklebten Hohllamellen verglichen. Die Elemente setzten sich aus fünf Schichten zu jeweils 40 mm Dicke zusammen.

Tabelle 7-3: Aufbauten – Vergleichsrechnung Decke 5s-HL

	Anzahl der Lagen [-]	Dicke [mm]	Grundmaterial [-]	E_0 [N/mm ²]	G_0 [N/mm ²]	G_{90} ¹⁾ [N/mm ²]
5s-HL86	5 – 40/ <u>40</u> / <u>40</u> / <u>40</u> / <u>40</u>	200	HL86	13.500	810	40,3 ²⁾
5s-HL112	5 – 40/ <u>40</u> / <u>40</u> / <u>40</u> / <u>40</u>	200	HL112	13.500	810	30,0 ²⁾
konv. BSP	5 – 40/ <u>40</u> / <u>40</u> / <u>40</u> / <u>40</u>	200	C24	11.600	690	50,0

Anmerkung:

Die Abmessung der Querlagen sind mit Unterstrich gekennzeichnet.

¹⁾ effektiver Rollschubmodul der Querlage

²⁾ Werte aus FE-Berechnung (siehe Abschnitt 3-5.2)

Die Berechnung der Biegesteifigkeiten, der Schubsteifigkeiten und der Schubkorrekturfaktoren erfolgte analog zum Abschnitt 6-3.5. Die ermittelten Steifigkeitskennwerte der Aufbauten sind in Tabelle 7-4 aufgelistet.

Tabelle 7-4: Querschnittskennwerte – Decke 5s-HL

	$K_{CLT/HL}$ [kNm ²]	ΔK [%]	$S_{CLT/HL}$ [kN]	ΔS [%]	κ [-]
5s-HL86	5.886	-3,91	10.890	-31,7	7,57
5s-HL112	5.610	-8,40	7.827	-50,9	9,94
konv. BSP	6.125	-	15.952	-	5,44

Die Grenzspannweiten, bei vollständiger Ausnutzung der jeweiligen Querschnitte, sind in Tabelle 7-5 bzw. Abbildung 7-1 aufgelistet und jenen von konventionellem Brettsperrholz gegenübergestellt.

Tabelle 7-5: Ergebnisse der Vergleichsrechnung – Decke 5s-HL

	5s-HL86		5s-HL112		konv. BSP
	L_{max} [m]	ΔBSP ¹⁾ [%]	L_{max} [m]	ΔBSP ¹⁾ [%]	L_{max} [m]
Biegung	11,6	102	11,4	101	11,3
Schub	41,4	51,1	32,2	39,6	81,1
Rollschub	15,1	43,5	11,6	33,5	34,7
Anfangsverformung	6,93	99,3	6,76	96,8	6,98
Endverformung	6,70	97,1	6,46	93,7	6,89
Eigenfrequenz	5,53	100,0	5,40	97,7	5,53
Steifigkeitskriterium	6,53	95,9	6,19	90,9	6,81

Anmerkung:

¹⁾ erzielbare Spannweiten im Vergleich zu konventionellen BSP

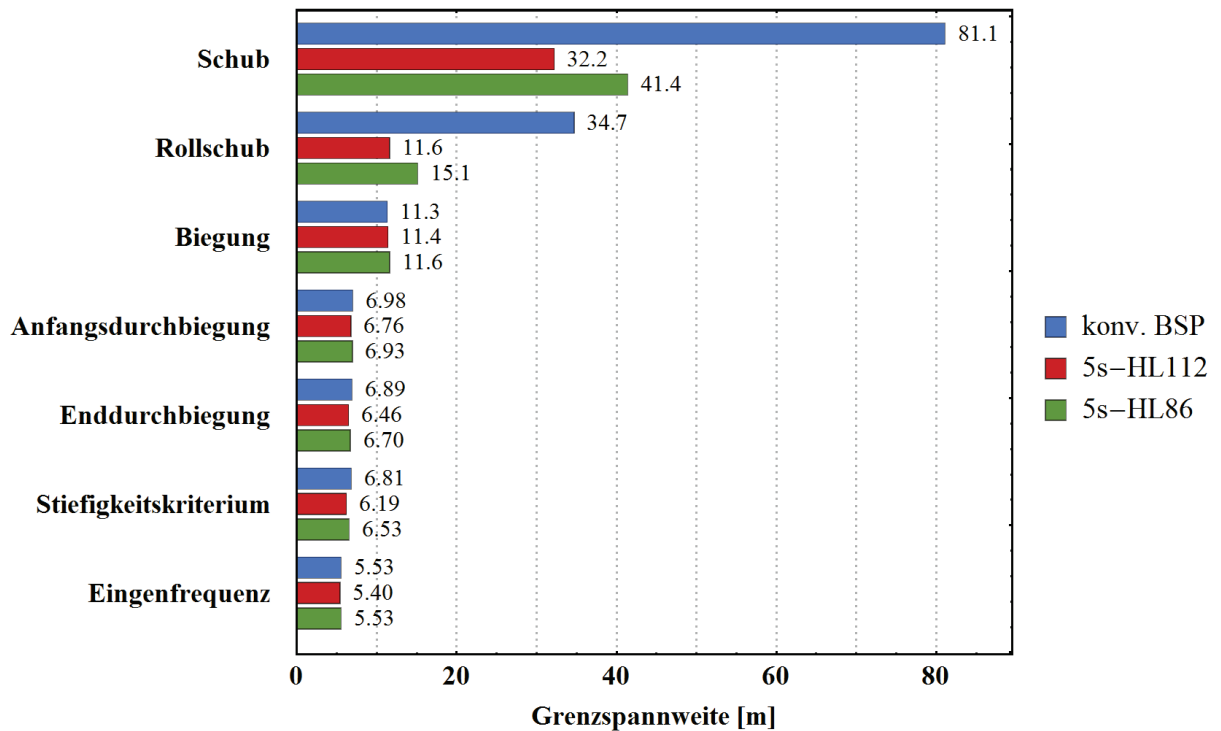


Abbildung 7-1: Ergebnisse der Vergleichsrechnung – Decke 5s-HL

Nachweise der Tragfähigkeit ULS:

In Abbildung 7-1 ist ersichtlich, dass bei der Verwendung von Hohllamellen für gesperrte Aufbauten es zu einer erheblichen Reduzierung der Schubtragfähigkeit, sowie der Rollschubtragfähigkeit, im Vergleich mit konventionellen Brettsper Holz kommt.

Maßgebend für die Tragfähigkeitsnachweise ist die Biegefestigkeit der Aufbauten. Aufgrund der höheren Biegefestigkeit der Hohllamellen im gesperrten Aufbau liegen die erzielbaren Spannweiten trotz Materialeinsparungen auf demselben Niveau wie konventionelles Brettsper Holz.

Nachweise der Gebrauchstauglichkeit SLS:

Die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit sind jedoch für den vorliegenden Einsatz als Deckenelement maßgebend. Aufgrund des höheren E-Moduls der Hohllamellen, liegen die Grenzspannweiten jedoch auf ähnlichem Niveau.

Mit dem Querschnitt 5s-HL86 kann dieselbe Grenzspannweite mit $L_{max} = 5,53$ m wie mit konventionellem Brettsper Holz erreicht werden trotz einer Materialeinsparung von 17,9 %.

Die maximale Spannweite für den Aufbau 5s-HL112 mit $L_{max} = 5,40$ m (Materialeinsparung 21,9 %) liegt damit knapp unter den beiden anderen Aufbauten.

7-1.1.2 Hybridquerschnitte

Die untersuchten Aufbauten sind in Tabelle 7-6 aufgelistet. Hierbei wurde konventionelles Brettsperrholz mit gesperrt verklebten Hohllamellen verglichen, welche Vollholzquerlagen aufweisen. Die Elemente setzen sich aus fünf Schichten zusammen, wobei die Längslagen eine Dicke von 40 mm und die Querlagen 20 mm aufweisen.

Tabelle 7-6: Aufbauten – Vergleichsrechnung Decke 5s-HL-VH

	Anzahl der Lagen [-]	Dicke [mm]	Grundmaterial [-]	E_0 [N/mm ²]	G_0 [N/mm ²]	G_{90} ¹⁾ [N/mm ²]
5s-HL86-VH ²⁾	5 – 40/ <u>20</u> /40/ <u>20</u> /40	160	HL86	13.500	810	50,0
5s-HL112-VH ²⁾	5 – 40/ <u>20</u> /40/ <u>20</u> /40	160	HL112	13.500	810	50,0
konv. BSP	5 – 40/ <u>20</u> /40/ <u>20</u> /40	160	C24	11.600	690	50,0

Anmerkung:

Die Abmessung der Querlagen sind mit Unterstrich gekennzeichnet.

¹⁾ effektiver Rollschubmodul der Querlage

²⁾ Querlagen aus Vollholz

Die Berechnung der Biegesteifigkeiten, der Schubsteifigkeiten und der Schubkorrekturfaktoren erfolgte analog zum Abschnitt 6-3.5. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-7 aufgelistet.

Tabelle 7-7: Querschnittskennwerte – Decke 5s-HL-VH

	$K_{CLT/HL}$ [kNm ²]	ΔK [%]	$S_{CLT/HL}$ [kN]	ΔS [%]	κ [-]
5s-HL86-VH ¹⁾	3.403	-3,50	15.085	-14,4	5,42
5s-HL112-VH ¹⁾	3.248	-7,90	14.450	-18,0	5,39
konv. BSP	3.526	-	17.628	-	4,81

Die Grenzspannweiten, bei vollständiger Ausnutzung der jeweiligen Querschnitte, sind in Tabelle 7-8 aufgelistet und in Abbildung 7-2 aufgelistet und jenen von konventionellem Brettsperrholz gegenübergestellt.

Tabelle 7-8: Ergebnisse der Vergleichsrechnung – Decke 5s-HL-VH

	5s-HL86-VH		5s-HL112-VH		konv. BSP
	L_{max} [m]	ΔBSP ¹⁾ [%]	L_{max} [m]	ΔBSP ¹⁾ [%]	L_{max} [m]
Biegung	10,0	102	9,82	99,8	9,84
Schub	32,3	50,4	25,0	39,0	64,1
Rollschub	29,1	104	29,4	105	28,0
Anfangsverformung	5,93	99,6	5,84	98,2	5,95
Endverformung	5,91	99,7	5,85	98,7	5,93
Eigenfrequenz	5,04	100	5,00	99,6	5,02
Steifigkeitskriterium	4,84	97,9	4,75	96,2	4,94

Anmerkung:

¹⁾ erzielbare Spannweiten im Vergleich zu konventionellen BSP

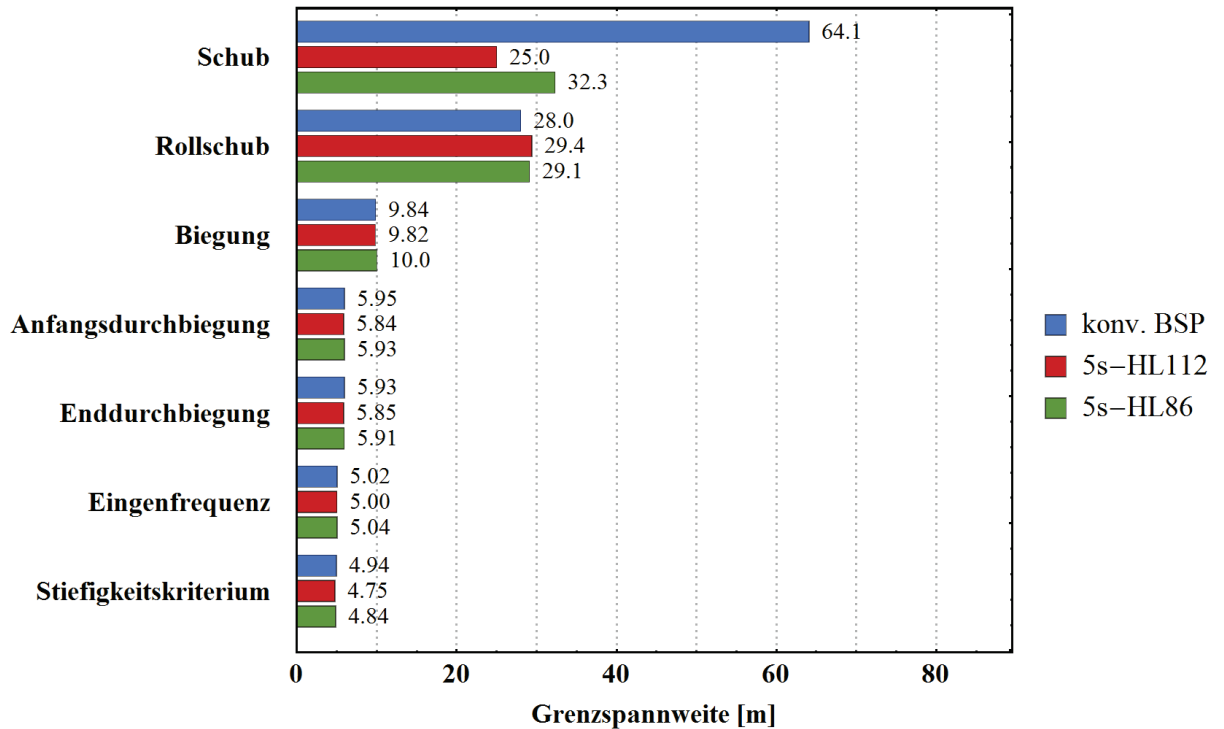


Abbildung 7-2: Ergebnisse der Vergleichsrechnung – Decke 5s-HL-VH

Nachweise der Tragfähigkeit ULS:

In Abbildung 7-2 ist ersichtlich, dass bei der Verwendung von Hohllamellen als Längslagen für gesperrte Aufbauten es zu einer erheblichen Reduzierung der Schubtragfähigkeit im Vergleich mit konventionellen Brettsperholz kommt. Durch die reduzierte Querschnittsbreite im Bereich der Steg liegen die Grenzspannweiten für Schub und Rollschub auf demselben Niveau.

Durch die höhere Biegefestigkeit der Hohllamellen liegen die erzielbaren Spannweiten trotz Materialeinsparungen (13,4 % für 5s-HL86-VH bzw. 16,4 % für 5s-HL112-VH) auf demselben Niveau wie konventionelles Brettsperholz.

Nachweise der Gebrauchstauglichkeit SLS:

Die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit sind jedoch für den vorliegenden Einsatz als Deckenelement maßgebend. Aufgrund des höheren E-Moduls der Hohllamellen, liegen die Grenzspannweiten jedoch auf ähnlichem Niveau.

Im Vergleich zu konventionellem BSP mit einer Grenzspannweite von $L_{max} = 4,94$ m, kann mit dem Querschnitt 5s-HL86-VH eine Grenzspannweite mit $L_{max} = 4,84$ m bei einer Materialeinsparung von 13,4 % erzielt werden.

Die maximale Spannweite für den Aufbau 5s-HL112-VH mit $L_{max} = 4,84$ m (Materialeinsparung 16,4 %) liegt damit knapp unter dem Aufbauten 5s-HL86-VH.

7-2 WAND

7-2.1 ABTRAGUNG VERTIKALER LASTEN

Zum Vergleich der Tragfähigkeiten der Hohlramelle im gesperrten Aufbau und konventionellen Brettsperrholz wurde eine Wand mit 3,0 m Höhe gewählt. Die Elemente setzen sich aus drei Schichten zu jeweils 40 mm Dicke zusammen. Die Abmessungen und die Materialkennwerte der verschiedenen Aufbauten sind der Tabelle 7-9 zu entnehmen.

Tabelle 7-9: Aufbauten – Vergleichsrechnung Wand 3s-HL

	Anzahl der Lagen [-]	Dicke [mm]	Grundmaterial [-]	$E_{0,05}^{1)}$ [N/mm ²]	$G_{0,05}^{1)}$ [N/mm ²]	$G_{90,05}^{1)}$ [N/mm ²]
3s-HL86	3 – 40/ <u>40</u> /40	120	HL86	11.250	675	33,6 ²⁾
3s-HL112	3 – 40/ <u>40</u> /40	120	HL112	11.250	675	25,0 ²⁾
konv. BSP	3 – 40/ <u>40</u> /40	120	C24	9.667	575	42,0

Anmerkung:

Die Abmessung der Querlagen sind mit Unterstrich gekennzeichnet.

¹⁾ 5 %-Quantil-Wert; Berechnung nach EN 1995-1-1 [13] mit $E_{05} = E_{mean} \cdot 5/6$ bzw. $G_{05} = G_{mean} \cdot 5/6$

²⁾ Werte aus FE-Berechnung (siehe Abschnitt 3-5.2)

Die Berechnung der Biegesteifigkeiten, der Schubsteifigkeiten und der Schubkorrekturfaktoren erfolgte analog zum Abschnitt 6-3.5 auf dem 5 %-Quantil-Niveau.

Tabelle 7-10: Querschnittskennwerte – Wand ohne Beanspruchung aus der Ebene

	$K_{CLT/HL,05}$ [kNm ²]	$S_{CLT/HL,05}$ [kN]	κ [-]	A_{net} [mm ²]	I_{net} [mm ⁴]	W_{net} [mm ³]
3s-HL86	1.300	4.992	8,89	65.674	$1,16 \cdot 10^8$	$1,93 \cdot 10^6$
3s-HL112	1.242	4.538	9,31	62.500	$1,10 \cdot 10^8$	$1,84 \cdot 10^6$
konv. BSP	1.340	7.370	6,47	80.000	$1,39 \cdot 10^8$	$2,31 \cdot 10^6$

Die Ergebnisse der Vergleichsrechnung sind in Tabelle 7-10 zusammengefasst. Die zulässigen Lasten beim Einsatz von Hohlramellen im gesperrten Aufbau liegen trotz der Materialeinsparungen bei rund 90 % der Traglast einer konventionellen Brettsperrholzwand.

Tabelle 7-11: Ergebnisse – Wand ohne Beanspruchung aus der Ebene

	$n_{d,max}$ [kN/m]	Tragfähigkeit ¹⁾ [%]	Materialeinsatz ²⁾ [%]
3s-HL86	780	96,6	82,1
3s-HL112	744	92,1	78,1
konv. BSP	808	100	100

Anmerkung:

¹⁾ bezogen auf konventionelles BSP

²⁾ eingesetztes Material in Bezug auf konventionelles BSP

7-2.2 ABTRAGUNG VERTIKALER LASTEN UND WINDBEANSPRUCHUNG

Die getroffenen Annahmen bezüglich des statischen Systems, der Bauteilabmessungen und verwendeten Materialparameter sind ident mit jenen im Abschnitt 7-2.1 getroffenen Annahmen. Beim betrachteten Bauteil handelt es sich um eine Außenwand mit einem Bemessungswert der Windlast von $w_d = 1,5 \text{ kN/m}^2$. Die Ergebnisse der Vergleichsrechnung sind in Tabelle 7-12 zusammengefasst.

Tabelle 7-12: Ergebnisse – Wand mit Beanspruchung aus der Ebene

	$n_{d,max}$ [kN/m]	Tragfähigkeit ¹⁾ [%]	Materialeinsatz ²⁾ [%]
3s-HL86	755	96,6	82,1
3s-HL112	719	92,0	78,1
konv. BSP	782	100	100

Anmerkung:

¹⁾ bezogen auf konventionelles BSP

²⁾ eingesetztes Material in Bezug auf konventionelles BSP

Es ist ersichtlich, dass die übertragbaren Lasten für gesperrte Aufbauten aus Hohllamellen nur geringfügig durch die Materialentnahme beeinflusst werden. Dies kann auf die höheren mechanischen Eigenschaften der HL zurückgeführt werden, wobei hier anzumerken ist, dass die Druckfestigkeit der Prototypen mit $f_{c,0,k} = 30,0 \text{ N/mm}^2$ aus den vorhandenen Prüfergebnissen abgeschätzt wurde und ein Stabilitätsversagen innerhalb der Hohllamelle nicht berücksichtigt wurde.

KAPITEL 8: RESÜMEE

Die Grundprodukte HL86 und HL112 weisen hohe mechanische Eigenschaften (Zug und Biegung) in Faserrichtung auf. Dies kann zum Teil auf das verwendete Grundmaterial aus kernfernen Bereichen (adultes Holz) zurückgeführt werden. Zusätzlich kommt es durch das Fügen mehrerer Holzteile zu einem Homogenisierungseffekt der mechanischen Eigenschaften. Aufgrund der Hohlräume müssen jedoch auch Abstriche bei gewissen Beanspruchungen gemacht werden. Die Prototypen weisen eine reduzierte Schubtragfähigkeit aufgrund der schmälere Stege auf. Ebenfalls verringert sich die Rollschubtragfähigkeit bzw. -steifigkeit durch die Aussparungen in den Hohl lamellen.

Die Fertigungsgenauigkeit der Prototypen führte im Bereich der Keilzinkenverbindung zu einer Reduktion der Verbundfläche und in weiterer Folge zu reduzierten Keilzinkenfestigkeiten. Die Festigkeit der Längsverbindung lag deutlich unter jener des Grundmaterials der Prototypen. Dies wurde auch bei den Prüfungen an gesperrt aufgebauten Produkten aus Hohl lamellen beobachtet. Durch Verbesserungen der Fertigungsgenauigkeit kann eine Steigerung der Keilzinkenfestigkeit erzielt werden, wodurch das Potential der Produkte vollständig genutzt werden kann.

Bei der Anwendung von Hohl lamellen im gesperrten Aufbau kommt es zu einer verringerten Rollschub- und Schubtragfähigkeit. Die verbleibende Festigkeit sind jedoch ausreichend, um im Bemessungsfall nicht maßgebend zu werden. Die maßgebenden Gebrauchstauglichkeitsnachweise führen zu rund 10 % kleineren erzielbaren Spannweiten bei Materialeinsparungen von bis zu 20 % im Vergleich mit konventionellem Brettsperholz mit identen Schichtdicken.

Eine mögliche Einschränkung stellt die geringe Querdruckfestigkeit von Elementen aus dem Prototypen HL112 dar. Die verbleibende Querdrucktragfähigkeit reicht jedoch für den Einsatz in Dachkonstruktionen aus. Bei der Verwendung von HL86 zum Aufbau gesperrter Bauteile liegt die Querdruckfestigkeit rund doppelt so hoch und damit würde eine ausreichende Tragfähigkeit für Deckenkonstruktionen in ein- bis zweigeschossigen Wohnbau vorhanden sein. Weitere Untersuchungen bezüglich teilflächiger Belastung ($k_{c,90}$ -Beiwerte) sind noch durchzuführen.

Einen weiteren Problempunkt stellt die Verbindungstechnik dar. Durch die Hohlräume reduzieren sich die Einbindelängen der Schrauben und folglich deren Tragfähigkeit. Da die Lage der Hohlräume nicht „planbar“ ist bzw. sie beim Einbau nicht mehr sichtbar sind, muss in der Bemessung demnach vom schlechtesten Fall ausgegangen werden. Bei Verschraubungen in den Schmalseiten der Elemente stellt sich zusätzlich das Problem, dass Schrauben zur Gänze in einem Hohlraum zum Liegen kommen können. Diese Probleme können zum Teil durch standardisierte Anschlusslösungen mit definierten Mindesteinbindelängen und Einschraubwinkeln behoben werden. Im Bereich der Verbindungstechnik für Bauteile hergestellt aus Hohl lamellen besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Zu klären sind noch die erforderlichen Randabstände von Schrauben und das Tragverhalten von auf Abscheren beanspruchten Verbindungsmitteln wie Rillennägeln.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass gesperrte Bauteile aus Hohl lamellen ein leistungsfähiges Produkt für den konstruktiven Einsatz darstellen und zusätzlich einen ressourcenschonenden Umgang mit dem natürlichen Werkstoff Holz fördern.

ANHANG

Inhaltsverzeichnis

ANHANG A: VERZEICHNISSE	A-2
A-1 LITERATURVERZEICHNIS	A-2
A-2 ABBILDUNGSVERZEICHNIS	A-5
A-3 TABELLENVERZEICHNIS	A-7
ANHANG B: GLEICHUNGEN VERGLEICHSRECHNUNG	B-12
B-1 DECKENSYSTEM (EINFELDTRÄGER)	B-12
B-2 WAND	B-16
ANHANG C: DETAILIERTE PRÜFERGEBNISSE	C-19
C-1 PRÜFUNGEN DER GRUNDPRODUKTE	C-19
C-2 PRÜFUNGEN AN HOHLLAMELLEN IM GESPERRTEN AUFBAU	C-25
ANHANG D: DIAGRAMME	D-27
D-1 PRÜFUNGEN DER GRUNDPRODUKTE	D-28
D-2 PRÜFUNGEN AN HOHLLAMELLEN IM GESPERRTEN AUFBAU	D-35
ANHANG E: BRUCHBILDER	E-48
E-1 PRÜFUNGEN DER GRUNDPRODUKTE	E-48
E-2 PRÜFUNGEN AN HOHLLAMELLEN IM GESPERRTEN AUFBAU	E-64

ANHANG A: VERZEICHNISSE

A-1 Literaturverzeichnis

- [1] T. Ehrhart, „Materialbezogene Einflussparameter auf die Rollschubeigenschaften in Hinblick auf Brettsperrholz,“ Technische Universität Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie, Graz, 2014.
- [2] proholz, „Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Holzwirtschaft,“ [Online]. Available: www.proholz.at/holzarten/. [Zugriff am 12 12 2014].
- [3] R. Brandner und G. Schickhofer, „APT 2.1.1 mature_wood: Quantifizierung ausgewählter Kenngrößen unter Vergleich juveniler und adulter Stammbereiche der Holzart Fichte,“ holz.bau forschung gmbh, Graz, 2012.
- [4] R. Brandner, *Präsentation Brettsperrholz: Technologie und Anwendung*, Internationales Holzbau Seminar, Volyne: TU Graz, 2011.
- [5] G. Schickhofer, T. Bogensperger und T. Moosbrugger, *BSPHandbuch - Holz-Massivbauweise auf Basis des neuen europäischen Normenkonzepts*, Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2010.
- [6] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM DIN 4074: Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2012.
- [7] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 338: Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2009.
- [8] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 1912: Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen - Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2013.
- [9] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 14081-1:Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende zwecke mit rechteckigem Querschnitt - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2014.
- [10] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 14080: Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2013.
- [11] R. Brandner, *Presentation: Modern Products and Solutions for the structural Use of Wood (Roofs and Houses)*, Building with Wood Seminar, Graz: TU Graz, 2010.

- [12] A. Ringhofer, „Dauerhafte Holz-Massivbauten durch interdisziplinäre Planung,“ in *1.KlagenfurterHolzbau-Fachtagung*, Klagenfurt, 2014.
- [13] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 1995-1-1: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1: Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*, CEN, Ed., Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2014.
- [14] Steidle, „Steidle,“ [Online]. Available: www.steidle.de. [Zugriff am 06 03 2015].
- [15] M. Augustin, G. Silly und A. Thiel, „Möglichkeiten zu einer ressourcenschoneneren Produktion von BSP-Elementen,“ *holz.bau forschung gmbh*, Graz, 2013.
- [16] M. Schmidt, M. Frese, H. J. Blaß und P. Glos, „Hochfestes Brettschichtholz aus Buche in Deutschland bauaufsichtlich zugelassen,“ 2009.
- [17] Lignatur AG, „Lignatur,“ [Online]. Available: <http://www.lignatur.ch/>. [Zugriff am 08 01 2015].
- [18] Lignotrend, „Lignotrend,“ [Online]. Available: www.lignotrend.de. [Zugriff am 09 01 2015].
- [19] Kulmer, „Kulmerbau,“ [Online]. Available: www.kulmerbau.at. [Zugriff am 12 01 2015].
- [20] H. Ylli, „Versuchstechnische Ermittlung von Querdruckkenngrößen für Brettsperrholz,“ Technische Universität Graz, Graz, 2008.
- [21] B. Bendtsen, „Rolling Shear Characteristics fo Nine Structural Sofwoods,“ *Forest Product Journal No. 11*, 1976.
- [22] A. Jakobs, „Zur Berechnung von Brettlagenholz mit starrem und nachgiebigen Verbund unter plattenartiger Belastung mit besonderer Berücksichtigung des Rollschubes und der Drillweichheit,“ Universität der Bundeswehr München Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, München, 2005.
- [23] S. Aicher und G. Dill-Langer, „Basic Sondersiderations to Rolling Shear Moduls in Wooden Boards,“ *Otto-Graf-Journal Nr. 11*, 2001.
- [24] I. Feichter, „Spannungs- und Traglastberechnungen an ausgewählten Problemen der Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz,“ Technische Universität Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie, Graz, 2013.
- [25] G. R., „Ein Verfahren zur Ermittlung des Rollschubmoduls von Holz,“ *Holz als Roh und Werkstoff Nr. 60*, 2002.
- [26] Dlubal, *Dlubal RFEM 5.04*.
- [27] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 15497: Keilgezinktes Vollholz für tragende Zwecke - Leistungsanforderung an die Herstellung*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2014.
- [28] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 16351: Holzbauwerke - Brettsperrholz - Anforderungen*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2012.

- [29] P. Niemz, „Physik des Holzes,“ ETH Zürich, Institut für Bausoffe, Zürich, 2005.
- [30] J. Dinwoodie, Timber: Its nature and behaviour - Second Edition, London: E & FN Spon, 2000.
- [31] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 1156: Holzwerkstoffe - Bestimmung von Zeitstandfestigkeit und Kriechzahl*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2013.
- [32] E. Schaffer, „Modelling the creep of wood in changing moisture environment,“ *Wood and Fiber Vol.3*, 1972.
- [33] R. Davidson, „The influence of temperature on creep in wood,“ *Forest Product Journal Vol.12*, pp. 377-381, 1962.
- [34] L. Bach und J. McNatt, „Creep of OSB with various strand alignments,“ in *IUFRO S5.02*, St.John, 1990.
- [35] P. Morlier, Rilem Report 8 - Creep in Timber Structures, London: E & FN SPON, 1994.
- [36] B. Madsen, Structural behaviour of timber, Vancouver: Timber Engineering Ltd., 1992.
- [37] K. De Borst, C. Jenkel, C. Montero, J. Colmars und J. Gril, „Mechanical characterization of wood: An integrative approach ranging from nanoscale to structure,“ *Computers and Structures*, pp. 53-67, 2013.
- [38] R. Jöbstl und G. Schickhofer, „Comparative examination of creep of GLT- and CLT-slabs in bending,“ Proceedings of CIB W18/40-12-3, Bled, 2007.
- [39] S. Nakajima, A. Miyatake, T. Tatsuya Shibuwasa, Y. Araki, N. Yamaguch, T. Haramiishi, N. Ando und M. Yasumura, „CREEP AND DURATION OF LOAD CHARACTERISTICS OF CROSS LAMINATED TIMBER,“ in *World Conference on Timber Engineering*, Quebec, 2014.
- [40] G. Silly und G. Schickhofer, „Kriechverhalten von schubbeanspruchten Bauholz,“ holz.bau forschungs GmbH, Graz, 2012.
- [41] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 408: Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2012.
- [42] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 1382: Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmitteln*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 1999.
- [43] DIBt, *CUAP 06.03/08: Self-tapping screws for use in timber constructions*, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2010.
- [44] Microsoft, *Excel 2010*.
- [45] Wolfram Research, *Mathematica 9.0.1.0*.

