



Abschlussbericht

Mit Harnstoffharz
verklebte Keilzinken-
stöße im Bestand

Experimentelle Unter-
suchungen zur Bestim-
mung der Tragfähig-
keit

Daniel Kattenbach M. Sc.
Henriette Röse M. Sc.
Prof. Dr.-Ing. Werner Seim
Dr.-Ing. Lars Eisenhut
M. Eng., M. Sc. Dominik
Dönicke
Annalena Funke M. Sc.

04. November 2025
überarbeitet 30. März 2026

Seiten: 94
(einschließlich Anlagen)

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T



Beratende Ingenieure
für das Bauwesen GmbH

Universität Kassel
Fachbereich Bauingenieur- und
Umweltingenieurwesen
Fachgebiet Bauwerkserhaltung und
Holzbau
Kurt-Wolters-Str. 3
D - 34125 Kassel

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Stegträger aus dem Bestand der St. Elisabeth Kirche.....	4
2.1	Bauwerksbeschreibung.....	4
2.2	Konstruktion der Bestandsträger	4
2.3	Ausführungsqualität der Bestandsträger	5
2.3.1	Bauzeitliches Herstellungsverfahren.....	5
2.3.2	Leimart und Leimgüte	6
2.3.3	Ausführung Keilzinkenverbindung	7
3	Zugversuche an Keilzinkenverbindungen.....	9
3.1	Gewinnung und Abmessungen der Prüfkörper	9
3.2	Versuchsdurchführung und Ergebnisse mit Keilzinkung	12
3.3	Versuchsdurchführung und Ergebnisse ohne Keilzinkung.....	22
3.4	Nebenversuche	25
4	Bauteilversuche.....	26
4.1	Versuchsaufbau und Versuchsablauf.....	26
4.2	Versuchsdurchführung und Ergebnisse.....	29
5	Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse	34
6	Bewertung der Tragfähigkeit.....	36
6.1	Vergleich der Bestandsstatik mit heutigen Regelwerken.....	36
6.2	Nachweise nach heutigem Regelwerk	37
6.3	Experimentelle Tragfähigkeitsuntersuchungen.....	38
7	Zusammenfassung	39
8	Literatur.....	41
9	Normen.....	41
A	Anhang	42
A.1	Versuchsdokumentation Rohdichtebestimmung	42
A.2	Versuchsdokumentation Zugversuche Keilzinkenverbindung.....	43
A.3	Versuchsdokumentation Biegeversuche am Gesamtquerschnitt	76
A.4	Dokumentation max. Dicken der Klebfugen und Kategorisierung der Keilzinkungen.....	91

1 Einleitung

Am 6. November 2023 stürzte das Dach der Elisabethkirche in Kassel gegen 13 Uhr ohne Vorankündigung vollständig ein. Obwohl die Kirche zum Zeitpunkt des Einsturzes für Besucher geöffnet war, kam niemand zu Schaden. Das Tragwerksversagen erfolgte nach dem derzeitigen Wissensstand ohne Vorankündigung. Erst unmittelbar vor dem Einsturz wurden vom Küster knisternde Geräusche wahrgenommen. Ein Foto, welches ca. eine Stunde vor dem Einsturz zufällig aufgenommen wurde, zeigt eine leichte Einsenkung des Firsts um wenige Zentimeter. Wie lange dies bestand, ist nicht bekannt.

Das Tragwerk des Daches bestand aus satteldachförmigen Wolff-Stegträgern, bei denen Harnstoffharz-Klebstoff sowohl für die flächige Verklebung der Stege und der Gurte als auch für die Verklebung der Keilzinkenstöße der Stege verwendet worden war.

Das Büro HAZ wurde mit der Beurteilung der Standsicherheit der Ruine sowie mit der gutachterlichen Klärung der Schadensursache beauftragt. Das daraufhin erstellte Gutachten [1] identifizierte mehrere Ursachen für das Tragversagen. Als wesentliche Ursachen sind folgende Punkte zu nennen:

- Mangelhafte Ausführung der Keilzinkenstöße im Firstbereich (unzureichende Passgenauigkeit, übermäßige Klebfugendicke, unvollständiger Leimauftrag),
- Induktion von niederzyklischen Spannungen bei nicht zwängungsfreier Lagerung,
- sowie eine mögliche Versprödung des verwendeten harnstoffharzbasierten (UF-)Leims infolge klimatischer Einflüsse und mechanischer Beanspruchung.

Zum Zeitpunkt der Erstellung des Gutachtens lagen keine experimentellen Daten zur Tragfähigkeit der Keilzinkenstöße der Träger aus der Elisabethkirche vor. Genau hier setzt das Forschungsvorhaben an: Ziel ist die experimentelle Untersuchung der Festigkeit von mit Harnstoffharz verklebten Keilzinkenstöße im Bestand am Beispiel der Elisabethkirche.

Temperatur- und Feuchtemessungen aus dem Bereich der Orgel über die vergangenen vier Jahre zeigten keine Überschreitungen der bekannten Grenzwerte für die Umgebungsbedingungen [2] [3]. Ebenso lagen keine Hinweise auf längerfristige Undichtigkeiten oder ungewöhnlich hohe Luftfeuchtigkeit (>85% bei 20°C) vor. Untersuchungen zu bauklimatischen Szenarien und zu möglichen Temperatur- und Feuchteeinwirkungen auf die Festigkeit des Klebstoffs sind nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts. Nach unserem Kenntnisstand sollen entsprechenden Untersuchungen von Laboren mit klebstofftechnischer Expertise durchgeführt werden. Die Prüfkörper dafür wurden von den Mitarbeitern des WKI Braunschweig im Herbst 2024 ausgewählt und wurden diesen für weitere Untersuchungen übergeben.

Vor diesem Hintergrund verfolgt das Forschungsvorhaben zwei zentrale Fragestellungen:

1. Besteht die Möglichkeit, dass Keilzinkenstöße im Bestand eine unzureichende Festigkeit aufweisen, auch dann, wenn es keine offensichtlichen Hinweise darauf gibt, dass die für Harnstoffharz-Verklebungen bekannten unzuträglichen Umgebungsbedingungen [2] [3] vorlagen?
2. Bedarf es möglicherweise einer Ergänzung bzw. Anpassung der Hinweise der ARGEBAU [2] im Hinblick auf die Bewertung von Keilzinkenverbindungen?

Zur Beantwortung dieser Fragen werden durch das Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau der Universität Kassel an eingelagerten Originalbauteilen umfangreiche experimentelle Untersuchungen und Zugfestigkeit sowie zur Biegetragfähigkeit des Gesamtquerschnitts durchgeführt.

2 Stegträger aus dem Bestand der St. Elisabeth Kirche

2.1 Bauwerksbeschreibung

Die Kirche wurde 1959/60 errichtet. Das Kirchenschiff ist ca. 37 m lang und ca. 15,5 m breit. Die Traufhöhe beträgt ca. 16 m. Die Kirche erstreckt sich in Nordost-Südwestrichtung.

Die Seitenwände bestehen aus eingespannten Stahlbetonstützen, die sich in Längsrichtung über mehrere Ringbalken zu einem Rahmen verbinden. Die Gefache dieser Rahmen sind mit Sicht-Ziegelmauerwerk ausgefacht.

Der oberste, L-förmige Ringbalken hat eine Breite von 50 cm. Die raumseitige Auflagerbank ist 24 cm hoch, der ca. 15 cm dünne außenseitige L-Schenkel ist ca. 55 cm hoch.

In den Jahren 1983/84 wurde eine Erneuerung des Daches vorgenommen. Im Rahmen dieser Maßnahme wurde die Dachkonstruktion aufgedoppelt, während die ursprüngliche Aluminiumdacheindeckung durch eine Konstruktion aus Kupferblech ersetzt wurde.

2.2 Konstruktion der Bestandsträger

Die Bestandsaufnahme erfolgte durch das Ingenieurbüro HAZ.

Die Binder wurden im Achsabstand von ca. 1,295 m verlegt. Darauf befindet sich eine Schalung, Dämmung und eine alte Dachabdichtung, darüber eine weitere Ebene Unterkonstruktion mit Dämmung und Schalung. Die Dacheindeckung besteht aus gefalzten Kupferblechscharen (vgl. Abbildung 2.1).

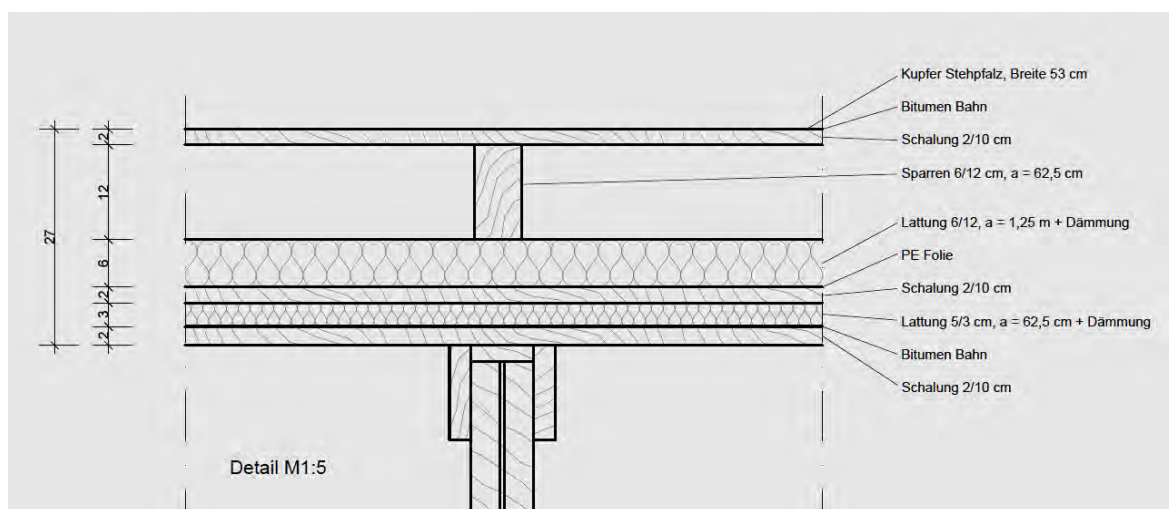


Abbildung 2.1: Dachaufbau nach eigenem Aufmaß

Es handelt sich bei den Dachbindern um geleimte Holzbinder der Fa. Wolff aus 37671 Höxter/Ottbergen (Wolff-Stegträger). Sie sind als Satteldachbinder konstruiert. Ihre Länge beträgt 15,1 m, die Stichhöhe im First beträgt ca. 1,08 m.

Die Binder wurden vor Ort aufgemessen und zeichnerisch dargestellt (vgl. Abbildung 2.2).

Der Binder ist planmäßig 56 cm hoch und als Doppel-T-Profil ausgebildet. Der ca. 8 cm breite Steg besteht außenseitig aus hochkant stehenden, längsverlaufenden Brettern, die auf einen Kern aus vertikalen Federhölzern (d = 10 mm) aufgeleimt sind. Die Stegplatten sind nur 51 cm hoch. Die Höhendifferenz zur Oberkante bzw. Unterkante der Flanschbretter wird über Deckbretter in Längsrichtung ausgeglichen. Die Flansche bestehen ebenfalls aus hochkant stehenden Brettern (125mm x 27mm), die seitlich auf den Steg geleimt sind.

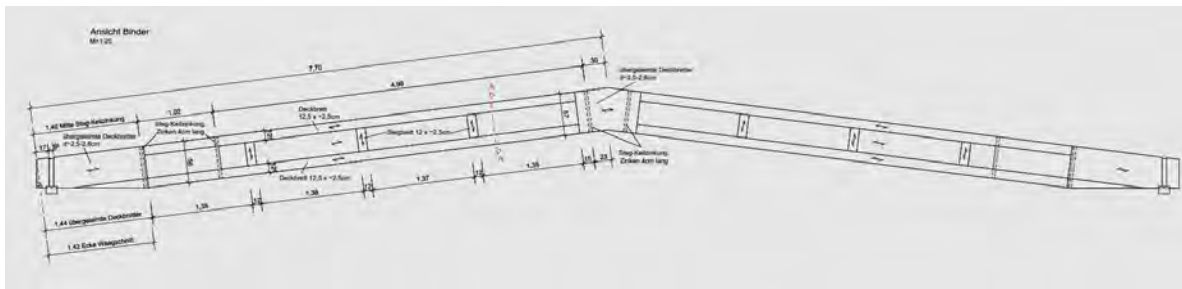


Abbildung 2.2: Seitenansicht Dachbinder nach eigenem Aufmaß

Richtung Auflager verjüngen sich die Binder unterseitig auf den jeweils letzten 1,55 m von 56 cm auf ca. 30 cm Höhe. Am Auflager und am First gibt es zusätzliche planmäßige Verstärkungen durch auf den Steg horizontal aufgeleimte Bretter.

Neben den Geometrien der zusammengeleimten Bretter wird in Abbildung 2.2 auch die Lage der Keilzinkenverbindungen dargestellt. In der Seitenansicht sind sie nur als sehr dünne vertikale Fuge zu erkennen. Im Firstbereich sind die Keilzinkenverbindungen durch die aufgeleimten Bretter verdeckt.

2.3 Ausführungsqualität der Bestandsträger

2.3.1 Bauzeitliches Herstellungsverfahren

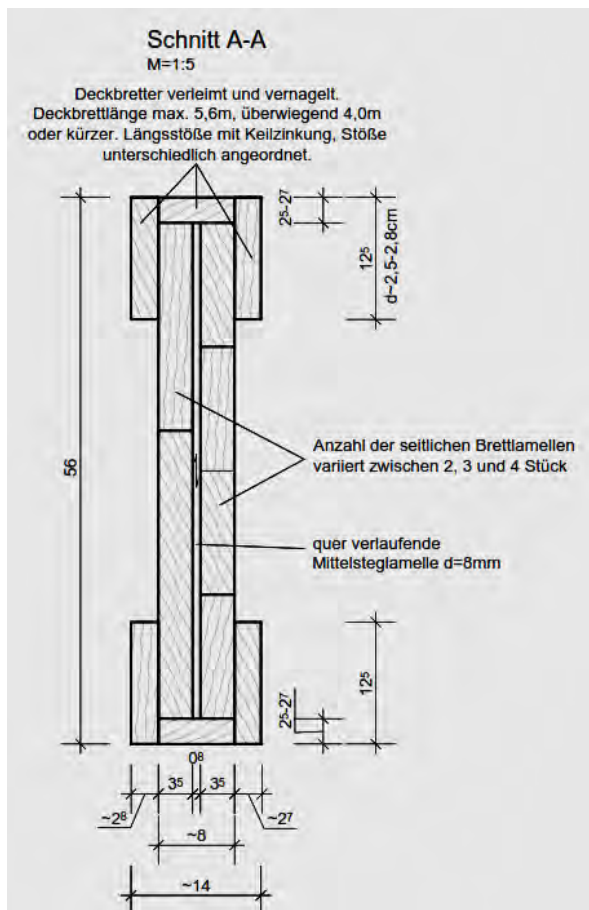
Die Fa. Wolff in Ottbergen war von 1954 bis 1995 überregional tätig.

Ein Zeitzeuge berichtet, dass von 1956 bis etwa 1965 Stegträger gefertigt wurden und ab 1965 überwiegend Brettschichtholzträger. Zunächst baute das Werk offenbar Kämpfstegträger – vermutlich in Lizenz – entwickelte das System aber weiter zu Wolff-Stegträgern mit eigener Zulassung. Charakteristisch war ein veränderter Stegaufbau mit einer mittigen dünnen vertikalen Lamelle, auf die beidseitig horizontale Bretter geleimt wurden, statt diagonal angeordneter Stegbretter. Die Einzellänge der Stege betrug maximal 5 m, längere Träger wurden gestoßen.

Die Qualitätskontrolle und der Leimprozess entwickelten sich schrittweise: Die Holzfeuchte wurde zunächst nur stichprobenartig, später systematisch mit Elektroden während der Trocknung und vor der Verklebung gemessen. Das Holz wurde visuell sortiert.

Zu Beginn wurde ausschließlich Harnstoffharzleim (UF) für die Flächenverklebung und die Schäftungen/Keilzinkungen verwendet, da dieser zunächst günstiger war als der später verwendete Resorcinharzleim.

Der UF-Klebstoff wurde mit Pulver und Wasser angerührt und in der Fläche anfangs per Hand aufgetragen, später über Rollen, über die das Brett lief. Am Tag wurden ca. 3-5 Pressungen vorgenommen.



a)



b)

Abbildung 2.3: a) Querschnitt Binder in Zeichnung [Anlage A], b) Fotografie des Querschnitts

2.3.2 Leimart und Leimgüte

Aus einem der Trägeteile wurden unmittelbar nach dem Einsturz Materialproben als Bohrkern an vier verschiedenen Stellen entnommen. Die Untersuchung der Proben auf die Art des Klebstoffs erfolgte an der TU München [4]. Der Leim in den Keilzinkenstößen wurde eindeutig als Harnstoff (UF)-Klebstoff identifiziert. Andere Bezeichnungen sind Harnstoff-Formaldehydharzleim (auch UF-Leim oder UF-Harz-Klebstoff). Diese Leime bzw. Klebstoffe entstehen durch eine Verbindung von Harnstoff und Formaldehyd.

Bei der Herstellung der Stegträger war mittels Anpressdruck sicherzustellen, dass die Fügeteile bis zum Erreichen ausreichender Klebstofffestigkeit aneinander liegen und die Klebstofffuge

möglichst dünn ist. Bei den Stegen wurde dies mittels Pressen erreicht, die Gurthölzer wurden mittels Nagelpressklebung angeschlossen.

Der UF-Klebstoff ist in Deutschland für tragende Holzbauteile seit dem Dacheinsturz in Bad Reichenhall 2006 nicht mehr zulässig.

Für die Herstellung von tragenden Bauteilen in neuen Holzkonstruktionen sind seither Klebstoffe des Klebstofftyp I zu verwenden. Der Klebstofftyp II, zu dem Harnstoffharz-Klebstoff zählt, ist für neue Konstruktionen in Deutschland nicht mehr zulässig.

Bei den örtlichen Untersuchungen an der Elisabethkirche wurden Leimfugen von bis zu 1,5 – 2 mm Dicke lokalisiert. Der Klebstoff haftete noch auf einer Seite auf dem Holz an. Der UF-Klebstoff zeigte ausgeprägte würfelartige Brüche und war ausnahmslos spröde und leicht abkratzenbar (vgl. Abbildung 2.4). Die Leimgüte entspricht nicht oder nicht mehr den Anforderungen an die Festigkeit.



Abbildung 2.4: Leimfuge zwischen Unterseite Stegplatte und Blendbrett mit zu dicker, versprödeter Leimfuge

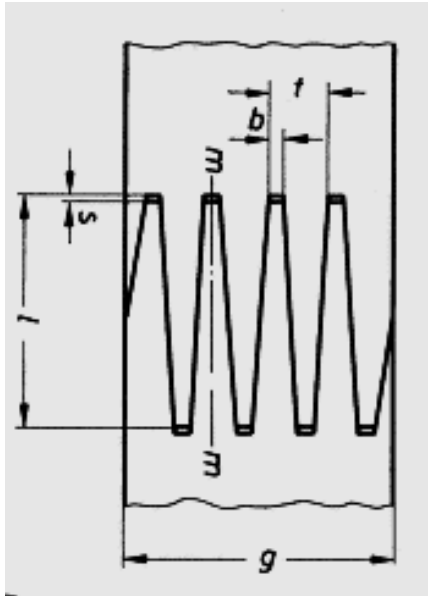
2.3.3 Ausführung Keilzinkenverbindung

Die Entwicklung der Keilzinkenverbindung und deren erster industrieller Einsatz datiert zurück in die 1950iger Jahren. Im Jahr 1960, also nach Errichtung der Binder, erscheint die erste Ausgabe der DIN 68140 – Keilzinkenverbindung von Holz [DIN 68140], welche die grundlegenden Anforderungen an die Geometrie von Keilzinken für tragende Konstruktionen regelte.

Die Keilzinkenverbindung der Binder in der Elisabethkirche wurden geometrisch aufgenommen (siehe Abbildung 2.6).

Aus den geometrischen Daten kann der sogenannte Verschwächungsgrad errechnet werden. Er ergibt sich bei der Keilzinkung an den Trägern der Elisabethkirche zu:

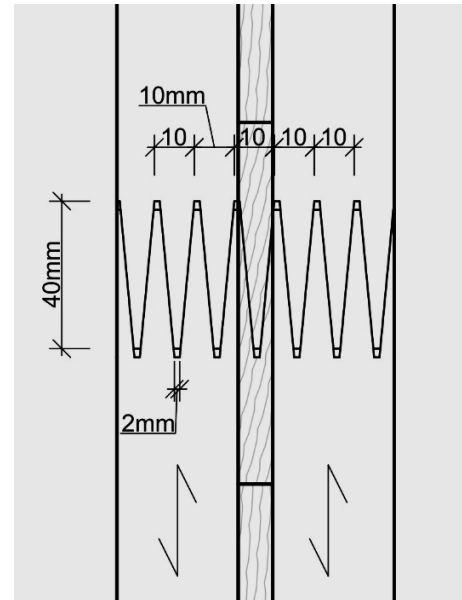
$$v = \frac{b}{t} = \frac{2 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = 0,2 = 20 \%$$



Zinkenteilung $t = 9 \text{ mm}$
Breite des Zinkengrunds $b = 1 \text{ mm}$
Zinkenlänge $l = 40 \text{ mm}$

Verschwächungsgrad $v = 11\%$

Abbildung 2.5: Geometrie zu Zinkenprofil
I, Form A, nach DIN 68140-Ausgabe 1960
[DIN 68140]



Zinkenteilung $t = 10 \text{ mm}$
Breite des Zinkengrunds $b = 2 \text{ mm}$
Zinkenlänge $l = 40 \text{ mm}$

Verschwächungsgrad $v = 20\%$

Abbildung 2.6: Vorhandene Geometrie
Keilzinkung Elisabethkirche

Die Zinkengeometrien bei den Trägern der Elisabethkirche entsprechen bei der Zinkenlänge der Form A nach DIN 68140-Ausgabe 1960, weichen aber bei der Zinkenteilung und bei der Breite des Zinkengrunds etwas von der – nach der Errichtung des Daches – entstandenen Norm ab.

Dabei ist insbesondere der Verschwächungsgrad von Bedeutung, der mit 20% höher ist als der nach der bauzeitlichen Norm mit 11 % bei vergleichbarer Zinkenlänge. In dem bauzeitlichen Standsicherheitsnachweis wird die Verschwächung von 20% berücksichtigt.

Abbildung 2.7 zeigt ein aus dem Träger herausgeschnittenes Stück einer intakten Keilzinkenverbindung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Fugen zwischen den Keilzinken nicht überall dünn und dicht geschlossen sind. Teilweise fehlt Leim. Das bedeutet, dass die Tragfähigkeit des Gesamtprofils durch diese Mängel abgemindert wird. Die Fehlstelle in der mittigen senkrecht stehenden Lamelle ist an dieser Stelle unerheblich für die Gesamttragwirkung.



Abbildung 2.7: Herausgeschnittene Keilzinkenverbindung mit mangelhaften Fugen

Die Ausführung der Keilzinkenverbindung des Steges war mangelhaft hinsichtlich Geometrie und Verschwächungsgrad, Klebfugendicke, Leimauftrag und mutmaßlich Anpressdruck, zumindest im Firstbereich. Der Klebstoff zeigt deutlich würfelartige Brüche, die auf ein bauzeitliches Schrumpfen oder auf eine zeitabhängige Versprödung, möglicherweise auch beides in Kombination, hindeuten.

3 Zugversuche an Keilzinkenverbindungen

3.1 Gewinnung und Abmessungen der Prüfkörper

Mit den Versuchen an Prüfkörpern mit Keilzinken sollten folgende Fragen beantwortet werden:

1. Lässt sich das an den Trägern festgestellte Versagen des Keilzinkenstoßes durch die dort vorhandenen Festigkeiten nachvollziehen?
2. Gibt es Unterschiede bei der Festigkeit der Keilzinkenverbindung
 - bei unterschiedlichen Trägern,
 - bei unterschiedlichen Stößen (First oder Auflager),
 - über die Trägerhöhe hinweg?

Um diese Fragen zu beantworten, war es erforderlich eine ausreichend große Anzahl an Prüfkörpern zu gewinnen und dabei die unterschiedlichen geometrischen Positionen (Träger

unterschiedlicher Achsen, unterschiedliche Stöße über die Trägerlänge, Höhenlage) zu berücksichtigen.

Insgesamt wurden acht Trägerhälften aus sieben unterschiedlichen Achspositionen ausgewählt (vgl. Abbildung 3.1). Dabei wurde darauf geachtet, dass die Keilzinkenstöße aus denen die Proben entnommen wurden, keine sichtbaren auf den Einsturz zurückzuführende mechanische Beschädigung aufwiesen.

Über die Länge sind bei jedem Träger sechs Vollstöße vorhanden. Zwei im Firstbereich (Achsen D und E), zwei im geradlinig geneigten Bereich der Träger (Achsen C und F), zwei im Bereich der Auflager beim Übergang vom horizontalen zum geneigten Bereich (Achsen B und G). Es wurden Proben aus allen sechs Achsen entnommen, kritisch erschienen die Stöße in den Achsen B,D,E und G, da nicht bekannt war, mit welchen Vorrichtungen bei der Herstellung der erforderliche Anpressdruck erzeugt worden war und ob es nicht insbesondere bei Knicken Schwierigkeiten gab, den erforderlichen Druck überhaupt aufzubringen.

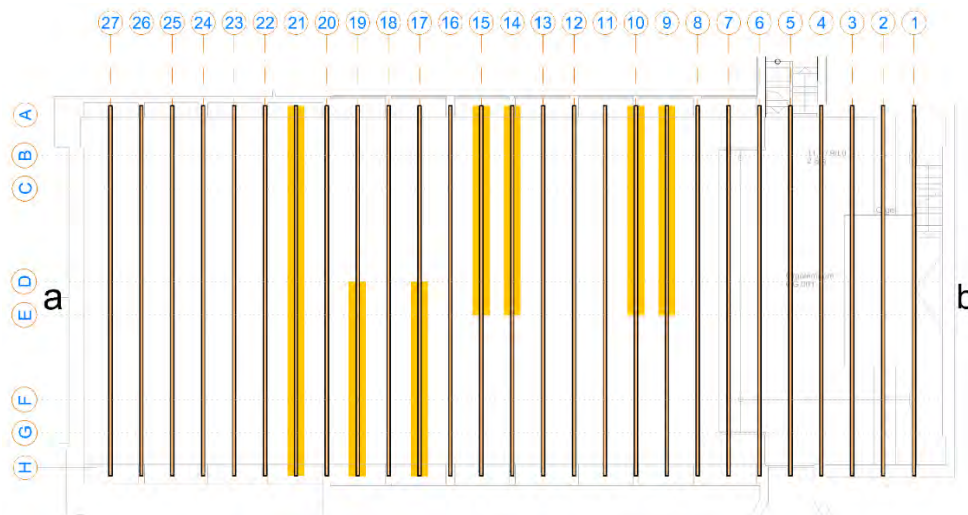


Abbildung 3.1: Übersichtsplan Träger Zugprüfung

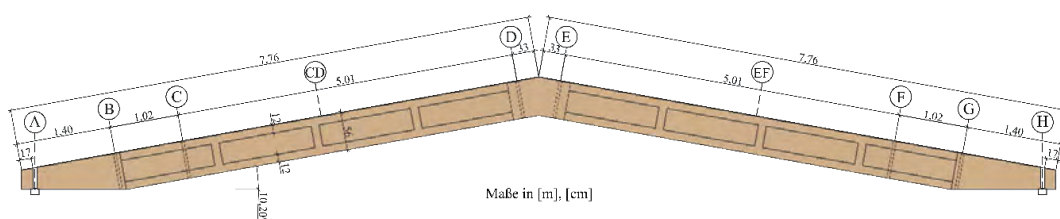
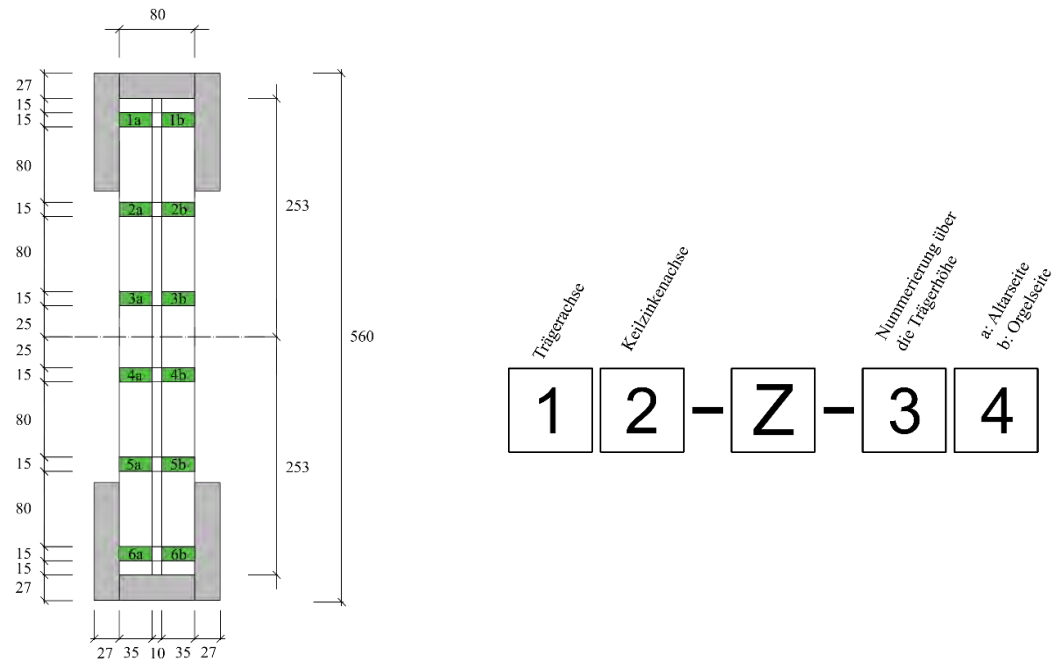


Abbildung 3.2: Träger Ansicht mit Lage der Keilzinkenstöße

In diesem Zusammenhang konnte auch nicht ausgeschlossen werden, dass der Anpressdruck über die Höhe gesehen exzentrisch aufgebracht wurde, mit entsprechenden Konsequenzen für die Festigkeit. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurden über die Höhe sechs Probekörper entnommen (siehe Abbildung 3.3a). Die beiden Bereiche links und rechts der mittig angeordneten und vertikal ausgerichteten Brettlage wurden als getrennte Prüfkörper gewonnen. Die Kennzeichnung mit a und b folgt der Festlegung aus Abbildung 3.3b.



a) b)
Abbildung 3.3: a) Träger - Querschnitt mit Bezeichnung der Probekörper über die Höhe,
b) Systematik der Probenbezeichnung

Bei sieben der acht Trägerhälften waren jeweils drei Stöße vorhanden, bei einer zwei. Damit ergibt sich die Gesamtzahl der Prüfkörper zu

$$(7 \cdot 3 + 1 \cdot 2) \cdot 6 \cdot 2 = 276.$$

Bei 24 dieser 276 Prüfkörper waren im Bereich der Keilzinkung Nägel vorhanden, welche offensichtlich eingebracht worden waren, um den Stoß bei der Herstellung zu fixieren. Für diese Prüfkörper waren keine verwertbaren Ergebnisse zu erwarten, so dass sie aus der in Abbildung 3.4 dargestellten Versuchsmatrix gestrichen wurden. Somit verblieben 252 Prüfkörper.