- [46] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 13183-1: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2004.
- [47] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM ISO 3131: Holz - Bestimmen der Dichte für physikalische und mechanische Prüfungen*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 1996.
- [48] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 384: Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2010.
- [49] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 14358: Holzbauwerke - Berechnung der 5%-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2007.
- [50] A. Ringhofer, R. Brandner, F. Georg und G. Schickhofer, „Axial beanspruchte Holzschrauben in Vollholz, Brettschichtholz und Brettsperrholz,“ *Bautechnik 92, Heft 11*, pp. 770-782, 2015.
- [51] P. Gressel, „Zur Verhersage des langfristigen Formänderungsverhaltens aus Kurz-Kriechversuchen,“ *Holz als Roh und Werkstoff, Volume 42*, pp. 293-301, August 1984.
- [52] OIB, *ETA-12/0373: Selbstbohrende Schrauben zur Verwendung im Holzbau*, Wien: OIB, 2012.

A-2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Querschnitt eines Holzstammes (Lärche), [1], [2].....	3
Abbildung 2-2:	Holzqualität Stamm, [4].....	4
Abbildung 2-3:	Ingenieurmäßige Betrachtung von Holz, [5].....	5
Abbildung 2-4:	Übersicht Holzwerkstoffe.....	7
Abbildung 2-5:	Aufbau Brettschichtholz, [4].....	8
Abbildung 2-6:	Aufbau Brettsperrholz, [11].....	9
Abbildung 2-7:	Überblick: Einsatzbereiche Brettsperrholz, [4].....	9
Abbildung 2-8:	weltweiter Absatz BSP, [12].....	10
Abbildung 2-9:	Spannungsverlauf BSP.....	11
Abbildung 2-10:	Anteile der Gesamtverformung bei biegebeanspruchtem BSP.....	12
Abbildung 2-11:	Grenzspannweiten eines Einfeldträgers für die einzelnen Nachweisen.....	13
Abbildung 2-12:	Spannungsverteilung Vollquerschnitt und I-Profil.....	14
Abbildung 2-13:	mögliche Ausführungen von Schalungsträger (links: Vollholz, rechts: Gittersteg), [14]	15
Abbildung 2-14:	Buchen-Fichten BSH (links) Buchen BSH (rechts), [16].....	16
Abbildung 2-15:	Lignatur Flächenelement, [17].....	17

Abbildung 2-16:	Lignotrend Hohlkastenelement, [18].....	17
Abbildung 2-17:	Kielstegträger Fa. Kulmer, [19]	17
Abbildung 3-1:	Geometrie HL86.....	20
Abbildung 3-2:	Geometrie HL112.....	20
Abbildung 3-3:	Querdruckverteilung Hohlramelle (links:-geschichtet, rechts: gesperrt).....	23
Abbildung 3-4:	Übersicht Schubebenen im Werkstoff Holz (A & B: Schub parallel zur Faser , C & D: Schub quer zur Faser – Rollschub), [1].....	23
Abbildung 3-5:	qualitativer Schubspannungsverlauf für fünfschichtiges HL-BSH nach Gleichung (3.8)	25
Abbildung 3-6:	Zusammenhang der Rollschubkenngrößen und der Rohdichte nach [21], aus [1].....	25
Abbildung 3-7:	Zusammenhang zwischen Rollschubfestigkeit und der Rohdichte (1.1-Fichte, 2.1-Birke, 2.2-Esche, 2.3-Pappel, 2.4-Buche, 2.5-Kiefer) aus [1].....	26
Abbildung 3-8:	Nomogramm Faktor „uprozent“ in Abhängigkeit von h/b (h=d=Dicke, b=Breite) aus [22]	26
Abbildung 3-9:	Rollschubkenngrößen in Abhängigkeit vom h/b-Verhältnis aus [1]	27
Abbildung 3-10:	theoretischer Rollschubmodul in Abhängigkeit der Jahrringneigung (β) aus [24]	28
Abbildung 3-11:	Rollschubmodul in Abhängigkeit der Jahrringneigung aus [25].....	28
Abbildung 3-12:	Rollschubmodul in Abhängigkeit von der Jahrringlage aus [1].....	29
Abbildung 3-13:	Rollschub Hohlramelle in Querlage	29
Abbildung 3-14:	Schubspannungsverlauf eines BSP-Querschnitts mit aufgelöster Querlage aus [24] .	30
Abbildung 3-15:	FE-Modell zur Ermittlung des effektiven Rollschubmoduls des Prototypen HL86 ...	32
Abbildung 3-16:	Qualitative Spannungsverlauf Hohlramelle unter Rollschub (links: $E_x = 370 \text{ N/mm}^2$, rechts: $E_x = 0 \text{ N/mm}^2$).....	33
Abbildung 3-17:	Parameter Keilzinkengeometrie	35
Abbildung 3-18:	Verformung von Holz unter Belastung, [30].....	37
Abbildung 3-19:	Phasen der Kriechverformung, [29]	38
Abbildung 3-20:	Zusammenhang zwischen der Kriechverformung und der Holzfeuchte bei Fichtenholz unter Biegung aus [35]	39
Abbildung 3-21:	Kriechverhalten in Abhängigkeit von der Belastungsart aus [37].....	39
Abbildung 3-22:	Kriechverhalten von BSP und BSH in verschiedenen Nutzungsklassen und Belastungsniveaus über den Zeitraum eines Jahres aus [38].....	40
Abbildung 4-1:	Produktionsablauf Hohlramelle.....	47
Abbildung 4-2:	aus Hohlramellen aufgebaute Tragstruktur	47
Abbildung 4-3:	Geometrie Hohlramelle HL86	48
Abbildung 4-4:	Geometrie Hohlramelle HL112	49
Abbildung 4-5:	Geometrie fünfschichtiger gesperrter Aufbau (5s-HL86-VH).....	50
Abbildung 4-6:	geometrische Unterschiede in den Stirnseiten.....	51
Abbildung 4-7:	Geometrie dreischichtiger gesperrter Aufbau (3s-HL86).....	52
Abbildung 4-8:	Prüfkonfiguration Z-HL86 und Z-HL112	53

Abbildung 4-9:	Prüfkonfiguration Z-HL86-KZ und Z-HL112-KZ	54
Abbildung 4-10:	Prüfkonfiguration B-HL86-FK und B-HL112-FK	55
Abbildung 4-11:	Prüfkonfiguration B-HL86-FK-KZ und B-HL112-FK-KZ	56
Abbildung 4-12:	Prüfkonfiguration B-HL86-FK-II	57
Abbildung 4-13:	Prüfkonfiguration B-HL86-HK	58
Abbildung 4-14:	Prüfkonfiguration PB-5s-HL86-VH	59
Abbildung 4-15:	Prüfkonfiguration PB-3s-HL86	60
Abbildung 4-16:	Prüfkonfiguration PS-5s-HL86-VH.....	61
Abbildung 4-17:	Prüfkonfiguration Querdruck.....	62
Abbildung 4-18:	Prüfvariationen Querdruck.....	62
Abbildung 4-19:	Prüfkonfiguration Kriechen	64
Abbildung 4-20:	Prüfkonfiguration Schraubenauszieh Widerstand.....	65
Abbildung 4-21:	Ermittlung $F_{c,90,max}$	71
Abbildung 5-1:	Temperatur- und Luftfeuchteverlauf.....	93
Abbildung 5-2:	k_c -Werte der Serie K-5s-HL86-VH	94
Abbildung 5-3:	k_c -Werte der Serie K-3s-HL86.....	96
Abbildung 6-1:	Boxplot Keilzinkenfestigkeit des Grundproduktes	108
Abbildung 6-2:	Fehlflächen in Keilzinke durch Versatz in Stegen.....	109
Abbildung 6-3:	Stegversatz in Keilzinkenverbindung (HL86)	110
Abbildung 6-4:	Boxplot Biegefestigkeit Hohlramelle im gesperrten Aufbau nach Bruchursache aufgeteilt	112
Abbildung 6-5:	Bruchbilder Keilzinken im Biegezugbereich (links: Ausziehen der Keilzinken, rechts: nicht vollständig gefräzte Keilzinke).....	112
Abbildung 6-6:	Rollschubversagen der Querlage	114
Abbildung 6-7:	Einfluss der Steifigkeit auf die Querdruckfestigkeit.....	116
Abbildung 6-8:	Bruchbilder Querdruckprüfungen (links: QD-HL86-BSH, rechts: QD-HL86-BSP)	116
Abbildung 6-9:	Zusammenhang zwischen E-Modul und Querdruckfestigkeit.....	117
Abbildung 6-10:	Boxplot Querdruckfestigkeit bezogen auf Nettoquerschnitt.....	117
Abbildung 6-11:	Hohlramellen im gesperrten Aufbau (HL 86).....	119
Abbildung 6-12:	Vergleich zwischen lokalem und globalem E-Modul der Prüfserie PB-3s-HL86	120
Abbildung 6-13:	verschmierter Deformationsbeiwert k_{def} in Abhängigkeit von Schichtanzahl und L/H-Verhältnis.....	123
Abbildung 6-14:	Boxplot Ausziehfestigkeit $f_{ax,korr}$ bei $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$	126
Abbildung 7-1:	Ergebnisse der Vergleichsrechnung – Decke 5s-HL	131
Abbildung 7-2:	Ergebnisse der- Vergleichsrechnung – Decke 5s-HL-VH	133

A-3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Vergleich juveniles/adultes Holz.....	4
Tabelle 2-2:	Auszug Festigkeitsklassen Holz für tragende Zwecke lt. EN 338	6
Tabelle 2-3:	Auszug Festigkeitsklassen Brettschichtholz lt. EN 14080	8
Tabelle 2-4:	Querschnittsvergleich Geometrie	15
Tabelle 2-5:	Querschnittsvergleich Materialeigenschaften,(Quelle: [15])	16
Tabelle 3-1:	Abmessungen Hohl lamellenprototypen HL86 und HL112.....	19
Tabelle 3-2:	Anforderung an die Grundprodukte HL86 und HL112 für die Zugkennwerte eines vergleichbaren homogenen Querschnitts	21
Tabelle 3-3:	Anforderung an die Grundprodukte HL86 und HL112 für die Biegekennwerte eines vergleichbaren homogenen Querschnitts	21
Tabelle 3-4:	Anforderung an die Grundprodukte HL86 und HL112 für die Querdrucktragfähigkeit eines vergleichbaren homogenen Querschnitts	22
Tabelle 3-5:	Richtungsabhängige Schubkenngrößen von Holz.....	24
Tabelle 3-6:	Anforderung an die Grundprodukte HL86 und HL112 für die Schubtragfähigkeit eines vergleichbaren homogenen Querschnitts	24
Tabelle 3-7:	scheinbarer Rollschubmodul bei der Verwendung von HL in der Querlage nach [22]	31
Tabelle 3-8:	Materialkennwerte FE-Modell	32
Tabelle 3-9:	effektiver Rollschubmodul aus FE-Berechnung ($E_x = 0 \text{ N/mm}^2$)	34
Tabelle 3-10:	effektiver Rollschubmodul aus FE-Berechnung ($E_x = 370 \text{ N/mm}^2$)	34
Tabelle 3-11:	Auszug gängige Keilzinkengeometrien, [27].....	35
Tabelle 3-12:	erforderliche Keilzinkenfestigkeiten lt. EN 14080 [10].....	36
Tabelle 3-13:	erforderliche Keilzinkenfestigkeiten lt. EN 16351 [28].....	36
Tabelle 3-14:	k_{def} -Werte für BSP, [38]	40
Tabelle 3-15:	k_{def} -Werte lt. EN 1995-1-1 [13].....	41
Tabelle 4-1:	durchgeführte Prüfungen an den Grundprodukten.....	44
Tabelle 4-2:	durchgeführte Prüfungen – Hohl lamelle im gesperrten Aufbau	44
Tabelle 4-3:	durchgeführte Prüfungen an Verbindungsmitteln (Schrauben).....	44
Tabelle 4-4:	Soll-Ist-Vergleich Geometrie HL86.....	48
Tabelle 4-5:	Soll-Ist-Vergleich Geometrie HL112.....	49
Tabelle 4-6:	Geometrie 5s-HL86-VH.....	50
Tabelle 4-7:	Geometrie 3s-HL86.....	51
Tabelle 4-8:	Abmessung und Prüfkfiguration der Prüfserie Z-HL86 und Z-HL112.....	53
Tabelle 4-9:	Abmessung und Prüfkfiguration der Prüfserie Z-HL86-KZ und Z-HL112-KZ.....	54
Tabelle 4-10:	Abmessung und Prüfkfiguration der Prüfserie B-HL86-FK und B-HL112-FK.....	55
Tabelle 4-11:	Abmessung und Prüfkfiguration der Prüfserie B-HL86-FK-KZ und B-HL112-FK-KZ	56
Tabelle 4-12:	Abmessung und Prüfkfiguration der Prüfserie B-HL86-FK-II	57
Tabelle 4-13:	Abmessung und Prüfkfiguration der Prüfserie B-HL86-HK.....	58

Tabelle 4-14:	Abmessung und Prüfkonfiguration der Prüfserie PB-5s-HL86-VH	59
Tabelle 4-15:	Abmessung und Prüfkonfiguration der Prüfserie PB-3s-HL86	60
Tabelle 4-16:	Abmessung und Prüfkonfiguration der Prüfserie PS-5s-HL86-VH.....	61
Tabelle 4-17:	Abmessung und Prüfkonfiguration der Prüfserie Kriechen 5s-BSP	63
Tabelle 4-18:	Abmessung und Prüfkonfiguration der Prüfserie Kriechen 3s-BSP	63
Tabelle 4-19:	Last und Ausnutzungsgrade Kriechversuche.....	64
Tabelle 4-20:	Eindringtiefen bzw. effektive Gewindelängen der einzelnen Prüfserien.....	65
Tabelle 4-21:	Materialeigenschaften – Berechnung K_{CLT}	67
Tabelle 4-22:	Materialeigenschaften – Berechnung S_{CLT}	68
Tabelle 4-23:	Auszug k_s -Werte lt. EN 14358 [49] bzw. berechnete Werte	74
Tabelle 5-1:	Prüfergebnisse der Prüfserie Z-HL86	75
Tabelle 5-2:	Prüfergebnisse der Prüfserie Z-HL86-KZ.....	76
Tabelle 5-3:	Prüfergebnisse der Prüfserie Z-HL112	77
Tabelle 5-4:	Prüfergebnisse der Prüfserie Z-HL112-KZ.....	78
Tabelle 5-5:	Prüfergebnisse der Prüfserie B-HL86-FK.....	79
Tabelle 5-6:	Prüfergebnisse der Prüfserie B-HL86-FK-II.....	80
Tabelle 5-7:	Prüfergebnisse der Prüfserie B-HL86-FK-KZ.....	81
Tabelle 5-8:	Prüfergebnisse der Prüfserie B-HL86-HK.....	82
Tabelle 5-9:	Prüfergebnisse der Prüfserie B-HL112-FK.....	83
Tabelle 5-10:	Prüfergebnisse der Prüfserie B-HL112-FK-KZ.....	84
Tabelle 5-11:	Prüfergebnisse der Prüfserie PB-5s-HL86-VH.....	85
Tabelle 5-12:	Prüfergebnisse der Prüfserie PB-3s-HL86.....	86
Tabelle 5-13:	Prüfergebnisse der Prüfserie PS-5s-HL86-VH	87
Tabelle 5-14:	Prüfergebnisse der Prüfserie QD-HL86-BSH (geschichteter Aufbau)	88
Tabelle 5-15:	Prüfergebnisse der Prüfserie QH-HL86-BSP (gesperrter Aufbau).....	89
Tabelle 5-16:	Prüfergebnisse der Prüfserie QH-HL86-VH (alternierender Aufbau Vollholz - Hohllamelle)	90
Tabelle 5-17:	Prüfergebnisse der Prüfserie QD-HL112-BSH (geschichteter Aufbau)	91
Tabelle 5-18:	Prüfergebnisse der Prüfserie QD-HL112-BSP (gesperrter Aufbau).....	92
Tabelle 5-19:	Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit Klimakammer.....	93
Tabelle 5-20:	Modellparameter K-5s-HL86-VH	94
Tabelle 5-21:	Ergebnisse - $k_{c,50Y,NK1}$ -Werte nach Modellen aufgeschlüsselt.....	95
Tabelle 5-22:	Modellparameter K-3s-HL86.....	96
Tabelle 5-23:	Ergebnisse - $k_{c,50Y,NK1}$ -Werte nach Modellen aufgeschlüsselt.....	97
Tabelle 5-24:	Prüfergebnisse der Prüfserie SA-1-V-60 (Steg, Ø 8 mm Eindringtiefe 60 mm)	98
Tabelle 5-25:	Prüfergebnisse der Prüfserie SA-1-H-60 (Hohlraum, Ø 8 mm Eindringtiefe 60 mm)	99

Tabelle 5-26:	Prüfergebnisse der Prüferserie SA-1-V-115 (Steg, Ø 8 mm Eindringtiefe 115 mm)...	99
Tabelle 5-27:	Prüfergebnisse der Prüferserie SA-1-H-115 (Hohlraum, Ø 8 mm Eindringtiefe 115 mm)	100
Tabelle 5-28:	Prüfergebnisse der Prüferserie SA-2-V-60 (Steg, Ø 8 mm Eindringtiefe 60 mm).....	101
Tabelle 5-29:	Prüfergebnisse der Prüferserie SA-2-H-60 (Hohlraum, Ø 8 mm Eindringtiefe 60 mm)	101
Tabelle 5-30:	Prüfergebnisse der Prüferserie SA-2-V-115 (Steg, Ø 8 mm Eindringtiefe 115 mm).	102
Tabelle 5-31:	Prüfergebnisse der Prüferserie SA-2-H-115 (Hohlraum, Ø 8 mm Eindringtiefe 115 mm)	103
Tabelle 6-1:	Zusammenfassung der Prüfergebnisse HL86.....	105
Tabelle 6-2:	Zusammenfassung der Prüfergebnisse HL112.....	105
Tabelle 6-3:	Ergebnis Stichprobenvergleich Prototypenserien HL86 und HL112.....	106
Tabelle 6-4:	mechanische Eigenschaften des Grundmaterials (Prüfserien HL86 & HL112).....	106
Tabelle 6-5:	mechanische Eigenschaften des Grundproduktes bezogen auf den Bruttoquerschnitt	107
Tabelle 6-6:	Gegenüberstellung Biege- und Zugfestigkeit des Grundproduktes und der Keilzinkenverbindung.....	108
Tabelle 6-7:	erforderliche Biege- und Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung lt. EN 16351 [28]	109
Tabelle 6-8:	theoretische Flächenreduktion nach Gleichung (6.3).....	110
Tabelle 6-9:	Zusammenfassung der Prüfergebnisse PB-5s-HL86-VH.....	111
Tabelle 6-10:	Zusammenfassung der Prüfergebnisse PB-3s-HL86.....	111
Tabelle 6-11:	Vergleich Tragfähigkeit Modell – Prüfungen	113
Tabelle 6-12:	Rollschubfestigkeit HL86 – Prüferserie PB-3s-HL86.....	114
Tabelle 6-13:	Zusammenfassung Querdrukfestigkeit.....	115
Tabelle 6-14:	Kennwerte der einzelnen Schichten zur Bestimmung des Schubkorrekturfaktors....	119
Tabelle 6-15:	Querschnittskennwerte	119
Tabelle 6-16:	Ergebnisse - k_{def} ($k_{c,50Y,NK1}$)	121
Tabelle 6-17:	Kriechfaktor Rollschub $k_{def,9090}$ aus Versuchen rückgerechnet	122
Tabelle 6-18:	Materialparameter	122
Tabelle 6-19:	Aufbauten – k_{def} – Berechnung Hohllamelle.....	124
Tabelle 6-20:	verschmierte k_{def} – Beiwerte Hohllamelle.....	124
Tabelle 6-21:	Kennwerte der verwendeten Schraube.....	125
Tabelle 6-22:	Vergleich der Tragfähigkeit von selbstbohrenden Holzschraube (Schraube senkrecht zur Breite bzw. Plattenebene).....	127
Tabelle 6-23:	Vergleich der Tragfähigkeit von selbstbohrenden Holzschraube (Schraube in Schmalseite eingedreht)	127
Tabelle 7-1:	Zusammenstellung Baustoffkennwerte – gesperrter Aufbau	129
Tabelle 7-2:	Einwirkungen – Vergleichsrechnung Decke.....	129

Tabelle 7-3:	Aufbauten – Vergleichsrechnung Decke 5s-HL	130
Tabelle 7-4:	Querschnittskennwerte – Decke 5s-HL	130
Tabelle 7-5:	Ergebnisse der Vergleichsrechnung – Decke 5s-HL	130
Tabelle 7-6:	Aufbauten – Vergleichsrechnung Decke 5s-HL-VH	132
Tabelle 7-7:	Querschnittskennwerte – Decke 5s-HL-VH	132
Tabelle 7-8:	Ergebnisse der Vergleichsrechnung – Decke 5s-HL-VH	132
Tabelle 7-9:	Aufbauten – Vergleichsrechnung Wand 3s-HL	134
Tabelle 7-10:	Querschnittskennwerte – Wand ohne Beanspruchung aus der Ebene	134
Tabelle 7-11:	Ergebnisse – Wand ohne Beanspruchung aus der Ebene	134
Tabelle 7-12:	Ergebnisse – Wand mit Beanspruchung aus der Ebene	135

ANHANG B: GLEICHUNGEN VERGLEICHSRECHNUNG

B-1	DECKENSYSTEM (EINFELDTRÄGER)	B-12
B-2	WAND	B-16
B-2-1	Vertikale Lasten	B-16
B-2-2	Schubbelastung in Platenebene	B-17

B-1 Deckensystem (Einfeldträger)

Biegung:

$$M_d = \frac{(g_d + q_d) \cdot l^2}{8} \quad (8.1)$$

$$\sigma_d = \frac{M_d}{K_{CLT}} \cdot \frac{t_{ges}}{2} \cdot E_0 \quad (8.2)$$

$$l = \sqrt{\frac{16 \cdot \sigma_b \cdot K_{CLT}}{E_0 \cdot (g_d + q_d) \cdot t_{ges}}} \quad (8.3)$$

Dabei sind:

- M_d Biegemoment in Feldmitte [kNm/m]
- σ_b Biegerandspannung in Feldmitte [kN/m²]
- g_d Designlast Eigengewicht [kN/m²]
- q_d Designlast Nutzlast [kN/m²]
- t_{ges} Gesamtdicke Element [m]
- E_0 Referenz-E-Modul des Elementes [kN/m²]
- K_{CLT} Biegesteifigkeit BSP bzw. HL im gesperrten Aufbau [kNm²/m]
- S_{CLT} Schubsteifigkeit BSP bzw. HL im gesperrten Aufbau [kN/m]
- l Spannweite Einfeldträger [m]

Schub / Rollschub:

$$V_{z,d} = \frac{(g_d + q_d) \cdot l}{2} \quad (8.4)$$

$$\tau_v(z) = \frac{V_z \cdot \int_{-t/2}^z (b(z_1) \cdot E(z_1) \cdot z_1) dz_1}{K_{CLT} \cdot b(z)} \quad (8.5)$$

$$l = \frac{2 \cdot V_v}{(g_d + q_d)} \quad (8.6)$$

Dabei sind:

- K_{CLT} Biegesteifigkeit BSP bzw. HL im gesperrten Aufbau [kNm²/m]
- τ_v Schubspannung [kN/m²]
- g_d Designlast Eigengewicht [kN/m²]
- q_d Designlast Nutzlast [kN/m²]
- l Spannweite Einfeldträger [m]

Durchbiegung:

$$w(L/2) = \frac{5 \cdot (g_d + q_d) \cdot l^4}{384 \cdot K_{CLT}} + \frac{(g_d + q_d) \cdot l^2}{8 \cdot S_{CLT}} \quad (8.7)$$

$$w_{grenz} = \frac{l}{k} \quad (8.8)$$

$$l = \dots \quad (8.9)$$

Dabei sind:

- w Durchbiegung in Feldmitte [m]
- K_{CLT} Biegesteifigkeit BSP bzw. HL im gesperrten Aufbau [kNm²/m]
- S_{CLT} Schubsteifigkeit BSP bzw. HL im gesperrten Aufbau [kN/m]
- g_d Designlast Eigengewicht [kN/m²]
- q_d Designlast Nutzlast [kN/m²]
- l Spannweite Einfeldträger [m]
- w_{grenz} erlaubte Durchbiegung [m]
- k Zahl zur Begrenzung der Durchbiegung lt. EC5 [13] (z.B.: 300) [-]

Schwingung:

-Eigenfrequenz

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \sqrt{\frac{(E \cdot I)_{l,eff}}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{l}{b}\right)^4 \cdot \frac{(E \cdot I)_{b,eff}}{(E \cdot I)_{l,eff}}} \quad (8.10)$$

$$(E \cdot I)_{eff} = \left(\frac{1}{K_{CLT} + EI_{Estrich}} + \frac{11,52}{S_{CLT} \cdot l^2} \right)^{-1} \quad (8.11)$$

Dabei sind:

- f_1 erste Eigenfrequenz des Aufbaus [Hz]
- $(EI)_{l,eff}$ effektive Biegesteifigkeit längs BSP bzw. HL im gesperrten Aufbau [kNm²/m]
- $(EI)_{b,eff}$ effektive Biegesteifigkeit quer BSP bzw. HL im gesperrten Aufbau [kNm²/m]
- $EI_{Estrich}$ Biegesteifigkeit Estrich [kNm²/m]
- K_{CLT} Biegesteifigkeit BSP bzw. HL im gesperrten Aufbau [kNm²/m]
- S_{CLT} Schubsteifigkeit BSP bzw. HL im gesperrten Aufbau [kN/m]
- l Spannweite Einfeldträger [m]
- b Breite der Decke (Abmessung quer zur Spannweite) [m]
- m Masse der Decke [kg]

-Steifigkeitskriterium

$$w_{stat} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot (K_{CLT} + EI_{Estrich}) \cdot b_F} + \frac{F \cdot l}{4 \cdot S_{CLT} \cdot b_F} \quad (8.12)$$

$$b_F = \frac{l}{1,1} \sqrt[4]{\frac{(E \cdot I)_{b,eff}}{(E \cdot I)_{l,eff}}} \quad (8.13)$$

Dabei sind:

- w_{stat} Durchbiegung in Feldmitte [mm]
- F Einzellast in Feldmitte $F = 1$ kN [kN]
- $(EI)_{l,eff}$ effektive Biegesteifigkeit längs BSP bzw. HL im gesperrten Aufbau [kNm²/m]
- $(EI)_{b,eff}$ effektive Biegesteifigkeit quer BSP bzw. HL im gesperrten Aufbau [kNm²/m]
- $EI_{Estrich}$ Biegesteifigkeit Estrich [kNm²/m]
- K_{CLT} Biegesteifigkeit BSP bzw. HL im gesperrten Aufbau [kNm²/m]
- S_{CLT} Schubsteifigkeit BSP bzw. HL im gesperrten Aufbau [kN/m]
- l Spannweite Einfeldträger [m]
- b_F mitwirkende Breite [m]

-Beschleunigungskriterium

$$a_{rms} = \frac{0,4 \cdot \alpha \cdot F_0}{2 \cdot \zeta \cdot M^*} \quad (8.14)$$

$$M^* = m \cdot \frac{l}{2} \cdot b_F \quad (8.15)$$

Dabei sind:

- a_{rms} Beschleunigung [m/s²]
- F_0 Einzellast gehende Person $F_0 = 700$ N [kN]
- m Masse der Decke [kg]
- M^* modale Masse [kg]
- l Spannweite Einfeldträger [m]
- b_F mitwirkende Breite [m]
- α Fourierkoeffizient $\alpha = e^{-0,4 \cdot f_1}$ [-]
- ζ modaler Dämpfungsgrad für BSP gilt $\zeta = 0,04$ [-]

Die in der ÖNORM B 1995-1-1 [13] festgelegten Grenzwerte der Eigenfrequenz, des Steifigkeitskriteriums und des Beschleunigungskriteriums sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** angeführt. Das Beschleunigungskriterium wird nur tragend, falls die Eigenfrequenz sich zwischen dem Grenzwert der Deckenklasse und der Mindestfrequenz von 4,5 Hz liegt. Das Steifigkeitskriterium muss immer eingehalten werden und darf nicht überschritten werden.

Tabelle Anhang B-1: Grenzwerte – Schwingungsnachweis lt. ÖNORM B 1995-1-1 [13]

	Deckenklasse I	Deckenklasse II	Deckenklasse III
Eigenfrequenz ¹⁾	≥ 8 HZ	≥ 6 HZ	-
Steifigkeitskriterium ²⁾	≤ 0,25 mm	≤ 0,50 mm	-
Beschleunigungskriterium ³⁾	≤ 0,05 m/s ²	≤ 0,10 m/s ²	-

Anmerkung:

¹⁾ Der Grenzwert kann unterschritten werden wenn 2) & 3) eingehalten werden, jedoch mindestens 4,5 Hz

B-2 Wand

B-2-1 Vertikale Lasten

Der Nachweis der Wände unter vertikalen Lasten erfolgte nach dem in [5] postulierten Verfahren. Die verwendeten Gleichungen sind in (8.16) bis (8.22) angeführt.

Die Verzweigungslast für den angenommenen Euler-Fall ii berechnet sich nach (8.16).

$$n_{cr} = \frac{K_{CLT,05} \cdot \pi^2}{L_k^2 \cdot \left(1 + \frac{K_{CLT,05}}{S_{CLT,05} \cdot L_k^2} \right)} \quad (8.16)$$

Dabei sind:

- n_{cr} Verzweigungslast [kN/m]
- $K_{CLT,05}$ Biegesteifigkeit BSP bzw. HL im gesperrten Aufbau [kNm²/m]
- $S_{CLT,05}$ Schubsteifigkeit BSP bzw. HL im gesperrten Aufbau [kN/m]
- L_k Höhe der Wand [m]

Bestimmung des Knickbeiwertes k_c :

$$k_c = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \end{array} \right. \quad (8.17)$$

mit
$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{A_{net} \cdot f_{c,0,k}}{n_{cr}}} \quad (8.18)$$

und mit
$$k = 0,5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0,30) + \lambda_{rel}^2 \right] \quad (8.19)$$

Dabei sind:

- k_c Knickbeiwert [-]
- λ_{rel} relative Schlankheit [-]
- β_c Beiwert (hier: $\beta_c = 0,2$ lt. EN-1995-1-1 [13]) [-]

Die Berechnung der maximalen übertragbaren Last ohne Beanspruchung aus der Plattenebene des Wandstreifens erfolgt nach (8.20).

$$n_{d,max} = k_c \cdot f_{c,0,d} \cdot A_{net} \quad (8.20)$$

mit
$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad (8.21)$$

Dabei sind:

- $n_{d,max}$ Tragfähigkeit [kN/m]
- A_{net} Nettoquerschnittsfläche (Querlagen in Abzug gebracht) [mm²]

Für Wände mit Belastungen aus der Plattenebene (z.B.: Windbelastung) erfolgt die Berechnung der maximalen Tragfähigkeit nach (8.22).

$$n_{d,max} = k_c \cdot f_{c,0,d} \cdot A_{net} \cdot \left(1,0 - \frac{m_d}{W_{net} \cdot f_{m,d}} \right) \quad (8.22)$$

Dabei sind:

- $n_{d,max}$ Tragfähigkeit [kN/m]
- A_{net} Nettoquerschnittsfläche (Querlagen in Abzug gebracht) [mm²/m]
- W_{net} Nettowiderstandsmoment (Querlagen in Abzug gebracht) [mm³/m]
- m_d Biegemoment aus der Plattenebene [kNm/m]

B-2-2 Schubbelastung in Plattenebene

Der Nachweis der Wände unter Schubbelastung in Plattenebene erfolgte nach dem in [5] postulierten Verfahren.

$$t_i^* = \begin{cases} \text{Min} [2 \cdot t_{i,mod}, t_{i+1,mod}] & \text{wenn } t_i, t_{i+1} \text{ Randlage} \\ \text{Min} [t_{i,mod}, t_{i+1,mod}] & \text{wenn } t_i, t_{i+1} \text{ Innenlage} \end{cases} \quad (8.23)$$

$$t_{i,mod} = \begin{cases} t_i & \text{wenn konv. BSP} \\ t_i \cdot \frac{A_{Netto,HL}}{A_{Brutto,HL}} & \text{wenn HL} \end{cases} \quad (8.24)$$

- t_i^* ideelle Ersatzdicke [mm]
- $t_{i,mod}$ modifizierte Lagendicke Hohlramelle [mm]
- t_i Lagendicke [mm]

Mechanismus I:

Der Versagensart „Mechanismus I“ beschreibt das Versagen der Lamellen auf Schub. Die verwendeten Gleichungen sind in bis angegeben.

$$\tau_{0,d} = \frac{\tau_{v,d}}{2} \quad (8.25)$$

$$n_{xy,v,d,max} = \tau_{0,d} \cdot \sum t_i^* \quad (8.26)$$

Dabei sind:

- $\tau_{0,d}$ ideelle Schubspannung bezogen auf t_i^* [N/mm²]
- $\tau_{v,d}$ nominelle Schubspannung hier: $\tau_{v,d} = f_{v,clt,d}$ [N/mm²]
- $n_{xy,v,d,max}$ maximal übertragbare Schubkraft Mechanismus I [N/mm]

Mechanismus II:

Der Versagensart „Mechanismus II“ beschreibt das Versagen der Klebefläche zwischen den Lamellen auf Torsion. Die verwendeten Gleichungen sind in bis angegeben.

$$\tau_{0,d} = \frac{\tau_{T,d} \cdot W_p}{t_i^* \cdot a^2} \quad (8.27)$$

$$n_{xy,T,d} = \tau_{0,d} \cdot \sum t_i^* \quad (8.28)$$

Dabei sind:

- $\tau_{0,d}$ ideelle Schubspannung bezogen auf t_i^* [N/mm²]
- $\tau_{T,d}$ nominelle Schubspannung hier: $\tau_{T,d} = f_{T,clt,d}$ [N/mm²]
- W_p polares Widerstandsmoment hier: $W_p = a^3/3$ [mm³]
- a Breite Lamelle [mm]
- $n_{xy,T,d,max}$ maximal übertragbare Schubkraft Mechanismus II [N/mm]

ANHANG C: DETAILIERTE PRÜFERGEBNISSE

C-1	PRÜFUNGEN DER GRUNDPRODUKTE.....	C-19
C-1-1	Z-HL86.....	C-19
C-1-2	Z-HL86-KZ.....	C-20
C-1-3	Z-HL112.....	C-21
C-1-4	Z-HL112-KZ.....	C-21
C-1-5	B-HL86-FK.....	C-22
C-1-6	B-HL86-FK-II.....	C-22
C-1-7	B-HL86-FK-KZ.....	C-23
C-1-8	B-HL86-HK.....	C-23
C-1-9	B-HL112-FK.....	C-24
C-1-10	B-HL112-FK-KZ.....	C-24
C-2	PRÜFUNGEN AN HOHLLAMELLEN IM GESPERRTEN AUFBAU.....	C-25
C-2-1	PB-5s-HL86-VH.....	C-25
C-2-2	PB-3s-HL86.....	C-25
C-2-3	PS-5s-HL86-VH.....	C-26

C-1 Prüfungen der Grundprodukte

C-1-1 Z-HL86

Tabelle Anhang C-1: Prüfergebnisse – Z-HL86

Bezeichnung	F_{\max} [kN]	f_t [N/mm ²]	$E_{t, \text{lokal}, 12}$ [N/mm ²]	$E_{t, \text{global}, 12}$ [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	A [mm ²]	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]
Z-HL86-01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z-HL86-02	212	35,4	13.956	12.756	170	41,7	5.985	8,42	488
Z-HL86-03	173	28,0	13.524	14.012	170	41,6	6.175	7,91	462
Z-HL86-04	166	28,6	12.850	12.210	170	41,4	5.809	8,16	461
Z-HL86-05	230	38,3	15.592	14.210	170	41,7	5.998	8,20	503
Z-HL86-06	155	26,4	13.322	12.393	170	40,9	5.864	9,74	480
Z-HL86-07	203	34,0	15.517	14.216	170	41,7	5.962	9,06	519
Z-HL86-08	160	25,8	13.412	13.464	170	40,6	6.206	8,51	476
Z-HL86-09	224	38,5	14.385	13.131	170	41,6	5.811	8,62	472
Z-HL86-10	210	36,1	15.192	14.251	170	41,3	5.820	8,46	500
Z-HL86-11	251	42,2	14.292	13.948	170	40,6	5.942	9,75	491
Z-HL86-12	137	23,2	12.804	13.646	170	41,2	5.893	7,56	495
Z-HL86-13	206	34,5	13.497	12.931	170	41,3	5.977	8,88	459
Z-HL86-14	254	43,3	14.873	13.169	170	41,5	5.876	8,88	470
Z-HL86-15	184	31,4	14.433	14.233	170	41,5	5.857	8,11	482
Z-HL86-16	151	25,5	13.128	12.256	171	41,5	5.905	7,82	454
Z-HL86-17	181	31,1	12.993	12.567	170	41,3	5.829	8,30	444
Z-HL86-18	163	27,0	12.503	12.582	170	41,5	6.026	7,75	465

Bezeichnung	F _{max} [kN]	f _t [N/mm ²]	E _{t,lokal,12} [N/mm ²]	E _{t,global,12} [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	A [mm ²]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
Z-HL86-19	213	37,0	14.022	14.064	170	40,5	5.760	8,21	490
Z-HL86-20	201	34,0	13.431	12.779	169	41,6	5.919	8,92	482
Z-HL86-21	226	38,0	14.358	13.499	169	41,5	5.376	10,1	523
Z-HL86-22	142	24,5	12.531	11.469	169	41,4	5.234	9,84	473
Z-HL86-23	199	34,6	13.370	11.858	169	41,3	5.175	9,89	513
Z-HL86-24	133	22,5	11.666	11.576	169	41,6	5.335	10,1	472
Z-HL86-25	214	35,4	12.130	10.568	169	41,5	5.488	9,88	482
Z-HL86-26	136	23,6	12.899	11.746	169	41,5	5.208	10,1	520
Z-HL86-27	220	38,2	13.630	10.838	169	41,5	5.183	9,83	517
Z-HL86-28	174	30,1	12.493	11.284	169	41,6	5.192	10,0	500
Z-HL86-29	181	30,3	12.650	10.948	169	41,5	5.389	10,3	484
Z-HL86-30	182	30,9	12.844	11.704	169	41,7	5.301	10,2	496
Z-HL86-31	266	44,0	14.927	12.628	169	41,6	5.498	10,2	544
Z-HL86-32	187	32,2	13.380	11.560	169	41,5	5.239	10,3	514
Z-HL86-33	201	34,5	12.945	12.682	169	41,6	5.256	10,1	511
Z-HL86-34	260	44,7	16.023	15.274	169	41,3	5.282	10,2	556
Z-HL86-35	168	28,2	13.727	11.798	169	41,7	5.363	10,2	545
Z-HL86-36	222	37,6	16.877	14.192	169	41,8	5.354	10,2	553
Z-HL86-37	225	38,7	15.578	13.544	169	41,6	5.338	9,99	569
Z-HL86-38	269	46,3	15.396	12.357	169	41,5	5.260	10,0	453
Z-HL86-39	177	29,0	16.531	13.209	175	41,7	5.537	10,1	576
Z-HL86-40	189	32,8	13.642	11.347	170	41,6	5.212	10,2	528
Anzahl	39	39	39	39	39	39	39	39	39
Min	133	22,5	11.666	10.568	169	40,5	5.175	7,56	444
Max	269	46,3	16.877	15.274	175	41,8	6.206	10,3	576
Mittelwert	196	33,2	13.880	12.741	170	41,4	5.611	9,31	498
Stabw.	36,7	6,28	1.251	1.146	0,918	0,298	331	0,922	33,4
COV	18,7%	18,9%	9,01%	9,00%	0,540%	0,720%	5,90%	9,90%	6,70%
Faktor k _s		1,84							-
char. Wert		22,9							443

C-1-2 Z-HL86-KZ

Tabelle Anhang C-2: Prüfergebnisse – Z-HL86-KZ

Bezeichnung	F _{max} [kN]	f _{t,Netto} [N/mm ²]	Bruchursache				A ₁ [mm ²]	A ₁ [mm ²]	u ₁ [%]	u ₂ [%]	ρ _{12,1} [kg/m ³]	ρ _{12,2} [kg/m ³]
			g [%]	s [%]	a [%]	Fehl [%]						
Z-HL86-KZ-01	164	20,6	10	50	25	15	7.980	8.640	9,28	9,86	476	454
Z-HL86-KZ-02	245	28,1	70	10	0	20	8.736	8.724	9,23	9,73	487	471
Z-HL86-KZ-03	225	25,7	40	50	0	10	8.755	8.775	8,79	8,62	488	472
Z-HL86-KZ-04	209	23,9	10	80	0	10	8.772	8.823	8,70	8,67	483	460
Z-HL86-KZ-05	221	25,1	15	65	10	10	8.843	8.799	9,61	9,44	452	466
Z-HL86-KZ-06	259	29,4	45	45	0	10	8.784	8.789	9,59	9,94	490	520
Z-HL86-KZ-07	187	21,4	20	60	10	10	8.876	8.726	9,00	10,1	480	444
Z-HL86-KZ-08	242	27,6	20	70	10	0	9.327	8.766	9,11	9,75	447	510
Z-HL86-KZ-09	199	23,1	15	70	5	10	8.600	8.827	9,00	9,96	463	486
Z-HL86-KZ-10	284	32,6	20	60	20	0	8.706	8.908	9,65	9,32	485	495
Z-HL86-KZ-11	273	31,6	15	75	10	0	8.641	8.883	9,36	9,15	486	491
Z-HL86-KZ-12	257	29,0	30	70	0	0	8.858	8.876	9,72	9,31	449	477
Z-HL86-KZ-13	217	24,7	35	40	25	0	8.871	8.776	9,74	9,73	449	461
Z-HL86-KZ-14	170	19,5	20	65	10	5	8.724	8.770	10,1	9,55	479	445
Z-HL86-KZ-15	274	31,1	20	50	30	0	9.080	8.795	8,96	9,20	522	467
Z-HL86-KZ-16	268	31,3	15	75	10	0	8.578	8.829	8,87	9,24	473	489
Z-HL86-KZ-17	289	34,2	60	25	5	10	8.470	8.898	9,49	9,32	473	482
Z-HL86-KZ-18	248	28,5	10	65	25	0	8.715	8.817	10,1	9,61	487	450
Z-HL86-KZ-19	249	28,6	25	50	25	0	8.703	8.748	8,66	9,53	477	467
Z-HL86-KZ-20	250	28,6	25	50	15	10	9.105	8.738	10,1	9,63	497	480
Z-HL86-KZ-21	230	26,2	55	25	10	10	9.040	8.774	8,92	9,78	482	503
Z-HL86-KZ-22	262	29,7	10	75	15	0	8.829	8.796	9,63	9,57	506	480
Z-HL86-KZ-23	271	31,2	15	70	10	5	8.684	8.909	9,63	9,32	474	491
Z-HL86-KZ-24	236	27,0	10	75	5	10	8.898	8.739	10,0	9,44	474	488
Z-HL86-KZ-25	266	30,3	65	20	5	10	8.787	8.873	10,0	9,35	493	465
Z-HL86-KZ-26	199	22,9	40	45	10	5	8.688	8.776	10,2	9,84	524	470
Z-HL86-KZ-27	187	22,0	25	55	5	15	8.480	8.829	10,2	9,52	503	463
Z-HL86-KZ-28	294	33,0	35	40	25	0	8.906	8.997	9,12	9,47	503	458
Z-HL86-KZ-29	269	30,6	40	50	10	0	8.895	8.789	8,92	9,42	512	444
Z-HL86-KZ-30	181	20,3	45	25	15	15	9.002	8.936	9,26	8,95	468	470
Z-HL86-KZ-31	222	25,2	45	50	5	0	8.847	8.822	10,2	9,45	477	512
Z-HL86-KZ-32	201	22,9	30	25	45	0	8.940	8.776	9,18	9,38	471	455

Bezeichnung	F _{max} [kN]	f _{t,Netto} [N/mm ²]	Bruchursache				Fehlrv [%]	A ₁ [mm ²]	A ₁ [mm ²]	u ₁ [%]	u ₂ [%]	ρ _{12,1} [kg/m ³]	ρ _{12,2} [kg/m ³]
			g [%]	s [%]	a [%]								
Z-HL86-KZ-33	234	26,0	15	75	10	0	9.014	9.038	9,06	9,69	461	497	
Z-HL86-KZ-34	207	24,0	35	30	25	10	8.646	8.929	9,74	9,23	491	465	
Z-HL86-KZ-35	171	19,6	20	60	10	10	8.917	8.750	10,1	9,39	512	458	
Z-HL86-KZ-36	280	31,5	40	50	10	0	8.911	9.045	9,08	9,76	474	525	
Z-HL86-KZ-37	289	32,5	40	40	10	10	8.939	8.906	9,18	9,35	521	503	
Z-HL86-KZ-38	272	31,0	20	40	40	0	8.846	8.784	9,12	9,42	480	498	
Z-HL86-KZ-39	268	30,8	55	20	25	0	8.881	8.711	9,66	9,26	492	472	
Anzahl	39	39					39	39	39	39	39	39	
Min	164	20,1					7.980	8.640	8,66	8,62	447	444	
Max	294	35,8					9.327	9.045	10,2	10,1	524	525	
Mittelwert	238	27,7					8.802	8.823	9,44	9,47	484	477	
Stabw.	37,3	4,23					218	88,8	0,469	0,316	19,6	21,2	
COV	15,7%	15,3%					2,47%	1,01%	4,97%	3,34%	4,05%	4,44%	
Faktor ks		1,84										-	
char. Wert		20,5										447	

C-1-3 Z-HL112

Tabelle Anhang C-3: Prüfergebnisse – Z-HL112

Bezeichnung	F _{max} [kN]	f _t [N/mm ²]	E _{t,lokal,12} [N/mm ²]	E _{t,global,12} [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	A [mm ²]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
Z-HL112-01	267	37,3	14.746	14.183	222	37,5	7.159	10,4	499
Z-HL112-02	350	49,2	16.361	15.691	223	38,2	7.102	10,4	524
Z-HL112-03	175	24,8	12.496	12.380	223	37,0	7.044	10,3	477
Z-HL112-04	238	33,3	12.581	12.812	224	38,5	7.162	10,6	473
Z-HL112-05	269	37,3	13.701	13.099	224	38,0	7.210	10,3	493
Z-HL112-06	174	24,9	11.665	11.136	223	38,2	7.002	10,3	446
Z-HL112-07	322	45,5	15.818	15.146	223	38,1	7.090	10,4	514
Z-HL112-08	201	28,8	14.629	14.519	224	36,5	6.999	10,4	499
Z-HL112-09	193	26,9	11.762	11.873	224	39,0	7.190	9,41	461
Z-HL112-10	306	43,0	15.684	14.877	223	37,0	7.118	10,9	513
Z-HL112-11	268	37,4	14.705	14.599	223	37,8	7.168	10,4	522
Z-HL112-12	193	27,3	11.385	10.835	223	38,2	7.079	10,4	441
Z-HL112-13	233	32,5	13.757	13.873	224	38,6	7.165	10,2	482
Z-HL112-14	167	22,4	14.473	13.741	223	38,8	7.448	10,4	504
Z-HL112-15	299	42,1	15.726	14.840	223	37,8	7.092	9,51	484
Z-HL112-16	156	22,1	11.102	11.585	223	37,4	7.074	9,60	469
Z-HL112-17	281	39,8	15.641	14.680	223	37,1	7.062	9,67	502
Z-HL112-18	207	28,5	13.593	12.216	223	37,8	7.256	10,2	483
Z-HL112-19	285	40,9	15.111	14.028	224	36,1	6.970	9,80	498
Z-HL112-20	288	40,5	16.104	15.131	224	37,5	7.103	9,62	525
Anzahl	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Min	156	22,1	11.102	10.835	222	36,1	6.970	9,41	441
Max	350	49,2	16.361	15.691	224	39,0	7.448	10,9	525
Mittelwert	244	34,2	14.052	13.562	223	37,8	7.125	10,2	490
Stabw.	57,4	8,16	1.701	1.467	0,376	0,764	106	0,412	24,4
COV	23,6%	23,9%	12,1%	10,8%	0,168%	2,02%	1,48%	4,05%	4,98%
Faktor ks		1,93							-
char. Wert		20,7							450

C-1-4 Z-HL112-KZ

Tabelle Anhang C-4: Prüfergebnisse – Z-HL112-KZ

Bezeichnung	F _{max} [kN]	f _{t,Netto} [N/mm ²]	Bruchursache				Fehlrv [%]	A ₁ [mm ²]	A ₁ [mm ²]	u ₁ [%]	u ₂ [%]	ρ _{12,1} [kg/m ³]	ρ _{12,2} [kg/m ³]
			g [%]	s [%]	a [%]								
Z-HL112-KZ-01	204	29,9	32,0	50	45	5	6.815	6.989	2,00	9,66	9,58	476	
Z-HL112-KZ-02	230	34,1	34,1	40	40	20	6.896	6.732	0	9,82	9,94	487	
Z-HL112-KZ-03	180	26,4	28,2	35	65	0	7.020	6.814	2,00	9,49	9,75	488	
Z-HL112-KZ-04	216	30,4	32,4	30	70	0	7.166	7.099	2,00	10,2	10,1	483	
Z-HL112-KZ-05	201	28,9	29,9	60	20	20	6.947	7.056	1,00	9,41	9,90	452	
Z-HL112-KZ-06	231	32,8	34,5	20	70	10	7.111	7.032	1,50	9,56	10,2	490	
Z-HL112-KZ-07	180	26,7	28,6	30	30	40	7.119	6.753	2,00	9,90	9,97	480	
Z-HL112-KZ-08	196	28,2	29,7	65	35	0	6.950	7.152	1,50	9,87	10,2	447	

Bezeichnung	F _{max} [kN]	f _{t,Netto} [N/mm ²]	Bruchursache				A ₁ [mm ²]	A ₁ [mm ²]	u ₁ [%]	u ₂ [%]	ρ _{12,1} [kg/m ³]	ρ _{12,2} [kg/m ³]
			g [%]	s [%]	a [%]	Fehl _v [%]						
Z-HL112-KZ-09	197	28,2	29,6	35	45	20	7.013	7.017	1,50	9,67	9,92	463
Z-HL112-KZ-10	198	27,9	29,3	35	20	45	7.115	7.204	1,50	9,98	10,3	485
Z-HL112-KZ-11	172	25,2	27,0	50	10	40	7.200	6.816	2,00	9,53	10,4	486
Z-HL112-KZ-12	222	32,2	35,1	50	45	5	6.891	7.202	2,50	10,0	10,2	449
Z-HL112-KZ-13	230	33,2	34,3	20	50	30	6.940	7.094	1,00	9,83	10,0	449
Z-HL112-KZ-14	212	30,3	30,8	60	40	0	7.064	6.986	0,500	10,3	10,2	479
Z-HL112-KZ-15	173	24,6	26,7	55	20	25	7.032	7.071	2,50	9,87	9,89	522
Z-HL112-KZ-16	260	37,7	40,3	50	50	0	6.895	6.975	2,00	9,77	10,1	473
Z-HL112-KZ-17	218	30,7	31,7	70	30	0	7.094	7.087	1,00	9,72	9,68	473
Z-HL112-KZ-18	263	37,2	40,4	40	45	15	7.071	7.226	2,50	9,78	10,2	487
Z-HL112-KZ-19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anzahl	18	18					18	18	18	18	18	18
Min	172	24,6					6.815	6.732	0	9,41	9,58	447
Max	263	37,7					7.200	7.226	2,50	10,3	10,4	522
Mittelwert	210	30,3					7.019	7.017	1,61	9,80	10,0	476
Stabw.	26,5	3,75					108	151	0,698	0,235	0,225	18,7
COV	12,6%	12,4%					1,53%	2,16%	43,3%	2,40%	2,24%	3,93%
Faktor k _s		1,95										-
char. Wert		23,7										443

C-1-5 B-HL86-FK

Tabelle Anhang C-5: Prüfergebnisse – B-HL86-FK

Bezeichnung	F _{max} [kN]	σ _m [N/mm ²]	E _{t,lokal,12} [N/mm ²]	f _v [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	I [mm ⁴]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
B-HL86-FK-01	26,9	44,2	13.487	5,73	255	41,0	1.442.549	10,1	465
B-HL86-FK-02	35,8	62,8	14.690	6,60	254	39,7	1.306.343	10,6	483
B-HL86-FK-03	35,8	57,5	12.675	7,15	256	41,4	1.489.742	9,59	501
B-HL86-FK-04	26,0	41,8	11.653	5,64	256	41,4	1.485.631	10,4	504
B-HL86-FK-05	32,9	56,1	14.701	6,68	255	40,1	1.357.459	10,5	504
B-HL86-FK-06	30,3	49,4	13.878	6,10	255	41,2	1.461.732	10,4	512
B-HL86-FK-07	29,6	47,2	12.291	6,21	256	41,6	1.511.097	9,15	458
B-HL86-FK-08	31,5	50,6	13.533	6,61	256	41,5	1.488.579	9,30	467
B-HL86-FK-09	33,2	56,6	12.888	5,98	255	40,2	1.361.084	10,4	520
B-HL86-FK-10	26,5	44,8		5,70	255	40,5	1.387.433	10,4	521
B-HL86-FK-11	23,1	38,9	15.325	5,49	255	40,5	1.387.018	9,61	507
B-HL86-FK-12	25,9	43,2	13.146	5,04	255	40,7	1.412.039	10,1	463
B-HL86-FK-13	27,7	45,7	10.425	7,66	255	41,1	1.438.042	10,2	406
B-HL86-FK-14	24,0	39,9	11.541	4,88	254	40,9	1.423.200	10,5	484
B-HL86-FK-15	26,7	42,9	12.631	5,36	256	41,4	1.482.921	9,65	487
B-HL86-FK-16	29,6	48,2	13.407	6,16	255	41,2	1.464.676	9,92	478
B-HL86-FK-17	21,2	35,4	15.571	5,00	256	40,7	1.410.915	9,80	492
B-HL86-FK-18	21,4	35,0	12.221	4,97	256	41,1	1.449.357	10,0	480
B-HL86-FK-19	27,1	44,9	12.523	5,13	255	40,8	1.423.377	10,9	471
B-HL86-FK-20	25,6	45,1	13.691	5,95	254	39,6	1.297.710	11,2	515
B-HL86-FK-21	25,5	39,9	9.457	5,28	257	41,9	1.547.247	10,5	475
Anzahl	21	21	20	21	21	21	21	21	21
Min	21,2	35,0	9.457	4,88	254	39,6	1.297.710	9,15	406
Max	35,8	62,8	15.571	7,66	257	41,9	1.547.247	11,2	521
Mittelwert	27,9	46,2	12.987	5,87	255	40,9	1.429.912	10,1	485
Stabw.	4,19	7,31	1.529	0,759	0,826	0,611	64.523	0,506	26,6
COV	15,0%	15,8%	11,8%	12,9%	0,324%	1,49%	4,51%	4,99%	5,49%
Faktor k _s		1,92		1,92					-
char. Wert		33,9		4,57					442

C-1-6 B-HL86-FK-II

Tabelle Anhang C-6: Prüfergebnisse – B-HL86-FK-II

Bezeichnung	F _{max} [kN]	f _m [N/mm ²]	E _{t,lokal,12} [N/mm ²]	τ _v [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	I [mm ⁴]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
B-HL86-FK-II-01	18,8	51,7	13.839	3,50	257	41,5	1.506.110	10,7	485
B-HL86-FK-II-02	21,9	59,0	11.416	4,53	257	41,9	1.551.294	10,3	470
B-HL86-FK-II-03	21,0	58,8	13.953	4,37	257	41,1	1.462.913	10,4	471
B-HL86-FK-II-04	20,0	55,0	12.895	4,01	256	41,6	1.507.515	12,1	519

Bezeichnung	F _{max} [kN]	f _m [N/mm ²]	E _{t,lokal,12} [N/mm ²]	τ _v [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	I [mm ⁴]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
B-HL86-FK-II-05	22,8	63,4	11.513	4,04	257	41,2	1.474.532	10,4	464
B-HL86-FK-II-06	25,1	68,2	14.412	4,90	257	41,9	1.540.545	10,7	499
B-HL86-FK-II-07	18,7	51,3	13.310	4,51	256	41,7	1.521.114	11,5	488
B-HL86-FK-II-08	18,2	50,2	11.967	4,46	256	41,6	1.505.763	11,5	478
B-HL86-FK-II-09	26,9	73,8	14.847	5,27	257	41,6	1.513.589	10,2	484
B-HL86-FK-II-10	24,4	66,2	14.693	5,02	257	41,8	1.539.740	10,1	489
B-HL86-FK-II-11	20,3	56,5	15.063	3,77	257	41,2	1.475.546	10,5	471
B-HL86-FK-II-12	23,9	65,4	13.917	4,67	257	41,6	1.514.451	10,2	468
B-HL86-FK-II-13	23,1	62,7	10.277	4,30	257	41,8	1.534.434	10,2	476
B-HL86-FK-II-14	21,4	58,4	12.917	3,96	257	41,6	1.522.611	10,1	464
Anzahl	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Min	18,2	50,2	10.277	3,50	256	41,1	1.462.913	10,1	464
Max	26,9	73,8	15.063	5,27	257	41,9	1.551.294	12,1	519
Mittelwert	21,9	60,0	13.216	4,38	257	41,6	1.512.154	10,6	480
Stabw.	2,62	6,96	1.458	0,495	0,578	0,257	26.416	0,612	15,3
COV	12,0%	11,6%	11,0%	11,3%	0,225%	0,618%	1,75%	5,76%	3,18%
Faktor ks		2,01		2,01					-
char. Wert		47,3		3,46					455

C-1-7 B-HL86-FK-KZ

Tabelle Anhang C-7: Prüfergebnisse – B-HL86-FK-KZ

Bezeichnung	F _{max} [kN]	f _m [N/mm ²]	E _{t,lokal,12} [N/mm ²]	τ _v [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	I [mm ⁴]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
B-HL86-FK-KZ-01	21,4	46,2	10.545	4,32	256	41,7	1.522.809	10,0	433
B-HL86-FK-KZ-02	22,6	50,1	16.205	4,22	256	41,2	1.463.484	10,5	494
B-HL86-FK-KZ-03	15,4	34,2	14.212	3,36	257	41,1	1.458.734	10,2	516
B-HL86-FK-KZ-04	21,8	48,8	11.599	4,29	256	41,0	1.440.630	10,5	456
B-HL86-FK-KZ-05	18,6	44,5	12.103	3,77	256	39,6	1.300.562	11,1	512
B-HL86-FK-KZ-06	21,9	51,0	11.916	4,24	256	40,2	1.362.160	10,6	495
B-HL86-FK-KZ-07	20,5	45,8	14.159	3,63	256	41,0	1.443.989	10,4	452
B-HL86-FK-KZ-08	20,7	47,0	11.571	4,09	255	40,8	1.414.791	10,4	499
B-HL86-FK-KZ-09	18,4	42,0	11.448	3,89	256	40,6	1.398.426	10,4	487
B-HL86-FK-KZ-10	18,9	41,2	11.733	3,37	256	41,4	1.496.302	9,66	481
B-HL86-FK-KZ-11	24,7	54,8	12.840	5,58	257	41,2	1.466.077	9,15	482
B-HL86-FK-KZ-12	23,0	50,2	15.242	4,63	257	41,5	1.495.087	9,47	509
B-HL86-FK-KZ-13	23,0	50,5	12.929	4,21	257	41,3	1.479.222	9,22	449
B-HL86-FK-KZ-14	17,2	37,3	11.513	3,37	256	41,6	1.511.315	9,66	476
B-HL86-FK-KZ-15	19,8	43,5	12.557	3,81	257	41,3	1.476.432	9,59	477
B-HL86-FK-KZ-16	21,5	46,0	14.616	3,90	257	41,8	1.540.597	9,63	503
B-HL86-FK-KZ-17	22,1	49,3	13.678	4,44	257	41,0	1.445.152	9,90	513
B-HL86-FK-KZ-18	18,7	43,2	10.633	4,14	257	40,3	1.372.675	9,36	445
B-HL86-FK-KZ-19	17,4	38,2	12.793	3,16	257	41,3	1.481.421	9,47	462
B-HL86-FK-KZ-20	19,7	46,1	12.233	3,44	257	40,0	1.344.284	9,40	493
Anzahl	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Min	15,4	34,2	10.545	3,16	255	39,6	1.300.562	9,15	433
Max	24,7	54,8	16.205	5,58	257	41,8	1.540.597	11,1	516
Mittelwert	20,4	45,5	12.726	3,99	256	41,0	1.445.707	9,93	482
Stabw.	2,34	5,14	1.528	0,559	0,505	0,594	62.988	0,545	24,9
COV	11,5%	11,3%	12,0%	14,0%	0,197%	1,45%	4,36%	5,49%	5,18%
Faktor ks		1,93		1,93					-
char. Wert		36,0		3,05					441

C-1-8 B-HL86-HK

Tabelle Anhang C-8: Prüfergebnisse – B-HL86-HK

Bezeichnung	F _{max} [kN]	f _m [N/mm ²]	E _{t,lokal,12} [N/mm ²]	τ _v [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	I [mm ⁴]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
B-HL86-HK-01	37,2	54,2	14.156	3,82	41,8	256	50.303.766	8,32	483
B-HL86-HK-02	32,8	50,0	15.121	3,39	41,0	255	48.044.016	8,69	507
B-HL86-HK-03	31,0	46,6	14.806	3,20	41,6	255	48.694.324	9,34	475
B-HL86-HK-04	30,5	45,6	14.599	3,14	40,8	255	48.941.714	9,32	508
B-HL86-HK-05	24,3	35,9	12.599	2,50	41,1	256	49.576.287	9,35	458
B-HL86-HK-06	33,7	49,2	14.758	3,48	41,5	257	50.478.819	8,71	484
B-HL86-HK-07	30,1	44,4	13.300	3,13	41,6	256	49.718.905	8,87	520

Bezeichnung	F _{max} [kN]	f _m [N/mm ²]	E _{t,lokal,12} [N/mm ²]	τ _v [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	I [mm ⁴]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
B-HL86-HK-08	24,8	37,0	15.339	2,54	41,5	256	49.204.177	7,87	467
B-HL86-HK-09	25,6	37,9	11.929	2,63	41,7	256	49.593.593	8,38	470
B-HL86-HK-10	28,2	42,4	13.430	2,91	41,6	256	48.841.471	8,24	473
B-HL86-HK-11	25,9	38,2	14.109	2,69	41,7	256	49.864.111	8,65	465
B-HL86-HK-12	31,7	46,7	14.563	3,27	41,0	256	49.893.139	8,70	497
B-HL86-HK-13	37,8	55,4	17.384	3,88	41,1	255	49.871.293	10,2	522
B-HL86-HK-14	32,5	48,0	13.831	3,33	41,4	256	49.544.957	9,93	483
B-HL86-HK-15	33,3	50,9	16.095	3,48	41,6	255	47.842.509	10,9	512
B-HL86-HK-16	30,1	45,4	13.944	3,12	41,5	255	48.516.589	10,3	488
B-HL86-HK-17	33,4	50,4	14.686	3,49	40,5	255	48.591.934	9,12	487
B-HL86-HK-18	22,2	34,7	14.195	2,36	41,6	254	46.675.324	10,4	525
B-HL86-HK-19	30,9	46,8	14.797	3,21	40,6	257	48.605.844	8,96	490
Anzahl	19	19	19	19	19	19	19	19	19
Min	22,2	34,7	11.929	2,36	40,5	254	46.675.324	7,87	458
Max	37,8	55,4	17.384	3,88	41,8	257	50.478.819	10,9	525
Mittelwert	30,3	45,2	14.402	3,14	41,3	256	49.094.883	9,17	490
Stabw.	4,26	6,12	1.202	0,433	0,381	0,632	939.695	0,832	20,6
COV	14,0%	13,5%	8,34%	13,8%	0,922%	0,247%	1,91%	9,08%	4,20%
Faktor ks		1,94		1,94					-
char. Wert		34,2		2,36					456