Versuchsmatrix Zugversuche mit Keilzinkung																											
	9B	9C	9D	10B	10C	10D	14B	14C	14D	15B	15C	15D	17E	17F	17G	19E	19F	19G	21B	21C	21E	21F	21G				
1	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b			
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Σ																											

$l = 420$ mm (schwarz), $l = 300$ mm (grau)

Abbildung 3.4: Versuchsmatrix Zugversuche mit Keilzinkung

Für einen direkten Vergleich der beiden Keilzinkungen erreichten Festigkeiten wurden bei allen Trägerabschnitten mittig zwischen den Achsen B und C bzw. E und F Prüfkörper ohne Keilzinkung entnommen. Die Prüfkörper wurden immer konsequent an derselben Stelle der Träger entnommen und waren somit – teilweise – mit Holzfehlern behaftet. Die Prüfmatrix für die Prüfkörper ohne Keilzinkung wird Abbildung 3.5 in dargestellt.

Prüfmatrix ohne Keilzinkung																
	9CD		10CD		14CD		15CD		17EF		19EF		21CD		21EF	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Σ	32															

$l = 420 \text{ mm}$ (schwarz), $l = 300 \text{ mm}$ (grau)

Abbildung 3.5: Versuchsmatrix Zugversuche ohne Keilzinkung

Hinsichtlich der Abmessung der Versuchskörper beträgt nach DIN EN 408 [DIN EN 408] das Mindestmaß für der freien Länge zwischen den Einspannbacken das 9-fache des kleinsten Querschnittsmaßes (vgl. Abbildung 3.6).

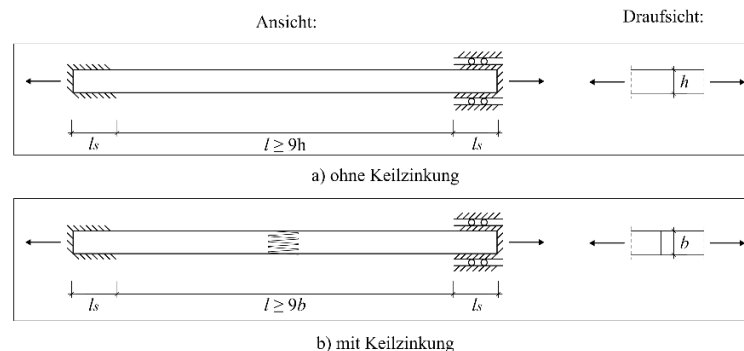


Abbildung 3.6: Schematischer Versuchsaufbau nach DIN EN 408 [DIN EN 408] a) ohne Keilzinkung, b) mit Keilzinkung

Der Darstellung im Querschnitt kann entnommen werden, dass die Breite der Prüfkörper durch den geometrischen Aufbau der Träger mit 35 mm gegeben war. Die Höhe wurde mit 15 mm gewählt. Damit ergibt sich als Mindestmaß für die freie Länge zwischen den Spannbacken 135 mm. Um einen Einfluss der Probenlänge auszuschließen, wurden bei vier der acht Stoßbereich Proben mit einer Länge von 300 mm aus dem Träger herausgeschnitten bei den vier anderen betrug die Länge 420 mm. Bei einer Klemmlänge der Spannbacken von 55 mm betrug die freie Länge somit 190 mm bzw. 310 mm.

Bei den Stößen im Firstbereich (Achsen E und D) verläuft die Faserrichtung des angeschlossenen Firstes nicht senkrecht zum Stoß, sondern ist um $10,2^\circ$ geneigt. Dadurch ergibt sich auch für eine Hälfte der Prüfkörper eine von der Belastungsrichtung abweichende Faserrichtung.

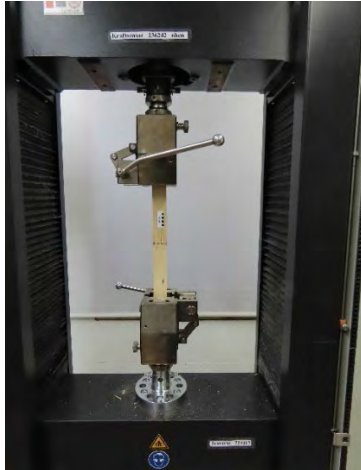
Alle Trägerabschnitte, aus denen die Prüfkörper stammen, wurden auf mechanische Beschädigungen überprüft. Sekundäre Versagensbereiche, welche mutmaßlich durch Stöße oder Aufprall verursacht worden sind, wurden nicht vorgefunden. Alle Keilzinkenstöße, aus denen Prüfkörper entnommen wurden, waren augenscheinlich intakt. Dass im Zuge des Einsturzes unplanmäßige Biege- und Zugbeanspruchungen auftraten ist naheliegend. Hinweise darauf, dass Keilzinkenverbindungen außerhalb der Versagensstelle beim Einsturz oder beim Transport auf eine Art und Weise beansprucht wurden, welche zu festigkeitsmindernden Vorschäden führten, gab es nicht.

3.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse mit Keilzinkung

Der Versuchsaufbau richtet sich nach DIN EN 408 [DIN EN 408] für Zugprüfungen an Keilzinkenverbindungen und Vollholzproben. Die Prüfungen erfolgen in einer Universalprüfmaschine des Typs Zwick Retroline. Von dieser werden die Prüfkraft und die

Verschiebung der Lasteinleitung aufgezeichnet. Die Prüfkörper werden beidseitig in die Maschine eingespannt, wobei die Belastung über die Traverse eingeleitet wird. Die Einspannung erfolgt über zwei baugleiche mechanische Spannbacken, wobei die Einspannlänge mit $l_s = 55 \text{ mm}$ festgelegt wurde.

Die Prüfkörper werden monoton mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit bis zum Versagen belastet. Die Prüfzeit soll $300 \pm 120 \text{ s}$ betragen. Um diesen Zeitbereich einzuhalten, ergab sich aus Vorversuchen eine Prüfgeschwindigkeit von $v = 2 \text{ mm/min}$.



a)

b)

Abbildung 3.7: Zugprüfkörper in der Universalprüfmaschine a) mit Keilzinkung, b) ohne Keilzinkung

Bei den Prüfkörpern wurden fünf unterschiedliche Versagensformen (VF) beobachtet.

- AST: 9 Prüfkörpern versagten im Bereich eines Astes
- SMA: bei 10 Prüfkörpern, die alle aus den Stößen im Bereich des Firstes stammten (Achsen E und D) versagte die Schmalseitenverklebung im Bereich derjenigen Hälfte des Prüfkörpers dessen Faserrichtung von der Belastungsrichtung abweicht. Schon bei der Herstellung der Prüfkörper war festgestellt worden, dass die Schmalseitenverklebungen durchgängig eine sehr schlechte Ausführungsqualität aufwiesen.
- KZI: bei 42 Prüfkörpern versagte ausschließlich die Keilzinkung, ohne dass ein Versagen im Holz selbst festzustellen war.
- MI: bei 154 und somit bei der überwiegenden Zahl der Prüfkörper trat das Versagen als Mischversagen auf, bei dem die teilweise die Keilzinkung selbst und das Holz im Bereich der Keilzinkung versagte.
- HO: bei 38 versagte der Holzquerschnitt außerhalb der Keilzinkung, meist im Bereich einer der beiden Einspannstellen. Auffällig ist hierbei das, kurzfasrige Bruchbild, das bei allen Proben mit Holzversagen festgestellt wurde.

Die Zugfestigkeit wurde nach folgender Gleichung berechnet:

$$f_{t,0,exp} = \frac{F_{max}}{\frac{b_1 + b_2}{2} \cdot \frac{h_1 + h_2}{2}}$$

Die geometrischen Werte wurden entsprechend Abbildung 3.8 bestimmt.

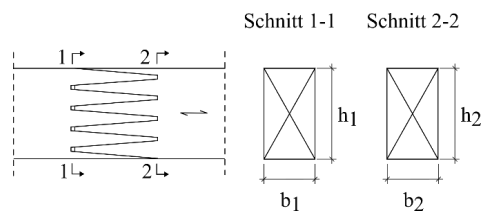


Abbildung 3.8: Ermittlung der Querschnittsflächen

Tabelle 3.1 bis Tabelle 3.6 sind für jeden Prüfkörper die maximale Prüflast, die geometrischen Werte und die berechnete Zugfestigkeit dokumentiert.

Tabelle 3.1: Abmessungen und Ergebnisse Prüfkörper 9B, 9C und 9D

Prüf- körper	$F_{\max}$ [N]	h_1 [mm]	h_2 [mm]	b_1 [mm]	b_2 [mm]	A [mm ²]	$f_{t,0}$ [MPa]	VF
9B-Z-1a	4687	34,43	34,70	15,25	15,32	528,3	8,9	MI
9B-Z-2a	7381	35,14	34,95	15,16	15,24	532,7	13,9	HO
9B-Z-3a	6984	34,81	35,38	15,28	15,25	535,7	13,0	HO
9B-Z-4a	7767	30,60	34,73	15,38	15,55	505,2	15,4	MI
9B-Z-5a	5825	14,90	14,93	34,50	34,69	516,0	11,3	MI
9B-Z-1b	4545	34,75	35,17	15,26	15,37	535,4	8,5	MI
9B-Z-2b	5719	34,20	34,56	14,97	14,99	515,0	11,1	MI
9B-Z-3b	3090	33,72	34,92	14,92	15,07	514,6	6,0	HO
9B-Z-4b	5958	34,86	35,08	15,32	15,05	531,0	11,2	MI
9B-Z-5b	5272	34,04	34,17	14,74	14,75	502,9	10,5	KZI
9C-Z-1a	6170	34,67	34,82	15,13	15,06	524,5	11,8	MI
9C-Z-2a	4641	34,78	34,74	15,25	15,14	528,2	8,8	MI
9C-Z-3a	3406	34,70	34,22	15,09	14,83	515,5	6,6	MI
9C-Z-4a	7106	34,77	34,86	14,83	14,80	515,8	13,8	MI
9C-Z-5a	5573	35,06	34,86	14,19	14,19	494,2	11,3	MI
9C-Z-6a	2587	34,98	34,65	14,95	14,81	518,0	5,0	MI
9C-Z-1b	3996	33,93	32,28	15,29	15,36	507,3	7,9	MI
9C-Z-2b	3294	33,93	33,11	15,28	15,43	517,2	6,4	MI
9C-Z-3b	3381	33,95	30,90	15,04	15,14	489,3	6,9	MI
9C-Z-4b	6597	34,53	35,16	15,18	15,26	530,3	12,4	MI
9C-Z-5b	5052	34,25	34,74	14,11	14,38	491,4	10,3	MI
9C-Z-6b	3105	34,92	34,23	14,37	14,02	490,8	6,3	MI
9D-Z-1a	2781	34,54	35,35	14,96	15,05	524,3	5,3	MI
9D-Z-2a	1967	34,88	35,54	14,73	14,75	519,0	3,8	MI
9D-Z-3a	4683	33,81	33,34	15,10	14,89	503,5	9,3	KZI
9D-Z-4a	2305	33,40	35,50	15,53	15,56	535,5	4,3	MI
9D-Z-5a	375	35,11	35,20	15,16	14,94	529,1	0,7	MI
9D-Z-6a	401	34,84	34,92	15,12	15,19	528,6	0,8	MI
9D-Z-1b	4153	33,62	32,93	14,77	14,85	492,8	8,4	MI
9D-Z-2b	2395	34,04	33,78	14,65	14,70	497,6	4,8	MI
9D-Z-4b	1212	34,80	34,74	14,57	14,63	507,6	2,4	SMA
9D-Z-5b	403	33,33	34,60	15,23	15,19	516,6	0,8	SMA
9D-Z-6b	503	33,29	33,17	15,32	15,38	510,1	1,0	KZI

Tabelle 3.2: Abmessungen und Ergebnisse Prüfkörper Achse 10B, 10C, 10D und 14B

Prüf- körper	F _{max} [N]	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	A [mm ²]	f _{t,0} [MPa]	VF
10B-Z-1a	8792	32,54	32,89	14,74	14,25	474,2	18,5	HO
10B-Z-2a	3484	34,44	37,74	14,70	14,47	526,4	6,6	MI
10B-Z-3a	10129	34,82	35,52	15,10	15,58	539,5	18,8	MI
10B-Z-4a	7724	34,80	34,53	15,50	16,20	549,4	14,1	MI
10B-Z-5a	10189	34,97	34,77	15,07	15,30	529,5	19,2	MI
10B-Z-1b	8591	34,70	34,50	14,40	14,73	503,9	17,0	MI
10B-Z-2b	8359	34,53	34,10	14,88	14,92	511,3	16,3	MI
10B-Z-3b	8119	34,45	34,31	15,03	15,05	517,1	15,7	MI
10B-Z-4b	8132	35,05	32,48	15,40	15,53	522,2	15,6	HO
10B-Z-5b	9226	33,80	35,44	15,24	15,10	525,2	17,6	HO
10C-Z-1a	8751	33,08	34,28	15,28	15,40	516,7	16,9	MI
10C-Z-2a	8736	35,28	34,88	14,34	14,52	506,2	17,3	AST
10C-Z-3a	14980	34,78	34,85	14,96	15,00	521,5	28,7	KZI
10C-Z-4a	8691	34,77	34,96	14,91	14,89	519,5	16,7	HO
10C-Z-5a	12378	34,27	34,54	15,09	15,12	519,7	23,8	KZI
10C-Z-6a	7052	34,30	34,45	15,08	15,20	520,4	13,6	HO
10C-Z-1b	6437	32,53	33,90	15,36	15,23	508,0	12,7	MI
10C-Z-2b	10545	34,62	34,98	14,32	14,32	498,3	21,2	MI
10C-Z-3b	8720	34,48	34,89	15,00	14,98	519,9	16,8	MI
10C-Z-4b	9783	34,59	35,06	14,85	14,91	518,2	18,9	MI
10C-Z-5b	6189	34,30	34,87	15,02	15,35	525,2	11,8	MI
10C-Z-6b	4254	33,47	31,25	15,39	15,38	497,9	8,5	KZI
10D-Z-1a	3082	33,95	33,81	14,06	14,06	476,4	6,5	SM
10D-Z-2a	9497	34,19	35,50	14,38	14,43	501,9	18,9	HO
10D-Z-3a	2683	35,28	35,02	14,10	14,18	497,0	5,4	SM
10D-Z-4a	8764	34,79	35,00	14,44	14,46	504,2	17,4	HO
10D-Z-5a	6427	33,86	34,50	14,80	14,55	501,6	12,8	MI
10D-Z-1b	5811	33,87	34,11	14,05	13,94	475,7	12,2	SM
10D-Z-2b	2592	34,24	32,36	14,35	14,38	478,4	5,4	SM
10D-Z-3b	4547	34,14	33,97	13,89	13,85	472,3	9,6	MI
10D-Z-4b	7102	34,30	34,32	14,37	14,52	495,6	14,3	MI
10D-Z-5b	5292	34,06	35,05	14,82	14,64	509,0	10,4	MI
10D-Z-6b	3335	32,15	34,42	14,30	14,04	471,6	7,1	MI
14B-Z-1a	8110	33,90	32,30	14,80	14,80	489,9	16,6	MI
14B-Z-2a	7732	32,75	32,76	15,23	15,10	496,7	15,6	HO
14B-Z-3a	6988	34,90	34,60	15,39	15,42	535,3	13,1	MI
14B-Z-4a	8727	34,55	31,18	15,15	15,20	498,7	17,5	MI
14B-Z-5a	6439	34,42	34,62	15,01	15,03	518,5	12,4	MI
14B-Z-6a	6280	34,26	34,66	15,24	15,19	524,3	12,0	MI
14B-Z-1b	7511	31,01	31,28	14,65	14,62	455,8	16,5	MI
14B-Z-2b	3671	30,59	34,48	14,67	14,53	475,0	7,7	MI
14B-Z-3b	5838	30,96	33,81	15,20	15,25	493,1	11,8	MI
14B-Z-4b	7595	33,82	33,40	15,00	15,07	505,3	15,0	MI
14B-Z-5b	6021	33,60	33,80	14,91	14,89	502,1	12,0	MI
14B-Z-6b	4070	34,91	34,00	15,19	15,13	522,3	7,8	MI

Tabelle 3.3: Abmessungen und Ergebnisse Prüfkörper 14C, 14D, 15B und 15Ca

Prüf- körper	$F_{\max}$ [N]	h_1 [mm]	h_2 [mm]	b_1 [mm]	b_2 [mm]	A [mm ²]	$f_{t,0}$ [MPa]	VF
14C-Z-1a	4623	34,44	32,79	14,41	14,52	486,2	9,5	MI
14C-Z-2a	7337	32,75	31,96	14,75	14,67	475,9	15,4	MI
14C-Z-3a	8129	34,87	34,58	14,52	14,58	505,2	16,1	MI
14C-Z-4a	10000	34,64	34,83	14,83	14,68	512,5	19,5	KZI
14C-Z-5a	4997	34,75	34,28	14,84	14,94	513,9	9,7	KZI
14C-Z-6a	9285	34,74	34,41	14,64	14,44	502,7	18,5	KZI
14C-Z-1b	3443	27,31	32,00	14,70	14,78	437,1	7,9	MI
14C-Z-2b	7698	34,63	34,71	15,20	15,24	527,7	14,6	MI
14C-Z-3b	8670	34,91	34,94	14,81	14,81	517,2	16,8	HO
14C-Z-4b	8599	34,76	34,75	15,14	15,05	524,6	16,4	KZI
14C-Z-5b	4430	28,83	27,33	15,14	15,08	424,3	10,4	KZI
14C-Z-6b	5175	34,25	34,66	14,69	14,69	506,1	10,2	MI
14D-Z-1a	2460	35,19	34,71	15,09	15,06	526,9	4,7	SM
14D-Z-2a	5432	33,27	32,84	14,91	15,11	496,2	10,9	MI
14D-Z-3a	704	35,42	32,74	14,67	14,78	501,8	1,4	AST
14D-Z-4a	5854	34,66	34,89	15,44	15,42	536,6	10,9	MI
14D-Z-5a	6257	34,46	34,86	15,38	15,60	536,9	11,7	MI
14D-Z-6a	5941	35,36	35,27	15,55	15,54	549,0	10,8	MI
14D-Z-1b	6451	33,94	34,44	15,36	15,19	522,3	12,4	MI
14D-Z-2b	6223	33,50	33,57	14,95	14,81	499,0	12,5	MI
14D-Z-3b	6932	34,98	35,09	15,03	14,72	521,1	13,3	HO
14D-Z-4b	5397	34,52	35,42	15,59	15,37	541,3	10,0	MI
14D-Z-5b	4206	33,94	35,05	15,44	15,56	534,7	7,9	MI
14D-Z-6b	3356	34,60	34,58	15,46	15,41	533,9	6,3	HO
15B-Z-1a	5482	33,24	33,28	14,70	14,76	489,9	11,2	MI
15B-Z-2a	5830	33,24	33,47	15,32	15,38	512,0	11,4	MI
15B-Z-3a	5660	34,97	34,56	15,31	15,28	531,7	10,6	KZI
15B-Z-4a	4571	34,08	33,97	15,06	15,11	513,3	8,9	KZI
15B-Z-5a	4546	35,92	34,08	14,03	14,22	494,4	9,2	MI
15B-Z-6a	7959	33,05	33,56	14,65	14,74	489,4	16,3	HO
15B-Z-1b	4570	33,98	34,27	14,40	14,72	496,9	9,2	MI
15B-Z-2b	6418	34,96	34,78	14,94	14,87	519,7	12,3	MI
15B-Z-3b	5084	32,77	33,46	14,92	15,10	497,1	10,2	MI
15B-Z-4b	6637	33,93	33,52	15,01	14,96	505,4	13,1	MI
15B-Z-5b	6115	34,55	34,42	14,62	14,62	504,2	12,1	MI
15B-Z-6b	3259	34,95	34,01	14,91	14,97	515,1	6,3	MI
15C-Z-1a	4868	40,77	35,77	14,96	14,86	570,6	8,5	MI
15C-Z-2a	3666	38,51	32,86	15,04	15,08	537,4	6,8	MI
15C-Z-4a	5518	34,88	34,78	15,03	14,90	521,2	10,6	MI
15C-Z-5a	7292	34,79	34,88	15,12	15,29	529,7	13,8	MI
15C-Z-6a	3300	23,82	27,96	14,71	14,98	384,3	8,6	HO

Tabelle 3.4: Abmessungen und Ergebnisse Prüfkörper Achse 15Cb, 15D, 17E, 17F und 17G

Prüf- körper	F _{max} [N]	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	A [mm ²]	f _{t,0} [MPa]	VF
15C-Z-1b	3903	34,10	34,37	14,94	14,95	511,6	7,6	MI
15C-Z-2b	3878	33,94	34,65	15,01	15,03	515,1	7,5	MI
15C-Z-4b	505	34,33	34,82	14,65	14,65	506,5	1,0	AST
15C-Z-5b	7237	34,70	34,41	15,04	15,04	519,7	13,9	KZI
15C-Z-6b	7215	34,41	34,20	14,92	14,78	509,4	14,2	MI
15D-Z-1a	5072	35,09	35,14	14,71	14,72	516,7	9,8	MI
15D-Z-2a	4694	34,75	34,81	14,76	14,70	512,3	9,2	MI
15D-Z-4a	4219	34,52	34,17	14,70	14,52	501,8	8,4	MI
15D-Z-5a	443	34,04	35,18	15,26	15,20	527,1	0,8	SMA
15D-Z-2b	4616	33,69	33,69	15,18	15,04	507,7	9,1	MI
15D-Z-4b	4796	33,64	33,45	15,13	15,05	506,2	9,5	MI
17E-Z-1a	5355	31,00	35,37	15,52	15,25	510,6	10,5	KZI
17E-Z-2a	4885	34,52	33,16	14,72	14,84	500,2	9,8	MI
17E-Z-3a	8373	34,43	34,92	14,81	15,00	516,8	16,2	HO
17E-Z-4a	7078	34,67	35,12	14,56	14,58	508,4	13,9	MI
17E-Z-5a	5643	35,08	35,17	14,52	14,61	511,6	11,0	KZI
17E-Z-6a	676	34,76	31,17	14,16	14,29	468,9	1,4	KZI
17E-Z-1b	6271	34,21	34,62	15,27	15,28	525,7	11,9	MI
17E-Z-2b	3761	34,87	34,93	14,70	14,92	516,9	7,3	MI
17E-Z-3b	5600	34,27	34,37	14,96	15,11	516,0	10,9	MI
17E-Z-4b	4950	34,54	34,38	14,48	14,42	497,9	9,9	MI
17E-Z-5b	890	34,17	34,04	14,11	14,13	481,6	1,8	AST
17E-Z-6b	252	26,06	34,81	14,75	14,91	451,4	0,6	MI
17F-Z-1a	6376	33,77	34,47	14,34	14,39	490,1	13,0	HO
17F-Z-2a	7159	33,86	34,03	15,03	14,81	506,5	14,1	HO
17F-Z-3a	3345	33,73	34,12	14,60	14,76	498,0	6,7	KZI
17F-Z-4a	5850	34,21	33,98	14,94	14,90	508,7	11,5	KZI
17F-Z-5a	5338	34,84	34,29	15,28	15,23	527,3	10,1	MI
17F-Z-6a	5119	34,04	33,24	14,95	15,05	504,6	10,1	KZI
17F-Z-1b	2747	29,74	30,64	14,60	14,58	440,5	6,2	KZI
17F-Z-2b	6772	34,61	34,34	15,06	14,87	515,9	13,1	KZI
17F-Z-3b	6757	34,38	33,65	14,75	14,78	502,2	13,5	MI
17F-Z-4b	6411	34,84	34,58	15,11	14,92	521,2	12,3	MI
17F-Z-5b	4945	34,82	34,83	15,33	15,37	534,6	9,3	KZI
17F-Z-6b	5268	33,11	33,02	14,98	14,80	492,3	10,7	HO
17G-Z-1a	6110	30,52	30,86	14,98	15,36	465,6	13,1	KZI
17G-Z-2a	5252	34,50	30,34	13,94	13,58	446,1	11,8	KZI
17G-Z-3a	3909	33,56	34,15	9,24	9,16	311,5	12,6	KZI
17G-Z-4a	3412	34,05	34,70	12,86	12,67	438,8	7,8	KZI
17G-Z-5a	4468	34,24	34,31	14,96	14,82	510,4	8,8	KZI
17G-Z-1b	7232	32,76	32,62	14,97	14,91	488,4	14,8	MI
17G-Z-2b	4722	33,62	33,61	13,37	13,31	448,4	10,5	MI
17G-Z-3b	3172	34,34	34,33	9,40	9,15	318,5	10,0	KZI
17G-Z-4b	3882	34,94	34,58	12,61	12,49	436,2	8,9	KZI
17G-Z-5b	5448	34,35	34,97	15,10	15,11	523,5	10,4	KZI

Tabelle 3.5: Abmessungen und Ergebnisse Prüfkörper Achse 19E, 19F, 19G und 21B

Prüf- körper	F _{max} [N]	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	A [mm ²]	f _{t,0} [MPa]	VF
19E-Z-1a	1040	35,01	34,84	15,33	15,33	535,4	1,9	SMA
19E-Z-2a	6554	35,24	35,11	15,31	15,30	538,4	12,2	MI
19E-Z-3a	3393	34,14	33,89	14,90	15,00	508,5	6,7	HO
19E-Z-4a	3658	34,43	34,42	15,31	15,28	526,5	6,9	MI
19E-Z-5a	3919	34,36	34,85	15,20	15,14	525,0	7,5	KZI
19E-Z-6a	166	35,03	35,20	15,73	15,38	546,2	0,3	MI
19E-Z-1b	8145	35,41	35,13	15,21	15,24	537,0	15,2	MI
19E-Z-2b	2771	35,22	35,20	15,31	15,20	537,1	5,2	HO
19E-Z-3b	7254	35,11	35,33	14,91	14,95	525,8	13,8	MI
19E-Z-4b	6151	35,45	35,27	15,05	15,19	534,6	11,5	MI
19E-Z-5b	3695	35,58	35,25	15,05	15,05	533,0	6,9	MI
19E-Z-6b	798	35,71	35,87	15,88	15,86	568,0	1,4	MI
19F-Z-2a	2414	34,96	34,20	15,28	15,18	526,7	4,6	AST
19F-Z-3a	2428	34,90	34,38	15,16	14,99	522,2	4,6	MI
19F-Z-4a	7286	34,78	34,54	14,68	14,72	509,5	14,3	HO
19F-Z-5a	6306	35,00	34,73	14,92	14,63	515,1	12,2	MI
19F-Z-6a	5794	34,38	34,85	14,96	14,81	515,2	11,2	MI
19F-Z-1b	5680	30,96	32,66	14,49	14,16	455,7	12,5	MI
19F-Z-2b	5657	33,82	34,27	15,30	15,32	521,2	10,9	MI
19F-Z-3b	8974	34,11	34,03	15,19	15,43	521,6	17,2	HO
19F-Z-4b	7055	34,98	35,27	14,91	14,96	524,6	13,4	HO
19F-Z-5b	7840	34,36	34,54	14,87	14,37	503,7	15,6	MI
19F-Z-6b	8769	33,73	34,12	14,76	14,64	498,7	17,6	KZI
19G-Z-1a	6179	34,31	34,54	15,34	14,82	519,1	11,9	MI
19G-Z-2a	4008	34,27	34,43	14,97	14,82	511,6	7,8	MI
19G-Z-3a	7065	34,77	34,69	15,31	15,01	526,5	13,4	KZI
19G-Z-4a	1500	33,99	34,55	14,73	14,91	507,9	3,0	AST
19G-Z-5a	4666	35,16	34,56	14,95	15,06	523,1	8,9	KZI
19G-Z-6a	2404	33,38	32,69	15,55	15,65	515,3	4,7	MI
19G-Z-1b	231	33,83	34,51	14,70	14,50	498,9	0,5	AST
19G-Z-2b	3592	34,12	34,30	14,76	14,63	502,7	7,1	MI
19G-Z-3b	5097	32,42	32,81	14,67	14,79	480,4	10,6	MI
19G-Z-4b	5846	33,45	33,64	14,68	14,76	493,8	11,8	MI
19G-Z-5b	3027	33,96	33,32	14,95	14,94	502,7	6,0	KZI
19G-Z-6b	4341	33,00	34,55	15,34	15,53	521,3	8,3	MI
21B-Z-1a	2962	31,44	33,38	15,18	15,31	494,1	6,0	MI
21B-Z-2a	7166	34,67	34,60	15,45	15,39	534,1	13,4	MI
21B-Z-3a	7875	35,10	34,33	15,79	15,45	542,2	14,5	MI
21B-Z-4a	3552	32,83	33,30	15,40	15,48	510,5	7,0	MI
21B-Z-5a	8707	34,10	34,00	15,75	15,55	532,9	16,3	MI
21B-Z-1b	8534	34,34	34,50	15,47	15,42	531,6	16,1	MI
21B-Z-2b	5690	34,13	34,32	15,51	15,18	525,2	10,8	MI
21B-Z-3b	5585	34,26	34,49	14,98	15,03	515,8	10,8	MI
21B-Z-4b	8023	34,93	34,43	14,96	14,87	517,3	15,5	MI
21B-Z-5b	5387	31,92	32,46	15,14	15,24	489,0	11,0	MI

Tabelle 3.6: Abmessungen und Ergebnisse Prüfkörper Achse 21C, 21E, 21F und 21G

Prüf- körper	F _{max} [N]	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	A [mm ²]	f _{t,0} [MPa]	VF
21C-Z-1a	6308	34,72	35,03	14,95	14,95	521,4	12,1	HO
21C-Z-2a	4944	34,95	34,77	15,06	15,12	526,0	9,4	MI
21C-Z-3a	6051	34,95	34,78	15,26	15,13	529,8	11,4	KZI
21C-Z-4a	5296	34,88	34,80	14,68	14,46	507,6	10,4	MI
21C-Z-5a	322	34,74	34,48	15,23	15,11	525,0	0,6	KZI
21C-Z-6a	132	34,70	34,74	15,07	15,07	523,2	0,3	MI
21C-Z-1b	2799	23,65	33,64	14,97	15,06	430,1	6,5	MI
21C-Z-2b	1940	34,71	34,83	14,94	15,00	520,5	3,7	MI
21C-Z-3b	6579	34,52	34,82	15,24	15,29	529,2	12,4	KZI
21C-Z-4b	4597	34,93	34,76	14,90	14,93	519,7	8,8	MI
21C-Z-5b	1695	34,69	34,49	15,58	15,48	537,2	3,2	MI
21C-Z-6b	524	34,72	34,85	14,66	14,95	515,0	1,0	KZI
21E-Z-2a	2709	35,45	35,48	15,42	15,48	547,9	4,9	SMA
21E-Z-3a	3186	35,35	35,62	15,18	15,26	540,1	5,9	AST
21E-Z-4a	8241	34,31	34,66	15,07	15,10	520,2	15,8	MI
21E-Z-5a	246	35,68	36,11	15,35	15,49	553,5	0,4	HO
21E-Z-6a	125	35,61	36,61	14,64	14,83	532,1	0,2	HO
21E-Z-1b	112	31,91	34,32	15,01	15,02	497,2	0,2	MI
21E-Z-2b	7882	34,62	34,72	15,43	15,41	534,6	14,7	MI
21E-Z-3b	4486	31,90	34,01	15,20	15,29	502,4	8,9	MI
21E-Z-4b	3677	34,35	33,61	15,04	15,16	513,1	7,2	HO
21E-Z-5b	7860	35,50	33,41	15,40	15,56	533,4	14,7	MI
21E-Z-6b	3022	35,28	34,97	15,39	15,46	541,8	5,6	HO
21F-Z-1a	1717	31,33	30,07	15,30	16,05	481,2	3,6	HO
21F-Z-2a	5515	34,75	34,65	14,05	14,13	488,9	11,3	HO
21F-Z-3a	5733	34,96	34,76	13,90	14,07	487,5	11,8	MI
21F-Z-4a	4622	35,12	34,77	15,52	15,57	543,2	8,5	MI
21F-Z-5a	7988	34,76	34,33	14,24	14,22	491,6	16,2	HO
21F-Z-1b	6133	32,26	31,69	15,26	15,30	488,6	12,6	MI
21F-Z-2b	7440	33,83	33,27	14,84	14,54	492,8	15,1	KZI
21F-Z-3b	7212	33,82	33,07	14,27	14,29	477,6	15,1	MI
21F-Z-4b	10359	34,17	33,95	16,20	15,90	546,7	19,0	MI
21F-Z-5b	6175	34,29	33,85	14,30	14,36	488,2	12,6	MI
21G-Z-1a	7516	33,83	33,73	15,45	15,52	523,1	14,4	MI
21G-Z-2a	8779	34,49	34,34	15,07	14,98	517,1	17,0	MI
21G-Z-3a	8380	33,85	34,81	14,36	14,45	494,5	16,9	HO
21G-Z-4a	8227	34,13	34,01	15,26	15,25	519,7	15,8	KZI
21G-Z-5a	1976	33,64	33,25	15,02	15,05	502,8	3,9	AST
21G-Z-1b	4083	33,16	25,78	15,31	15,37	452,1	9,0	HO
21G-Z-2b	8954	34,32	34,25	15,02	14,93	513,4	17,4	MI
21G-Z-3b	7676	33,68	33,16	14,15	14,47	478,2	16,1	HO
21G-Z-4b	6211	34,31	34,23	17,98	15,12	567,2	11,0	HO
21G-Z-5b	7583	34,34	34,40	14,56	14,38	497,3	15,2	HO

Abbildung 3.9 zeigt eine grafische Darstellung der erreichten Festigkeiten. Anhand dieser Darstellung lässt sich folgendes erkennen:

- Die Festigkeiten der jeweiligen Prüfkörper a und b liegen in der Regel relativ nahe beieinander. D. h. in gleicher Höhe des Stoßes werden ähnliche Festigkeiten erreicht,
- Besonders geringe Festigkeiten werden an überproportional vielen Prüfkörpern festgestellt, die jeweils am unteren Rand eines Stoßes in Firstbereich (Achsen E und D) entnommen wurden

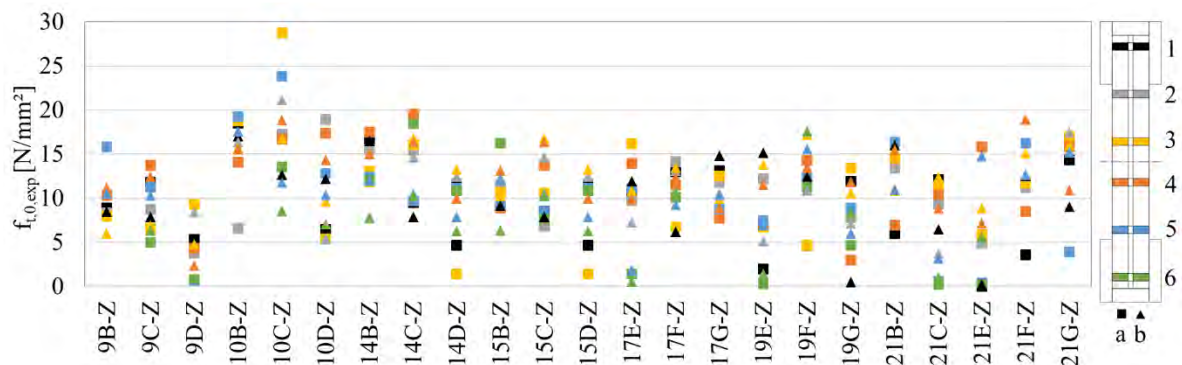


Abbildung 3.9: Zugfestigkeiten der Keilzinkenverbindungen

Die Abbildung 3.10 zeigt eine Darstellung der Zugfestigkeit ohne die Prüfkörper, bei denen die Versagensformen AST und SMA beobachtet wurde. Diese beiden Versagensformen werden als Ausreißer eingestuft, da es sich um Fehlstellen handelt, die keine repräsentative Aussage über die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen zulassen. Im Vergleich zu Abbildung 3.9 fällt auf, dass durch die Aussortierung der Prüfkörper mit Versagensformen AST und SMA einige Prüfergebnisse mit geringer Festigkeit wegfallen und, dass sich aber ansonsten die Verteilung der Festigkeiten nur wenig ändert.