C-1-9 B-HL112-FK

Tabelle Anhang C-9: Prüfergebnisse – B-HL112-FK

Bezeichnung	F _{max} [kN]	σ _m [N/mm ²]	E _{t,lokal,12} [N/mm ²]	f _v [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	I [mm ⁴]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
B-HL112-FK-01	20,5	43,8	11.099	6,07	224	38,2	1.033.704	11,0	472
B-HL112-FK-02	17,1	36,5	13.394	4,93	223	38,3	1.037.144	10,9	500
B-HL112-FK-03	21,9	49,1	15.254	6,33	224	37,4	965.111	11,4	525
B-HL112-FK-04	19,1	40,6	12.915	5,74	224	38,3	1.037.987	10,9	539
B-HL112-FK-05	19,0	45,2	14.633	7,05	224	36,3	883.215	10,9	469
B-HL112-FK-06	20,2	47,0	10.491	6,21	224	36,7	911.531	11,7	462
B-HL112-FK-07	18,9	42,3	16.698	5,47	224	37,4	965.983	10,8	547
B-HL112-FK-08	22,2	47,8	13.440	5,56	224	38,1	1.021.218	11,4	506
B-HL112-FK-09	16,1	36,8	16.495	5,12	224	37,0	934.777	11,1	504
B-HL112-FK-10	18,7	42,0	10.463	5,06	224	37,2	952.798	11,3	480
B-HL112-FK-11	17,1	41,4	13.692	5,41	224	35,8	854.643	11,0	512
B-HL112-FK-12	16,8	39,7	12.818	5,62	223	36,3	887.110	11,1	472
B-HL112-FK-13	16,7	36,0	11.080	4,97	223	38,2	1.025.606	11,3	487
B-HL112-FK-14	16,4	38,4	13.728	5,45	225	36,4	893.679	10,8	501
B-HL112-FK-15	14,8	34,8	13.965	5,39	224	36,3	888.846	10,9	488
B-HL112-FK-16	18,3	41,1	12.295	5,97	241	35,9	921.663	10,5	463
B-HL112-FK-17	24,8	57,3	14.132	6,52	224	36,7	915.227	11,0	498
B-HL112-FK-18	14,6	32,1	5.920	4,67	223	37,8	995.642	11,0	470
B-HL112-FK-19	20,7	49,7	13.332	6,50	223	36,0	864.265	11,0	491
B-HL112-FK-20	18,9	45,0	13.092	5,86	224	36,1	874.272	10,3	488
Anzahl	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Min	14,6	32,1	5.920	4,67	223	35,8	854.643	10,3	462
Max	24,8	57,3	16.698	7,05	241	38,3	1.037.987	11,7	547
Mittelwert	18,6	42,3	12.947	5,69	225	37,0	943.221	11,0	494
Stabw.	2,58	6,01	2.384	0,620	3,88	0,887	63.252	0,305	23,9
COV	13,8%	14,2%	18,4%	10,9%	1,73%	2,40%	6,71%	2,78%	4,84%
Faktor ks		1,93		1,93					-
char. Wert		32,0		4,60					454

C-1-10 B-HL112-FK-KZ

Tabelle Anhang C-10: Prüfergebnisse – B-HL112-FK-KZ

Bezeichnung	F _{max} [kN]	f _m [N/mm ²]	E _{t,lokal,12} [N/mm ²]	τ _v [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	I [mm ⁴]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
B-HL112-FK-KZ-01	14,1	41,8	11.364	4,72	224	37,9	1.006.027	11,0	493
B-HL112-FK-KZ-02	9,01	29,7	8.957	3,64	224	35,9	855.055	11,3	514
B-HL112-FK-KZ-03	12,7	39,4	10.124	3,76	223	37,0	935.487	11,5	496
B-HL112-FK-KZ-04	11,6	37,8	11.547	3,17	224	36,1	875.317	11,0	489
B-HL112-FK-KZ-05	13,1	38,5	10.609	4,44	224	38,1	1.017.399	11,2	492

Bezeichnung	F _{max} [kN]	f _m [N/mm ²]	E _{t,lokal,12} [N/mm ²]	τ _v [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	I [mm ⁴]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
B-HL112-FK-KZ-06	16,9	50,3	14.503	4,54	224	37,9	1.005.869	10,8	500
B-HL112-FK-KZ-07	12,2	39,5	10.555	3,26	224	36,2	879.945	10,9	453
B-HL112-FK-KZ-08	13,2	40,8	16.553	4,22	224	37,1	945.163	11,1	480
B-HL112-FK-KZ-09	12,9	40,4	10.171	3,81	224	36,9	930.871	10,9	492
B-HL112-FK-KZ-10	13,5	43,6	12.958	4,09	224	36,3	885.352	11,1	482
Anzahl	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Min	9,01	29,7	8.957	3,17	223	35,9	855.055	10,8	453
Max	16,9	50,3	16.553	4,72	224	38,1	1.017.399	11,5	514
Mittelwert	12,9	40,2	11.734	3,97	224	36,9	933.648	11,1	489
Stabw.	1,99	5,11	2.309	0,527	0,247	0,815	60.008	0,212	15,7
COV	15,4%	12,7%	19,7%	13,3%	0,110%	2,21%	6,43%	1,91%	3,22%
Faktor ks		2,10		2,10					-
char. Wert		30,3		2,96					463

C-2 Prüfungen an Hohllamellen im gesperrten Aufbau

C-2-1 PB-5s-HL86-VH

Tabelle Anhang C-11: Prüfergebnisse – PB-5s-HL86-VH

Bezeichnung	F _{max} [kN]	f _m [N/mm ²]	E _{m,lokal,12} [N/mm ²]	E _{m,global,12} [N/mm ²]	τ _{v,90,90} [N/mm ²]	τ _{v,0,90} [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	K _{CLT} [mm ²]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
PB-5s-HL86-VH-01	143	44,0	14.599	14.917	1,11	2,50	511	155	1,556E+12	11,5	467
PB-5s-HL86-VH-02	123	39,2	13.847	13.868	1,03	2,26	484	155	1,515E+12	10,4	465
PB-5s-HL86-VH-03	105	33,1	14.058	14.725	0,843	1,88	496	154	1,514E+12	11,0	467
PB-5s-HL86-VH-04	95,4	31,2	13.581	14.013	0,788	1,72	487	154	1,463E+12	11,1	463
PB-5s-HL86-VH-05	101	31,0	13.290	14.120	0,802	1,77	511	154	1,551E+12	11,1	471
PB-5s-HL86-VH-06	77,9	25,3	13.838	13.569	0,651	1,45	482	154	1,475E+12	11,1	450
PB-5s-HL86-VH-07	88,7	29,5	14.542	14.647	0,743	1,64	487	154	1,437E+12	11,6	460
PB-5s-HL86-VH-08	141	43,4	13.226	14.010	1,12	2,58	511	154	1,555E+12	11,3	469
PB-5s-HL86-VH-09	133	41,9	14.598	15.476	1,10	2,60	486	154	1,514E+12	11,4	464
PB-5s-HL86-VH-10	129	40,1	13.851	13.990	1,02	2,43	512	154	1,546E+12	11,1	464
Anzahl	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Min	77,9	25,3	13.226	13.569	0,651	1,45	482	154	1,437E+12	10,4	450
Max	143	44,0	14.599	15.476	1,12	2,60	512	155	1,556E+12	11,6	471
Mittelwert	114	35,9	13.943	14.333	0,919	2,08	497	154	1,513E+12	11,2	464
Stabw.	23,0	6,63	509	584	0,172	0,436	13,2	0,444	4,197E+10	0,345	5,79
COV	20,3%	18,5%	3,65%	4,07%	18,7%	20,9%	2,66%	0,288%	2,77%	3,09%	1,25%
Faktor ks		2,10		2,10	2,10						-
char. Wert		23,6		0,601	1,30						455

C-2-2 PB-3s-HL86

Tabelle Anhang C-12: Prüfergebnisse – PB-3s-HL86

Bezeichnung	F _{max} [kN]	σ _m [N/mm ²]	E _{m,lokal,12} [N/mm ²]	E _{m,global,12} [N/mm ²]	f _{v,90,90} [N/mm ²]	τ _{v,0,90} [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	K _{CLT} [mm ²]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]
PB-3s-HL86-01	47,1	22,7	11.703	11.833	0,480	0,715	566	119	8,752E+11	11,4	468
PB-3s-HL86-02	39,3	22,9	13.300	13.070	0,469	0,722	486	118	7,269E+11	11,4	503
PB-3s-HL86-03	44,2	24,1	14.495	13.990	0,497	0,736	516	118	7,728E+11	11,3	472
PB-3s-HL86-04	37,5	21,5	13.776	13.268	0,441	0,724	496	117	7,298E+11	11,7	476
PB-3s-HL86-05	41,8	23,6	13.366	13.899	0,490	0,733	495	118	7,411E+11	11,7	488
PB-3s-HL86-06	36,2	23,8	11.769	11.892	0,497	0,767	420	119	6,477E+11	11,6	484
PB-3s-HL86-07	38,2	23,0	13.198	13.582	0,479	0,765	462	118	7,027E+11	11,4	491
PB-3s-HL86-08	32,5	18,9	12.547	11.937	0,392	0,587	481	118	7,248E+11	11,9	475
PB-3s-HL86-09	38,4	21,8	13.158	12.576	0,461	0,675	481	119	7,465E+11	12,1	474
PB-3s-HL86-10	42,7	23,8	12.727	13.194	0,495	0,752	501	118	7,558E+11	11,7	482
PB-3s-HL86-11	41,2	22,6	12.675	12.394	0,472	0,822	506	118	7,627E+11	11,1	491
PB-3s-HL86-12	39,7	22,2	14.262	13.937	0,465	0,704	496	118	7,513E+11	11,4	501
PB-3s-HL86-13	37,3	21,3	12.010	12.601	0,444	0,628	491	117	7,363E+11	11,9	476
PB-3s-HL86-14	38,8	20,9	13.057	13.116	0,443	0,615	509	118	7,739E+11	11,6	490
PB-3s-HL86-15	38,3	21,9	12.835	12.610	0,453	0,662	492	118	7,358E+11	12,0	478
Anzahl	15	15	15	15	15	15	15	15	1,500E+01	15	15
Min	32,5	18,9	11.703	11.833	0,392	0,587	420	117	6,477E+11	11,1	468
Max	47,1	24,1	14.495	13.990	0,497	0,822	566	119	8,752E+11	12,1	503

Bezeichnung	F_{max} [kN]	σ_m [N/mm ²]	$E_{m,lokal,12}$ [N/mm ²]	$E_{m,global,12}$ [N/mm ²]	$f_{v,90,90}$ [N/mm ²]	$\tau_{v,0,90}$ [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	K_{CLT} [mm ²]	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]
Mittelwert	39,5	22,3	12.992	12.927	0,465	0,707	493	118	7,456E+11	11,6	483
Stabw.	3,50	1,36	816	738	0,028	0,064	30,6	0,418	4,738E+10	0,278	10,5
COV	8,86%	6,09%	6,28%	5,71%	6,02%	9,00%	6,21%	0,354%	6,36%	2,39%	2,17%
Faktor ks		1,99			1,99	1,99					-
char. Wert		19,7			0,410	0,587					466

C-2-3 PS-5s-HL86-VH

Tabelle Anhang C-13: Prüfergebnisse – PS-5s-HL86-VH

Bezeichnung	F_{max} [kN]	σ_m [N/mm ²]	$E_{m,lokal,12}$ [N/mm ²]	$f_{v,90,90}$ [N/mm ²]	$\tau_{v,0,90}$ [N/mm ²]	Breite [mm]	Dicke [mm]	K_{CLT} [mm ²]	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]
PS-5s-HL86-VH-01	198	30,8	14.767	1,58	3,27	512	154	1,544E+12	11,6	471
PS-5s-HL86-VH-02	175	25,8	15.782	1,36	3,01	520	154	1,626E+12	11,1	489
PS-5s-HL86-VH-03	150	24,0	14.931	1,24	2,77	497	154	1,496E+12	11,2	479
PS-5s-HL86-VH-04	136	23,1	14.464	1,18	2,72	467	154	1,407E+12	11,4	490
PS-5s-HL86-VH-05	137	23,1	13.708	1,16	2,75	480	154	1,422E+12	11,6	477
PS-5s-HL86-VH-06	119	19,1	14.947	0,982	2,37	491	153	1,483E+12	11,6	493
PS-5s-HL86-VH-07	153	23,7	13.814	1,23	2,72	503	154	1,547E+12	11,6	467
PS-5s-HL86-VH-08	157	26,3	13.502	1,32	3,27	482	154	1,433E+12	11,7	490
Anzahl	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00E+00	8,00	8,00
Min	119	19,1	13.502	0,982	2,37	467	153	1,407E+12	11,1	467
Max	198	30,8	15.782	1,58	3,27	520	154	1,626E+12	11,7	493
Mittelwert	153	24,5	14.489	1,26	2,86	494	154	1,495E+12	11,5	482
Stabw.	24,7	3,32	774	0,175	0,305				0,214	9,82
COV	16,1%	13,6%	5,34%	13,9%	10,7%				1,86%	2,04%
Faktor ks		2,19		2,19	2,19					
char. Wert		18,1		0,921	2,25					466

ANHANG D: DIAGRAMME

D-1	PRÜFUNGEN DER GRUNDPRODUKTE.....	D-28
D-1-1	Z-HL86.....	D-28
D-1-2	Z-HL112.....	D-30
D-1-3	B-HL86-FK.....	D-31
D-1-4	B-HL86-FK-II.....	D-32
D-1-5	B-HL86-FK-KZ.....	D-33
D-1-6	B-HL112-FK.....	D-34
D-1-7	B-HL112-FK-KZ.....	D-35
D-2	PRÜFUNGEN AN HOHLAMELLEN IM GESPERRTEN AUFBAU.....	D-35
D-2-1	PB-5s-HL86-VH.....	D-35
D-2-2	PB-3s-HL86.....	D-36
D-2-3	PS-5s-HL86-VH.....	D-37
D-2-4	K-5s-HL86-VH.....	D-38
D-2-5	K-3s-HL86.....	D-41
D-2-6	QD-HL86-VH-BSH.....	D-45
D-2-7	QD-HL86-BSH.....	D-45
D-2-8	QD-HL86-BSP.....	D-46
D-2-9	QD-HL112-BSH.....	D-46
D-2-10	QD-HL112-BSP.....	D-47

D-1 Prüfungen der Grundprodukte

D-1-1 Z-HL86

Z-HL86-01 bis 10

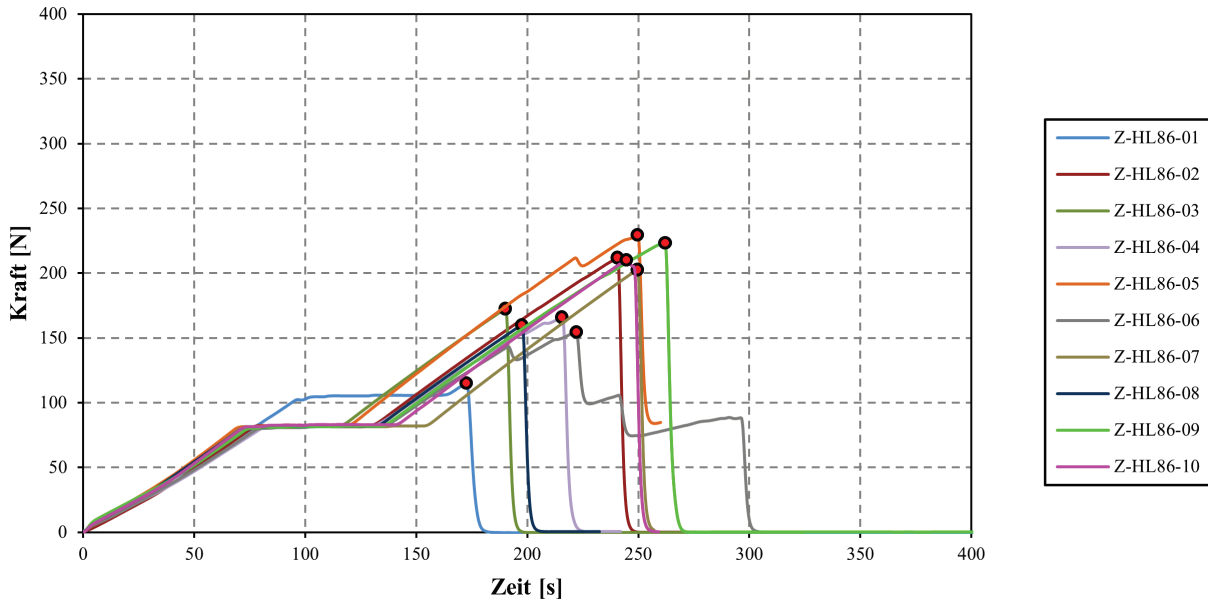


Abbildung Anhang D-1: Kraft-Zeit-Diagramm – Z-HL86-01 bis 10

Z-HL86-11 bis 20

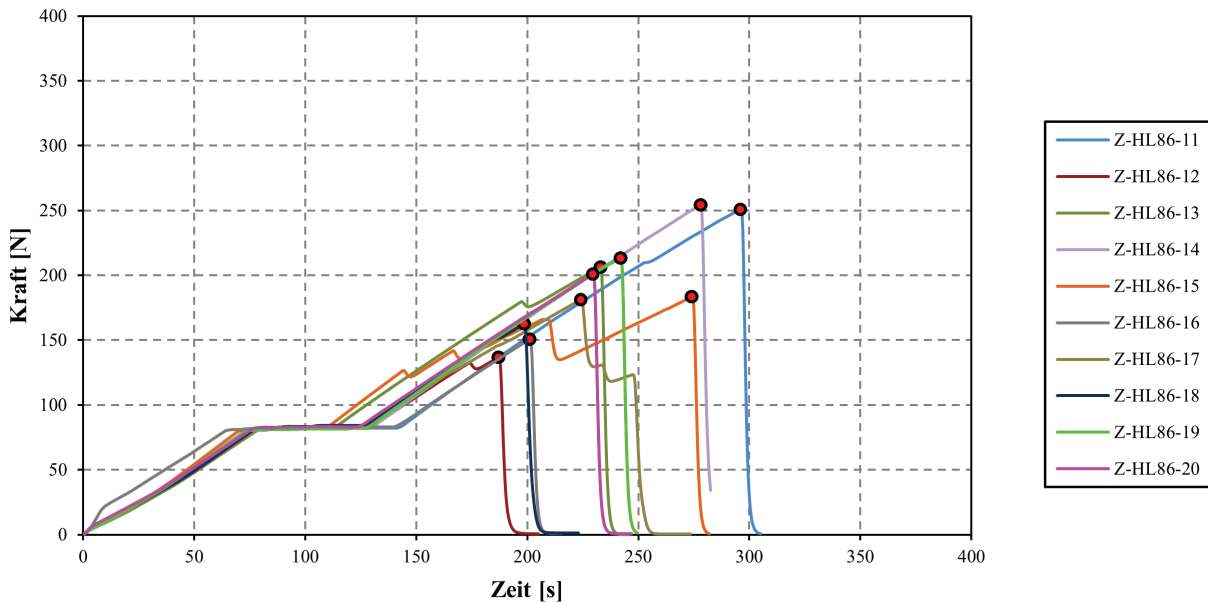


Abbildung Anhang D-2: Kraft-Zeit-Diagramm – Z-HL86-11 bis 20

Z-HL86-21 bis 30

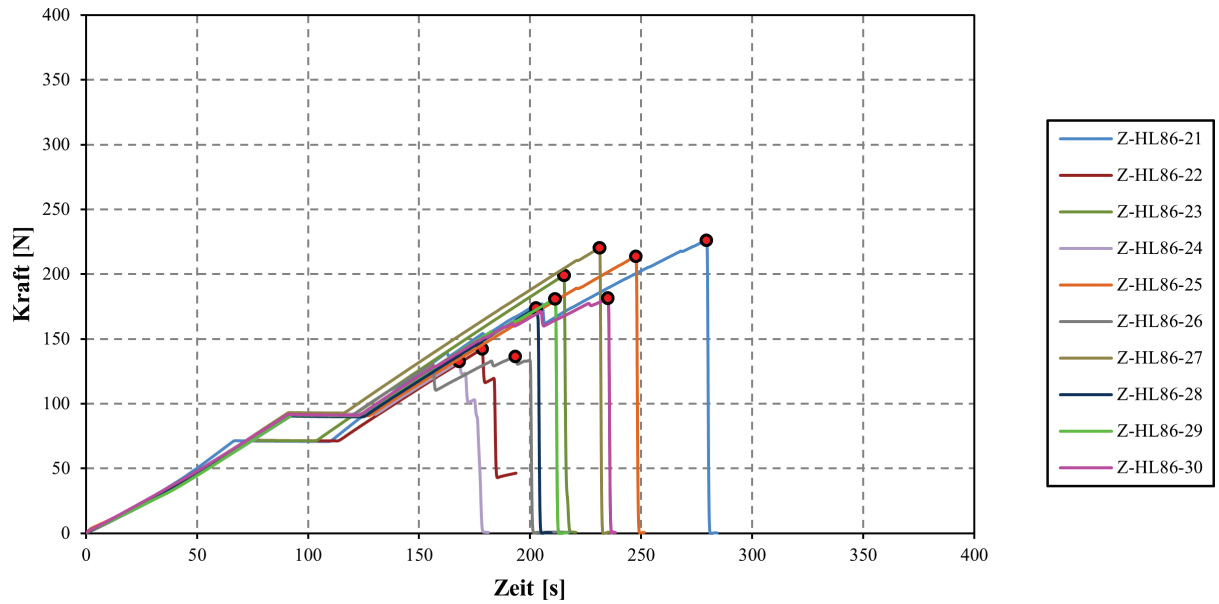


Abbildung Anhang D-3: Kraft-Zeit-Diagramm – Z-HL86-21 bis 30

Z-HL86-31 bis 40

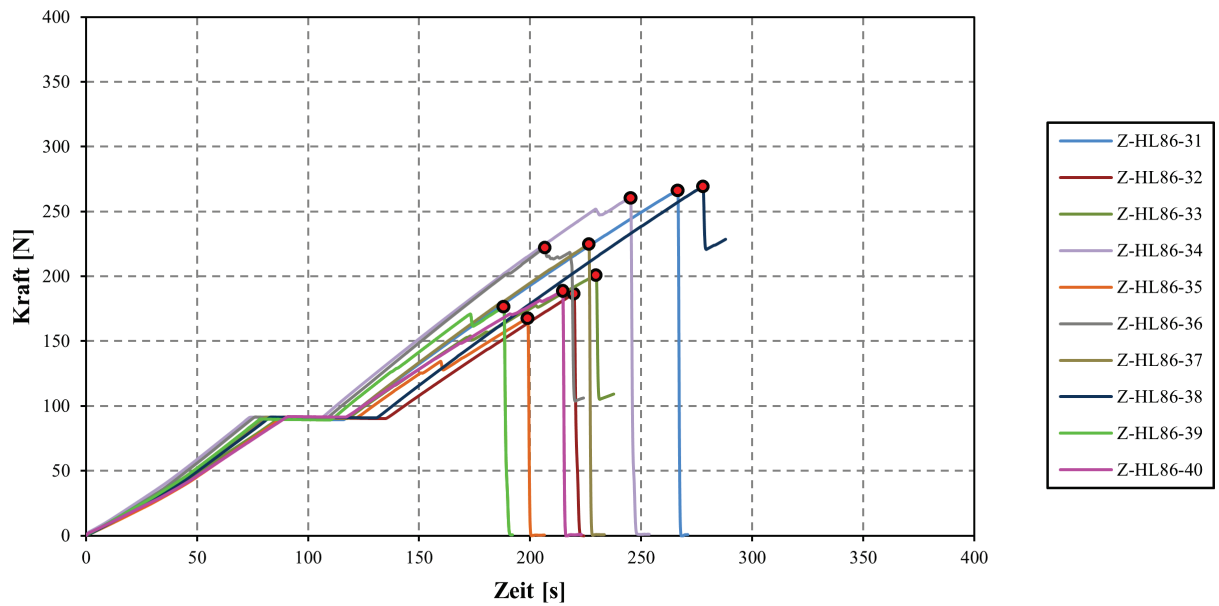


Abbildung Anhang D-4: Kraft-Zeit-Diagramm – Z-HL86-31 bis 40

D-1-2 Z-HL112

Z-HL112-01 bis 10

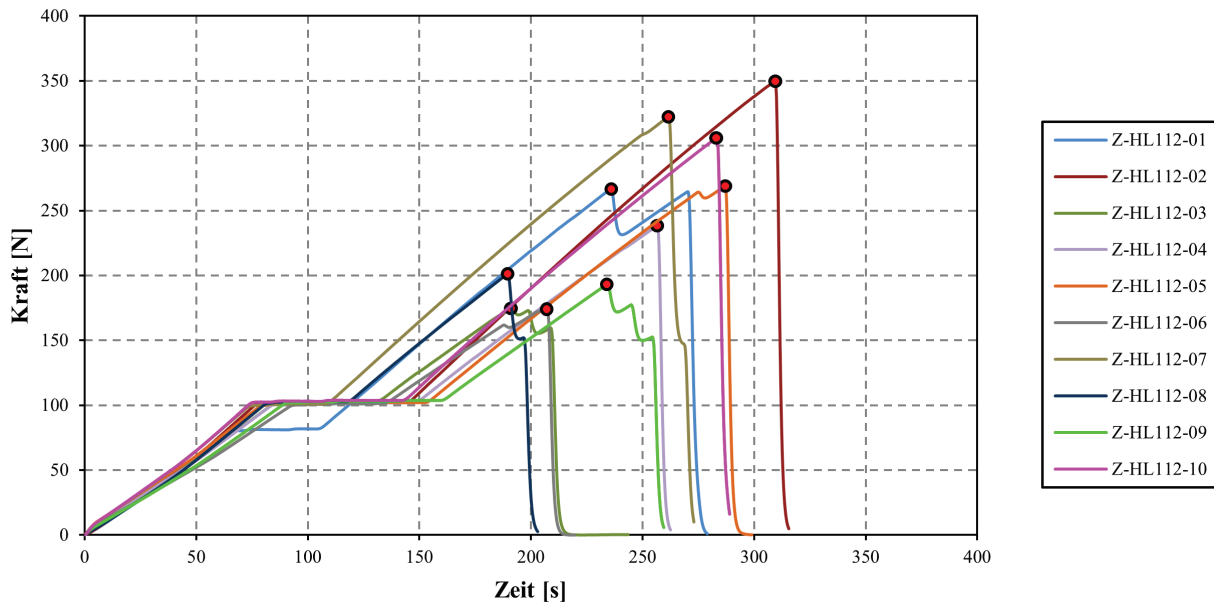


Abbildung Anhang D-5: Kraft-Zeit-Diagramm – Z-HL112-01 bis 10

Z-HL112-11 bis 20

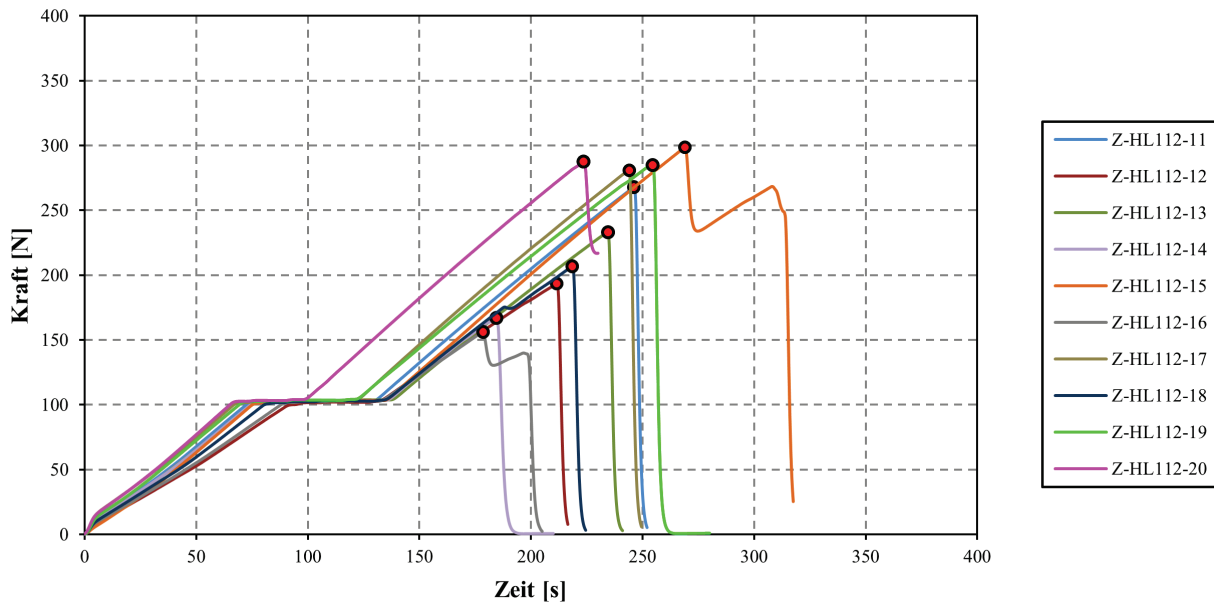


Abbildung Anhang D-6: Kraft-Zeit-Diagramm – Z-HL112-11 bis 20

D-1-3 B-HL86-FK

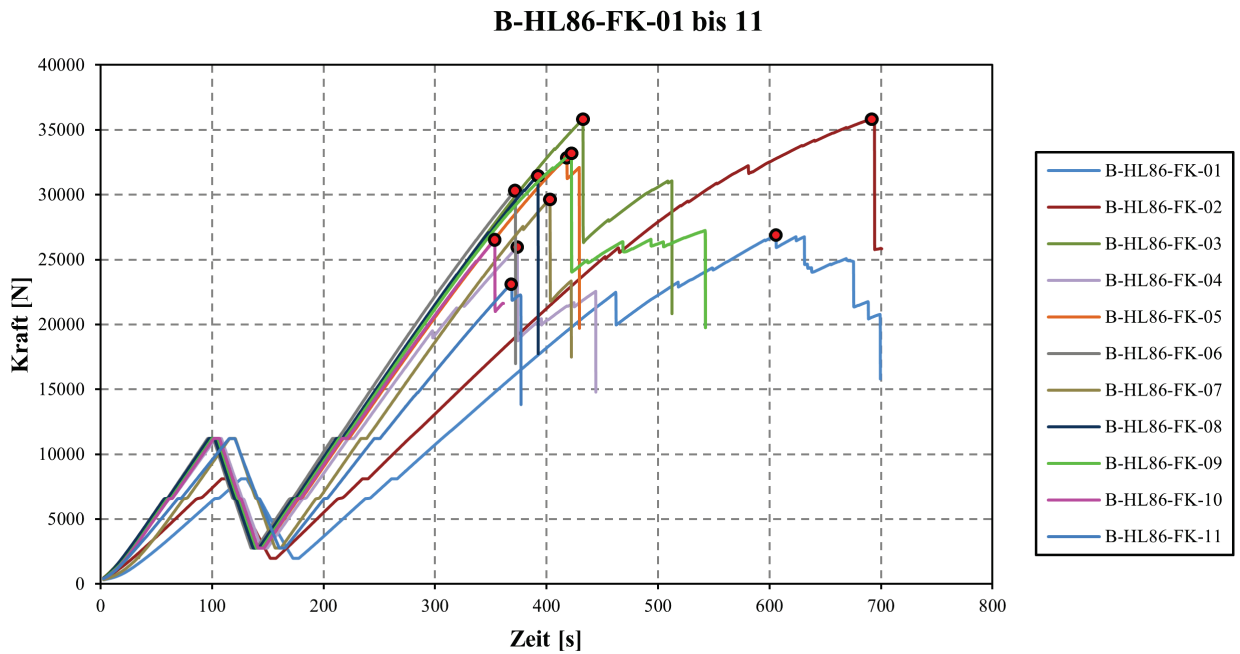


Abbildung Anhang D-7: Kraft-Zeit-Diagramm – B-HL86-FK-01 bis 11

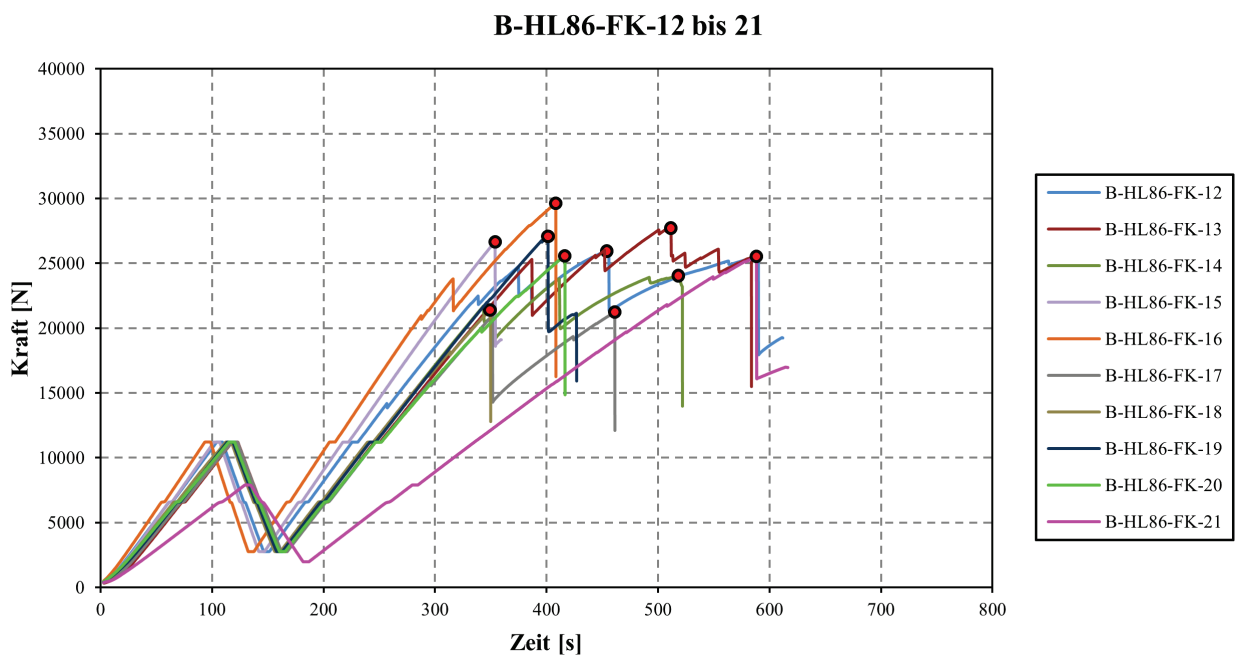


Abbildung Anhang D-8: Kraft-Zeit-Diagramm – B-HL86-FK-12 bis 21

D-1-4 B-HL86-FK-II

B-HL86-FK-II-01 bis 07

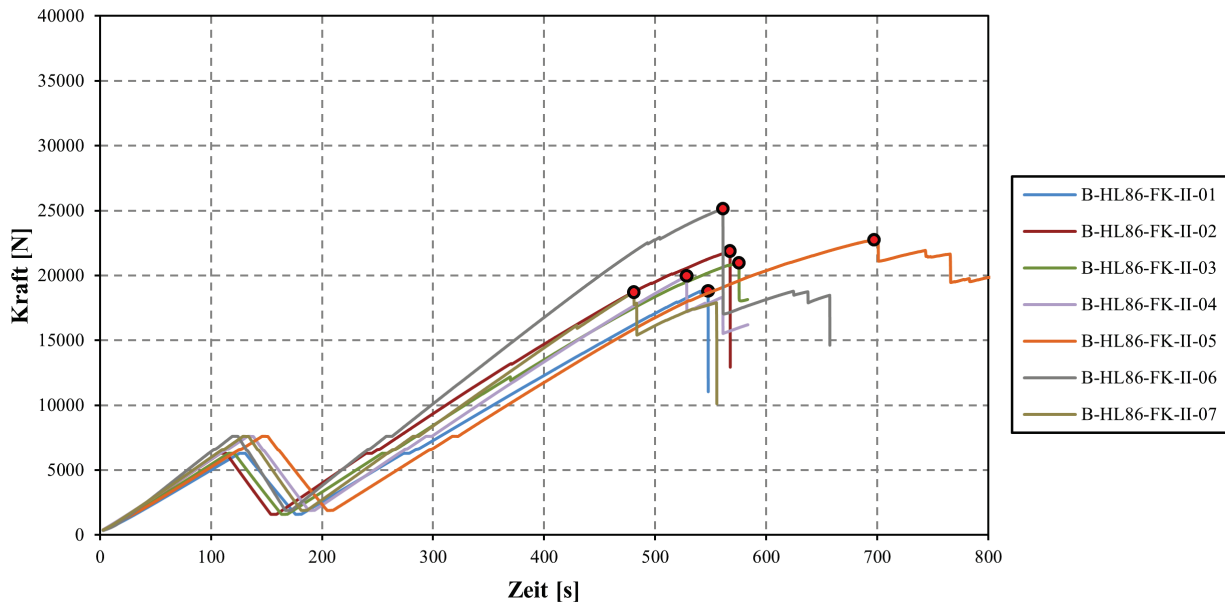


Abbildung Anhang D-9: Kraft-Zeit-Diagramm – B-HL86-FK-II-01 bis 07

B-HL86-FK-II-08 bis 14

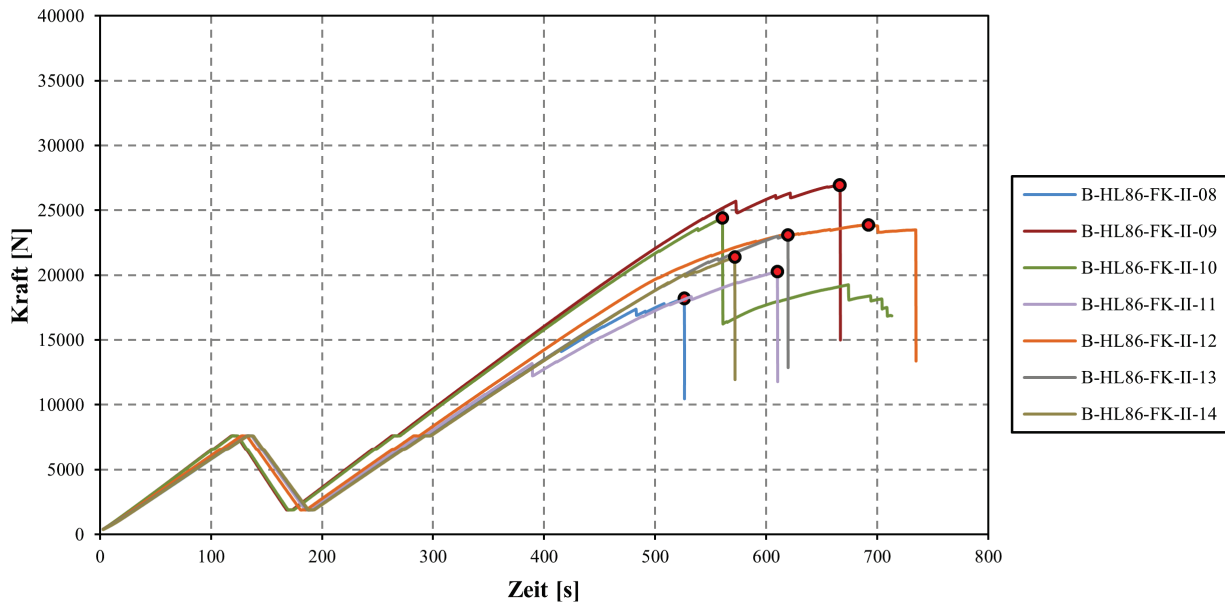


Abbildung Anhang D-10: Kraft-Zeit-Diagramm – B-HL86-FK-II-08 bis 14

D-1-5 B-HL86-FK-KZ

B-HL86-FK-KZ-01 bis 10

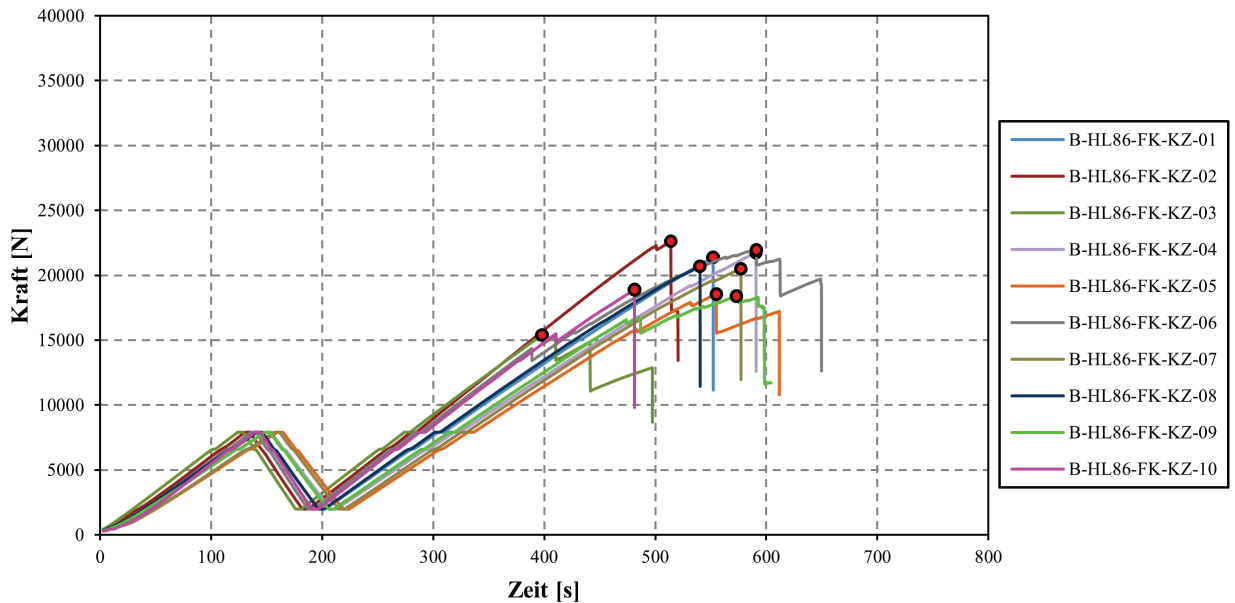


Abbildung Anhang D-11: Kraft-Zeit-Diagramm – B-HL86-FK-KZ-01 bis 10

B-HL86-FK-KZ-11 bis 20

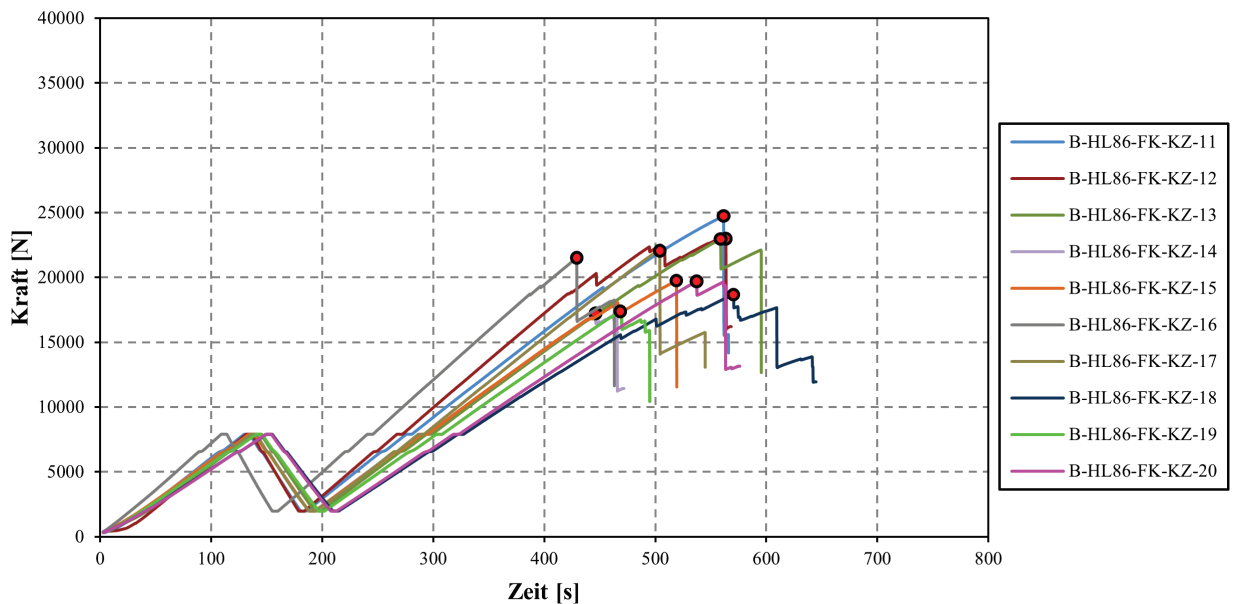