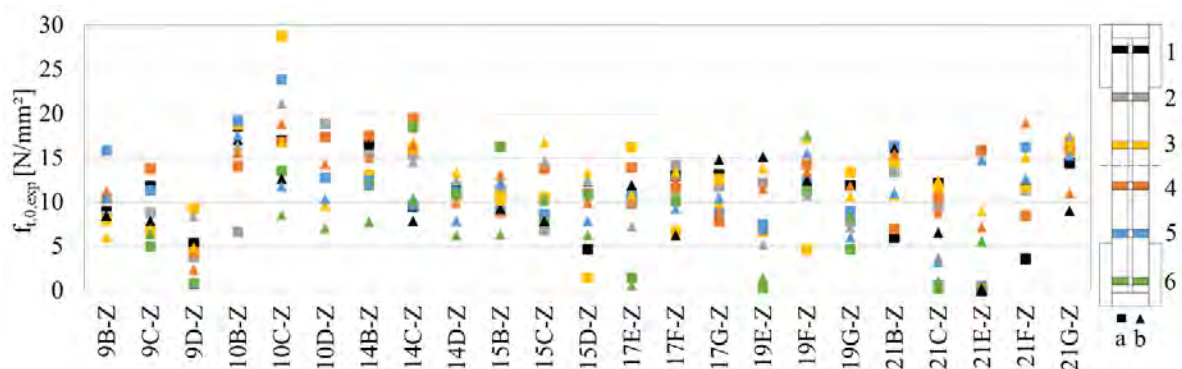


Abbildung 3.10: Zugfestigkeiten der Keilzinkenverbindungen ohne die Versagensarten AST und SMA

Tabelle 3.7 und Abbildung 3.11 geben einen Überblick über die unterschiedlichen Versagensarten und der zugehörigen Zugfestigkeit. Die Bruchbilder aller Prüfkörper sind im Anhang A.2 dokumentiert.

Tabelle 3.7: Verteilung der Versagensfälle Keilzinkenverbindung

		SMA	HO	MI	KZI	AST
nPrüfkörper	[-]	10	38	154	42	9
Anteil	[%]	4,0	15,0	60,9	16,6	3,6
$f_{t,0,m,Versagen}$	[N/mm ²]	4,5	11,9	10,8	11,0	4,4

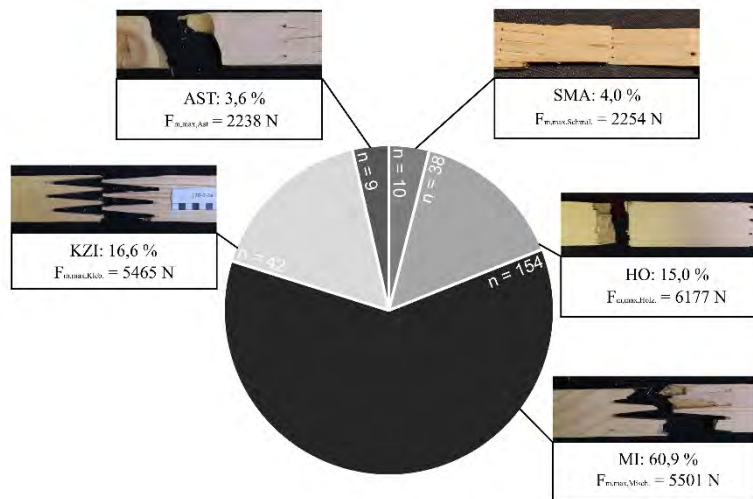


Abbildung 3.11: Verteilung der Versagensfälle Keilzinkenverbindung

3.3 Versuchsdurchführung und Ergebnisse ohne Keilzinkung

Die Prüfung erfolgt mit demselben Versuchsaufbau, wie die Keilzinkenprüfung nach DIN EN 408 [DIN EN 408]. Die Prüfkörper werden monoton mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit bis zum Versagen belastet. Die Prüfzeit soll 300 ± 120 s betragen. Um diesen Zeitbereich einzuhalten, ergab sich aus Vorversuchen eine Prüfgeschwindigkeit von $v = 5$ mm/min.

Bei den Prüfkörpern wurden vier unterschiedliche Versagensformen beobachtet.

- AST: 7 Prüfkörpern versagten im Bereich eines Astes.
- SR: bei 3 Prüfkörpern wurde ein Schrägbruch entlang einer Jahrringgrenze beobachtet. Es wird davon ausgegangen, dass der Einfluss der Jahrringe bei der Bestimmung der Zugfestigkeit bei kleinen Prüfkörpern geringer ist als bei größeren Querschnitten.
- ZUG: bei 13 Prüfkörpern konnte ein kurzfasriges bzw. würfelförmiges Zugversagen beobachtet werden. Die würfelförmige Bruchfläche ist bei sehr trockenem Holz nicht ungewöhnlich.
- MI: bei 9 Prüfkörpern trat der Bruch als Kombination aus Querdruckversagen in den Spannbacken bei hoher Prüfkraft und einem Zugversagen auf. Diese Prüfkörper wiesen die höchsten Festigkeiten auf.

Aus den Versuchsdaten wird die Zugfestigkeit der Prüfkörper ermittelt. Hierfür ist zunächst die Bestimmung der Querschnittsfläche erforderlich. Die Abmessungen werden an den beiden Enden sowie in der Mitte der Prüfkörper mittels Schieblehre aufgenommen. Die Querschnittsfläche ergibt sich aus den gemittelten Höhen- und Breitenwerten.

Die Zugfestigkeit berechnet sich nach folgender Beziehung:

$$f_{t,0,exp} = \frac{F_{max}}{\frac{b_1 + b_2 + b_3}{3} \cdot \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3}}$$

Tabelle 3.8: Abmessungen und Ergebnisse Prüfkörper Achse 9CD, 10CD, 14CD, 17EF, 19EF und 21EF

Prüfkörper	F _{max} [N]	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	h ₃ [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	b ₃ [mm]	A [mm ²]	f _{t,0} [MPa]	VF
9CD-Z-1a	9302	15,04	15,41	15,22	36,06	35,92	35,80	546,9	17,0	ZUG
9CD-Z-2a	6830	15,37	15,75	15,28	36,36	36,24	36,39	561,9	12,2	SR
9CD-Z-1b	1026	14,81	14,93	15,24	36,30	36,24	36,09	542,9	18,9	ZUG
9CD-Z-2b	3874	15,01	15,21	15,47	36,09	36,06	35,94	548,7	7,1	AST
10CD-Z-1a	2837	15,07	15,12	14,94	34,51	34,73	34,86	522,0	54,4	MI
10CD-Z-2a	2240	14,71	14,82	14,88	34,18	34,23	34,45	507,6	44,1	MI
10CD-Z-1b	7050	15,02	14,96	14,82	34,70	34,83	34,98	520,2	13,6	MI
10CD-Z-2b	3502	15,67	15,42	15,55	35,55	35,41	35,39	551,1	6,4	AST
14CD-Z-1a	2478	35,20	34,96	35,04	14,95	15,19	15,12	529,0	46,8	ZUG
14CD-Z-2a	5068	15,04	15,11	14,97	33,42	33,63	33,84	505,8	100,2	MI
14CD-Z-1b	1215	14,54	14,72	14,68	34,62	34,82	34,75	508,7	23,9	ZUG
14CD-Z-2b	2228	14,41	14,25	14,53	34,58	34,64	34,47	497,6	44,8	ZUG
15CD-Z-1a	9285	15,21	15,29	15,34	34,98	35,01	34,58	532,6	17,4	ZUG
15CD-Z-2a	3771	14,60	14,97	15,30	34,60	34,76	34,9	520,2	72,5	MI
15CD-Z-1b	9123	15,22	15,34	15,51	35,06	35,08	34,98	538,1	17,0	SR
15CD-Z-2b	1901	15,39	15,02	14,64	34,79	34,69	34,58	520,9	36,5	ZUG
17EF-Z-1a	8318	14,33	15,37	14,71	34,45	33,48	35,41	509,9	16,3	AST
17EF-Z-1b	9838	14,90	15,12	15,30	34,57	34,7	35,07	525,4	18,7	ZUG
17EF-Z-2a	2554	15,35	15,46	15,39	35,85	35,92	36,12	553,8	46,1	MI
17EF-Z-2b	1143	14,71	14,79	14,92	35,10	34,71	34,89	516,8	22,1	ZUG
19EF-Z-1a	1009	15,25	15,47	15,66	34,91	34,84	35,31	541,4	18,6	ZUG
19EF-Z-2a	7350	14,21	14,41	14,56	34,75	34,66	34,44	498,2	14,8	ZUG
19EF-Z-1b	2225	14,95	14,91	14,70	34,01	34,28	34,57	509,3	4,4	AST
19EF-Z-2b	1137	14,14	14,25	14,64	35,05	35,11	35,23	503,9	22,6	ZUG
21CD-Z-1a	3692	15,01	15,05	14,96	34,7	34,81	34,97	522,6	70,7	MI
21CD-Z-2a	4350	15,15	15,21	15,29	35,00	34,97	34,95	532,2	81,7	MI
21CD-Z-1b	5972	15,05	15,07	15,13	34,56	34,62	34,65	522,0	11,4	AST
21CD-Z-2b	1663	14,72	14,83	15,03	34,72	34,61	34,45	514,1	32,4	ZUG
21EF-Z-1a	7601	14,28	14,18	14,16	34,30	34,81	34,3	489,7	15,5	AST
21EF-Z-2a	1172	14,64	14,91	15,03	34,66	34,59	34,91	515,9	22,7	SR
21EF-Z-1b	1278	14,51	14,66	14,36	34,75	34,93	35,02	506,4	25,2	AST
21EF-Z-2b	3374	15,13	15,18	15,37	33,72	33,93	34,02	516,0	65,4	MI

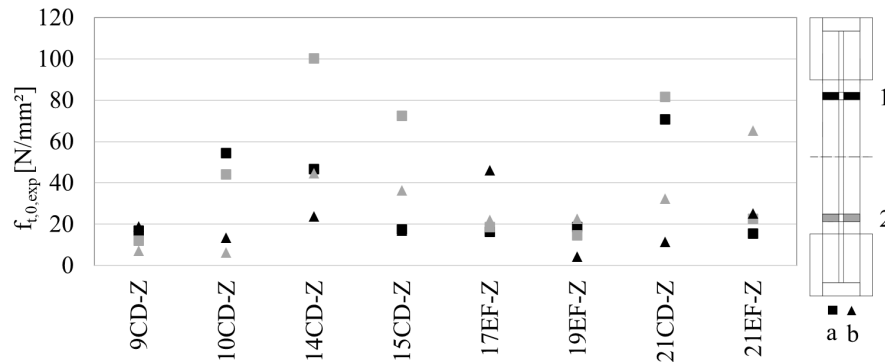


Abbildung 3.12: Zugfestigkeiten ohne Keilzinkung

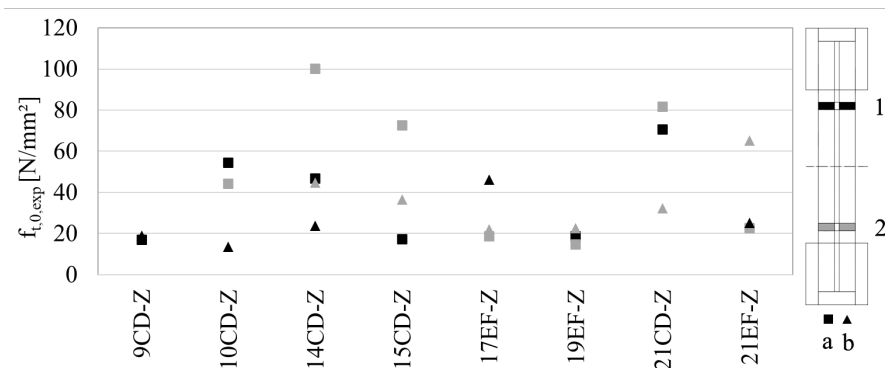


Abbildung 3.13: Zugfestigkeiten ohne Keilzinkung und ohne die Versagensarten AST und SR

In Tabelle 3.8 sind für jeden Prüfkörper die maximale Prüflast, die geometrischen Werte und die berechnete Zugfestigkeit dokumentiert. Abbildung 3.13 zeigt eine grafische Darstellung aller erreichten Festigkeiten und Abbildung 3.13 eine grafische Darstellung der erreichten Festigkeiten ohne die Versagensarten AST und SR. Anhand dieser Darstellungen lässt sich folgendes erkennen:

- Lässt man die Prüfkörper außer Acht, bei denen aufgrund von Ästen (AST) oder durch die vergleichsweise große Faserneigung (SR) sehr geringe Festigkeiten auftraten, dann betragen die Festigkeiten der Prüfkörper ohne Keilzinkung ca. das 3,6-fache der Prüfkörper mit Keilzinkung, wobei sich auf die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung ohne die Versagensformen AST und SMA von 11,0 N/mm² bezogen wird.
- Der Mittelwert der Festigkeiten der Prüfkörper ohne die Versagensarten AST und SR beträgt 40,1 N/mm², das ist das 3-fache des charakteristischen Wertes der Zugfestigkeit für C24.
- Auch bei den Versagensarten ZUG und MI zeigt sich eine vergleichsweise hohe Streuung. Bei einem Prüfkörper – also bei 4,5 % der Gesamtheit ZUG und MI liegt die Festigkeit unter dem charakteristischen Wert.

Tabelle 3.9 und Abbildung 3.14 geben einen Überblick über die unterschiedlichen Versagensarten und die zugehörigen Zugfestigkeiten. Die Bruchbilder aller Prüfkörper sind im Anhang A.2 dokumentiert.

Tabelle 3.9: Verteilung der Versagensfälle ohne Keilzinkenverbindung

		MI	SR	ZUG	AST
nPrüfkörper	[-]	13	3	9	7
Anteil	[%]	40,6	9,4	28,1	21,9
$f_{t,0,m,Versagen}$	[N/mm ²]	25,7	17,3	61,0	12,3

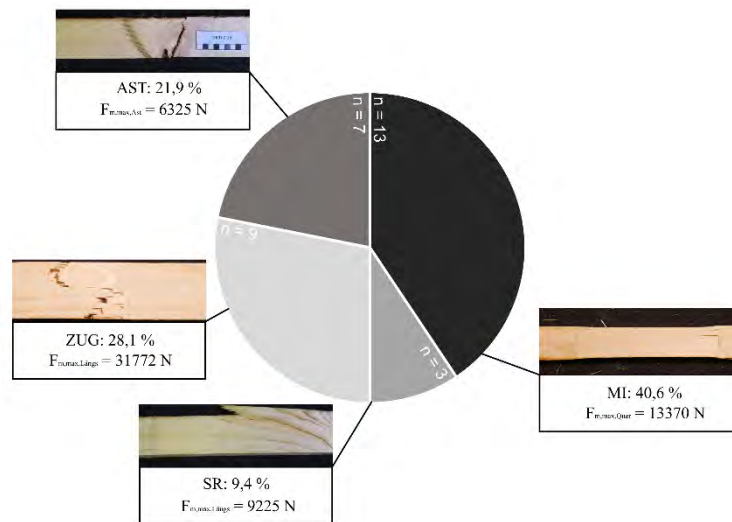


Abbildung 3.14: Verteilung der Versagensformen ohne Keilzinkung

3.4 Nebenversuche

Aus den drei Binderhälften 16E–H, 20A–D und 20E–H wurden insgesamt 14 Prüfkörper entnommen zur Bestimmung der Rohdichte und des Feuchtegehalts des Holzes. Die Abmessungen der Prüfkörper betrugen etwa $l = 13$ cm, $b = 10$ cm und $h = 3$ cm.

Die Rohdichteversuche werden nach DIN EN 13183-1 [DIN EN 13183-1] durchgeführt. Die Prüfung erfolgt in einem Trocknungsschrank bei 103°C. Die Messung ist nach Erreichen einer Massenkonzanz von $\leq 0,1$ % Abweichung zur vorherigen Messung und einem Messintervall von mindestens 24 h abgeschlossen.

Die für die Volumenbestimmung erforderlichen genauen Abmessungen wurden jeweils an drei Stellen der Prüfkörper mittels Schieblehre aufgenommen. Die Massebestimmung erfolgte mit einer Feinwaage.

Die Rohdichte ρ wird aus der Darrtrockenmasse m_o und dem Volumen V der Prüfkörper bestimmt:

$$\rho = \frac{m_o}{V}$$

Der Feuchtegehalt u wird aus der Darrtrockenmasse m_o und der Anfangsmasse m_u ermittelt:

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

Tabelle 3.10: Ergebnisse Bestimmung Rohdichte und Feuchtegehalt

Prüfkörper	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Höhe h [mm]	Masse m [g]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Feuchtegehalt u [%]
R01	133,57	104,14	29,86	178,87	430,6	8,5
R02	133,52	108,31	30,24	194,74	445,3	8,8
R03	133,23	105,73	28,03	182,71	462,7	8,5
R04	132,61	106,61	28,81	183,67	450,9	8,8
R05	132,23	106,93	28,85	184,10	451,3	8,8
R06	133,12	96,90	30,17	162,12	416,6	8,9
R07	134,73	109,89	30,52	188,87	418,0	8,5
R08	133,50	111,59	28,31	182,77	433,4	8,8
R09	133,20	106,64	29,50	180,20	430,0	8,6
R10	132,61	105,58	29,53	184,34	445,9	8,3
R11	132,87	107,89	30,12	183,12	424,1	8,6
R12	132,61	101,58	30,29	175,45	430,0	8,4
R13	134,90	118,71	29,59	215,37	454,5	8,8
R14	131,97	108,28	30,04	192,26	447,9	8,7
Mittelwert					438,7	8,7

Der charakteristische Wert der Rohdichte lässt sich nach DIN EN 14358 [DIN EN 14358] für die 14 Einzelwerte bestimmen zu 395,1 kg/m³.

4 Bauteilversuche

4.1 Versuchsaufbau und Versuchsablauf

Mit den Versuchen am Gesamtquerschnitt soll die Biegetragfähigkeit einer einzelnen Keilzinkung im Gesamtquerschnitt untersucht werden. Dazu wurden drei Vier-Punkt-Biegeversuche (4PB) sowie zwei Drei-Punkt-Biegeversuche (3PB) konzipiert (vgl. Abbildung 4.1, Abbildung 4.2, Abbildung 4.5, Abbildung 4.6). Für die Versuche wurde der Prüfraumen des zentralen Versuchslabors der Universität Kassel genutzt, welcher mit einem Hydropulszylinder mit Maximalkraft von +/- 2500 kN der Firma Schenk ausgestattet ist.

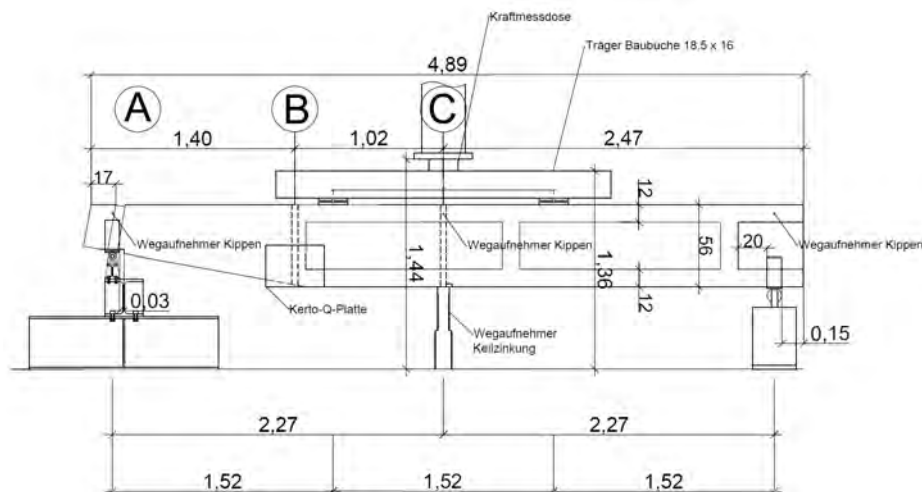


Abbildung 4.1: Zeichnung Versuchsaufbau Vier-Punkt-Biegeversuch



Abbildung 4.2: Versuchsaufbau Vier-Punkt-Biegeversuch

Der Versuchsaufbau 4PB wurde so ausgelegt, dass die Keilzinkung der Achse C bzw. Achse F in der Feldmitte des Prüfkörpers liegt. Daraus ergibt sich eine Spannweite von 4,54 m. Die Keilzinkung der Achse B bzw. Achse G wird durch eine 27 mm Kerto-Q-Platte verstärkt, um ein Versagen dieser Keilzinkung auszuschließen. Die Prüfkraft wird in den Drittelpunkten eingeleitet. Es wird jeweils ein Wegaufnehmer der Prüfkörperseite a und Prüfkörperseite b in Feldmitte angeordnet, um die Durchbiegung an der Stelle der Keilzinkung aufzuzeichnen. Weiterhin wird in der Achse C bzw. Achse F ein Wegeaufnehmer mittig an der Gurtlamelle angebracht, um Kippverformungen in der Feldmitte aufzunehmen. An den Auflagern in den Achsen A bzw. Achsen H und den Achsen CD bzw. Achsen EF werden ebenfalls Kippverformungen aufgezeichnet. Die Prüfkraft wird mit einer 300 kN Kraftmessdose unterhalb des Prüfzylinders aufgezeichnet.

Die Biegeversuche des Gesamtquerschnittes werden in Anlehnung an DIN EN 26891 durchgeführt (vgl. Abbildung 4.3). Dabei wird eine Vorbelastung von 40 % der erwarteten Maximallast aufgebracht und 30 s gehalten, um Schlupf im Versuchsausbau auszugleichen. Anschließend wird entlastet bis auf ein Niveau von 10% der erwarteten Maximallast, welches ebenfalls für 30 gehalten wird. Nach der Vorbelastung wird der Prüfkörper bis zum Versagen belastet. Die Versuchsgeschwindigkeit ist in beiden Belastungsphasen sowie der Entlastungsphase gleich zu wählen.

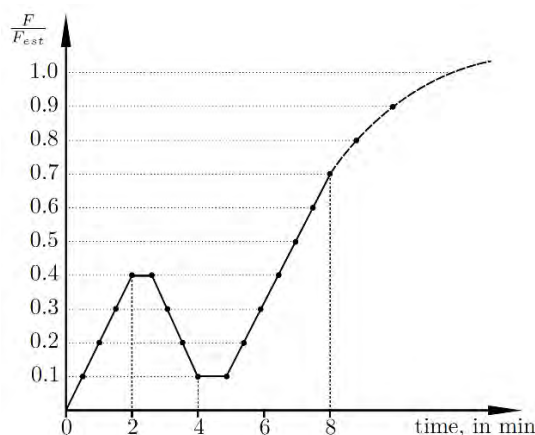


Abbildung 4.3: Lastprotokoll in Anlehnung an DIN EN 26891[DIN EN 26891]

Für die Prognose des der Maximallast wird die Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung über die Korrelation zwischen der Zugfestigkeit und der Biegefestigkeit nach JCSS [5] abgeschätzt. Für diese beiden Größen besteht der folgende Zusammenhang:

$$R_{t,0} = 0,6 R_m$$

Aus der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung ohne die Versagensformen AST und SMA ergibt nach Kapitel 3.2 sich für die Biegefestigkeit:

$$R_m = \frac{11,0 \frac{N}{mm^2}}{0,6} = 18,3 \frac{N}{mm^2}$$

Mithilfe der Biegefestigkeit und den Querschnittswerten des Gesamtquerschnittes ohne Berücksichtigung der vertikalen Zwischenschicht wird die Prüfgeschwindigkeit abgeschätzt. Die Querschnittswerte können Tabelle 4.2 entnommen werden. Die Prüfgeschwindigkeit im Vorfeld mit 5 mm/min abgeschätzt und nach dem ersten Versuch angepasst zu 12,6 mm/min.

Es werden Versuche an fünf verschiedenen Trägerstücken durchgeführt. An den Trägerstücken 25EF-H, 17A-CD und 27A-CD wird ein Vier-Punkt-Biegeversuch durchgeführt. Die Prüfkörper werden nach der Keilzinkung in Feldmitte benannt und erhalten das Kürzel B für Biegeversuch (vgl. Abbildung 4.4).