Abbildung Anhang D-12: Kraft-Zeit-Diagramm – B-HL86-FK-KZ-11 bis 20

D-1-6 B-HL112-FK

B-HL112-FK-01 bis 11

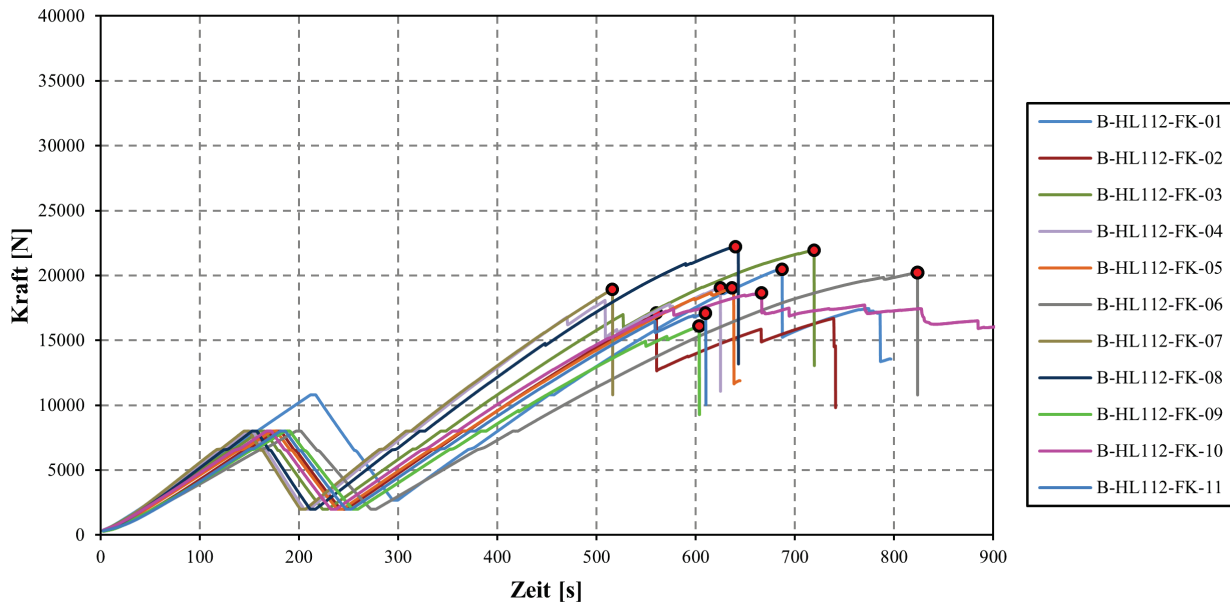


Abbildung Anhang D-13: Kraft-Zeit-Diagramm – B-HL112-FK-01 bis 11

B-HL112-FK-12 bis 20

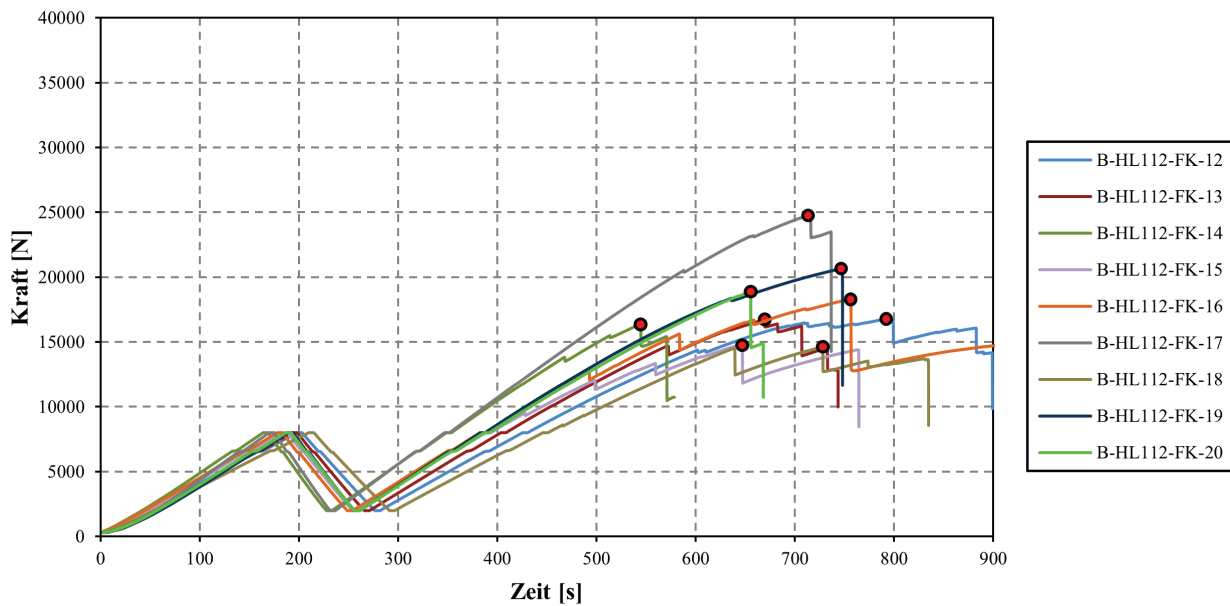


Abbildung Anhang D-14: Kraft-Zeit-Diagramm – B-HL112-FK-12 bis 20

D-1-7 B-HL112-FK-KZ

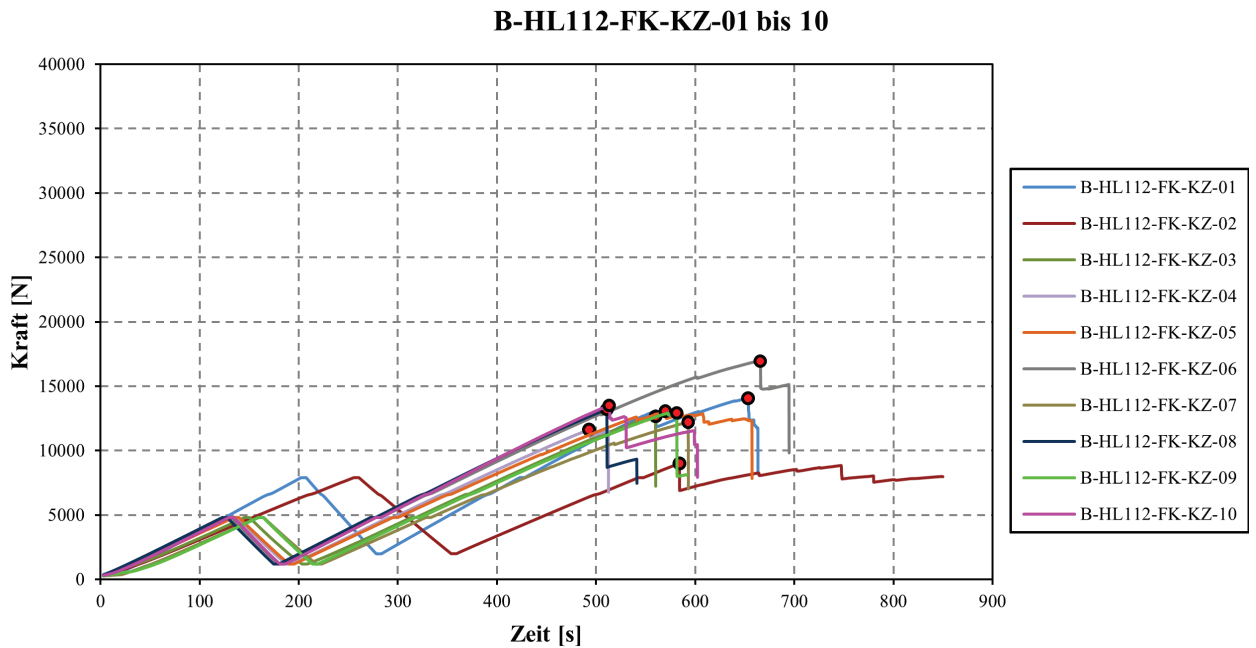


Abbildung Anhang D-15: Kraft-Zeit-Diagramm – B-HL112-FK-KZ-01 bis 10

D-2 Prüfungen an Hohllamellen im gesperrten Aufbau

D-2-1 PB-5s-HL86-VH

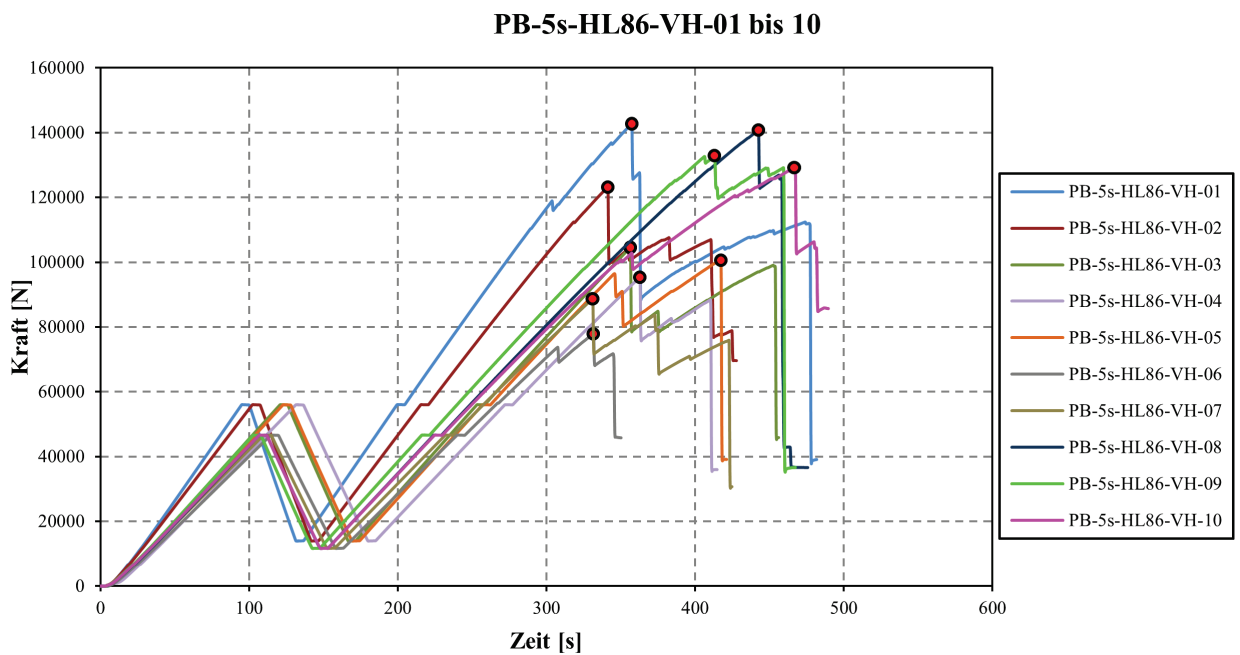


Abbildung Anhang D-16: Kraft-Zeit-Diagramm – PB-5s-HL86-VH-01 bis 10

D-2-2 PB-3s-HL86

PB-3s-HL86-01 bis 08

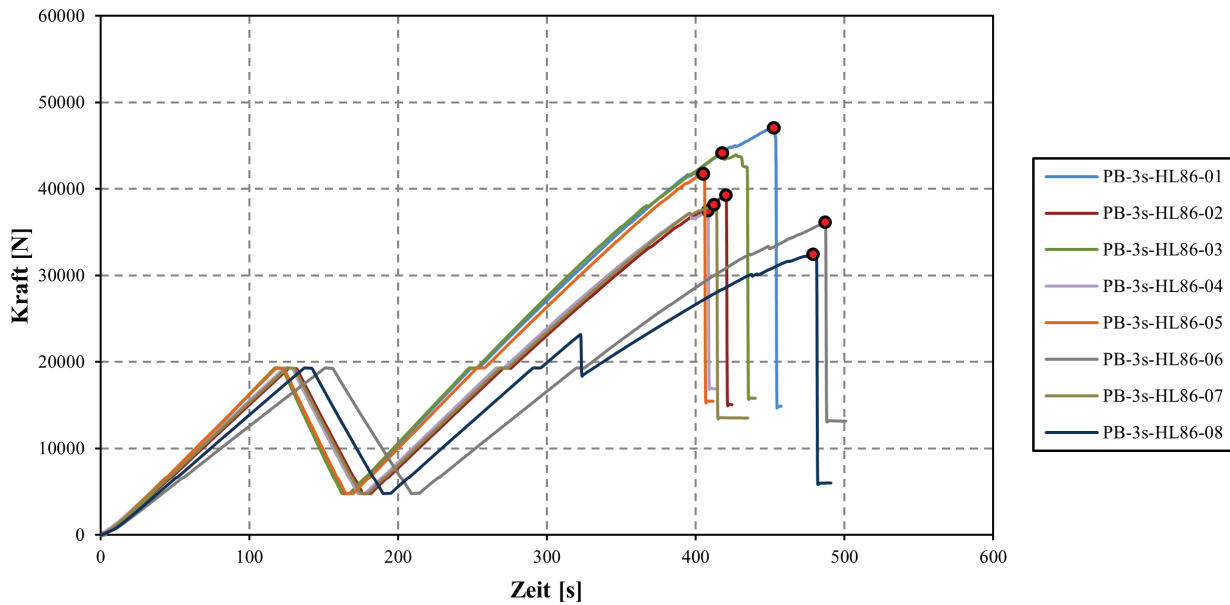


Abbildung Anhang D-17: Kraft-Zeit-Diagramm – PB-3s-HL86-01 bis 08

PB-3s-HL86-09 bis 15

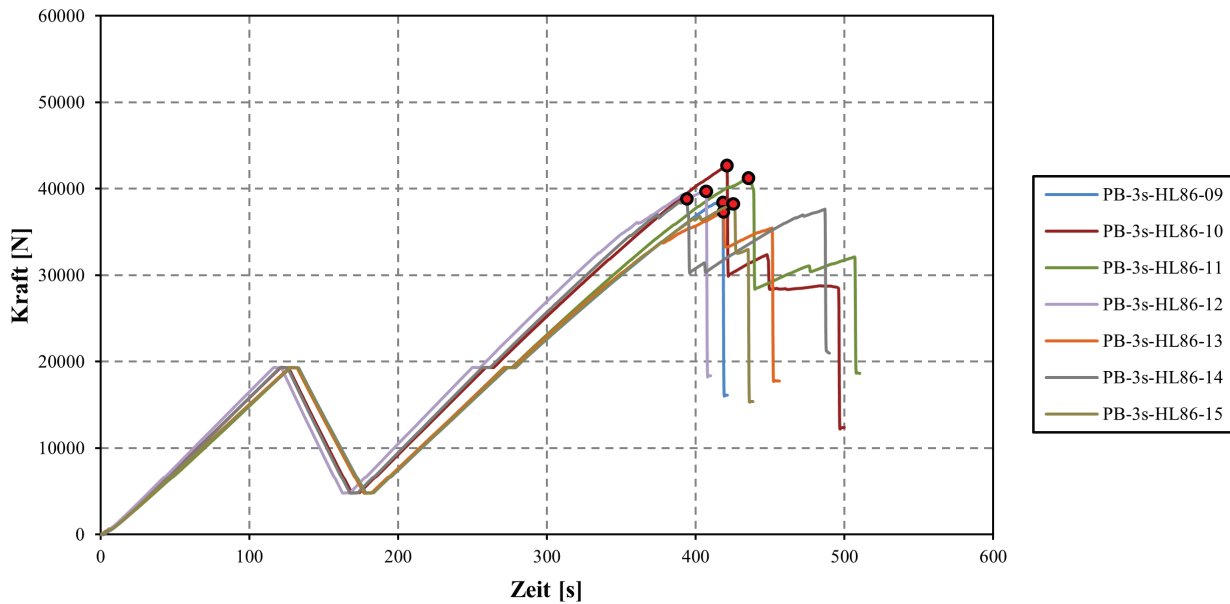


Abbildung Anhang D-18: Kraft-Zeit-Diagramm – PB-3s-HL86-09 bis 15

D-2-3 PS-5s-HL86-VH

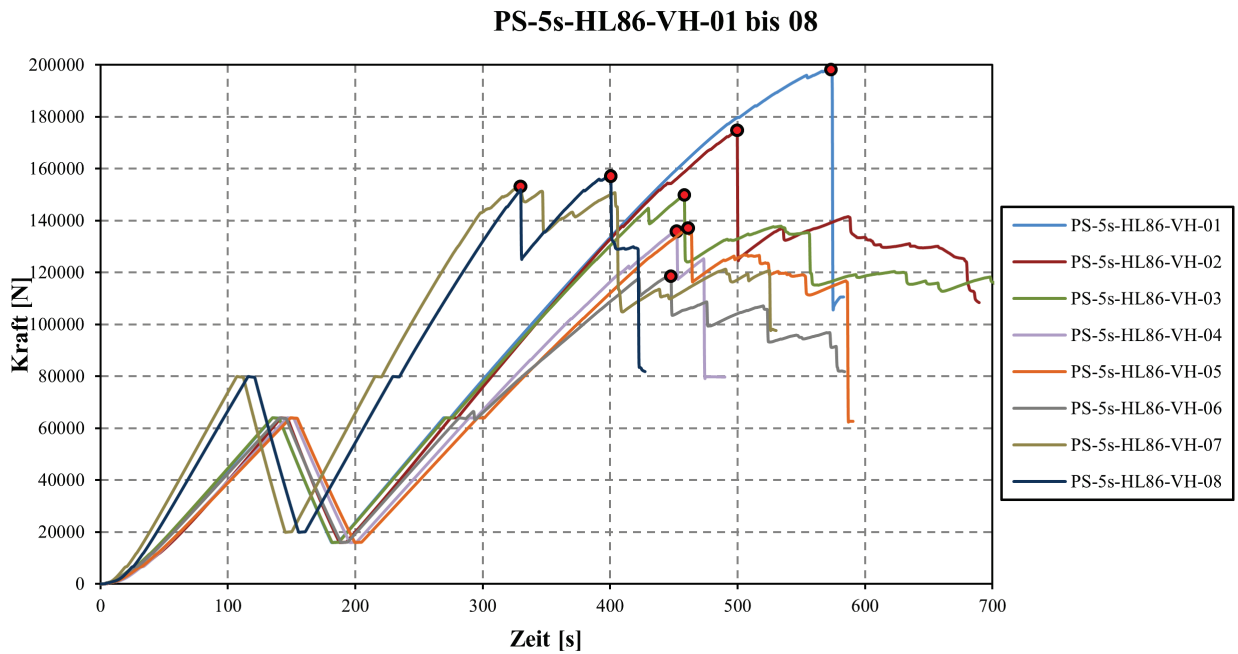


Abbildung Anhang D-19: Kraft-Zeit-Diagramm – PS-5s-HL86-VH-01 bis 08

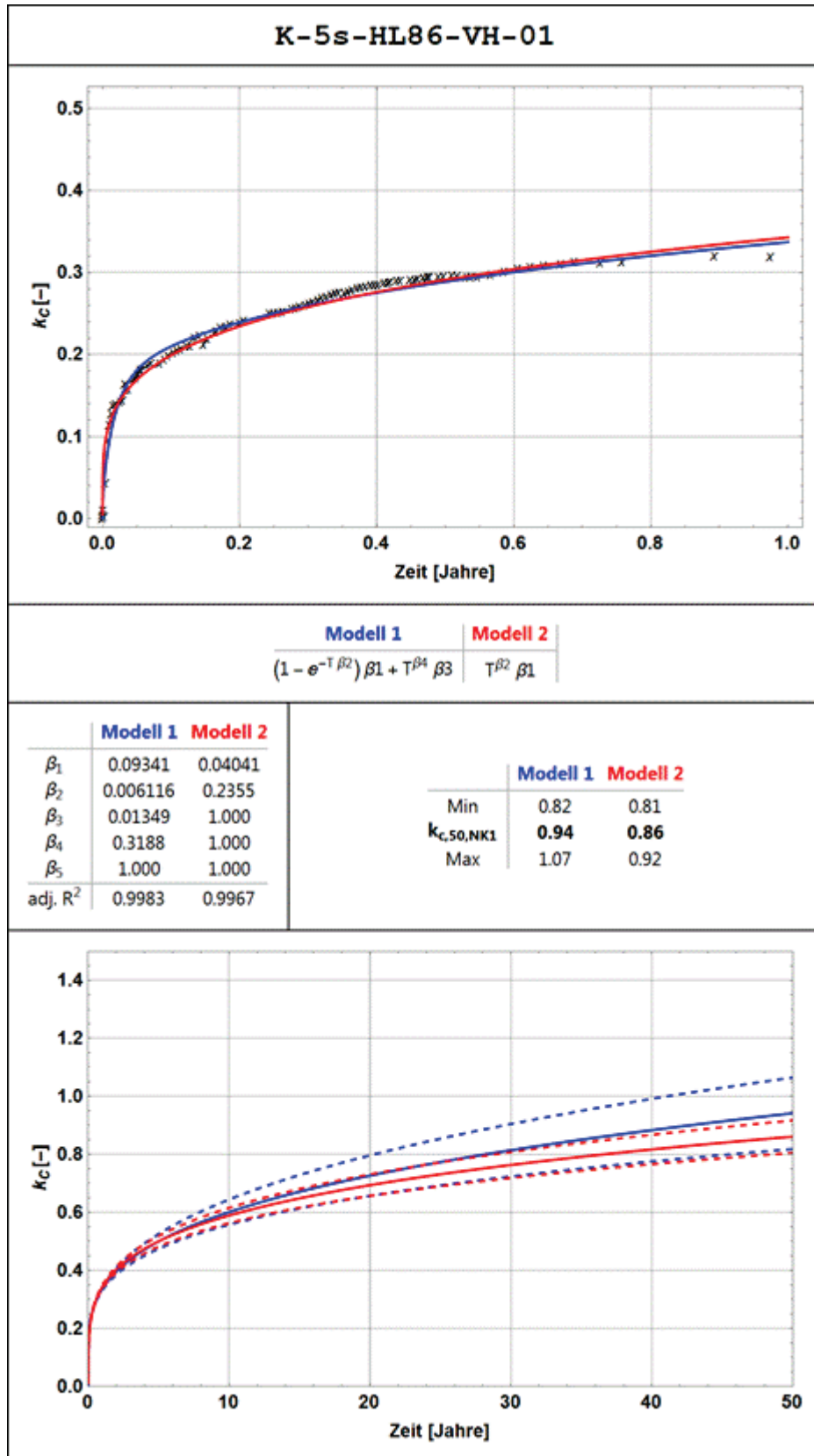
D-2-4 K-5s-HL86-VH


Abbildung Anhang D-20: K-5s-HL86-VH-01

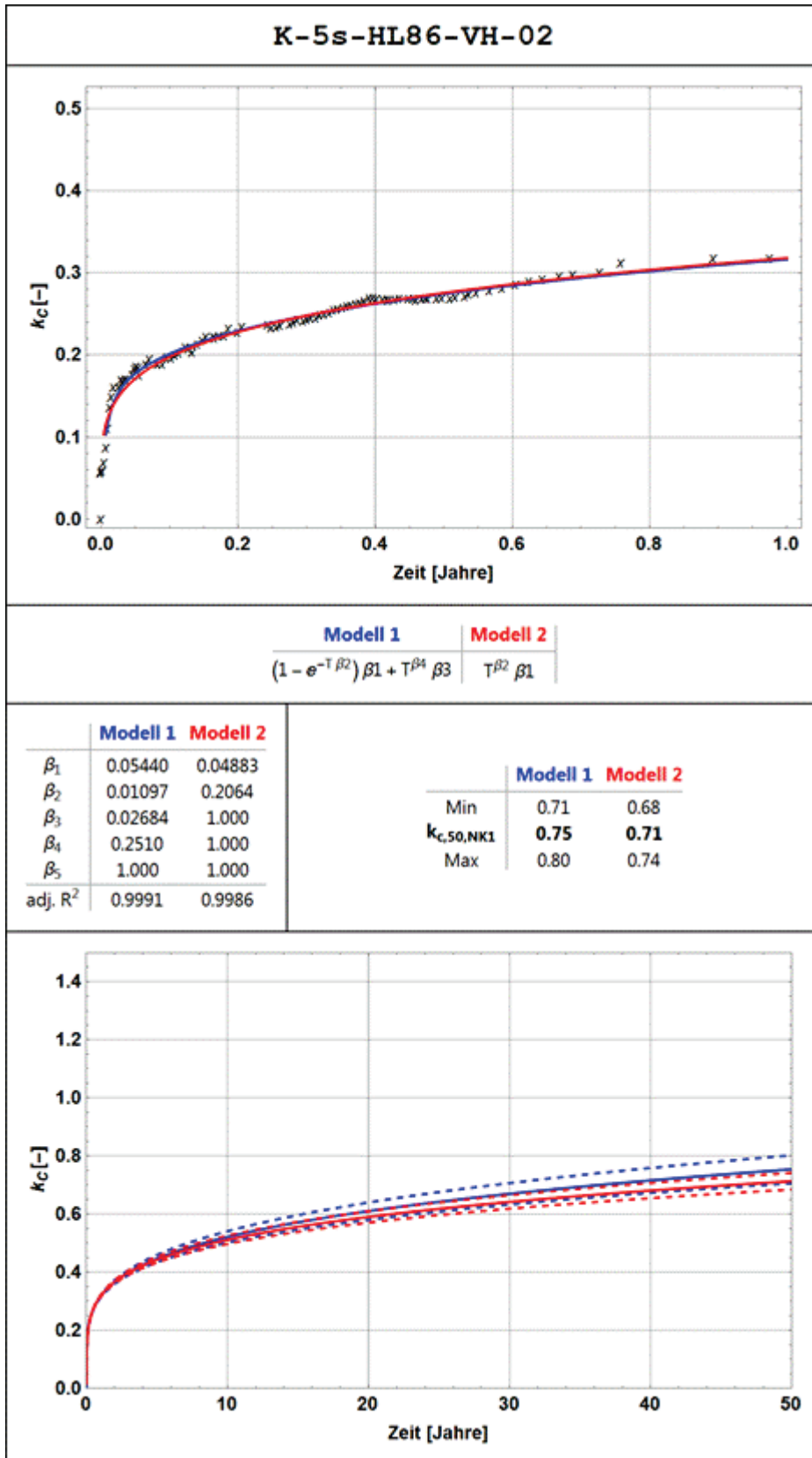


Abbildung Anhang D-21: K-5s-HL86-VH-02

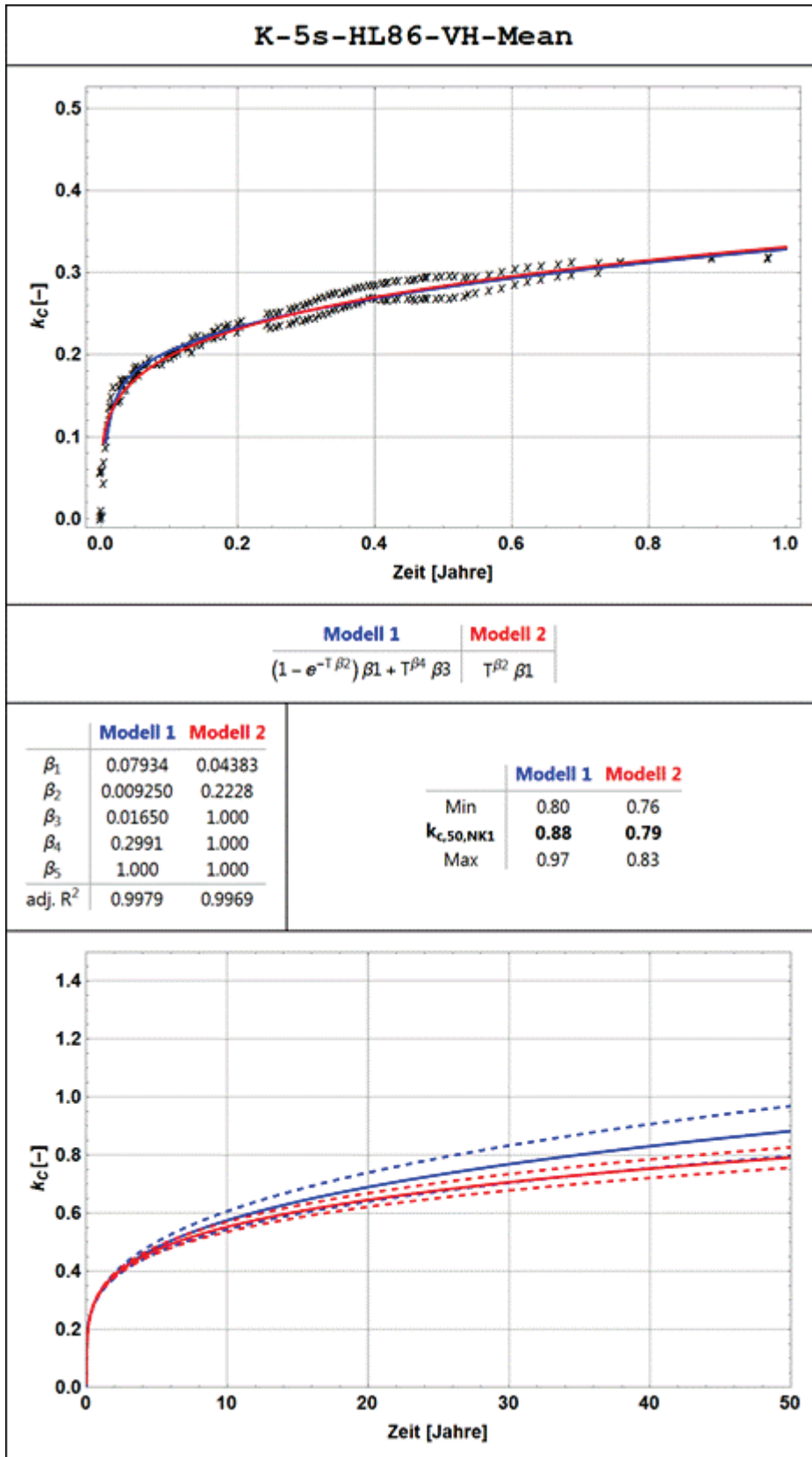


Abbildung Anhang D-22: K-5s-HL86-VH-Mean

D-2-5 K-3s-HL86

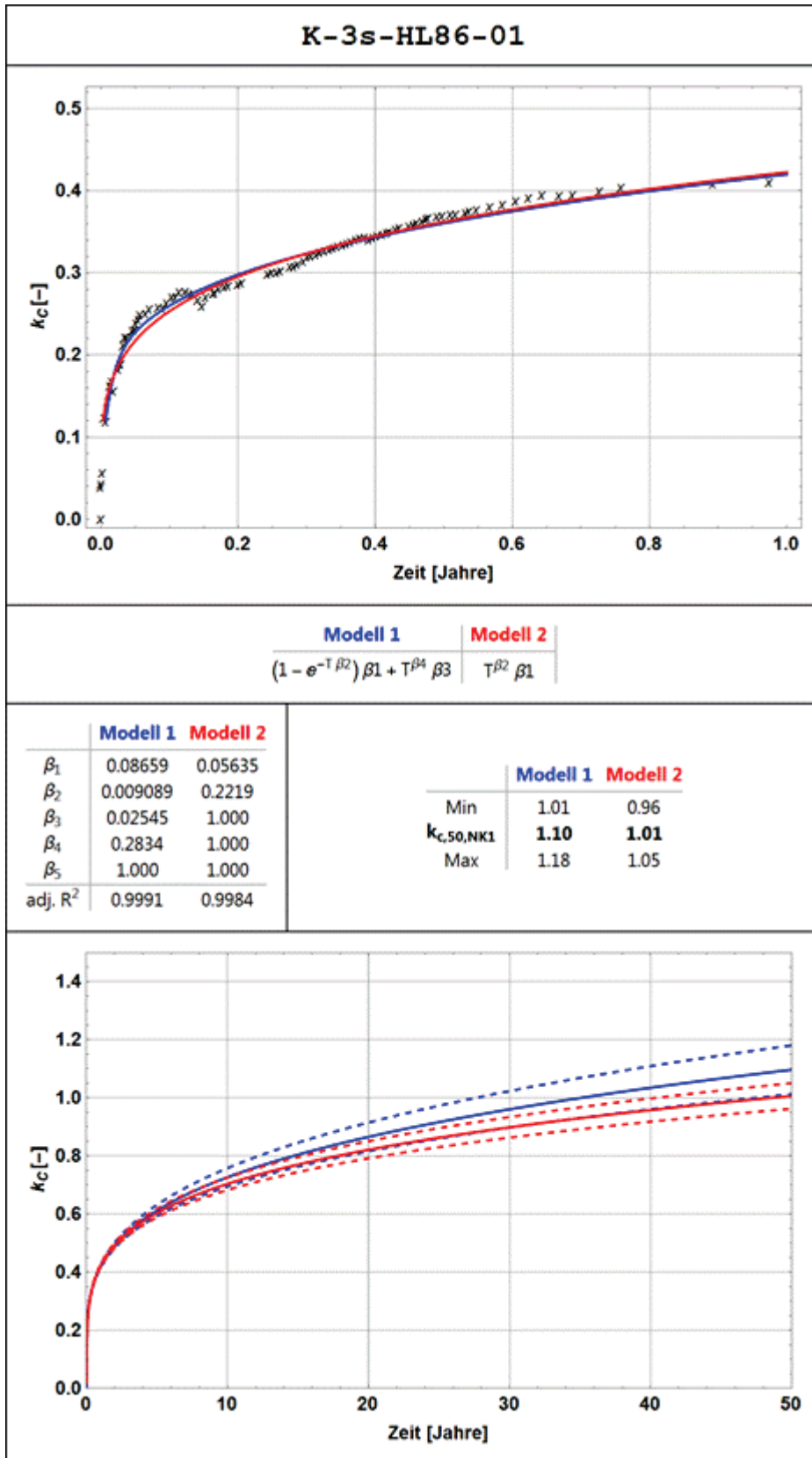


Abbildung Anhang D-23: K-3s-HL86-01

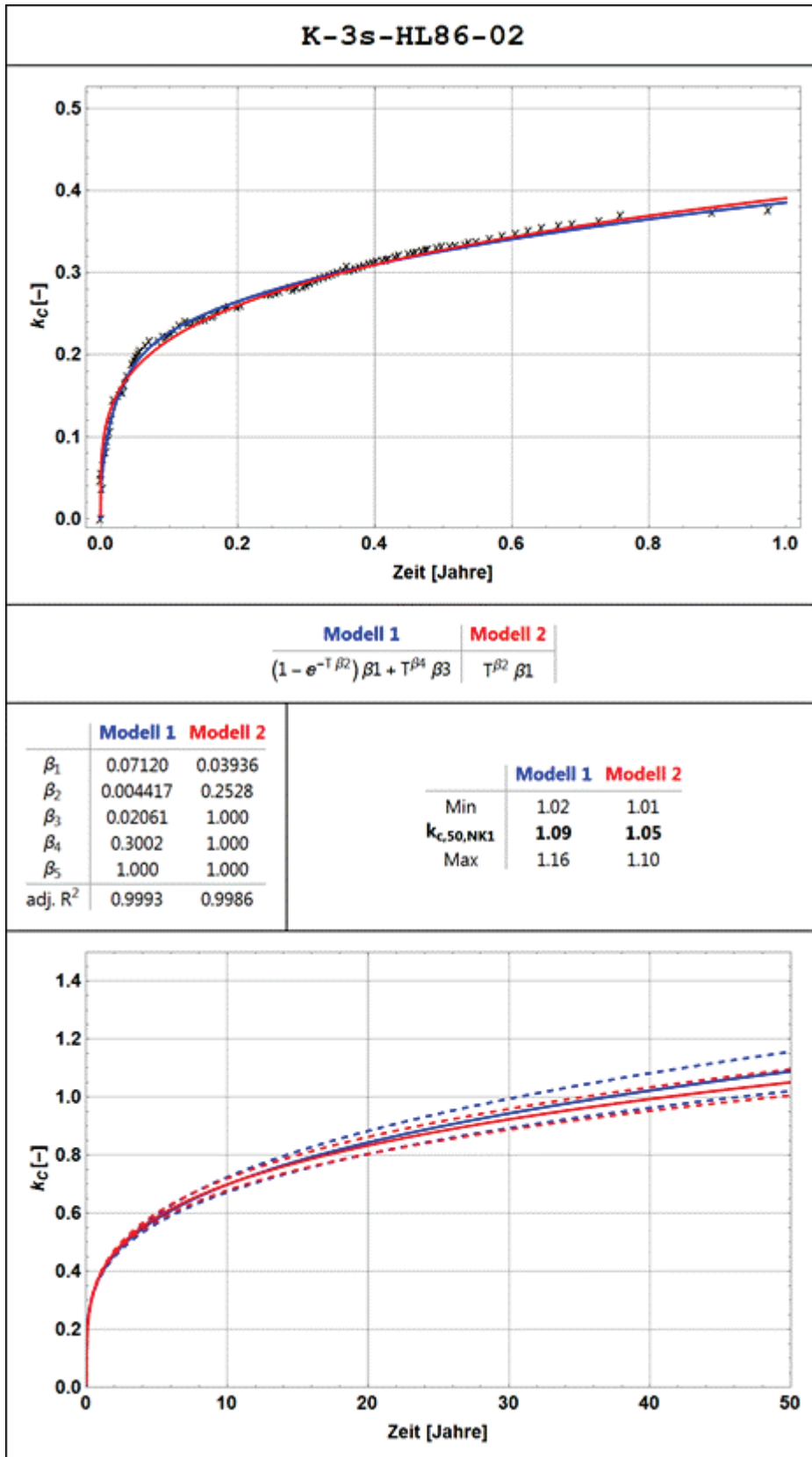


Abbildung Anhang D-24: K-3s-HL86-02

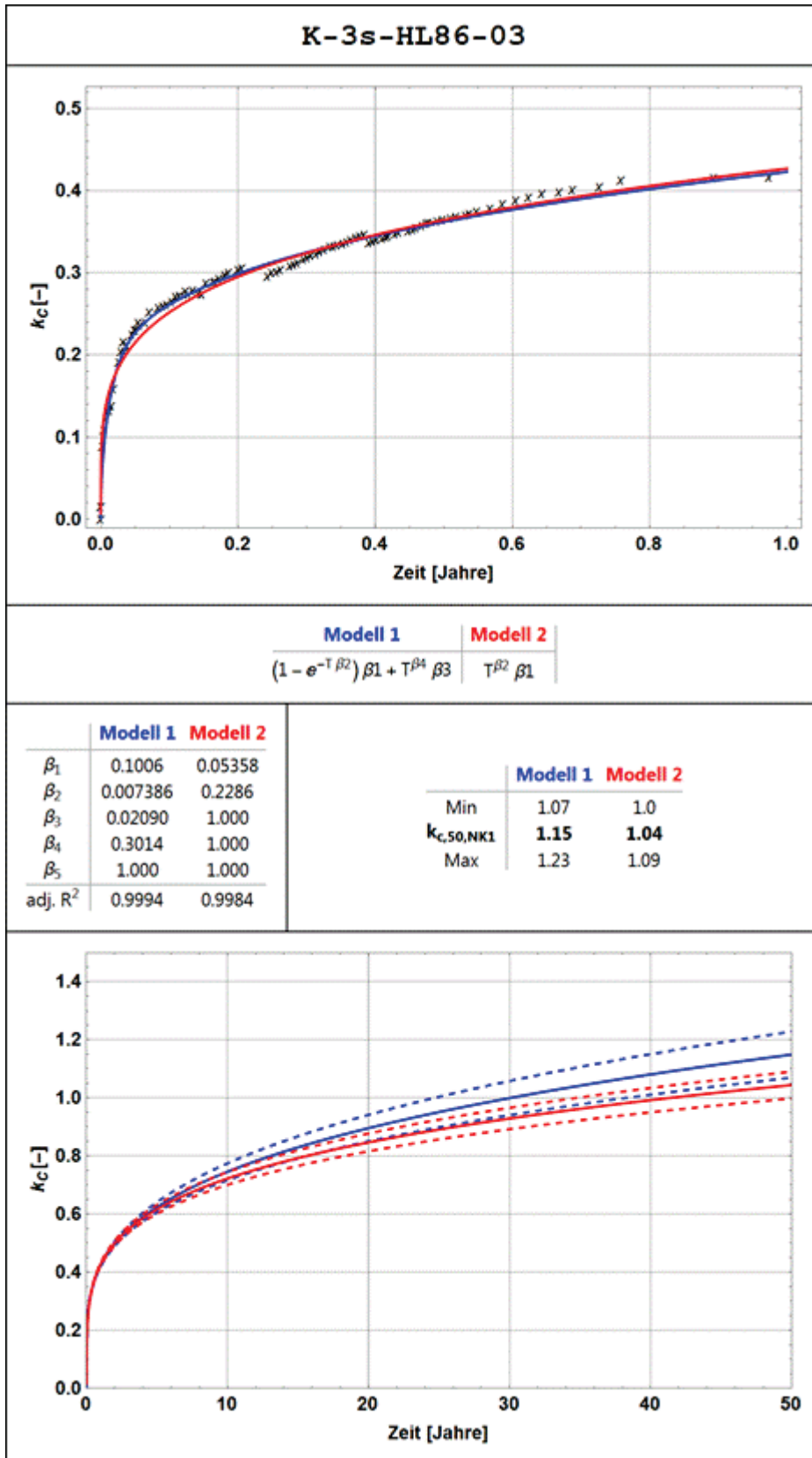


Abbildung Anhang D-25: K-3s-HL86-03

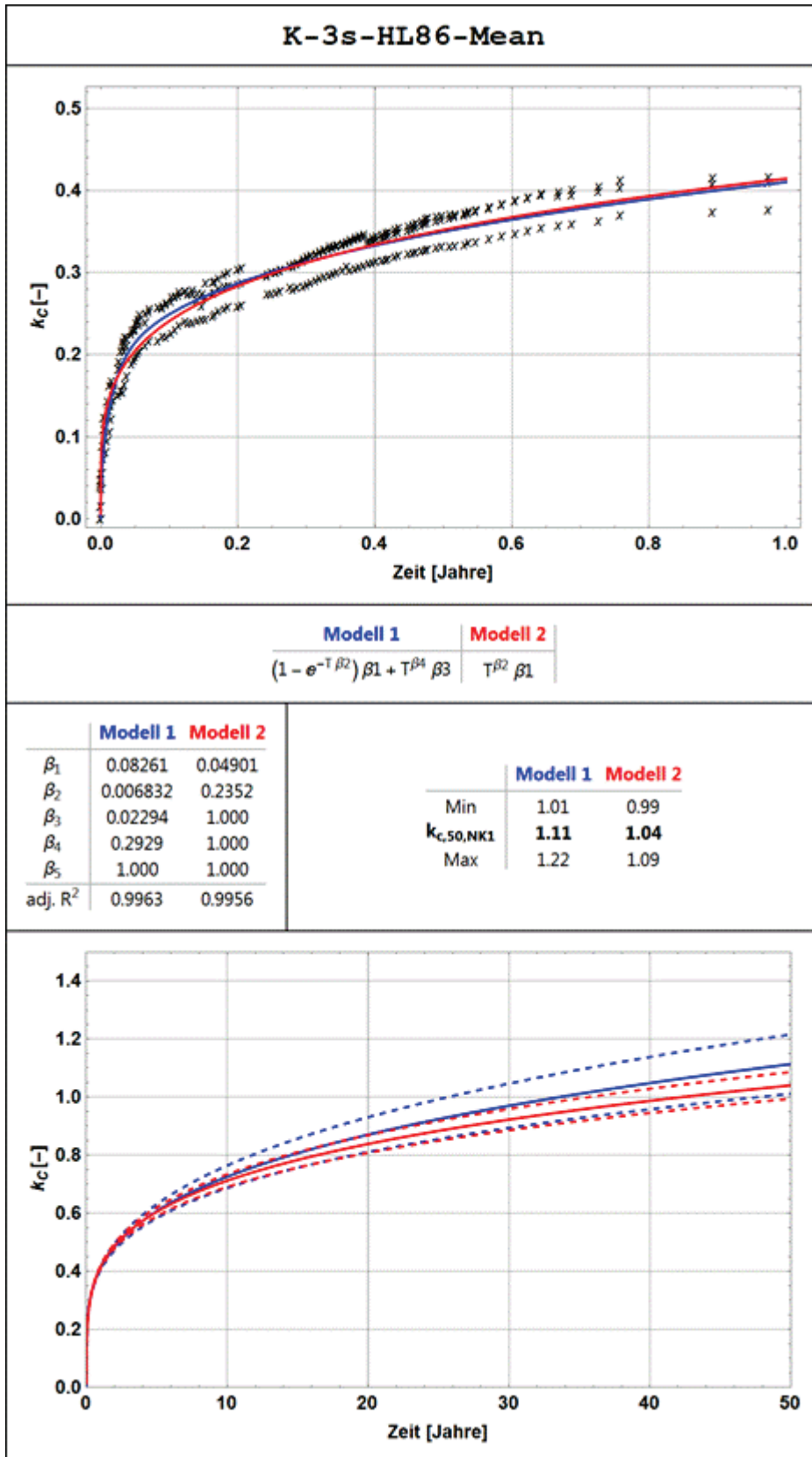


Abbildung Anhang D-26: K-3s-HL86-Mean

D-2-6 QD-HL86-VH-BSH

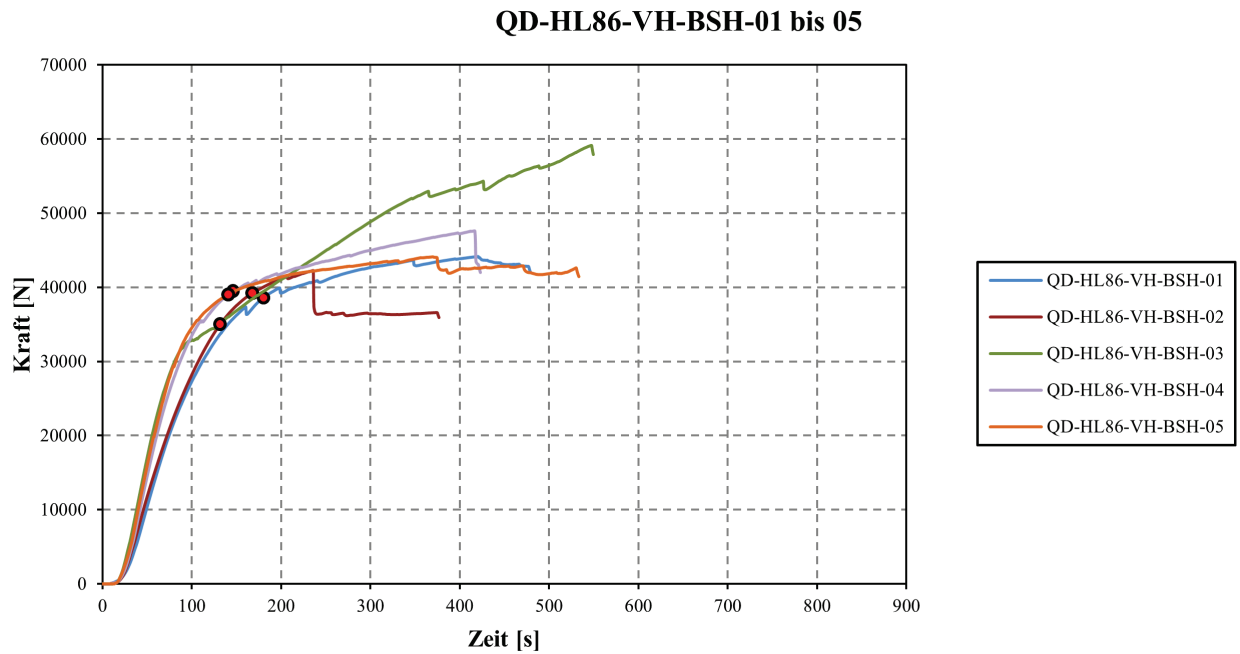


Abbildung Anhang D-27: Kraft-Zeit-Diagramm – QD-HL86-VH-BSH-01 bis 05

D-2-7 QD-HL86-BSH

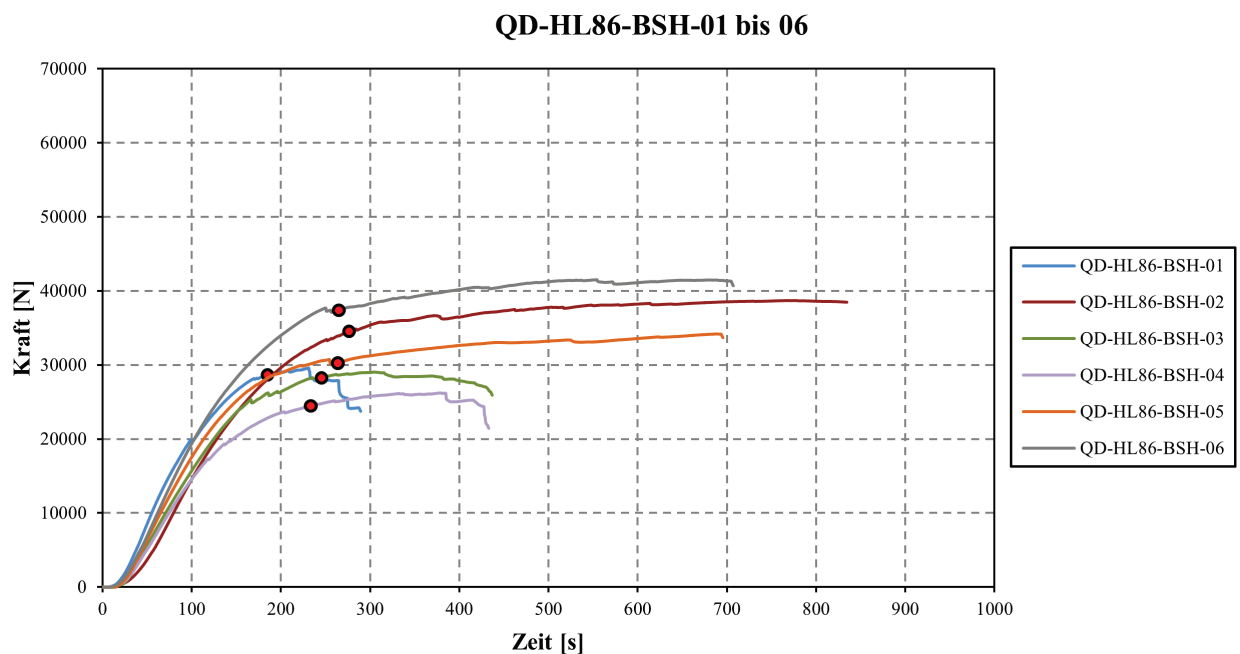


Abbildung Anhang D-28: Kraft-Zeit-Diagramm – QD-HL86-BSH-01 bis 06

D-2-8 QD-HL86-BSP

QD-HL86-BSP-01 bis 06

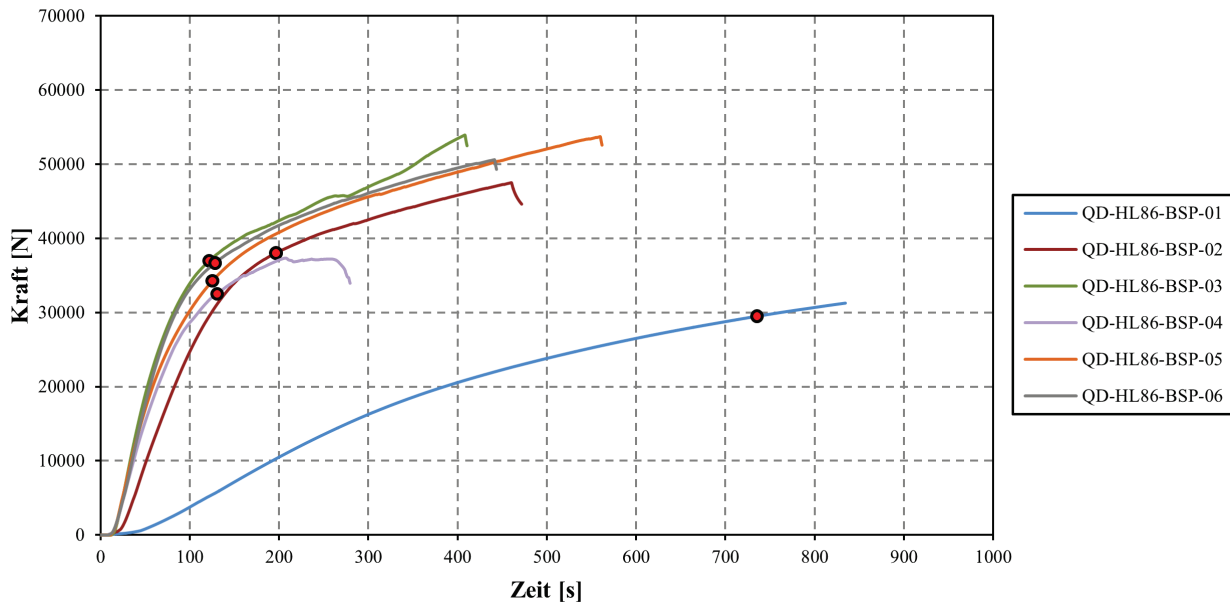


Abbildung Anhang D-29: Kraft-Zeit-Diagramm – QD-HL86-BSP-01 bis 06

D-2-9 QD-HL112-BSH

QD-HL112-BSH-01 bis 05

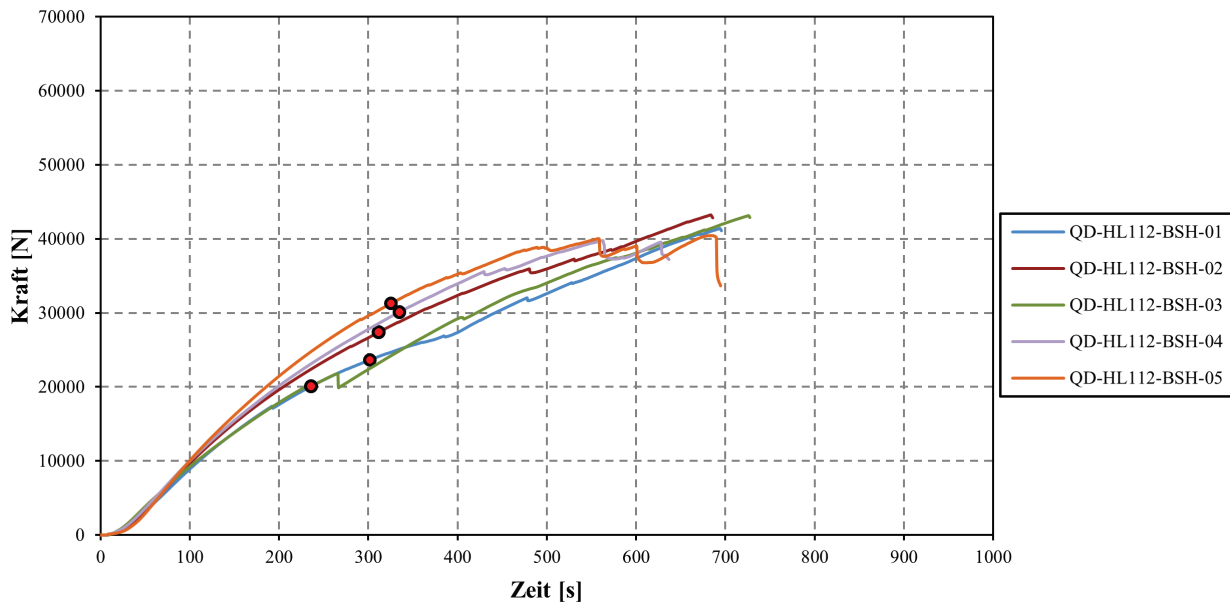


Abbildung Anhang D-30: Kraft-Zeit-Diagramm – QD-HL112-BSH-01 bis 05

D-2-10 QD-HL112-BSP

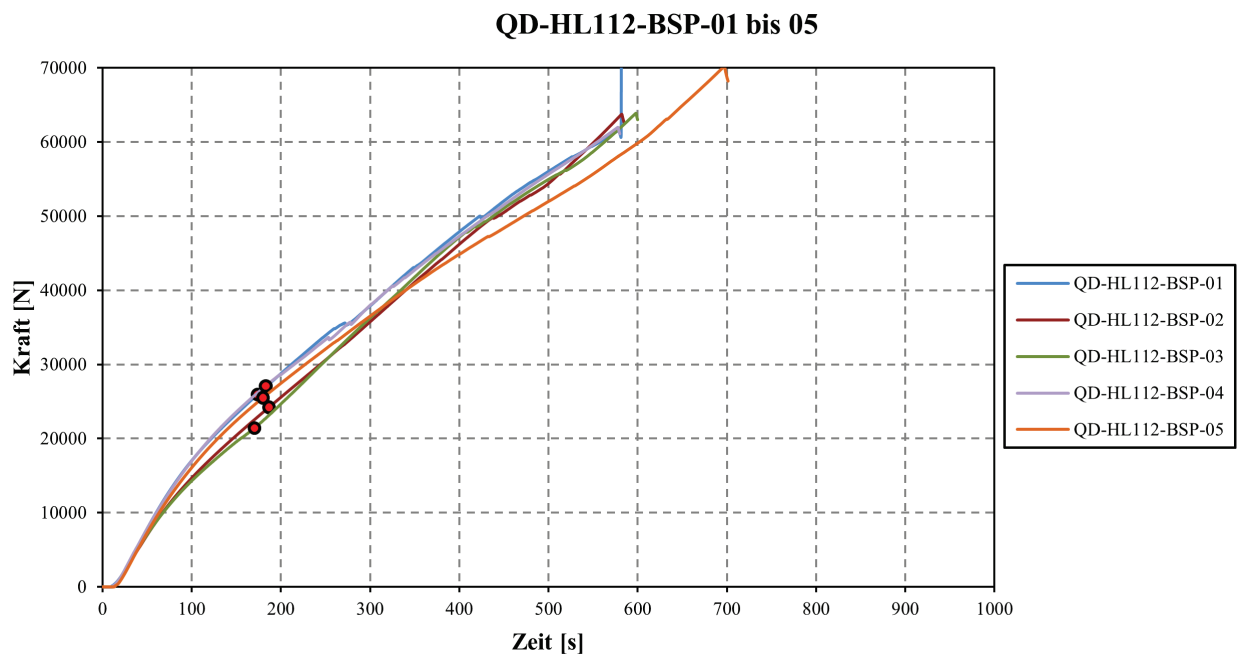


Abbildung Anhang D-31: Kraft-Zeit-Diagramm – QD-HL112-BSP-01 bis 05

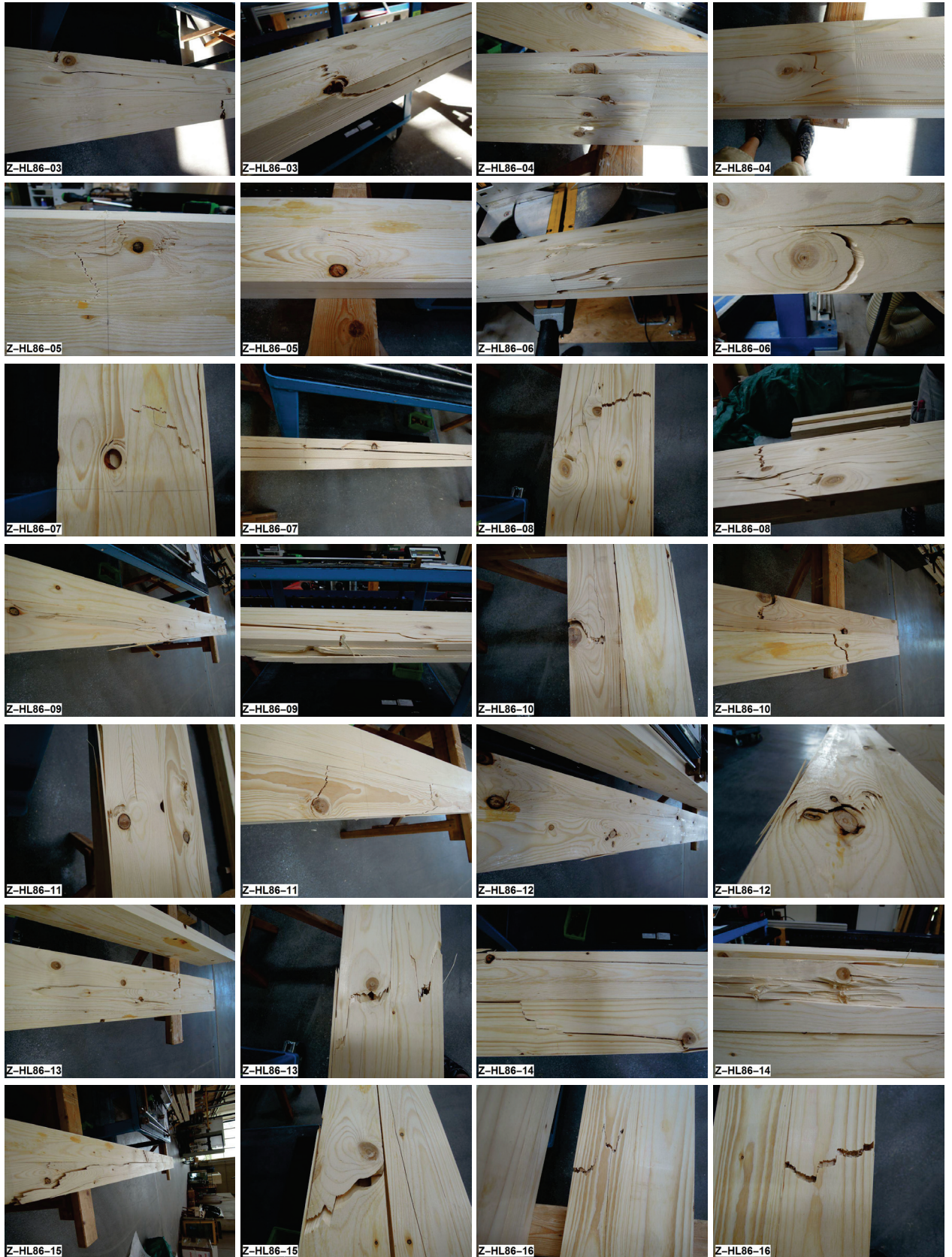
ANHANG E: BRUCHBILDER

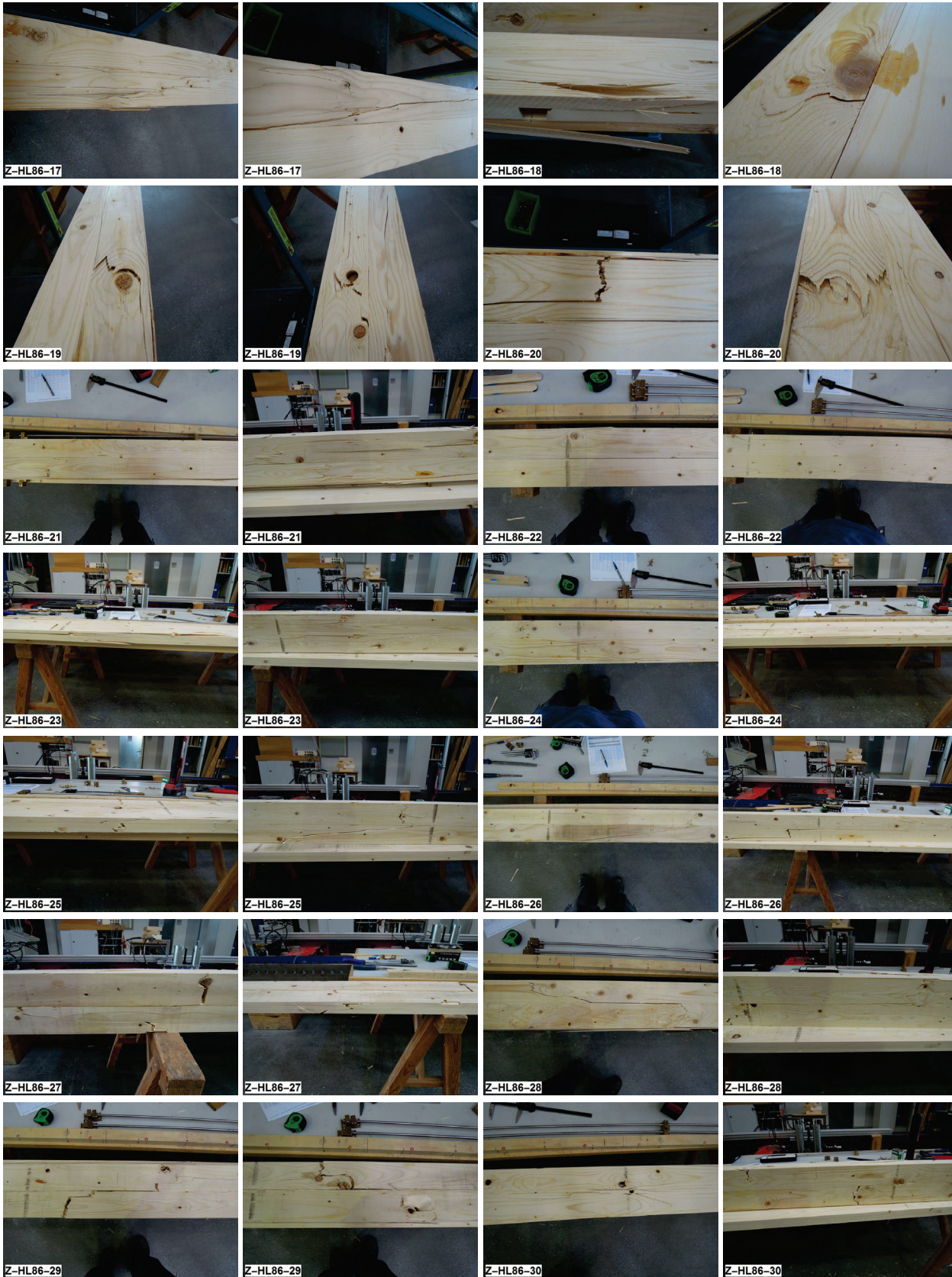
E-1	PRÜFUNGEN DER GRUNDPRODUKTE	E-48
E-1-1	Z-HL86	E-48
E-1-2	Z-HL86-KZ.....	E-51
E-1-3	Z-HL112	E-54
E-1-4	Z-HL112-KZ.....	E-56
E-1-5	B-HL86-FK.....	E-58
E-1-6	B-HL86-FK-II.....	E-59
E-1-7	B-HL86-FK-KZ	E-60
E-1-8	B-HL112-FK.....	E-62
E-1-9	B-HL112-FK-KZ	E-63
E-2	PRÜFUNGEN AN HOHLLAMELLEN IM GESPERRTEN AUFBAU.....	E-64
E-2-1	PB-5s-HL86-VH.....	E-64
E-2-2	PB-3s-HL86	E-65
E-2-3	PS-5s-HL86-VH	E-66
E-2-4	QD-HL86-VH-BSH.....	E-66
E-2-5	QD-HL86-BSH.....	E-67
E-2-6	QD-HL86-BSP.....	E-67
E-2-7	QD-HL112-BSH.....	E-68
E-2-8	QD-HL112-BSP.....	E-68