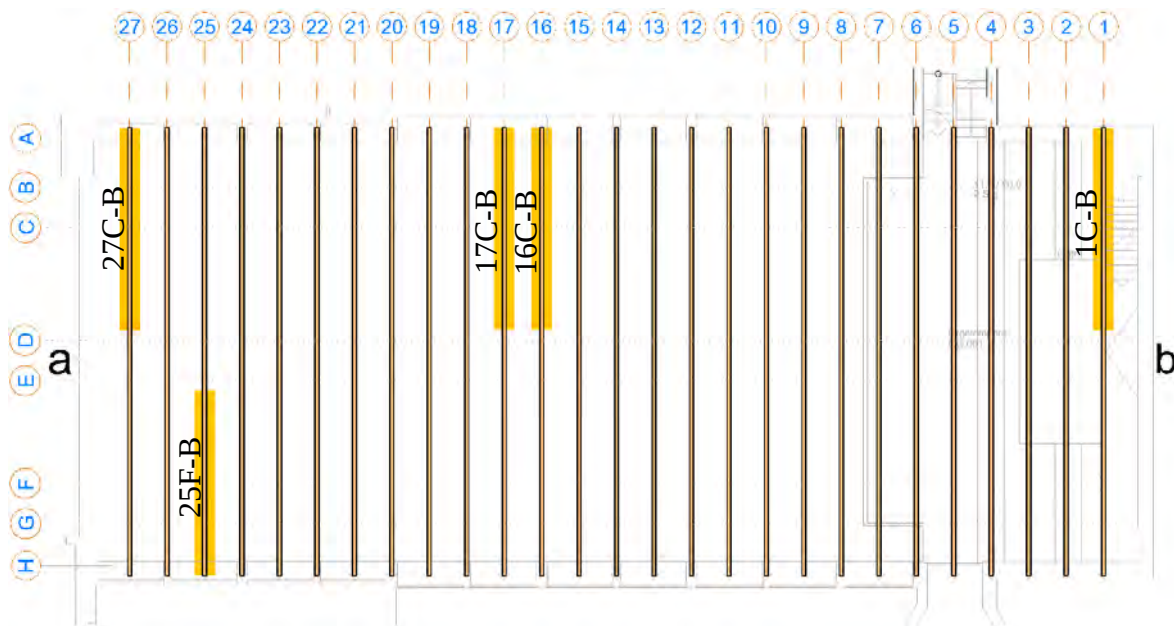
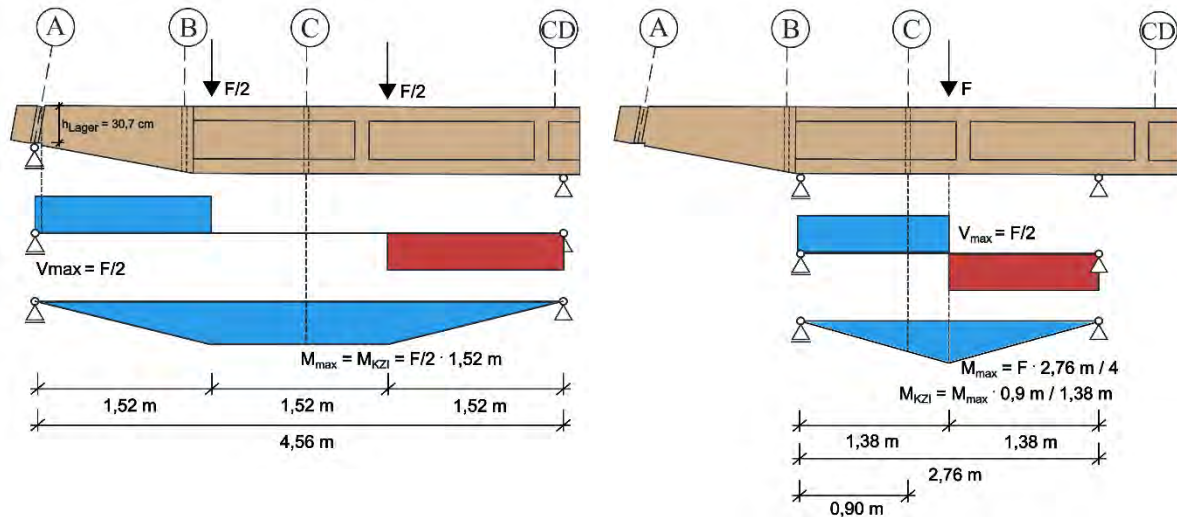


Abbildung 4.4: Übersichtsplan Träger Bauteilprüfung und Prüfkörperbezeichnung

Da bei zwei der drei im Vier-Punkt-Biegeversuche getesteten Träger ein vorzeitiges Schubversagen im Auflagerbereich eintrat, wurde der Versuchsaufbau geändert. Die restlichen zwei Bauteile 25A-CD und 27A-CD wurden im Drei-Punkt-Biegeversuch (3PB) geprüft (vgl. Abbildung 4.5, Abbildung 4.6). Der Versuchsaufbau 3PB wird so ausgelegt, dass die Verjüngung des Auflagerquerschnittes sich nicht mehr im Prüfraum befindet und nur die zu prüfende Keilzinkenverbindung im Drittelspunkt des Feldes liegt. Die Prüfkörper werden nach diesen Keilzinkungen benannt und erhalten das Kürzel B für Biegeversuch.

am Auflager im Bereich des verjüngten Auflagerquerschnitts. Die Versagensformen und die zugehörigen Kräfte sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Weiterhin wird die Querkraft sowie das resultierende Moment in der Keilzinkung und in Feldmitte mit der zugehörigen Bauteilverformung aufgelistet. In Abbildung 4.7 werden die Zusammenhänge zur Ermittlung der Querkraft und der Biegemomente aufgezeigt.



a)

b)

Abbildung 4.7: Schnittgrößenermittlung a) Vier-Punkt-Biegeversuch, b) Drei-Punkt-Biegeversuch

Tabelle 4.1: Versuchsergebnisse Bauteilversuche

Prüfkörper	$F_{\max}$ [kN]	$u_{\max}(F_{\max})$ [mm]	$u_{KZI}(F_{\max})$ [mm]	$V_{\max}$ [kN]	$M_{\max}$ [kNm]	M_{KZI} [kNm]	Versagen	Versuch
17C-B	118,2	17,9	17,9	59,1	89,8	89,8	Schub	4PB
25F-B	82,5	23,2	23,2	41,3	62,7	62,7	Biegung	4PB
27C-B	135,8	20,0	20,0	67,9	103,2	103,2	Schub	4PB
1C-B	155,6	16,9	13,6	77,8	107,4	70,0	Biegung	3PB
16C-B	168,9	10,6	9,8	84,5	116,6	76,0	Biegung	3PB

Aus den Versuchsdaten (vgl. Tabelle 4.1) und den in Tabelle 4.2 zusammengestellten Querschnitten lassen sich die Schubspannungen und Biegespannungen ermitteln. Die Gesamtheit der Versuchsdaten können dem Anhang A.3 entnommen werden. Für die beiden Versagensfälle lassen sich aus den Spannungen Rückschlüsse auf die Schubfestigkeit $f_{v,exp,BT}$ und die Biegefestigkeit $f_{m,exp,BT}$ des Querschnittes ziehen.

Die Schubfestigkeit wird aus der Querkraft, der Querschnittsfläche und dem Beiwert k_{cr} , um die Abminderung der Querschnittsfläche aus Rissbildung im Holz zu berücksichtigen, ermittelt:

$$f_{v,exp,BT} = \frac{1,5 \cdot V_{\max}}{k_{cr} \cdot A}$$

Die Biegespannung kann aus dem in der Keilzinkung wirkenden Moment und dem Widerstandsmoment des Querschnittes ermittelt werden:

$$f_{m,exp,BT} = \frac{M_{KZI}}{W}$$

Die Ergebnisse der Auswertung werden in Abbildung 4.10 bis Abbildung 4.13 grafisch und in Tabelle 4.3 tabellarisch zusammengefasst. Dabei werden verschiedene Annahmen hinsichtlich der wirksamen Querschnittsfläche überprüft (vgl. Abbildung 4.8, Abbildung 4.9). Die Annahmen werden in Tabelle 4.2 aufgelistet. Die vertikale Steglamelle wird bei jeder Betrachtung als nicht tragend angenommen. Beispielhaft wird die Bestimmung von $W_{ges.}$ aufgezeigt.

$$I_y = \frac{((13,4 \text{ cm}) \cdot (56,0 \text{ cm})^3 - 5,4 \text{ cm} \cdot (32,0 \text{ cm})^3)}{12} = 181358,9 \text{ cm}^4$$

$$W_{y,ges} = \frac{2 \cdot 181358,9 \text{ cm}^4}{56 \text{ cm}} - \frac{1 \text{ cm} \cdot (50,6 \text{ cm})^2}{6} = 6050,4 \text{ cm}^3$$

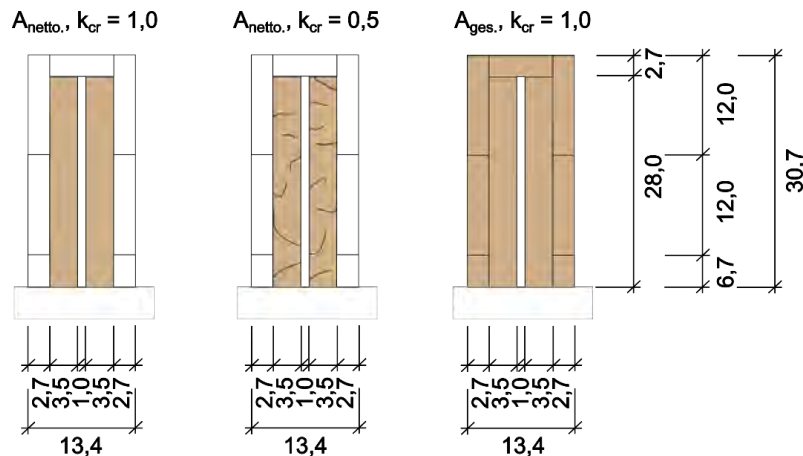


Abbildung 4.8: Querschnittsabmessungen für die Querschnittsermittlung Auflagerbereich

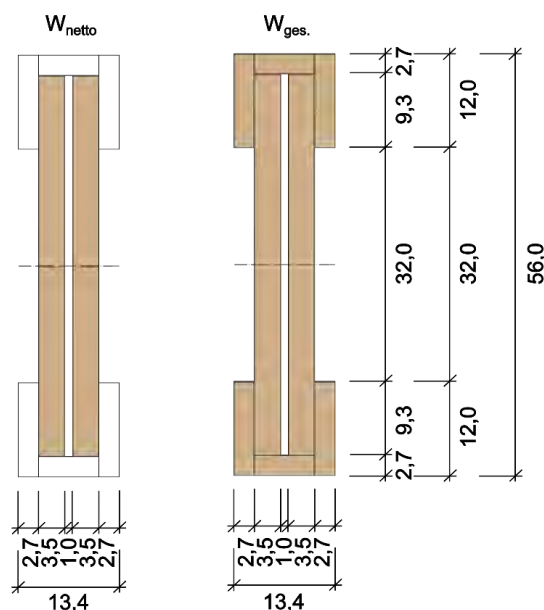


Abbildung 4.9: Querschnittsabmessungen für die Querschnittsermittlung Feldbereich

Tabelle 4.2: Annahmen der wirksamen Querschnittsfläche für die Spannungsermittlung

Wirksamer Querschnitt	Wert	Festigkeit	Beschreibung	Versuch
$A_{\text{netto}}, k_{\text{cr}} = 1,0$ (Auflager)	196,0 cm ²	$f_{\text{v},A_{\text{netto}},k_{\text{cr}}=1,0}$ (Schubfestigkeit am Auflager)	Nur die Stegfläche mit Faserrichtung in Träger Längsachse ist wirksam	4PB
$A_{\text{netto}}, k_{\text{cr}} = 0,5$ (C24) (Auflager)	98,0 cm ²	$f_{\text{v},A_{\text{netto}},k_{\text{cr}}=0,5}$ (Schubfestigkeit am Auflager)	Nur die Stegfläche mit Faserrichtung in Träger Längsachse ist wirksam mit der Annahme eines gerissenen Querschnittes: $k_{\text{cr}} = 0,5$	4PB
$A_{\text{ges}}, k_{\text{cr}} = 1,0$ (Auflager)	383,4 cm ²	$f_{\text{v},A_{\text{ges}},k_{\text{cr}}=1,0}$ (Schubfestigkeit am Auflager)	Wirksame Stegfläche inkl. außen aufgeklebten Brettlage	4PB
$A_{\text{netto}}, k_{\text{cr}} = 1,0$ (Feldmitte)	354,2 cm ²	$f_{\text{v},A_{\text{netto}},k_{\text{cr}}=1,0}$ (Schubfestigkeit in Keilzinkung)	Nur die Stegfläche mit Faserrichtung in Träger Längsachse ist wirksam	3PB
$A_{\text{netto}}, k_{\text{cr}} = 0,5$ (C24) (Feldmitte)	177,1 cm ²	$f_{\text{v},A_{\text{netto}},k_{\text{cr}}=0,5}$ (Schubfestigkeit in Keilzinkung)	Nur die Stegfläche mit Faserrichtung in Träger Längsachse ist wirksam mit der Annahme eines gerissenen Querschnittes: $k_{\text{cr}} = 0,5$	3PB
$A_{\text{ges}}, k_{\text{cr}} = 1,0$ (Feldmitte)	527,0 cm ²	$f_{\text{v},A_{\text{ges}},k_{\text{cr}}=1,0}$ (Schubfestigkeit in Feldmitte)	Wirksame Stegfläche inkl. außen aufgeklebten Gurthölzer	3PB
W_{netto} (Feldmitte, KZI)	2987,1 cm ³	$f_{\text{m},W_{\text{netto}}}$ (Biegefestigkeit in Keilzinkung)	Nur die Stegfläche mit Faserrichtung in Träger Längsachse ist wirksam	3PB, 4PB
W_{ges} (Feldmitte, KZI)	6050,4 cm ³	$f_{\text{m},W_{\text{ges}}}$ (Biegefestigkeit in Keilzinkung)	Wirksame Stegfläche inkl. außen aufgeklebten Gurthölzer	3PB, 4PB

Tabelle 4.3: Festigkeiten Bauteilversuche

Prüfkörper	V_{max} [kN]	M_{KZI} [kNm]	$f_{\text{v},A_{\text{netto}},k_{\text{cr}}=1,0}$ [N/mm ²]	$f_{\text{v},A_{\text{netto}},k_{\text{cr}}=0,5}$ [N/mm ²]	$f_{\text{v},A_{\text{ges}},k_{\text{cr}}=1,0}$ [N/mm ²]	$f_{\text{m},W_{\text{netto}}}$ [N/mm ²]	$f_{\text{m},W_{\text{ges}}}$ [N/mm ²]
17C-B	59,1	89,8	4,5	9,0	2,3	30,1	14,8
25F-B	41,3	62,7	3,2	6,3	1,6	21,0	10,4
27C-B	67,9	103,2	5,2	10,4	2,7	34,6	17,1
1C-B	77,8	70,0	3,3	6,6	2,2	23,4	11,6
16C-B	84,5	76,0	3,6	7,2	2,4	25,4	12,6

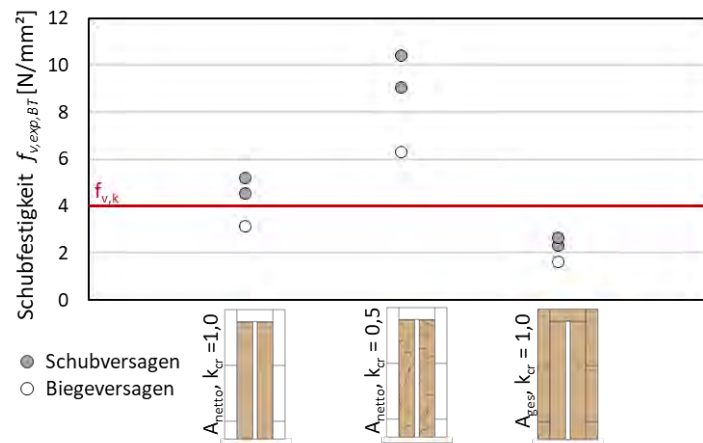


Abbildung 4.10: Schubfestigkeit $f_{v,exp,BT}$ 4PB

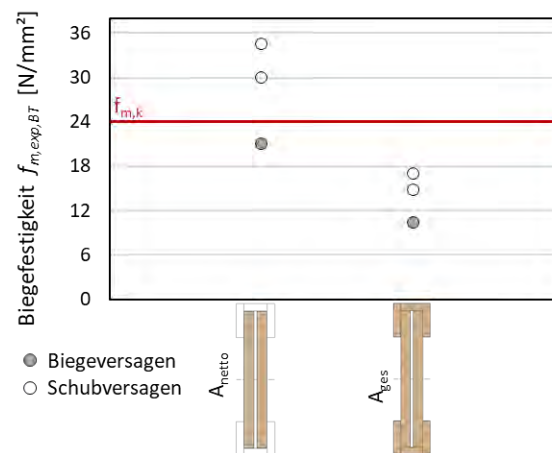


Abbildung 4.11: Biegefestigkeit $f_{m,exp,BT}$ 4PB

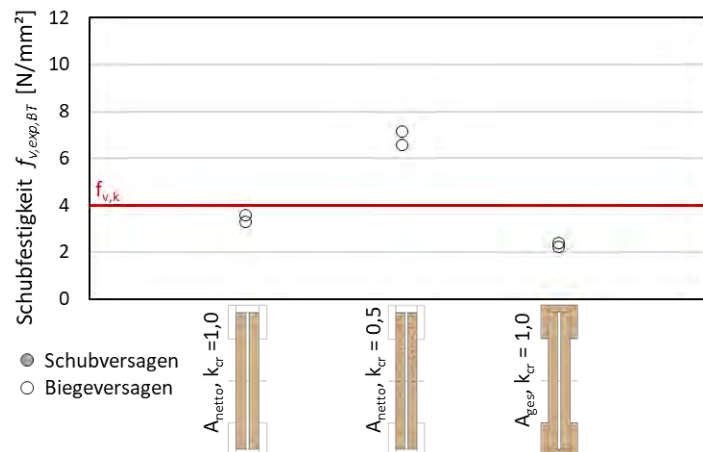


Abbildung 4.12: Schubfestigkeit $f_{v,exp,BT}$ 3PB

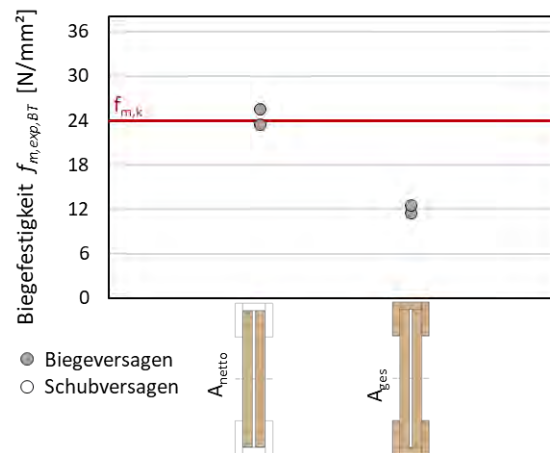


Abbildung 4.13: Biegefestigkeit $f_{m,exp,BT}$ 3PB

Aus den ermittelten Spannungen können verschiedene Schlüsse zur Tragfähigkeit des Gesamtquerschnittes gezogen werden. Die ermittelten Spannungen werden direkt mit den charakteristischen zulässigen Spannungen für C24 nach DIN 1995-1-1 [DIN 1995-1-1] verglichen.

- Die Biegetragfähigkeit im Fall eines Biegeversagens im 4PB und 3PB liegt sowohl für die Spannungsermittlung mit W_{netto} , als auch W_{ges} unter der charakteristischen Biegetragfähigkeit von C24.
- Die Schubfestigkeit, berechnet mit A_{netto} unter Annahme von $k_{cr} = 1,0$, liegt geringfügig über der charakteristischen Schubtragfähigkeit von C24, was auf eine unzureichende Verklebung zwischen dem Steg und den außen aufgeklebten Brettlagen hindeutet.
- Die Annahme der Unwirksamkeit der Verklebung der senkrecht angeordneten Zwischenschicht und den Steghölzern kann durch Beobachtungen im Versuch bestätigt werden.

5 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse zusammengefasst und miteinander verglichen. Die Resultate der Zugversuche der Prüfkörper mit und ohne Keilzinkenverbindung werden sowohl in ihrer Gesamtheit als auch unter Ausschluss bestimmter Versagensformen dargestellt (vgl. Abbildung 5.1). Bei den Prüfkörpern mit Keilzinkenverbindung werden die Versagensformen Ast und Schmalseitenversagen ausgeschlossen, da sie nicht die tatsächliche Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindung widerspiegeln. Bei den Prüfkörpern ohne Keilzinkenverbindung werden die Versagensformen Ast und Schrägbruch (entlang einer Jahrringgrenze) als Materialschwäche eingestuft und daher ebenfalls ausgeschlossen. Auf Grundlage dieser Darstellungen lassen sich folgenden Erkenntnisse zusammenfassen:

- Prüfkörper ohne Keilzinkenverbindung zeigen deutlich höhere Mittelwerte und eine größere Streuung der Zugfestigkeiten.
- Die Filterung der Ausreißer für Prüfkörper mit Keilzinkung (AST, SMA) beeinflusst den Medianwert nur geringfügig und führt zu einer leichten Reduktion der Streuung im unteren Quantilsbereich der Messergebnisse.
- Die Filterung der Ausreißer bei Prüfkörpern ohne Keilzinkung (AST, SR) bewirkt eine Erhöhung des Medianwerts und eine deutlich geringere Streuung der Ergebnisse.

- Die Keilzinkenverbindung weisen signifikant geringere Zugfestigkeiten auf. Die Zugfestigkeit der Prüfkörper mit Keilzinkenverbindung beträgt 27,1 % der Zugfestigkeit der Prüfkörper ohne Keilzinkenverbindung.
- Bei zahlreichen Prüfkörpern war deutlich erkennbar, dass die Flanken der Keilzinken nicht mit gleichmäßiger Dicke an der jeweiligen Gegenseite anlagen.

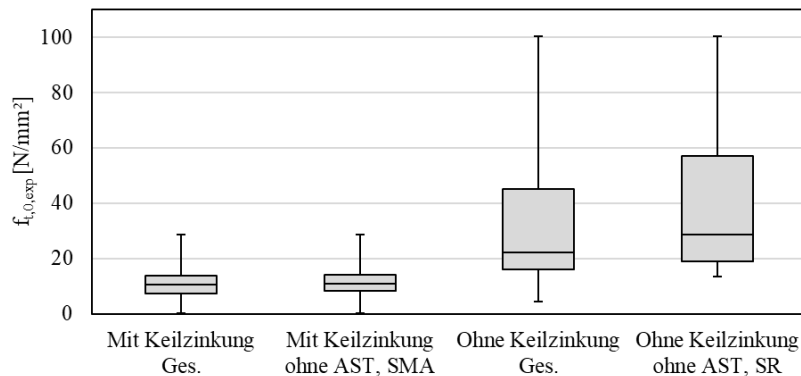


Abbildung 5.1: Zugfestigkeit Gesamtübersicht

Die Versuchsergebnisse des Gesamtquerschnittes werden im Folgenden aus den beiden Versuchstypen Vier-Punkt- und Drei-Punkt-Biegeversuch zusammengefasst dargestellt (vgl. Abbildung 5.2), um Aussagen über die Biegetragfähigkeit des Gesamtquerschnitts treffen zu können. Dabei lassen sich die folgenden wesentlichen Punkte zusammenfassen:

- Die Versuchsergebnisse des Gesamtquerschnitts zeigen eine signifikant reduzierte Biegetragfähigkeit.
- Der Mittelwert der Biegefestigkeit aus allen fünf Versuchen beträgt:
 - $f_{m,exp,W_{netto}} = 26,9 \text{ N/mm}^2$,
 - $f_{m,exp,W_{ges}} = 13,3 \text{ N/mm}^2$.
- Bei den Versuchen mit Biegeversagen ($n = 3$) ergibt sich ein Mittelwert von:
 - $f_{m,exp,W_{netto}} = 23,3 \text{ N/mm}^2$,
 - $f_{m,exp,W_{ges}} = 11,5 \text{ N/mm}^2$.
- Die Biegefestigkeit, berechnet mit W_{netto} , liegt bei drei von fünf Versuchen unterhalb des charakteristischen Festigkeitsniveaus für Holz der Qualität C24 ($f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$).
- Bei allen fünf Versuchen liegt die Biegefestigkeit, ermittelt aus W_{ges} , unter dem charakteristischen Wert für C24.

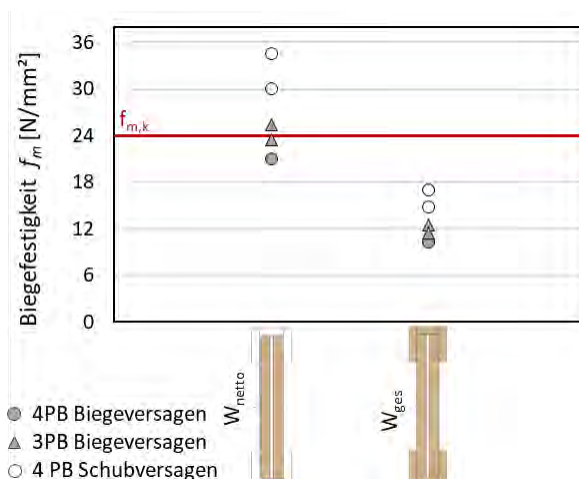


Abbildung 5.2: Biegefestigkeit Gesamtübersicht

6 Bewertung der Tragfähigkeit

6.1 Vergleich der Bestandsstatik mit heutigen Regelwerken

Im Hinblick auf die Bewertung der Tragfähigkeit von mit Harnstoffharz verklebten Keilzinkenstößen im Bestand, werden zunächst die von der Elisabethkirche vorliegende Bestandsstatik mit den heutigen Regelwerken verglichen.

Die bauzeitliche Statik und Ausführungsplanung der Elisabethkirche liegen in geprüfter Form vor. Die Statik der Stegträger wurde am 30.07.1959 vom ausführenden Unternehmen, Fa. Wolff aus Ottbergen im Kreis Höxter als 6. Nachtrag aufgestellt [6]. Die Ausführungszeichnung der Stegträger ist auf den 29.10.1959 datiert [7].

Die örtliche Bauüberwachung umfasste Bewehrungs- und Festigkeitsprüfungen sowie stichprobenartige Kontrollen der tragenden Konstruktionen.

Die Angaben zu Bindergeometrie, Schwelle, Schalung sowie Verbindungsmitteln und Auflagerausbildung wurden am Bestand überprüft.

Zwei wesentliche Abweichungen konnten festgestellt werden:

- beim Dachaufbau, der ca. 1983 aufgedoppelt wurde: Dadurch erhöht sich die Eigenlast gegenüber der bauzeitlichen Statik um ca. 16%
- bei der Verankerung der Mauerlatte auf dem Betonringbalken: Hier wurde nur jeder zweite Verankerungspunkt realisiert (ca. 2,60 m anstelle 1,295 m).

Für die Keilzinkenverbindungen liegen keine detaillierten Ausführungsunterlagen vor. Die damalige Zulassung [8] fordert lediglich eine versetzte Anordnung der Stöße. In der Zulassung sind biegesteife abgewinkelten Stöße über die gesamte Querschnittshöhe nicht geregelt. Diese Stoßart in der Nähe des Firstes stellt auch die Bruchstelle dar. In der Literatur [8] wird die Bemessung von geknickten Stegträgern beschrieben und die Herstellung von satteldachförmigen Stegträgern war nicht unüblich, auch wenn diese nicht explizit in der Zulassung geregelt waren.

Die sechsseitige Statik beschreibt die Binder als verleimte, vollwandige Stegträger aus Nadelholz, System Wolff Güteklasse I. Angesetzte Lastannahmen:

- Eigengewicht: $0,83 \text{ kN/m}^2$
- Dachfläche und Schnee: $0,74 \text{ kN/m}^2$
- Wind (Sog): $-0,19 \text{ kN/m}^2$ (nicht relevant für Bemessung, weil sie entlastend wirken)

Der Nachweis erfolgt für den Querschnitt aus Abbildung 6.1. Dabei wird die mittig hochkant stehende Lamelle nicht berücksichtigt. Die Blendbretter sind stumpf gestoßen und nicht keilgezinkt. Die wirksame Steghöhe beträgt daher 51 cm. Als statisches System wurde ein einfach gelagerter Träger mit einer rechnerischen Stützweite von 14,75 m und einer Dachneigung von 10° angesetzt.

Das Flächenträgheitsmoment wurde richtigerweise ohne die senkrechte Lamelle ermittelt und der Anteil des Stegs auf 80% reduziert, um die Schwächung durch die Keilzinkenverbindung zu berücksichtigen. Die berechnete Biegespannung beträgt $10,8 \text{ N/mm}^2$, die zulässige Biegespannung $13,0 \text{ N/mm}^2$. Quersugnachweise am First waren zum damaligen Zeitpunkt nicht üblich. Lastanteile parallel zur Binderachse wurden nicht berücksichtigt.

Insgesamt entsprach die Errichtung der Elisabethkirche den damaligen baurechtlichen Anforderungen.

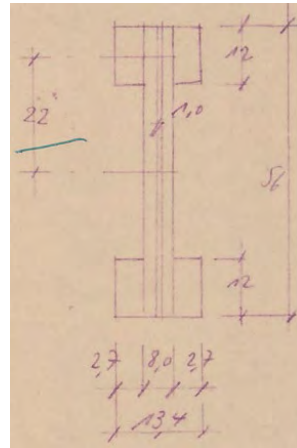


Abbildung 6.1 Querschnittsskizze aus bauzeitlicher Genehmigungsstatik

6.2 Nachweise nach heutigem Regelwerk

Grundlage für die heutigen Bemessungsregeln sind experimentelle Untersuchungen an biegesteifen abgewinkelten Stößen mit Keilzinkung seit Mitte der 1960er Jahre, also nach der Errichtung der Elisabethkirche.

Die Einwirkungen auf Tragwerke werden aktuell nach [DIN EN 1991-1] bestimmt. Für die Bemessung von Holzbauteilen ist heute die europäische Norm [DIN EN 1995-1-1] und das nationale Anwendungsdokument [DIN EN 1995-1-1/NA] gültig.

Die aktuellen Bemessungsregeln unterscheiden Stöße als Keilzinkenverbindungen für einzelne Lamellen und Universalkeilzinkenstöße für biegesteife gerade oder abgewinkelte Stöße über die gesamte Querschnittsfläche. Bei biegesteifen abgewinkelten Keilzinkenstößen, bei denen an der inneren Ecke Zugspannungen auftreten, so wie bei der Elisabethkirche (vgl. Abbildung 6.2), treten traglastmindernde Querkzugspannungen sowie Längsspannungsspitzen an der Innenecke auf. Dieser traglastmindernde Effekt wird beim Nachweis berücksichtigt, indem das Spannungsniveau auf 20% der Festigkeit begrenzt wird.

Die mittig angeordnete hochkant stehende Lamelle wirkte bei den Trägern der Elisabethkirche als Querkzugverstärkung und hat über die Standzeit hinweg die Querkzugspannungen aufnehmen können. Die Nachweise nach DIN EN 1995 sehen keine Querkzugverstärkung für biegesteife abgewinkelte Stöße vor.

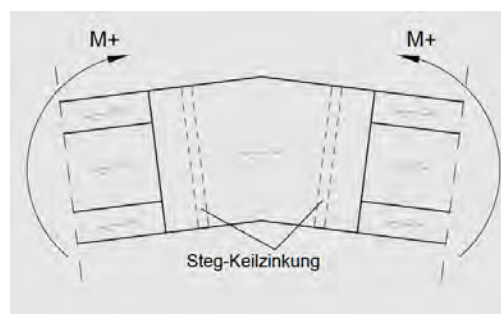


Abbildung 6.2 Biegesteif abgewinkelter Stoß im First der Elisabethkirche

Mittels einer Finite Elemente Berechnung wurden die Biegespannungen am Knickpunkt im First und an der Keilzinkenverbindung untersucht:

- Am Knickpunkt (First) zeigt der Verlauf der Biegespannungen (vgl. Abbildung 6.3 a)) eine deutliche Spannungsspitze im Zugbereich an der Innenecke. Der Nachweis der Tragfähigkeit wird hier etwa um das 1,5 fache überschritten $\sigma_{m,d} = 31,7 \text{ N/mm}^2 > 20,8 \text{ N/mm}^2 = f_{m,d}$.
- An der Keilzinkenverbindung, welche die Bruchstelle darstellt, zeigen sich keine Spannungsspitzen (vgl. Abbildung 6.3 b)). Der Nachweis der Tragfähigkeit wird hier nur etwa 5% überschritten: $\sigma_{m,d} = 17,4 \text{ N/mm}^2 > 16,6 \text{ N/mm}^2 = f_{m,lf,d}$

In beiden Fällen wird davon ausgegangen, dass die Querspannungen von der senkrecht stehenden Lamelle aufgenommen wurden und die Biegetragfähigkeit dadurch nicht abgemindert wird.

Die Ergebnisse geben einen Hinweis darauf, dass die Schwächung nicht primär durch Spannungsüberschreitung, sondern eher durch die mangelhafte Keilzinkung verursacht wurde. Insgesamt ergibt sich für einen ungeschädigten Träger nach heutiger Berechnung eine Überlastung um etwa das 1,5-fache. Die rechnerische Beanspruchung ist dabei im Firstbereich größer als an der Keilzinkenverbindung selbst.

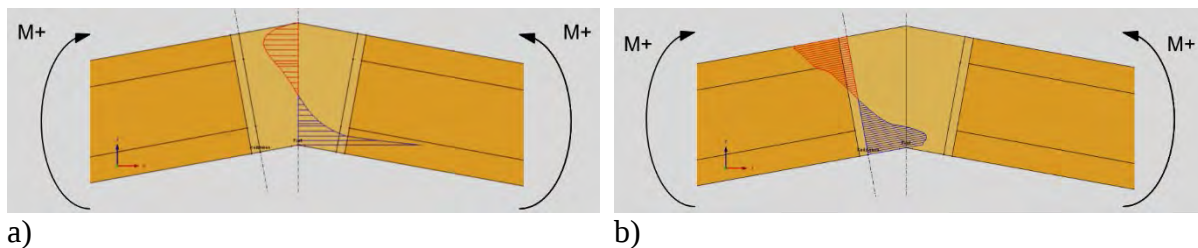


Abbildung 6.3: Biegespannungsverlauf a) im First, b) in der Keilzinkung

6.3 Experimentelle Tragfähigkeitsuntersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen lieferten 252 Ergebnisse von Keilzinkenverbindungen (vgl. Kapitel 3). Unter Ausschluss der Versagensformen AST (Astversagen) und SMA (Versagen der Schmalseitenverklebung) ergibt sich eine mittlere Zugfestigkeit von etwa $11,0 \text{ N/mm}^2$. Die mittleren Zugfestigkeiten der Versagensformen AST und SMA liegen bei nur $4,5 \text{ N/mm}^2$.

Auffällig sind die geringen Festigkeiten bei den Prüfkörpern, die dem unteren Bereich der Keilzinkenstöße im Firstbereich (Achse D und E) entnommen wurden.

Um die Versuchsergebnisse der Keilzinkenverbindungen einordnen zu können, wurden zusätzlich Zugversuche an Prüfkörpern ohne Keilzinkung durchgeführt. Die mittlere Zugfestigkeit ohne die Versagensformen AST (Astversagen) und SR (Schrägbruch aufgrund von Jahrringen) beträgt $40,1 \text{ N/mm}^2$. Im Vergleich zu der ermittelten Festigkeit der Keilzinkenverbindungen ohne Ausreißer entspricht das dem 3,6-fachen. Zudem liegt der Wert beim 3-fachen des charakteristischen Werts der Zugfestigkeit für C24.

Die Differenz zeigt deutlich, dass die Keilzinkung eine signifikante Schwächung der Zugfestigkeit darstellt.

Die in diesem Bericht vorgelegten Untersuchungsergebnisse umfassen ausschließlich mechanische Prüfungen. Es kann also nicht ausgeschlossen werden, dass eine altersbedingte Leimversprödung eine Rolle gespielt hat. Auch eine mechanische Schädigung infolge des Einsturzes lässt sich nicht vollständig ausschließen. Allerdings zeigt schon die visuelle Bewertung der Keilzinkungen deutliche Unregelmäßigkeiten bei den Klebefugen. Das betrifft sowohl die Dicke als auch die Füllung der Fuge mit Klebstoff. Diese Unregelmäßigkeiten treten bei allen Keilzinkungen auf, auch in geraden Abschnitten des Trägers, wo das Aufbringen des erforderlichen Anpressdrucks keine außergewöhnliche Herausforderung darstellt. Unter Berücksichtigung dieser Befunde kann eine mangelnde Ausführungsqualität bei der Herstellung der Keilzinkenstöße als maßgebend für die unzureichende Festigkeit der Träger benannt werden.

Unabhängig von dem nicht erfüllten Nachweis nach geltenden Normen zeigen die Versuchsergebnisse, dass die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung deutlich unter 80% der Tragfähigkeit des Holzes liegen.

Die Bauteilversuche bestätigen die geringe Tragfähigkeit bei Annahme der Wirkung des vollen Binderquerschnittes der Keilzinkenstöße. Die Biegefestigkeit der Keilzinkung liegt bei allen Versuchen unter der charakteristischen Biegefestigkeit von C24.

7 Zusammenfassung

Die experimentellen Ergebnisse bestätigen, dass mit UF-Klebstoff verklebte Keilzinkenverbindungen im Bestand eine deutlich reduzierte Festigkeit aufweisen können. Das ermittelte Spannungsniveau aus der FE-Auswertung bestätigt die geringe Tragfähigkeit. Die auftretenden Spannungen auf Höhe der Keilzinkenverbindung liegen höher als die in den Versuchen ermittelte Festigkeit.

Der Nachweis der Tragfähigkeit solcher Verbindungen erfordert daher eine individuelle Bewertung, insbesondere bei den Universalkeilzinkungen und bei den biegesteifen abgewinkelten Stößen.

Bewertung zur zentralen Fragestellung:

Die durchgeführten Rohdichte- und Feuchteuntersuchungen zeigen, dass die Holzqualität grundsätzlich gut war. Dennoch liegt die mittlere Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen bei $f_{t,exp} = 11,0 \text{ N/mm}^2$, was deutlich geringer ist als die Festigkeit des intakten Holzes mit $f_{t,exp} = 40,1 \text{ N/mm}^2$. Auch unter Ausschluss von Astversagen und Versagen der Schmalseitenverklebung zeigen die Keilzinkenverbindungen eine signifikant geringere Tragfähigkeit im Vergleich zum Vollholz.

Auch die Bauteilversuche bestätigen den Befund, dass eine signifikant geringere Tragfähigkeit durch die Keilzinkenverbindung vorliegt. Die Untersuchungen zeigen ein Biegezugversagen sowohl in der Keilzinkenverbindung als auch in den aufgeklebten Flanschbrettern. Dadurch kann eine effektive Tragwirkung des Gesamtquerschnittes bestätigt werden. Die Biegefestigkeit konnte bei drei Prüfkörpern eindeutig durch Biegezugversagen mit $f_{m,exp,BT} = 11,5 \text{ N/mm}^2$ bestimmt werden. Somit liegt diese deutlich unterhalb der charakteristischen Biegefestigkeit von vergleichbarem Konstruktionsvollholz C24 mit $f_{m,k} = 24,0 \text{ N/mm}^2$ und in der Größenordnung der bauzeitlich zur Bemessung angesetzten zulässigen Biegespannung von $\sigma_b = 13,0 \text{ N/mm}^2$ sowie nur knapp über der bauzeitlich berechneten Biegespannung von $10,8 \text{ N/mm}^2$.

Daraus lässt sich ableiten, dass handwerklich ausgeführte Keilzinkenstöße im Bestand eine unzureichende Tragfähigkeit aufweisen können, ohne entsprechende an der Oberfläche der Träger erkennbare Auffälligkeiten.

Die Liste möglicher Ausführungsmängel umfasst:

- Passungenauigkeiten bei der Keilzinkengeometrie,
- Ungleichmäßiger oder zu geringer Leimauftrag,
- zu dicke Klebefugen,
- Fehler beim Mischen oder beim Verarbeiten des Leims,
- Unzureichender bzw. ungleichmäßiger Anpressdruck.

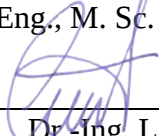
Diese traglastmindernden Effekte können in Einzelfällen durch andere Einflüsse, wie etwa Spannungen aus nicht zwängungsfreier Lagerung verstärkt werden. Die Frage, ob im vorliegenden Fall festigkeitsmindernde Veränderungen beim Klebstoff durch nicht bekannte Temperatur- und Feuchteeinwirkungen aufgetreten sind, ist nicht Gegenstand dieser Untersuchungen und soll an anderer Stelle geklärt werden.

Die Hinweise der ARGEBAU [2] und sowie die Arbeiten von Aicher [3] bewerten geklebte Verbindungen im Bestand in Abhängigkeit von klimatischen Einflussgrößen, wie Feuchte, Temperatur und Wechselklima. Der untersuchte Dacheinsturz der Elisabethkirche zeigt dass bei Stegträgern auch dann von einer deutlich verringerten Tragfähigkeit ausgegangen werden muss, wenn es keine Verfärbungen gibt, die auf Feuchteeinwirkungen infolge von Undichtigkeiten oder Kondensat hindeuten. Ursächlich hierfür sind insbesondere Mängel bei der Ausführung der Keilzinkenverbindung. Inwieweit diese Mängel zusätzlich die Festigkeitsentwicklung und das Alterungsverhalten des Klebstoffs beeinflusst haben, ist nicht Gegenstand dieser Untersuchungen.

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse, empfehlen wir, bei den Hinweisen der ARGEBAU [2] einen Punkt aufzunehmen, der das besondere Risiko bei Keilzinkenvollstößen benennt. Bei Stegträgern sollte auch die flächige Verklebung der Gurte und der Stege überprüft werden

Kassel, den 04.11.2025 (überarbeitet 30.03.2026)



M. Eng., M. Sc. Dominik Dönicke

Dr.-Ing. Lars Eisenhut

Daniel Kattenbach M. Sc.

Prof. Dr.-Ing. Werner Seim.

8 Literatur

- [1] <https://haz-ingenieure.com/wp-content/uploads/2024/07/HAZ-Gutachten.pdf>,
Stand: 21.10.2025
- [2] ARGE Bau, Fachkommission Bautechnik (2013). Hinweise zur Einschätzung von Art und Umfang zu untersuchender harnstoffharz-verklebter Holzbauteile auf mögliche Schäden aus Feuchte- oder Temperatureinwirkungen durch den Eigentümer / Verfügungsberechtigten.
- [3] [4] Aicher, S.; Langzeitbeständigkeit und Sicherheit Harnstoffharz-verklebter tragender Holzbauteile, Forschungsbericht MPA Stuttgart.
- [4] TU München MPA BAU - Prüfstelle Holzbau Prüfbericht CH 23-10, München, 37.11.2024
- [5] JCSS: Joint Committee on Structural Safety. Probabilistic Model Code. Part 3: Material Properties; August 2006.
- [7] Wolf, Josef, 6.Nachtrag Statische Berechnung Dachbinder, 5 Seiten, Ottbergen /Höxter, 1959
- [6] Fa. Wolff, Aussteifhölzer, Schwelle, Schalung usw., Geprüfter Ausführungsplan Binder, Ottbergen/Höxter, 1959
- [8] Zulassung – Wolff-Stegträger; Der Minister für Wiederaufbau des Landes Nordrhein-Westfalen, Bauaufsicht, Düsseldorf, 23.12.1958

9 Normen

- [DIN EN 408] DIN EN 408 Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften, Beuth Verlag, Berlin
- [DIN 68140] DIN 68140 1960-06 Holzverbindungen – Keilzinkenverbindungen als Längsverbindungen], Beuth Verlag, Berlin
- [DIN EN 1991-1] DIN EN 1991-1: 2020-12 EC1 – Einwirkungen auf Tragwerke, Beuth Verlag, Berlin
- [DIN EN 1995-1-1] IN EN 1995-1-1 2010-12-EC5 – Bemessung Holzbauten, Beuth Verlag, Berlin
- [DIN EN 1995-1-1/NA] DIN EN 1995-1-1/NA 2010-12-EC5 – Bemessung Nationaler Anhang, Beuth Verlag, Berlin
- [DIN EN 13183-1] DIN EN 13183-1 Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren; Deutsche Fassung EN 13183-1:2002, Beuth Verlag, Berlin
- [DIN EN 14358] Holzbauwerke - Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte; Deutsche Fassung EN 14358:2016, Ausgabe 2016-11, Beuth Verlag, Berlin
- [DIN EN 26891] Holzbauwerke; Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln; Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens (ISO 6891:1983); Deutsche Fassung EN 26891:1991, Beuth Verlag, Berlin

A Anhang

A.1 Versuchsdokumentation Rohdichtebestimmung

Tabelle A. 1 Rohdichtebestimmung

Prüfkörper	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Höhe h [mm]	Darrdichte ρ [kg/m ³]	Feuchtegehalt u [%]	04.12.2024			06.12.2024			10.12.2024			Feuchte abweichung [%]
						Gewicht [g]	Dichte [kg/m ³]	Feuchte [%]	Gewicht [g]	Dichte [kg/m ³]	Feuchte [%]	Gewicht [g]	Dichte [kg/m ³]	Feuchte [%]	
R01	133,57	104,14	29,86	430,60	8,50	194,12	467,36	179,01	430,98	8,44	178,87	430,65	8,53	-0,08	
R02	133,52	108,31	30,24	445,30	8,80	211,92	484,59	195,00	445,90	8,68	194,74	445,31	8,82	-0,13	
R03	133,23	105,73	28,03	462,70	8,50	198,31	502,25	182,80	462,97	8,48	182,71	462,74	8,54	-0,05	
R04	132,61	106,61	28,81	450,90	8,80	199,81	490,57	183,82	451,31	8,70	183,67	450,94	8,79	-0,08	
R05	132,23	106,93	28,85	451,30	8,80	200,38	491,22	184,26	451,71	8,75	184,10	451,31	8,84	-0,09	
R06	133,12	96,90	30,17	416,60	8,90	176,55	453,65	162,19	416,76	8,85	162,12	416,58	8,90	-0,04	
R07	134,73	109,89	30,52	418,00	8,50	205,00	453,68	189,08	418,45	8,42	188,87	417,98	8,54	-0,11	
R08	133,50	111,59	28,31	433,40	8,80	198,92	471,66	182,89	433,65	8,76	182,77	433,37	8,84	-0,07	
R09	133,20	106,64	29,50	430,00	8,60	195,78	467,22	180,37	430,45	8,54	180,20	430,04	8,65	-0,09	
R10	132,61	105,58	29,53	445,90	8,30	199,64	482,87	184,47	446,17	8,22	184,34	445,86	8,30	-0,07	
R11	132,87	107,89	30,12	424,10	8,60	198,81	460,44	183,15	424,17	8,55	183,12	424,10	8,57	-0,02	
R12	132,61	101,58	30,29	430,00	8,40	190,27	466,32	175,45	430,00	8,45	175,45	430,00	8,45	0,00	
R13	134,90	118,71	29,59	454,50	8,80	234,25	494,35	215,68	455,16	8,61	215,37	454,51	8,77	-0,14	
R14	131,97	108,28	30,04	447,90	8,70	208,99	486,86	192,38	448,16	8,63	192,26	447,88	8,70	-0,06	
Mittelwert				438,66	8,64		476,65		438,99	8,58		438,66		-0,07	

A.2 Versuchsdokumentation Zugversuche Keilzinkenverbindung



Abbildung A.1: 9B-Z-a vor der Prüfung



Abbildung A.2: 9B-Z-a nach der Prüfung

Tabelle A.2: 9B-Z-a
Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
8,9	MI
13,9	HO
13,0	HO
15,4	MI
11,3	MI



Abbildung A.3: 9B-Z-b vor der Prüfung

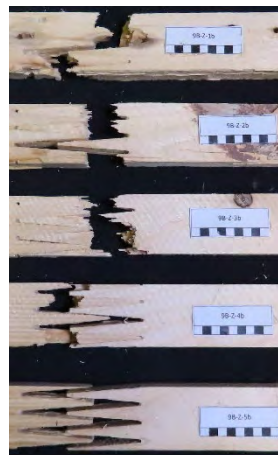


Abbildung A.4: 9B-Z-b nach der Prüfung

Tabelle A.3: 9B-Z-a
Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
8,5	MI
11,1	MI
6,0	HO
11,2	MI
10,5	KZI



Abbildung A.5: 9C-Z-a vor der Prüfung

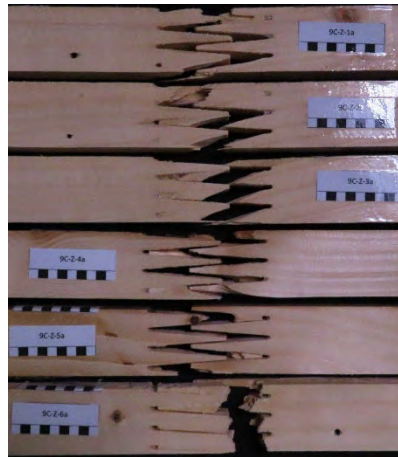


Abbildung A.6: 9C-Z-a nach der Prüfung

Tabelle A.4: 9C-Z-a
Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
11,8	MI
8,8	MI
6,6	MI
13,8	MI
11,3	MI
5,0	MI



Abbildung A.7: 9C-Z-b vor der Prüfung

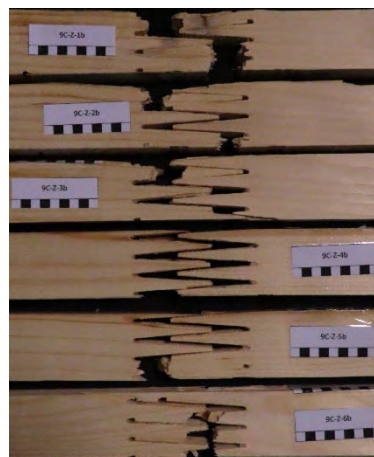


Abbildung A.8: 9C-Z-b nach der Prüfung

Tabelle A.5: 9C-Z-b
Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
7,9	MI
6,4	MI
6,9	MI
12,4	MI
10,3	MI
6,3	MI



Abbildung A.9: 9D-Z-a vor der Prüfung

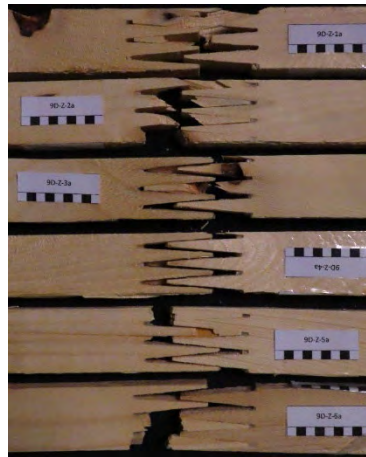


Abbildung A.10: 9D-Z-a nach der Prüfung

**Tabelle A.6: 9D-Z-a
Zugfestigkeit und
Versagensart**

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
5,3	MI
3,8	MI
9,3	KZI
4,3	MI
0,7	MI
0,8	MI



Abbildung A.11: 9D-Z-b vor der Prüfung

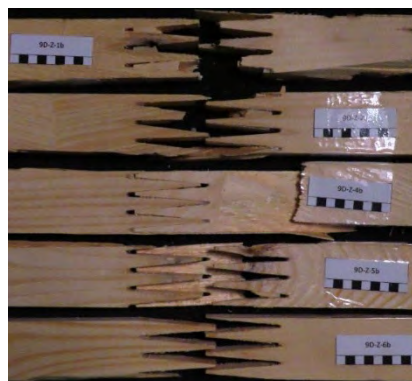


Abbildung A.12: 9D-Z-b nach der Prüfung

**Tabelle A.7: 9D-Z-b
Zugfestigkeit und
Versagensart**

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
8,4	MI
4,8	MI
2,4	SMA
0,8	SMA
1,0	KZI



Abbildung A.13:
10B-Z-a vor der
Prüfung



Abbildung A.14: 10B-Z-a nach der Prüfung

Tabelle A.8: 10B-Z-a
Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
18,5	HO
6,6	MI
18,8	MI
14,1	MI
19,2	MI



Abbildung A.15:
10B-Z-b vor der
Prüfung

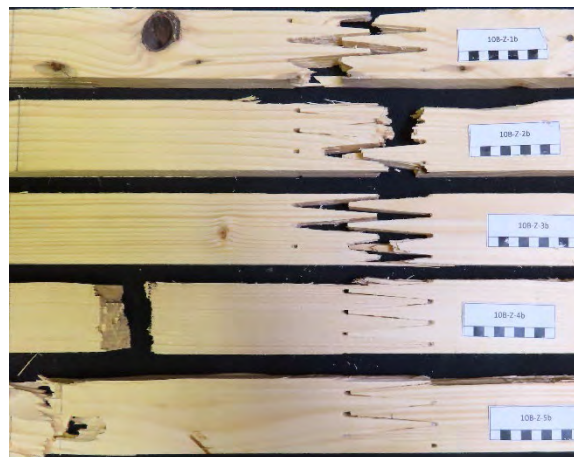


Abbildung A.16: 10B-Z-b nach der Prüfung

Tabelle A.9: 10B-Z-
b Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
17,0	MI
16,3	MI
15,7	MI
15,6	HO
17,6	HO

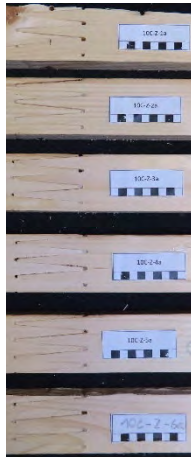


Abbildung A.17: 10C-Z-a vor der Prüfung



Abbildung A.18: 10C-Z-a nach der Prüfung

Tabelle A.10: 10C-Z-a Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
16,9	MI
17,3	AST
28,7	KZI
16,7	HO
23,8	KZI
13,6	HO



Abbildung A.19: 10C-Z-b vor der Prüfung

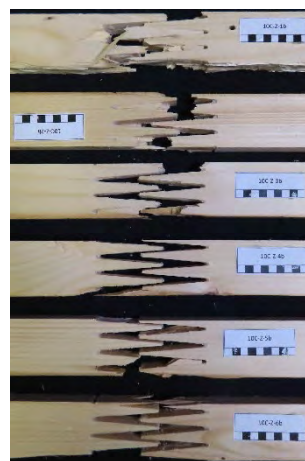


Abbildung A.20: 10C-Z-b nach der Prüfung

Tabelle A.11: 10C-Z-b Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
12,7	MI
21,2	MI
16,8	MI
18,9	MI
11,8	MI
8,5	KZI

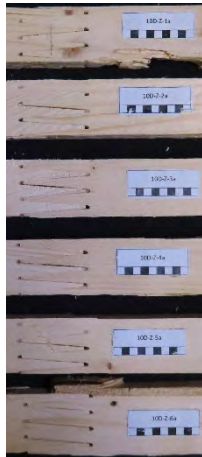


Abbildung A.21: 10D-Z-a vor der Prüfung



Abbildung A.22: 10D-Z-a nach der Prüfung

Tabelle A.12: 10D-Z-a Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
6,5	SMA
18,9	HO
5,4	SMA
17,4	HO
12,8	MI
6,5	SMA



Abbildung A.23: 10D-Z-b vor der Prüfung



Abbildung A.24: 10D-Z-b nach der Prüfung

Tabelle A.13: 10D-Z-b Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
12,2	SMA
5,4	SMA
9,6	MI
14,3	MI
10,4	MI
7,1	MI



Abbildung A.25: 14B-Z-a vor der Prüfung

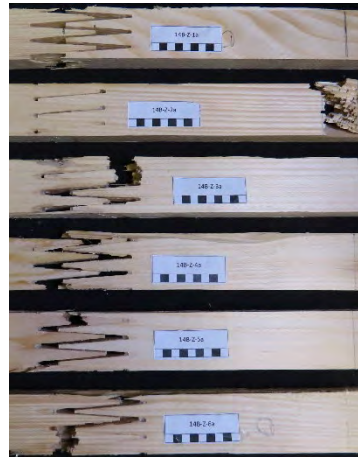


Abbildung A.26: 14B-Z-a nach der Prüfung

Tabelle A.14: 14B-Z-a Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
16,6	MI
15,6	HO
13,1	MI
17,5	MI
12,4	MI
12,0	MI

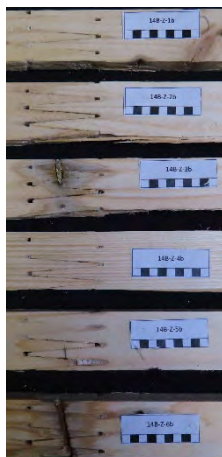


Abbildung A.27: 14B-Z-b vor der Prüfung



Abbildung A.28: 14B-Z-b nach der Prüfung

Tabelle A.15: 14B-Z-b Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
16,5	MI
7,7	MI
11,8	MI
15,0	MI
12,0	MI
7,8	MI



Abbildung A.29: 15B-Z-a vor der Prüfung



Abbildung A.30: 15B-Z-a nach der Prüfung

Tabelle A.16: 15B-Z-a Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
11,2	MI
11,4	MI
10,6	KZI
8,9	KZI
9,2	MI
16,3	HO



Abbildung A.31: 15B-Z-b vor der Prüfung

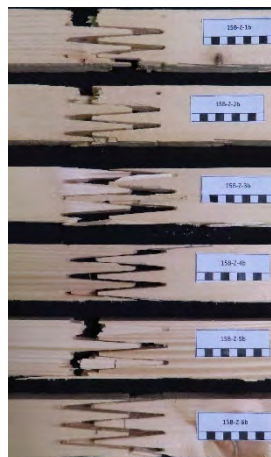


Abbildung A.32: 15B-Z-b nach der Prüfung

Tabelle A.17: 15B-Z-b Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
9,2	MI
12,3	MI
10,2	MI
13,1	MI
12,1	MI
6,3	MI



Abbildung A.33: 15C-Z-a vor der Prüfung



Abbildung A.34: 15C-Z-a nach der Prüfung

Tabelle A.18: 15C-Z-a Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
8,5	MI
6,8	MI
10,6	MI
13,8	MI
8,6	HO



Abbildung A.35: 15C-Z-b vor der Prüfung



Abbildung A.36: 15C-Z-b nach der Prüfung

Tabelle A.19: 15C-Z-b Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
7,6	MI
7,5	MI
1,0	AST
13,9	KZI
14,2	MI



Abbildung A.37: 15D-Z-a vor der Prüfung



Abbildung A.38: 15D-Z-a nach der Prüfung

Tabelle A.20: 15D-Z-a Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
9,8	MI
9,2	MI
8,4	MI
0,8	SMA



Abbildung A.39: 15D-Z-b vor der Prüfung



Abbildung A.40: 15D-Z-b nach der Prüfung

Tabelle A.21: 15D-Z-b Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
9,1	MI
9,5	MI



Abbildung A.41:
17E-Z-a vor der
Prüfung



Abbildung A.42: 17E-Z-a nach der
Prüfung

Tabelle A.22: 17E-Z-
a Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
10,5	KZI
9,8	MI
16,2	HO
13,9	MI
11,0	KZI
1,4	KZI

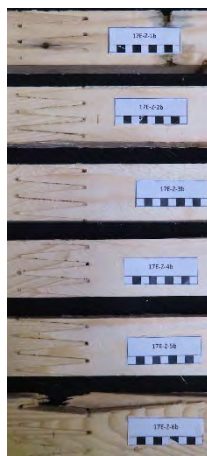


Abbildung A.43:
17E-Z-b vor der
Prüfung



Abbildung A.44: 17E-Z-b nach der
Prüfung

Tabelle A.23: 17E-Z-
b Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
11,9	MI
7,3	MI
10,9	MI
9,9	MI
1,8	AST
0,6	MI



Abbildung A.45:
17F-Z-a vor der
Prüfung



Abbildung A.46: 17F-Z-a nach der
Prüfung

Tabelle A.24: 17F-Z-a
Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
13,0	HO
14,1	HO
6,7	KZI
11,5	KZI
10,1	MI
10,1	KZI



Abbildung A.47:
17F-Z-b vor der
Prüfung



Abbildung A.48: 17F-Z-b nach der
Prüfung

Tabelle A.25: 17F-Z-b
Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
6,2	KZI
13,1	KZI
13,5	MI
12,3	MI
9,3	KZI
10,7	HO



Abbildung A.49:
17G-Z-a vor der
Prüfung



Abbildung A.50: 17G-Z-a nach der
Prüfung

Tabelle A.26: 17G-
Z-a Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
13,1	KZI
11,8	KZI
12,6	KZI
7,8	KZI
8,8	KZI



Abbildung A.51:
17G-Z-b vor der
Prüfung



Abbildung A.52: 17G-Z-b nach der
Prüfung

Tabelle A.27: 17G-
Z-b Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
14,8	MI
10,5	MI
10,0	KZI
8,9	KZI
10,4	KZI



Abbildung A.53:
19E-Z-a vor der
Prüfung



Abbildung A.54: 19E-Z-a nach der
Prüfung

Tabelle A.28: 19E-Z-
a Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
1,9	SMA
12,2	MI
6,7	HO
6,9	MI
7,5	KZI
0,3	MI

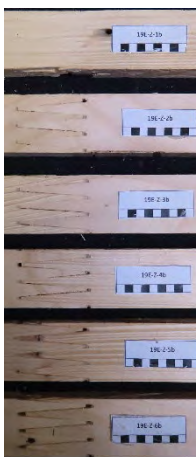


Abbildung A.55:
19E-Z-b vor der
Prüfung

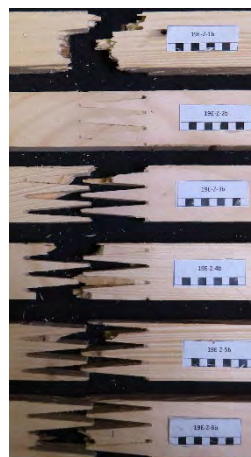


Abbildung A.56: 19E-Z-b nach der
Prüfung

Tabelle A.29: 19E-Z-
b Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
15,2	MI
5,2	HO
13,8	MI
11,5	MI
6,9	MI
1,4	MI



Abbildung A.57:
19F-Z-a vor der
Prüfung



Abbildung A.58: 19F-Z-a nach der
Prüfung

Tabelle A.30: 19F-Z-
a Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
4,6	AST
4,6	MI
14,3	HO
12,2	MI
11,2	MI



Abbildung A.59:
19F-Z-b vor der
Prüfung



Abbildung A.60: 19F-Z-b nach der
Prüfung

Tabelle A.31: 19F-Z-
b Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
12,5	MI
10,9	MI
17,2	HO
13,4	HO
15,6	MI
17,6	KZI

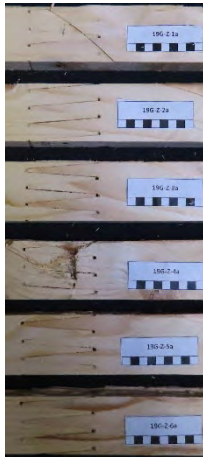


Abbildung A.61:
19G-Z-a vor der
Prüfung



Abbildung A.62: 19G-Z-a nach der
Prüfung

Tabelle A.32: 19G-
Z-a Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
11,9	MI
7,8	MI
13,4	KZI
3,0	AST
8,9	KZI
4,7	MI



Abbildung A.63:
19G-Z-b vor der
Prüfung



Abbildung A.64: 19G-Z-b nach der
Prüfung

Tabelle A.33: 19G-
Z-b Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
0,5	AST
7,1	MI
10,6	MI
11,8	MI
6,0	KZI
8,3	MI

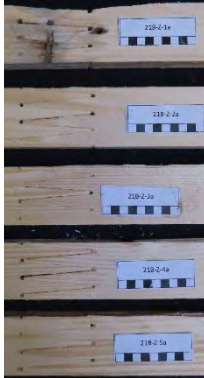


Abbildung A.65:
21B-Z-a vor der
Prüfung



Abbildung A.66: 21B-Z-a nach der
Prüfung

Tabelle A.34: 21B-Z-
a Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
6,0	MI
13,4	MI
14,5	MI
7,0	MI
16,3	MI

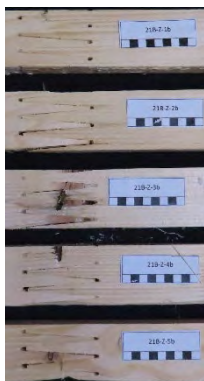


Abbildung A.67:
21B-Z-b vor der
Prüfung

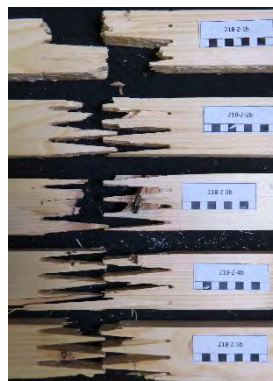


Abbildung A.68: 21B-Z-b nach der
Prüfung

Tabelle A.35: 21B-Z-
b Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
16,1	MI
10,8	MI
10,8	MI
15,5	MI
11,0	MI



Abbildung A.69:
21C-Z-a vor der
Prüfung

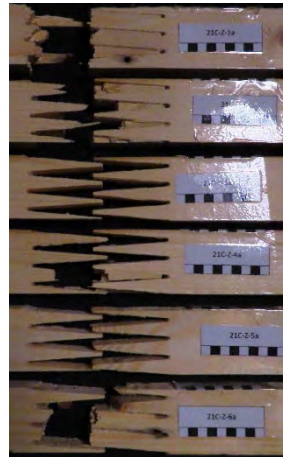


Abbildung A.70: 21C-Z-a nach der
Prüfung

Tabelle A.36: 21C-Z-a
Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
12,1	HO
9,4	MI
11,4	KZI
10,4	MI
0,6	KZI
0,3	MI



Abbildung A.71:
21C-Z-b vor der
Prüfung



Abbildung A.72: 21C-Z-b nach der
Prüfung

Tabelle A.37: 21C-Z-b
Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
6,5	MI
3,7	MI
12,4	KZI
8,8	MI
3,2	MI
1,0	KZI



Abbildung A.73:
21E-Z-a vor der
Prüfung



Abbildung A.74: 21E-Z-a nach der Prüfung

Tabelle A.38: 21E-Z-a Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
-	-
4,9	SMA
5,9	AST
15,8	MI
0,4	HO
0,2	HO



Abbildung A.75:
21E-Z-b vor der
Prüfung



Abbildung A.76: 21E-Z-b nach der Prüfung

Tabelle A.39: 21E-Z-b Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
0,2	MI
14,7	MI
8,9	MI
7,2	HO
14,7	MI
5,6	HO



Abbildung A.77:
21F-Z-a vor der
Prüfung



Abbildung A.78: 21F-Z-a nach der Prüfung

Tabelle A.40: 21F-Z-a
Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
3,6	HO
11,3	HO
11,8	MI
8,5	MI
16,2	HO



Abbildung A.79:
21F-Z-b vor der
Prüfung



Abbildung A.80: 21F-Z-b nach der Prüfung

Tabelle A.41: 21F-Z-b
Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
12,6	MI
15,1	KZI
15,1	MI
19,0	MI
12,6	MI



Abbildung A.81:
21G-Z-a vor der
Prüfung



Abbildung A.82: 21G-Z-a nach der Prüfung

Tabelle A.42: 21G-Z-a Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
14,4	MI
17,0	MI
16,9	HO
15,8	KZI
3,9	AST



Abbildung A.83:
21G-Z-b vor der
Prüfung



Abbildung A.84: 21G-Z-b nach der Prüfung

Tabelle A.43: 21G-Z-b Zugfestigkeit und Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
9,0	HO
17,4	MI
16,1	HO
11,0	HO
15,2	HO

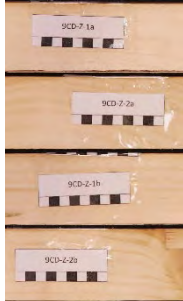


Abbildung A.85:
9CD-Z vor der
Prüfung



Abbildung A.86: 9CD-Z nach der Prüfung

Tabelle A.44: 9CD-Z
Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
17,0	ZUG
12,2	SR
18,9	ZUG
7,1	AST



Abbildung A.87:
10CD-Z vor der
Prüfung



Abbildung A.88: 10CD-Z nach der Prüfung

Tabelle A.45: 10CD-Z
Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
54,5	MI
44,1	MI
13,5	MI
6,4	AST

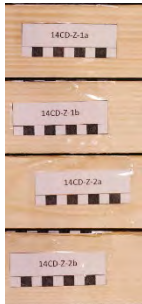


Abbildung A.89:
14CD-Z vor der
Prüfung



Abbildung A.90: 14CD-Z nach der Prüfung

Tabelle A.46: 14CD-
Z Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
46,7	ZUG
100,2	MI
23,9	ZUG
44,8	ZUG

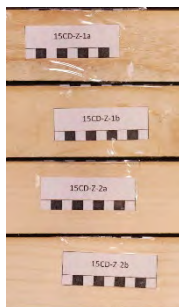


Abbildung A.91:
15CD-Z vor der
Prüfung



Abbildung A.92: 15CD-Z nach der Prüfung

Tabelle A.47: 15CD-
Z Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
17,4	ZUG
72,5	MI
17,0	SR
36,5	ZUG



Abbildung A.93:
17EF-Z vor der
Prüfung

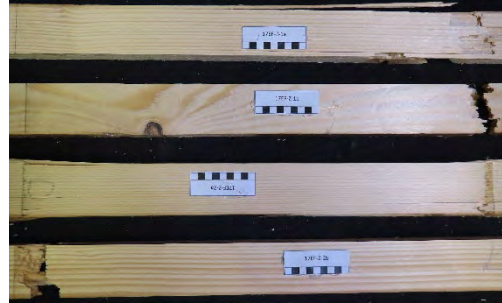


Abbildung A.94: 17EF-Z nach der Prüfung

Tabelle A.48: 17EF-
Z Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
16,3	AST
18,7	ZUG
72,2	MI
22,1	ZUG



Abbildung A.95:
19EF-Z vor der
Prüfung

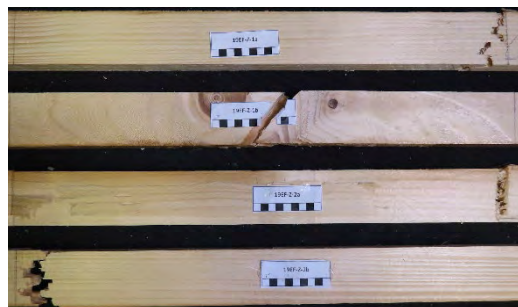


Abbildung A.96: 19EF-Z nach der Prüfung

Tabelle A.49: 19EF-
Z Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
18,6	ZUG
14,8	ZUG
4,4	AST
22,6	ZUG



Abbildung A.97:
21CD-Z vor der
Prüfung



Abbildung A.98: 21CD-Z nach der Prüfung

Tabelle A.50: 21CD-
Z Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
70,7	MI
81,7	MI
11,5	AST
32,4	ZUG



Abbildung A.99:
21EF-Z vor der
Prüfung

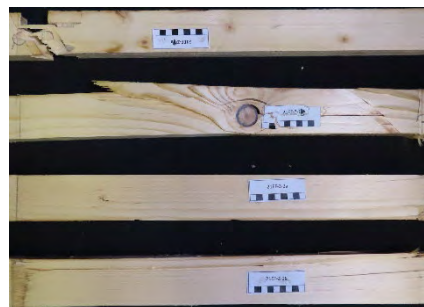


Abbildung A.100: 21EF-Z nach der Prüfung

Tabelle A.51: 21EF-
Z Zugfestigkeit und
Versagensart

$f_{t,0,exp}$ [MPa]	Versagensart [-]
15,3	AST
22,7	SR
25,2	AST
65,4	MI

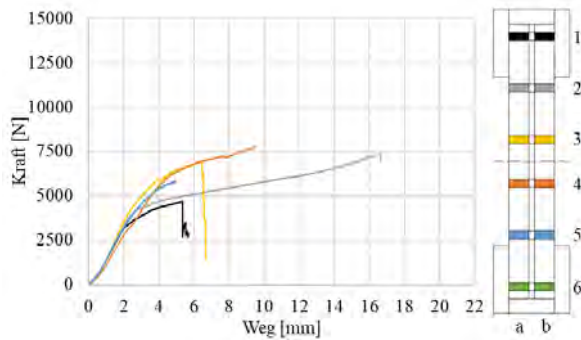


Abbildung A.101: Last-Verformungs-Kurven 9B-Z-a

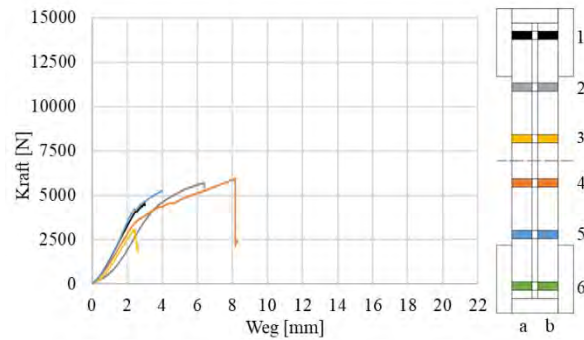


Abbildung A.102: Last-Verformungs-Kurven 9B-Z-b

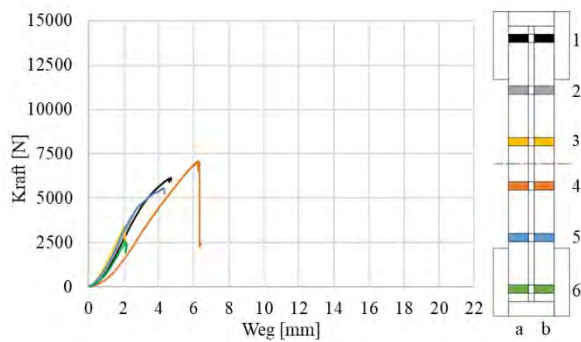


Abbildung A.103: Last-Verformungs-Kurven 9C-Z-a

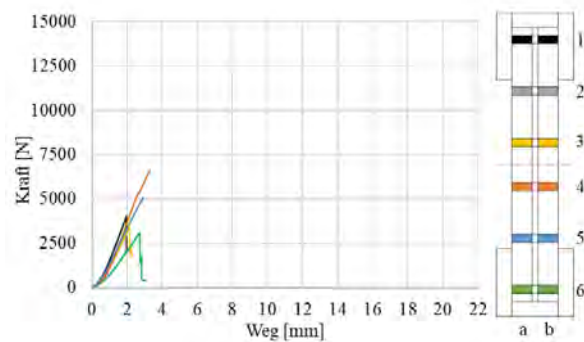


Abbildung A.104: Last-Verformungs-Kurven 9C-Z-b

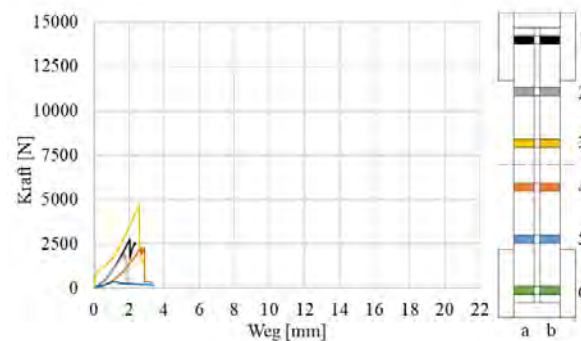


Abbildung A.105: Last-Verformungs-Kurven 9D-Z-a

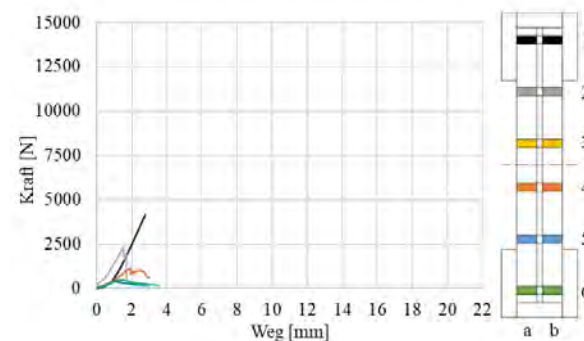


Abbildung A.106: Last-Verformungs-Kurven 9D-Z-b

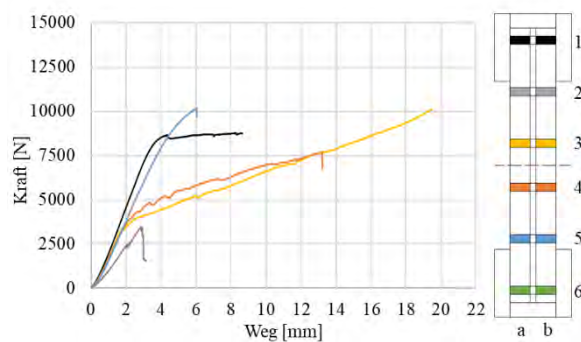


Abbildung A.107: Last-Verformungs-Kurven 10B-Z-a

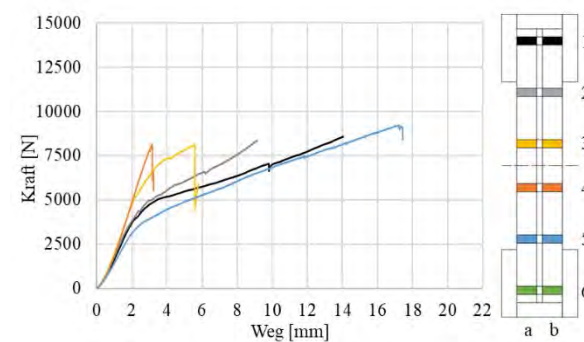


Abbildung A.108: Last-Verformungs-Kurven 10B-Z-b

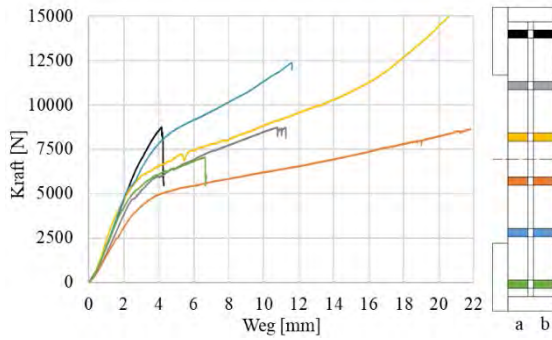


Abbildung A.109: Last-Verformungs-Kurven 10C-Z-a

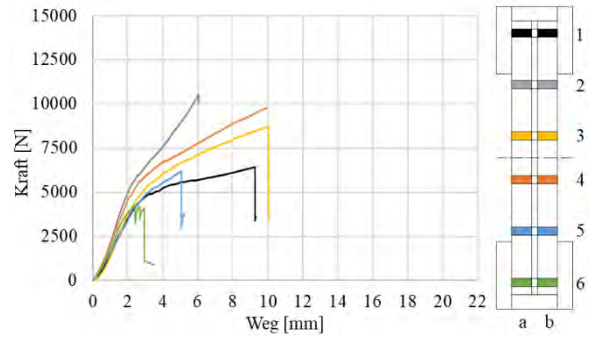


Abbildung A.110: Last-Verformungs-Kurven 10C-Z-b

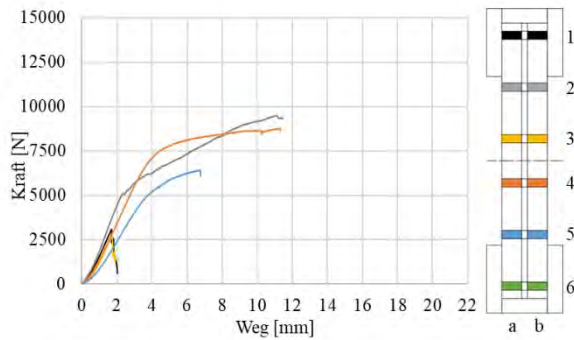


Abbildung A.111: Last-Verformungs-Kurven 10D-Z-a

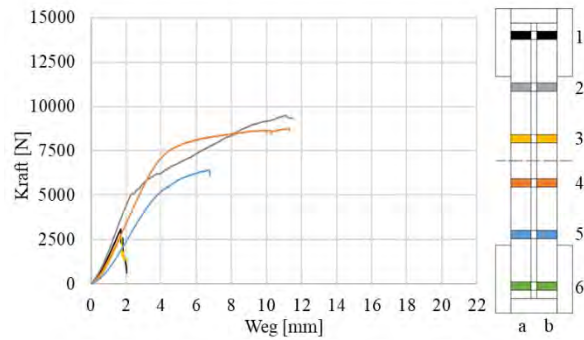


Abbildung A.112: Last-Verformungs-Kurven 10D-Z-b

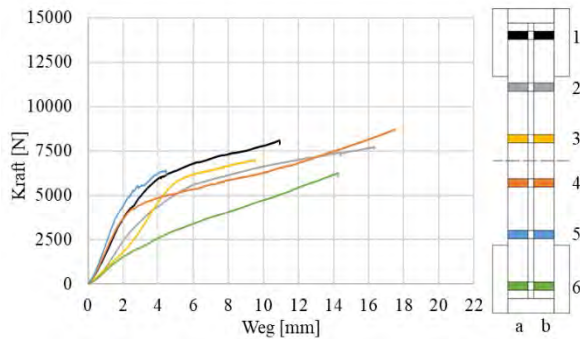


Abbildung A.113: Last-Verformungs-Kurven 14B-Z-a

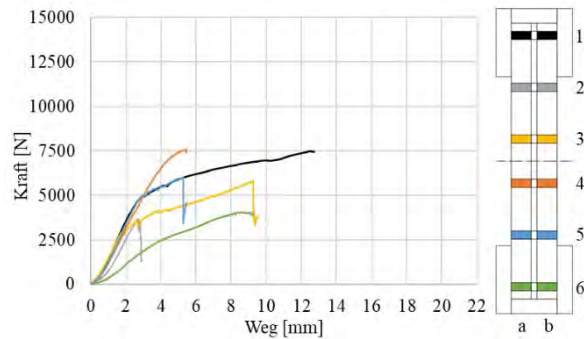


Abbildung A.114: Last-Verformungs-Kurven 14B-Z-b

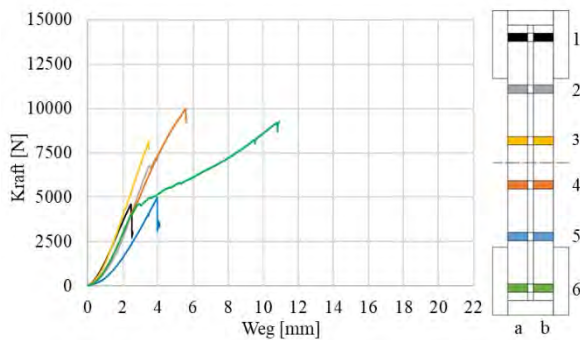


Abbildung A.115: Last-Verformungs-Kurven 14C-Z-a

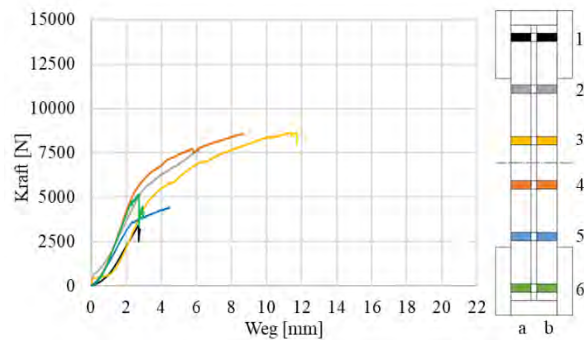


Abbildung A.116: Last-Verformungs-Kurven 14C-Z-b

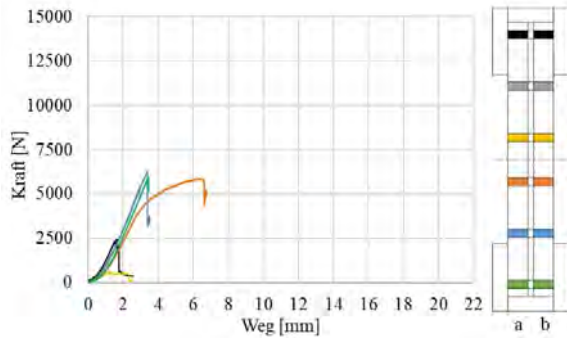


Abbildung A.117: Last-Verformungs-Kurven 14D-Z-a

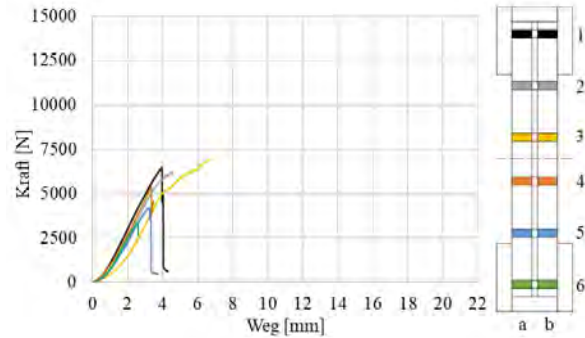


Abbildung A.118: Last-Verformungs-Kurven 14D-Z-b

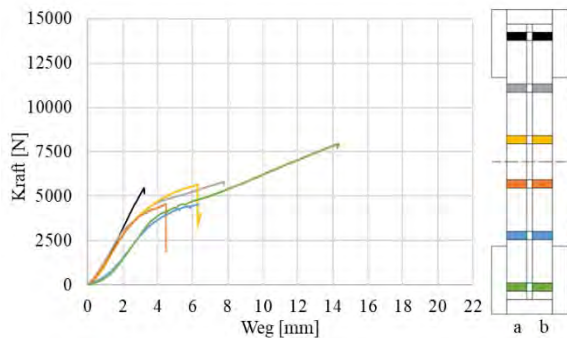


Abbildung A.119: Last-Verformungs-Kurven 15B-Z-a

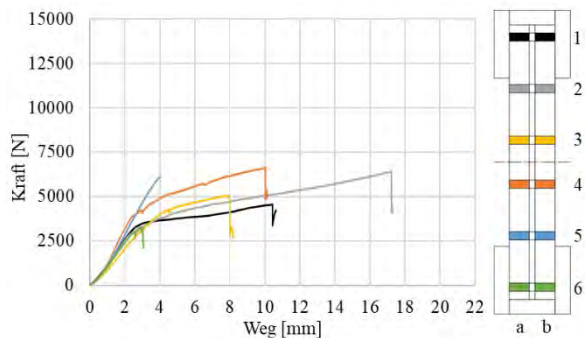


Abbildung A.120: Last-Verformungs-Kurven 15B-Z-b

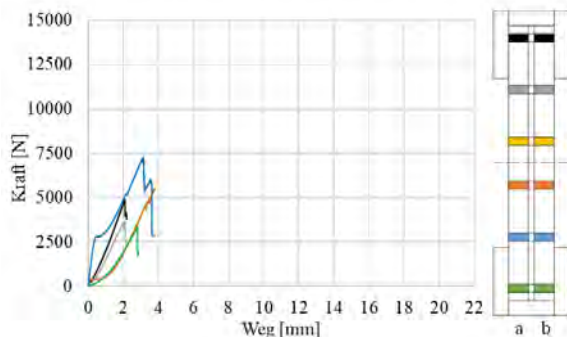


Abbildung A.121: Last-Verformungs-Kurven 15C-Z-a

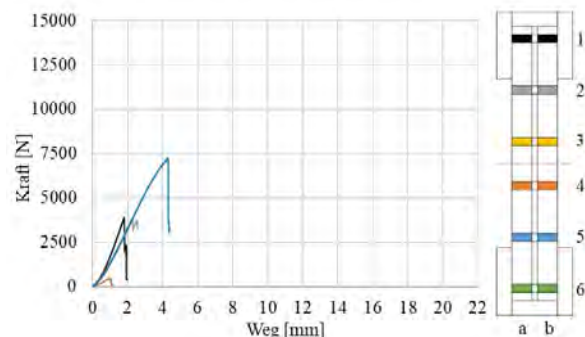


Abbildung A.122: Last-Verformungs-Kurven 15C-Z-b

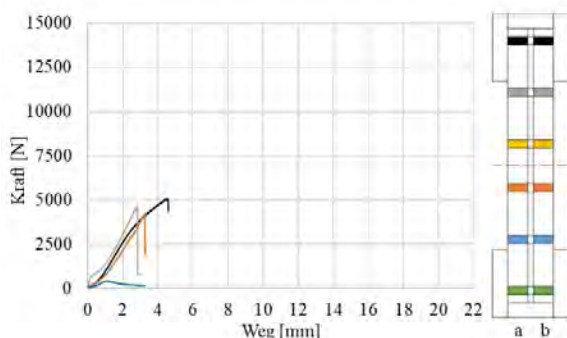


Abbildung A.123: Last-Verformungs-Kurven 15D-Z-a

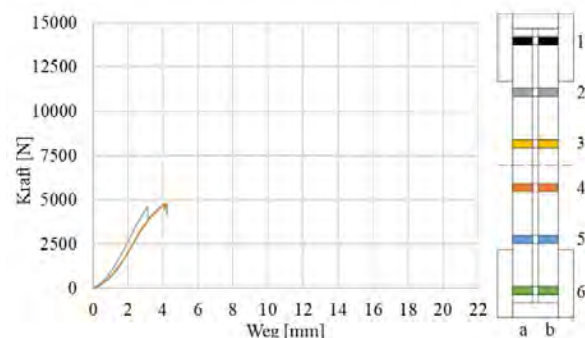


Abbildung A.124: Last-Verformungs-Kurven 15D-Z-b

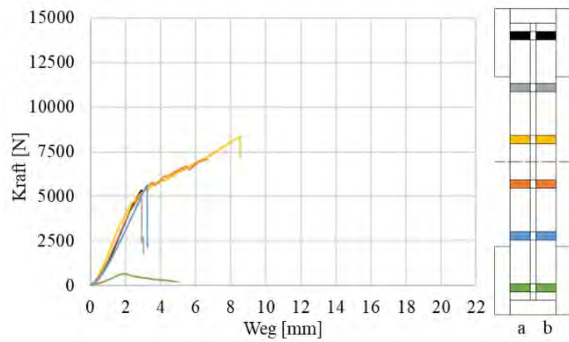


Abbildung A.125: Last-Verformungs-Kurven 17E-Z-a

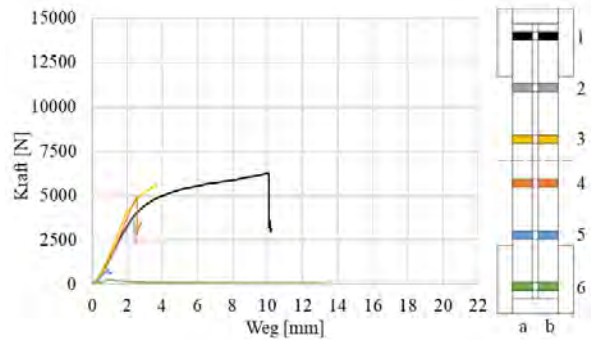


Abbildung A.126: Last-Verformungs-Kurven 17E-Z-b

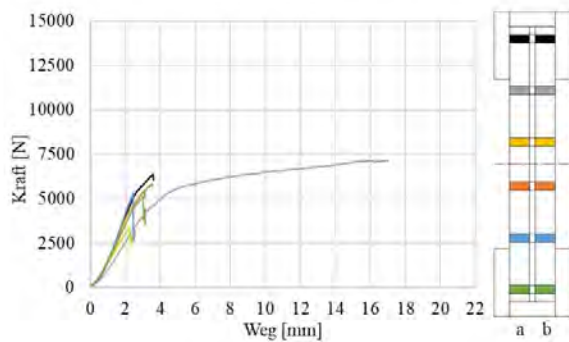


Abbildung A.127: Last-Verformungs-Kurven 17F-Z-a

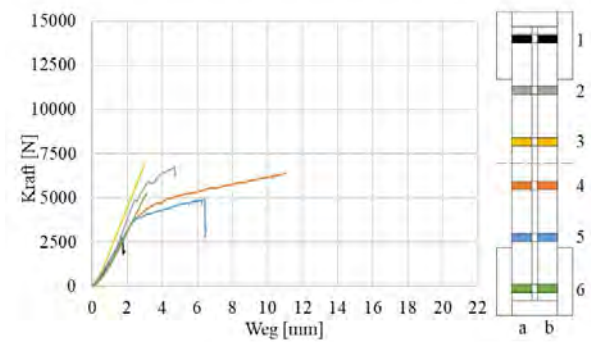


Abbildung A.128: Last-Verformungs-Kurven 17F-Z-b

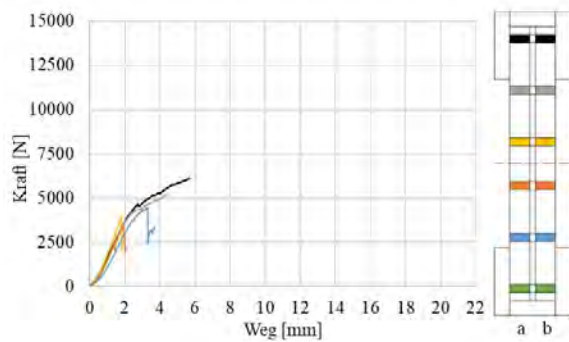


Abbildung A.129: Last-Verformungs-Kurven 17G-Z-a

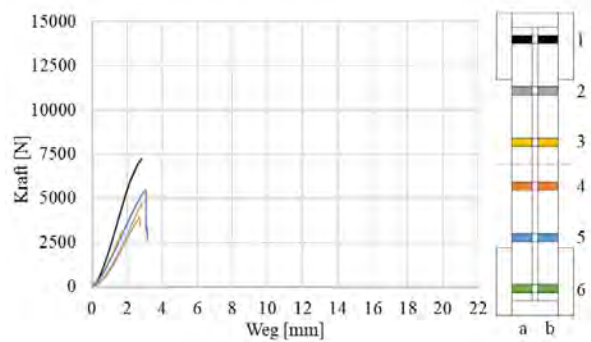


Abbildung A.130: Last-Verformungs-Kurven 17G-Z-b

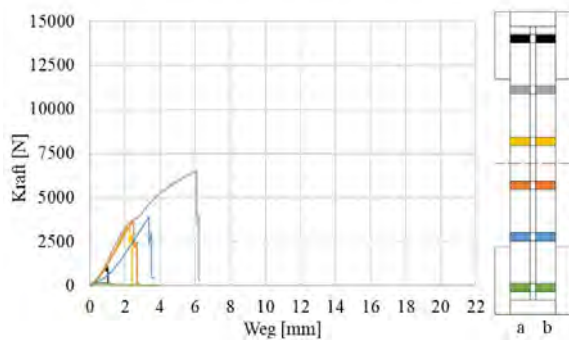


Abbildung A.131: Last-Verformungs-Kurven 19E-Z-a

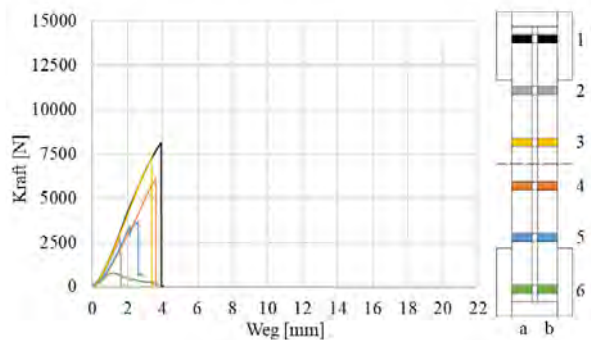


Abbildung A.132: Last-Verformungs-Kurven 19E-Z-b

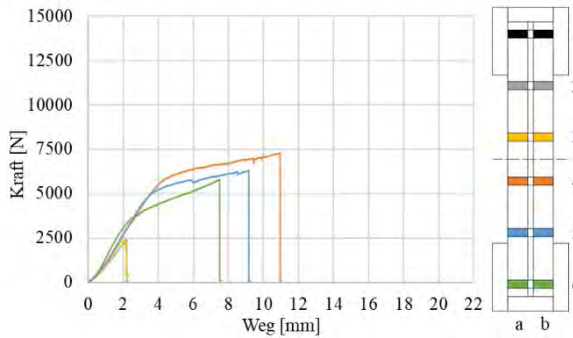


Abbildung A.133: Last-Verformungs-Kurven 19F-Z-a

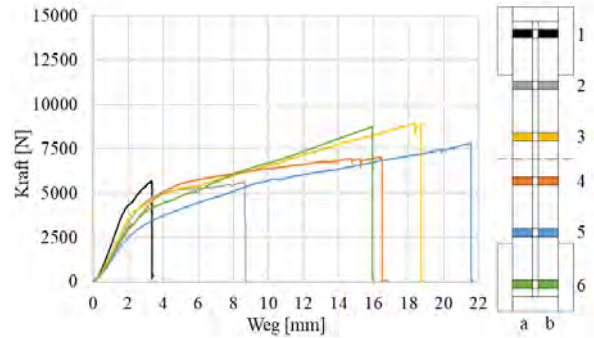


Abbildung A.134: Last-Verformungs-Kurven 19F-Z-b

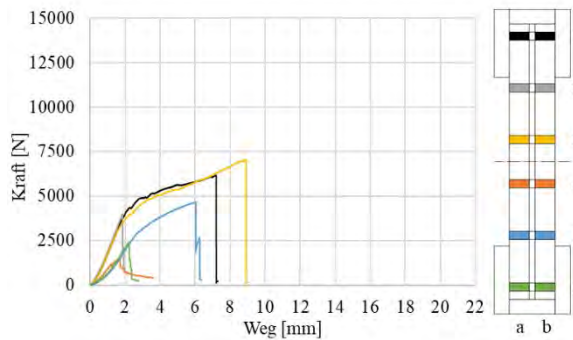


Abbildung A.135: Last-Verformungs-Kurven 19G-Z-a

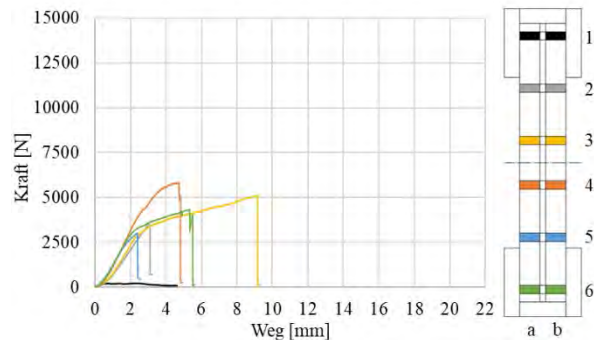


Abbildung A.136: Last-Verformungs-Kurven 19G-Z-b

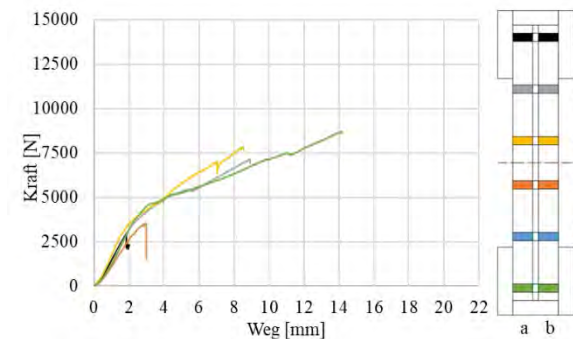


Abbildung A.137: Last-Verformungs-Kurven 21B-Z-a

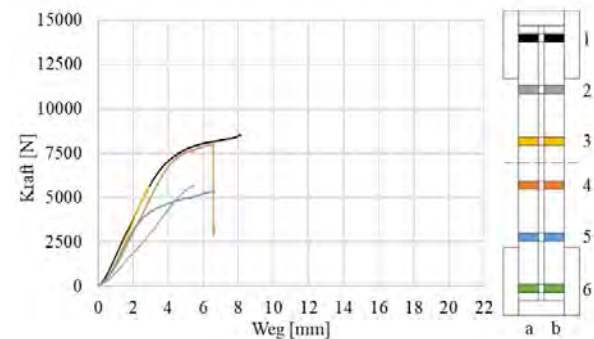


Abbildung A.138: Last-Verformungs-Kurven 21B-Z-b

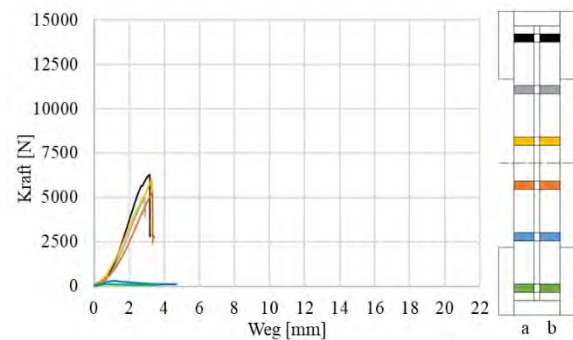


Abbildung A.139: Last-Verformungs-Kurven 21C-Z-a

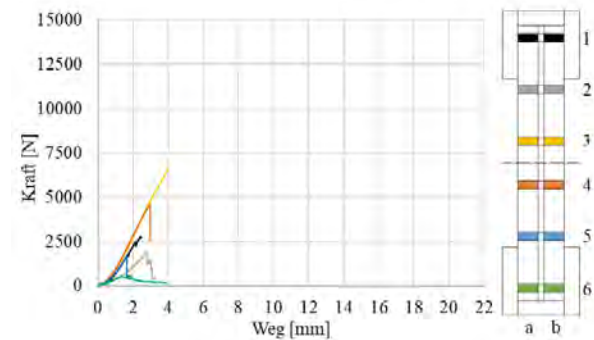


Abbildung A.140: Last-Verformungs-Kurven 21C-Z-b

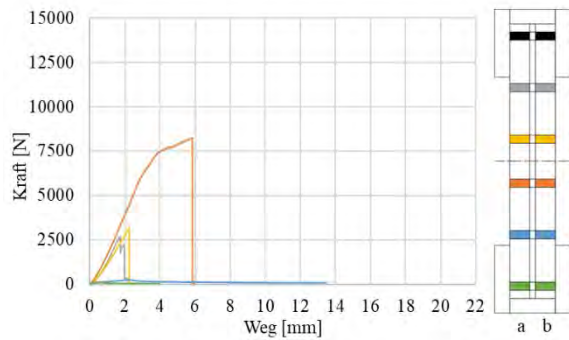


Abbildung A.141: Last-Verformungs-Kurven 21E-Z-a

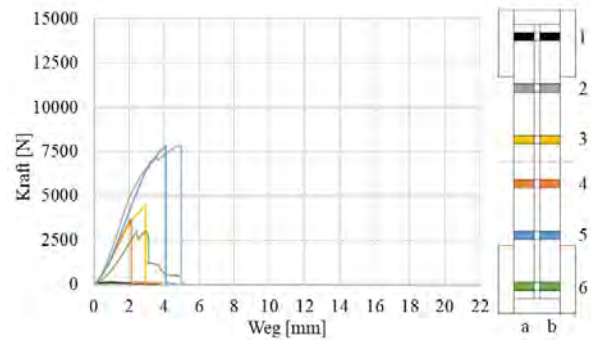


Abbildung A.142: Last-Verformungs-Kurven 21E-Z-b

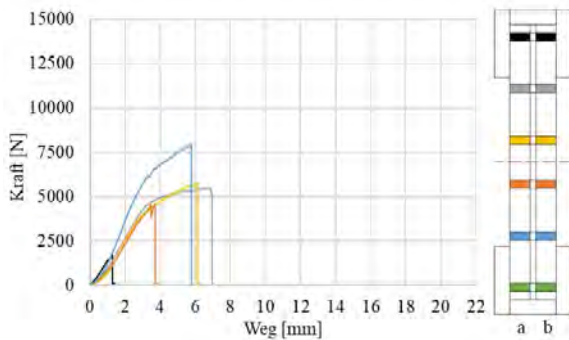


Abbildung A.143: Last-Verformungs-Kurven 21F-Z-a

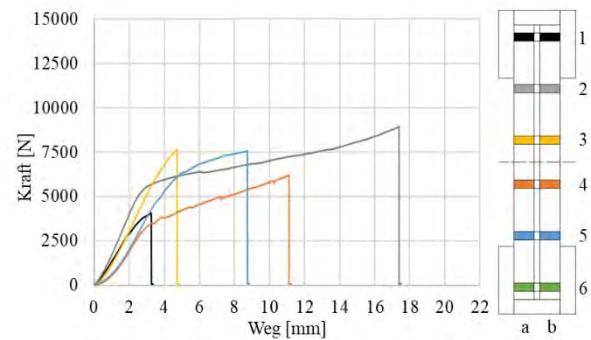


Abbildung A.144: Last-Verformungs-Kurven 21F-Z-b

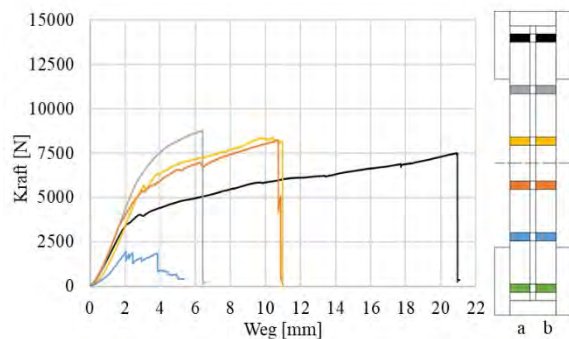


Abbildung A.145: Last-Verformungs-Kurven 21G-Z-a

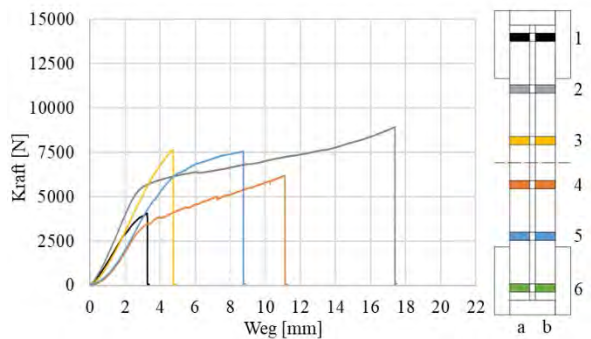


Abbildung A.146: Last-Verformungs-Kurven 21G-Z-b

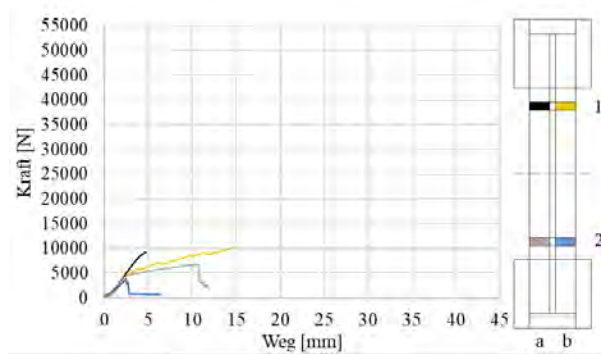


Abbildung A.147: Last-Verformungs-Kurven
9CD-Z

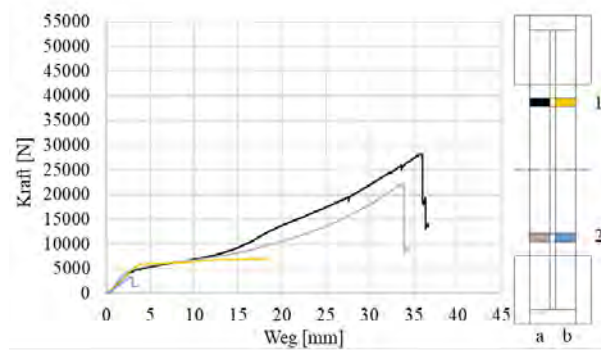


Abbildung A.148: Last-Verformungs-Kurven
10CD-Z

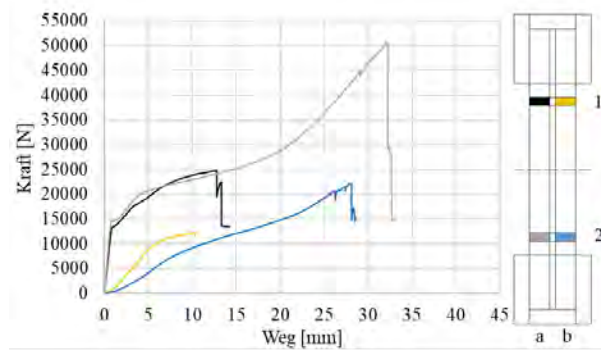


Abbildung A.149: Last-Verformungs-Kurven
14CD-Z

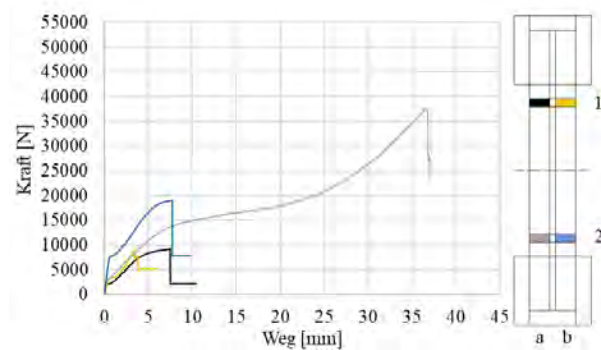


Abbildung A.150: Last-Verformungs-Kurven
15CD-Z

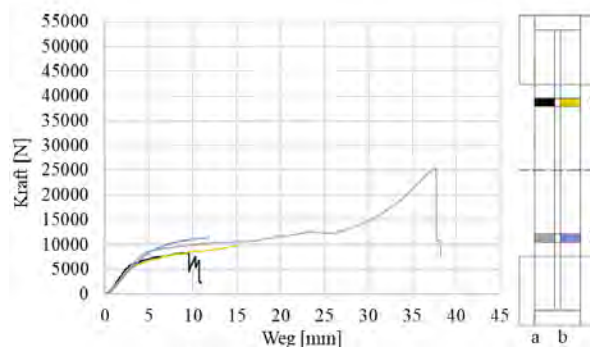


Abbildung A.151: Last-Verformungs-Kurven
17EF-Z

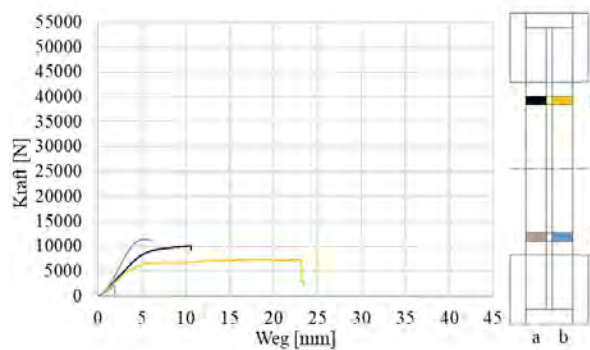


Abbildung A.152: Last-Verformungs-Kurven
19EF-Z

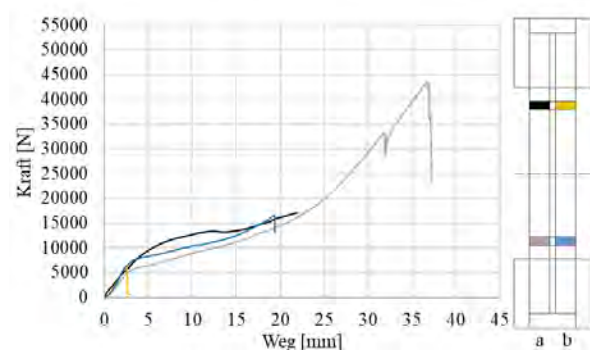


Abbildung A.153: Last-Verformungs-Kurven
21CD-Z

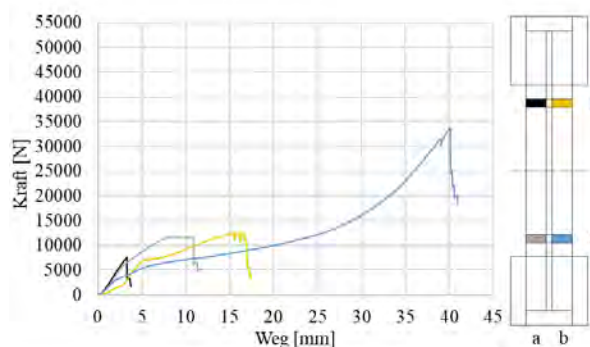


Abbildung A.154: Last-Verformungs-Kurven
21EF-Z

A.3 Versuchsdokumentation Biegeversuche am Gesamtquerschnitt

17C-B:

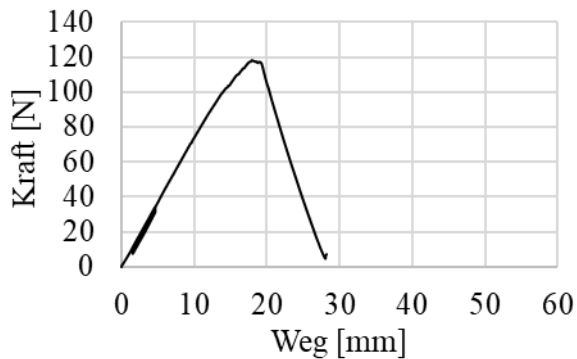


Abbildung A.155: Last-Verformungs-Kurve Mittelwert Feldmitte 17C-B

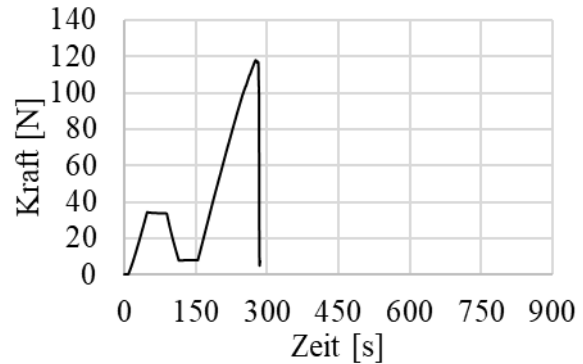


Abbildung A.156: Last-Zeit-Kurve 17C-B

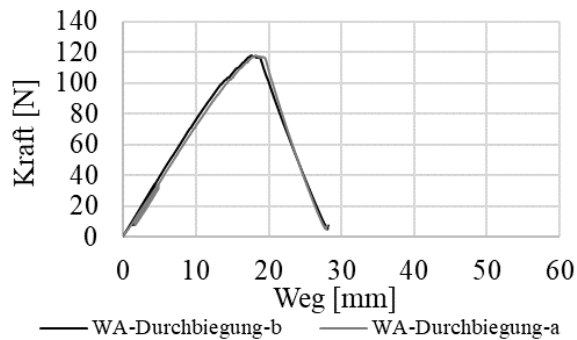


Abbildung A.157: Last-Verformungs-Kurve Einzelwerte Feldmitte 17C-B

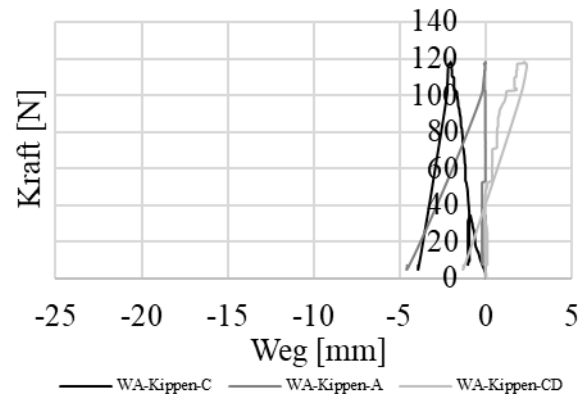


Abbildung A.158: Last-Verformungs-Kurve Kippen 17C-B

Tabelle A. 52: 17C-B Ergebnisse

$F_{\max}$ [kN]	$u_{\max}(F_{\max})$ [mm]	$u_{KZI}(F_{\max})$ [mm]	$V_{\max}$ [kN]	$M_{\max}$ [kNm]	M_{KZI} [kNm]
118,2	17,9	17,9	59,1	89,8	89,8
$f_{v,A_{\text{netto}},kcr=1,0}$ [N/mm ²]	$f_{v,A_{\text{netto}},kcr=0,5}$ [N/mm ²]	$f_{v,A_{\text{ges.}},kcr=1,0}$ [N/mm ²]	$f_{m,W_{\text{netto}}}$ [N/mm ²]	$f_{m,W_{\text{ges.}}}$ [N/mm ²]	Versagen [-]
4,5	9,0	2,3	30,1	14,8	Schub

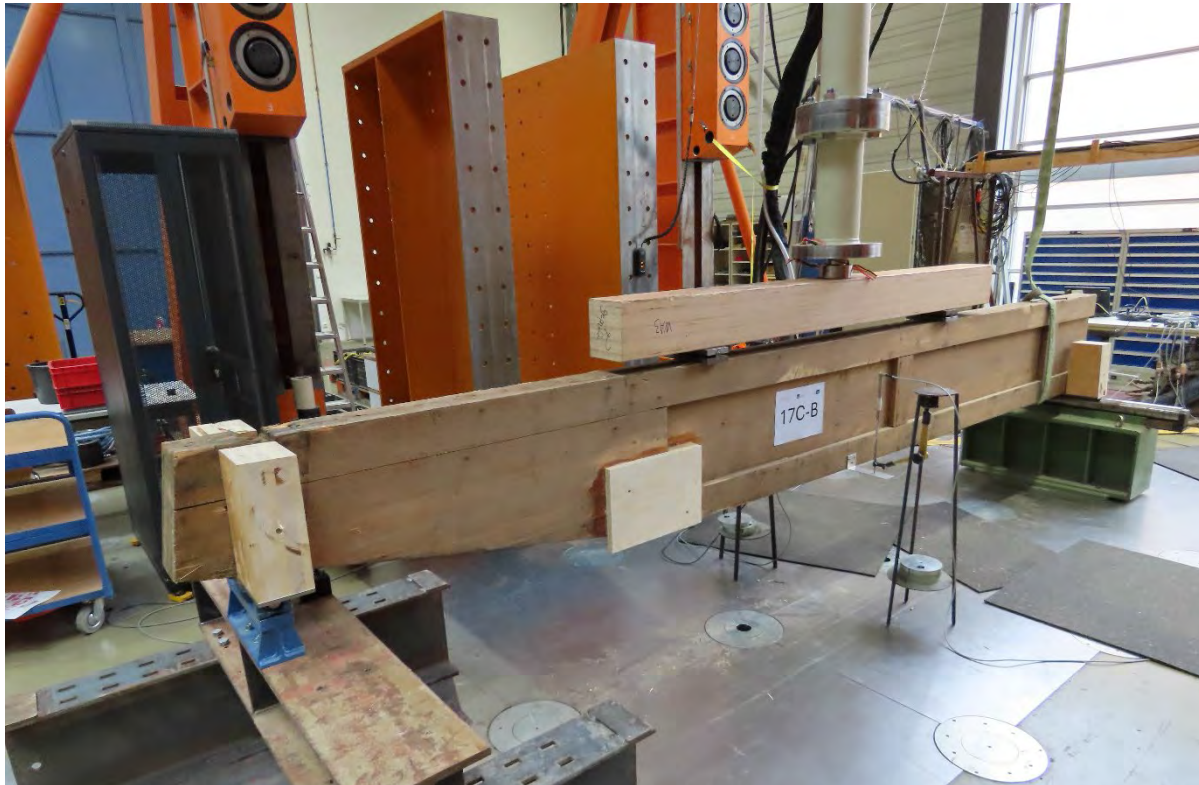


Abbildung A.159: 17C-B vor der Prüfung



Abbildung A.160: 17C-B Keilzinkung
Trägerseite a vor der Prüfung



Abbildung A.161: 17C-B Keilzinkung
Trägerseite b vor der Prüfung



Abbildung A.162: 17C-B Schubversagen Trägerseite a



Abbildung A.163: 17C-B Schubversagen Trägerseite b, Ausziehen der Zwischenschicht mit geringerem Klebstoffauftrag

25F-B:

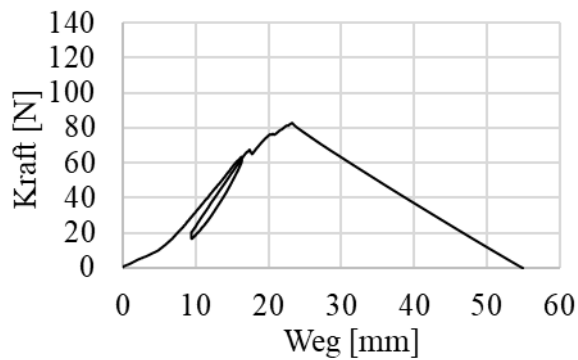


Abbildung A.164: Last-Verformungs-Kurve Mittelwert Feldmitte 25F-B

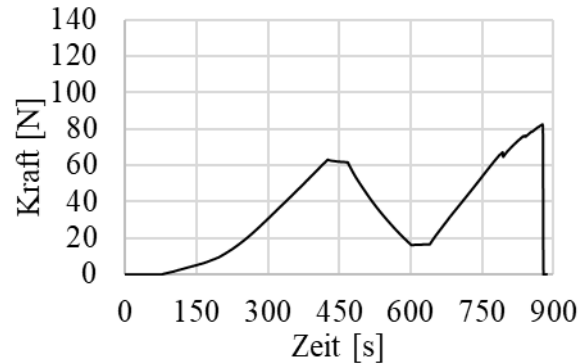
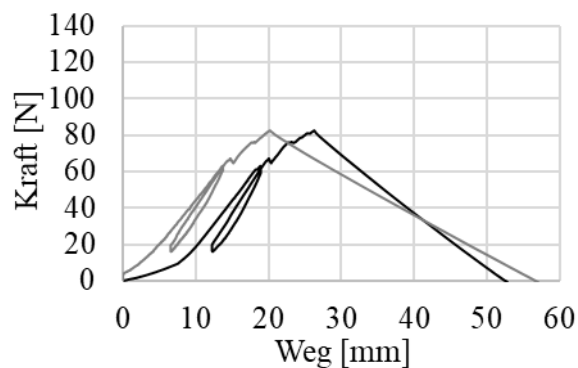
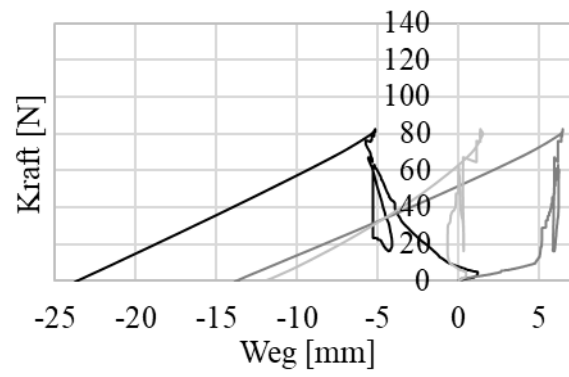


Abbildung A.165: Last-Zeit-Kurve 25F-B



— WA-Durchbiegung-b — WA-Durchbiegung-a

Abbildung A.166: Last-Verformungs-Kurve Einzelwerte Feldmitte 25F-B



— WA-Kippen-C — WA-Kippen-A — WA-Kippen-CD

Abbildung A.167: Last-Verformungs-Kurve Kippen 25F-B

Tabelle A. 53: 25F-B Ergebnisse

$F_{\max}$ [kN]	$u_{\max}(F_{\max})$ [mm]	$u_{KZI}(F_{\max})$ [mm]	$V_{\max}$ [kN]	$M_{\max}$ [kNm]	M_{KZI} [kNm]
82,5	23,2	23,2	41,3	62,7	62,7
$f_{v,Anetto,kcr=1,0}$ [N/mm ²]	$f_{v,Anetto,kcr=0,5}$ [N/mm ²]	$f_{v,Ages.,kcr=1,0}$ [N/mm ²]	$f_{m,Wnetto}$ [N/mm ²]	$f_{m,Wges.}$ [N/mm ²]	Versagen
3,2	6,3	1,6	21,0	10,4	Biegung



Abbildung A.168: 25F-B vor der Prüfung



Abbildung A.169: 25F-B Keilzinkung
Trägerseite a vor der Prüfung



Abbildung A.170: 25F-B Keilzinkung
Trägerseite b Biegezugversagen



Abbildung A.171: 25F-B Trägerseite b Gurtlammellenversagen



Abbildung A.172: 25F-B Trägerseite a Gurtlammellenversagen

27C-B:

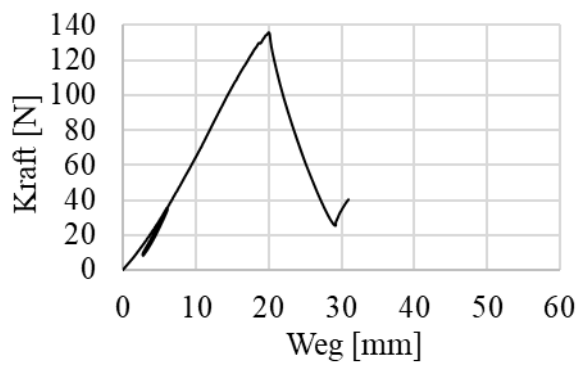


Abbildung A.173: Last-Verformungs-Kurve
Mittelwert Feldmitte 27C-B

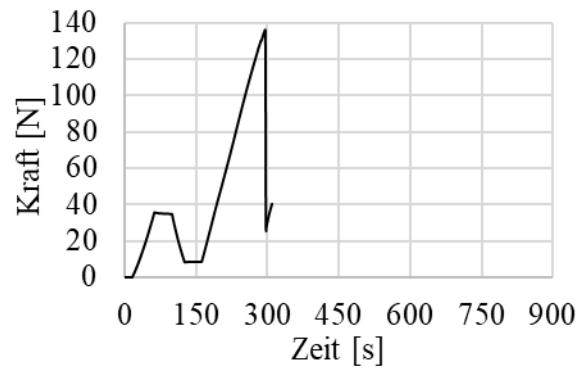
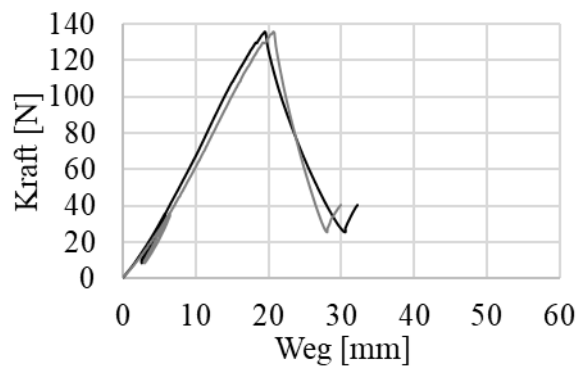
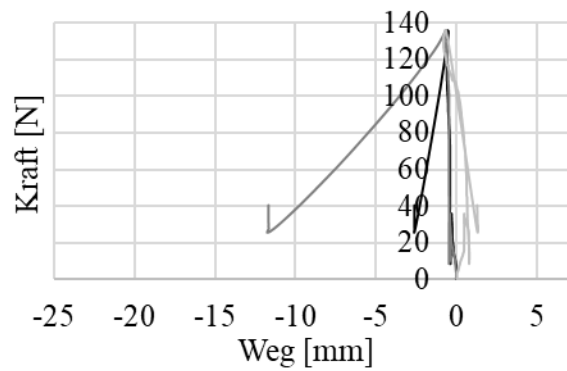


Abbildung A.174: Last-Zeit-Kurve 27C-B



— WA-Durchbiegung-b — WA-Durchbiegung-a
Abbildung A.175: Last-Verformungs-Kurve
Einzelwerte Feldmitte 27C-B



— WA-Kippen-C — WA-Kippen-A — WA-Kippen-CD
Abbildung A.176: Last-Verformungs-
Kurve Kippen 27C-B

Tabelle A. 54: 27C-B Ergebnisse

$F_{\max}$ [kN]	$u_{\max}(F_{\max})$ [mm]	$u_{KZI}(F_{\max})$ [mm]	$V_{\max}$ [kN]	$M_{\max}$ [kNm]	M_{KZI} [kNm]
135,8	20,0	20,0	67,9	103,2	103,2
$f_{v,A_{\text{netto}},kcr=1,0}$ [N/mm ²]	$f_{v,A_{\text{netto}},kcr=0,5}$ [N/mm ²]	$f_{v,A_{\text{ges.}},kcr=1,0}$ [N/mm ²]	$f_{m,W_{\text{netto}}}$ [N/mm ²]	$f_{m,W_{\text{ges.}}}$ [N/mm ²]	Versagen [-]
5,2	10,4	2,7	34,6	17,1	Schub

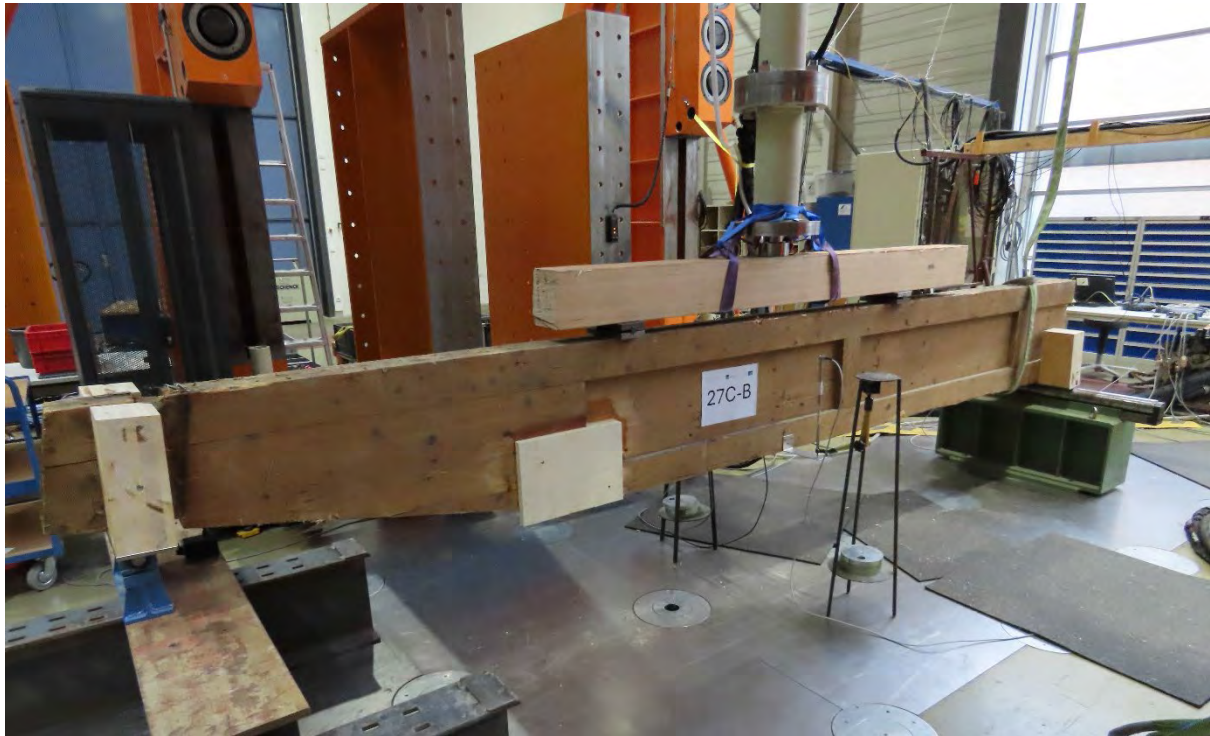


Abbildung A.177: 27C-B vor der Prüfung



Abbildung A.178: 27C-B Keilzinkung
Trägerseite a vor der Prüfung



Abbildung A.179: 27C-B Keilzinkung
Trägerseite b vor der Prüfung

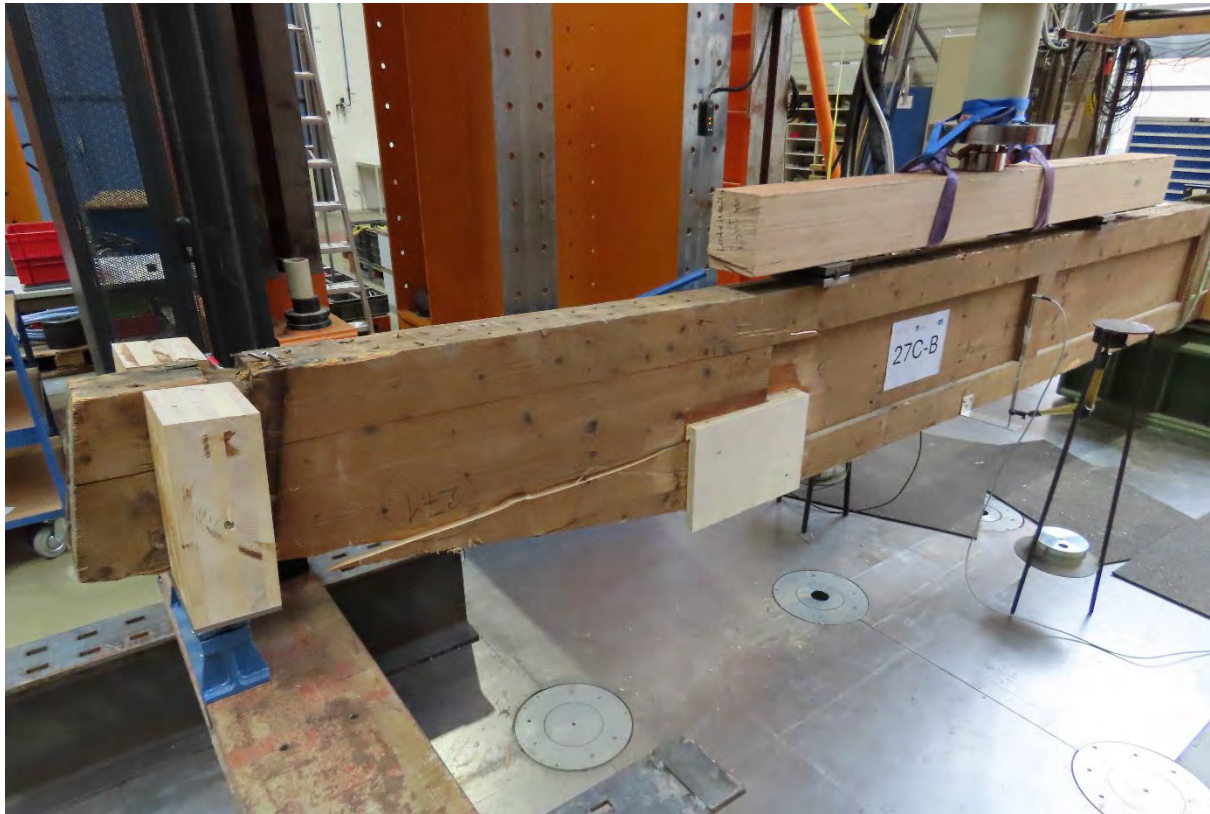


Abbildung A.180: 27C-B Schubversagen Trägerseite a



Abbildung A.181: 27C-B Schubversagen Trägerseite b

1C-B:

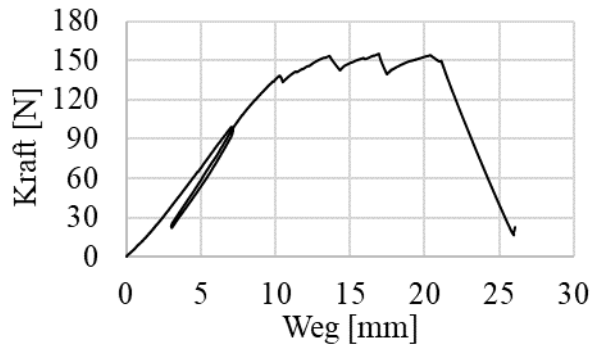


Abbildung A.182: Last-Verformungs-Kurve Mittelwert Feldmitte 1C-B

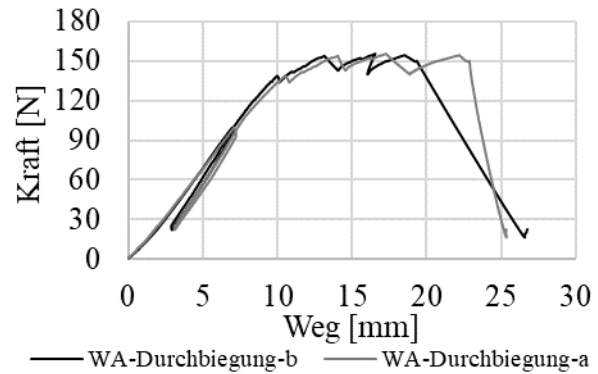


Abbildung A.183: Last-Verformungs-Kurve Einzelwerte Feldmitte 1C-B

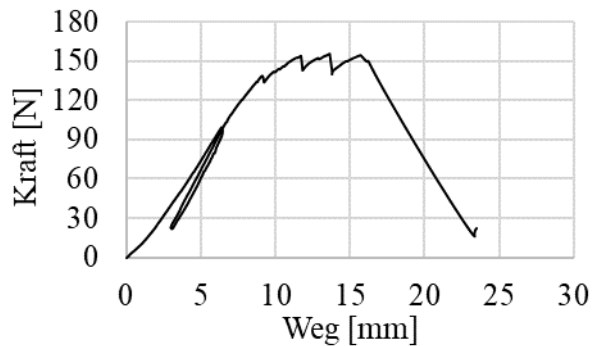


Abbildung A.184: Last-Verformungs-Kurve Mittelwert Keilzinkung 1C-B

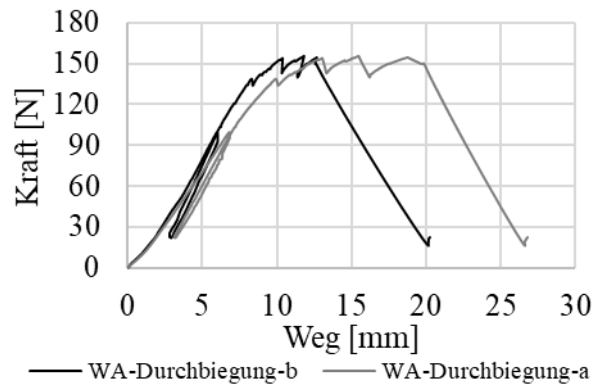


Abbildung A.185: Last-Verformungs-Kurve-Einzelwerte Keilzinkung 1C-B

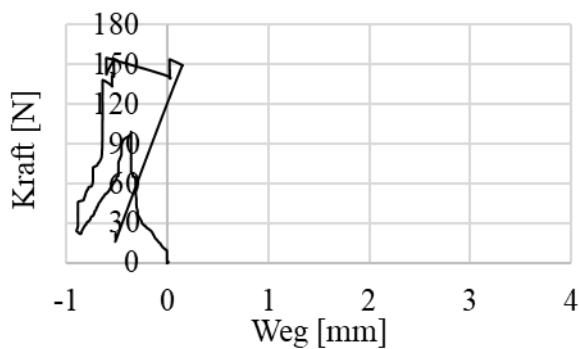


Abbildung A.186: Last-Verformungs-Kurve-Kippen Feldmitte 1C-B

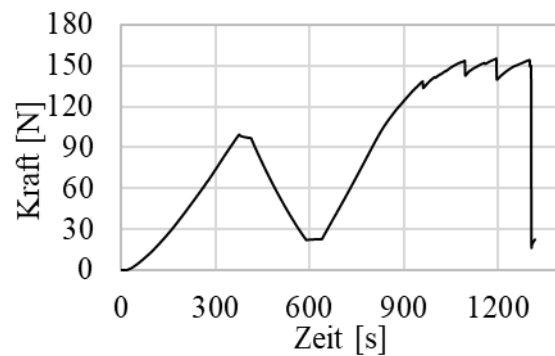


Abbildung A.187: Last-Zeit-Kurve 1C-B

Tabelle A. 55: 1C-B Ergebnisse

$F_{\max}$ [kN]	$u_{\max}(F_{\max})$ [mm]	$u_{KZI}(F_{\max})$ [mm]	$V_{\max}$ [kN]	$M_{\max}$ [kNm]	M_{KZI} [kNm]
155,6	16,9	13,6	77,8	107,4	70,0
$f_{v,A_{\text{netto}},kcr=1,0}$ [N/mm ²]	$f_{v,A_{\text{netto}},kcr=0,5}$ [N/mm ²]	$f_{v,A_{\text{ges.}},kcr=1,0}$ [N/mm ²]	$f_{m,W_{\text{netto}}}$ [N/mm ²]	$f_{m,W_{\text{ges.}}}$ [N/mm ²]	Versagen [-]
3,3	6,6	2,2	23,4	11,6	Biegung



Abbildung A.188: 1C-B 27C-B vor der Prüfung



Abbildung A.189: 1C-B Keilzinkung Trägerseite a vor der Prüfung



Abbildung A.190: 1C-B Keilzinkung Trägerseite b Biegezugversagen



Abbildung A.191: 1C-B Keilzinkung Trägerseite a Biegezugversagen

16C-B:

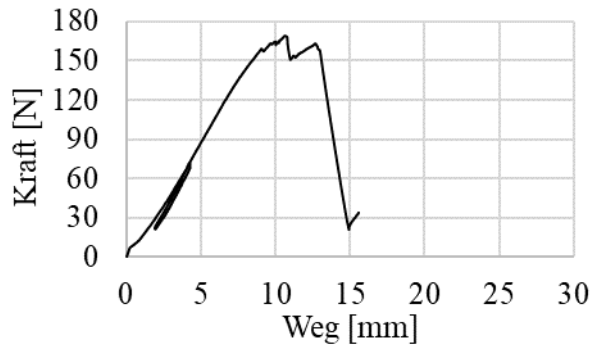


Abbildung A.192: Last-Verformungs-Kurve Mittelwert Feldmitte 16C-B

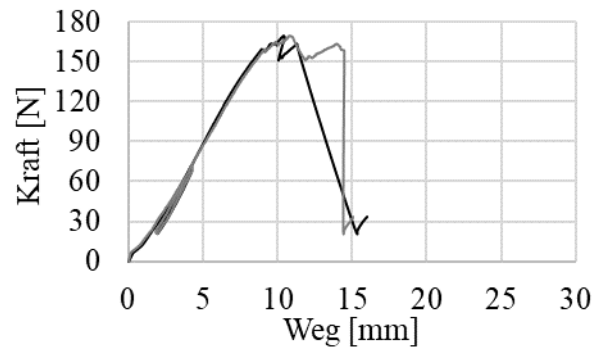


Abbildung A.193: Last-Verformungs-Kurve Einzelwerte Feldmitte 16C-B

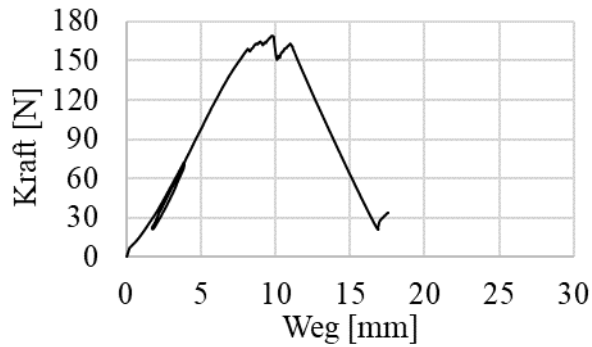


Abbildung A.194: Last-Verformungs-Kurve Mittelwert Keilzinkung 16C-B

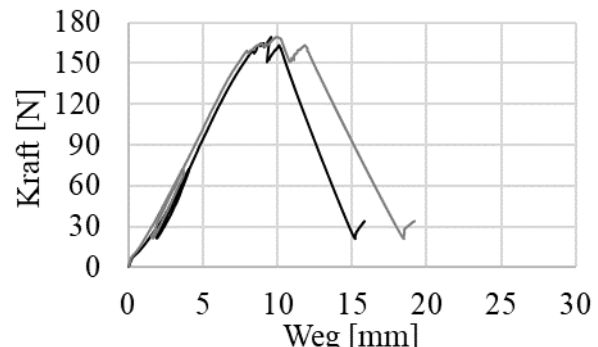


Abbildung A.195: Last-Verformungs-Kurve-Einzelwerte Keilzinkung 16C-B

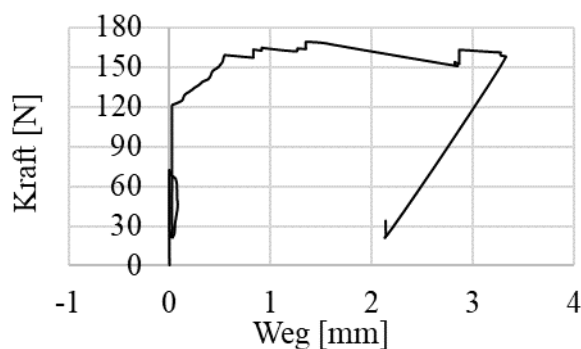


Abbildung A.196: Last-Verformungs-Kurve-Kippen Feldmitte 16C-B

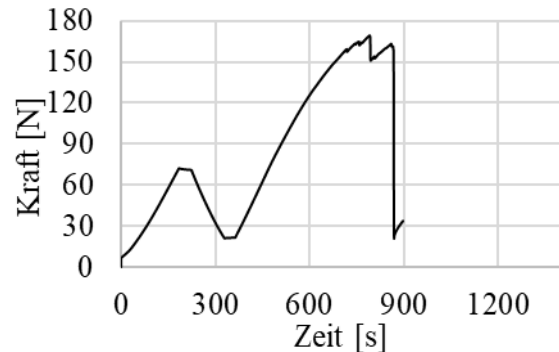


Abbildung A.197: Last-Zeit-Kurve 16C-B

Tabelle A. 56: 1C-B Ergebnisse

$F_{\max}$ [kN]	$u_{\max}(F_{\max})$ [mm]	$u_{KZI}(F_{\max})$ [mm]	$V_{\max}$ [kN]	$M_{\max}$ [kNm]	M_{KZI} [kNm]
168,9	10,6	9,8	84,5	116,6	76,0
$f_{v,A_{\text{netto}},kcr=1,0}$ [N/mm ²]	$f_{v,A_{\text{netto}},kcr=0,5}$ [N/mm ²]	$f_{v,A_{\text{ges.}},kcr=1,0}$ [N/mm ²]	$f_{m,W_{\text{netto}}}$ [N/mm ²]	$f_{m,W_{\text{ges.}}}$ [N/mm ²]	Versagen [-]
3,6	7,2	2,4	25,4	12,6	Biegung

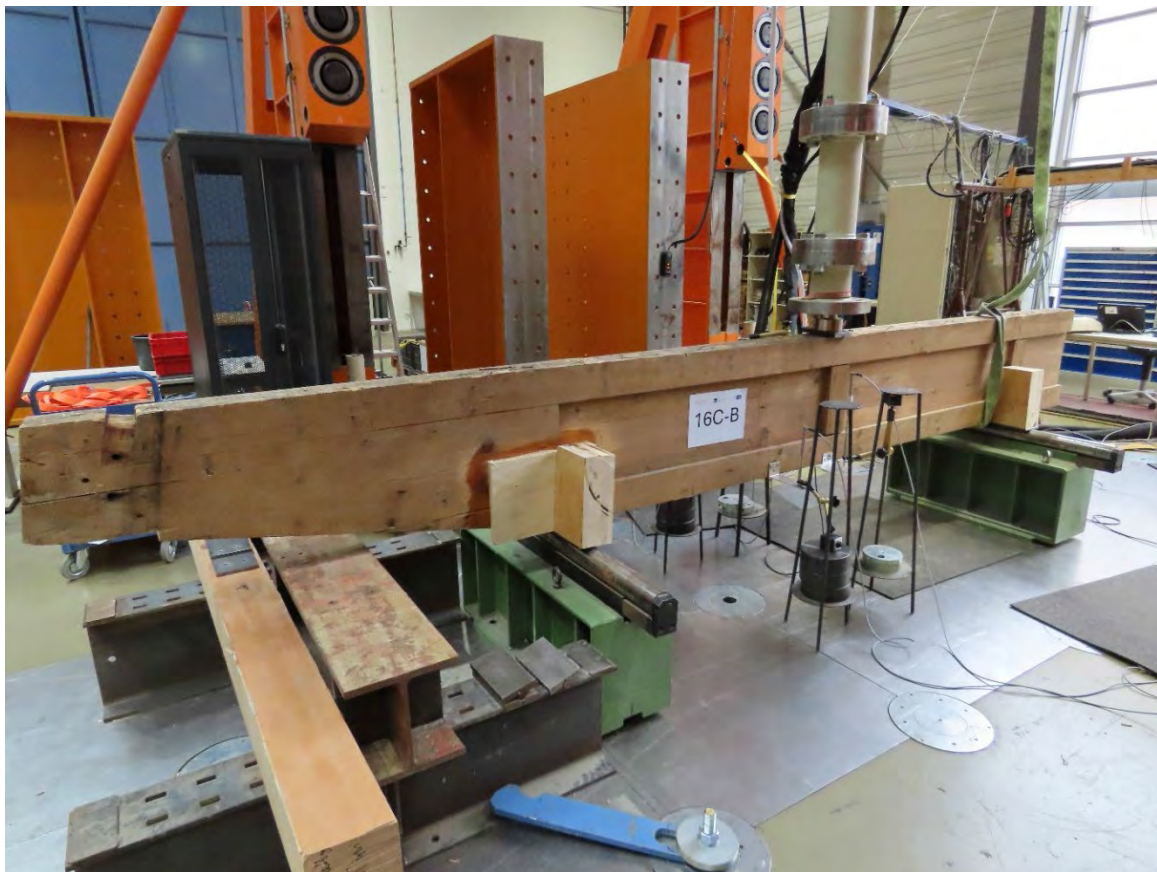


Abbildung A.198: 16C-B vor der Prüfung



Abbildung A.199: 16C-B Keilzinkung
Trägerseite a vor der Prüfung



Abbildung A.200: 16C-B Keilzinkung
Trägerseite b vor der Prüfung



Abbildung A.201: 16C-B Keilzinkung Trägerseite a Biegezugversagen



Abbildung A.202: 16C-B Keilzinkung Trägerseite b Biegezugversagen

A.4 Dokumentation maximale Dicken der Klebfugen und Kategorisierung der Keilzinkungen

Kategorie 1: Keine Fehlstellen in den Keilzinkenfugen	Kategorie 2: Fehlstellen in 0 - 25 % der aufsummierten Flankenlänge	Kategorie 3: Fehlstellen in 25 - 50 % der aufsummierten Flankenlänge	Kategorie 4: Fehlstellen > 50 % der aufsummierten Flankenlänge und/oder Holzfehler der Zinken
			

Abbildung A.203: Kategorien der Keilzinkungen (Beispiele)

Tabelle A. 57: Dicke der Klebfugen und Kategorisierung - Teil 1

Prüfkörper [-]	Max. Fugendicke [mm]	Zustand [-]	Prüfkörper [-]	Fugendicke [mm]	Kategorie [-]
9B-Z-1a	0,4	3	10C-Z-1a	0,6	2
9B-Z-2a	0,45	2	10C-Z-2a	0,45	2
9B-Z-3a	0,3	3	10C-Z-3a	0,5	2
9B-Z-4a	0,35	4	10C-Z-4a	0,35	2
9B-Z-5a	0,45	4	10C-Z-5a	0,45	2
9B-Z-1b	0,35	2	10C-Z-6a	0,35	2
9B-Z-2b	0,45	2	10C-Z-1b	0,45	1
9B-Z-3b	0,4	2	10C-Z-2b	0,55	1
9B-Z-4b	0,45	3	10C-Z-3b	0,4	2
9B-Z-5b	0,5	4	10C-Z-4b	0,5	2
9C-Z-1a	0,3	3	10C-Z-5b	0,9	2
9C-Z-2a	0,4	3	10C-Z-6b	0,7	2
9C-Z-3a	0,45	3	10D-Z-1a	0,4	2
9C-Z-4a	0,35	2	10D-Z-2a	0,5	2
9C-Z-5a	0,45	4	10D-Z-3a	0,55	2
9C-Z-6a	0,6	3	10D-Z-4a	0,6	2
9C-Z-1b	0,45	2	10D-Z-5a	0,4	2
9C-Z-2b	0,5	2	10D-Z-6a	0,45	2
9C-Z-3b	0,8	2	10D-Z-1b	0,45	2
9C-Z-4b	0,6	2	10D-Z-2b	0,35	2
9C-Z-5b	0,6	1	10D-Z-3b	0,55	3
9C-Z-6b	0,65	1	10D-Z-4b	0,5	2
9D-Z-1a	0,4	1	10D-Z-5b	0,35	2
9D-Z-2a	0,4	2	10D-Z-6b	0,65	3
9D-Z-3a	0,45	2	14B-Z-1a	0,3	2
9D-Z-4a	0,4	2	14B-Z-2a	0,65	2
9D-Z-5a	0,5	2	14B-Z-3a	0,55	2
9D-Z-6a	0,6	2	14B-Z-4a	0,6	2
9D-Z-1b	0,8	2	14B-Z-5a	0,5	1
9D-Z-2b	0,7	2	14B-Z-6a	0,6	1
9D-Z-4b	0,6	3	14B-Z-1b	0,55	2
9D-Z-5b	0,7	2	14B-Z-2b	0,7	2
9D-Z-6b	0,8	3	14B-Z-3b	0,6	2
10B-Z-1a	0,5	2	14B-Z-4b	0,45	2
10B-Z-2a	0,4	2	14B-Z-5b	0,45	2
10B-Z-3a	0,4	2	14B-Z-6b	0,85	2
10B-Z-4a	0,45	3	14C-Z-1a	0,55	1
10B-Z-5a	0,4	1	14C-Z-2a	0,75	2
10B-Z-1b	0,45	1	14C-Z-3a	0,5	1
10B-Z-2b	0,45	2	14C-Z-4a	0,35	1
10B-Z-3b	0,45	1	14C-Z-5a	0,4	1
10B-Z-4b	0,4	2	14C-Z-6a	0,4	1
10B-Z-5b	0,65	2	14C-Z-1b	0,5	2

Tabelle A. 58: Dicke der Klebfugen und Kategorisierung - Teil 2

Prüfkörper [-]	max. Fugendicke [mm]	Zustand [-]	Prüfkörper [-]	Fugendicke [mm]	Kategorie [-]
14C-Z-2b	1	1	15D-Z-2b	0,4	2
14C-Z-3b	0,35	1	15D-Z-4b	0,4	1
14C-Z-4b	0,7	1	17E-Z-1a	0,6	2
14C-Z-5b	0,7	1	17E-Z-2a	0,4	1
14C-Z-6b	0,55	2	17E-Z-3a	0,5	1
14D-Z-1a	0,35	1	17E-Z-4a	0,4	1
14D-Z-2a	0,55	1	17E-Z-5a	0,55	1
14D-Z-3a	0,5	2	17E-Z-6a	0,35	1
14D-Z-4a	0,35	1	17E-Z-1b	0,35	1
14D-Z-5a	0,25	1	17E-Z-2b	0,9	2
14D-Z-6a	0,3	1	17E-Z-3b	0,35	1
14D-Z-1b	0,5	2	17E-Z-4b	0,45	2
14D-Z-2b	0,45	2	17E-Z-5b	0,35	2
14D-Z-3b	0,45	2	17E-Z-6b	0,25	2
14D-Z-4b	0,3	1	17F-Z-1a	0,7	1
14D-Z-5b	0,35	2	17F-Z-2a	0,45	1
14D-Z-6b	0,4	1	17F-Z-3a	0,3	1
15B-Z-1a	0,45	1	17F-Z-4a	0,4	1
15B-Z-2a	0,5	1	17F-Z-5a	0,55	2
15B-Z-3a	0,65	1	17F-Z-6a	0,5	4
15B-Z-4a	0,4	1	17F-Z-1b	0,85	1
15B-Z-5a	0,45	1	17F-Z-2b	0,4	1
15B-Z-6a	0,4	1	17F-Z-3b	0,65	1
15B-Z-1b	0,4	2	17F-Z-4b	0,55	2
15B-Z-2b	0,5	2	17F-Z-5b	7	1
15B-Z-3b	0,4	2	17F-Z-6b	0,5	1
15B-Z-4b	0,35	1	17G-Z-1a	0,65	1
15B-Z-5b	0,35	2	17G-Z-2a	0,75	1
15B-Z-6b	0,5	1	17G-Z-3a	0,8	2
15C-Z-1a	0,55	3	17G-Z-4a	0,6	1
15C-Z-2a	0,65	2	17G-Z-5a	0,45	1
15C-Z-4a	0,6	2	17G-Z-1b	0,55	1
15C-Z-5a	0,55	2	17G-Z-2b	0,65	2
15C-Z-6a	0,3	1	17G-Z-3b	0,45	3
15C-Z-1b	0,3	1	17G-Z-4b	0,6	2
15C-Z-2b	0,5	1	17G-Z-5b	0,45	1
15C-Z-4b	0,25	2	19E-Z-1a	0,25	2
15C-Z-5b	0,35	1	19E-Z-2a	0,4	2
15C-Z-6b	0,55	1	19E-Z-3a	0,75	2
15D-Z-1a	0,5	1	19E-Z-4a	0,35	2
15D-Z-2a	0,5	2	19E-Z-5a	0,4	2
15D-Z-4a	0,35	2	19E-Z-6a	0,6	1
15D-Z-5a	0,35	1	19E-Z-1b	0,3	1

Tabelle A. 59: Dicke der Klebfugen und Kategorisierung - Teil 3

Prüfkörper [-]	max. Fugendicke [mm]	Kategorie [-]	Prüfkörper [-]	Fugendicke [mm]	Kategorie [-]
19E-Z-2b	0,35	2	21C-Z-5a	0,8	2
19E-Z-3b	0,6	2	21C-Z-6a	1,4	3
19E-Z-4b	0,45	1	21C-Z-1b	1,4	3
19E-Z-5b	0,7	2	21C-Z-2b	0,7	2
19E-Z-6b	0,7	2	21C-Z-3b	0,55	2
19F-Z-1a	0,4	3	21C-Z-4b	0,7	2
19F-Z-2a	0,5	2	21C-Z-5b	0,75	2
19F-Z-3a	0,5	2	21C-Z-6b	1	4
19F-Z-4a	0,4	2	21E-Z-1a	0,25	2
19F-Z-5a	0,4	2	21E-Z-2a	0,6	2
19F-Z-6a	0,5	1	21E-Z-3a	0,65	2
19F-Z-1b	0,4	3	21E-Z-4a	0,65	2
19F-Z-2b	0,4	2	21E-Z-5a	0,3	3
19F-Z-3b	0,25	2	21E-Z-6a	0,45	2
19F-Z-4b	0,25	2	21E-Z-1b	0,4	2
19F-Z-5b	0,45	1	21E-Z-2b	0,4	2
19F-Z-6b	0,6	2	21E-Z-3b	0,4	1
19G-Z-1a	0,4	3	21E-Z-4b	0,35	4
19G-Z-2a	0,45	3	21E-Z-5b	0,65	1
19G-Z-3a	0,45	1	21E-Z-6b	0,5	1
19G-Z-4a	0,4	2	21F-Z-1a	1,2	4
19G-Z-5a	0,55	1	21F-Z-2a	0,45	2
19G-Z-6a	0,4	3	21F-Z-3a	0,75	2
19G-Z-1b	0,4	2	21F-Z-4a	0,7	2
19G-Z-2b	0,5	1	21F-Z-5a	0,7	1
19G-Z-3b	0,4	1	21F-Z-1b	0,35	2
19G-Z-4b	0,45	2	21F-Z-2b	0,7	1
19G-Z-5b	0,4	2	21F-Z-3b	0,55	1
19G-Z-6b	0,35	2	21F-Z-4b	0,6	1
21B-Z-1a	0,6	2	21F-Z-5b	0,6	1
21B-Z-2a	0,55	1	21G-Z-1a	0,5	1
21B-Z-3a	0,35	1	21G-Z-2a	0,3	1
21B-Z-4a	0,5	2	21G-Z-3a	0,4	1
21B-Z-5a	0,25	1	21G-Z-4a	0,4	1
21B-Z-1b	0,5	1	21G-Z-5a	0,6	1
21B-Z-2b	0,8	2	21G-Z-1b	0,45	1
21B-Z-3b	0,7	2	21G-Z-2b	0,35	1
21B-Z-4b	0,4	2	21G-Z-3b	0,3	1
21B-Z-5b	0,55	1	21G-Z-4b	0,4	1
21C-Z-1a	0,55	1	21G-Z-5b	0,35	1
21C-Z-2a	0,6	1			
21C-Z-3a	0,6	1			
21C-Z-4a	0,6	3			