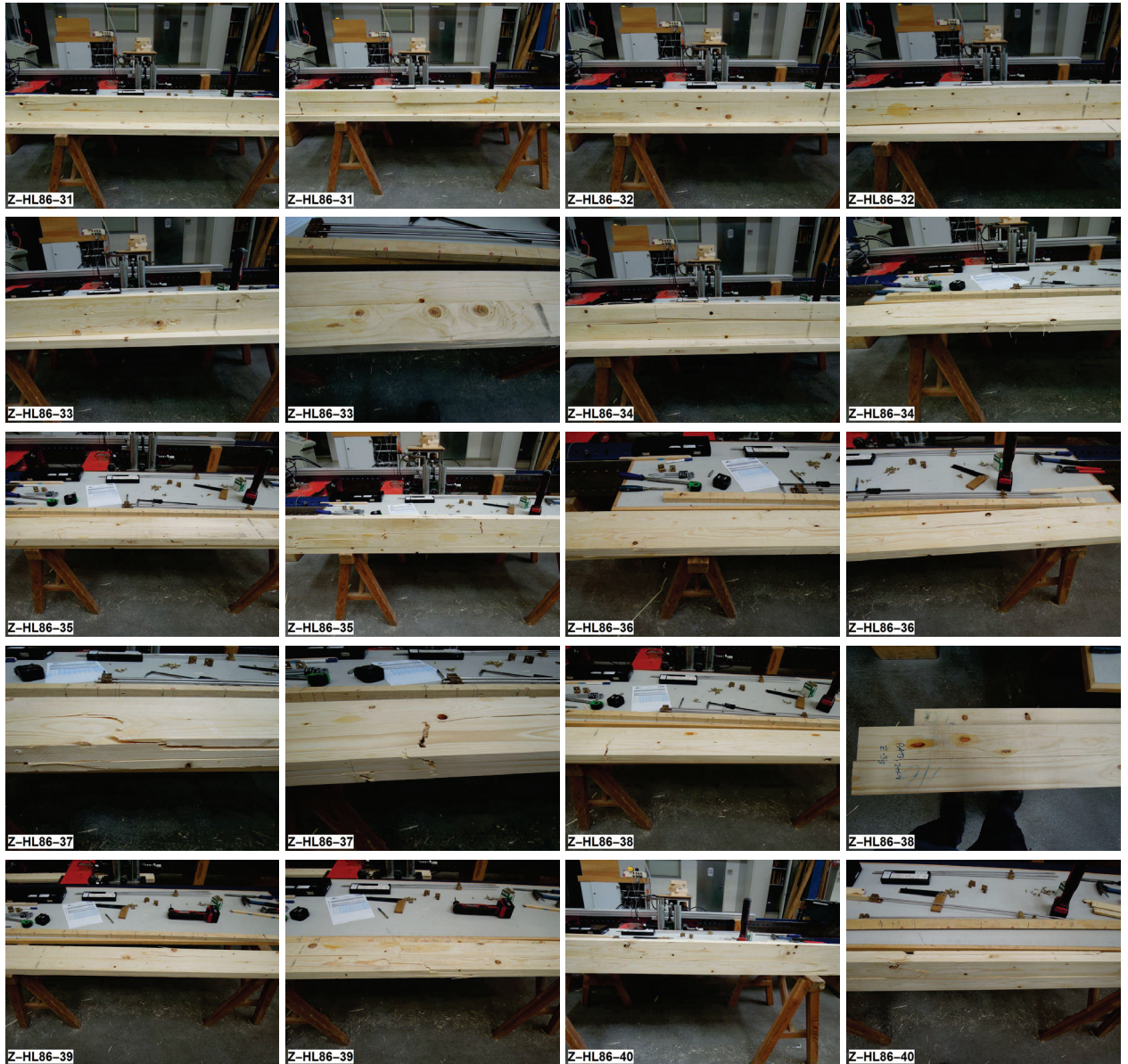
E-1 Prüfungen der Grundprodukte

E-1-1 Z-HL86

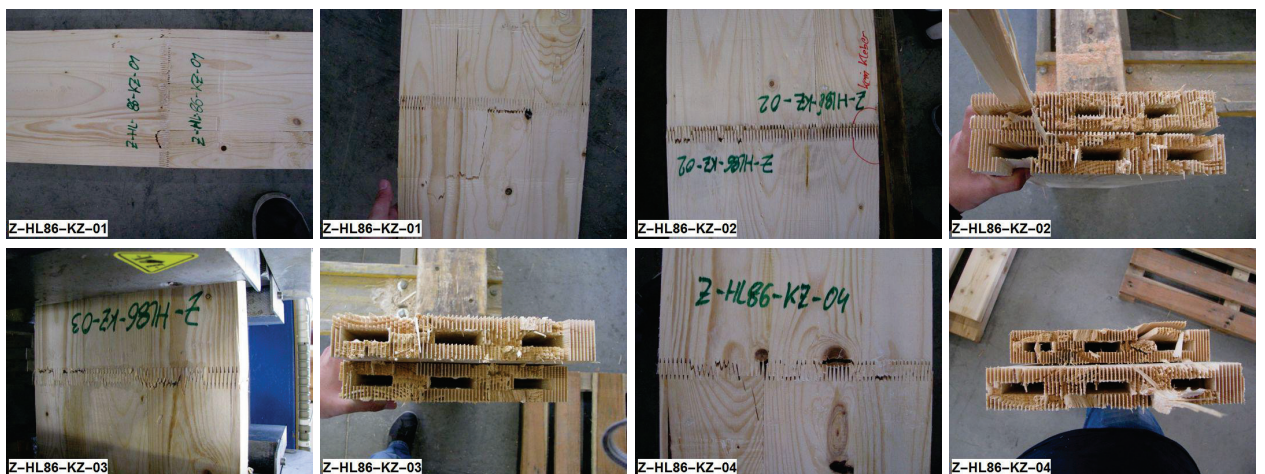




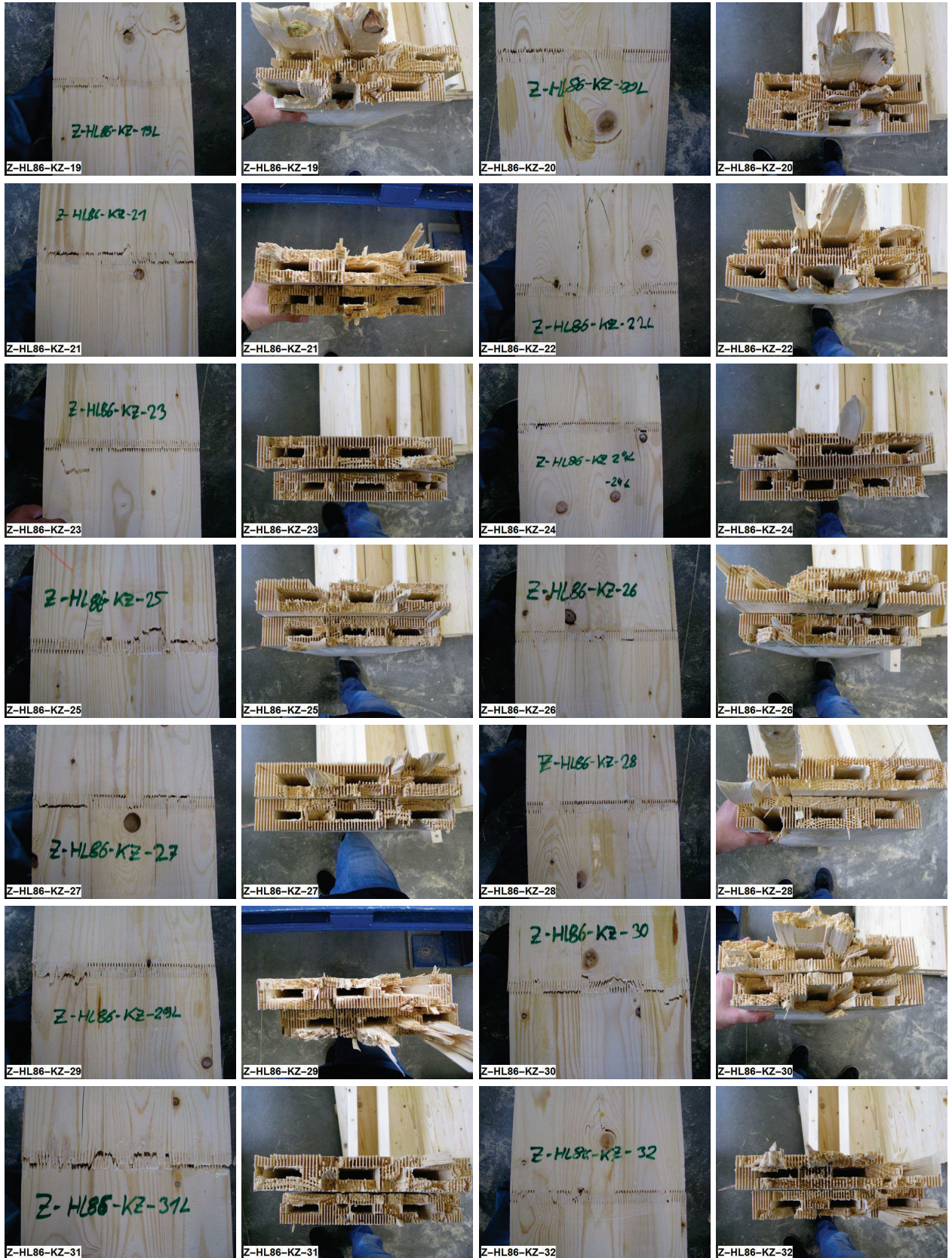


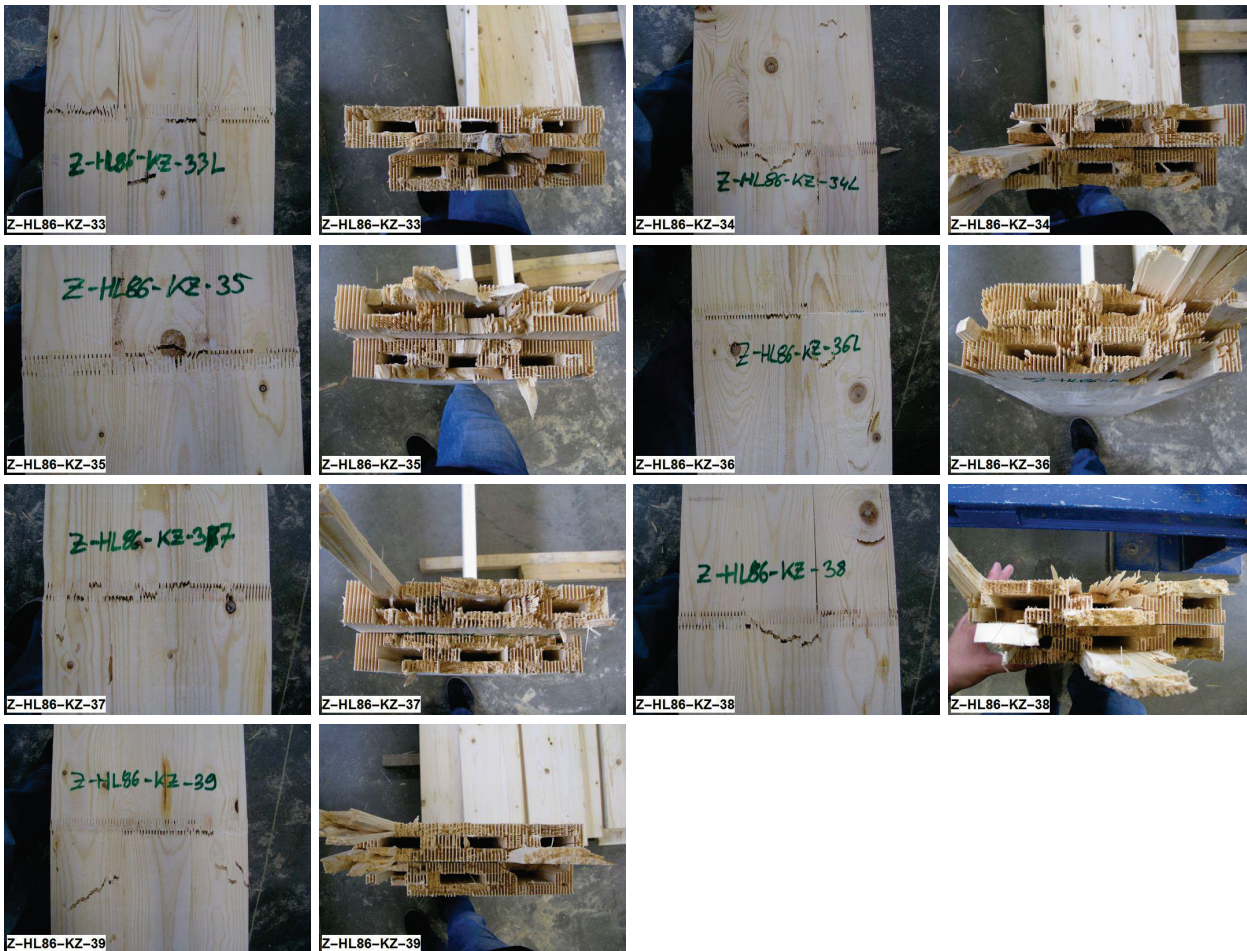


E-1-2 Z-HL86-KZ

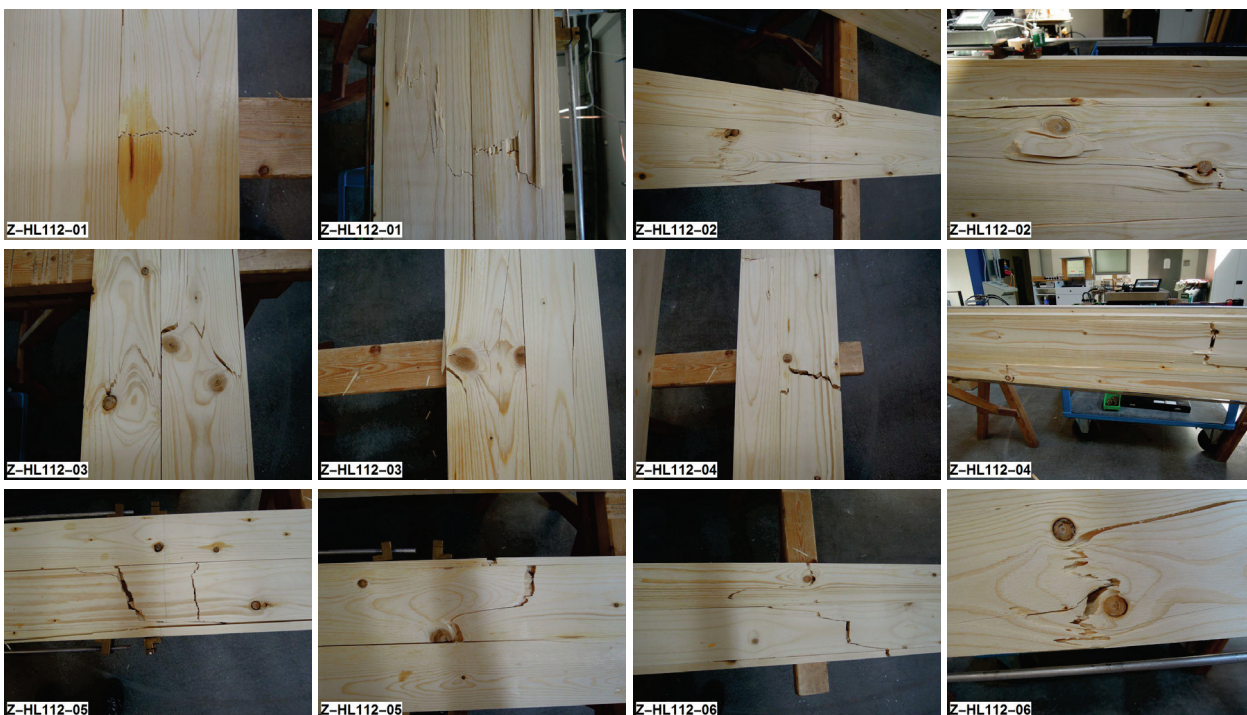


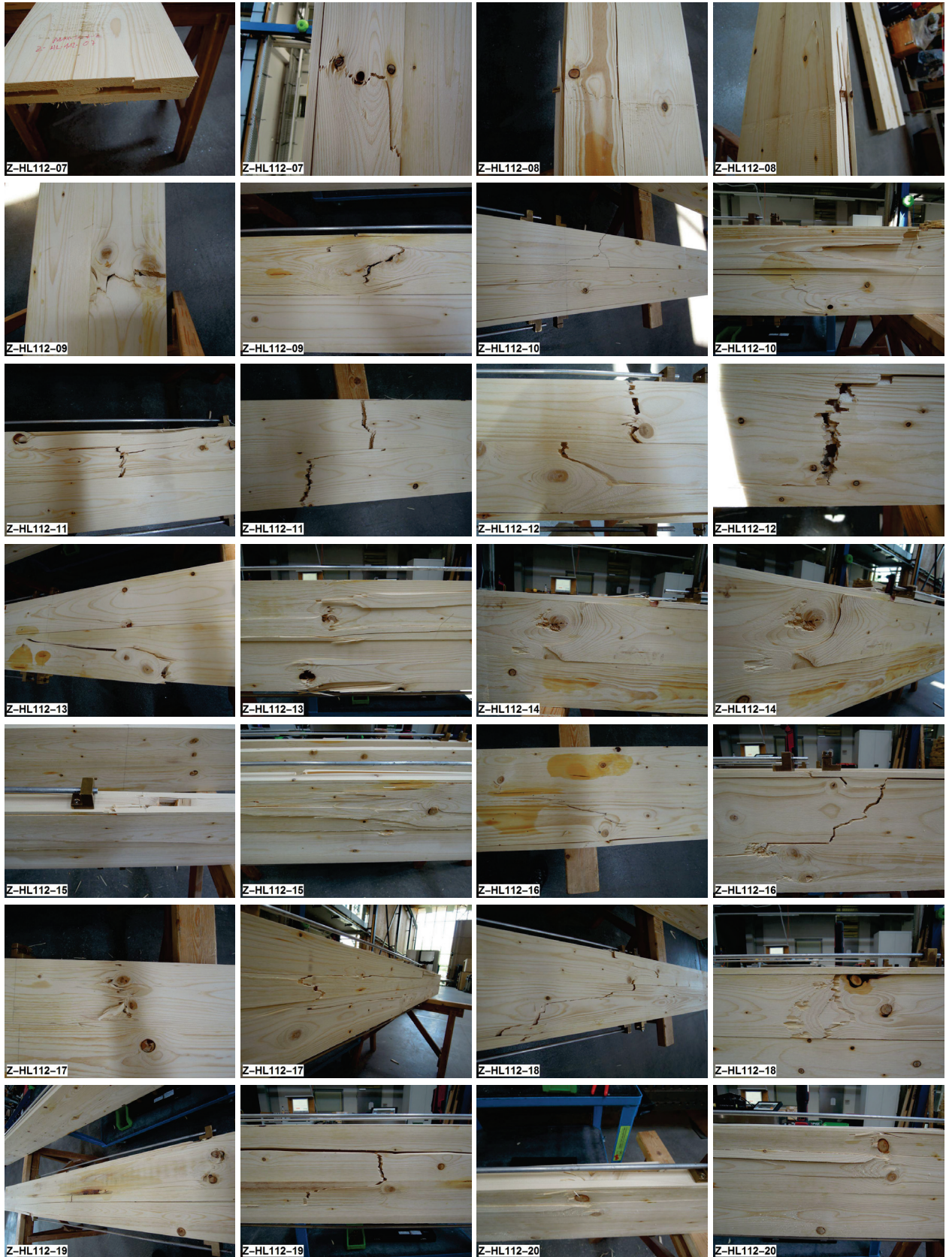






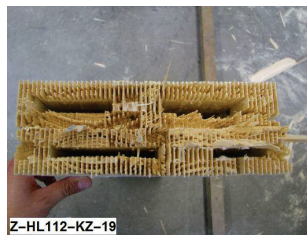
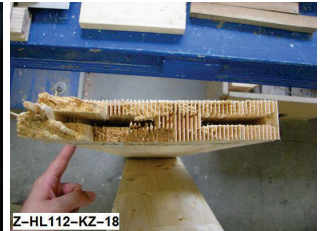
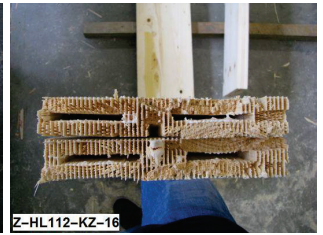
E-1-3 Z-HL112



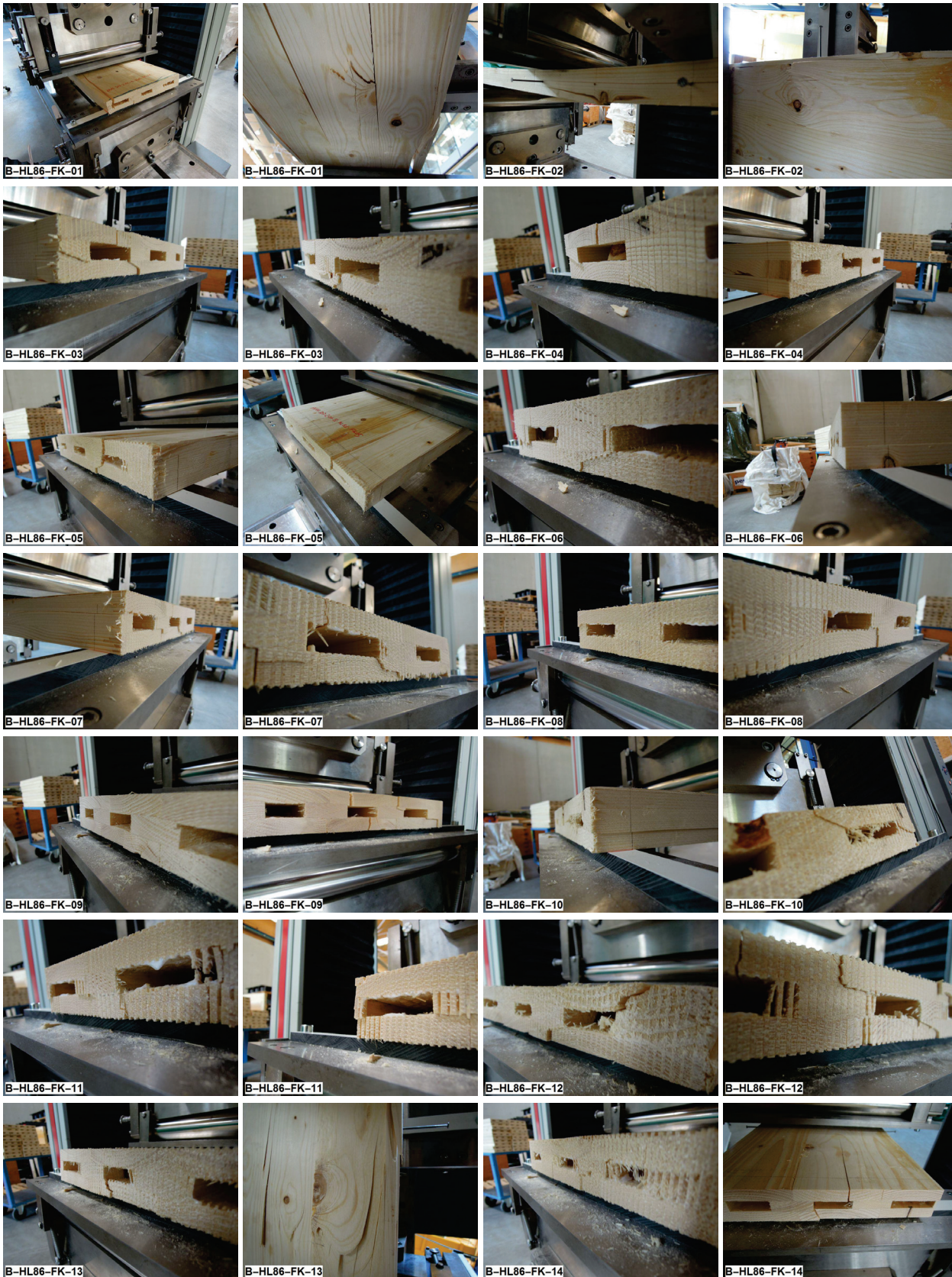


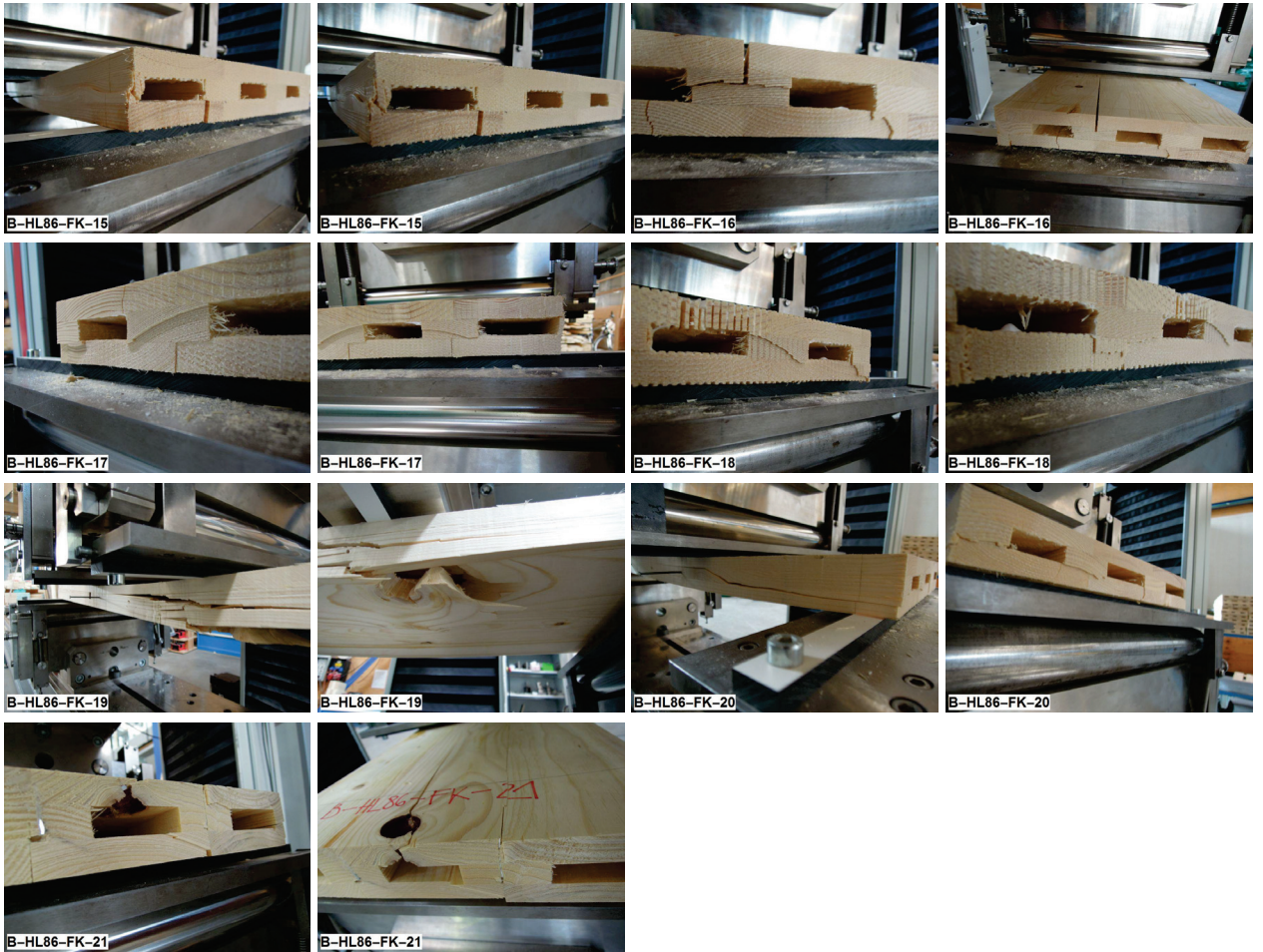
E-1-4 Z-HL112-KZ





E-1-5 B-HL86-FK





E-1-6 B-HL86-FK-II



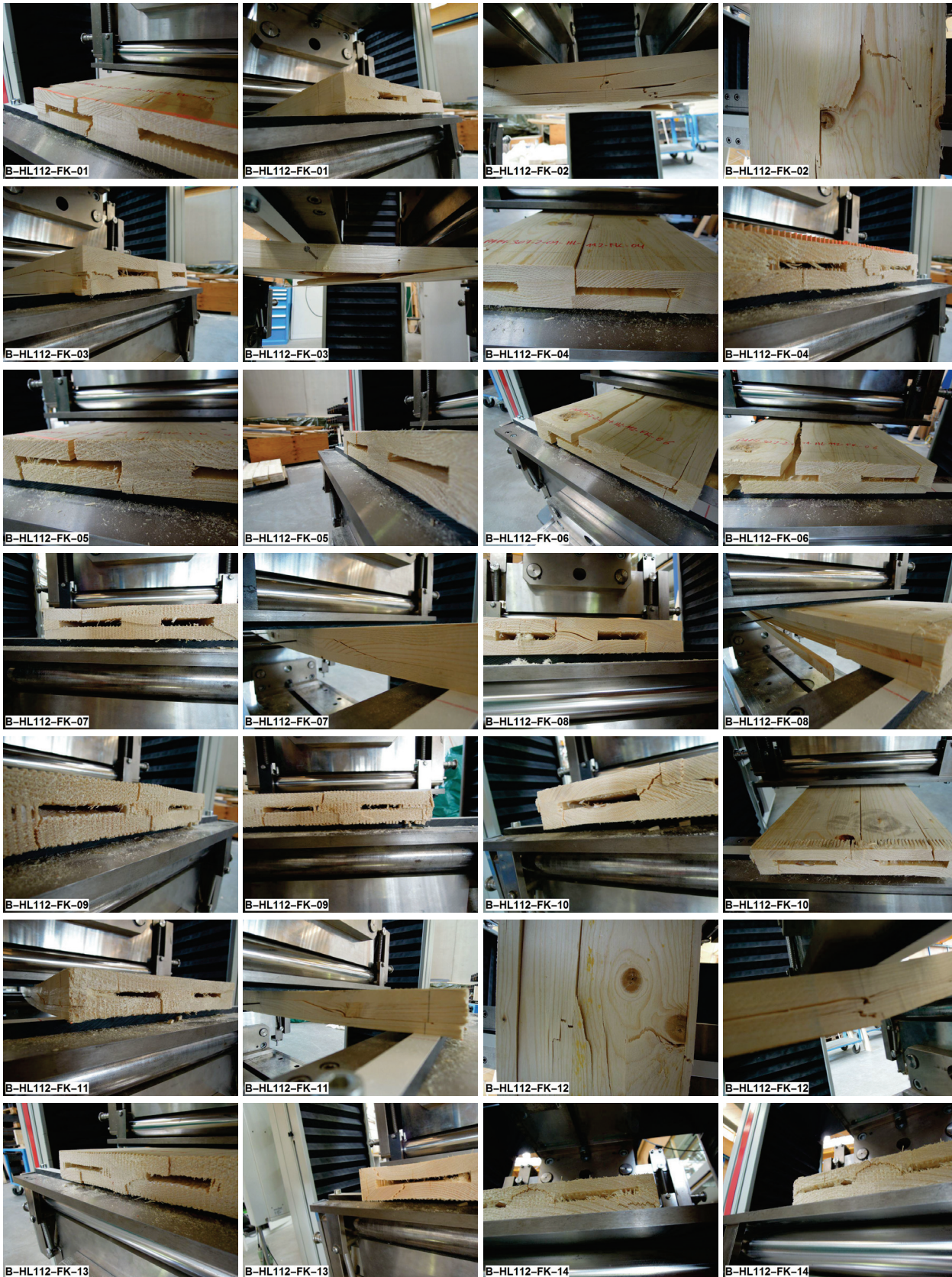


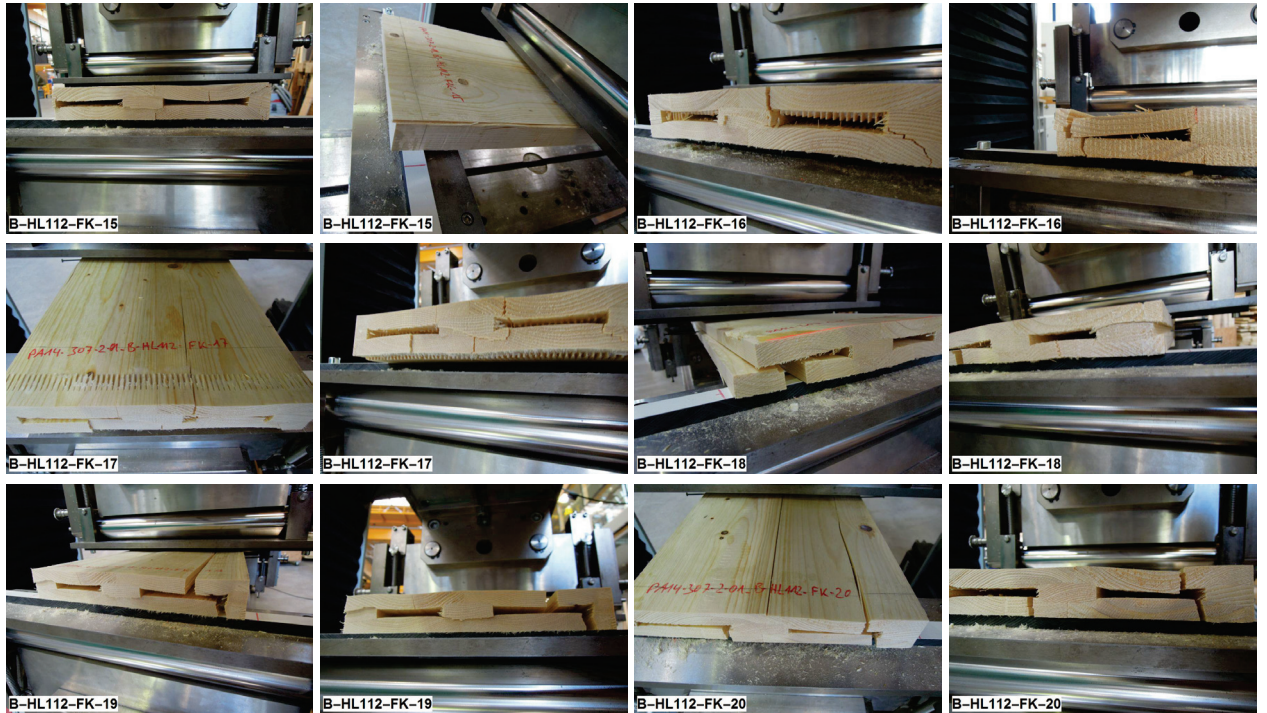
E-1-7 B-HL86-FK-KZ





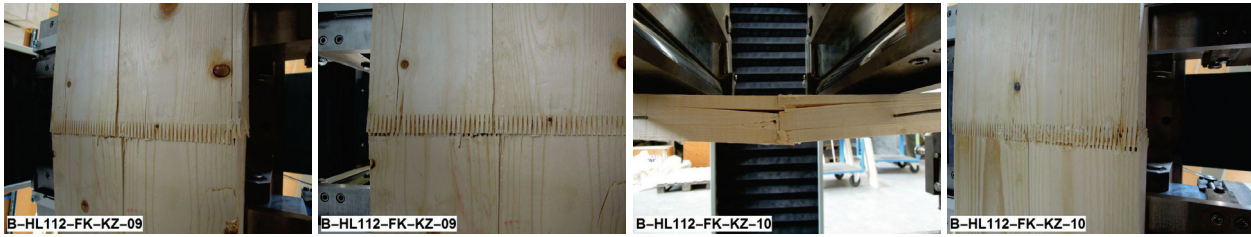
E-1-8 B-HL112-FK





E-1-9 B-HL112-FK-KZ





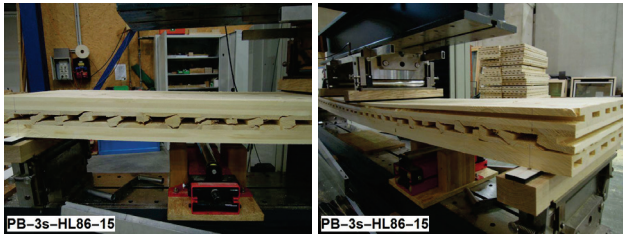
E-2 Prüfungen an Hohlplatten im gesperrten Aufbau

E-2-1 PB-5s-HL86-VH

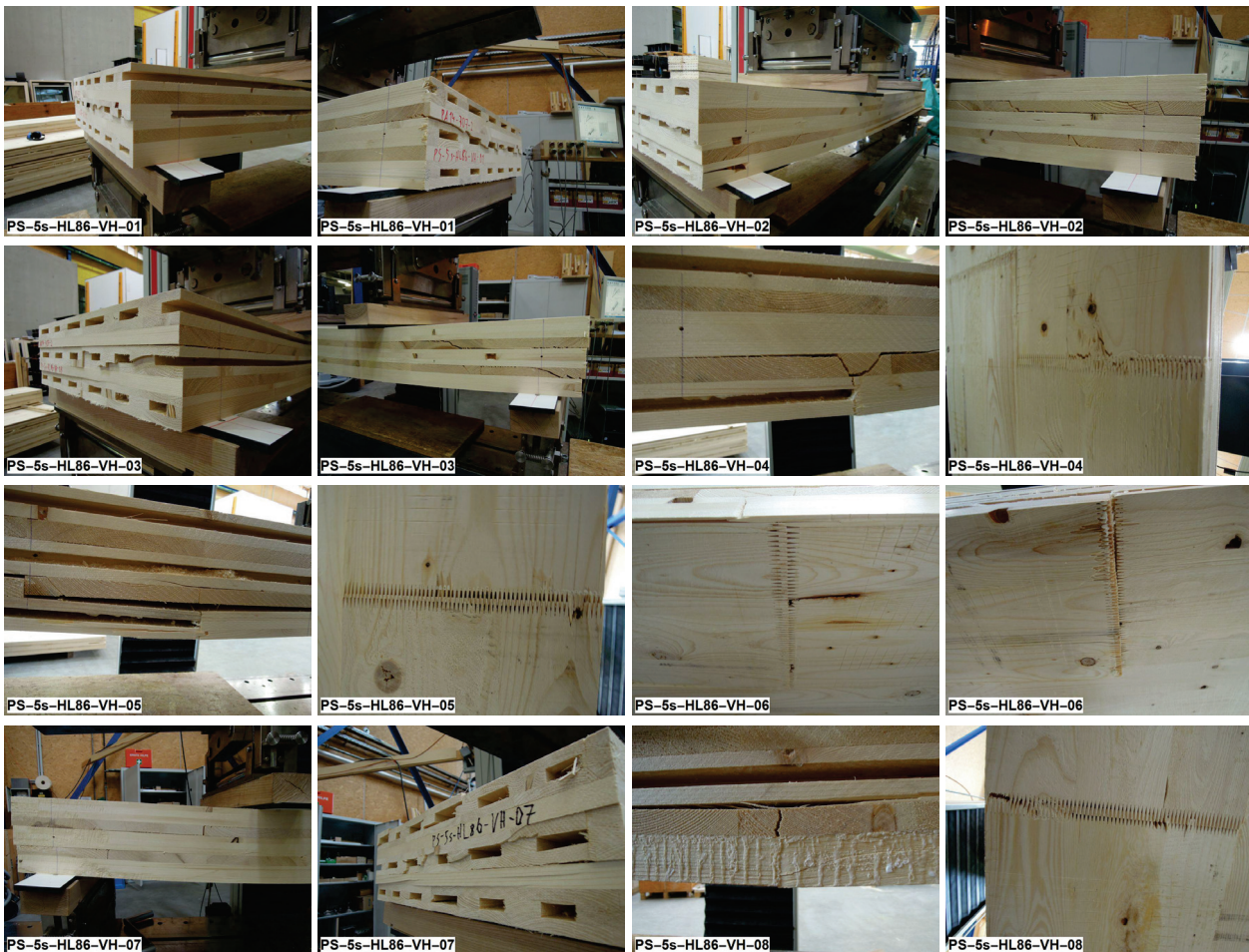


E-2-2 PB-3s-HL86

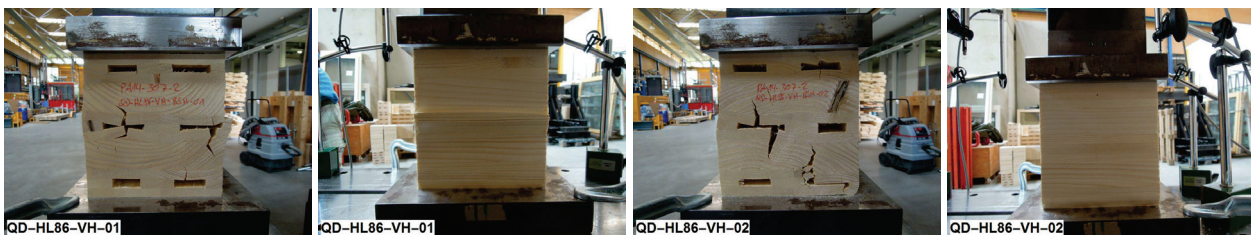




E-2-3 PS-5s-HL86-VH

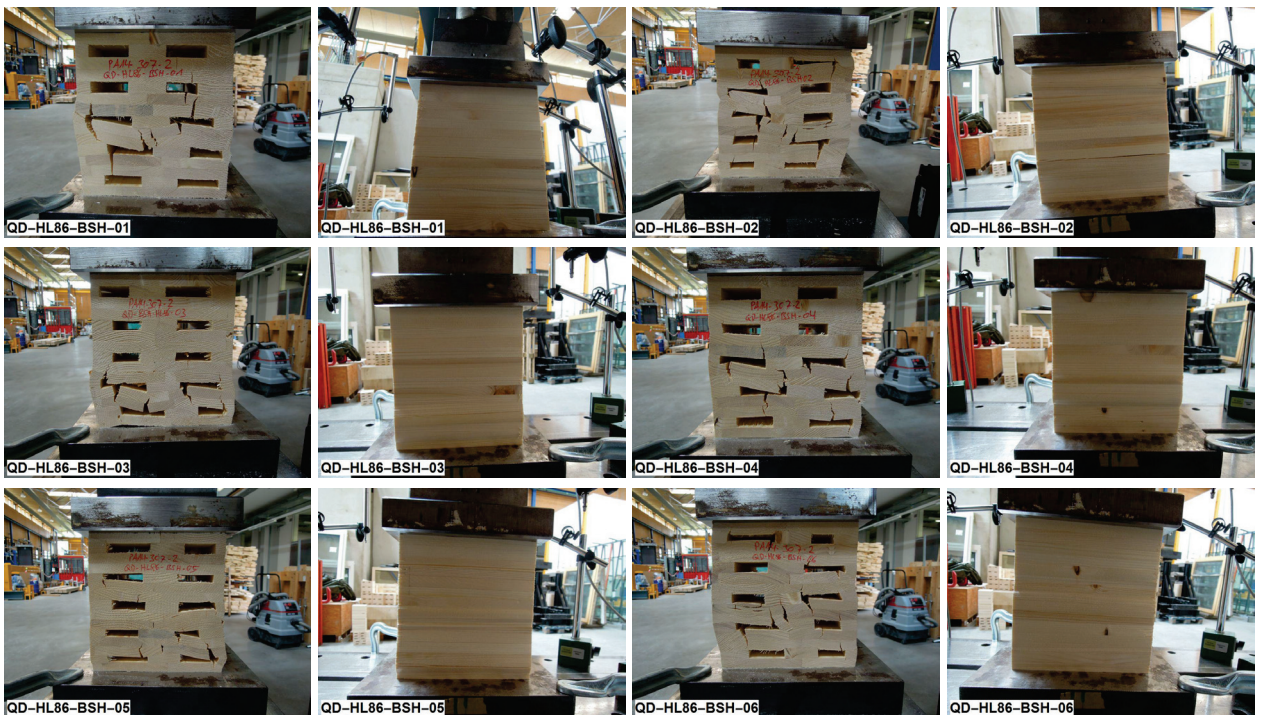


E-2-4 QD-HL86-VH-BSH





E-2-5 QD-HL86-BSH



E-2-6 QD-HL86-BSP





E-2-7 QD-HL112-BSH



E-2-8 QD-HL112-BSP





QD-HL112-BSP-03



QD-HL112-BSP-03



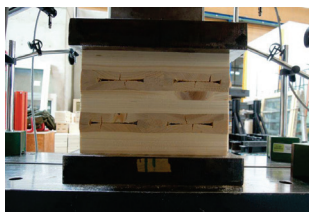
QD-HL112-BSP-04



QD-HL112-BSP-04



QD-HL112-BSP-05



QD-HL112-BSP-05

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

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

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

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

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

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

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

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

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

Institutskennzahl:

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

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl