

Renaissance der Pressklebung mit Nägeln oder Klammern

Schlussbericht

Valentin Räber, Dio Hans Lins, Martin Lehmann, Steffen Franke, Bettina Franke, Joel Karolin
01.09.2021 – 31.12.2024

Dieses Projekt wurde realisiert mit Unterstützung des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) im Rahmen des Aktionsplans Holz.

Schlussbericht
Renaissance der Pressklebung mit Nägeln oder Klammern
01.09.2021 – 31.12.2024

Published by
Bern University of Applied Sciences
Architecture, Wood and Civil Engineering
Solothurnstrasse 102
CH-2504 Biel

Renaissance der Pressverklebung mit Nägeln oder Klammern

Forschungsbericht

Schlussbericht

Bericht Nr. 31HT-012939-R-01-PB-01AB

Auftrag Nr. R.012939-10-31HT-01

Klassifizierung öffentlich

Datum 09. Dezember 2024

Dieses Projekt wurde realisiert mit Unterstützung des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) im Rahmen des Aktionsplans Holz

Adresse der Forschungsstelle
Berner Fachhochschule
Institut für Holz, Tragwerk und Architektur
Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel/Bienne 6
+41 32 344 02 02
www.ahb.bfh.ch

Verfasser Valentin Räber, Dio Hans Lins, Martin Lehmann, Steffen Franke, Bettina Franke, Joel Karolin

Projektverantwortliche Prof. Dr. Steffen Franke
Prof. Dr. Martin Lehmann

Institutsleiter Christoph Fuhrmann

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Verklebung im Holzbau	7
1.2	Pressverklebung	8
1.3	Rahmenbedingungen des Projektes	8
1.3.1	Zielsetzung	8
1.3.2	Projektstruktur	9
1.3.3	Wirtschaftspartner	9
2	Beurteilung von Verbindungsmittern für die Pressverklebung	10
2.1	Einleitung	10
2.2	Material	10
2.2.1	Holz und Holzwerkstoffe	10
2.2.2	Klammern	10
2.3	Methode	11
2.3.1	Anpresskraft	12
2.3.1.1	Einzelversuche	12
2.3.1.2	Gruppenversuche	13
2.3.2	Ermittlung des Ausziehparameters mittels einseitigem Ausziehversuch	14
2.3.3	Zweiseitiger Ausziehversuch	15
2.3.4	Ermittlung des Kopf-Durchziehparameters	16
2.3.5	Beurteilung der Spreizung durch Röntgenstrahlen	17
2.4	Ergebnisse	17
2.4.1	Anpresskraft	17
2.4.1.1	Einzelversuche	17
2.4.1.2	Gruppenversuche	24
2.4.2	Ermittlung des Ausziehparameters mittels einseitigem Ausziehversuch	25
2.4.3	Zweiseitiger Ausziehversuch	34
2.4.4	Ermittlung des Kopf-Durchziehparameters	38
2.4.5	Beurteilung der Spreizung durch Röntgenstrahlen	40
2.5	Diskussion und Schlussfolgerung	41
2.5.1	Ermittlung der Anpresskraft	41
2.5.2	Ermittlung des Ausziehparameters mittels einseitigem Ausziehversuch	42
2.5.3	Zweiseitiger Ausziehversuch	43
2.5.4	Ermittlung des Kopf-Durchziehparameters	43
2.6	Zusammenfassung	44
3	Beurteilung der Pressverklebung	46
3.1	Einleitung	46
3.2	Bestimmung der Scherfestigkeit nach SN EN 14080:2013 Anhang D	46
3.3	Bestimmung der Scherfestigkeit bei nassen Bedingungen nach EAD 130320-00-0304	47
3.4	Bestimmung der Klebfugendicke	48
3.5	Material	48
3.5.1	Holz und Holzwerkstoffe	48
3.5.2	Klammern	49

3.5.3 Klebstoffe	49
3.6 Methode	50
3.6.1 Kleinformatige Laborverklebungen	50
3.6.1.1 Prüfprogramm	50
3.6.1.2 Herstellung der Prüfkörper	51
3.6.2 Grossformatige Praxisverklebungen Teil I	53
3.6.2.1 Prüfprogramm	53
3.6.2.2 Herstellung der Prüfkörper	53
3.6.3 Grossformatige Laborverklebungen	56
3.6.3.1 Prüfprogramm	56
3.6.3.2 Herstellung der Prüfkörper	56
3.6.4 Grossformatige Praxisverklebungen Teil II	58
3.6.4.1 Prüfprogramm	58
3.6.4.2 Herstellung der Prüfkörper	59
3.7 Ergebnisse	62
3.7.1 Kleinformatige Laborverklebungen	62
3.7.1.1 Scherversuche nach EN 14080	62
3.7.1.2 Vergleich der Scherfestigkeit mit und ohne Klammer	64
3.7.1.3 Analyse der Klebefuge	65
3.7.2 Grossformatige Praxisverklebungen Teil I	66
3.7.2.1 Scherversuche nach EN 14080	66
3.7.2.2 Analyse der Klebefuge	68
3.7.3 Grossformatige Laborverklebungen	69
3.7.3.1 Analyse der Scherfestigkeit	69
3.7.3.2 Analyse der Klebefuge	70
3.7.4 Grossformatige Praxisverklebungen Teil II	72
3.7.4.1 Analyse der Scherfestigkeit	72
3.7.4.2 Analyse der Klebefuge	74
3.8 Diskussion und Schlussfolgerung	75
3.8.1 Kleinformatige Laborverklebungen	75
3.8.2 Grossformatige Praxisverklebungen Teil I	76
3.8.3 Grossformatige Laborverklebungen	76
3.8.4 Grossformatige Praxisverklebungen Teil II	77
4 Fazit und Ausblick	78
5 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	79
6 Literaturverzeichnis	80
7 Anhang	82
7.1 Konfigurationen kleinformatige Laborverklebungen	82
7.2 Konfigurationen grossformatige Praxisverklebungen Teil I	82
7.3 Dokumentation Verklebungsparameter der grossformatigen Praxisversuche	83
7.3.1 Verklebung bei Holzbauer 1	84
7.3.1 Verklebung bei Holzbauer 2	86
7.3.1 Verklebung bei Holzbauer 3	88
7.4 Beurteilung der Scherfestigkeit der grossformatigen Praxisversuche Teil I	90

7.4.1 Beurteilung des Standortes der Verklammerung	90
7.4.1 Vergleich der einreihigen und zweireihigen Verklammerung	91
7.5 Resultate der Klebfugendicke der grossformatigen Praxisversuche	92
7.6 Beurteilung der Scherfestigkeit der grossformatigen Praxisversuche Teil II	94

1 Einführung

1.1 Verklebung im Holzbau

Kleben ist eine Art des stoffschlüssigen Fügens, dabei werden Materialien gleicher Art oder eine Kombination verschiedener Materialien miteinander verbunden (Habenicht, 2016). Die Möglichkeit eines Verbundes hohe Tragfähig- sowie Steifigkeit führt zu einer interessanten Verbindungsart im Holzbau.

Die ersten Klebstoffe basierten auf Naturprodukten und benötigten eine sehr geringe Festigkeit, da sie ausschliesslich im Innenbereich angewandt wurden. Zur effizienteren Holznutzung wurde die Entwicklung von Klebstoffen im 19. und 20. Jahrhundert vorangetrieben. Zwei frühzeitig biobasierte Klebstoffe waren: Kasein für die Produktion von Brettschichtholz und von Sojaklebstoffen für Sperrholz im Innenbereich. Die biobasierten Klebstoffe wurden jedoch bereits in den 1930er Jahren durch synthetische Klebstoffe auf Grund von Feuchteresistenz, Ökonomie sowie Anwenderfreundlichkeit abgelöst (Frihart, 2015).

Einer den ersten synthetischen Klebstoffen war *Phenol-Formaldehyde* (PF), welcher die Produktion von Sperrholz für den Aussenbereich ermöglichte. Weiter synthetische Klebstoffe wie *Resorcinol-Formaldehyde* (RF), *Phenol-Resorcinol-Formaldehyde* (PRF), *Melamine-Formaldehyde* (MF) wurden auf Grund der grossen Erdölindustrie nach dem zweiten Weltkrieg entwickelt. Nebenan wurden auch andere synthetische Klebstoffe wie *Isocyanate*, *Epoxide* sowie *Polyurethane* (PU) entwickelt. Ein grosser Vorteil dieser Klebstoffe besteht darin, dass sie je nach Art und Verhältnis der Monomere eine breite Palette von Eigenschaften aufweisen können (Frihart, 2015).

Durch die Entwicklung der vielseitigen Klebstoffsysteme war es somit möglich, hoch tragfähige sowie dauerhafte Verklebungen im Holzbau zu realisieren. Zur Auswahl des richtigen Klebstoffes müssen bei der Holzverklebung die von Brockmann et al., 2005 definierten Randbedingungen eingehalten werden:

- In der praktischen Anwendung weist Holz stets eine Restfeuchte von 6-15 % auf. Darrtrockenes Holz ist nur von wissenschaftlicher Bedeutung. Der Klebstoff muss also sowohl bei der Applikation wie im Dauergebrauch über eine gewisse Kompatibilität mit Wasser und Wasserdampf verfügen.
- Holz unterliegt feuchtigkeitsbedingten und damit klimabedingten Dimensionsschwankungen. An den Fugengrenzflächen können dadurch hohe Schubspannungen auftreten, die entweder durch die Elastizität des Klebstoffs aufgefangen oder durch genügend hohe Adhäsions- und Kohäsionskräfte gehalten werden.
- Holzoberflächen sind auch bei gehobeltem oder geschliffenem Holz nie absolut plan. Holzklebstoffe müssen daher eine gewisse Füllkraft aufweisen. Zusätzlich werden Holzverklebungen in der Regel unter Pressdruck gefertigt. Dieser kann auf verschiedenste Arten erzeugt werden: durch Schraubzwingen oder Klammern im Handwerksbereich bis hin zu vollautomatisierten Stapel- und Formpressen für industrielle Anwendungen.

Je nach Reaktionsart und Eigenschaft eines Klebstoffes, kann dieser bei unterschiedlichen Anwendungsbereichen im Holzbau wie Keilzinkenverklebung, Flächenverklebung, Stirnholzverklebung, Herstellung von Faser- sowie Span-Werkstoffen wie z. B. Spanplatten oder auch das Einkleben von Stahlteilen verwendet werden (Habenicht, 2016). Dabei lassen sich mit riss- sowie fugenfüllendem Klebstoff ohne zusätzlichen Druck dickere Klebefugen ausbilden im Vergleich zu den nicht fugenfüllenden Klebstoffen, welche nur bis zu einer definierten Klebfugendicke angewendet werden können (E DIN 1052-10:2023).

In junger Zeit gewannen einkomponentige, feuchtigkeitshärtende Polyurethanklebstoffe bei Holzverklebungen, speziell im Ingenieurholzbau, an Bedeutung (Brandmair et al., 2012; Radovic & Rothkopf, 2003). Vorteile dieser Klebstoffklasse sind nach Brockmann et al., 2005 folgende:

- geringere Auftragsmengen
- nahezu verlustfreie Anwendung
- Einsetzbarkeit ohne Mischprozess, wie vom Hersteller angeliefert – kein Bedarf für Leimküche, kein Abwasser
- wählbar kurze bis extrem kurze Reaktionszeiten
- unauffällige Klebstofffuge mit holzähnlichem Alterungsverhalten

- Zulassung für Innen- und Aussenanwendungen sowie für freie Längen
- ökologische Unbedenklichkeit.

1.2 Pressverklebung

Die Methode der Pressverklebung wird multidisziplinär eingesetzt. Bei der Pressverklebung werden zwei zu verbindende Oberflächen unter ausreichendem Pressdruck verklebt.

Bei der Herstellung von konventionellen Holzwerkstoffen wie z. B. Brettschichtholz, Sperrholz, Faserplatten etc. werden grossformatige Pressen verwendet, welche den Pressdruck sowie die Presszeit und eventuell Temperatur optimal auf den Holzwerkstoff abstimmen können (Brockmann et al., 2005). Die Prozesse der Produktion sowie Qualitätssicherung sind schon seit Jahren normativ europaweit abgehandelt und werden weiter optimiert, die Anforderungen an Brettschichtholz sind z. B. in der SN EN 14080:2013 abgehandelt.

Neben den konventionellen Holzwerkstoffen gibt es auch die Anwendung der Schraubpressverklebung, welche die Herstellung von Verbundsystemen wie z. B. Rippendecken, Holkastenelementen oder Doppel-Steg Trägern ermöglicht (Kairi, 2000). Ein weiterer Anwendungsbereich sind lokale Verstärkungen von Verbindungen, Durchbrüchen und Ausklinkungen. Diese Verklebung findet sich nicht nur bei Neubauten wieder, sondern kann auch als Retrofitting verwendet werden, um geschädigte Bauteile zu ertüchtigen. Informationen zu der Ausführung der Schraubpressverklebung sind im österreichischen Anhang des Eurocode 5 ÖNORM B 1995-1-1:2023, in der deutschen Norm E DIN 1052-10:2023 sowie im Entwurf des Eurocode 5 prEN 1995-3:2023 zu finden. Die Normen machen Vorgaben bezüglich der zu verbindenden Materialarten und -dicken, Geometrie und Anordnung der Schrauben sowie eine Abhängigkeit der zu verwendenden Klebstoffe von der Klebfugendicke. Der schweizerische Ingenieur- und Architektenverein (SIA) hat keine normative Abhandlung der Schraubpressverklebung. Einige Schweizer Ingenieurbüros geben daher teilweise Anwendungsdokumente zur Ausführung der Schraubpressverklebung heraus, wie z. B. Pirmin Jung AG (Pirmin Jung, o. D.), Holzprojekte AG (holzprojekte, 2022) oder Besmer Holzbauingenieure GmbH (Besmer, 2019).

Neben der Schraubpressverklebung wurde auch Forschung in ganz Europa zu unterschiedlichen Verbindungsmitteln von Nägeln über Schraubnägel bis zu Klammern für die Anwendung einer Pressverklebung durchgeführt (Fürst, 2019; Rug et al., 2010; Schiere et al., 2018; Timbatec, 2014). Bis 2004 war die Nagelpressverklebung in der DIN 1052-1:1988 normativ verankert, wobei seitdem nur noch die Schraubpressverklebung normativ abgehandelt wird. Gemäss DIN 1052-1:1988 konnte die Nagelpressverklebung für Brettlamellen bis 33 mm Dicke und Holzwerkstoffplatten bis 50 mm Dicke angewendet werden. Dabei betrug die Nagellänge 2.5-mal die Dicke der Lamellen bzw. Platten. Pro Nagel konnte maximal eine Fläche von 6'500 mm² angesetzt werden mit einem maximalen Nagelabstand von 100 mm.

Eine Studie von Kairi et al., 1999 zeigte, dass PU Klebstoffe ein weniger sprödes Verhalten aufzeigen im Vergleich zu konventionellen Klebstoffen. Dadurch können lokale Spannungsspitzen geglättet werden. Somit wird die Duktilität von Brettschichtholz und die Stabilität von gerippten Elementen durch die PU-Verklebung verbessert. Zudem benötigt der PU-Klebstoff einen Pressdruck von 0.03-0.1 N/mm² (Kairi et al., 1999). Als wichtigstes Qualitätssicherungskriterium der Anwendung der jeweiligen Klebstoffe gilt die Klebfugendicke. Nach den Angaben der ÖNORM B 1995-1-1:2023 dürfen Klebstoffe gemäss SN EN 15425:2023 und Klebstoff Typ I gemäss SN EN 301:2023 (Klebstoffe für dünne Fugen) bei einer maximalen Klebfugendicke von 0.3 mm verwendet werden. Daher ist die wichtigste Voraussetzung für eine erfolgreiche Verklebung zwei ausreichend glatte, plane Oberflächen (Kairi, 2000).

1.3 Rahmenbedingungen des Projektes

1.3.1 Zielsetzung

Die Anwendung der Pressverklebung für Holzwerkstoffe erfreut sich in der Schweiz grosser Beliebtheit. Aktuelle Pressverklebungen sind normativ für Schrauben (Schraubpressverklebung) definiert. Auch die Nagelpressverklebung wurde 1988 normativ verankert, wurde jedoch 2004 bei der Überarbeitung der Norm wieder entfernt. Für einen optimalen Verbund zwischen zwei Holzbauteilen wird während des Aushärtens von Klebstoffen ein spezifischer Pressdruck in der Klebefuge benötigt. Dieser dient zur Limitierung der Klebfugendicke, welche durch das Klebstoffsystem vorgegeben ist.

Um Kosten und Material im Bereich der Verbindungsmittel einsparen zu können, ist die alternative Verwendung von Nägeln oder bevorzugt Klammern an der Stelle von Schrauben denkbar. Der Mindestpressdruck sollte zum Zeitpunkt des Einbringens mittels Hand-Applikationsgeräten erreicht werden. Dies ermöglicht auch kleineren und mittelständigen Unternehmen ohne kostenintensive Anschaffungen und grosse technische Anpassungen den Zugang und die Anwendung der Pressverklebung.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung von alternativen Verbindungsmitteln mit dem Fokus auf der Klammer, da diese ökologische sowie ökonomische Vorteile gegenüber der Schraube aufweist. Ebenso sollen die Rahmenbedingungen, unter welchen die Anwendung der Klammerpressverklebung risikofrei ist, evaluiert werden.

Abschliessend soll im Rahmen einer Anwenderrichtlinie die Rahmenbedingungen der Pressverklebung mittels verschiedener Verbindungsmittel für eine risikofreie Anwendung verfasst werden.

1.3.2 Projektstruktur

Das Projekt war unterteilt in die folgenden Arbeitsschritte:

1. Beurteilung verschiedener Klammern sowie Klammerkonfigurationen für die Pressverklebung
2. Untersuchen von unterschiedlichen Klammer- sowie Klebstoffkonfigurationen der Pressverklebung im Rahmen von kleinformatigen Laborverklebungen
3. Prüfung der optimierten Verklebungskonfigurationen im Rahmen von grossformatigen Praxisverklebungen
4. Untersuchung des Einflusses von Produktionstoleranzen auf die Klebefuge bei Deckenelementen mittels grossformatiger Labor- sowie Praxisverklebungen

Die Arbeiten in diesem Projekt wurden vom Institut für Holzbau der Berner Fachhochschule in Biel ausgeführt.

1.3.3 Wirtschaftspartner

An diesem Forschungsprojekt waren folgende Wirtschaftspartner beteiligt:

- Brawand Zimmerei AG
- Collano AG
- Henkel & Cie. AG
- Holzprojekt
- Jowat Swiss AG
- Makiol Wiederkehr AG
- Prebena AG
- TechnoWood AG
- Timbatec
- Uffer AG Savognin
- Zaugg AG Rohrbach
- Zehnder Holz und Bau AG

Im Rahmen des Projektes unterstützte uns zusätzlich zu den offiziellen Wirtschaftspartnern die Firma Holzbau Oberholzer GmbH beim Durchführen von einigen Versuchsreihen.

2 Beurteilung von Verbindungsmittern für die Pressverklebung

2.1 Einleitung

Schiere et al. (2018) untersuchten eine breites Spektrum an Schrauben und Nägeln sowie einen Klammertyp hinsichtlich des resultierenden Anpressdrucks auf die zu verbindenden Bauteile. Dabei zeigte sich, dass die Klammer mit einer mittleren Anpresskraft von 173 N eine um den Faktor 6 bis 15 geringere Anpresskraft im Vergleich zu den entsprechenden Schraubentypen aufwies. Zudem wies die Klammer mit einem CoV von 48 % eine grosse Streuung auf. Um den Zielwert des Anpressdruck von 0.1 N/mm² für die Verwendung von PU-Klebstoffen erreichen zu können, ist eine Optimierung der Klammerkonfiguration erforderlich.

In diesem Kapitel werden verschiedene Klammertypen sowie Klammerkonfigurationen auf folgende Eigenschaften untersucht: die Anpresskraft, die ein- sowie zweiseitige Ausziehkraft in Anlehnung an die (SN EN 1382:2016) sowie die Kopfdurchziehkraft in Anlehnung an die SN EN 1383:2016. Sämtliche Versuchsreihen werden unter Berücksichtigung der Norm Holzbauwerke - Stiftförmige Verbindungsmitte - Anforderungen (SN EN 14592:2022) durchgeführt. Des Weiteren wird der Effekt eines Anschleifens der Klammerspitzen auf die Anpresskraft untersucht. In einem zweiten Schritt wird mit dem vielversprechenden Klammertyp Z mit stark verzinktem Stahl und der ETA-Zertifizierung (ETA-16/0101) der optimale Klammerabstand für einen möglichst hohen Anpressdruck evaluiert.

2.2 Material

2.2.1 Holz und Holzwerkstoffe

Im Rahmen der Beurteilung der Verbindungsmitte für die Pressverklebung wurde jeweils eine 27 mm Dreischichtplatte der Qualität B/C auf Konstruktionsvollholz (KVH) aus Fichte (*Picea abies*) der Qualität C24 verklammert. Dabei wurde bei dem KVH und den Decklagen der Dreischichtplatte darauf geachtet, dass die Klammer nicht direkt auf einen Ast traf.

2.2.2 Klammern

Zur Ermittlung der Eigenschaften und Leistungsfähigkeit der einzelnen Klammern wurden folgende Klammern (der Firma Prebena) verwendet, siehe Abbildung 2-1.

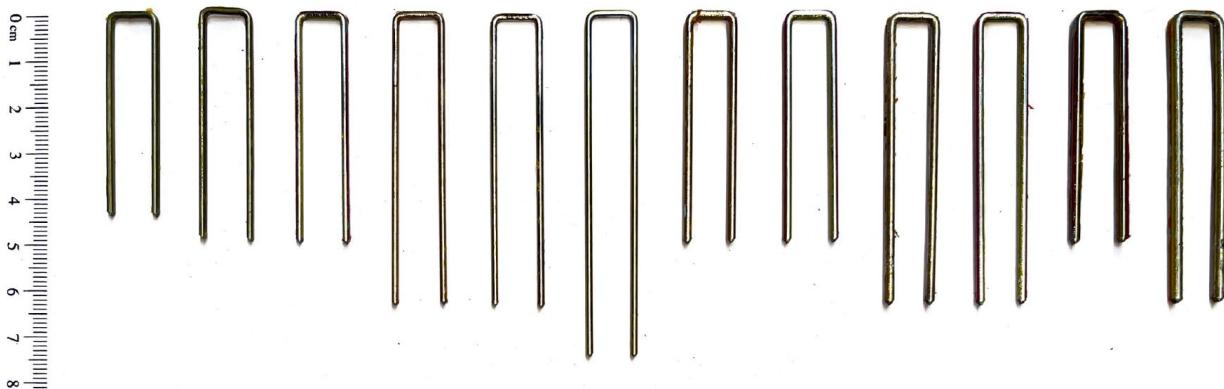


Abbildung 2-1: Geprüfte Klammern. Von links nach rechts Z44CNKHA, Z50CNKHA, Z50CSVHA-ETA, Z64CNKHA, Z64CSVHA-ETA, Z75CNKHA, Q50CNKHA, Q50CSVHA-ETA, Q63CNKHA, Q63CSVHA-ETA, QL50CSVHA-ETA, QL63CSVHA-ETA.

Die Experimente wurden in zwei Versuchsreihen durchgeführt. Die erste Phase umfasst den Druckversuch (=Ermittlung der Anpresskraft), den zweiseitigen Ausziehversuch und die gemessenen Spreizungen der Klammerspitzen beim Ausziehversuch. Die zweite Phase umfasst die Ermittlung der Kopfdurchziehkraft, die Ermittlung der Ausziehkraft/-parameter sowie der Spreizung der Klammerspitzen bei der Ermittlung der Ausziehkraft. Alle getesteten Klammern weisen die gleiche Rückenbreite auf (Tabelle 2-1). Der Unterschied zwischen den Z-, Q- und QL-Klammern besteht in der Stärke der beiden Drahtmasse. Während unterschiedliche Längen der Klammern untersucht wurden, wurde ebenfalls zwei verschiedene Beschichtungen bzw. und Harzungen untersucht. Dabei wird zwischen NK-HA (verzinkter Stahl mit Harzung) und SV-HA-ETA (stark verzinkter Stahl; spezielle Harzung; ETA-zertifiziert) unterschieden.

Tabelle 2-1: Geprüfte Klammern. NK = verzinkter Stahl, SV = stark verzinkter Stahl.

Klammer	Länge [mm]	Rückenbreite [mm]	Drahtmass 1 [mm]	Drahtmass 2 [mm]	Beschichtung	Harzung
Z44CNKHA	44	11.2	1.4	1.6	NK	HA
Z50CNKHA	50	11.2	1.4	1.6	NK	HA
Z50CSVHA-ETA	50	11.2	1.4	1.6	SV	HA-ETA
Z64CNKHA	64	11.2	1.4	1.6	NK	HA
Z64CSVHA-ETA	64	11.2	1.4	1.6	SV	HA-ETA
Z75CNKHA	75	11.2	1.4	1.6	NK	HA
Q50CNKHA	50	11.2	1.64	1.87	NK	HA
Q50CSVHA-ETA	50	11.2	1.64	1.87	SV	HA-ETA
Q63CNKHA	63	11.2	1.64	1.87	NK	HA
Q63CSVHA-ETA	63	11.2	1.64	1.87	SV	HA-ETA
QL50CSVHA-ETA	50	11.2	1.8	2.08	SV	HA-ETA
QL63CSVHA-ETA	63	11.2	1.8	2.08	SV	HA-ETA

2.3 Methode

Die Prüfserien gliedern sich nach der Orientierung, dem Winkel zwischen dem Klammerücken und der Holzfaser im Vollholz bzw. der Holzfaser in der Decklage einer Dreischichtplatte. Es werden die drei Orientierungen 90°, 0° und 45° lt. Abbildung 2-2 berücksichtigt.

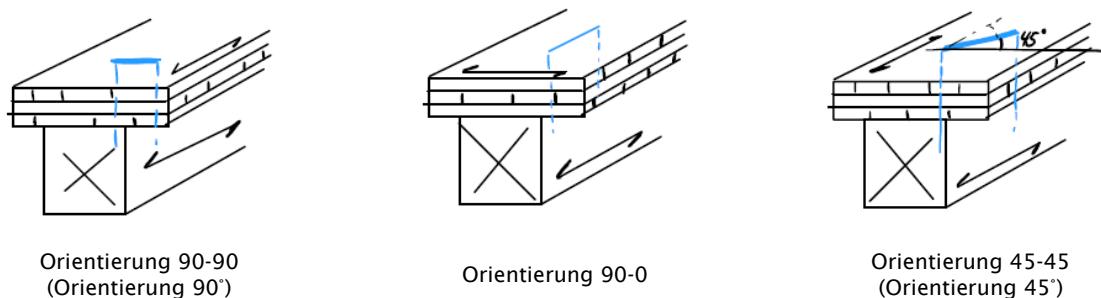


Abbildung 2-2: Orientierung des Klammerrückens in Relation zur Faserrichtung in der Dreischichtplatte und dem Vollholz.

Beim Versuch zur Beurteilung der Ausziehkraft bzw. des Ausziehparameters (siehe Abschnitt 2.3.2 und 2.3.3) wird für die Eintreibrichtung der Klammer zwischen radialer und tangentialer Richtung unterschieden. Diese Unterscheidung basiert auf Stellung der Klammerschenkel relativ zu den Fasern der Holzstruktur. In der nachfolgenden Abbildung 2-3 sind die beiden Richtungen dargestellt.

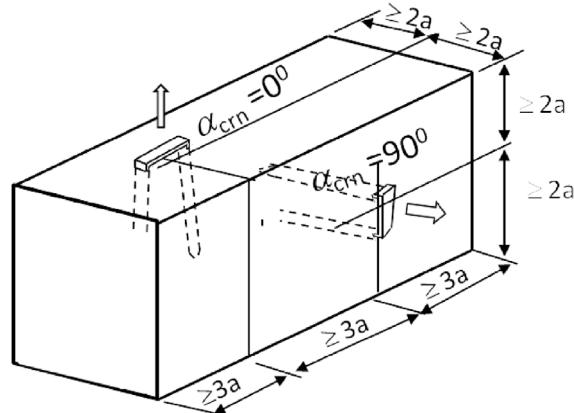
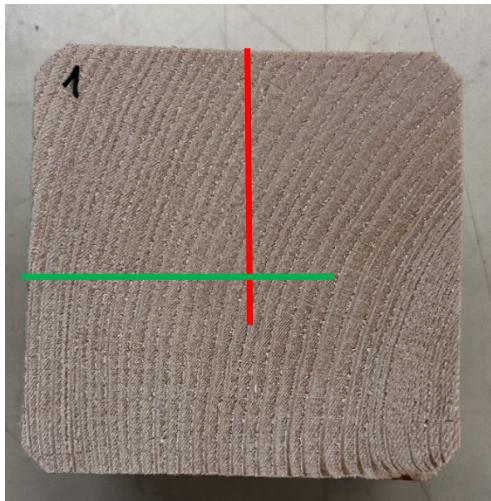


Abbildung 2-3: Links: Bildliche Darstellung der radialen (grün) und tangentialen (rot) Richtung der Klammerschenkel relativ zur Holzfaser bzw. der Einschussrichtung. Rechts: Prüfkörper für die Prüfung auf Herausziehen — Last rechtwinklig zur Faserrichtung (SN EN 1382:2016).

Die vollständige Nomenklatur der Prüfkörper in Kapitel 2 ist folgendermassen definiert:

Z50CSVHA-ETA 90-90 radial

Z50CSVHA-ETA	Definition der Klammer; Z44CNKHA, Z50CNKHA, Z50CSVHA-ETA, Z64CNKHA, Z64CSVHA-ETA, Z75CNKHA, Z75CSVHA-ETA, Q50CNKHA, Q50CSVHA-ETA, Q63CNKHA, Q63CSVHA-ETA, QL50CSVHA-ETA oder QL63CSVHA-ETA
90-90	Definition der Orientierung; 90-90, 90-0 oder 45-45
radial	Definition der anatomischen Holzrichtung; radial oder tangential

Sofern gewisse Parameter bei den Versuchen nicht existieren, werden diese bei der Nomenklatur aus- sen vor gelassen.

2.3.1 Anpresskraft

2.3.1.1 Einzelversuche

In diesen Versuchen wurde die zwischen einer Dreischichtplatte und dem zu verbindenden Vollholz vorherrschende Kraft zum Zeitpunkt des Einschiessens ermittelt und über eine Dauer von 60 bis 180 Sekunden nach Einbringen der Klammer mit einer Frequenz von 100 Hz aufgezeichnet. Dazu wurden jeweils 3 Kraftmessdosen (10 kN Burster 8402 6010) in Ausfrässungen im Balken angebracht, wobei ein Überstand von ein 1-2 Millimetern (diente als Abstand von Vollholzoberfläche zu der auf den Kraftmessdosen aufgelegten Dreischichtplatte) nach dem Einlegen der Kraftmessdosen vorhanden war (siehe Abbildung 2-4). Die zu testende Klammer wurde jeweils als Verbindungsmitel zwischen Dreischichtplatte und Vollholz innerhalb des durch die Kraftmessdosen aufgespannten Dreiecks eingetrieben. Zur Aufzeichnung der Kraft wurden die Kraftmessdosen mit einem HBM-Messverstärker angeschlossen und die Daten mit der Software Catman® aufgezeichnet. Für jede getestete Klammer wurden jeweils 5 Versuche durchgeführt. Es ist zu beachten, dass in der mittleren Lage der Dreischichtplatte im Vorhinein nicht erkennbar war, ob Holzmerkmale wie Äste, Harzgallen, Reaktionsholz etc. vorhanden sind.

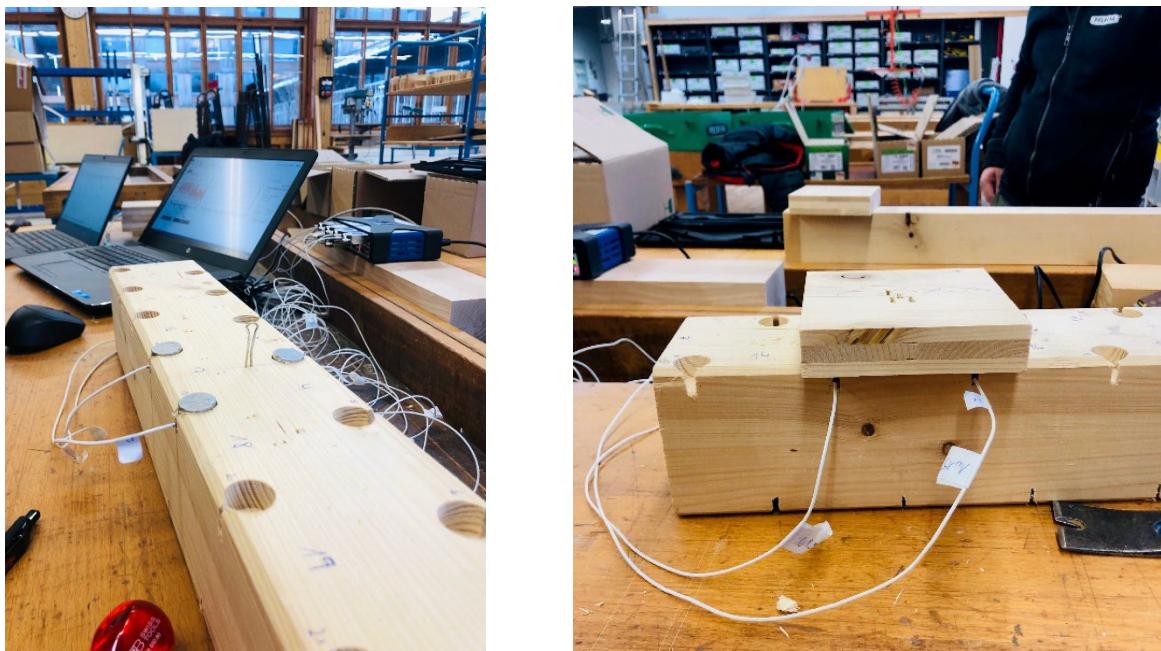


Abbildung 2-4: Prüfaufbau für den Druckversuch.

Neben den in Abbildung 2-1 gezeigten handelsüblichen Klammentypen wurden für dieses Projekt Klammen mit angeschliffenen Spitzen hergestellt, um die Auswirkungen verschiedener Anschleifwinkel auf die Anpresskraft untersuchen zu können. Dabei wurden die Klammen mit 30° sowie 60° angeschliffen und mit nicht angeschliffenen Klammen verglichen, siehe Abbildung 2-5. Insgesamt wurden 15 Versuche pro Konfiguration durchgeführt. Dabei wurden die verschiedenen Anschleifwinkel direkt nebeneinander ins Holz eingeschossen, um möglichst die gleichen Holzeigenschaften für die verschiedenen Winkel vorzufinden.

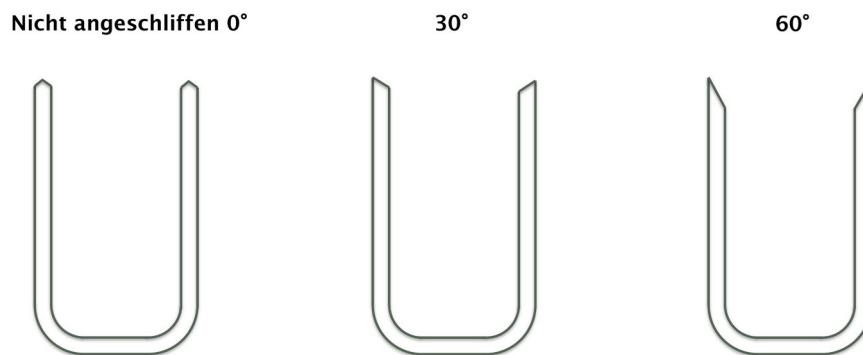


Abbildung 2-5: Zeichnung der Klammen mit einem Schleifwinkel von 30° und 60° und nicht angeschliffenen Klammen (0°).

2.3.1.2 Gruppenversuche

Kälin und Hadorn (2023) untersuchten im Rahmen einer Semesterarbeit den optimalen Klammerabstand zum Erreichen des höchstmöglichen Anpressdrucks. Dazu wurde eine 27 mm Dreischichtplatte mit einem 80 mm breiten KVH-Balken einreihig verklammert. Zur Kraftmessung wurden 4 Kraftmessdosen verwendet, die wie in den Einzelversuchen in Ausfrässungen zwischen Balken und Dreischichtplatte angebracht wurden. Zwischen den Kraftmessdosen wurden jeweils 10 Klammen mit Abständen von 20 bis 80 mm eingebracht, wobei jeder Abstand in jeweils 6 Versuchen geprüft wurde.

Zur Evaluation des Unterschiedes zwischen einreihig und zweireihig geklammerten Ständern wurde der optimale Klammerabstand der einreihigen Versuche auch für die zweireihige Verklammerung verwendet. Dabei wurden die Kräfte von jeweils 20 Klammen aufgezeichnet. Das Klammerbild und die Klammerabfolge können Abbildung 2-7 entnommen werden. Bei der zweireihigen Klammerung wurde

zuerst eine Reihe komplett verklammert und in einem zweiten Schritt die zweite Reihe. Dabei wurde dieselbe Klammerabfolge wie bei der einreihigen Verklammerung verwendet.



Abbildung 2-6: Klammerbild der einreihigen Verklammerung von 10 Klammern.

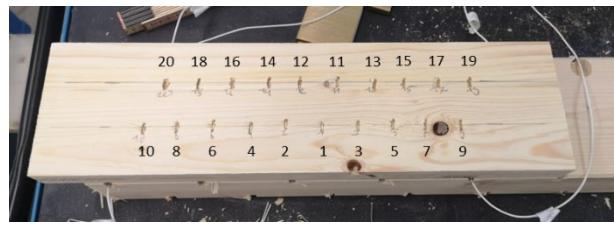


Abbildung 2-7: Klammerbild der zweireihigen Verklammerung von 20 Klammern.

2.3.2 Ermittlung des Ausziehparameters mittels einseitigem Ausziehversuch

Die Bestimmung der Ausziehtragfähigkeit bzw. des Ausziehparameters wird in Anlehnung an SN EN 1382:2016 durchgeführt. Dafür werden Prüfkörper aus Vollholz mit den Massen 90 mm x 90 mm x 70 mm verwendet, wobei die kleinste Dimension derjenigen in Faserrichtung entspricht (siehe Abbildung 2-3). Zur Berechnung der Ausziehkraft pro Orientierung wird jeweils die Hälfte der Tests in radialer und tangentialer Richtung durchgeführt. Die Ausziehkraft ergibt sich dann aus der Mittelung der Kräfte in beide Richtungen. Im Rahmen dieses Versuches wurden Experimente für die Orientierungen von 45° (Orientierung 45) und 90° (Orientierung 90) und die beiden Richtungen (tangential und radial) durchgeführt. Zur Ermittlung der Ausziehkraft bzw. des Ausziehparameters wurden insgesamt 10 Klammern getestet (siehe Tabelle 2-1). Insgesamt wurden 40 Konfigurationen (10 Klammern, 2 Orientierungen und 2 Richtungen) mit jeweils 5 Klammern pro Konfiguration getestet.

Damit nach dem Einbringen der Klammer in den Prüfkörper der Klammerrücken mit einer Klemme (siehe Abbildung 2-8) gegriffen werden kann, wurde die Klammer mit einem kleinen Überstand des Klammerrückens zur Oberfläche des Prüfkörpers eingebbracht. Dieser Überstand wurde zur Ermittlung des Ausziehparameters erfasst und in die spätere Auswertung miteinbezogen. Da die Verbindung zwischen Klammer und Klemme nicht schlupffrei ist, kann der tatsächliche Weg vom aufgezeichneten Weg abweichen. Die Ausziehtragfähigkeit entspricht der maximalen Ausziehkraft F_{max} . In einem ersten Schritt wird die maximale Ausziehkraft mit der Formel (2-1) nach dem Anhang der SN EN 14592:2022 auf die Referenzholzdichte von 350 kg/m³ normiert. Der aus der Ausziehkraft resultierende Ausziehparameter f_{ax} wird abweichend von der Norm SN EN 1382:2016 mit der Formel (2-2) bestimmt. Normativ würde die Eindringtiefe l_p im Nenner mit dem Drahtdurchmesser multipliziert werden. Da ein wesentlicher Unterschied zwischen den Klammervarianten (Q, QL und Z) jedoch ihr Drahtdurchmesser ist, wird die abweichende Berechnungsmethode gewählt, um die Differenzen zwischen den Varianten sichtbarer zu machen.

$$F_{max,n} = F_{max} \cdot \left(\frac{\rho_m}{\rho_{m,sel}} \right)^c \quad (2-1)$$

F_{max} Maximalkraft [N]

ρ_m 5%-Quantil der Rohdichte für die Festigkeitsklasse C24 = 350 [kg/m³]

$\rho_{m,sel}$ die mittlere Holzrohdichte aller ausgewählten Stücke

c Faktor, der die Beobachtungen von ρ_m korrigiert. Hier 1.0 eingesetzt.

$$f_{ax} = \frac{F_{max,n}}{l_p} \quad (2-2)$$

$F_{max,n}$ auf die Rohdichte normierte Maximalkraft [N]

l_p Eindringtiefe des Verbindungsmittel inklusive der Spitze [mm]



Abbildung 2-8: Prüfaufbau zur Aufzeichnung der Ausziehkraft/-parameter einer Klammer.

2.3.3 Zweiseitiger Ausziehversuch

In diesem Abschnitt wird der zweiseitige Ausziehversuch betrachtet. Beim zweiseitigen Ausziehversuch geht es darum, die Kraft zu ermitteln, die für das Ausziehen einer Klammer aufgebracht werden muss. Zur Herstellung des Prüfkörpers wurde jeweils eine Dreischichtplatte auf den beiden gegenüberliegenden Seiten eines Massivholzstückes mittels einer Klammer verbunden (siehe schematische Darstellung in Abbildung 2-9). Dieser Prüfkörper wurde dann in einer Universalprüfmaschine (Abbildung 2-10) auf die maximale Ausziehkraft der Klammern geprüft. Basierend auf den Gegebenheiten des Versuchsaufbaus wird die schwächere der beiden vorliegenden Verbindungen im Prüfkörper gemessen. Das erhaltene Resultat beschreibt somit die Kraft derjenigen Klammer, die ausgezogen werden konnte. Die andere Klammer weist eine Ausziehkraft grösser der gemessenen Kraft auf.

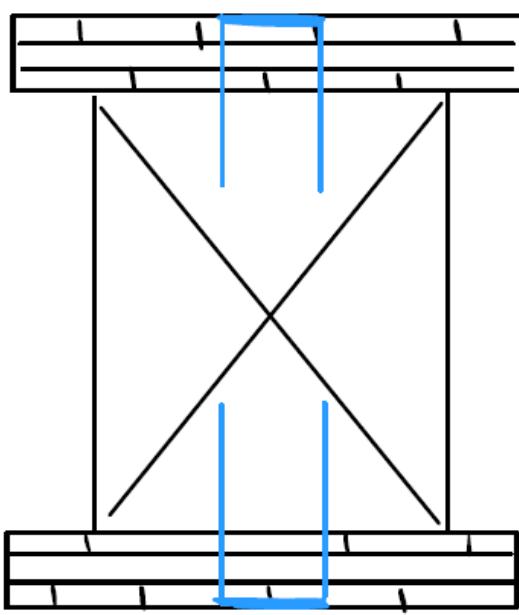


Abbildung 2-9: Schematischer Aufbau des Prüfkörpers für den zweiseitigen Ausziehversuch.



Abbildung 2-10: Eingespannter Prüfkörper für den zweiseitigen Ausziehversuch.

Basierend auf dem Versuchsaufbau entspricht die grösste gemessene Kraft der schwächeren der beiden Verbindungen im gleichen Prüfkörper. Dadurch kann lediglich der schwächeren Verbindung ein Absolutwert zugeordnet werden. Aufgrund einer Prüfkörperanzahl von $n = 5$ ist eine Auswertung mit einer «survival function» nicht aussagekräftig. Aus diesem Grund wird hier nicht weiter darauf eingegangen. Für die Auswertungen wurde im weiteren Verlauf lediglich die Ausziehtragfähigkeit verwendet.

2.3.4 Ermittlung des Kopf-Durchziehparameters

Im zweiseitigen Ausziehversuch konnte nicht explizit zwischen Ausziehkraft und Kopfdurchziehkraft unterschieden werden, da durch den Experimentaufbau beide Einflüsse gleichzeitig aufgezeichnet wurden. Deshalb wurden zwei weitere Experimente durchgeführt, um die Ausziehkraft (bzw. den Ausziehparameter) und die Kopfdurchziehkraft separat zu prüfen.

Um die Kopfdurchziehkraft zu bestimmen, in Anlehnung an die SN EN 1383:2016 angewendet. Aufgrund des Prüfaufbaus (siehe Abbildung 2-12) konnten die verlangten Dimensionen der 27 Millimeter dicken Dreischichtplatte (siehe Abbildung 2-11) nicht eingehalten werden. Statt den vorgeschriebenen Mindestmassen von 108 mm x 108 mm wurden Prüfkörper mit einer Dimension von 95 mm x 95 mm x 27 mm verwendet. In diesem Experiment wurden nur die Orientierungen von 45° (Orientierung 45) und 90° (Orientierung 90) berücksichtigt. Insgesamt wurden 9 unterschiedliche Klammern für das Experiment verwendet (siehe Tabelle 2-1). Die Klammer Z75CNKHA wurde für dieses Experiment nicht betrachtet, da sie sich nur in der Länge von der Z50CNKHA und Z64CNKHA Klammer unterscheidet. Für jede der 18 Konfigurationen (9 Klammern und 2 Orientierungen resultieren in 18 Kombinationen bzw. Konfigurationen) wurden 5 Klammern getestet. Für die Auswertungen wurde die auf die Referenzholzdichte normierte Kopfdurchziehtragfähigkeit $F_{max,n}$ verwendet, siehe Formel (2-1).

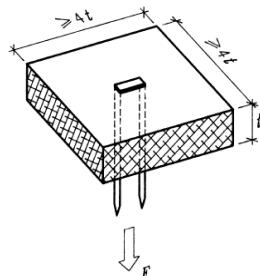


Abbildung 2-11: Prüfkörper zur Ermittlung der Kopfdurchziehkraft einer Klammer gemäss SN EN 1383:2016.

Die Dreischichtplatte wird in der Prüfapparatur festgehalten, während die Klammerschenkel in einer Klemme festgeklemmt werden.



Abbildung 2-12: Prüfaufbau zur Ermittlung der Kopfdurchziehkraft.

2.3.5 Beurteilung der Spreizung durch Röntgenstrahlen

In den Prüfserien zur Bestimmung der maximalen Ausziehkräfte bzw. -parameter der Klammern wurde jeweils die Spreizungen der Klammern nach dem Ausziehen gemessen. Für jede Klammer wurden dann die Spreizungen für die verschiedenen Orientierungen (45° und 90°) sowie der zwei Einbringrichtungen (radial und tangential) in einem Diagramm dargestellt.

2.4 Ergebnisse

Zur übersichtlichen Darstellung der Datenverteilung werden im folgenden Kapitel Boxplots verwendet, siehe Abbildung 2-13. Dabei stellt die Box den Interquartilsabstand dar, d. h. den Bereich zwischen dem ersten und dritten Quartil (= 50 % der Daten). Darüber hinaus werden der Mittelwert (x), der Median (-) und die Ausreisser (+) dargestellt. Die beiden «Whisker» (unterer Whisker, oberer Whisker) gehen bis zum grössten bzw. kleinsten Datenpunkt, der sich im 1,5-fachen Interquartilsabstand von den Rändern der Box befindet. Diese Darstellung bietet eine kompakte Übersicht über zentrale Tendenz, Streuung und Symmetrie der Daten.

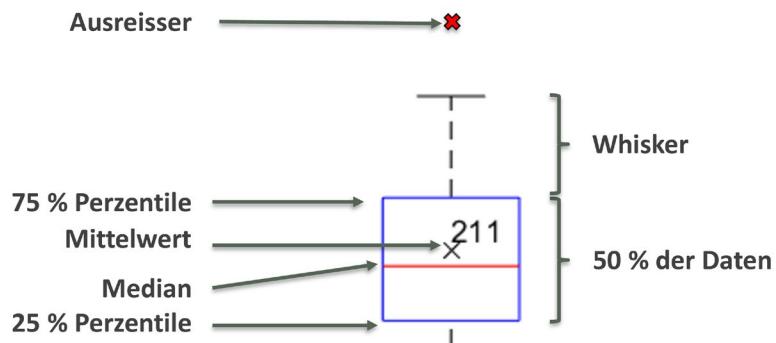


Abbildung 2-13: Bezeichnungen der Attribute der verwendeten Boxplots

2.4.1 Anpresskraft

2.4.1.1 Einzelversuche

Mit Abbildung 2-14 wird eine Beispieldauswertung in Form eines Liniendiagramms für die aufgezeichneten Versuche der Klammer Q50CNKHA und einer Orientierung von 90-90 gezeigt.

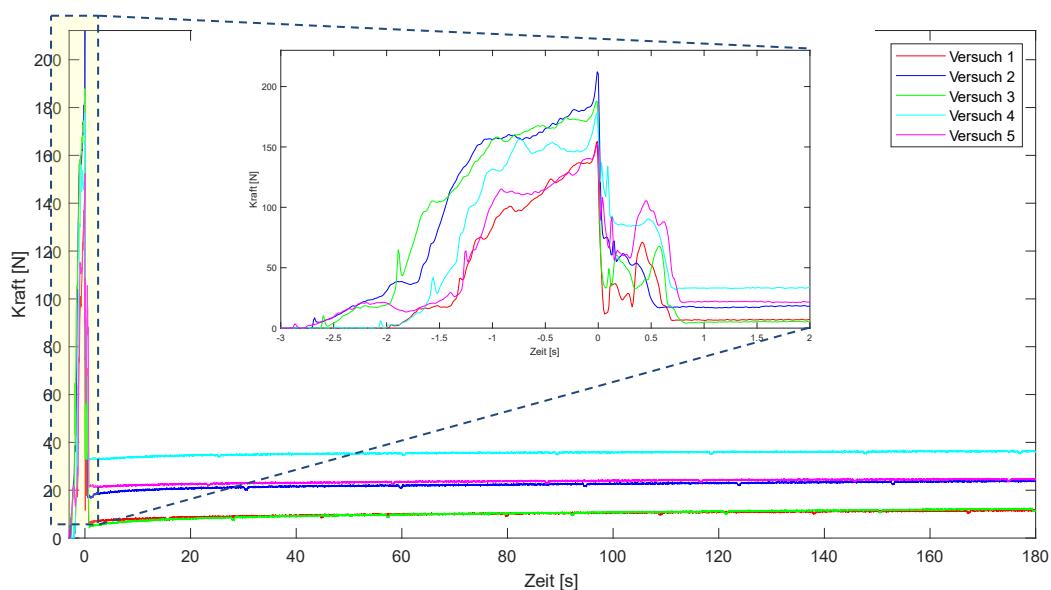


Abbildung 2-14: 5 Kraftverläufe mit der Klammer Q50CNKHA und einer Orientierung 90-90.

Der über 180 Sekunden aufgezeichnete Kraftverlauf zeigt für alle Klammern, dass die gemessene Kraft zwischen dem Vollholz und der Dreischichtplatte zum Zeitpunkt des Einschiessens (Nullpunkt der im Diagramm dargestellten 180 Sekunden) der Klammer am höchsten ist. Diese Kraft fällt dann sofort ab auf ein bedeutend tieferes Niveau. Über die aufgezeichneten von 20 bis 180 Sekunden nach dem Einschiessen zeigt die Kraft nur noch minimale Schwankungen bzw. verändert sich nicht mehr gegen Ende der Messung.

Die nach 20 Sekunden erreichten Kräfte (F_{20}) aller Experimente werden in Abbildung 2-15 bis Abbildung 2-17 als Boxplots für die verschiedenen Orientierungen dargestellt, wobei jeweils 5 Versuche pro Klammer (bzw. die Endkräfte nach 20 Sekunden jedes Diagramms gemäss Abbildung 2-14) in einem Boxplot dargestellt sind.

Abbildung 2-16 fasst die Kräfte F_{20} für die Orientierung 90-90 zusammen. Längere Klammern innerhalb eines Klammertyps (Z-, Q- bzw. QL-Klammer) weisen eine höhere Endkraft nach 20 Sekunden auf. Eine Ausnahme stellt hier die Z50CSVHA-ETA Klammer dar, die einerseits einen tieferen Wert als die nicht ETA zertifizierte Klammer Z50CNKHA und andererseits auch noch eine tiefere Endkraft als die um 6 Millimeter kürzere Z44CNKHA erreicht. Bei den Q-Klammern werden im Vergleich höhere Kräfte nach 20 Sekunden für die Q50CSVHA-ETA sowie Q63CSVHA-ETA Klammern registriert als für die nicht ETA zertifizierte Klammern Q50CNKHA und Q63CNKHA. Die Standardabweichung zeigt grosse Differenzen zwischen den einzelnen Klammern, speziell die Q63CNKHA, Q63CSVHA-ETA und QL63CSVHA-ETA weisen eine breite Streuung auf. Vergleicht man die Q-Klammern mit den Z-Klammern, weisen letztere höhere Mittelwerte nach 20 Sekunden auf. Davon ausgenommen ist der Vergleich der beiden ETA zertifizierten Klammern Z50CSVHA-ETA und Q50CSVHA-ETA, wobei der Durchschnittswert der Q-Klammern höher ist als derjenige der Z-Klammer.

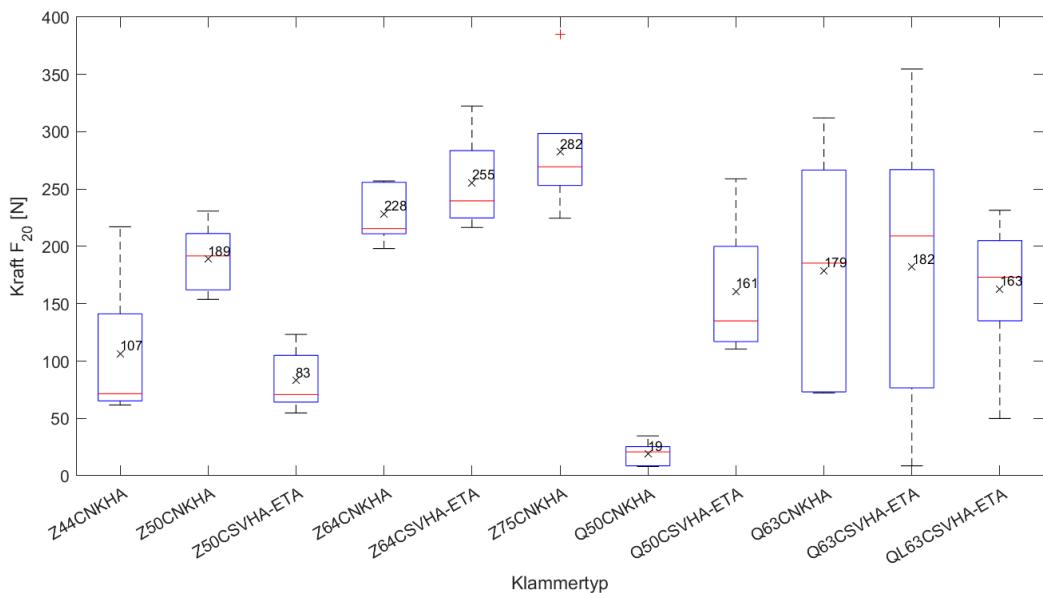


Abbildung 2-15: Auswertung der Kräfte nach 20 Sekunden (F_{20}) für die Orientierung 90-90 mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot.

Abbildung 2-16 fasst die Kräfte F_{20} für die Orientierung 90-0 zusammen. Je länger die nicht zertifizierte Klammer eines Klammertyps (Z- bzw. Q-Klammer), desto höhere Kräfte wurden nach 20 Sekunden aufgezeichnet. Werden die ETA zertifizierten Klammern mit den nicht ETA zertifizierten Klammern der gleichen Länge und des gleichen Klammertyps verglichen, dann ist ersichtlich, dass die ETA zertifizierten Klammern einen höheren Mittelwert erreichen (16 N höher bei den Z-Klammern, 101 N höher bei den Q-Klammern). Der Vergleich zwischen den Z50-ETA- bzw. Z64- und den Q50-ETA- bzw. Q63-Klammern zeigt, dass letztere Klammern eine höhere durchschnittliche Kraft aufbringen. Der Vergleich zwischen der Q50- und Z50-Klammer zeigt jedoch, dass die Z-Klammer eine höhere Anpresskraft erzielt.

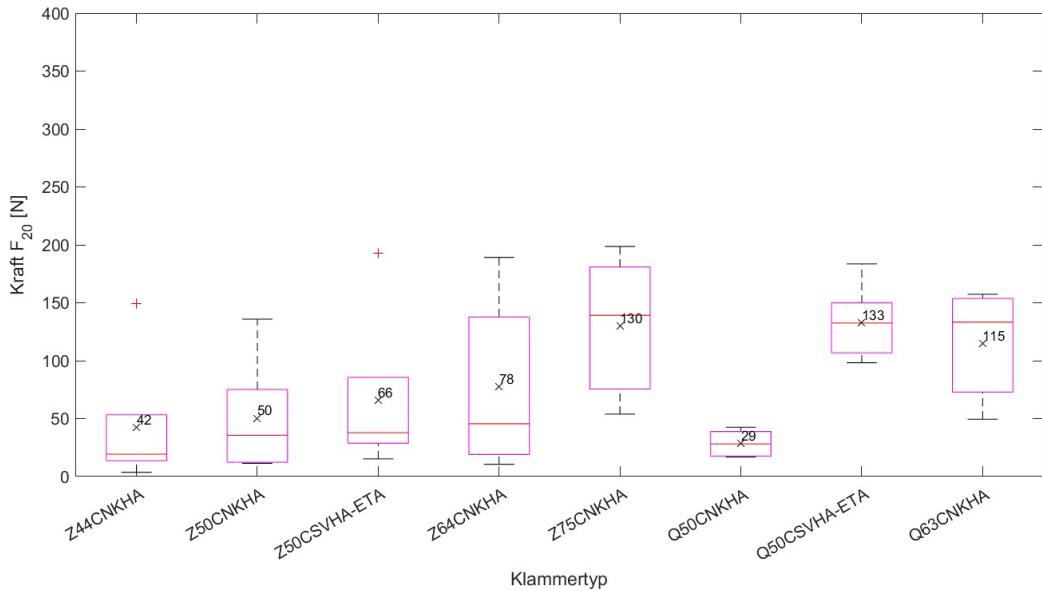


Abbildung 2-16: Auswertung der Kräfte nach 20 Sekunden (F_{20}) für die Orientierung 90-0 mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot.

Der Vergleich zwischen der Orientierung 90-90 und der Orientierung 90-0 zeigt, dass ein höherer Mittelwert für die Endkraft in allen Klammern, mit Ausnahme der Q50CNKHA und Z50CNKHA, erreicht wird. Aufgrund der sehr tiefen Werte wurde diese Klammeranordnung nicht bei sämtlichen Klammern geprüft und weiterverfolgt. Stattdessen wurden weitere Versuche mit praxisnaher Orientierung von 45-45 durchgeführt.

Für die Orientierung 45-45 in Abbildung 2-17 ist zu sehen, dass längere Klammern eines Klemmertyps zu einer höheren mittleren Kraft F_{20} führen. Einzig für die Klammern Z50CNKHA und Z64CNKHA ist keine Abweichung im Mittelwert zu sehen. Zudem zeigt der Mittelwert der Klammer QL63CSVHA-ETA eine sehr geringe Endkraft nach 20 Sekunden auf. Weiter weist die Klammer Z50CSVHA-ETA einen tieferen Mittelwert für F_{20} auf als die Klammer Z50CNKHA, während die Klammer Q50CSVHA-ETA einen höheren Mittelwert verglichen mit der Klammer Q50CNKHA aufweist. Der Vergleich zwischen den Z- und Q-Klammern zeigt, dass die Mittelwerte der Endkraft nach 20 Sekunden für die Q-Klammern tiefer sind als die für die Z-Klammern.

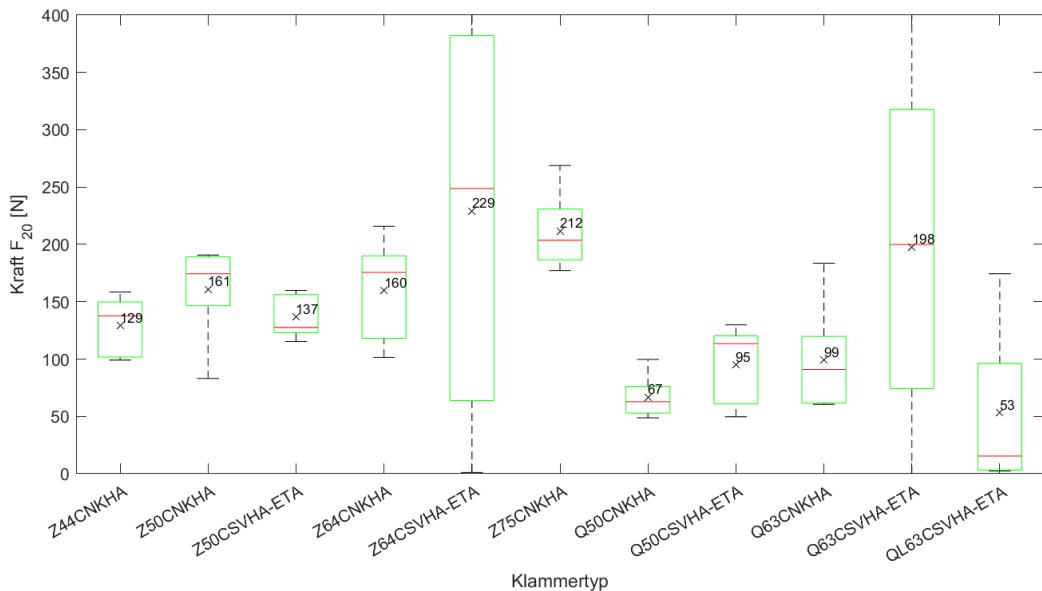


Abbildung 2-17: Auswertung der Kräfte nach 20 Sekunden (F_{20}) für die Orientierung 45-45 mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot.

Der Vergleich zwischen den Orientierungen 90-90 und 45-45 in Abbildung 2-19 zeigt, dass die Klammern Z44CNKHA, Z50CSVHA-ETA, Z64CSVHA-ETA und Q50CNKHA bei einer Orientierung 45-45 höhere Medianwerte aufweisen als bei der Orientierung 90-90. Vergleicht man die Z-, Q- und QL-Klammer über sämtliche Versuche, zeigt die Z-Klammer im Durchschnitt die höchsten Medianwerte für F_{20} und somit das grösste Potential für Klammerpressverklebungen. Wobei auch bei diesem Klamertyp sehr grosse Streuungen festgestellt wurden, im Speziellen bei der Klammer Z64CSVHA-ETA mit der Orientierung 45-45.

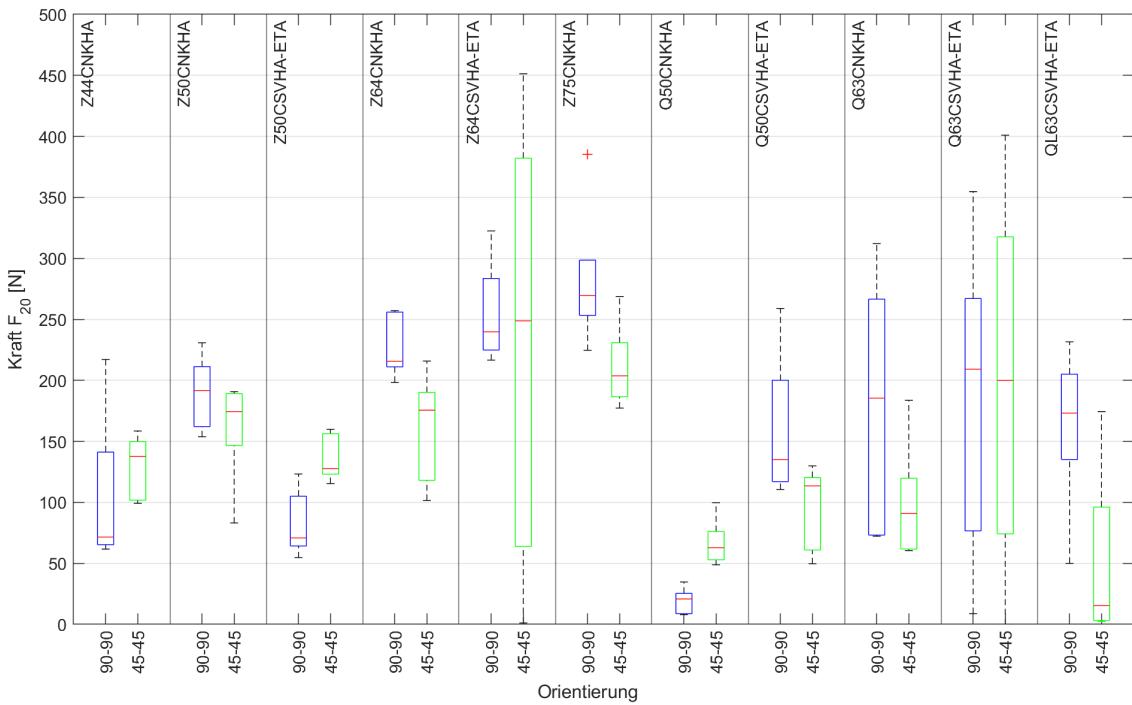


Abbildung 2-18: Auswertung der Kräfte nach 20 Sekunden (F_{20}) für alle Orientierungen mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot.

In Abbildung 2-19 bis Abbildung 2-21 sind für die drei Orientierungen die maximale Kraft zum Zeitpunkt 0 (F_0) und die Kraft nach 180 Sekunden (F_{180}) als Punktepaar in einem Diagramm dargestellt.

Abbildung 2-19 zeigt, dass bei einer 90-90 Orientierung eine Korrelation zwischen F_0 und F_{180} vorhanden ist. Über alle Klammern gemeinsam betrachtet zeigt sich eine starke lineare Regression zwischen den aufgezeigten Kräften mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.89$.

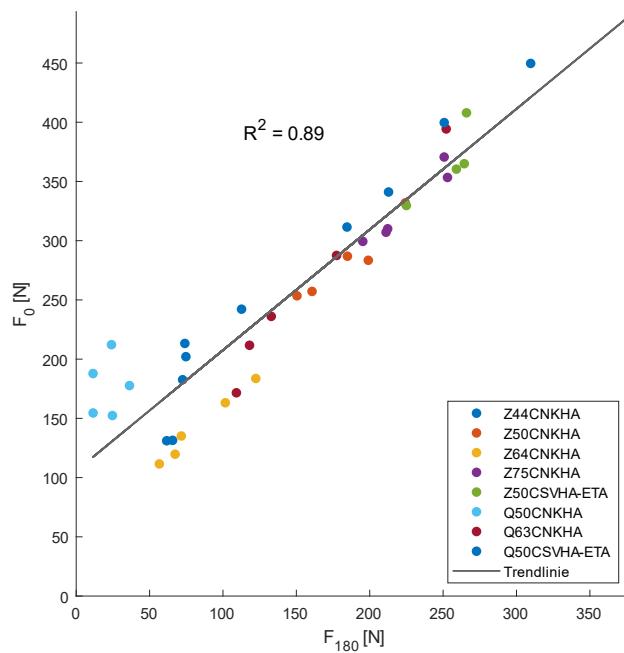


Abbildung 2-19: Punktpaare für die Orientierung 90-90 mit der Kraft nach 180 Sekunden (F_{180}) auf der x -Achse und der Kraft zum Zeitpunkt 0 (F_0) auf der y -Achse. 5 Punktpaare pro Klammer.

Für die Orientierung 90-0 zeigt der untere Bereich (0 N – 55 N) keinen klaren linearen Zusammenhang zwischen F_0 und F_{180} (Abbildung 2-20). Daher ergibt sich für alle Datenpunkt ein Bestimmtheitsmaß R^2 von lediglich 0.38, obwohl im Bereich ab $F_{180} = \text{ca. } 80 \text{ N}$ ein stärkerer linearer Zusammenhang ersichtlich ist.

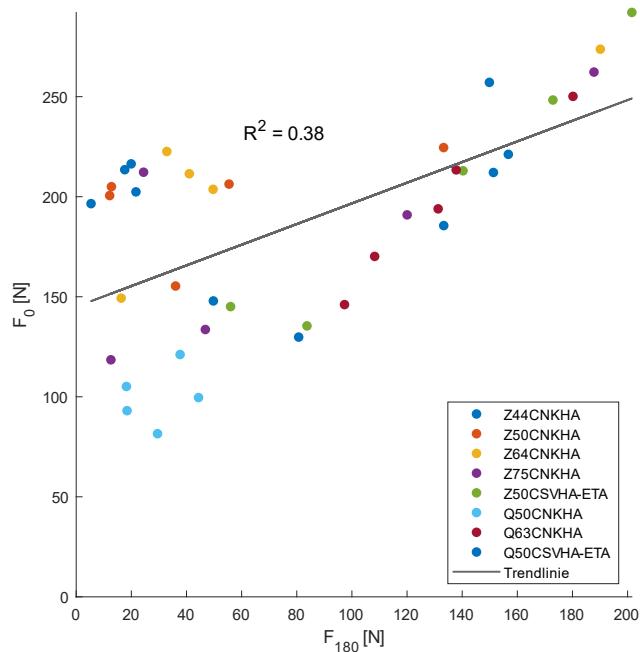


Abbildung 2-20: Punktpaare für die Orientierung 90-0 mit der Kraft nach 180 Sekunden (F_{180}) auf der x -Achse und der Kraft zum Zeitpunkt 0 (F_0) auf der y -Achse. 5 Punktpaare pro Klammer.

Abbildung 2-21 zeigt die Kräfte F_0 und F_{180} dargestellt für die Orientierung 45-45, dabei zeigt sich über alle Klammern gemeinsam betrachtet eine nahezu perfekte lineare Regression zwischen den aufgezeigten Kräften mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.97$

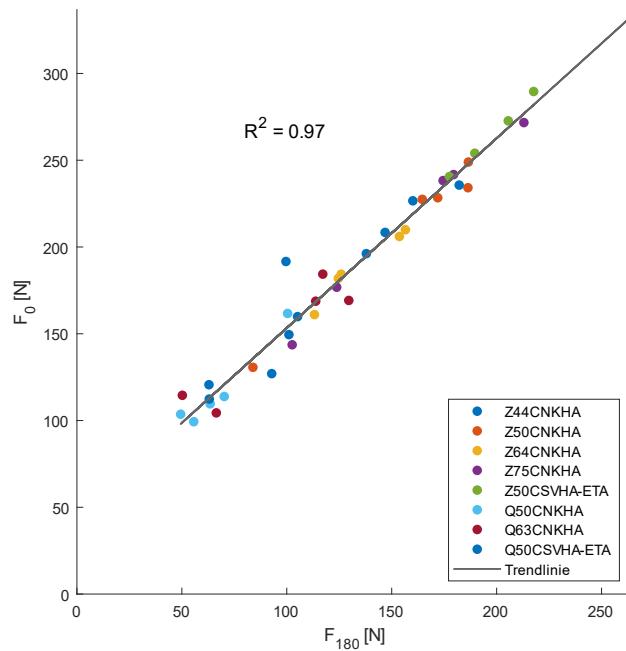


Abbildung 2-21: Punktepaare für die Orientierung 45-45 mit der Kraft nach 180 Sekunden (F_{180}) auf der x -Achse und der Kraft zum Zeitpunkt 0 (F_0) auf der y -Achse. 5 Punktepaare pro Klammer.

Abbildung 2-22 und Abbildung 2-23 zeigen die Korrelation zwischen F_0 und F_{20} bei einer 90-90 Orientierung der verschiedenen angeschliffenen Klammern Q63CSVHA-ETA und Z64CSVHA-ETA. Dabei zeigt sich eine starke lineare Korrelation zwischen der Anfangskraft F_0 und der Kraft nach 20 Sekunden F_{20} . Diese Linearität ist vergleichbar mit der Linearität der Abbildung 2-19, welche die Abhängigkeit zwischen F_0 und F_{180} von verschiedenen Klammertypen aufzeigt. Dies zeigt, dass dieselbe Abhängigkeit auch für angeschliffene Klammern gilt.

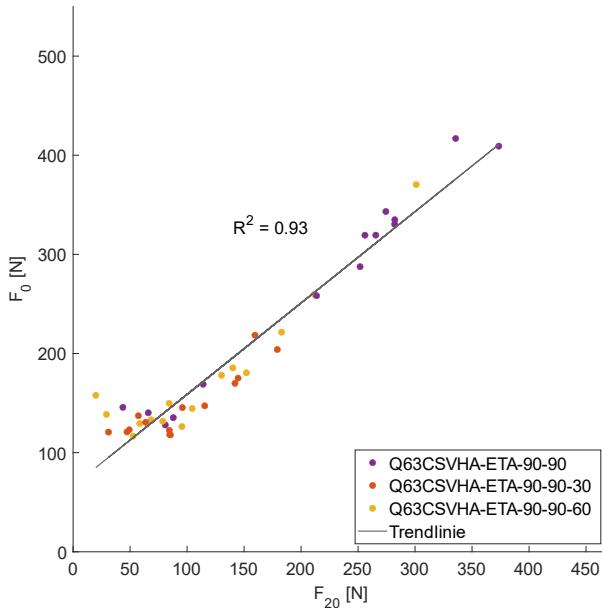


Abbildung 2-22: Punktepaare für die Orientierung Q63-90-90 mit der Kraft nach 20 Sekunden (F_{20}) auf der x -Achse und der Kraft zum Zeitpunkt 0 (F_0) auf der y -Achse. 15 Punktepaare je Konfiguration.

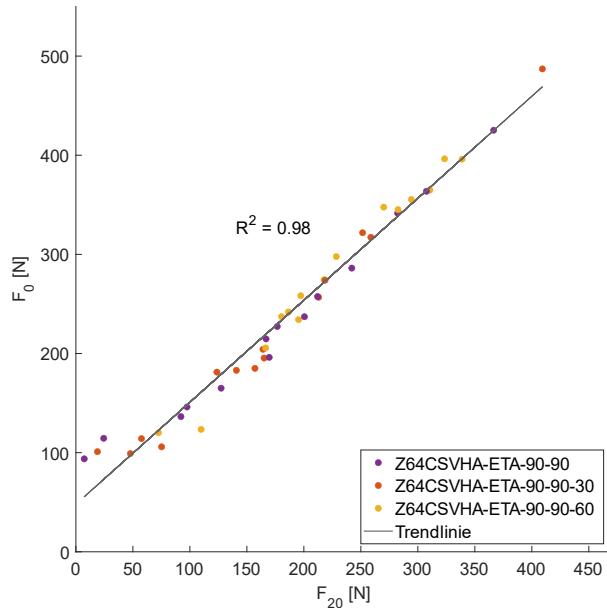


Abbildung 2-23: Punktepaare für die Orientierung Z64-90-90 mit der Kraft nach 20 Sekunden (F_{20}) auf der x -Achse und der Kraft zum Zeitpunkt 0 (F_0) auf der y -Achse. 15 Punktepaare je Konfiguration.

Bei der Auswertung mittels Boxplot (Abbildung 2-24) zeigt sich eine sehr grosse Streuung bei fast sämtlichen Prüfkonfigurationen. Die Prüfserien Z64CSVHA-ETA-old und Q63CSVHA-ETA-old wurden für den Vergleich von verschiedenen Klammertypen zu einem früheren Zeitpunkt durchgeführt,

unabhängig von der Untersuchung der Spreizung. Die Konfigurationen sind jedoch identisch mit den Prüfreihen Z64CSVHA-ETA und Q63CSVHA-ETA. Betrachtet man die beiden identischen Prüfserien der Z-Klammer Z64CSVHA-ETA-old und Z64CSVHA-ETA-0, zeigt sich ein deutlicher Unterschied der Streuung. Bei den weiteren Vergleichen werden die alten Prüfreihen (Z64CSVHA-ETA-old und Q63CSVHA-ETA-old) nicht weiter berücksichtigt. Bei der Z-Klammer liegt der Mittelwert der mit 30° angeschliffenen Klammern um 1.4 % tiefer und bei den 60° angeschliffenen Klammern um 25.4 % höher als die nicht angeschliffenen Klammern. Bei der Q-Klammer liegt der Mittelwert der mit 30° angeschliffenen Klammern um 51.2 % und bei den 60° angeschliffenen Klammern um 56.9 % tiefer als die nicht angeschliffenen Klammern.

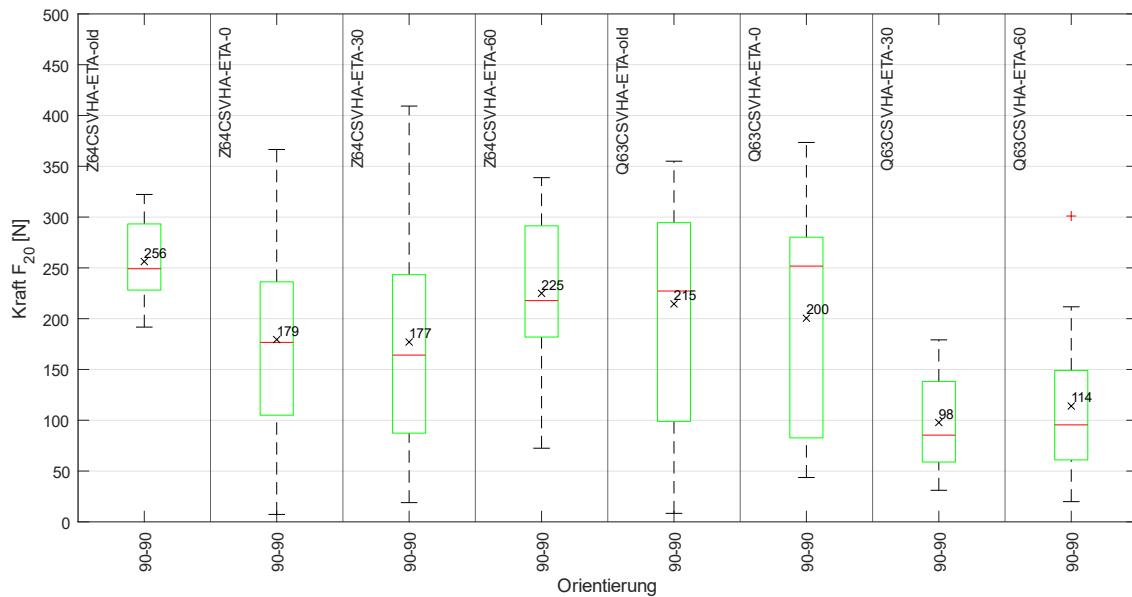


Abbildung 2-24: Auswertung der Kräfte nach 20 Sekunden (F_{20}) für die Z- und Q-Klammer mit den Anschleifwinkeln 0°, 30° und 60° mit jeweils $n = 15$ Versuchen pro Boxplot. Inkl. alte Prüfreihen mit $n = 10$ als Vergleich.

Bei einigen Versuchen war die Spreizung so gross, dass die Klammer nicht bis in den Massivholzständer vordringen konnte und sich nur in der Dreischichtplatte befand, siehe Abbildung 2-25 und Abbildung 2-26.



Abbildung 2-25: Abbildung einer eingeschossenen Klammer auf der Rückseite der Dreischichtplatte. Ein Drahtteil drang mit einer breiten Spreizung in das Vollholz, der andere Draht hatte eine solch starke Spreizung, dass er sich über 90° krümmte und nie im Vollholz ankam.



Abbildung 2-26: Abbildung einer eingeschossenen Klammer auf der Rückseite der Dreischichtplatte. Ein Drahtteil drang mit einer breiten Spreizung in das Vollholz. Der Verlauf des anderen Drahtende ist unbekannt. Eventuell gibt es einen Einfluss des Verlaufs auf Grund des Astes in der Decklage.

2.4.1.2 Gruppenversuche

Die Abbildung 2-27 zeigt den berechneten Anpressdruck unter Berücksichtigung einer Ständerbreite von 80 mm in Form von Boxplots mit jeweils 6 Versuchen pro Klammerabstand. Der optimale Klammerabstand befindet sich zwischen 30 mm und 40 mm. Dabei zeigt der Klammerabstand mit 30 mm noch einen etwas höheren Median sowie Mittelwert. Diese Unterschiede sind jedoch sehr gering für ein Prüfvolumen von $n = 6$. Bei einer Vergrösserung des Klammerabstandes nimmt der Anpressdruck signifikant ab. Bei der Verringerung des Klammerabstandes auf 20 mm ergibt sich eine Reduktion des Medians sowie Mittelwertes gegenüber dem Klammerabstand von 30 mm.

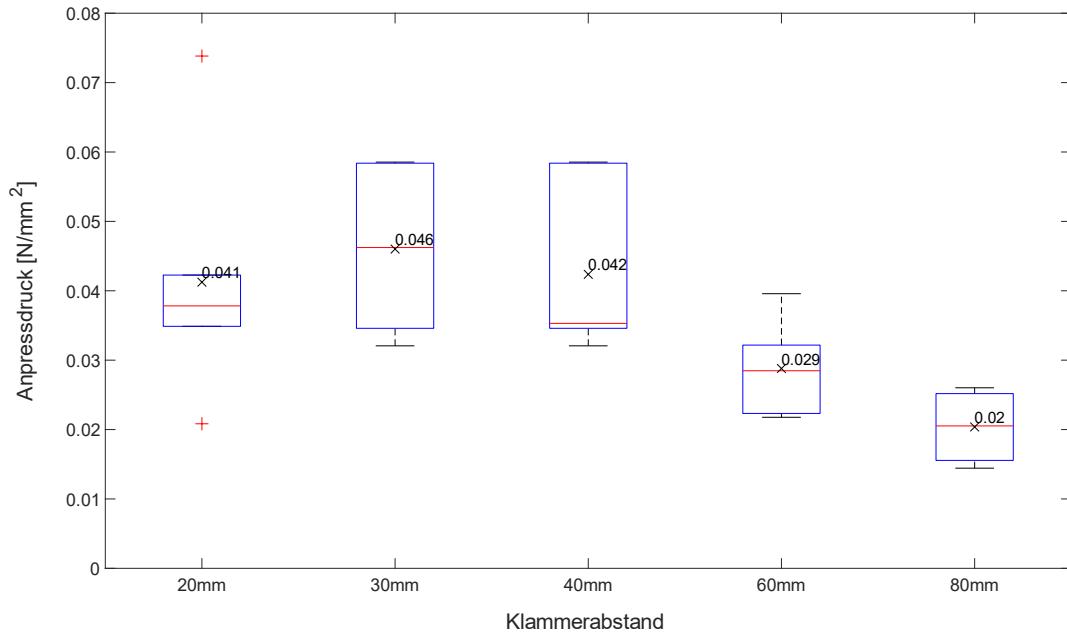


Abbildung 2-27: Anpressdruck für eine Ständerbreite von 80 mm in Abhängigkeit vom Klammerabstand, ermittelt mit jeweils 10 Klammern mit jeweils $n = 6$ Versuchen; Datengrundlage von Kälin & Hadorn, 2023.

Die Kraftverläufe der einreihigen Verklammerung (Abbildung 2-28), als Summe aus den 4 Kraftmessdosen, zeigen keine lineare Zunahme der Anpresskraft. Die erste Klammer weist eine signifikant höhere Anpresskraft auf. Die Kraftzunahme zwischen der zweiten bis zur zehnten Klammer zeigt sich anschliessend relativ linear. Bei den Kraftverläufen der zweireihigen Verklammerung (Abbildung 2-29) zeigt sich bei der Verklammerung der Klammern 11 bis 16 der zweiten Reihe eine sehr geringe Kraftzunahme. Resultierend berechnet auf eine Ständerbreite von 80 mm, ergibt sich ein Anpressdruck für die einreihige Verklammerung von 0.037 N/mm^2 und für die zweireihige Verklammerung von 0.044 N/mm^2 .

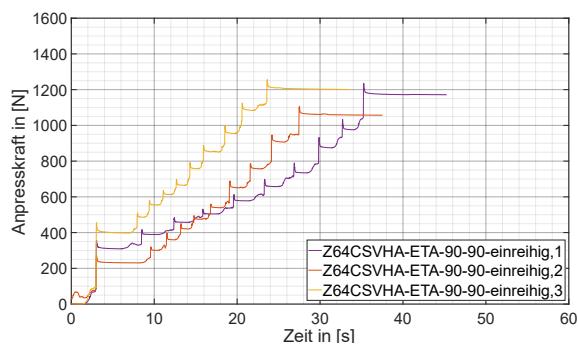


Abbildung 2-28: Kraftverläufe der einreihigen Verklammerung mit 10 Klammern und dem Klammerabstand von 40 mm.

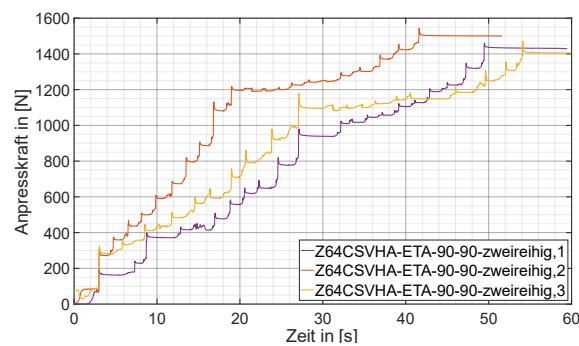


Abbildung 2-29: Kraftverläufe der zweireihigen Verklammerung mit 20 Klammern und dem Klammerabstand von 40 mm.

2.4.2 Ermittlung des Ausziehparameters mittels einseitigem Ausziehversuch

Abbildung 2-30 zeigt beispielhaft 5 aufgezeichnete Kraftverläufe für einen Ausziehversuch einer Q50CNKHA Klammer mit der Orientierung 90° eingebracht in radialer Richtung. Für die weiteren Auswertungen dieses Experimentes wird die Maximalkraft jedes Kraftverlaufes verwendet.

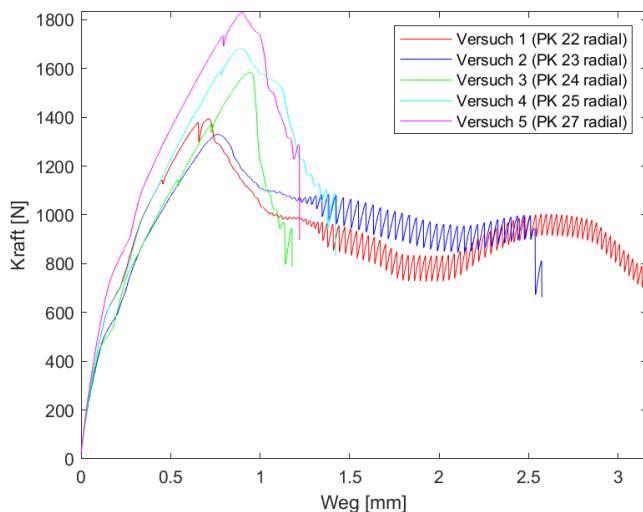


Abbildung 2-30: Aufzeichnung von 5 Kraftverläufen zur Ermittlung der Ausziehkraft für eine Q50CNKHA-Klammer mit der Orientierung 90° eingebracht in radialer Richtung.

Abbildung 2-31 bis Abbildung 2-40 zeigen die Auswertungen der Ausziehparameter für jede Klammer, Orientierung und Richtung in Form von Boxplots. Alle Ausziehkräfte wurden über die Dichte der Prüfkörper normiert. Als Referenzdichte wurde 350 kg/m³ verwendet. Zusätzlich wurden in Abbildung 2-31 bis Abbildung 2-37 die Ausziehkräfte über die Eindringtiefe der korrespondierenden Klammern in den Prüfkörpern normiert. Diese Normierung führt zum Ausziehparameter (Kraft pro Länge bzw. N/mm). Der absolute Betrag für die Ausziehkräfte wird in Abbildung 2-39 und Abbildung 2-40 dargestellt.

Abbildung 2-31 zeigt die Auswertung aller Klammern mit einer Orientierung von 90° eingebracht in radialer Richtung. Es ist zu erkennen, dass die nicht zertifizierten Z-Klammern mit einer Länge von 50 mm und 64 mm einen annähernd identischen mittleren Ausziehparameter (28 N/mm für Z50CNKHA und 29 N/mm für Z64CNKHA) aufweisen, während der gemittelte Ausziehparameter für eine Z-Klammer der Länge von 75 mm mit 20 N/mm bedeutend kleiner ist. Die ETA-zertifizierte Z50-Klammer weist gegenüber der normalen (nicht zertifizierten) Z50-Klammer einen höheren Mittelwert auf (39 N/mm für Z50CSVHA-ETA und 28 N/mm für Z50CNKHA). Die Z64CSVHA-ETA Klammer hingegen zeigt einen beinahe identischen Mittelwert (30 N/mm) verglichen mit der Z64CNKHA (29 N/mm). Bei den Q-Klammern zeigen die beiden nicht zertifizierten Klammern (Q50CNKHA und Q63CNKHA) beinahe gleiche Ausziehparameter (30 N/mm für Q50CNKHA und 31 N/mm für Q63CNKHA). Die beiden ETA-zertifizierten Q-Klammern (Q50CSVHA-ETA und Q63CSVHA-ETA) zeigen einen höheren Mittelwert als die nicht zertifizierten Q-Klammern. Die beiden ETA-zertifizierten Q-Klammern untereinander verglichen zeigen, dass die Q50CSVHA-ETA Klammer einen um 4 N/mm höheren mittleren Ausziehparameter als die Q63CSVHA-ETA Klammer aufweist. Beim Vergleich zwischen den Klammentypen ist zu erkennen, dass die nicht zertifizierten Z-Klammern und Q-Klammern ähnliche Werte aufweisen (28 N/mm bzw. 29 N/mm für die Z-Klammern und 30 N/mm bzw. 31 N/mm für die Q-Klammern). Beim Vergleich der ETA zertifizierten Klammern ist zu beobachten, dass die Q-Klammern (44 N/mm für Q50CSVHA-ETA und 40 N/mm für Q63CSVHA-ETA) leicht höhere Mittelwerte aufweisen als die Z-Klammern (39 N/mm für Z50CSVHA-ETA und 30 N/mm für Z64CSVHA-ETA). Ebenfalls ist für beide Klammentypen zu erkennen, dass die längeren ETA zertifizierten Klammern (64 mm bei den Z-Klammern und 63 mm bei den Q-Klammern) einen kleineren Ausziehparameter aufweisen als die kürzeren zertifizierten ETA-Klammern (50 mm für Z- und Q-Klammern). Die QL50CSVHA-ETA Klammer weist einen höheren mittleren Ausziehparameter (43 N/mm) als die äquivalente Z-Klammer (39 N/mm) aber einen leicht tieferen Wert als die äquivalente Q-Klammer (44 N/mm) auf.

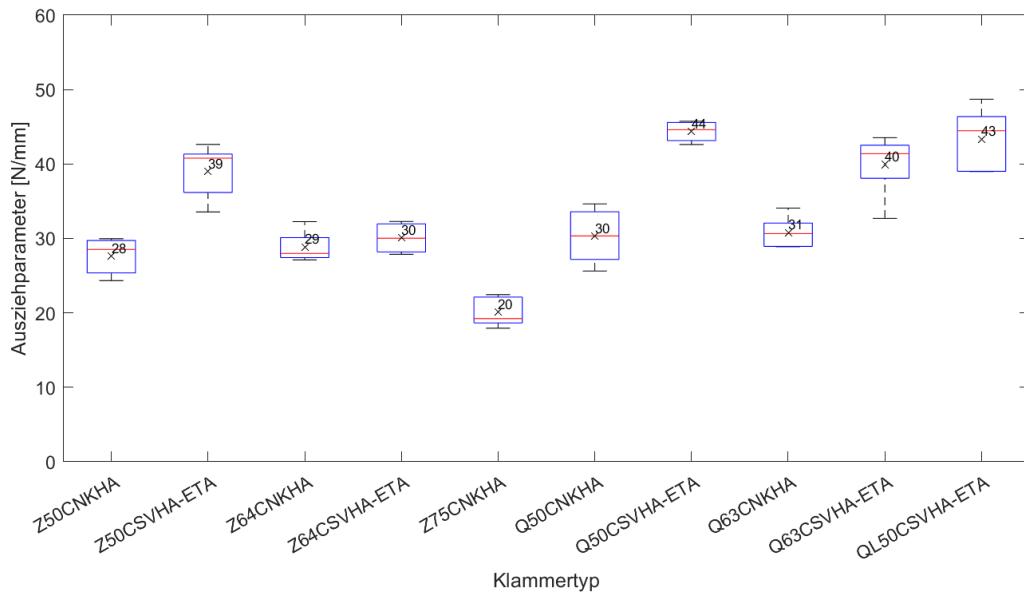


Abbildung 2-31: Auswertung des Ausziehparameters für die Orientierung 90° in radialer Richtung mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot. Normierung der Ausziehkräfte auf eine Referenzdichte von 350 kg/m³ und über die Eindringtiefe l_p der Klammer.

Abbildung 2-32 zeigt die Auswertung aller Klammern mit einer Orientierung von 90° in tangentialer Richtung. Die nicht zertifizierten Z-Klammern mit einer Länge von 50 mm und 64 mm weisen einen identischen Mittelwert auf (24 N/mm) während die längste getestete Z-Klammer mit 75 mm einen tieferen mittleren Ausziehparameter (21 N/mm) aufweist. Die ETA-zertifizierten Z-Klammer weisen einen Mittelwert von 30 N/mm für eine Länge von 50 mm und einen Mittelwert 24 N/mm für eine Länge von 64 mm auf. Somit entspricht der mittlere Ausziehparameter für die ETA-zertifizierten Klammern mindestens dem der nicht zertifizierten Klammern. Zudem weist die längere der beiden ETA-zertifizierten Klammern einen tieferen durchschnittlichen Ausziehparameter auf. Die nicht zertifizierten Q-Klammern weisen annähernd den gleichen mittleren Ausziehparameter auf (25 N/mm für Q50CNKHA und 26 N/mm für Q63CNKHA). Die ETA-zertifizierten Klammern weisen einen Mittelwert von 37 N/mm für die Q50CSVHA-ETA Klammer und 32 N/mm für die Q63CSVHA-ETA Klammer auf, wobei die längere der beiden Klammern einen tieferen mittleren Ausziehparameter aufweist. Die ETA-zertifizierten Q-Klammern weisen zudem höhere Mittelwerte auf als die nicht zertifizierten Q-Klammern. Der Vergleich zwischen den Klemmertypen zeigt, dass die mittleren Ausziehparameter der Z-Klammern tiefer sind als diejenigen der Q-Klammern. Für die nicht zertifizierten Klammern mit einer Länge von 50 mm bis 64 mm ist dieser Unterschied nur sehr gering (24 N/mm für Z50CNKHA und Z64CNKHA, 25 N/mm bzw. 26 N/mm für Q50CNKHA bzw. Q63CNKHA). Der Vergleich der ETA-zertifizierten Z- und Q-Klammern zeigt hingegen, dass die Unterschiede im Ausziehparameter bedeutend grösser sind (30 N/mm bzw. 24 N/mm für Z50CSVHA-ETA bzw. Z64CSVHA-ETA und 37 N/mm bzw. 32 N/mm für Q50CSVHA-ETA bzw. Q63CSVHA-ETA). Die QL-Klammer weisst für die betrachtete Orientierung und Richtung den grössten mittleren Ausziehparameter auf.

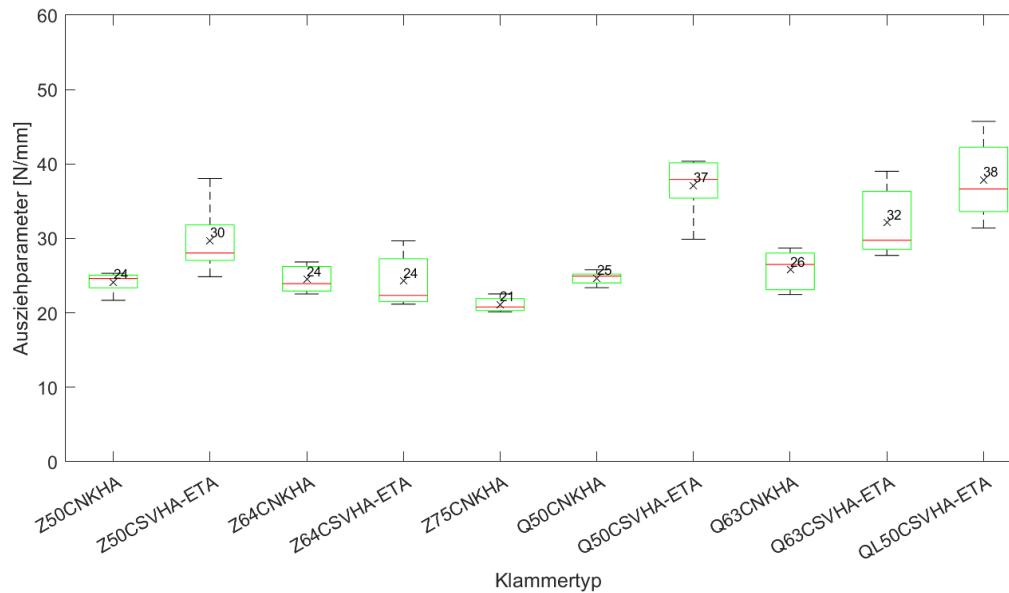


Abbildung 2-32: Auswertung des Ausziehparameters für die Orientierung 90° in tangentialer Richtung mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot. Normierung der Ausziehkräfte auf eine Referenzdichte von 350 kg/m³ und über die Ein- dringtiefe l_p der Klammer.

Abbildung 2-33 zeigt die Auswertung aller Klammern eingebracht mit einer Orientierung von 45° in radialer Richtung. Der nachfolgenden Abbildung 2-33 kann entnommen werden, dass eine 64 mm lange nicht zertifizierte Z-Klammer einen höheren mittleren Ausziehparameter (28 N/mm) als die kürzere 50 mm lange Klammer (23 N/mm) aufweist. Innerhalb der nicht zertifizierten Z-Klammern wird der tiefste mittlere Ausziehparameter (19 N/mm) mit der längsten Klammer (Z75CNKHA) erzielt. Die längere der beiden getesteten und ETA-zertifizierten Z-Klammern weist einen leicht tieferen durchschnittlichen Ausziehparameter (29 N/mm) auf als die kürzere Z50CSVHA-ETA Klammer (31 N/mm). Innerhalb der getesteten nicht zertifizierten Q-Klammern ist ein leicht höherer Mittelwert für die längere Q63CNKHA Klammer (26 N/mm) gegenüber der Q50CNKHA (24 N/mm) festzustellen. Bei den ETA-zertifizierten Q-Klammern weist die längere Q63CSVHA-ETA Klammer einen tieferen Wert (37 N/mm) gegenüber der kürzeren Q50CSVHA-ETA Klammer (40 N/mm) auf. Der Vergleich zwischen den getesteten Z- und Q-Klammer mit vergleichbarer Länge zeigt, dass die nicht zertifizierten Klammern ähnliche Mittelwerte (alle innerhalb des Bereichs von 23 N/mm – 28 N/mm) erzielen. Der Vergleich zwischen den Z- und Q-Klammer mit einer ETA-Zertifizierung zeigt, dass die Q-Klammern einen höheren mittleren Ausziehparameter (40 N/mm bzw. 37 N/mm für Q50CSVHA-ETA bzw. Q63CSVHA-ETA) aufweisen als die Z-Klammern (31 N/mm bzw. 29 N/mm für Z50CSVHA-ETA bzw. Z64CSVHA-ETA). Die QL50CSVHA-ETA Klammer weist einen tieferen mittleren Ausziehparameter (37 N/mm) auf als die gleich lange Klammer Q50CSVHA-ETA (40 N/mm).

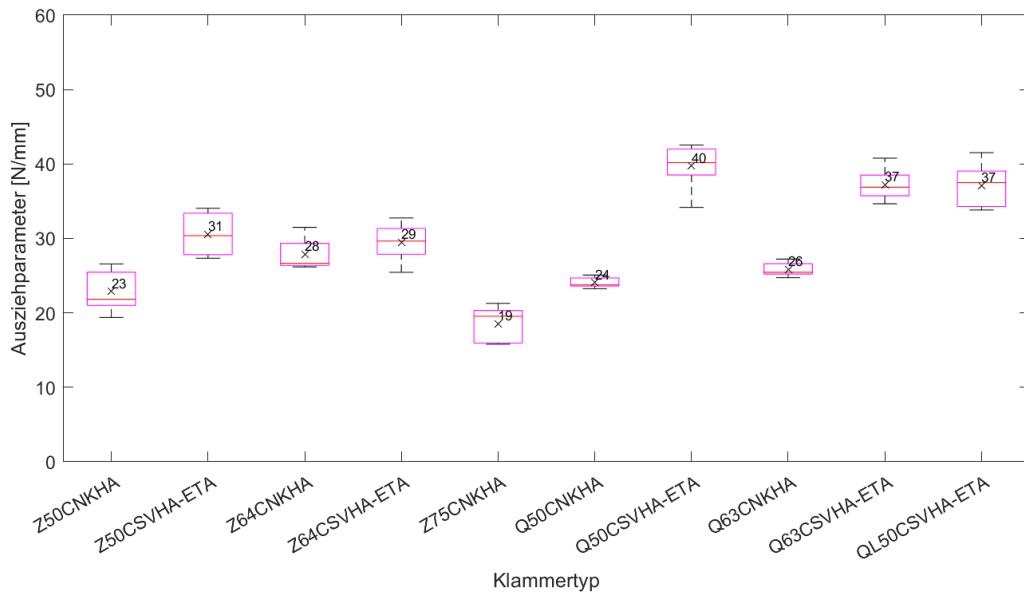


Abbildung 2-33: Auswertung des Ausziehparameters für die Orientierung 45° in radialer Richtung mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot. Normierung der Ausziehkräfte auf eine Referenzdichte von 350 kg/m³ und über die Eindringtiefe l_p der Klammer.

Abbildung 2-34 zeigt die Auswertung aller vorgenommenen Tests mit einer Orientierung von 45° und in tangentialer Richtung. Die längste der nicht zertifizierten Z-Klammern (Z75CNKHA) weist den tiefsten mittleren Ausziehparameter (18 N/mm) auf. Der Vergleich der Z50CNKHA und Z64CNKHA Klammern zeigt, dass die längere der beiden Klammern einen höheren Wert aufweist (24 N/mm gegenüber 20 N/mm). Die zertifizierte Z50CSVHA-ETA Klammer weisst einen höheren mittleren Ausziehparameter (27 N/mm) im Vergleich zur gleichen nicht zertifizierten Klammer auf. Die ETA-zertifizierte Z64 Klammer hingegen weisst den gleichen Mittelwert wie die nicht zertifizierte Klammer der gleichen Länge und des gleichen Klammertyps auf und verglichen mit der kürzeren Z50CSVHA-ETA Klammer einen tieferen Mittelwert. Innerhalb der Q-Klammern ist zu erkennen, dass die beiden nicht zertifizierten Klammern ähnliche durchschnittliche Ausziehparameter aufweisen (21 N/mm für Q50CNKHA und 23 N/mm für Q63CNKHA). Der durchschnittliche Ausziehparameter der beiden ETA-zertifizierten Q-Klammern (30 N/mm für Q50CSVHA-ETA und 29 N/mm für Q63CSVHA-ETA) weist höhere Werte auf als die äquivalenten nicht zertifizierten Q-Klammern. Ebenfalls ist der untenstehenden Abbildung zu entnehmen, dass die beiden ETA-zertifizierten Q-Klammern beinahe den gleichen Mittelwert für den Ausziehparameter aufweisen. Der Vergleich zwischen den Z- und Q-Klammern zeigt, dass die Q-Klammern, mit Ausnahme der Q63CNKHA Klammer, höhere mittlere Ausziehparameter erreichen als die vergleichbaren Z-Klammern. Die QL50CSVHA-ETA Klammer erreicht den höchsten mittleren Ausziehparameter (34 N/mm) für die betrachtete Orientierung und Richtung.

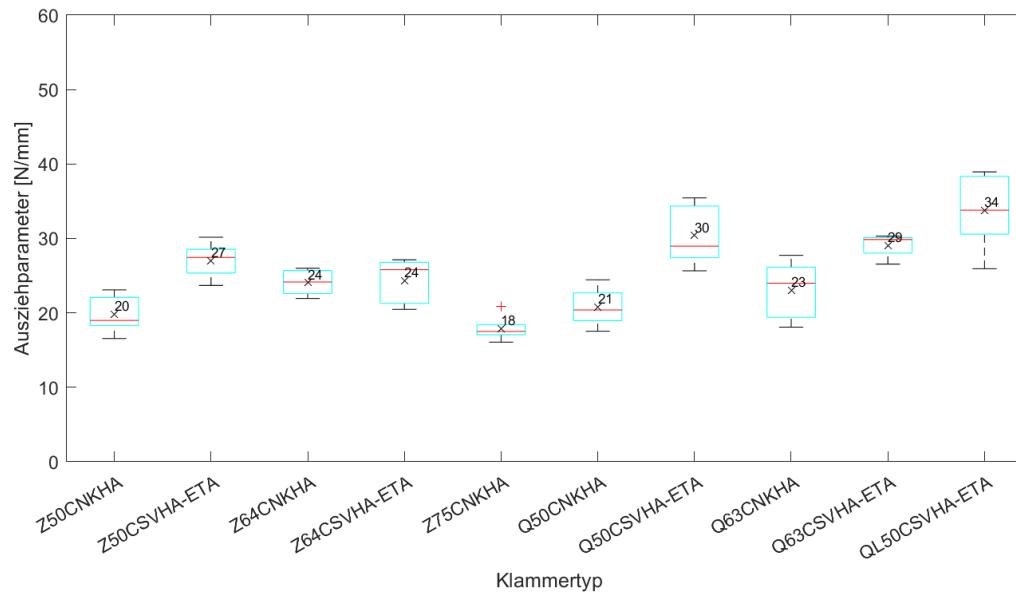


Abbildung 2-34: Auswertung des Ausziehparameters für die Orientierung 45° in tangentialer Richtung mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot. Normierung der Ausziehkräfte auf eine Referenzdichte von 350 kg/m³ und über die Ein- dringtiefe l_p der Klammer.

Beim Vergleich in Abbildung 2-35 zwischen dem Ausziehparameter für die Orientierung 45° in tangentialer Richtung und die Orientierung 45° in radialer Richtung ist zu erkennen, dass alle ermittelten mittleren Ausziehparameter in tangentialer Richtung kleinere Werte aufzeigen als in radialer Richtung. Der Vergleich zwischen den Richtungen radial und tangential mit einer Orientierung von 90° zeigt, dass alle mittleren Ausziehparameter für eine 90° Orientierung höhere Werte erzielen, wenn die Klammern radial statt tangential eingebracht werden. Einzige Ausnahme stellt hier die längste der getesteten Klammern, die Z75CNKHA Klammer, dar (20 N/mm in radialer Richtung und 21 N/mm in tangentialer Richtung). Der Vergleich zwischen Abbildung 2-31 (Ausziehparameter für 90° Orientierung in radialer Richtung) und Abbildung 2-33 (Ausziehparameter für 45° Orientierung in radialer Richtung) zeigt, dass die mittleren Ausziehparameter jeder Klammer für eine 90° Orientierung höhere Werte aufzeigen als für eine 45° Orientierung des Klammerrückens zur Fasserrichtung des Prüfkörpers. Der Vergleich zwischen Abbildung 2-34 (Ausziehparameter für Orientierung 45° und tangentialer Richtung) und Abbildung 2-32 (Ausziehparameter für 90° Orientierung und tangentialer Richtung) zeigt, dass eine Orientierung von 45° zu tieferen oder gleichen Mittelwerten für die Ausziehparameter führt, verglichen mit einer Orientierung von 90°.

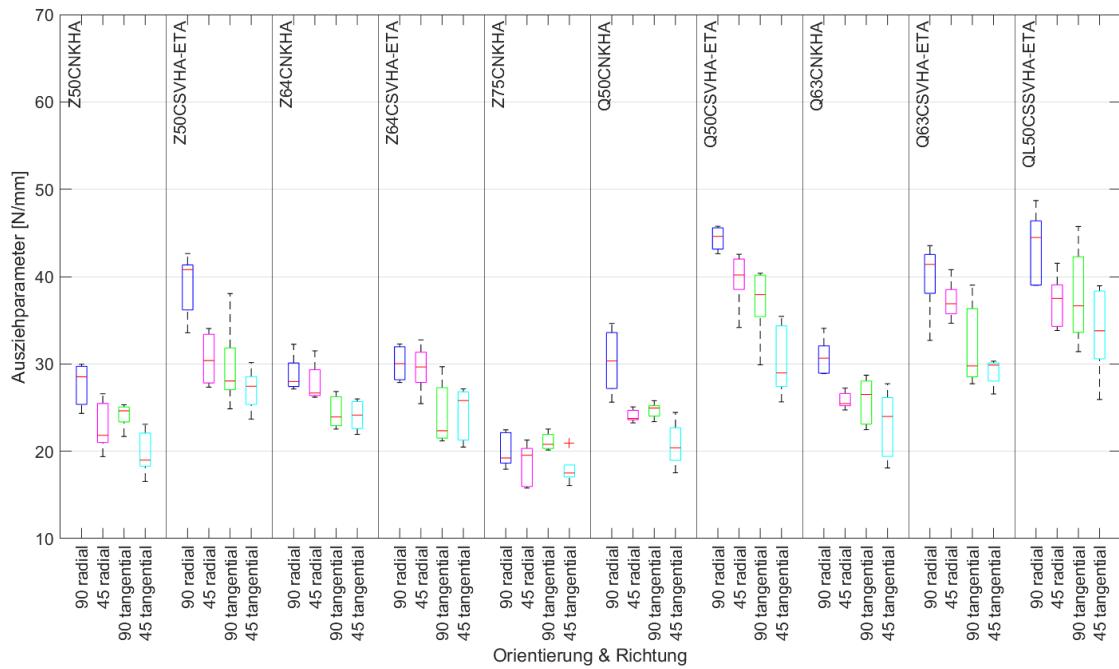


Abbildung 2-35: Auswertung des Ausziehparameters für die Orientierung 90° und 45° in radialer und tangentialer Richtung mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot. Normierung der Ausziehkräfte auf eine Referenzdichte von 350 kg/m^3 und über die Eindringtiefe l_p der Klammer.

In Abbildung 2-36 wird der Ausziehparameter aller Versuche mit einer Orientierung von 90° dargestellt, wobei nicht zwischen radial und tangential unterschieden wird. Es kann der nachfolgenden Abbildung entnommen werden, dass die mittleren Ausziehparameter der Klammer Z50CNKHA und Z64CNKHA beinahe die gleichen Werte erreichen (26 N/mm bzw. 27 N/mm). Die längere Z75CNKHA Klammer hingegen zeigt mit 21 N/mm einen tieferen mittleren Ausziehparameter. Die kleinere der beiden ETA-zertifizierten Z-Klammern weisst in der Abbildung einen höheren Wert auf (34 N/mm für Z50CSVHA-ETA und 27 N/mm für Z64CSVHA-ETA) und somit auch einen höheren Mittelwert verglichen mit dem Ausziehparameter der Z50CSVHA Klammer. Die längere der beiden ETA-zertifizierten Klammern (Z64CNKHA) hingegen weisst den gleichen mittleren Ausziehparameter (27 N/mm) wie die äquivalente nicht zertifizierte Klammer auf. Für die Q-Klammern weisen die beiden nicht zertifizierten Klammern annähernd den gleichen durchschnittlichen Ausziehparameter (27 N/mm für Q50CNKHA und 28 N/mm für Q63CNKHA) auf. Die beiden ETA-zertifizierten Klammern zeigen einen mittleren Ausziehparameter, der grösser demjenigen der nicht zertifizierten Z-Klammern ist, wobei die kürzere der beiden Klammern einen höheren Mittelwert aufweist (41 N/mm für Q50CSVHA-ETA und 36 N/mm für Q63CSVHA-ETA). Ein Vergleich zwischen den Q50- bzw. Q63- und Z50- bzw. Z64-Klammern zeigt, dass die Q-Klammern höhere Werte erzielen als die äquivalenten Z-Klammern. Die QL50CSVHA-ETA Klammer zeigt den gleichen mittleren Ausziehparameter wie die Q50CSVHA-ETA Klammer.

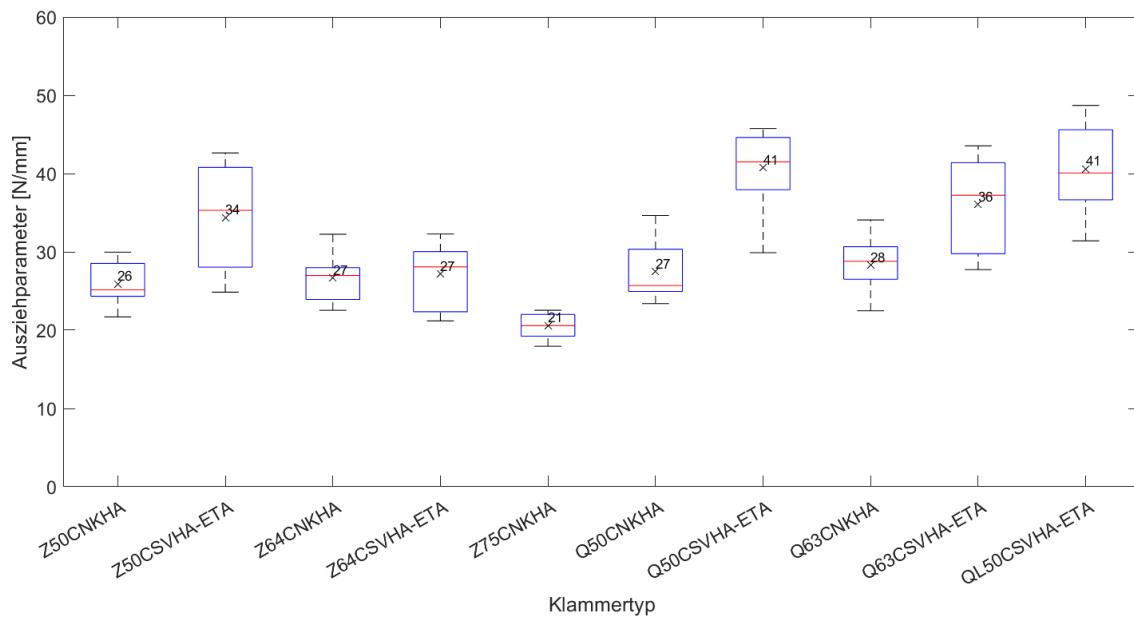


Abbildung 2-36: Auswertung des Ausziehparameters für die Orientierung 90° zusammengefasst aus radialer und tangentialer Richtung mit jeweils $n = 10$ Versuchen pro Boxplot. Normierung der Ausziehkräfte auf eine Referenzdichte von 350 kg/m³ und über die Eindringtiefe l_p der Klammer.

In Abbildung 2-37 wird der Ausziehparameter aller Versuche mit einer Orientierung von 45° dargestellt. Eine Unterscheidung zwischen radialer und tangentialer Richtung wird nicht gemacht. Unter den nicht zertifizierten Z-Klammern erreicht die Z64CNKHA den höchsten mittleren Ausziehparameter (26 N/mm) gefolgt von Z50CNKHA mit 21 N/mm und Z75CNKHA mit 18 N/mm. Unter den ETA-zertifizierten Z-Klammern erreicht die kürzere Z50CSVHA-ETA Klammer einen Mittelwert von 29 N/mm gegenüber der Z64CSVHA-ETA Klammer mit 27 N/mm. Die zwei nicht zertifizierten Q-Klammern weisen beinahe gleiche mittlere Ausziehparameter auf (22 N/mm für Q50CNKHA und 24 N/mm für Q63CNKHA). Die ETA-zertifizierten Q-Klammern weisen einen höheren Mittelwert auf verglichen mit den äquivalenten nicht zertifizierten Q-Klammern, während die kürzere Klammer (Q50CSVHA-ETA) einen höheren durchschnittlichen Ausziehparameter (35 N/mm) gegenüber der längeren Q63CSVHA-ETA Klammer (33 N/mm) aufweist. Der Vergleich zwischen den verschiedenen Klammentypen zeigt, dass die Ausziehparameter der Q-Klammern im Mittel höher sind als für die vergleichbaren Z-Klammern. Die QL50CSVHA-ETA Klammer zeigt in der nachfolgenden Abbildung den gleichen mittleren Ausziehparameter wie die Q50CSVHA-ETA Klammer mit 35 N/mm.

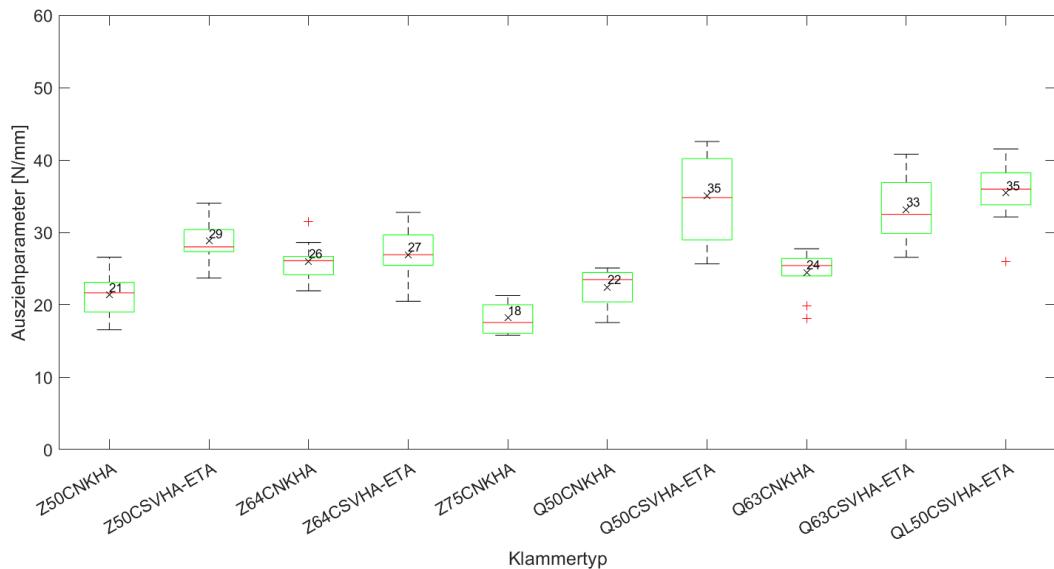


Abbildung 2-37: Auswertung des Ausziehparameters für die Orientierung 45° zusammengefasst aus radialem und tangentialem Richtung mit jeweils $n = 10$ Versuchen pro Boxplot. Normierung der Ausziehkräfte auf eine Referenzdichte von 350 kg/m^3 und über die Eindringtiefe l_p der Klammer.

Der Vergleich zwischen den beiden Orientierungen 90° und 45° (wobei radiale und tangentiale Richtung zusammengefasst sind) zeigt, dass die mittleren Ausziehparameter für die Orientierung 90° grösser sind als die Mittelwerte für eine Orientierung von 45° . Einzig die Klammer Z64CSVHA-ETA zeigt für beide Orientierungen den gleichen mittleren Ausziehparameter.

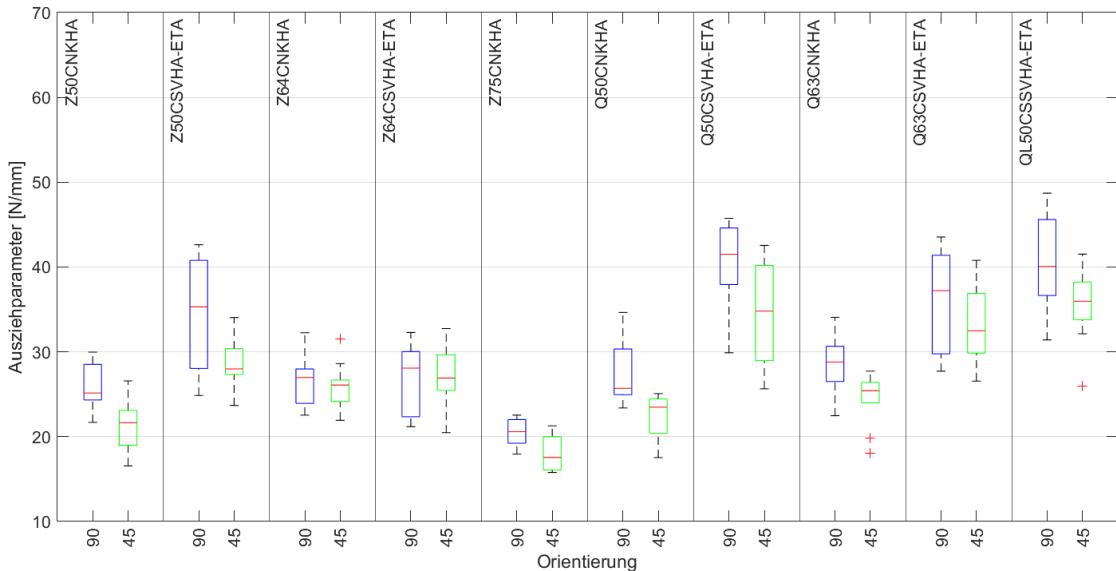


Abbildung 2-38: Auswertung des Ausziehparameters für die Orientierung 90° und 45° zusammengefasst aus radialem und tangentialem Richtung mit jeweils $n = 10$ Versuchen pro Boxplot. Normierung der Ausziehkräfte auf eine Referenzdichte von 350 kg/m^3 und über die Eindringtiefe l_p der Klammer.

In Abbildung 2-39 wird die Ausziehtragfähigkeit aller Versuche mit einer Orientierung von 90° dargestellt. Im Vergleich zu den vorangehenden Abbildungen sind hier die aufgezeichneten Maximalwerte nicht über die Eindringtiefe normiert, sondern zeigen den absoluten Mittelwert. Bei den nicht zertifizierten Z-Klammern ist zu erkennen, dass die mittlere Ausziehtragfähigkeit der Z50-Klammer (1061 N) kleiner ist als diejenige der Z64-Klammer (1401 N). Die Ausziehkraft der Z75-Klammer (1349 N) hingegen liegt zwischen den beiden zuletzt erwähnten Z-Klammern. Die beiden ETA-zertifizierten Z-Klammern weisen jeweils eine höhere Ausziehkraft auf als die äquivalenten nicht zertifizierten Klammern, wobei ebenfalls die längere der beiden Klammern einen höheren Ausziehparameter aufweist (1394 N).

für Z50CSVHA-ETA und 1481 N für Z64CSVHA-ETA). Bei den nicht zertifizierten Q-Klammern weist die längere Klammer (Q63CNKHA) eine höhere durchschnittliche Ausziehkraft (1519 N) gegenüber der kürzeren Klammer (Q50CNKHA, 1135 N) auf. Die beiden ETA-zertifizierten Q-Klammern zeigen höhere Mittelwerte für die Ausziehkraft verglichen mit den äquivalenten nicht zertifizierten Klammern. Ebenfalls weist die längere Klammer (Q63CSVHA-ETA) eine höhere mittlere Ausziehkraft (1946 N) gegenüber der kürzeren Q50CSVHA-ETA Klammer mit einer Ausziehkraft von 1672 N auf. Der Vergleich zwischen den Klammertypen zeigt, dass die Q-Klammern höhere Werte erzielen im Vergleich zu den vergleichbaren Z-Klammern. Die QL50CSVHA-ETA Klammer weisst eine beinahe identische durchschnittliche Ausziehkraft (1673 N) wie die vergleichbare Q50CSVHA-ETA Klammer auf.

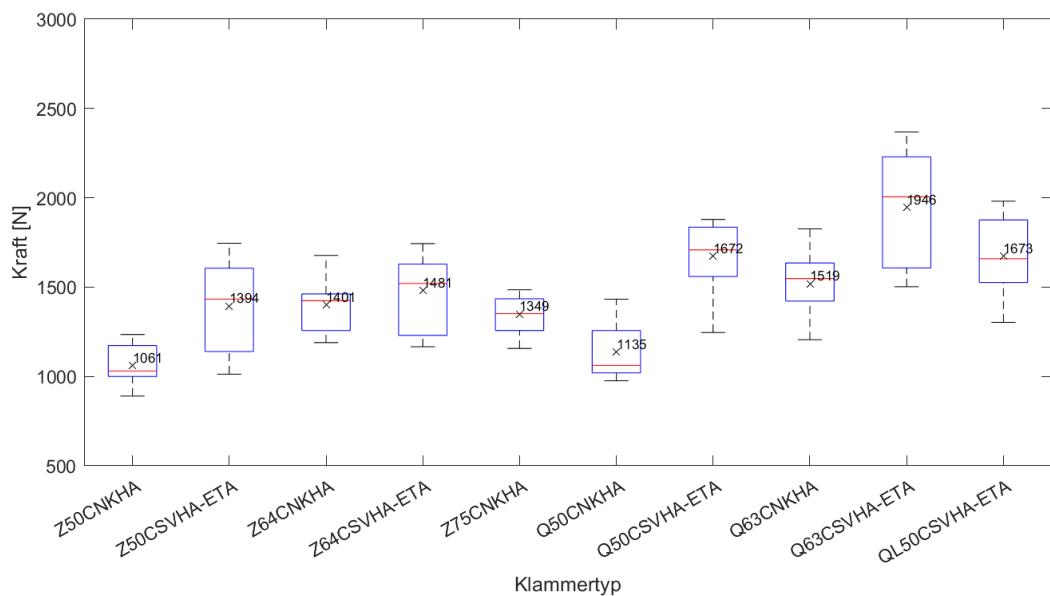


Abbildung 2-39: Auswertung der Ausziehkraft für die Orientierung 90° zusammengefasst aus radialer und tangentialer Richtung mit jeweils $n = 10$ Versuchen pro Boxplot. Normierung der Ausziehkräfte auf eine Referenzdichte von 350 kg/m³.

Abbildung 2-40 stellt die mittleren Ausziehkräfte der Versuche für eine Orientierung von 45° dar. Die höchste mittlere Ausziehkraft, der nicht zertifizierten Z-Klammer wird durch die Z64CNKHA Klammer (1396 N) erreicht, gefolgt von der Z75CNKHA Klammer mit 1193 N und der Z50CNKHA Klammer mit 868 N. Bei den beiden ETA-zertifizierten Z-Klammern wird für die Längere der beiden Klammern (1451 N für Z64CSVHA-ETA) gegenüber der kürzeren Z50CSVHA-ETA Klammer (1144 N) eine höhere mittlere Ausziehkraft erreicht. Die zertifizierten Z-Klammern weisen eine höhere mittlere Ausziehkraft auf als die äquivalenten nicht zertifizierten Z-Klammern. Die Betrachtung der Q-Klammern (ETA-zertifiziert und nicht zertifiziert) zeigt, dass eine längere Klammer jeweils eine höhere mittlere Ausziehkraft zur Folge hat. Die ETA-zertifizierten Q-Klammern weisen zudem einen höheren Mittelwert auf als die nicht zertifizierten Q-Klammern. Der Vergleich zwischen den Q-Klammern und den Z-Klammern zeigt, dass die Q-Klammern höhere Mittelwerte als die vergleichbaren Z-Klammern aufweisen. Einzige Ausnahme stellt hier die Q63CNKHA Klammer dar, die mit einem Mittelwert von 1306 N einen tieferen Mittelwert als derjenige der Z64CNKHA Klammer (1396 N) erreicht. Die QL50CSVHA-ETA Klammer weist eine vergleichbare mittlere Ausziehkraft (1427 N) wie die gleich lange Q50CSVHA-ETA Klammer mit einem Mittelwert von 1442 N auf.

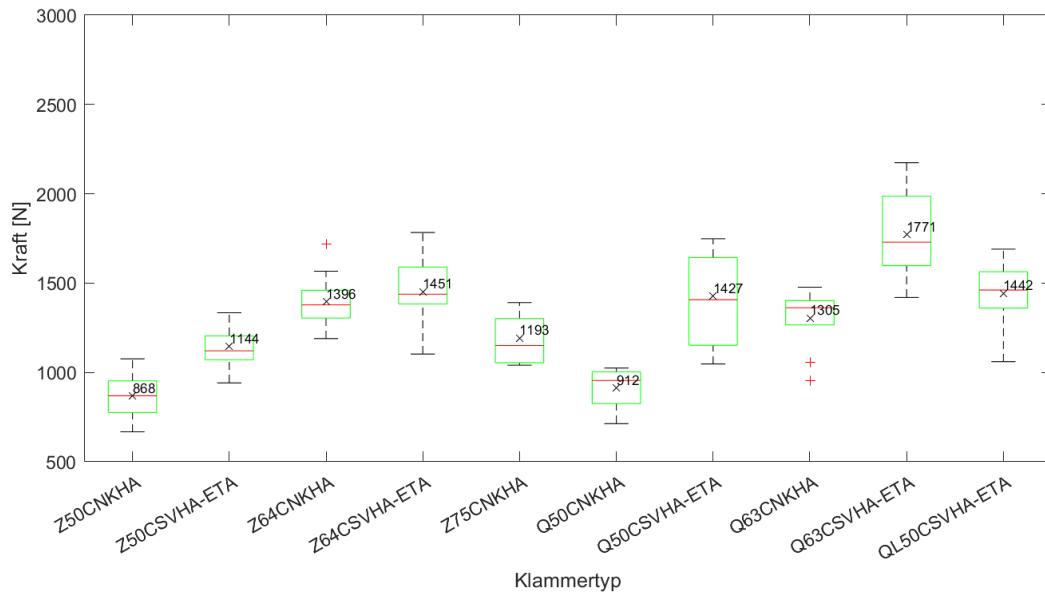


Abbildung 2-40: Auswertung der Ausziehkraft für die Orientierung 45° zusammengefasst aus radialer und tangentialer Richtung mit jeweils $n = 10$ Versuchen pro Boxplot. Normierung der Ausziehkräfte auf eine Referenzdichte von 350 kg/m³.

Der Vergleich zwischen den beiden Orientierungen von 90° und 45° (wobei radiale und tangentiale Richtung jeweils zusammengefasst sind für die beiden Orientierungen) zeigt, dass alle mittleren Ausziehparameter der Klammern mit einer Orientierung von 90° grösser sind gegenüber den Werten für eine Orientierung von 45°.

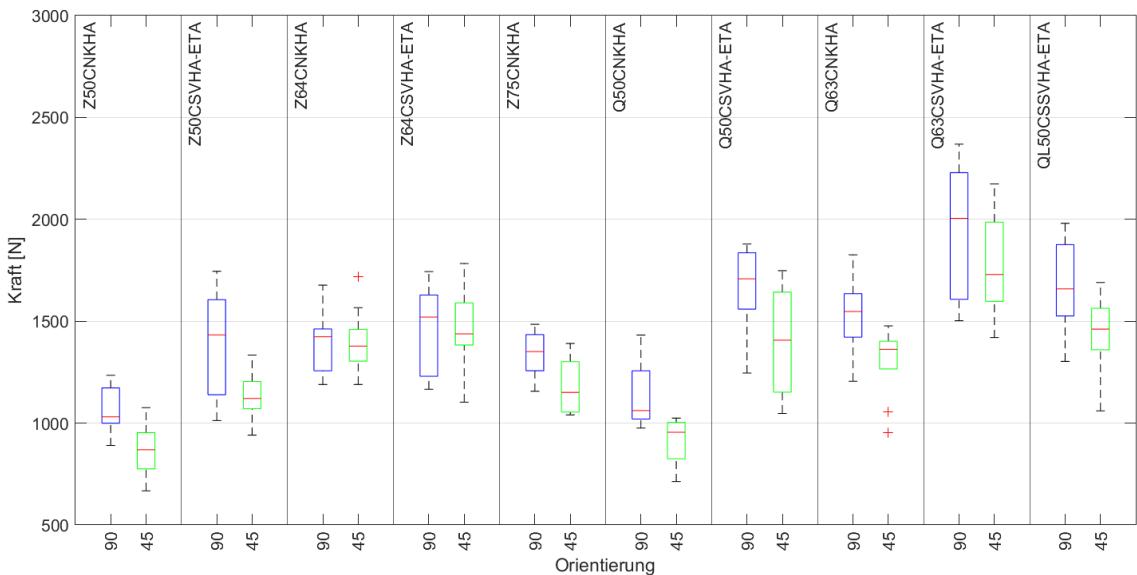


Abbildung 2-41: Auswertung der Ausziehkraft für die Orientierung 90° und 45° zusammengefasst aus radialer und tangentialer Richtung mit jeweils $n = 10$ Versuchen pro Boxplot. Normierung der Ausziehkräfte auf eine Referenzdichte von 350 kg/m³.

2.4.3 Zweiseitiger Ausziehversuch

Die nachfolgende Abbildung 2-42 zeigt beispielhaft für alle Experimente die Aufzeichnung von 5 Ausziehversuchen der Klammer Q50CNKHA mit der Orientierung 90-90. Zur Ermittlung der Ausziehkräfte wurden für dieses Experiment die ersten Kraftspitzen aller aufgezeichneten Kraftverläufe ausgewertet. Jede Kraftspitze hat einen vorübergehenden Kraftabfall zur Folge gepaart mit einem Anstieg des gemessenen Weges.

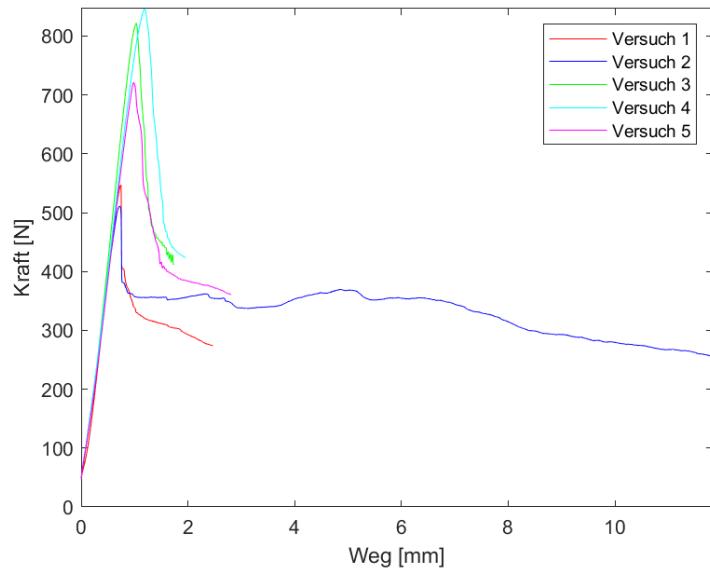


Abbildung 2-42: 5 Kraftverläufe von 5 Prüfkörpern eines zweiseitigen Ausziehversuches mit der Klammer Q50CNKHA und der Orientierung 90-90.

Abbildung 2-43 zeigt die Auswertungen der Ausziehkräfte für die Orientierung 90-90. Die Ausziehkräfte innerhalb eines Klammertyps (Z-Klammer oder Q-Klammer) für diese Orientierung und Klammerlängen zwischen 44 mm und 64 mm steigen mit zunehmender Länge der Klammer. Innerhalb der Z-Klammern ist zu erkennen, dass die Z75CNKHA Klammer mit einer Länge von 75 mm eine kleinere mittlere Ausziehkraft (755 N) als die kürzere Z64CNKHA (874 N) aufweist. Weiter weist die Z50CSVHA-ETA Klammer eine um 153 N höhere durchschnittliche Ausziehkraft auf als die gleiche nicht ETA-zertifizierte Z50CNKHA Klammer. Bei den Q-Klammern liegt der Durchschnittswert für die Q50CSVHA-ETA-Klammer um 167 N höher als für die nicht ETA-zertifizierte Q50CNKHA Klammer. Werden die Durchschnittswerte der Q-Klammern mit den Werten der äquivalenten Z-Klammern verglichen (hier wird einfachheitshalber eine Q63- mit einer Z64-Klammer verglichen), kann festgestellt werden, dass die Q-Klammern eine höhere Ausziehkraft erzielen, wobei die grösste Differenz mit 384 N zwischen den Z64CNKHA und der Q63CNKHA liegt.

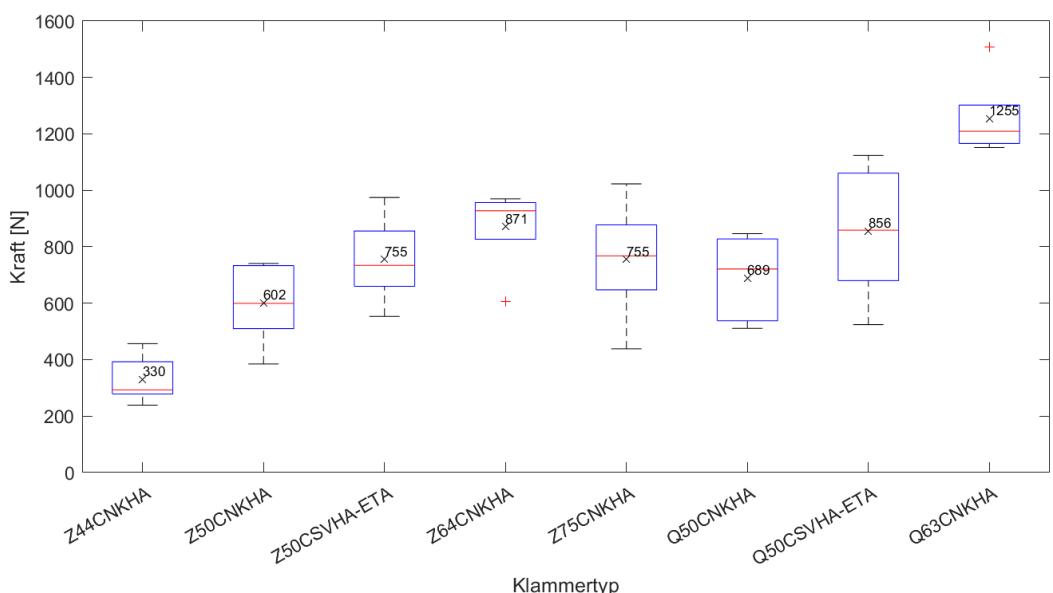


Abbildung 2-43: Auswertung der Ausziehkräfte (zweiseitiger Versuch) für die Orientierung 90-90 mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot.

In Abbildung 2-44 werden die Ausziehkräfte für eine Orientierung 90-0 zusammengefasst. Es ist zu sehen, dass innerhalb der Klammertypen eine längere Klammer zu höheren mittleren Ausziehkräften führt. Einzige Ausnahme ist die Klammer Z75CNKHA (673 N). Diese weist eine kleinere durchschnittliche Ausziehkraft auf als die kleinere Klammer Z64CNKHA (705 N). Die ETA-zertifizierte Z50-Klammer (Z5CSVHA-ETA) zeigt einen um 222 N höheren Durchschnittswert als die äquivalente nicht zertifizierte Z50-Klammer (Z50CNKHA). Bei den Q50-Klammern hingegen weisst die ETA-zertifizierte Klammer eine um 22 N kleinere durchschnittliche Ausziehkraft auf verglichen mit der nicht zertifizierten Ausführung. Die beiden Q50-Klammern verglichen mit den Z50-Klammern weisen fast den gleichen (329 N für Z50CNKHA und 328 N für Q50CNKHA) oder einen tieferen Mittelwert (551 N für Z50CSVHA-ETA und 306 N für Q50CSVHA-ETA) für die Ausziehkräfte auf.

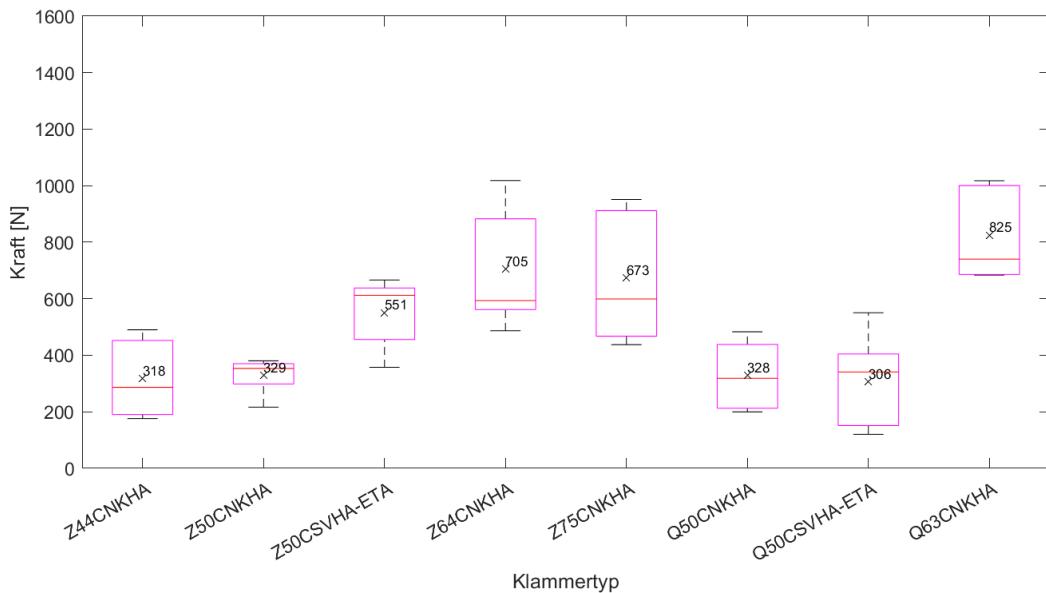


Abbildung 2-44: Auswertung der Ausziehkräfte (zweiseitiger Versuch) für die Orientierung 90-0 mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot.

Abbildung 2-45 fasst die Daten für eine Orientierung von 45-45 zusammen. Es ist zu sehen, dass eine längere Klammer zu höheren Durchschnittswerten bei der Ausziehkraft führt. Die Z75CNKHA Klammer stellt hier eine Ausnahme dar, wobei eine mittlere Ausziehkraft von 648 N gegenüber 814 N für die Z64CNKHA Klammer ermittelt wurde. Die beiden ETA-zertifizierten Klammern weisen für diese Orientierung eine höhere durchschnittliche Ausziehkraft auf als die gleichen nicht zertifizierten Klammern (497 N für Z50CSVHA-ETA gegenüber 459 N für Z50CNBKHA und 570 N für Q5CSVHA-ETA gegenüber 500 N für Q50CNKHA). Die beiden Q50-Klammern erreichen im Vergleich mit den beiden äquivalenten Z50-Klammern eine höhere durchschnittliche Ausziehkraft. Die Q63CNKHA-Klammer (629 N) hingegen erzielt einen tieferen Durchschnittswert als die Z64CNKHA-Klammer (814 N).

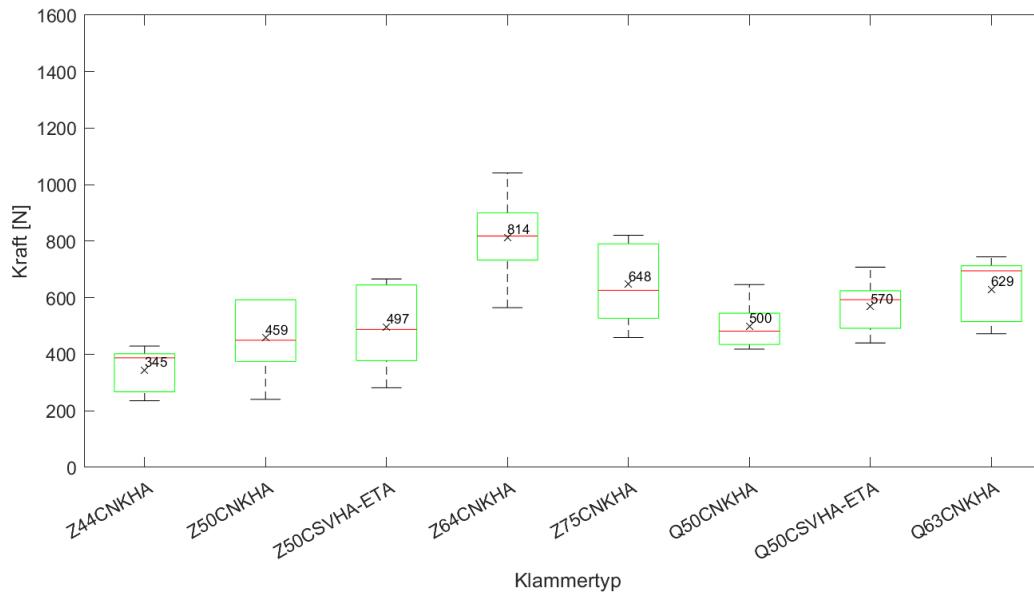


Abbildung 2-45: Auswertung der Ausziehkräfte (zweiseitiger Versuch) für die Orientierung 45-45 mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot.

Der Vergleich zwischen der Orientierung 90-90 und der Orientierung 90-0 in Abbildung 2-46 zeigt, dass die Ausziehkräfte für alle Klammern mit einer Orientierung 90-90 grösser sind verglichen mit der Orientierung 90-0. In Abbildung 2-46 ist zu sehen, dass im Durchschnitt alle Klammern mit einer Orientierung 45-45 kleinere Ausziehkräfte erzielen als für die Orientierung 90-90. Eine Ausnahme stellt dabei die Klammer Z44CNKHA dar, welche einen Mittelwert von 345 N für die Orientierung 45-45 erreicht gegenüber 330 N für die Orientierung 90-90. Der Vergleich zwischen der Orientierung 45-45 (Abbildung 2-45) und der Orientierung 90-0 (Abbildung 2-44) zeigt, dass die Klammern Z44CNKHA, Z50CNKHA, Z64CNKHA, Q50CNKHA und Q50CSVHA-ETA höhere Mittelwerte für die Orientierung 45-45 erreichen. Die übrigen Klammern erreichen tiefere mittlere Ausziehkräfte. (SN EN 301:2023)

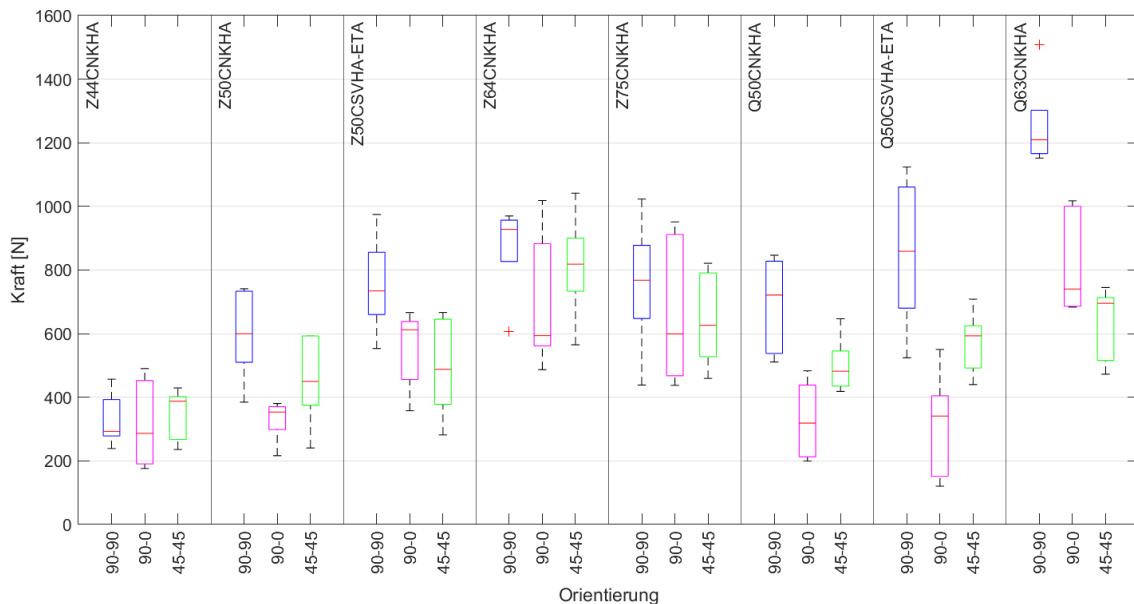


Abbildung 2-46: Auswertung der Ausziehkräfte (zweiseitiger Versuch) für die Orientierung 45-45 mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot.

2.4.4 Ermittlung des Kopf-Durchziehparameters

Die nachfolgende Abbildung 2-47 zeigt beispielhaft 5 aufgezeichnete Kraftverläufe zur Ermittlung der Kopfdurchziehkraft für eine Z50CNKHA-Klammer mit einer Orientierung von 90°. Zur weiteren Auswertung der Kopfdurchziehkraft wurden in diesem Experiment die Maximalwerte jedes aufgezeichneten Kraftverlaufes verwendet.

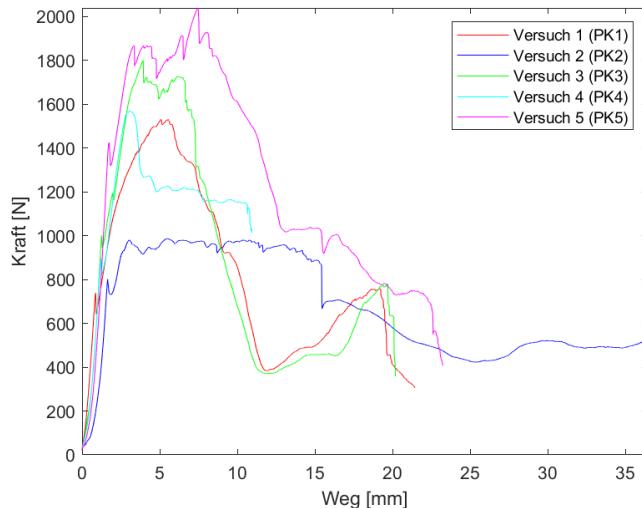


Abbildung 2-47: Aufzeichnung von 5 Versuchen zur Ermittlung der Kopfdurchziehkraft für eine Z50CNKHA-Klammer mit der Orientierung von 90° (Klammerrücken zu Faserrichtung in der Decklage der Dreischichtplatte).

Abbildung 2-48 bis Abbildung 2-49 zeigen die Auswertungen der Kopfdurchziehkräfte jeder Klammer und Orientierung in Form von Boxplots, siehe Abbildung 2-13. Die erreichten Maximalwerte jedes Kraftverlaufes wurden zusätzlich normiert mit der Dichte des Prüfkörpers. Für die Normierung wurde eine Referenzdichte von 350 kg/m³ verwendet.

Abbildung 2-48 zeigt die statistische Auswertung für die Kopfdurchziehkräfte und einer Orientierung von 90°. Innerhalb eines Klammertyps (Z-Klammer, Q-Klammer) ist zu erkennen, dass die Mittelwerte stark variieren. Für die Z-Klammern werden Durchschnittswerte von 1055 N bis 1274 N erreicht während für die Q-Klammern Mittelwerte von 1147 N bis 1447 N erzielt werden. Die QL-Klammer weist einen Mittelwert von 1182 N auf. Der Vergleich zwischen den Klammertypen zeigt, dass die Q-Klammern die höchsten Mittelwerte (im Schnitt 1316 N) aufweisen gegenüber den Z-Klammern (Durchschnitt von 1138 N). Die QL-Klammern weisen einen Mittelwert näher bei dem der Z-Klammer auf als dem der Q-Klammern. Eine Abhängigkeit der Länge mit der Kopfdurchziehkraft kann nicht abschließend bestimmt werden.

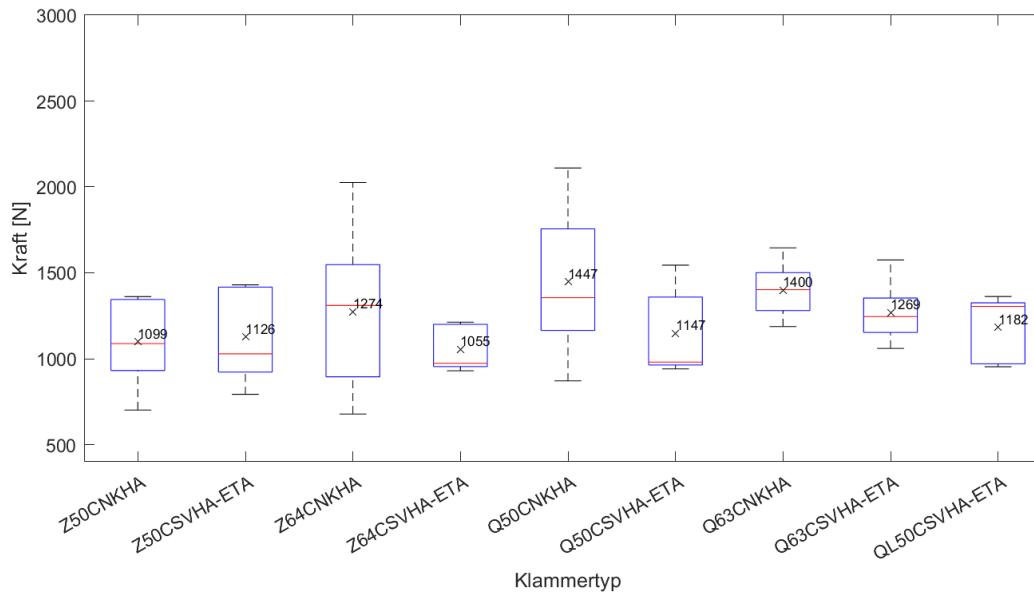


Abbildung 2-48: Auswertung der Kopfdurchziehkräfte für die Orientierung 90° mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot. Normierung der Ausziehkräfte auf eine Referenzdichte von 350 kg/m³.

In Abbildung 2-49 sind die Boxplot-Auswertungen mit den Kopfdurchziehkräften für eine Orientierung von 45° zu sehen. Innerhalb eines Klammertyps ist zu erkennen, dass für längere Klammen kleinere mittlere Kopfdurchziehkräfte erzielt werden (differenzierte Betrachtung zwischen ETA- und nicht ETA-zertifizierten Klammen). Für die Z64-, Q50- und Q63-Klammer ist der Abbildung zu entnehmen, dass die ETA-zertifizierten Klammen einen höheren Mittelwert erreichen als die nicht ETA-zertifizierten Klammen. Bei der Z50-Klammer ist umgekehrtes Verhalten zu beobachten.

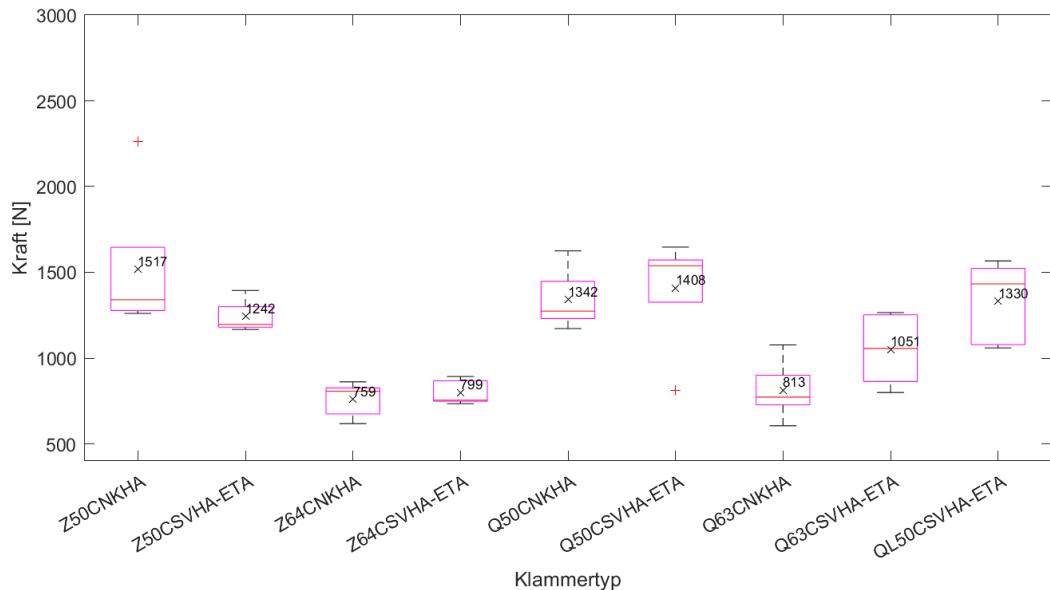


Abbildung 2-49: Auswertung der Kopfdurchziehkräfte für die Orientierung 45° mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot. Normierung der Ausziehkräfte auf eine Referenzdichte von 350 kg/m³.

Der Vergleich der beiden Orientierungen 90° und 45° in Abbildung 2-50 zeigt, dass bei allen Klammen mit einer Länge von 50 mm die durchschnittliche Kopfdurchziehkraft höher ist für eine Orientierung von 45°. Für alle übrigen Klammen sind die mittleren Kopfdurchziehkräfte für eine Orientierung von 90° grösser. Einzig die Klammer Q50CNKHA erreicht für eine Orientierung von 45° eine tiefere mittlere Kopfdurchziehkraft als für eine Orientierung von 90°.

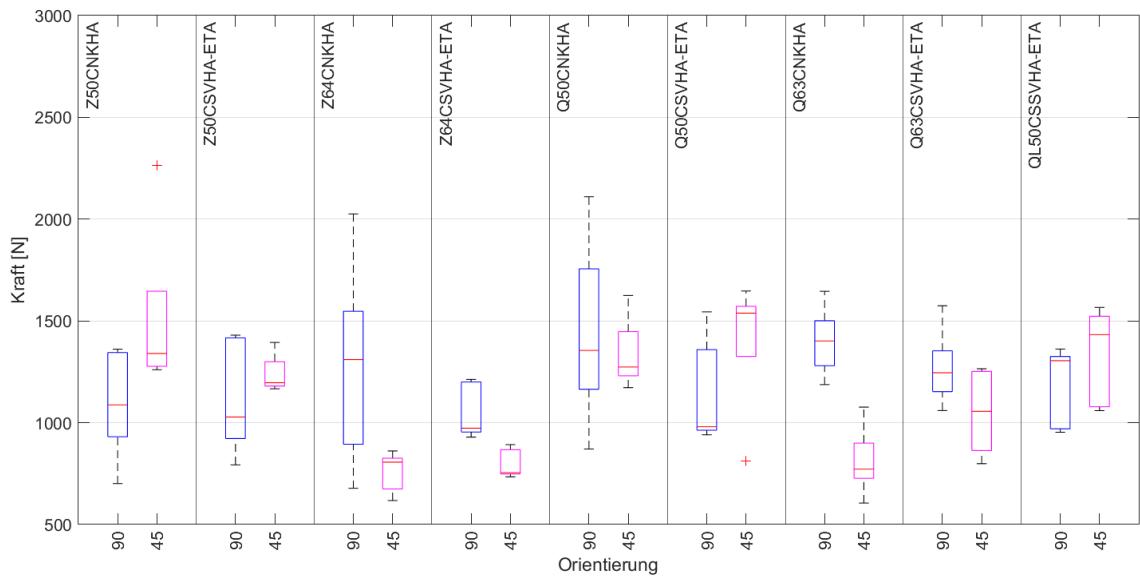


Abbildung 2-50: Auswertung der Kopfdurchziehkräfte für die Orientierung 90° und 45° mit jeweils $n = 5$ Versuchen pro Boxplot. Normierung der Ausziehkräfte auf eine Referenzdichte von 350 kg/m³.

2.4.5 Beurteilung der Spreizung durch Röntgenstrahlen

Die vielen verschiedenen Spreizformen erschweren eine Beurteilung der Spreizung in Abhängigkeit der Klammerkonfiguration, siehe Abbildung 2-51. Vergleicht man die offene Spreizweite am Klammerende, resultiert eine breite Streuung über sämtliche Klammerkonfigurationen, Abbildung 2-52. Die Konfiguration Q63-90 erzielt im Mittel den höchsten Spreizwert vor der Klammerkonfiguration Z64-45, Q63-45 und Z64-90. Die Streuung scheint willkürlich und es kann kein Zusammenhang zu einer besseren Performance der Klammer Q oder Z festgestellt werden.

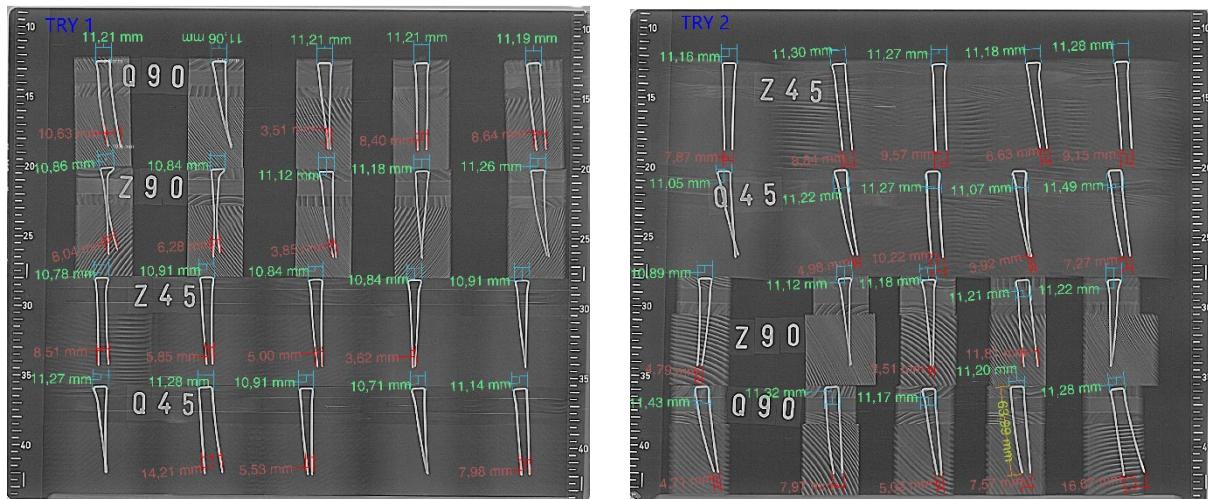


Abbildung 2-51: Vermessene Röntgenbilder von der Q- und Z-Klammer mit einem Einschusswinkel von 45° bzw. 90°.

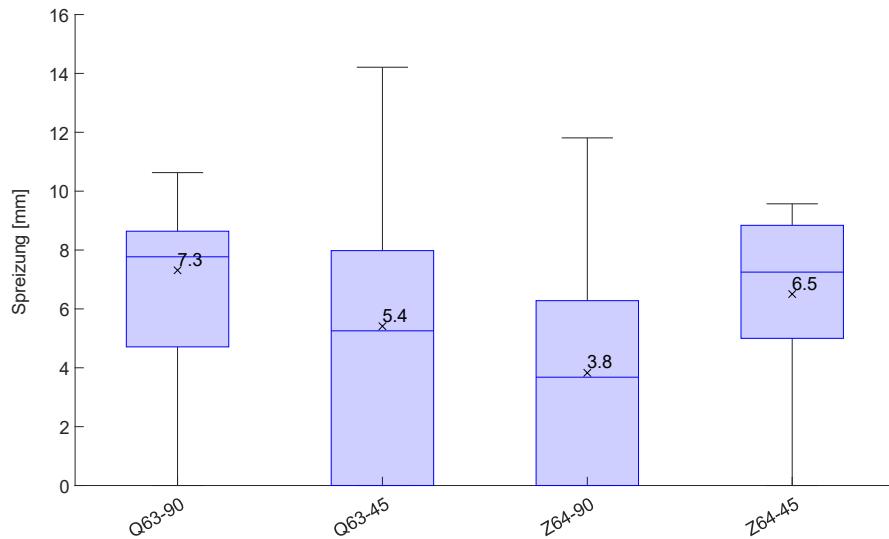


Abbildung 2-52: Durch Röntgenbilder ermittelte Spreizung am Klammerende der Klammern Q63 und Z64 mit einem Einschusswinkel von 45° bzw. 90°.

2.5 Diskussion und Schlussfolgerung

Pro Klammer, Orientierung und Richtung wurden jeweils nur 5 Versuche durchgeführt. Aus diesen Daten wurden dann die statistischen Auswertungen durchgeführt. Bei der Einordnung und Beurteilung der Mittelwerte und Streuungen ist der kleine Stichprobenumfang zu berücksichtigen.

2.5.1 Ermittlung der Anpresskraft

Bei sämtlichen Versuchen zur Ermittlung der Anpresskraft wurden innerhalb der einzelnen Serien sehr grosse Streuungen festgestellt, obwohl die Randbedingungen möglichst identisch waren. So wurde in den Serien beispielsweise darauf geachtet, dass der gleiche Anwender die Klammern einschießt. Da die Streuungen dennoch sehr hoch sind, liegt die Vermutung nahe, dass der Werkstoff Holz mit seinem anisotropen Aufbau und den verschiedenen Holzmerkmalen einen massgebenden Einfluss auf die erzeugte Anpresskraft hat und dass dieser Einfluss möglicherweise sogar denjenigen der eingeschossenen Klammer selbst übersteigt. Zwar wurde auch in Bezug auf die Holzauswahl auf eine möglichst grosse Homogenität geachtet, beispielsweise durch identische Holzqualitäten und Holzfeuchtigkeit, allerdings sind Holzmerkmale, die die Anpresskraft beeinflussen können, oftmals nicht ersichtlich. Dazu zählt insbesondere die mittlere Lage der Dreischichtplatte aber auch das innere des Duo-Balkens, in dem Äste, Reaktionsholz o. ä. nicht sichtbar sind. Bei der Verwendung der angeschliffenen Klammern hatten solche Holzmerkmale anscheinend eine noch grössere Auswirkung auf den Verlauf der Klammer und damit auf die erzeugte Anpresskraft und die Streuung. Dies ist bei der Q-Klammer noch ausgeprägter als bei der Z-Klammer, möglicherweise aufgrund der unterschiedlichen Dicke des Drahtes. Durch den dickeren Draht der Q-Klammer ergibt sich eine grössere angeschliffene Fläche, welche in Kombination mit beispielsweise Ästen in einer sehr grossen Spreizung resultiert.

Wie den Kraftverläufen (Abbildung 2-14) und den Diagrammen mit den Punktepaaren bestehend aus F_0 und F_{180} (Abbildung 2-19 bis Abbildung 2-21) entnommen werden kann, hat eine höhere Kraft beim Nullpunkt eine höhere Kraft nach 180 Sekunden zu Folge. Dies lässt sich damit begründen, dass eine auf die Dreischichtplatte aufgebrachte Kraft (also die Kraft bzw. Druck zwischen der Dreischichtplatte und dem Vollholz) durch das Einbringen einer Klammer bis zu einem gewissen Grad von der Klammer gehalten werden kann. Es treten jedoch Verluste auf. Diese Verluste könnten durch weitere Analysen bzw. durch das Bilden des Verhältnisses von F_0 und F_{180} weiter quantifiziert werden.

Die im System wirkende Kraft setzt sich aus der Gravitationskraft des Applikationsgerätes für die Klammer, der zusätzlich aufgebrachten Kraft durch den Anwender und aus dem Impuls beim Einschießen der Klammer zusammen. Diese Gegebenheit hat zur Folge, dass die wirkende Kraft von Versuch zu Versuch variieren kann und nicht konstant ist über mehrere Versuche. Entsprechend ist eine abschliessende Aussage über die variierenden Initialkräfte zum Zeitpunkt Null nicht möglich. Da die Kraft zum

Zeitpunkt Null (F_0) und die in der Verbindung vorhandene Kraft nach 180 Sekunden (F_{180}) zu korrelieren scheinen, ist auch F_{180} von den sich ändernden Gegebenheiten der Kraft abhängig. Entsprechend ist es abschliessend auch nicht möglich eine verlässliche Schlussfolgerung für die in Abschnitt 2.4.1 dargestellten Boxplots zu ziehen, da diese Abbildungen die Auswertungen der Kraft nach 180 Sekunden darstellen.

Trotz der vorhandenen Unsicherheiten ist eine Regelmässigkeit zwischen den Boxplots zu erkennen. So scheinen beispielsweise längere Klammern eine höhere Kraft nach 180 Sekunden im System halten zu können. Dies kann damit zusammenhängen, dass durch eine längere Klammer die Reibungskraft zwischen Klammerschenkeln und Holz grösser ist und somit mehr Kraft im System gehalten werden kann. Weiter wird eine kleinere Kraft mit den Q-Klammern im Vergleich zu den vergleichbaren Z-Klammern erreicht. Dieser Beobachtung widerspricht die oben genannte Theorie, da der Q-Klammer eine grössere Drahtstärke aufweist und somit höhere Kräfte im System gehalten werden sollten. Eine mögliche Begründung könnte aber sein, dass durch die grössere Reibung und das dickere Drahtmass ein grösserer Verlust des Impulses beim Einschiessen resultiert und dadurch weniger Kraft ins System eingebracht werden könnte. Weiter ist zu erkennen, dass die Z50CSVHA-ETA Klammer tiefere Kräfte im System hält als die äquivalente nicht zertifizierte Z50CNKHA Klammer.

Mögliche Begründungen für die auftretenden Regelmässigkeiten im letzten Abschnitt können durch weitere Analysen und Anpassungen des Versuches gefunden werden. Dazu zählt einerseits die Be trachtung des Verlustes zwischen F_0 und F_{180} und andererseits die Verwendung eines Sliders (Applikationsgerät von Prebena AG) um möglichst alle nicht konstanten Einflüsse eliminieren zu können.

Bei den Gruppenversuchen zur Anpresskraft wurde an verschiedenen Stellen sehr unterschiedliche Kraftzunahmen der einzelnen Klammern festgestellt. Dies könnte, neben der bereits beschriebenen hohen Streuung, auf ein «Sperren» durch zuvor eingeschossene Klammern zurückzuführen sein. Insbesondere die Tatsache, dass die erste Klammer eine deutlich höhere Anpresskraft erzeugt als alle folgenden, deutet darauf hin. Ähnlich verhält es sich bei den zweireihigen Versuchen, bei denen in der zweiten Reihe deutlich geringere Kraftzunahmen aufgezeichnet wurden. Dies lässt die Vermutung zu, dass ein abwechselndes Schiessen der beiden Reihen höhere Anpresskräften gemessen werden könnten. Wie aussagekräftig die resultierende Anpresskraft bei der Aufzeichnung durch vier Kraftmessdosen bei 20 Klammern ist, kann in diesem Rahmen nicht beurteilt werden. Obwohl daher die Absolutwerte der Prüfungen infrage gestellt werden können, ist der relative Vergleich zwischen den verschiedenen Klammerabständen trotzdem aussagekräftig.

2.5.2 Ermittlung des Ausziehparameters mittels einseitigem Ausziehversuch

Die annähernd gleichen mittleren Ausziehparameter innerhalb eines Klammertyps mit der Orientierung 90° für die Klammern Z50CNKHA und Z64CNKHA sowie die Klammern Q50CNKHA und Q63CNKHA lassen sich mit der Normierung über die Eindringtiefe der Klammern begründen. Die etwas längere Z75CNKHA Klammer hingegen erreicht im Vergleich tiefere Werte. Dieser Effekt ist ebenfalls bei den Z50CSVHA-ETA und Z64CSVHA-ETA sowie den Q50CSVHA-ETA und Q63CSVHA-ETA zu beobachten. Diese Beobachtung könnte mit der Aktivierung des Verbindungsmittels bzw. der Länge des Verbindungsmittels begründet werden. Die Zugkraft, welche auf die Klammer wirkt, wird mittels einer Schubkraft auf die Verbindung zwischen Klammer und Holzwerkstoff übertragen. Dabei ist an der Oberfläche des Holzwerkstoffes die Schubkraft am grössten und nimmt über die Eindringtiefe der Klammer ab. Kann die Schubkraft nicht mehr übertragen werden, kann es zum Versagen der Verbindung kommen, wobei nicht zwingendermassen die gesamte Länge der Klammer aktiviert sein muss. Der Vergleich mit den absoluten Werten zeigt jedoch, dass die Z75CNKHA Klammer einen tieferen Mittelwert erreicht als die kürzere Z64CNKHA Klammer. Die Begründung mit der Aktivierung steht somit gewissermassen im Widerspruch mit der vorherigen Begründung, denn eine etwa gleich grosse Kraft für die Z75-Klammer im Vergleich zu der Z64-Klammer wäre zu erwarten (auf Grund der mindestens gleichen Aktivierungslänge).

Die Experimente mit einer Orientierung von 45° zeigen quantitativ vergleichbare Ergebnisse wie mit einer 90° Orientierung wobei die Z50CNKHA Klammer einen um 5 N/mm tieferen Mittelwert in radialer Richtung und 4 N/mm tieferen Mittelwert in tangentiale Richtung aufweist. Um diese Differenz beurteilen zu können, wird eine grössere Anzahl Stichproben zu analysieren vorgeschlagen.

Da in der Anwendung eine Unterscheidung zwischen radialer und tangentialer Richtung nicht stattfinden wird, können die weiteren Betrachtungen der Experimente lediglich auf der Unterscheidung der Orientierung (Mittelwert aus radialer und tangentialer Betrachtung) vorgenommen werden. Ebenfalls spielen die Ausziehparameter gegenüber der Ausziehtragfähigkeit eine untergeordnete Rolle. Bei der Frage, ob zuerst die Kopfdurchziehkraft oder die Ausziehtragfähigkeit erreicht ist, liegt der Fokus auf dem Absolutwert der Kraft.

Der Vergleich der Absolutwerte der beiden Orientierungen zeigt, dass der mittlere Ausziehparameter für eine 90° Orientierung für die durchgeföhrten Experimente höher ist. Eine Erklärung für diese Beobachtung besteht bisher nicht.

Zur Validierung der Versuche wurde für jede Klammer der charakteristische Ausziehparameter nach den Normen SN EN 1382:2016 und SN EN 14358:2016 berechnet. Die Betrachtung des Ausziehparameters auf charakteristischem Niveau zeigt, dass bei den Klammern ohne ETA die Klammer Z64CNKHA mit $f_{ax,k} = 7.12 \text{ N/mm}^2$ und Q63CNKHA mit $f_{ax,k} = 5.57 \text{ N/mm}^2$ die höchsten Werte erzielten. Bei den Klammern mit einer ETA erzielte die Klammer Q50CSVHA-ETA mit $f_{ax,k} = 7.65 \text{ N/mm}^2$ den höchsten Ausziehparameter gefolgt von Z50CSVHA-ETA mit $f_{ax,k} = 7.41 \text{ N/mm}^2$, QL50CSVHA-ETA $f_{ax,k} = 7.26 \text{ N/mm}^2$, Q63CSVHA-ETA mit $f_{ax,k} = 7.19 \text{ N/mm}^2$ und Z64CSVHA-ETA mit $f_{ax,k} = 6.68 \text{ N/mm}^2$. Dabei liegen sämtliche geprüften charakteristischen Werte über dem in der ETA für die Heftklammern angegebenen charakteristischen Ausziehparameter von $f_{ax,k} = 5 \text{ N/mm}^2$ (ETA-16/0101).

2.5.3 Zweiseitiger Ausziehversuch

Der zweiseitige Ausziehversuch zeigt mit wenigen Ausnahmen, dass längere Klammern tendenziell höhere Ausziehkräfte zur Folge haben. Dies ist für die zwei betrachteten Klammertypen, genauer die Z-Klammern und Q-Klammern, gleichermaßen zu erkennen. Eine mögliche Begründung hierfür könnte die zur Länge der Klammerschenkel proportionale Oberfläche sein. Durch eine grössere Oberfläche steigt auch die Haftreibungskraft beim Auszug und somit wird eine grössere Kraft zum Ausziehen der Klammer benötigt. Einzig die Klammer Z75CNKHA stellt hier eine Ausnahme dar. Dabei werden für alle drei Orientierungen tiefere Ausziehkräfte erreicht als für die kleinere Z64CNKHA Klammer. Eine mögliche Begründung konnte dafür nicht gefunden werden.

Weiter werden mit den ETA-zertifizierten Klammern (Z50CSVHA-ETA und Q50CSVHA-ETA) mehrheitlich höhere Ausziehtragfähigkeiten erzielt als mit den äquivalenten nicht ETA-zertifizierten Klammern (Z50CNKHA und Q50CNKHA). Eine höhere Ausziehkraft für diese ETA-zertifizierten Klammern lässt sich durch die angepasste Harzung bei diesen Klammern begründen. Durch die angepasste Harzung wird der Verbund zwischen dem Verbindungsmittel und dem Holzwerkstoff verbessert, woraus eine höhere Ausziehkraft resultiert. Einige Ausnahme stellt hier die Q50CSVHA-ETA Klammer mit einer Orientierung von 90-0 dar, wobei die mittlere Ausziehkraft um 22 N kleiner ist als bei der äquivalenten Q50CNKHA Klammer. Dieser Unterschied könnte auf die kleine Stichprobengrösse von $n = 5$ pro Klammer und Orientierung zurückgeführt werden. Für eine abschliessende Aussage wären weitere Experimente durchzuführen.

Der Vergleich zwischen den Z- und Q-Klammern zeigt, dass die Q-Klammern tendenziell einen höheren Ausziehparameter aufweisen verglichen mit den vergleichbaren Z-Klammern (einzig die Klammer Q63CNKHA für eine Orientierung 45-45 stellt eine Ausnahme dar). Dies lässt sich wiederum mit der Oberfläche der Klammerschenkel begründen. Die Q-Klammer weist ein stärkeres Drahtmass auf als die Z-Klammern, wodurch die Oberfläche für die gleiche Klammerlänge vergrössert wird. Dadurch steigt auch die Reibungskraft zwischen Verbindungsmittel und Holzwerkstoff.

Aufgrund dessen, dass die Ausziehkräfte für die Orientierung 90-0 am tiefsten sind im Vergleich zu den anderen Orientierungen wurde in nachfolgenden Experimenten nur noch die Orientierungen 90-90 und 45-45 betrachtet. Die Orientierung 90-90 ergibt zwar die höchsten Werte, jedoch ist die Orientierung 45-45 in der Praxis die einfachste Anwendung (siehe Abbildung 2-2).

2.5.4 Ermittlung des Kopf-Durchziehparameters

Innerhalb eines Klammertyps und bei der Betrachtung lediglich einer Orientierung waren vor dem Versuch keine grossen Unterschiede für die Kopfdurchziehkraft zu erwarten. Denn basierend auf dem Aufbau des Experimentes sollte der Einfluss der Schenkellänge der Klammern keinen Einfluss auf den Kopfdurchziehparameter haben. Ebenfalls wurde angenommen, dass die ETA-Klammern bzw. die

Harzung keinen Vorteil (im Verhältnis zum Effekt des Klammercückens) hinsichtlich des untersuchten Parameters haben sollten. Die Annahme dahinter war, dass im Versuch der Rücken durch die Holzfasern gezogen werden und der Verbund zwischen Klammer und Holzwerkstoff (ausgehend von der Harzung) keinen Beitrag leistet.

Für eine Orientierung von 90° weisen die mittleren Kopfdurchziehkräfte Unterschiede von 219 N für die Z-Klammern und 300 N für die Q-Klammern auf. Diese Schwankungen für die Orientierung von 45° betragen 758 N für die Z-Klammern und 529 N für die Q-Klammern. Während die Unterschiede in der mittleren Kopfdurchziehkrat für eine Orientierung von 45° enorm gross sind und eine plausible Begründung dafür fehlt, könnten die kleineren Schwankung für eine Orientierung von 90° auf die kleine Stichprobengrösse von $n = 5$ pro Klammer und Orientierung zurückzuführen sein.

Werden für die Kopfdurchziehkräfte alle Stichproben eines Klammertyps (Z-, Q- und QL-Klammern) gemittelt, können die Klammertypen miteinander verglichen werden. Für eine Orientierung von 90° ergibt sich eine Kopfdurchziehkrat von 1139 N für die Z-Klammer, 1316 N für die Q-Klammern und 1182 N für die QL-Klammer. Für eine Orientierung von 45° ergibt die mittlere Kopfdurchziehkrat von 1079 N für die Z-Klammern, 1154 N für die Q-Klammern und 1330 N für die QL-Klammern. Für letztere Orientierung können die Unterschiede der mittleren Kopfdurchziehkräfte mit der Drahtstärke bzw. dem Drahtmass begründet werden. Die Z-Klammer weist das kleinste Drahtmass auf, während die QL-Klammer das grösste Drahtmass aufweist. Durch ein grösseres Drahtmass (v. A. aus der Ebene der Klammer) ergibt sich eine grösse Auflagefläche des Rückens auf den Holzfasern und somit verteilt sich der Druck besser im Holz bzw. in den Holzfasern, weshalb mehr Kraft für einen Durchzug aufgebracht werden muss. Für die Orientierung von 90° weist die Q-Klammer den höchsten Kopfdurchziehparameter auf und die Z-Klammer den kleinsten. Dieser Unterschied kann jedoch nicht mit dem Drahtmass begründet werden.

Der Vergleich zwischen den beiden betrachteten Orientierungen zeigt zudem, dass keine abschliessende Aussage über die leistungsfähigere Orientierung gemacht werden kann.

2.6 Zusammenfassung

Eine Auflistung der Mittelwerte aller geprüften Parameter und Klammern gibt die Tabelle 2-2. Dabei stellt die Anpresskraft den massgebenden Parameter für die Pressverklebung dar. Wie im Kapitel 2.3.1 abgebildet, ist die Streuung unabhängig von der Klammer bei sämtlichen Versuchsreihen sehr gross. Dies lässt darauf schliessen, dass die Holzparameter, in welche die Klammern eingeschlossen werden, einen signifikant höheren Einfluss auf die Kräfte haben als der Klammertyp selbst. Bei sämtlichen Versuchen wurde eine 27 mm 3-Schichplatte verwendet, dadurch wurde erwartet, dass bei den Versuchen der Anpresskraft, der 2-seitigen Ausziehkraft sowie der Ausziehkraft die längeren Klammern eine höhere Kraft aufzeigen. Dies konnte jedoch nicht bei sämtlichen Klammern festgestellt werden. Eine Begründung dafür könnte die geringe Versuchsanzahl von $n = 5$ in Kombination dem grossen Einfluss der Holzparameter sein.

Für die weiterführenden Verklebungen werden daher in einem ersten Schritt die Klammern mit einer ETA (Z64CSVHA-ETA, Q63CSVHA-ETA sowie QL63CSVHA-ETA) weiter untersucht, da diese die höchsten Anpresskräfte erzielten, im Vergleich zu den Klammern ohne ETA mit der gleichen Länge. Die Wahl der Länge der Klammern stützt sich auf der Verwendung einer 27 mm Dreischichtplatte. Entsprechend kann die Wahl je nach zu verbindendem Holzwerkstoff variieren, wobei dafür weitere Untersuchungen nötig sind. Ebenfalls sollte der Stichprobenumfang der durchgeföhrten Prüfungen vergrössert werden, wodurch die Aussagekraft der ermittelten Werte erhöht werden könnte.

Tabelle 2-2: Übersicht der Mittelwerte sämtlicher geprüfter Klammern auf Anpresskraft, Ausziehkraft 2-seitiger Versuch, Ausziehkraft und Kopfdurchziehkraft.

Klammername	Anpresskraft [N]	Ausziehkraft 2-seitiger Versuch [N]	Ausziehkraft [N]	Kopfdurch- ziehkraft [N]
Z44CNKHA	107	330	-	-
Z50CNKHA	189	602	1061	1099
Z50CSVHA-ETA	83	755	1394	1126
Z64CNKHA	228	871	1401	1274
Z64CSVHA-ETA	256	-	1481	1055
Z75CNKHA	282	755	1349	-
Q50CNKHA	19	669	1135	1447
Q50CSVHA-ETA	161	856	1672	1147
Q63CNKHA	179	1255	1519	1400
Q63CSVHA-ETA	215	-	1945	1269
QL50CSVHA-ETA	-	-	1673	1182
QL63CSVHA-ETA	136	-	-	-

Die Untersuchungen der Spreizung von Klammern zeigten einen kontraproduktiven Effekt, da es nicht möglich war, eine optimale Spreizung konstant zu erreichen aufgrund des grossen Einflusses der Holzparameter, welche teilweise zu ungewollt grossen Spreizungen führten.

Bei der Untersuchung des optimalen Klammerabstand zeigten die Abstände von 30 mm sowie 40 mm die höchsten Anpressdrücke. Wobei auch bei diesen Versuchen eine relativ grosse Streuung festgestellt wurde. Zudem ist bei diesen Versuchen abschliessend nicht klar, wie aussagekräftig die Messung von den vier Kraftmessdosen auf den gesamten Anpressdruck ist. Da verschiedene Effekte von „Sperren“ der bereits eingeschossenen Klammern und minimale Durchbiegung der Dreischichtplatte Effekte darstellen, welche einen Einfluss auf die Messungen der Kraftmessdosen haben könnten.

Der Vergleich zwischen den einreihig und zweireihig geschossenen Ständern zeigte, dass bei den zweireihig geschossenen Ständern nur ein geringfügig höherer Anpressdruck gemessen werden konnte. Dies ist möglicherweise wieder auf das „Sperren“ von bereits geschossenen Klammern der ersten Reihe zurückzuführen.

3 Beurteilung der Pressverklebung

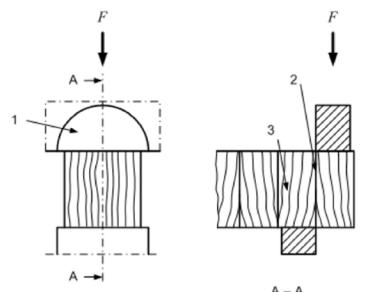
3.1 Einleitung

Bei der Beurteilung der Pressverklebung ging es in erster Linie um die Tragfähigkeit der Klammerpressverklebung. Als Referenz dazu wurden Verklebungen mit kontrolliertem Pressdruck, Schraubpress- sowie Nagelpressverklebungen durchgeführt. Dabei wurden insgesamt 8 verschiedene Klebstoffe, 3 Klammertypen, ein Nagel- sowie ein Schraubentyp untersucht. Hierfür wurden 27 mm Dreischichtplatten auf Massivholz verklebt. Mittels Scherprüfung nach SN EN 14080:2013 wurde die Scherfestigkeit ermittelt und mithilfe des «Wiesner Tests» der Faserbruchanteil in der Bruchfuge analysiert. Eine zusätzliche Beurteilung der Klebefuge wurde mittels Mikroskopie durchgeführt, welche Aufschluss über die Klebfugendicke und -qualität gibt.

Dieses Kapitel beinhaltet zum einen eine Prüfreihe von kleinformatigen Verklebungen, welche unter Laborbedingungen an der Berner Fachhochschule hergestellt wurden, zum andern wurde eine Prüfreihe mit praxisnahen Verklebungsbedingungen an der Berner Fachhochschule simuliert, wobei grösere Prüfkörper mit Absätzen hergestellt wurden. Des Weiteren beinhaltet dieses Kapitel grossformatige Praxisverklebungen welche bei verschiedenen Holzbauer hergestellt und an der Berner Fachhochschule geprüft wurden.

3.2 Bestimmung der Scherfestigkeit nach SN EN 14080:2013 Anhang D

Zur Bestimmung der Scherfestigkeit der Klebefuge wurde die SN EN 14080:2013 verwendet, siehe Abbildung 3-1. Dabei wurden die verklebten Prüfkörper in kleinere Prüfkörper mit einer Scherfläche von ca. 40 mm x 40 mm (bedingt durch die eingeschränkte Schnittführung aufgrund der Klammern teilweise auch kleinere Querschnittsbreiten von mindestens 20 mm) zugeschnitten und nach dem Testsetup der SN EN 14080:2013 getestet, siehe Abbildung 3-2. Die Prüfkörper wurden parallel zur Faser präzise auf der Klebefuge getestet.



Legende

- 1 zylindrisches Druckstück
- 2 Scherfläche
- 3 angemessen durch Klemmen befestigter Prüfstab

F = monotone Belastung



Abbildung 3-1: Illustration der Prüfkonfiguration nach SN EN 14080:2013.

Abbildung 3-2: Scherprüfung auf der Zwick 50 kN.

Die Scherfestigkeit wird nach der Prüfung aus der Bruchkraft wie folgt berechnet:

$$f_v = k_v \cdot \frac{F_u}{A} \quad (3-1)$$

F_u Bruchkraft [N]

$A = b \cdot t$ Scherfläche [mm²]

b Breite [mm]

t Dicke (in Prüfrichtung) [mm]

k_v Ein Faktor: $k_v = 0.78 + 0.0044 \cdot t$, welcher die Scherfestigkeit bei Prüfkörpern mit einer Dicke t in Faserrichtung kleiner als 50 mm modifiziert.

Je nach Klammerkonfiguration konnte die normativ minimale Scherflächenabmessung der Prüfkörper nicht eingehalten werden. Die Scherfestigkeit der Prüfkörper mit einer geringeren Abmessung wurden gleichwohl mittels Formel (3-1) bestimmt.

Die Norm SN EN 14080:2013 gibt Anforderung an die Scherfestigkeit in Kombination mit dem Faserbruchanteil der Prüfkörper. Eine Scherfestigkeit von 4 N/mm² ist beispielsweise nur bei einem Faserbruchanteil von 100 % akzeptabel. Dahingegen muss die Scherfestigkeit jeder Klebefuge mindestens 6 N/mm² betragen, wenn der Faserbruchanteil lediglich bei 74 % liegt. Die verwendeten Anforderungen sind in Tabelle 3-1 angegeben.

Tabelle 3-1: Mindestwerte des Faserbruchanteils, bezogen auf die Scherfestigkeit f_v ^a, nach SN EN 14080:2013.

	Mittelwert			Einzelwert		
Scherfestigkeit f_v , in N/mm ²	6	8	$f_v \geq 11$	4 $\geq f_v \geq 6$	6	$f_v \geq 10$
Mindestwert des Faserbruchanteils, in % ^b	90	72	45	100	74	20

^a Zwischenwerte werden linear interpoliert.

^b Für Mittelwerte muss der Mindestwert des prozentualen Faserbruchanteils 144 – (9 f_v) betragen. Für Einzelwerte muss der Mindestwert des prozentualen Faserbruchanteils, bezogen auf die Scherfestigkeit $f_v \geq 6,0$ N/mm², 153,3 – (13,3 f_v) betragen.

Zur Bestimmung des Faserbruchanteiles wurde der sog. «Wiesner Test» gemacht, d. h. die Bruchflächen der Prüfkörper wurden mit Phloroglucin / HCl angestrichen. Bei den Flächen mit Klebstoffrückständen gibt es keine Verfärbung, wohingegen sich durch die Reaktion mit Lignin beim Holz die Flächen violett verfärbten, siehe Abbildung 3-3. Der prozentuale Faserbruchanteil wurde aus dem Mittelwert der beiden beurteilten Bruchflächen des Scherbruches bestimmt. Der effektive Faserbruchanteil wurde von 2 Personen unabhängig bewertet und daraus der Mittelwert verwendet.



Abbildung 3-3: Faserbruchanteil der Verklebung G2 mit der Klammerkonfiguration Q63_45, rote Flächen zeigen den Faserbruch und die Hellen gelben Flächen den Klebstoffbruch.

3.3 Bestimmung der Scherfestigkeit bei nassen Bedingungen nach EAD 130320-00-0304

Das EAD 130320-00-0304 gibt Angaben zur Prüfung der Klebefuge bei nassen Bedingungen. Dabei verweist sie auf den Prüfablauf der Norm SN EN 14080:2013, siehe Kapitel 3.2. Abweichend dazu sollen die Prüfkörper nach dem Zuschnitt einem Auffeuchtungs- sowie Trocknungsprozess ausgesetzt werden. Dabei werden folgende Schritte durchgeführt:

- Für mindestens 4 Stunden in kochendem Wasser konditionieren
- Für mindestens 16 Stunden in einer ventilierten Trocknungskammer bei einer Temperatur von mindestens 60 °C trocknen
- Für mindestens 4 Stunden in kochendem Wasser konditionieren
- Für mindestens 2 Stunden in Wasser (bei Raumtemperatur) konditionieren

Die Prüfkörper werden anschliessend nass nach dem Anhang D der SN EN 14080:2013 geprüft. Darüber hinaus soll im gleichen Verfahren die reine Holzscherfestigkeit ermittelt werden, um damit eine relative Scherfestigkeit der Klebefuge ($rel. f_{v,b,mean} = f_{v,b,mean}/f_{v,w,mean}$) ermitteln zu können. Folgende Anforderungen sind dabei einzuhalten:

- $rel. f_{v,b,mean} \geq 0.90$
- Holzfaserbruchanteil ≥ 0.70

3.4 Bestimmung der Klebfugendicke

Zur Bestimmung der Klebfugendicke wurden aus den verklebten Prüfkörpern entsprechend der nachfolgenden Kapitel Proben herausgeschnitten. Diese wurden anschliessend auf der Hirnholzseite geschliffen (i. d. R. 800er Körnung) und bei 5-facher Vergrösserung in axialer Blickrichtung unter einem Leica DMLM Lichtmikroskop begutachtet (siehe Abbildung 3-4). Dabei wurde die Klebfugendicke in regelmässigen Abständen digital gemessen und mit einer Jenoptik Gryphax Arktur Kamera entsprechende Fotos gemacht. Bei Prüfkörpern, deren Klebfugendicke 1 mm überstieg, wurde die Messung makroskopisch mithilfe eines digitalen Messschiebers durchgeführt.



Abbildung 3-4: Leica DMLM Lichtmikroskop.

3.5 Material

3.5.1 Holz und Holzwerkstoffe

Bei allen Verklebungen wurden 27 mm Dreischichtplatten aus Fichte (*Picea abies*) mit der Qualität B/C verwendet, wobei die die Seite der B-Qualität für die Verklebung genutzt, und Fehlstellen in der Decklage gemieden wurden. Diese wurden mit Duobalken (C24; 80 x 120 mm; ebenfalls aus Fichte) verklebt, welche innerhalb von 24 Stunden vor dem Verkleben gehobelt wurden. Dies ist ein

Qualitätssicherungskriterium, welches nach der SN EN 14080:2013 bei der Blockverklebung eingehalten werden muss.

Auch im Rahmen der grossformatigen Praxisversuche wurden die Firmen entsprechend angeleitet, die Balken frühestens 48 Stunden vor der Verklebung auf der Verklebungsseite um 2 mm zu hobeln. Bei der Evaluation der Tragfähigkeit wurde festgestellt, dass dies nicht durchgehend durchgeführt wurde. Ebenso wurden nicht nur Duobalken verwendet, sondern auch Konstruktionsvollholz (KVH) sowie Brettschichtholz (BSH).

3.5.2 Klammen

Die drei verwendeten Klammertypen sind in Tabelle 3-2 aufgeführt. Es wurden nur Klammen mit einer ETA verwendet, um einen möglichst schnellen Einsatz der Klammerpressverklebung auf dem Markt zu ermöglichen.

Tabelle 3-2: Klammen welche bei den Klammerpressverklebungen zum Einsatz kamen: ausgewählte charakteristische Eigenschaften.

Klammer	Länge [mm]	Rücken- breite [mm]	Draht- mass 1 [mm]	Draht- mass 2 [mm]	Beschichtung	Harzung
Z64CSVHA-ETA	64	11.2	1.4	1.6	SV	HA-ETA
Q63CSVHA-ETA	63	11.2	1.64	1.87	SV	HA-ETA
QL63CSVHA-ETA	50	11.2	1.8	2.08	SV	HA-ETA

3.5.3 Klebstoffe

Im Rahmen der Pressverklebungen wurden 8 verschiedene Klebstoffe von den unterschiedlichen Wirtschaftspartnern getestet. Dabei handelte es sich ausschliesslich um Polyurethan Klebstoffe, allerdings sowohl 1K-, als auch 2K-Systeme. Die verwendeten Klebstoffe sind in Tabelle 3-3 aufgelistet. Bei den Verklebungen G1 und G5 wurde der gleiche Klebstoff verwendet, wobei die Auftragsmenge variiert.

Tabelle 3-3: Klebstoffe, welche bei der Klammerpressverklebung verwendet wurden: ausgewählte charakteristischen Eigenschaften (Angaben durch Klebstoffhersteller).

Klebstoffbezeichnung	Klebstoffsyste	Dichte [g/cm ³]	Offene Zeit [min]	Mindestpressdauer [min]	Endfestigkeit	Klebstoffmenge [g/m ²]	Viskosität [mPa ³ s]	Pressdruck [N/mm ²]	Klebfugendicke [mm]	Klassifizierungs-Norm
G1/G5	1K-PUR	1.3	<60	>150	7 d	150-300	70'000-100'000	0,1-1	0,1 0,5 1 0,1 0,5 1	
G2	1K-PUR	1.15	<60	150-200						
G3	1K-PUR	1.1	<60	>180	24 h	>200	5'000	Klebfugendicke darf nicht überschritten werden Möglichst geringe Fugendicke	0,3	SN EN 15425:2023
G4	1K-PUR	1.15	<60	135-165	24 h	150-200	10'200	Möglichst geringe Fugendicke	0,3	SN EN 15425:2023
G6	1K-PUR	1.15	<30	>60	24 h	140-200	15'000	Möglichst geringe Fugendicke	0,3	SN EN 15425:2023
G7	2K-PUR	1.34	<30	2 Tage (75 % Festigkeit)	7 Tage	Abhängig von der Klebfugendicke	1'500-4'500	kein Pressdruck vonnöten	-	SN EN 17334:2021
G8	2K-PUR	1.34	<30	>120 (bis 0.1 mm)	7 Tage	Abhängig von der Klebfugendicke	25'000-55'000	kein Pressdruck vonnöten	-	SN EN 17334:2021
G9	2K-PUR					Abhängig von der Klebfugendicke	50'000-70'000	kein Pressdruck vonnöten		

3.6 Methode

3.6.1 Kleinformatige Laborverklebungen

3.6.1.1 Prüfprogramm

Es wurden insgesamt 30 Verklebungen mit den Klebstoffen G1 bis G5 mit den Klammern Z64, Q63 und QL63 durchgeführt. Dabei wurde je Klammer-Klebstoff-Kombination eine Klammerorientierung von 45° und 90° geprüft. Zusätzlich wurde pro Klebstoff eine Referenzverklebung mit einem Pressdruck von 0.1 – 0.2 N/mm² durchgeführt. Abbildung 3-5 stellt eine Übersicht über das Prüfprogramm dar.

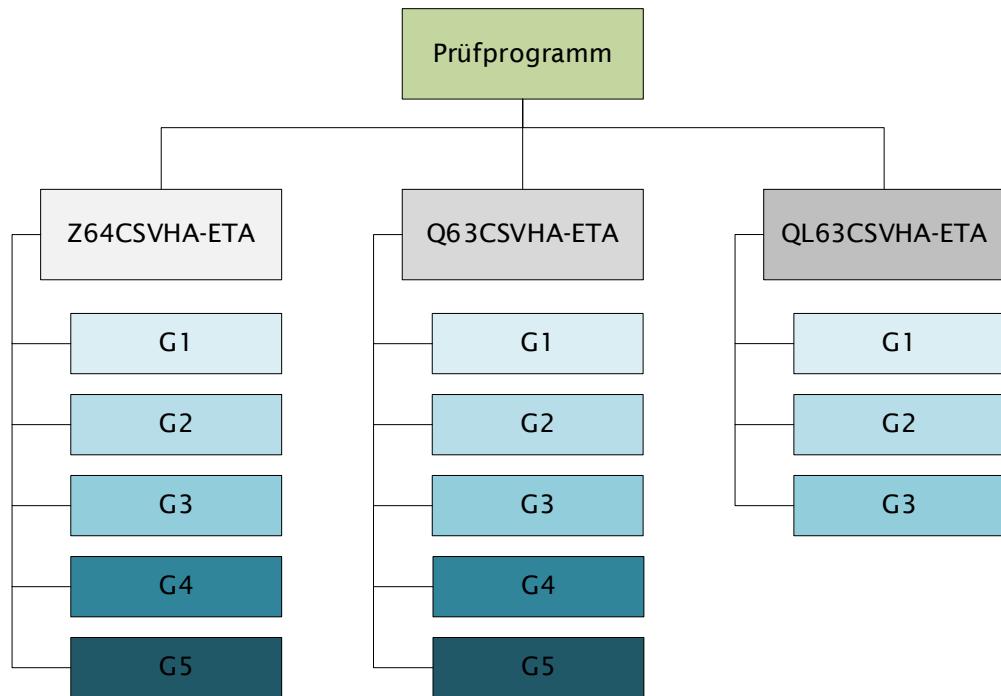


Abbildung 3-5: Prüfprogramm kleinformatige Laborverklebungen; Sämtliche getestete Prüfkonfigurationen sind im Anhang in Tabelle 7-1 aufgelistet.

3.6.1.2 Herstellung der Prüfkörper

In einem ersten Schritt wurde die Massivholzoberfläche mit einer Dickenhobelmaschine «gf hd65» des Herstellers Malawer gehobelt, um eine flache Oberfläche zu erhalten. Die Dreischichtplatten wurde mit der Oberflächenqualität B/C (geschliffen) ab Werk verwendet. Anschliessend wurden die Prüfkörper auf 240 x 160 mm zugeschnitten. Auf die Dreischichtplatte wurde einseitig ~180 – 320 g/m² Klebstoff mit einem Spachtel gleichmässig aufgetragen und anschliessend gewogen, siehe Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7. Die effektiv aufgetragene Klebstoffmenge kann der Tabelle 7-1 entnommen werden. Die Dreischichtplatte wurde anschliessend auf das Massivholz gelegt und mit einem Klammerabstand von 80 mm verklammert, siehe Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9. Zur Evaluation des Klammerabstandes von 80 mm wurde die zurückgezogene DIN 1052-1:1988 verwendet. Diese gibt eine axiale Anpresskraft von 640 N pro Nagel vor. Zusätzlich wird die maximale Fläche pro Nagel auf 6'500 mm² begrenzt. Dies führt zu einem minimalen Anpressdruck von annähernd 0.1 N/mm². Mit der Formel (3-2) bei Berücksichtigung der Prüfkörperbreite von 160 mm und 2 Verbindungsmittelreihen ergibt sich somit ein Klammerabstand S von 81.25 mm. Hierbei wurden Gruppeneffekte von mehreren Klammern in einem ersten Schritt nicht berücksichtigt. Diese wurden später im Projekt genauer untersucht, siehe 2.3.1.2.

$$S = \frac{F * n}{p * w} \quad (3-2)$$

- F Kopfdurchziehwiderstand oder Ausziehwiderstand bei Klammern in Newton
- p minimaler pressdruck zur Aushärtung des Klebstoffes = 0.1 N/mm² (DIN 1052)
- w Breite der Verklebung = 160 mm
- n Anzahl Verbindungsmittelreihen = 2

Anschliessend wurden die Prüfkörper mindestens 5 Stunden bei 20 °C gelagert, um die Presszeit der Klebstoffe einzuhalten. Die Referenzverklebungen wurden mit einem Pressdruck von 0.1 – 0.2 N/mm² und einer Presszeit von 4 Stunden in der Furnierpressmaschine «Langzauner Prefect» durchgeführt. Hierbei muss angemerkt werden, dass der Pressdruck vor der Pressung bei der Furnierpressmaschine auf 0.15 N/mm² eingestellt wurde. Der effektive Pressdruck konnte über die Presszeit nicht aufgezeichnet werden und kann daher von den 0.15 N/mm² abweichen.



Abbildung 3-6: Spachtel zum Auftragen des Klebstoffes auf die Dreischichtplatte.



Abbildung 3-7: Messen der Klebstoffmenge auf dem Prüfkörper.

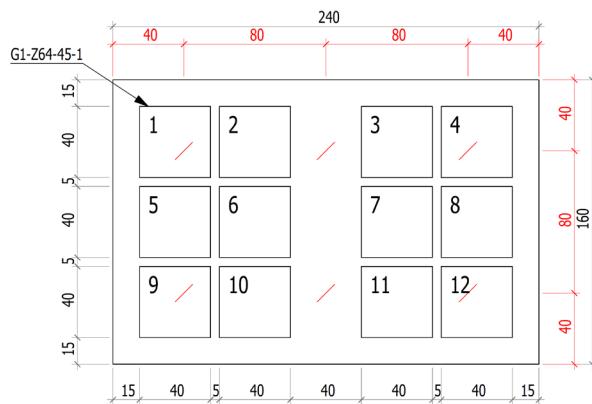


Abbildung 3-8: Konzept der Verklammerung einer Verklebung mit einer Klammerorientierung von 45°.

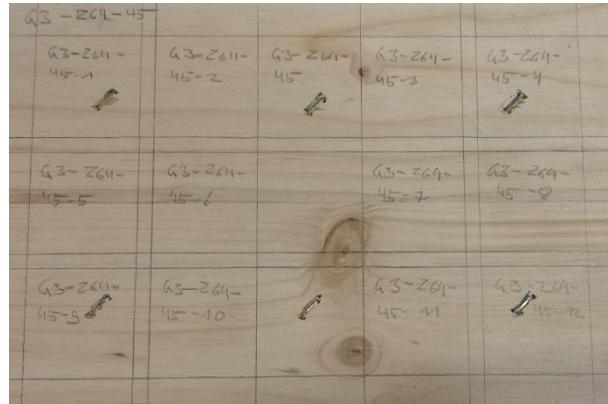


Abbildung 3-9: Position der effektiven Verklammerung des Prüfkörper einer Verklebung.

Aus einem grossen Prüfkörper wurden im Folgenden 12 kleinere Prüfkörper mit einer Abmessung von 40 mm x 40 mm geschnitten, welche anschliessend bei 20 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 65 % 10 Tage gelagert wurden, um die Endfestigkeit der Klebefuge zu erreichen. Zusätzlich wurden aus dem Mittelstück bei jeder Verklebung 3 kleine Prüfkörper geschnitten, siehe Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11. Diese wurden zur Mikroskopie der Klebefuge verwendet.

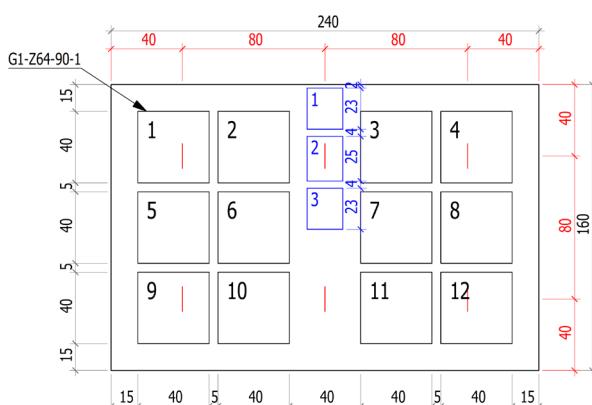


Abbildung 3-10: Konzept der Prüfkörperentnahme für die Mikroskopie.



Abbildung 3-11: Die rote Markierung zeigt die Stelle, an der die Proben für die Mikroskopie entnommen wurden

Die so hergestellten Prüfkörper wurden gemäss folgender Systematik eindeutig benannt:

G1-Z64-90

G1 Definition des Klebstoffes: G1, G2, G3, G4 oder G5
 Z64 Definition der Klammer; Z64= Z64CSVHA-ETA; Q63 = Q63CSVHA-ETA; QL63 = QL63CSVHA-ETA
 90 Klammerwinkel zur Parallelen Ausrichtung der Faser der Decklage; 90 = 90° oder 45 = 45°

3.6.2 Grossformatige Praxisverklebungen Teil I

3.6.2.1 Prüfprogramm

Insgesamt wurden 18 Verklebungen mit 3 verschiedenen Klebstoffen und der Klammer Z64CSVHA-ETA hergestellt. Dies geschah in drei verschiedenen Holzbaubetrieben und es wurden drei unterschiedliche Varianten des Einschiessens geprüft. Diese waren manuelles Einschiessen sowie Einschiessen mit dem Slider und der Portalanlage. Der Slider ist eine halbautomatische Variante des klassischen Schussapparates: er wird von einem Anwender bedient, fährt jedoch auf Rollen und schießt die Klammer im eingestellten Abstand automatisch ein. Die Klammerorientierung variierte zwischen 60° bei der Portalanlage, 30° bei dem Slider und ~30° - 60° bei der manuellen Verklebung. Bei der Portalanlage dem Holzbauer 1 ergab sich beim Einschuss der Klammer eine zusätzliche Aufkraft durch das Aggregat. Bei einer Messung mittels Kraftmessdosen wurde dafür ein Gewicht von rund 80 kg ermittelt. Eine Übersicht über das Prüfprogramm ist in Abbildung 3-12 dargestellt. In Tabelle 7-2 im Anhang ist darüber hinaus eine Übersicht mit allen Verklebungsparametern zu allen Konfigurationen, die hergestellt wurden im Detail aufgeführt.

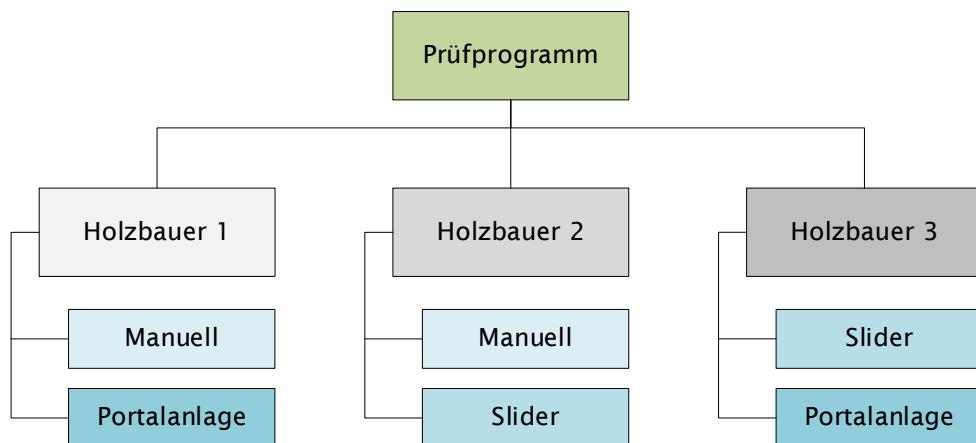


Abbildung 3-12: Prüfprogramm grossformatige Praxisverklebungen Teil I; mit den Klebstoffen G3, G4 und G5; Sämtliche getestete Prüfkonfigurationen sind im Anhang in Tabelle 7-2 aufgelistet.

3.6.2.2 Herstellung der Prüfkörper

Zur praxisnahen Ausführung der Pressverklebung mit Klammern wurden Prüfkörper unter Praxisbedingungen hergestellt. Als Prüfkörper wurden Rippendeckenelemente mit den Abmessungen 1,25 m x 2,50 m erstellt. Diese setzten sich aus einem Rahmen, bestehend aus vier Rippen (80 x 120 mm) und einem durchlaufenden Randbalken an den beiden kurzen Seiten, sowie einer Dreischichtplatte zusammen (siehe Abbildung 3-13). In einem ersten Schritt wurden die Rippen mit den Seitenhölzern zu einem Holzrahmen verschraubt. Anschliessend folgte der Klebstoffauftrag manuell mittels Düsen oder maschinell mittels Portalanlage auf die Ständer (Abbildung 3-14). Nach dem Auftrag des Klebstoffes auf einen Ständer wurde das Gewicht der Kartusche erhoben für die Bestimmung der Klebstoffmenge für jeden Ständer.

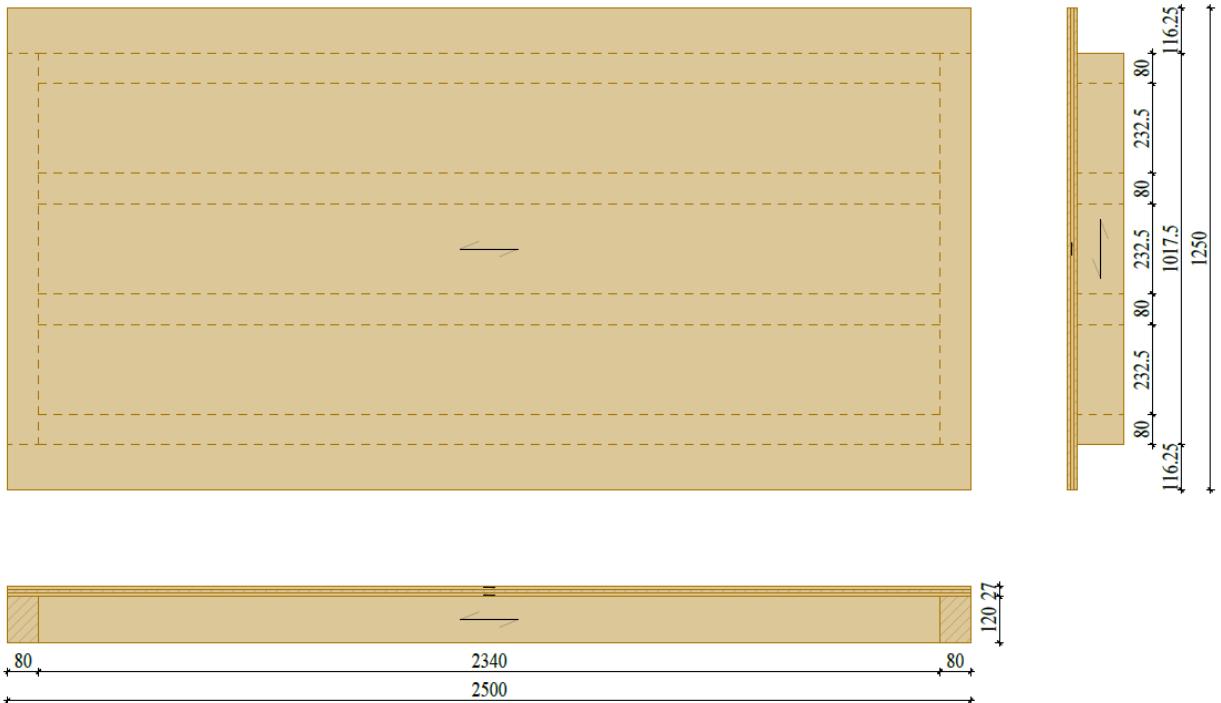


Abbildung 3-13: Rippendeckenelement; alle Angaben in [mm].

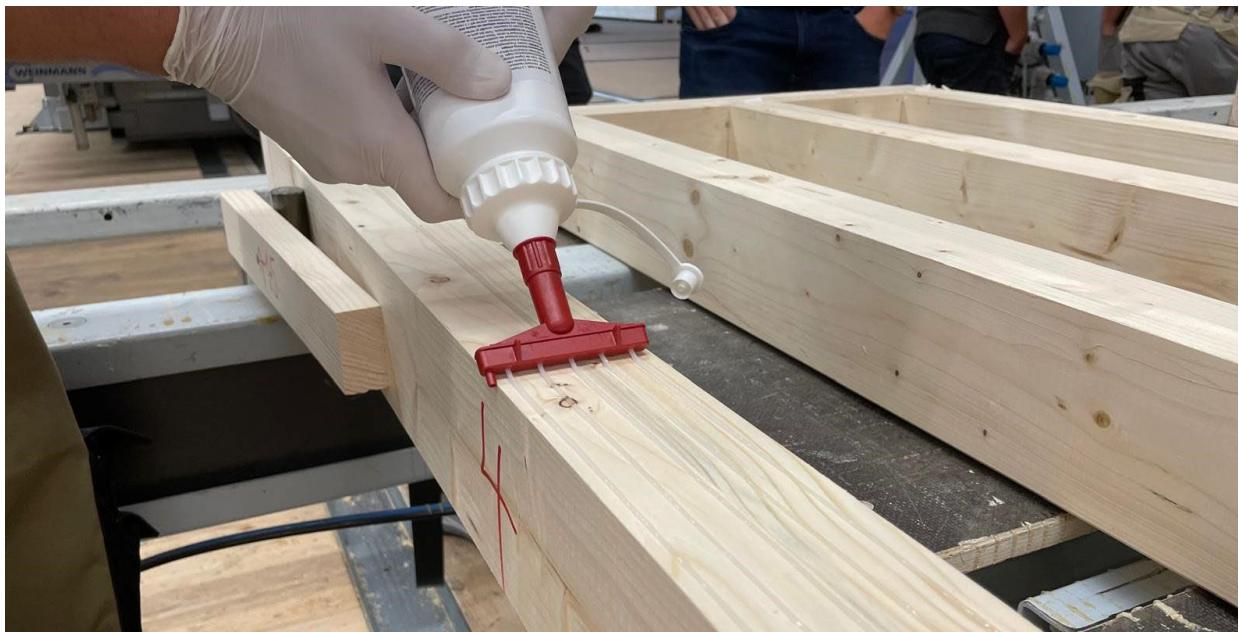


Abbildung 3-14: Düse zum Auftragen des Klebstoffes auf den Ständer.

Für die Praxisverklebungen wurde der in Kap.2.4.1.2 ermittelte optimale Klammerabstand bei einer einreihigen Verklammerung zwischen 30 mm und 40 mm verwendet. Um ein Zuschneiden der Scherprüfkörper zu ermöglichen, wurde für eine einreihige Verklammerung ein Klammerabstand von 40 mm und bei der zweireihigen Verklammerung von 60 mm gewählt. Bei der zweireihigen Verklammerung wurde ein versetztes Klammerbild und ein Abstand vom Ständerrand von 20 mm gewählt (Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16). Nach dem Klebstoffauftrag auf den Ständern wurde die Platte auf den Holzrahmen gelegt und nach der Klammerkonfiguration, in Abbildung 3-17 ersichtlich, verklammert.

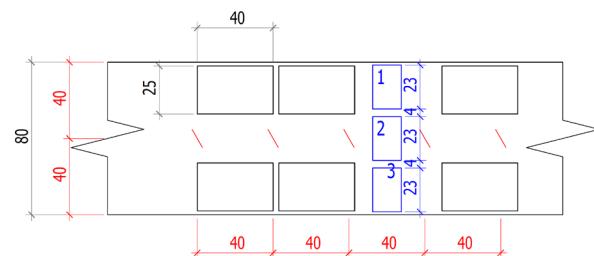


Abbildung 3-15: Klammerbild sowie Lage der Prüfkörper bei der einreihigen Verklammerung; in blau die Prüfkörper für die Mikroskopie.

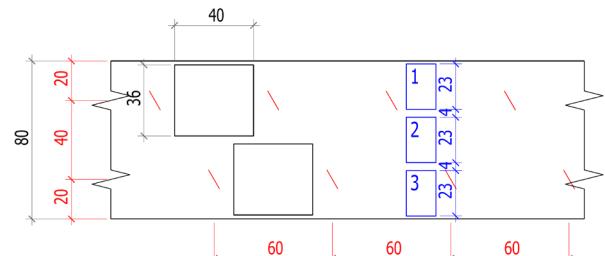


Abbildung 3-16: Klammerbild sowie Lage der Prüfkörper bei der zweireihigen Verklammerung; in blau die Prüfkörper für die Mikroskopie.

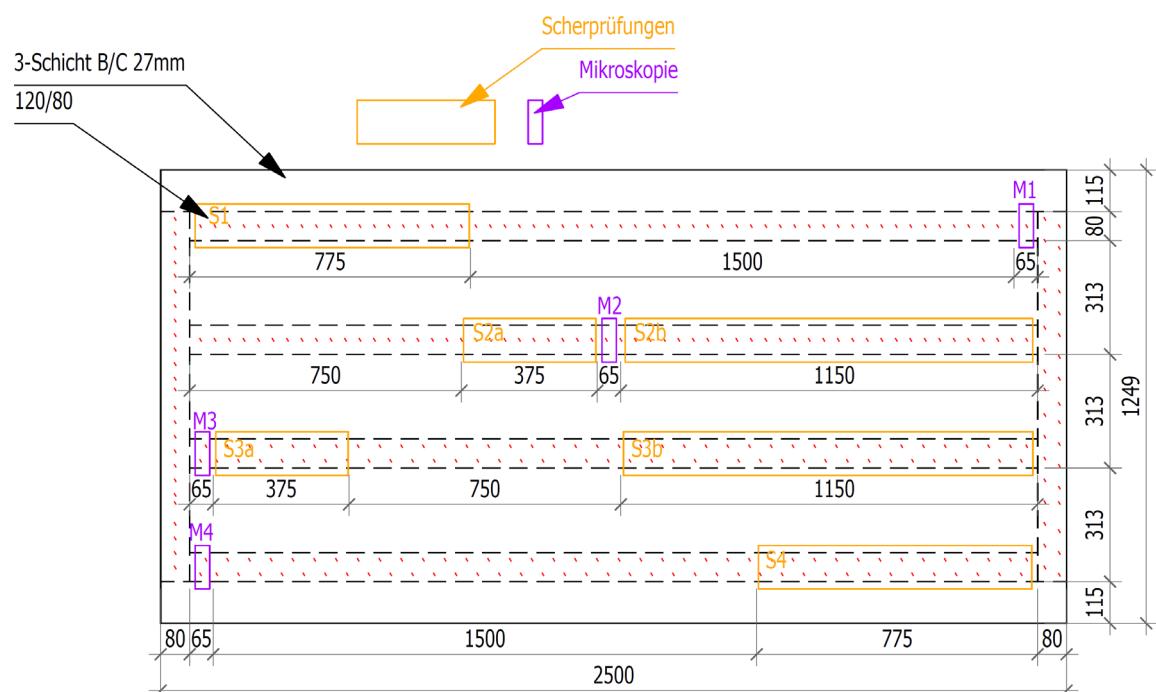


Abbildung 3-17: Konzept der Verklammerung und Prüfserie sowie Zuschnitt einer grossformatigen Praxisverklebung.

Anschiessend wurden die Elemente für min. 4 Stunden in den Firmen bei 21-24 °C sowie 40-55 % rel. Luftfeuchtigkeit gelagert. Nach der Aushärtezeit wurden die Elemente von den Firmen in Plattenbalken zugeschnitten, welche für den weiteren Zuschnitt der Prüfkörper an die BFH geliefert wurden. Insgesamt wurden aus einer Verklebung 22 Trockenscherprüförper und 12 Mikroskopieprüfkörper in den in Abbildung 3-17 angegebenen Zonen entnommen. Normativ nach SN EN 14080:2013 ist die minimale Prüfkörperbreite und -höhe für die Scherprüfungen gegeben als 40 mm. Aufgrund der Klammerkonfiguration und variierenden Verklammerung in der Anwendung, konnte diese Prüfkörpergrösse nicht eingehalten werden. Die Korrektur zur Berechnung der Scherfestigkeit wurde gleichermassen nach der SN EN 14080:2013 durchgeführt, vgl. Kapitel 3.2.

Die so hergestellten Prüfkörper wurden gemäss folgender Systematik eindeutig benannt:

Hb1-G3-M-E40-S1

Hb1	Definition der Holzbauer; Hb1, Hb2, Hb3 und Hb4
G3	Definition des Klebstoffes: G3, G4 und G5
M	Art des Verklemmerns der Prüfkörper; M = manuell; P = Portalanlage; P* = Portalanlage mit Zusatzgewicht; S = Slider
E40	Klammerkonfiguration E40 einreihige Verklammerung alle 40 mm; Z60 zweireihige Verklammerung alle 60 mm
S1	Prüfkörperort (an welchem Punkt beim Rahmen befindet sich der Prüfkörper (siehe Abbildung 3-17), S = Scherprüfungen, M = Mikroskopie

3.6.3 Grossformatige Laborverklebungen

3.6.3.1 Prüfprogramm

Neben den kleinformatigen Laborverklebungen wurden auch grossformatige Elemente im Labor der Berner Fachhochschule verklebt. Das Ziel dabei war, den Einfluss von Produktionstoleranzen auf die Klammerpressverklebung zu untersuchen. Dabei wurde ausserdem die Eignung von 2K-PUR Klebstoffen für die Verklebung geprüft. Die Erwartung an diese Versuche war, dass die 2K-PUR Klebstoffe einen geringeren Pressdruck benötigen, als die 1K-PUR Klebstoffe und auch mit grösseren Klebfugendicken funktionieren. Als Referenz zu diesen Tests wurde ein Element mit einer Schraubpressklebung gemäss ÖNORM B 1995-1-1:2023 sowie mit einem 1K-PUR Klebstoff hergestellt.

Insgesamt wurden zwölf Elemente mit drei unterschiedlichen Fertigungstoleranzen und vier verschiedenen Klebstoffen hergestellt (siehe Abbildung 3-18). Dabei wurde eine manuelle, einreihige Verkammerung mit der Klammer Z64CSVHA-ETA mit einer Klammerorientierung von 90° und einem Verbindungsmittelabstand von 40 mm gewählt. 2 Elemente wurden mit der Konfiguration des Klebstoffes G6 ohne Kopfholz hergestellt. Beim Referenz-Element mit Schraubpressklebung wurde eine 8 x 140 mm Tellerkopfschraube (Speedo TK DAG 8/140) mit einem Verbindungsmittelabstand von 167 mm genutzt. Dies entspricht den Anforderungen des österreichischen nationalen Anhangs der EN 1995 (ÖNORM B 1995-1-1:2023).

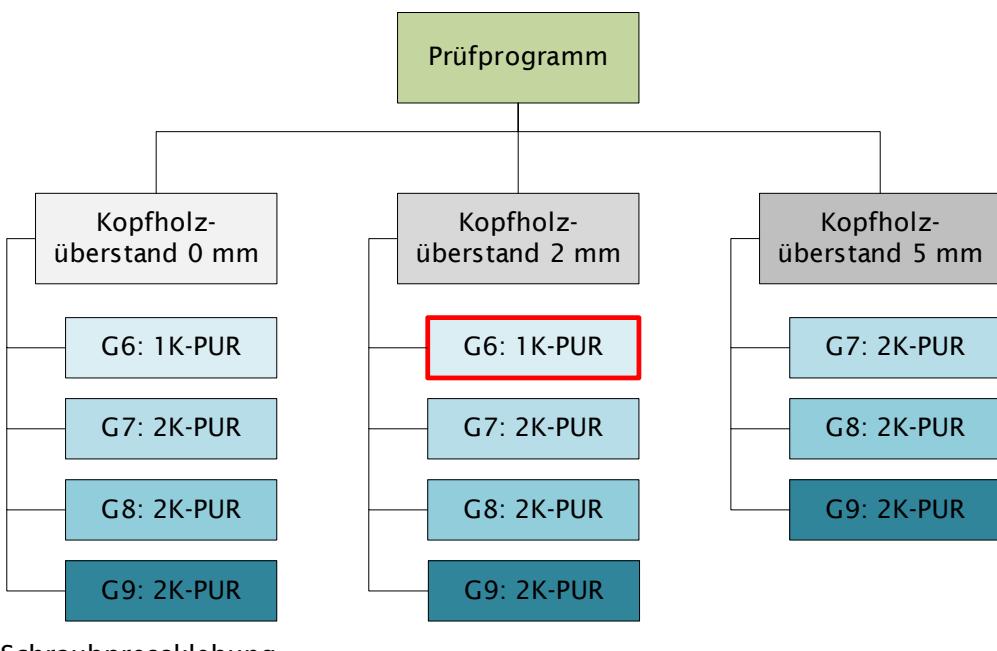


Abbildung 3-18: Prüfprogramm grossformatige Laborverklebungen.

3.6.3.2 Herstellung der Prüfkörper

Für die grossformatigen Laborverklebungen wurden Rippendeckenelemente an der Berner Fachhochschule hergestellt. Diese hatten jedoch aufgrund der zur Verfügung stehenden Räumlichkeiten vergleichsweise kleine Abmessungen: Ein Element bestand aus zwei Rippen und zwei durchlaufenden Randbalken, die mit einer Dreischichtplatte verklebt wurden. Die Gesamtabmessungen betragen 1500 mm x 750 mm (siehe Abbildung 3-19). Die verwendeten Balken lagerten durchgehend im Normklima (20 °C & 65 % r. F.) und wurden vor der Herstellung der Elemente abgerichtet und gehobelt. So konnte gewährleistet werden, dass weder unterschiedliche Holzfeuchten und Oberflächenqualitäten noch Verdrehungen der Bauteile Einfluss auf die Ergebnisse haben. Anschliessend wurden die Rahmen miteinander verschraubt, wobei die planmässigen Überstände der Randbalken durch entsprechende Schifthölzer realisiert wurden (siehe Abbildung 3-20). Im nächsten Schritt wurde der Klebstoffauftrag auf die Balken ebenfalls bei Normklima durchgeführt. Dabei wurde ein manueller Raupenauftrag mit einer Auftragsmenge von etwa 250 g/m² gewählt (siehe Abbildung 3-21). Direkt nach dem Klebstoffauftrag wurden die Dreischichtplatten auf die Holzrahmen gelegt und manuell verklammert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Verkammerung bei allen Elementen vom selben Anwender

durchgeführt wurde und dass sich dieser dabei nicht auf dem Element befand. Nach 5 Tagen Aushärtungszeit bei 20 °C & 65 % r. F wurden die Elemente gemäss Abbildung 3-22 zugeschnitten.

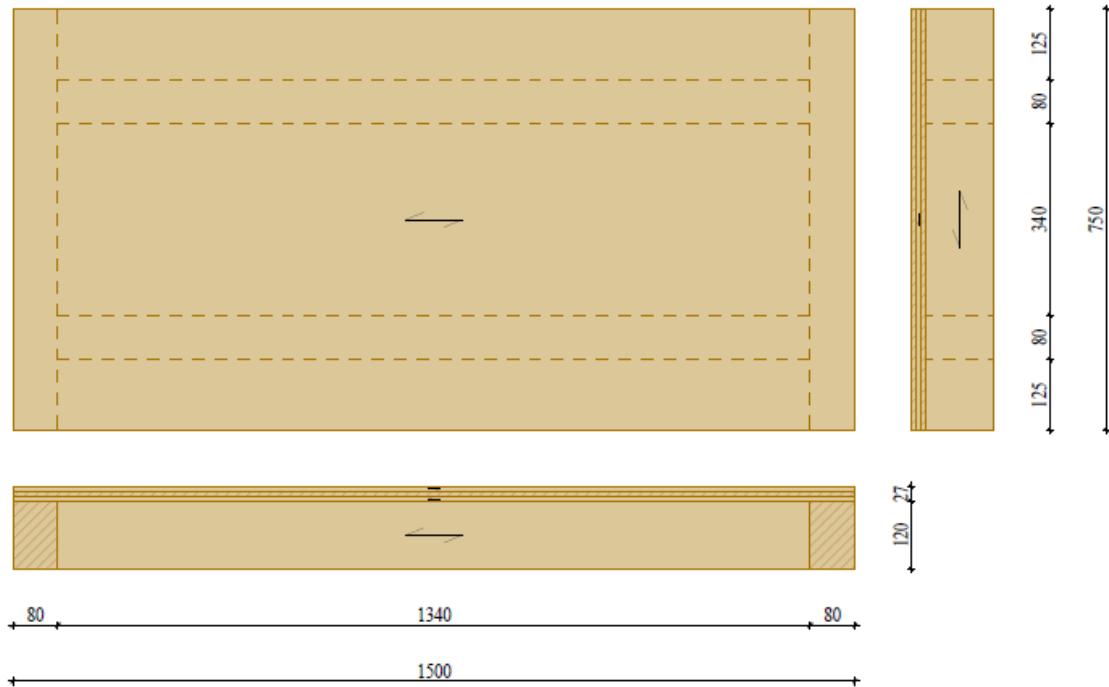


Abbildung 3-19: Rippendeckenelement; alle Angaben in [mm].



Abbildung 3-20: Ausführung Kopfholzüberstand.



Abbildung 3-21: Raupenauftrag.

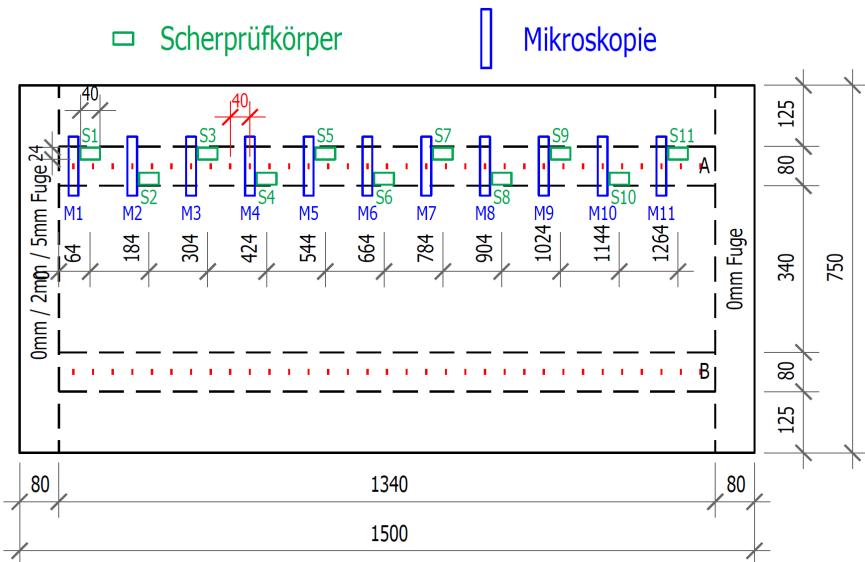


Abbildung 3-22: Zuschnittplan.

Die so hergestellten Prüfkörper wurden gemäss folgender Systematik eindeutig benannt:

G6-0-A-S1

- G6 Definition des Klebstoffs: G6, G7, G8, G9
- 0 Überstand des Randbalkens: 0 = 0 mm (passgenau), 2 = 2 mm, 5 = 5 mm
- A Definition des Ständers: A, B
- S1 Art der Prüfung und Ort im Element (siehe Abbildung 3-22): S = Scherprüfung, M = Mikroskopie

3.6.4 Grossformatige Praxisverklebungen Teil II

3.6.4.1 Prüfprogramm

In einer zweiten Serie von Praxisverklebungen sollte der Einfluss von Vorkräften untersucht werden, die sich beim Einschiessen auf einer Portalanlage durch das entsprechende Aggregat aufbringen

lassen. Daher wurden die Verklebungen bei Holzbauer 4 durchgeführt, denn dort konnte auf einer Portalanlage der Firma Technowood die Vorkraft variiert werden. Neben dem Einfluss von Vorkräften wurde auch in diesen Versuchsreihen der Einfluss von Produktionstoleranzen untersucht. Darüber hinaus wurden vergleichende Versuche mit Nägeln statt Klammern als Verbindungsmittel durchgeführt.

Insgesamt wurden sechs Elemente mit fünf verschiedenen Vorkräften und zwei verschiedenen Fertigungstoleranzen hergestellt (siehe Abbildung 3-23). Die Angabe der Vorkräfte erfolgt in Prozent und bezieht sich auf die maximal mögliche Vorkraft des entsprechenden Aggregats. Auch die Absolutwerte dieser Vorkräfte wurden mithilfe von Kraftmessungen analog zu Kapitel 2.3.1 ermittelt, die Ergebnisse sind in Tabelle 3-4 aufgeführt. Während die Messergebnisse für die Klammern unter Einbezug der Streuung durchaus plausibel sind, wurden für die Nägel bei 50 % und 100 % praktisch identische Werte gemessen. Ob dies an einer Fehleinstellung des Aggregates oder am geringen Stichprobenumfang ($n = 3$) lag, konnte nicht evaluiert werden. Beim Einschiessen auf der Portalanlage wurde die Klammer Z64CSVHA-ETA bzw. der Nagel CW 3.1/80 rille blank GC600 verwendet. Damit wurden die Elemente jeweils einreihig mit einem Verbindungsmittelabstand von 40 mm eingeschossen. Der Klammer-Faser-Winkel betrug 90° und der Klebstoff war bei allen Elementen der 1K-PUR Klebstoff G6.

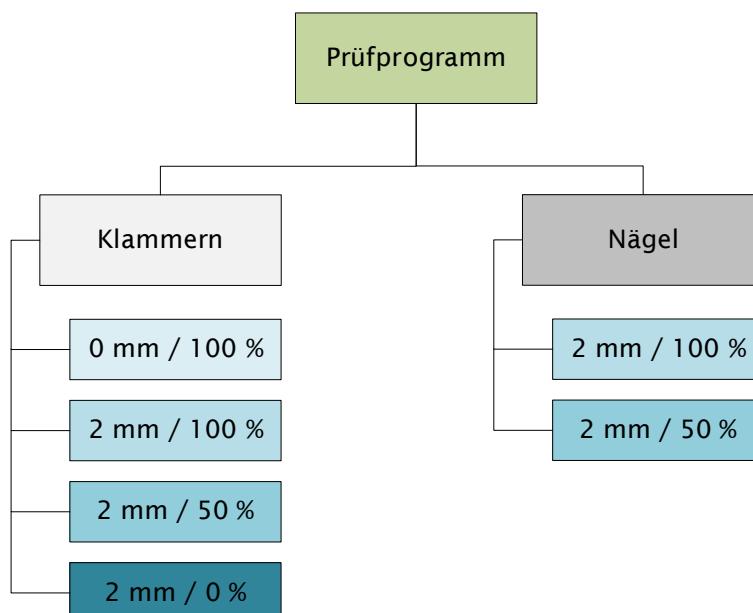


Abbildung 3-23: Prüfprogramm grossformatige Praxisverklebungen Teil II.

Tabelle 3-4: Ermittelte Vorkräfte der Portalanlage.

	100 %	50 %	0 %
Klammern	740 N	450 N	20 N
Nägel	430 N	460 N	-

3.6.4.2 Herstellung der Prüfkörper

Für den zweiten Teil der grossformatigen Praxisverklebungen wurden Rippendeckenelemente analog zu denen aus dem ersten Teil hergestellt: Ein Element bestand aus vier Rippen und zwei durchlaufenden Randbalken, die mit einer Dreischichtplatte verklebt wurden. Die Gesamtabmessungen betragen 2500 mm x 1250 mm (siehe Abbildung 3-24). Die verwendeten Balken lagerten vorgängig an der BFH im Normklima (20 °C & 65 % r. F.) und wurden vor der Herstellung der Elemente abgerichtet und gehobelt. So konnte gewährleistet werden, dass weder unterschiedliche Holzfeuchten, Oberflächenqualitäten noch Verkrümmungen oder Verdrehungen der Bauteile Einfluss auf die Ergebnisse haben. Anschliessend wurden die Rahmen miteinander verschraubt, wobei die planmässigen Überstände der Randbalken durch entsprechende Schifthölzer realisiert wurden (siehe Abbildung 3-25). Die so vorbereiteten Holzrahmen wurden von der BFH zu Holzbauer 4 transportiert und dort wurde im nächsten Schritt mithilfe der Portalanlage der Klebstoffauftrag auf die Balken mit einer Auftragsmenge von 200

g/m² durchgeführt. Dabei kam es bei jedem Element zu einem fehlerhaften Klebstoffauftrag am Anfang des ersten Ständers pro Element (siehe Abbildung 3-26). Dieser fehlerhafte Klebstoffauftrag war jedoch örtlich sehr begrenzt und wurde ausserdem rechtzeitig bemerkt, sodass er bei der Auswertung der späteren Prüfkörper berücksichtigt werden konnte. Direkt nach dem Klebstoffauftrag wurden die Dreischichtplatten auf die Holzrahmen gelegt und die Verbindungsmitel mit der Portalanlage eingeschossen. Nach Ablauf der Presszeit bei Holzbauer 4 wurden die Elemente zurück an die BFH transportiert und dort gemäss Abbildung 3-27 zugeschnitten.

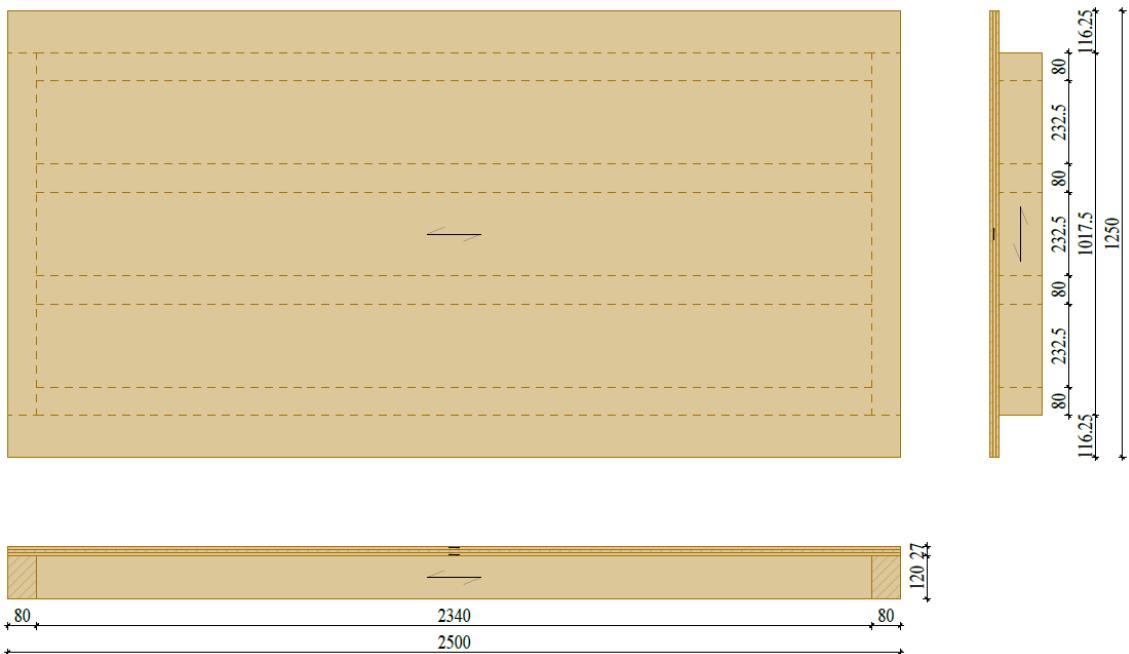


Abbildung 3-24: Rippendeckenelement; alle Angaben in [mm].

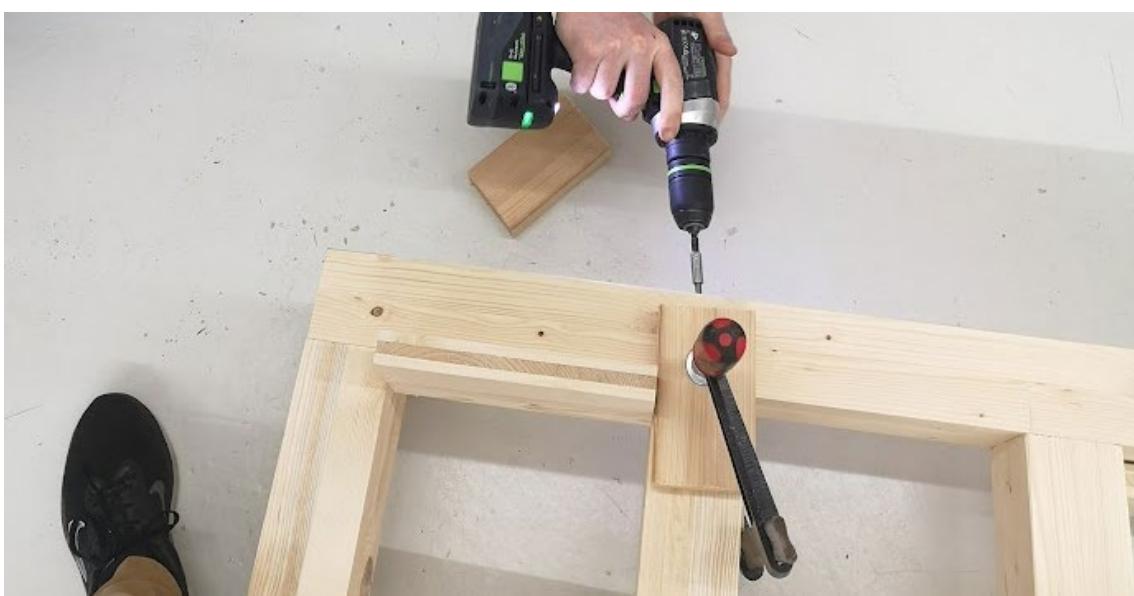


Abbildung 3-25: Ausführung Kopfholzüberstand.

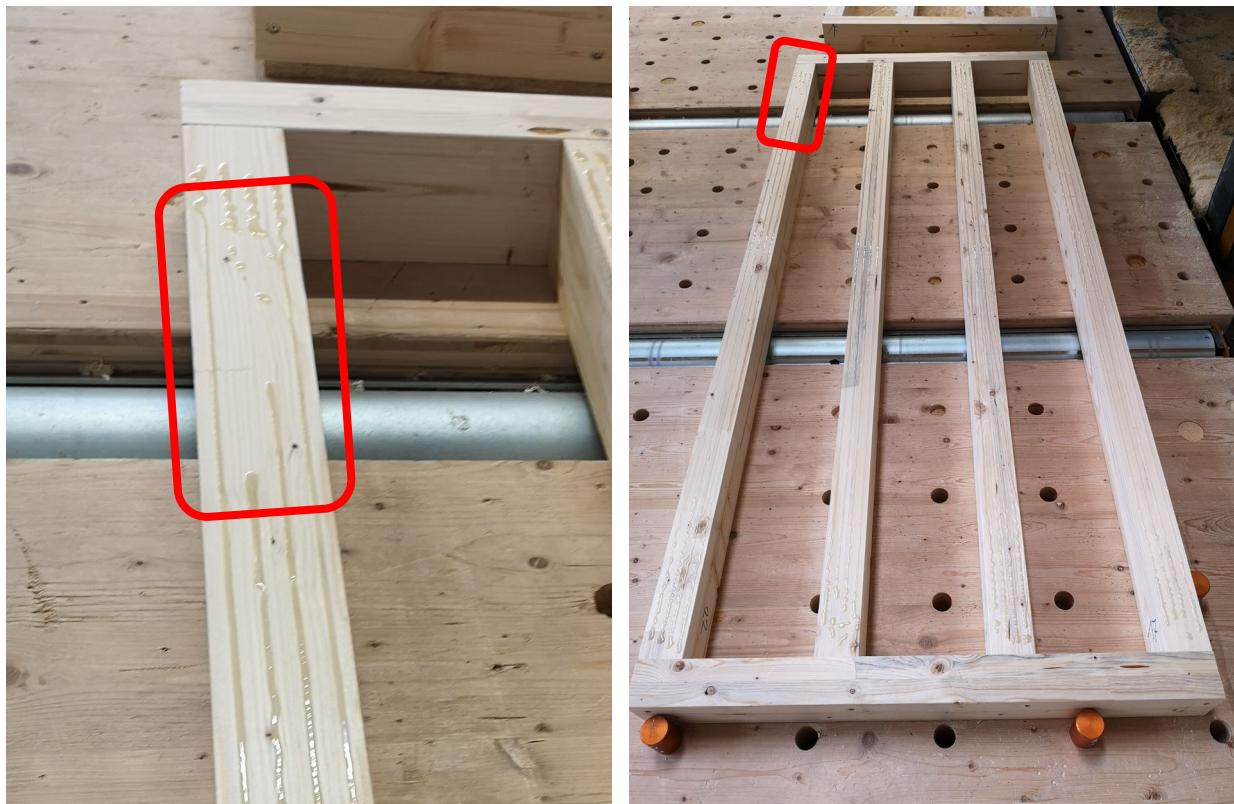


Abbildung 3-26: Raupenauftrag.

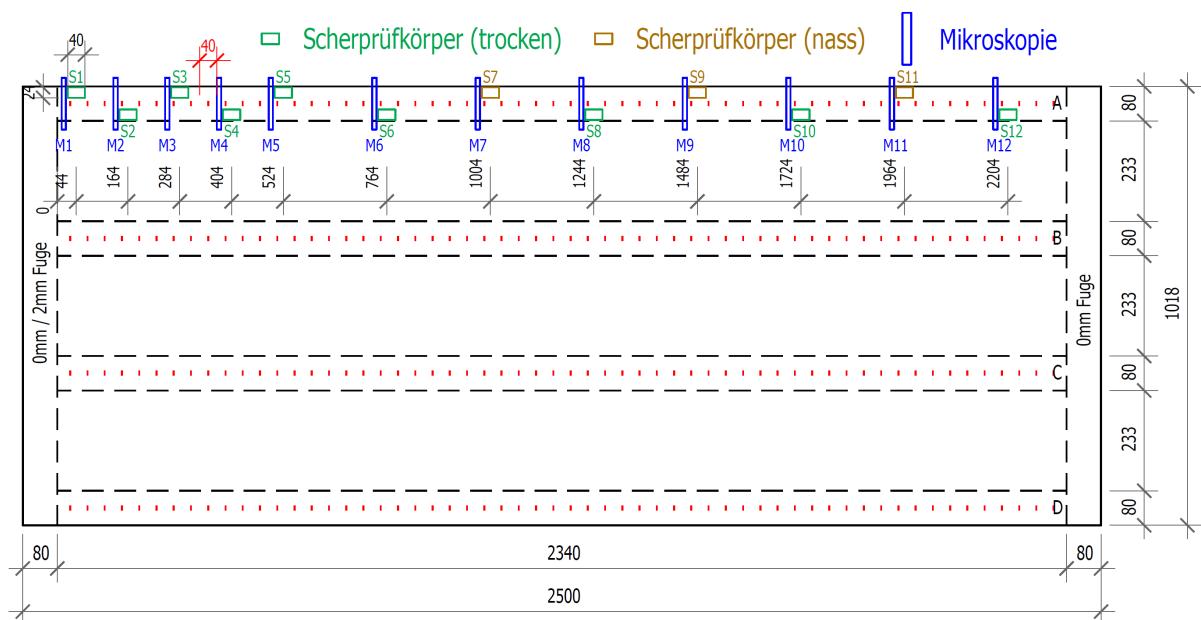


Abbildung 3-27: Zuschnittsplan.

Die so hergestellten Prüfkörper wurden gemäss folgender Systematik eindeutig benannt:

G6-K-0-100-A-S1

- G6 Definition des Klebstoffs: G6
- K Verbindungsmitel: K = Klammer, N = Nagel
- 0 Überstand des Randbalkens: 0 = 0 mm (passgenau), 2 = 2 mm
- 100 Höhe der Vorkraft in %: 100 = 100 %, 50 = 50 %, 0 = 0 %
- A Definition des Ständers: A, B, C, D
- S1 Art der Prüfung und Ort im Element (siehe Abbildung 3-27): S = Scherprüfung, M = Mikroskopie

3.7 Ergebnisse

3.7.1 Kleinformatige Laborverklebungen

3.7.1.1 Scherversuche nach EN 14080

Ein Beispiel der Kraftverläufe der Konfiguration G1-QL63-90 zeigt Abbildung 3-28. Die Grafik zeigt, dass sich bei den Prüfkörpern mit Klammer 1,4,9 und 12 nach dem Scherversagen des Klebstoffes ein konstantes Kraftniveau einstellt, welches auf die Klammer im Prüfkörper zurückzuführen ist.

Die Anforderungen der SN EN 14080:2013 (Tabelle 3-1) wurden als Grenzlinien der Mittel- und Einzelwerte in den untenstehenden Grafiken dargestellt, welche die empirischen Daten zeigen. Die Abbildung 3-29 - Abbildung 3-33 zeigen die Resultate der Verklebungen G1 bis G5 mit den Klammern Z64CSVHA-ETA, Q63CSVHA-ETA und QL63CSVHA-ETA. Dabei haben die Klebstoffe G1, G2 und G5 die Anforderungen der Norm nicht erfüllt. Dabei wird die Mindestanforderung bei diesen und folgenden Diagrammen, als M. A. Abgekürzt. Die Verklebungen G4 erfüllten bis auf einen Prüfkörper die Anforderung, wobei dieser eine Scherfestigkeit von 8.8 N/mm² aufwies und nur geringfügig unterhalb der Grenzlinie lag. Die Verklebungen mit G3 erreichten mit sämtlichen Prüfkörpern ausnahmslos die Anforderungen der SN EN 14080:2013.

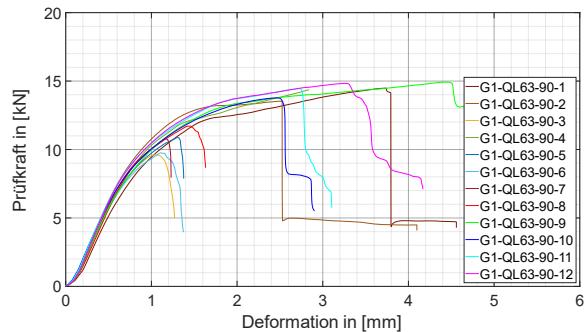


Abbildung 3-28: Kraftverläufe der Scherversuche nach SN EN 14080:2013 mit der Klammer QL63CSVHA-ETA, der Orientierung 90° und dem Klebstoff G1.

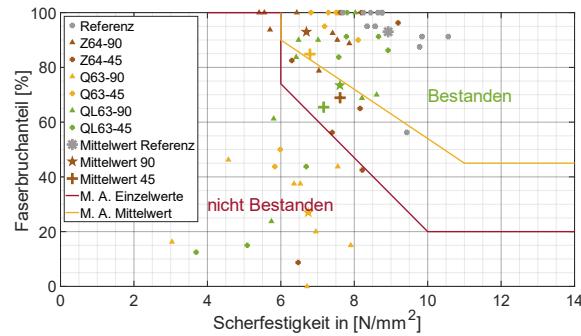


Abbildung 3-29: Darstellung der Einzelwerte und Mittelwerte der Scherfestigkeit der Verklebungen G1; Mindestanforderung wird bei diesem und den folgenden Diagrammen, als M. A. Abgekürzt.

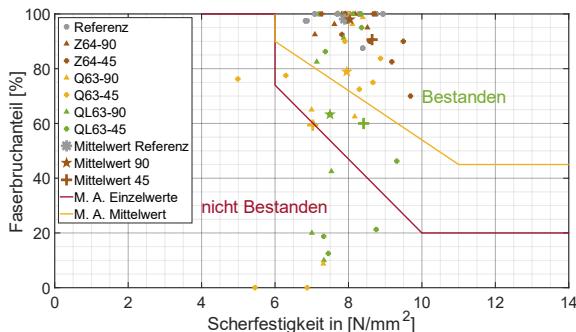


Abbildung 3-30: Darstellung der Einzelwerte und Mittelwerte der Scherfestigkeit der Verklebungen G2.

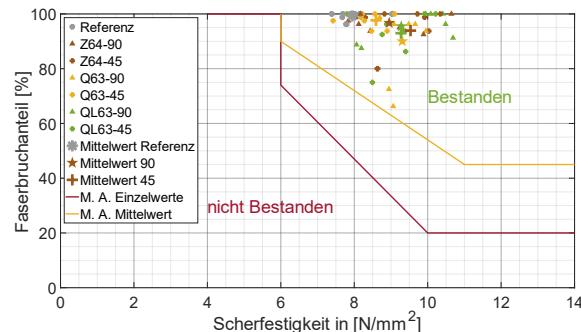


Abbildung 3-31: Darstellung der Einzelwerte und Mittelwerte der Scherfestigkeit der Verklebungen G3.

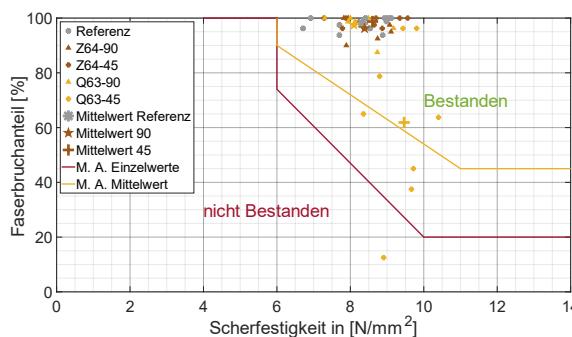


Abbildung 3-32: Darstellung der Einzelwerte und Mittelwerte der Scherfestigkeit der Verklebungen G4.

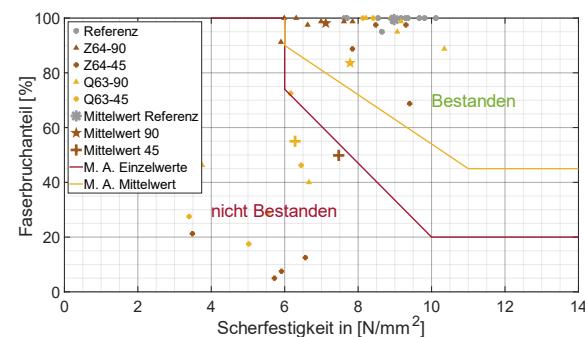


Abbildung 3-33: Darstellung der Einzelwerte und Mittelwerte der Scherfestigkeit der Verklebungen G5.

Des Weiteren wurden die Prüfreihen in 3 Farben eingeteilt. Wenn sich kein Einzelwert unter der roten Linie befindet, erhält die Prüfserie die Farbe Grün. Wenn sich der Mittelwert oberhalb der gelben Line befindet, es jedoch Einzelwerte gibt, die sich unter der roten Line befinden, erhält die Prüfserie die Farbe Gelb. Bei Nichterfüllen der Anforderung von Einzelwerten und dem Mittelwert erhält die Prüfserie die Farbe Rot.

Mit dem beschriebenen Farbkriterium wurde die Scherfestigkeit der Klebstoffe G1 bis G5 jeweils in Boxplots dargestellt, siehe Abbildung 3-34 - Abbildung 3-38. Die Referenzverklebungen von allen 5 Klebstoffen haben die Anforderungen der SN EN 14080:2013 erfüllt. Bei den verklammerten Testkonfigurationen haben G1 mit 4 roten und 2 gelben sowie G5 mit 2 roten und 2 gelben Bewertungen am schlechtesten abgeschnitten. Beim Klebstoff G2 wurden 2 Konfigurationen mit Grün, 1 Konfiguration mit Gelb und 3 Konfigurationen mit Rot bewertet. Klebstoff G4 erreichte bis auf eine gelbe Bewertung ausschliesslich grüne. Nur beim Klebstoff G3 haben sämtliche Prüfkonfigurationen die Anforderungen erfüllt. Es konnte kein signifikanter Einfluss der Klammerkonfigurationen auf die Scherfestigkeit festgestellt werden.

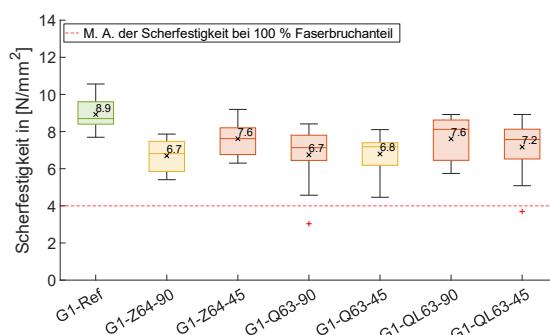


Abbildung 3-34: Boxplot der Scherfestigkeit der Verklebungen G1.

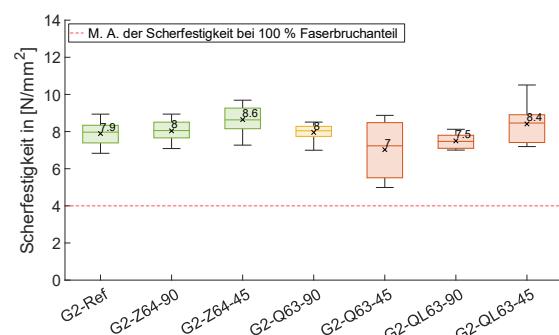


Abbildung 3-35: Boxplot der Scherfestigkeit der Verklebungen G2.

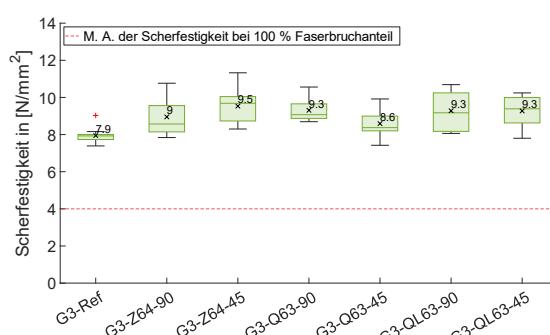


Abbildung 3-36: Boxplot der Scherfestigkeit der Verklebungen G3.

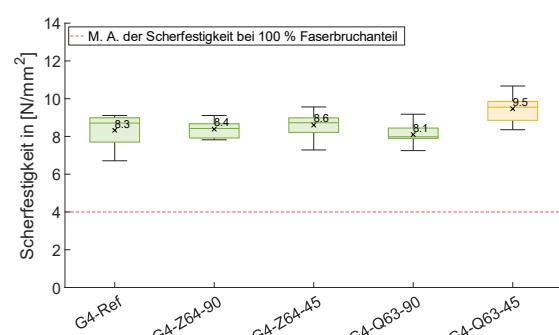


Abbildung 3-37: Boxplot der Scherfestigkeit der Verklebungen G4.

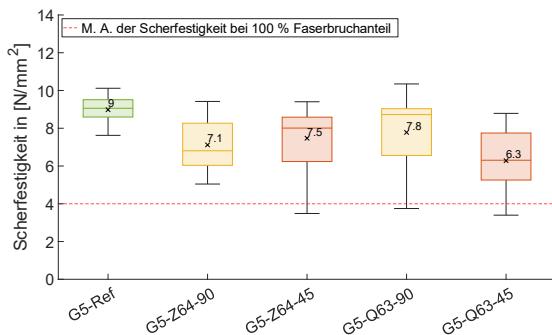


Abbildung 3-38: Boxplot der Scherfestigkeit der Verklebungen G5.

3.7.1.2 Vergleich der Scherfestigkeit mit und ohne Klammer

Hierbei werden die Scherprüfkörper mit einer Klammer 1, 4, 9 und 12 mit den restlichen verglichen, um einen möglichen Einfluss der Klammer auf die maximale Scherfestigkeit schliessen zu können. Bei den Scherprüfungen mit dem Klebstoff G1 war bei 4 Prüfkonfigurationen und bei den Klebstoffen G2 und G3 bei 5 Prüfkonfigurationen der Mittelwert der Scherprüfungen mit Klammer höher als der Mittelwert der Scherprüfungen ohne Klammer, siehe Abbildung 3-39 bis Abbildung 3-43. Wenn man sämtliche Prüfkonfigurationen betrachtet, haben die Prüfkörper mit einer Klammer eine 5 % höhere Festigkeit erreicht als die Prüfkörper ohne Klammern.

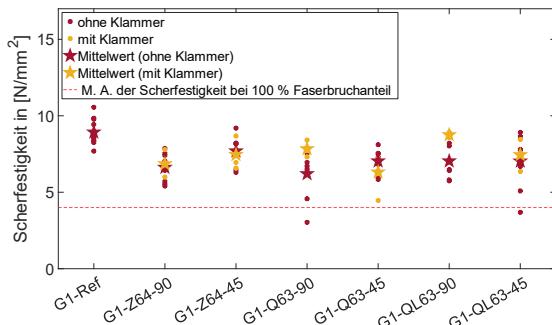


Abbildung 3-39: Vergleich zwischen den Scherprüfungen mit Klammer und ohne Klammer der Verklebungen G1.

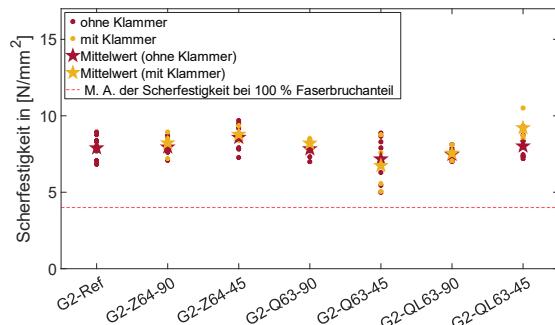


Abbildung 3-40: Vergleich zwischen den Scherprüfungen mit Klammer und ohne Klammer der Verklebungen G2.

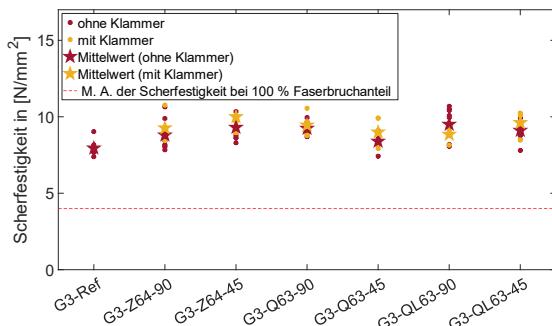


Abbildung 3-41: Vergleich zwischen den Scherprüfungen mit Klammer und ohne Klammer der Verklebungen G3.

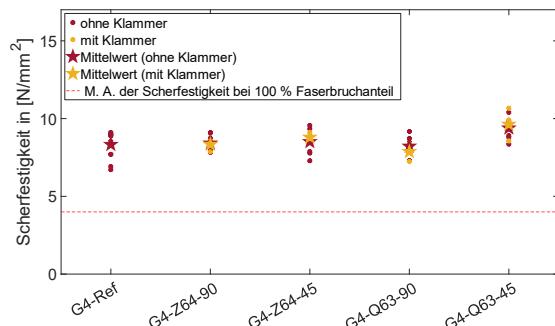


Abbildung 3-42: Vergleich zwischen den Scherprüfungen mit Klammer und ohne Klammer der Verklebungen G4.

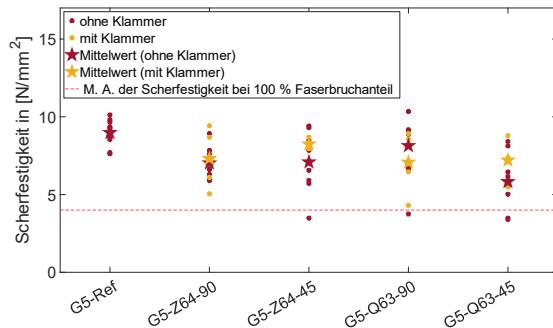


Abbildung 3-43: Vergleich zwischen den Scherprüfungen mit Klammer und ohne Klammer der Verklebungen G5.

3.7.1.3 Analyse der Klebefuge

Für die Analyse der Klebefuge wurden 20 mm breite Materialproben verwendet, welche aus der Mitte einer Verklebung geschnitten wurden, siehe Abbildung 3-10. Da die Dreischichtplatte durch das Schleifen eine sehr raue Oberfläche hatte, ergab sich eine hohe Schwankung der Klebfugendicke. Daher wurden im Abstand von einem Millimeter 3 Klebfugendicken gemessen und daraus der Mittelwert gebildet, siehe Abbildung 3-44. Aus den Mittelwerten wurde anschliessend ein Dicke-Profil der Klebefuge vom Rand bis zur Mitte des Prüfkörpers erstellt, siehe Abbildung 3-45 bis Abbildung 3-49. Bei den Verklebungen G1 kann eine leichte Zunahme der Klebfugendicke von 250 µm auf 350 µm in der Mitte der Verklebungen festgestellt werden. Bei den Verklebungen G5 mit dem gleichen Klebstoff, aber einer geringeren Auftragsmenge, konnte eine Reduktion der Klebfugendicke auf 100 µm und 300 µm festgestellt werden. Bei den Verklebungen G2 zeigte sich bei 2 Prüfkörpern am Rand der Verklebung eine grössere Fugendicke als in der Mitte. Die Verklebungen G3 und G4 wiesen mit einer relativ konstanten Fugendicke zwischen 100 µm und 300 µm die geringste Fugendicke auf.

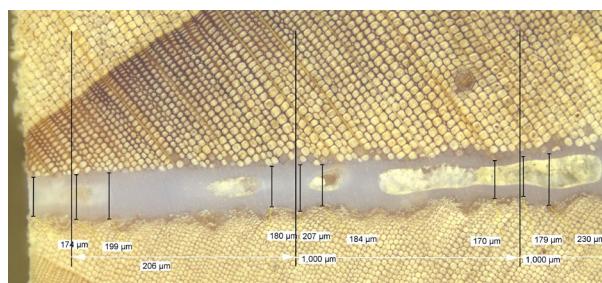


Abbildung 3-44: Klebfugendicke.

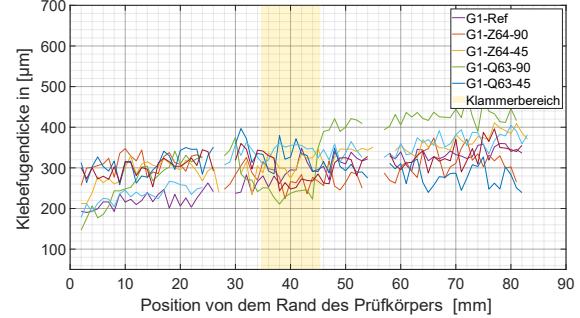


Abbildung 3-45: Verlauf der Klebfugendicke der Verklebungen G1.

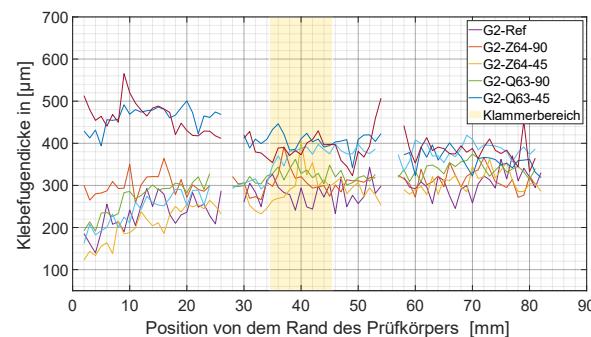


Abbildung 3-46: Verlauf der Klebfugendicke der Verklebungen G2.

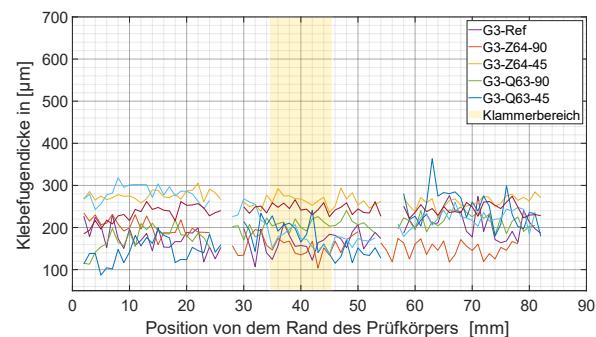


Abbildung 3-47: Verlauf der Klebfugendicke der Verklebungen G3.

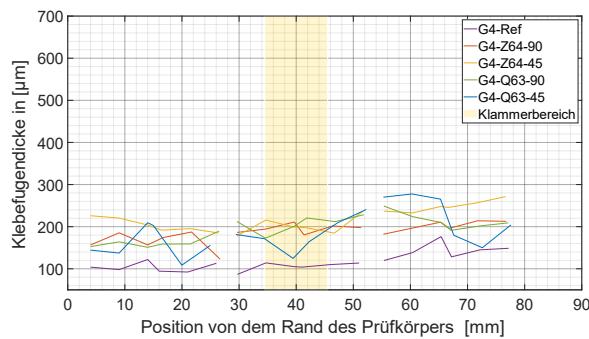


Abbildung 3-48: Verlauf der Klebfugendicke der Verklebungen G4.

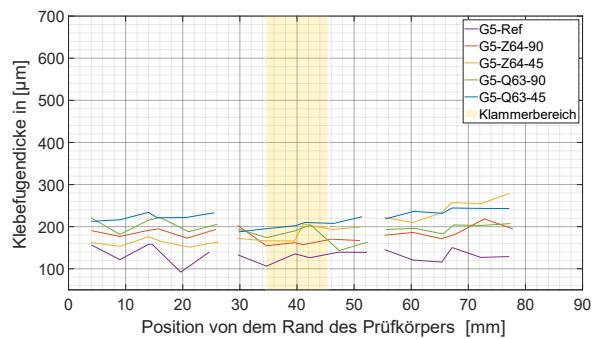


Abbildung 3-49: Verlauf der Klebfugendicke der Verklebungen G5.

Die Oberflächenqualität der Holzflächen scheint einen entscheidenden Einfluss auf die Klebfugendicke zu haben, siehe Abbildung 3-50 der Verklebung G3-Q63-90. Dieses Bild zeigt eine grosse Rauheit der Dreischichtplatte an einer Stelle, was zu einer dicken Klebstofffuge sowie teilweise zu Klebstofflöchern führen kann, siehe Abbildung 3-51.



Abbildung 3-50: Mikroskopie Bild der Verklebung G3-Q63-90 mit grosser Oberflächenrauheit der Dreischichtplatte.

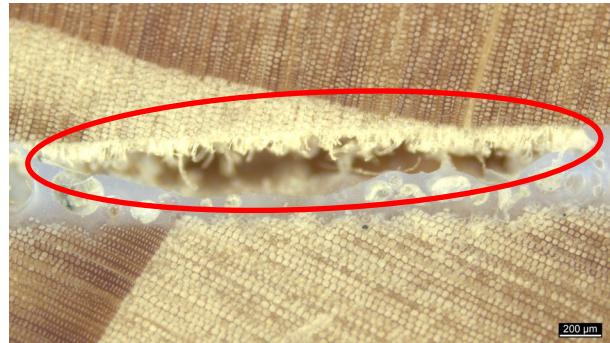


Abbildung 3-51: Mikroskopie Bild der Verklebung G3-Q63-90 mit Luftlöchern in der Fuge aus der Kombination einer dicken Fuge und mangelndem Klebstoff.

3.7.2 Grossformatige Praxisverklebungen Teil I

3.7.2.1 Scherversuche nach EN 14080

Die Ergebnisdarstellung erfolgt analog zu Kap. 3.7.1.1. Abbildung 3-28: Kraftverläufe der Scherversuche nach SN EN 14080:2013 mit der Klammer QL63CSVHA-ETA, der Orientierung 90° und dem Klebstoff G1 bis Abbildung 3-54 zeigen die Resultate der Verklebungen G3 bis G5 mit den Klammern Z64CSVHA-ETA. Im Vergleich zwischen den verschiedenen Klebstoffen hat Klebstoff G3 am besten abgeschnitten, allerdings hatte auch dieser Klebstoff keine Konfiguration, bei welcher sämtliche Prüfkörper die Vorgaben der SN EN 14080:2013 erfüllten.

Bei der Betrachtung sämtlicher Prüfkonfigurationen in Abhängigkeit des Applikationsgerätes fällt auf, dass die Portalanlage Holzbauer 1 am besten abschneidet. Bei dem Klebstoff G3 erfüllt der Mittelwert die Anforderung und nur ein Wert liegt knapp unter der Einzelwertanforderung. Beim Klebstoff G4 liegt der Mittelwert geringfügig unter der Anforderung, da vier Prüfkörper einen sehr tiefen Faserbruchanteil aufzeigen. Beurteilt man zudem den Randeinfluss, zeigt sich, dass sich sämtliche Prüfkörper mit einem sehr tiefen Faserbruchanteil im Bereich bis zu 25 cm Abstand vom Rand befinden, siehe Abbildung 7-7. Beim Klebstoff G5 zeigt sich eine grössere Streuung der Prüfkörper, auch über den Einfluss des Randabstandes hinaus.

Bei der Beurteilung zwischen der Verklammerung einreihig und zweireihig zeigte sich keine klare Tendenz, ob die zweireihige Verklammerung vielversprechendere Resultate hervorbringt, siehe Anhang 7.4.1.

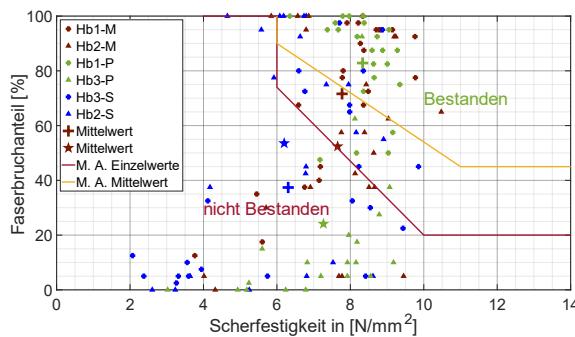


Abbildung 3-52: Darstellung der Einzelwerte und Mittelwerte der Scherfestigkeit der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G3.

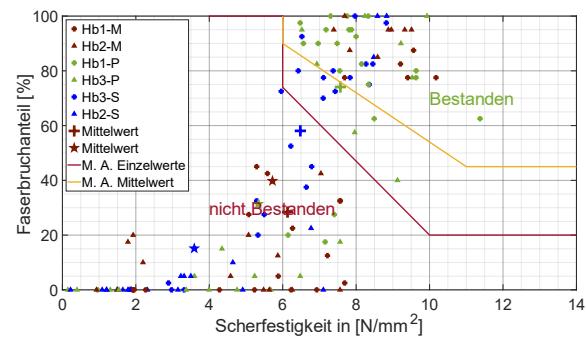


Abbildung 3-53: Darstellung der Einzelwerte und Mittelwerte der Scherfestigkeit der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G4.

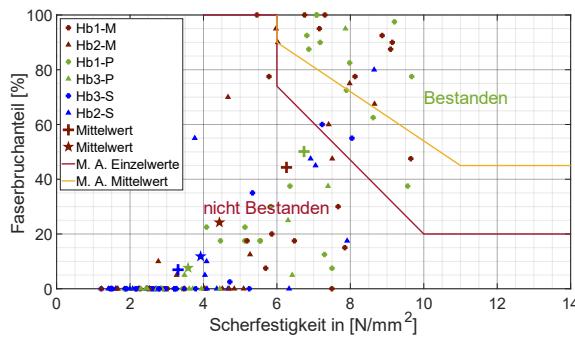


Abbildung 3-54: Darstellung der Einzelwerte und Mittelwerte der Scherfestigkeit der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G5.

Mit dem in Kap. 3.7.1.1 beschriebenen Farbkriterium wurde die Scherfestigkeit von den Klebstoffen G3 bis G5 in jeweiligen Boxplots dargestellt, siehe Abbildung 3-55 bis Abbildung 3-57. Bis auf die Konfiguration Hb1-G3-P lagen sämtliche Mittelwerte unter der Vorgabe, zudem zeigten sämtliche Konfigurationen Einzelwerte auf, welche unter der Anforderung lagen. Vergleicht man die Herstellungsvarianten und -firmen miteinander, zeigt die Konfiguration Hb1-P bei allen Klebstoffen den höchsten Median sowie Mittelwert.

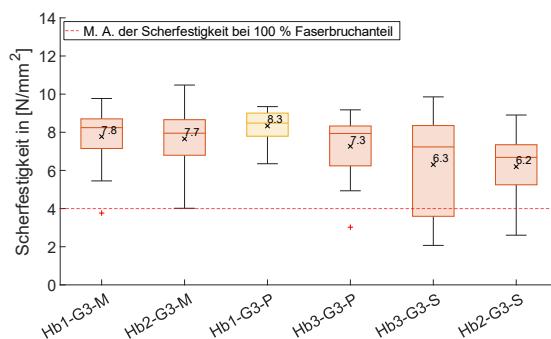


Abbildung 3-55: Boxplot der Scherfestigkeit der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G3.

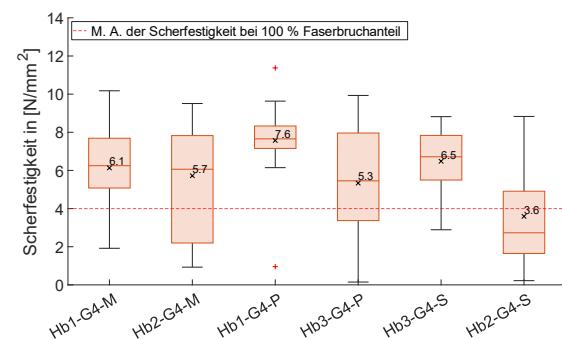


Abbildung 3-56: Boxplot der Scherfestigkeit grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G4.

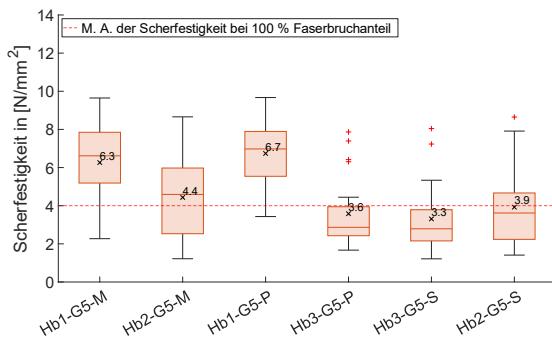


Abbildung 3-57: Boxplot der Scherfestigkeit grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G5.

3.7.2.2 Analyse der Klebefuge

Die Analyse der Klebefuge erfolgte grundsätzlich analog zu Kap. 3.7.1.3. Aufgrund der im Vorhinein durchgeführten Scherprüfungen und der makroskopischen Beurteilung der teilweise sehr dicken Klebefuge, wurden jedoch aus zeitlichen Gründen pro Prüfstelle nur zwei Messungen durchgeführt und linear verbunden. Die Resultate für die Position M1 (vgl. Abbildung 3-17) sind in Abbildung 3-58 bis Abbildung 3-60 abgebildet. Die restlichen Messtellen sind im Anhang 7.5 dargestellt. An gewissen Stellen waren die Klebefugendicken zu gross, um sie mit dem Mikroskop erfassen zu können, daher fehlen diese Verklebungen in den Diagrammen. Ein signifikanter Unterschied zeigt sich zwischen der Mikroskopie am Rand (M1, M3, M4) und in der Mitte (M2). Bei der Position M1 zeigen zum Beispiel bis auf die Verklebung Hb1-G3-M sämtliche Verklebungen eine Klebefugendicke von mehr als 300 µm.

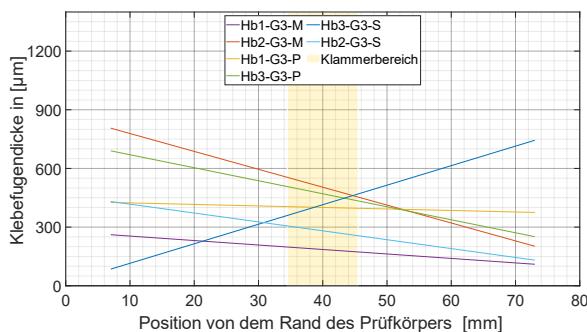


Abbildung 3-58: Verlauf der Klebefugendicke der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G3 an Position M1.

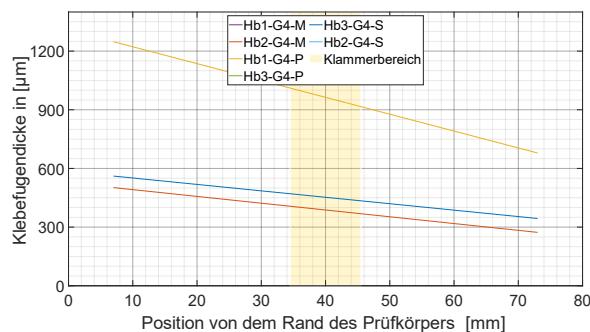


Abbildung 3-59: Verlauf der Klebefugendicke der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G4 an Position M1.

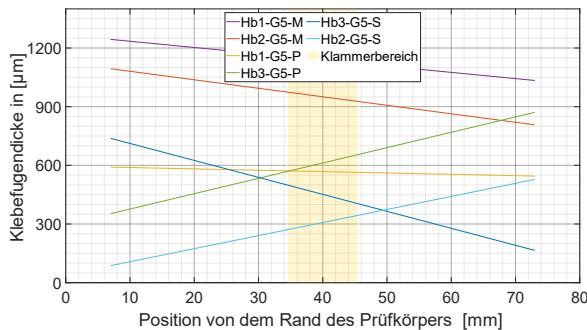


Abbildung 3-60: Verlauf der Klebefugendicke der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G5 an Position M1.

Bei der Beurteilung der Mikroskopiebilder der grossformatigen Praxisversuche zeigten sich grosse Unterschiede in der Qualität der Klebefuge. So zeigen Abbildung 3-61 und Abbildung 3-62 Beispiele für eine gute Verklebung und Abbildung 3-63 sowie Abbildung 3-64 Beispiele von Klebefugen mit einer Dicke weit grösser als 300 µm. Dabei ist die Distanz zwischen den beiden Fügeteile so gross, dass

nicht genügend Klebstoff vorhanden ist, um die Klebefuge vollends mit Klebstoff zu füllen und es bildet sich in der Mitte ein grosser Spalt mit Luft. Beide Oberflächen sind jedoch mit Klebstoff benetzt. Die Abbildung 3-64 zeigt zudem die Fase des Massivholzes.

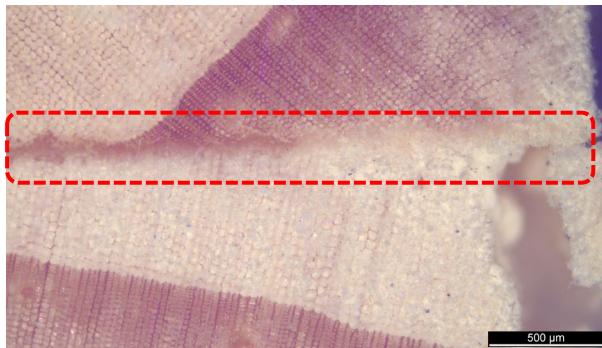


Abbildung 3-61: Mikroskopie Bild der Verklebung Hb2-G5-S der Position M3. Klebefuge im roten Rechteck.

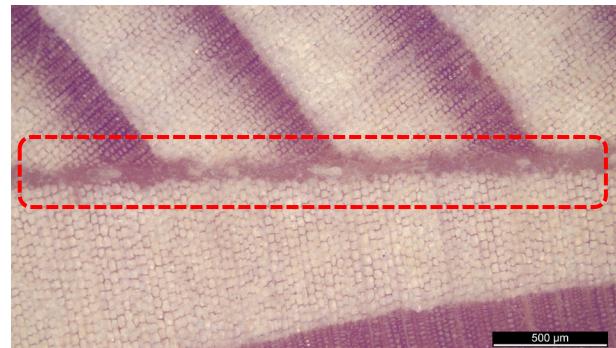


Abbildung 3-62: Mikroskopie Bild der Verklebung Hb1-G3-M der Position M2. Klebefuge im roten Rechteck.

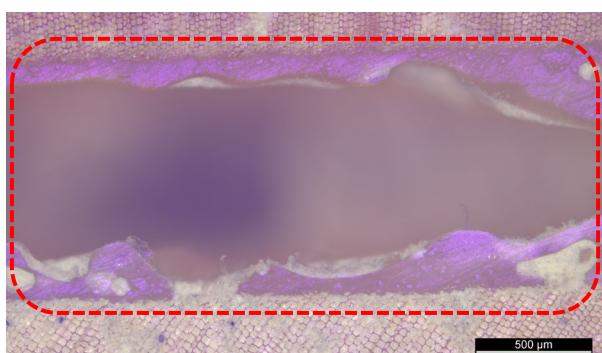


Abbildung 3-63: Mikroskopie Bild der Verklebung Hb1-G4-M der Position M3. Klebefuge im roten Rechteck.

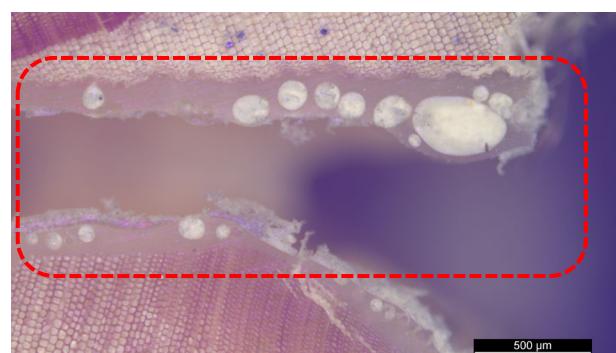


Abbildung 3-64: Mikroskopie Bild der Verklebung Hb3-G5-S der Position M1. Klebefuge im roten Rechteck.

3.7.3 Grossformatige Laborverklebungen

3.7.3.1 Analyse der Scherfestigkeit

Zur Analyse der Scherfestigkeit wurde diese in Abbildung 3-65 bis Abbildung 3-67 in Abhängigkeit von der Ständerlänge geplottet. Dabei wurden die Daten nach den unterschiedlichen Kopfholzüberständen getrennt ausgewertet, um den Einfluss der Fertigungstoleranzen sichtbar zu machen. Die jeweils zwei Rippen pro Element wurden einzeln abgebildet und die einzelnen Datenpunkte in Grün (bestanden) oder Rot (nicht bestanden) dargestellt, um visuell zu verdeutlichen, ob die Anforderungen nach SN EN 14080:2013 erfüllt wurden, oder nicht.

Der Verlauf der Scherfestigkeit über die Ständerlänge ist in Abbildung 3-65 für die Elemente ohne planmässige Fertigungstoleranzen dargestellt. Dabei lassen sich zwar sehr unterschiedliche Festigkeiten in Abhängigkeit vom verwendeten Klebstoff feststellen, über die Elementlänge kann jedoch keine systematische Abhängigkeit erkannt werden. Der 1K-PUR Klebstoff G6 erreicht im Mittel mit etwa 8 N/mm^2 die höchsten Scherfestigkeiten und erfüllt die normativen Anforderungen bei vielen Prüfkörpern. Die niedrigsten Scherfestigkeiten mit etwa 3 N/mm^2 im Mittel weist der 2K-PUR Klebstoff G9 auf, der dabei kein einziges Mal die Anforderungen erfüllt. Die Klebstoffe G7 und G8 weisen grosse Schwankungen in ihren Scherfestigkeiten auf. Dabei unterscheiden sie sich auch in ihren Mittelwerten: Bei G7 liegt die Scherfestigkeit bei etwa 5 N/mm^2 , bei G8 bei ca. 7 N/mm^2 . Entsprechend der grossen Streuung gibt es sowohl Prüfkörper, die die Anforderungen erfüllen, als auch solche, die dies nicht tun.

In Abbildung 3-66 sind die Ergebnisse der Variante mit 2 mm Kopfholzüberstand dargestellt. Dabei lässt sich erkennen, dass die Schraubpressverklebung bereits ca. 10-20 cm vom überstehenden Randbalken entfernt funktioniert und die normativen Anforderungen erfüllt. Die Scherfestigkeiten nehmen bis ca. 30 cm zu und bleiben dann im Mittel relativ konstant bei etwa $8-9 \text{ N/mm}^2$. Bei den klammerpressverklebten Prüfkörpern hingegen werden die Anforderungen der SN EN 14080:2013 über die gesamte Ständerlänge weitgehend nicht erfüllt. Zwar steigt die Scherfestigkeit von ca. 1 N/mm^2 am

Anfang auf knapp 4 N/mm² am Ende an, die Anforderungen werden jedoch nur in wenigen Ausnahmen erfüllt. Beim Vergleich der Klebstoffe lässt sich festhalten, dass Klebstoff G8 tendenziell die höchsten Scherfestigkeiten aufweist, wohingegen sich G7 und G9 nicht systematisch unterscheiden.

Abbildung 3-67 zeigt die Serie mit dem grössten Kopfholzüberstand von 5 mm. Dabei ist zu erkennen, dass erst ab ca. 30 cm überhaupt messbare Scherfestigkeiten erreicht werden, die zum Ende des Ständers zwar ansteigen, jedoch auch dort nur in wenigen Ausnahmen eine Scherfestigkeit von 4 N/mm² übersteigen. Lediglich 2 Prüfkörper mit dem Klebstoff G7 erfüllen in diesem Bereich die normativen Anforderungen. Insgesamt lässt sich jedoch kein deutlicher Unterschied zwischen den Klebstoffen erkennen und die Scherfestigkeiten am Ende des Elements liegen im Mittel bei etwa 3 N/mm².

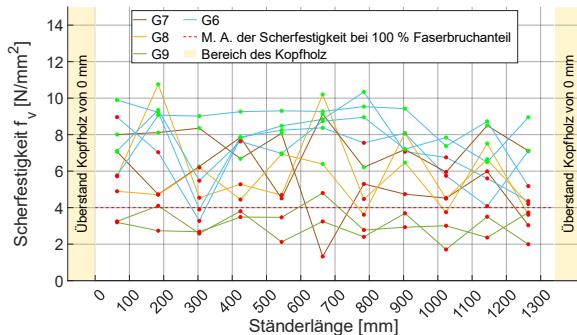


Abbildung 3-65: Scherfestigkeit vs. Ständerlänge: 0 mm Überstand.

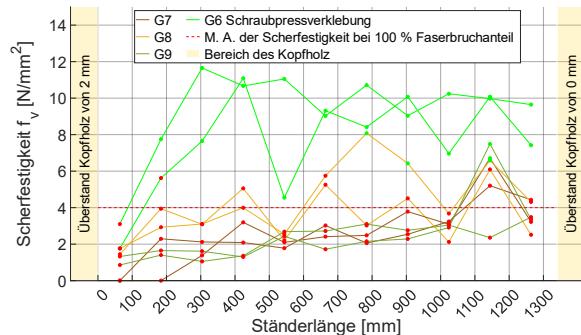


Abbildung 3-66: Scherfestigkeit vs. Ständerlänge: 2 mm Überstand.

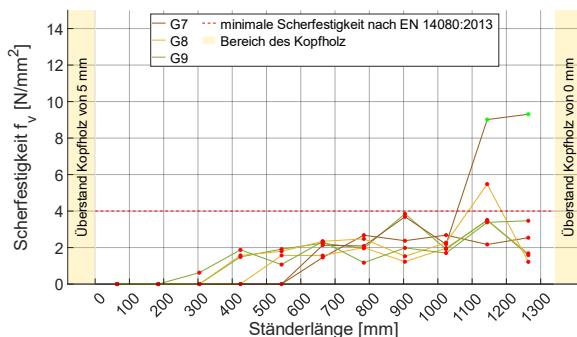


Abbildung 3-67: Scherfestigkeit vs. Ständerlänge: 5 mm Überstand.

3.7.3.2 Analyse der Klebefuge

Abbildung 3-68 und Abbildung 3-69 zeigen exemplarisch zwei Aufnahmen der mikroskopischen Untersuchungen. Die Beispiele stammen aus der Serie mit 2 mm Kopfholzüberstand sowie einem 2K-PUR Klebstoff und zeigen den ersten (Abbildung 3-69) und den letzten (Abbildung 3-68) Prüfkörper in Bezug auf den Abstand zum überstehenden Randbalken. Dabei lässt sich bereits erkennen, dass die Klebefugendicke mit zunehmendem Abstand vom überstehenden Randbalken abnimmt. Jedoch weist sie auch am weitesten entfernten Punkt eine grosse Fugendicke auf. Darüber hinaus wird auch deutlich, dass die Klebstoffauftragsmenge nicht ausreichend war, da die Fuge in weiten Teilen nicht mit Klebstoff gefüllt ist. Ausserdem gibt es in Abbildung 3-68 auch im mit Klebstoff gefüllten Bereich Lufteinschlüsse und damit eine nicht optimal ausgebildete Verklebung.

In den Diagrammen in Abbildung 3-70 bis Abbildung 3-72 ist die Klebefugendicke gegen die Ständerlänge und damit gegen die Entfernung vom überstehenden Randbalken abgetragen. Dabei wurde der Mittelwert aus zwei Messungen an jedem Prüfkörper gemäss Abbildung 3-22 für jeden Ständer nach Kopfholzüberstand getrennt geplottet. Damit die Daten der verschiedenen Überstände gut erkennbar sind, wurden unterschiedliche Einteilungen der Y-Achsen gewählt.

Der Verlauf der Klebefugendicke in Abhängigkeit von der Ständerlänge für die Elemente ohne planmässige Fertigungstoleranzen ist in Abbildung 3-70 dargestellt. Entsprechend lässt sich keine systematische Abhängigkeit zwischen Klebefugendicke und Ständerlänge erkennen. Die Klebefugendicke ist über

die Ständerlänge trotz gewisser Schwankungen konstant und liegt zwischen 0.2 mm und 0.5 mm. Zwischen den Klebstoffen lassen sich jedoch Unterschiede feststellen. So weist beispielsweise der 1K-PUR Klebstoff mit etwa 0.2 mm die geringste Klebfugendicke auf, der 2K-PUR G9 hingegen die grösste mit etwa 0.5 mm. G7 und G8 liegen bei etwa 0.3 mm, wobei einer der beiden Ständer von G7 gegen Ende des Elements aufgrund einer stark erhöhten Klebstoffauftragsmenge deutlich grössere Werte aufweist.

Abbildung 3-71 zeigt die Prüfserie mit 2 mm überstehendem Randbalken. Am Übergang vom Randbalken zum Ständer entspricht die Klebfugendicke genau der geplanten Fertigungstoleranz. Diese verringert sich gegen Ende des Ständers auf etwa 0.5 mm für die verklammerten Elemente und ca. 0.2 mm bei den verschraubten. Auch bei den Verläufen zwischen Klammer- und Schraubpressklebung wird ein Unterschied deutlich: Die Schraubpressklebung erreicht bereits etwa 25 cm vom Überstand entfernt ihre endgültige Klebfugendicke von ca. 0.2 mm, bei der Klammerpressverklebung werden die 0.5 mm erst deutlich später, ungefähr nach 75-100 cm erreicht, wobei sich teilweise Unterschiede zwischen den verschiedenen Klebstoffen abzeichnen. So weist der Klebstoff G9 auch in dieser Konfiguration mit ca. 0.5 mm am Ende die grösste Klebfugendicke auf, G7 und G8 hingegen liegen beide im Mittel bei etwa 0.3 mm.

In Abbildung 3-72 ist die Variante mit 5 mm Kopfholzüberstand zu sehen. Es lässt sich erkennen, dass auch hier die Klebfugendicke direkt am überstehenden Randbalken praktisch genau der geplanten 5 mm Produktionstoleranz entspricht und am Ende in einem annähernd asymptotischen Verlauf auf 0.5 mm absinkt. Dabei sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Klebstoffen vergleichsweise gering, lediglich einer der Ständer mit dem Klebstoff G8 weicht deutlich nach oben ab.



Abbildung 3-68: Mikroskopische Aufnahme der Klebefuge: G8-2-A-M11.



Abbildung 3-69: Mikroskopische Aufnahme der Klebefuge: G8-2-B-M1.

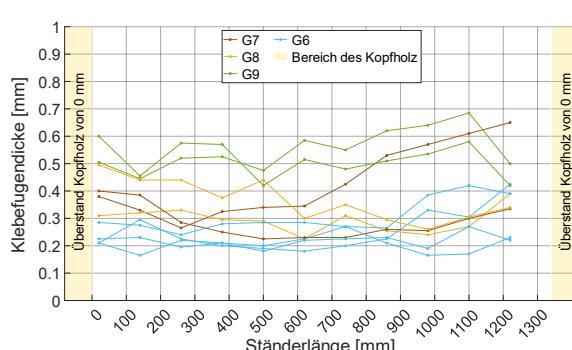


Abbildung 3-70: Klebfugendicke vs. Ständerlänge: 0 mm Überstand.

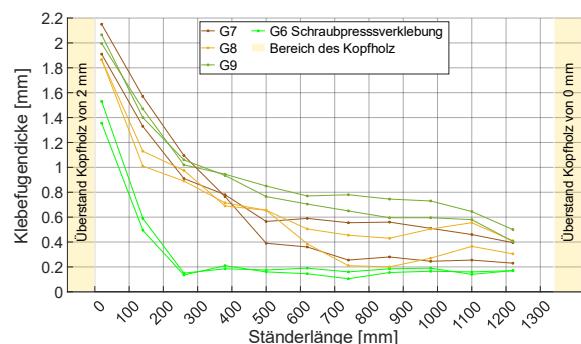


Abbildung 3-71: Klebfugendicke vs. Ständerlänge: 2 mm Überstand.

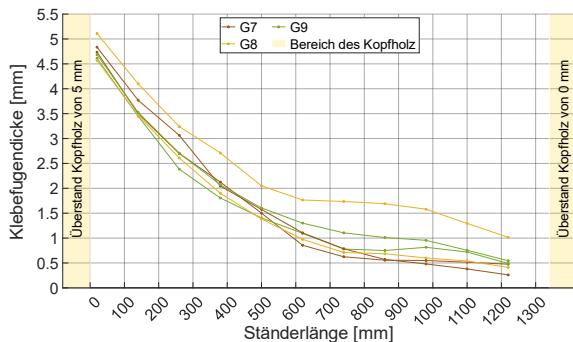


Abbildung 3-72: Klebefugendicke vs. Ständerlänge: 5 mm Überstand.

3.7.4 Grossformatige Praxisverklebungen Teil II

3.7.4.1 Analyse der Scherfestigkeit

Zur Analyse der Scherfestigkeit wurde diese in Abbildung 3-73 bis Abbildung 3-75 in Abhängigkeit von der Ständerlänge geplottet. Dabei wurden die Serien mit 2 mm Fertigungstoleranz nach den Verbindungsmitteln (Klammern / Nägel) getrennt ausgewertet und innerhalb der Diagramme sind die vier Ständer jedes Elements einzeln dargestellt. Darüber hinaus wurde die Referenzverklebung ohne Fertigungstoleranzen einzeln abgebildet. Außerdem wurden die einzelnen Datenpunkte jeweils in Grün (bestanden) oder Rot (nicht bestanden) dargestellt, um visuell zu verdeutlichen, ob die Anforderungen nach SN EN 14080:2013 erfüllt wurden, oder nicht.

Die Auswertung der Klammerpressverklebung mit 2 mm Produktionstoleranz in Abbildung 3-73 macht deutlich, dass die Scherfestigkeit direkt am überstehenden Randbalken mit ca. 1 N/mm² sehr gering ist. Mit zunehmender Entfernung vom Kopfholz steigt sie zunächst nur geringfügig an, nach 25-50 cm lässt sich ein sprunghafter Anstieg der Scherfestigkeit auf etwa 8 N/mm² feststellen. Ab dieser Entfernung bleibt die Festigkeit mit gewissen Schwankungen auf dem gleichen Niveau und erfüllt ab ca. 50 cm Entfernung auch überwiegend die Anforderungen der SN EN 14080:2013. In Bezug auf die unterschiedlichen Vorkräfte lässt sich sagen, dass die Varianten 100 % und 50 % im Mittel in etwa auf dem gleichen Niveau liegen. Die Alternative ohne Vorkraft weist hingegen etwas geringere Scherfestigkeiten auf, inklusive einem deutlichen Ausreißer nach unten.

Die vernagelte Variante, die ebenfalls mit 2 mm Produktionstoleranz hergestellt wurde, ist in Abbildung 3-74 dargestellt. Auch hier sind die Scherfestigkeiten direkt am überstehenden Kopfholz mit ca. 1 N/mm² sehr gering und steigen erst mit zunehmender Entfernung an. Dieser Anstieg ist, wie auch bei den Klammern, sehr sprunghaft, erreicht allerdings schon nach etwa 20-30 cm sein Plateau. Im Mittel liegt die Scherfestigkeit dort allerdings ein wenig niedriger als bei den Klammern, nämlich bei ca. 7 N/mm², erfüllt aber ebenfalls weitgehend die normativen Anforderungen. Ein systematischer Unterschied zwischen den verschiedenen Vorkraftniveaus lässt sich nicht erkennen.

Das letzte Element, welches als Referenz zu betrachten ist, da es ohne planmässige Produktionstoleranzen hergestellt wurde und die Klammern mit der grösstmöglichen Vorkraft eingeschossen wurden, ist in Abbildung 3-75 abgebildet. Hier wird deutlich, dass ohne Fertigungstoleranzen auch direkt am Randbalken ausreichend hohe Festigkeiten erreicht werden. Diese liegen fast durchgehend bei etwa 8 N/mm² und erfüllen weitgehend die Anforderung der Norm.

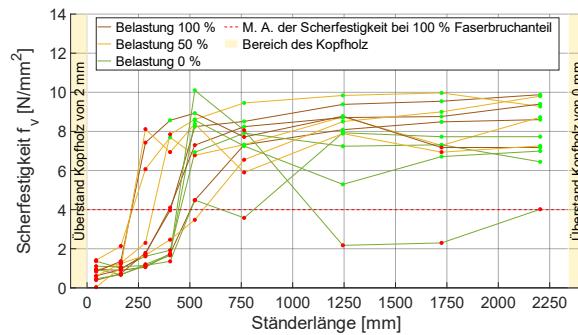


Abbildung 3-73: Scherfestigkeit vs. Ständerlänge: Klammer mit 2 mm Überstand.

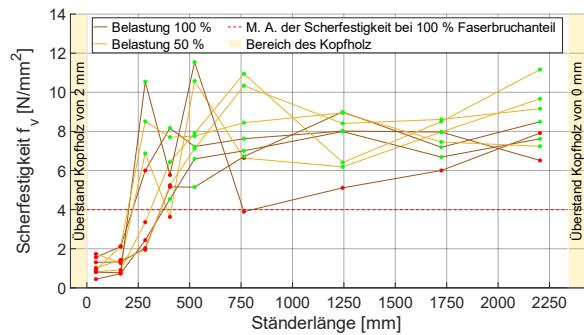


Abbildung 3-74: Scherfestigkeit vs. Ständerlänge: Nagel mit 2 mm Überstand.

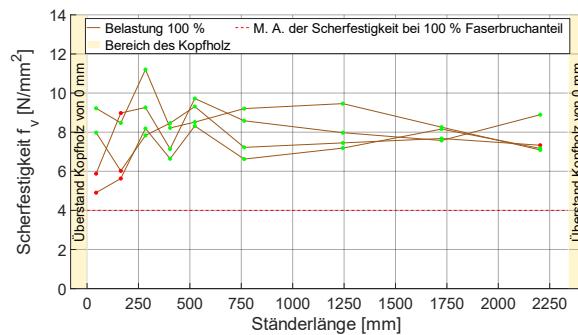


Abbildung 3-75: Scherfestigkeit vs. Ständerlänge: Klammer mit 0 mm Überstand.

Bei der Auswertung der Nassscherversuche in Abbildung 3-76 bis Abbildung 3-78 wurden die Holzfaserbruchanteile über der Scherfestigkeit der jeweiligen Prüfkörper getrennt für Klammer und Nägel abgebildet. Dabei wurden die Prüfkörper erst ab ca. 75 cm Entfernung vom überstehenden Randbalken entnommen und geprüft. Es fällt auf, dass weder zwischen Klammen und Nägeln noch zwischen den verschiedenen Vorkräften ein systematischer Unterschied besteht. Die Scherfestigkeit liegt bei ca. 3 N/mm² und weist vergleichsweise geringe Streuungen auf. Im Gegensatz dazu ist beim Holzfaserbruchanteil eine sehr grosse Streuung erkennbar. Die Werte liegen praktisch im gesamten Bereich zwischen 0 % und 100 %. Darüber hinaus wurden vermehrt Adhäsionsbrüche festgestellt, die in der Beurteilung entsprechend nicht als Faserbruchanteil bewertet wurden.

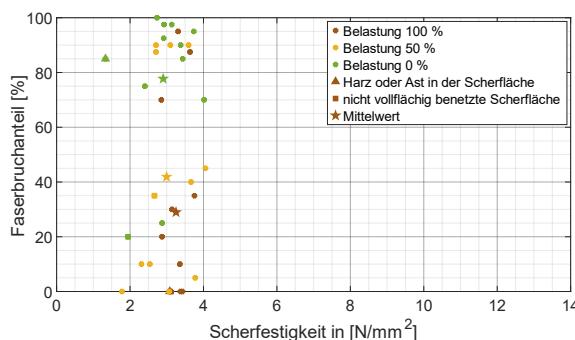


Abbildung 3-76: Faserbruchanteil vs. Scherfestigkeit (nass): Klammer mit 2 mm Überstand.

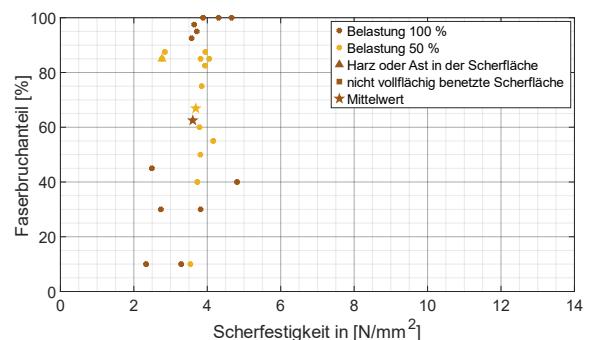


Abbildung 3-77: Faserbruchanteil vs. Scherfestigkeit (nass): Nagel mit 2 mm Überstand.

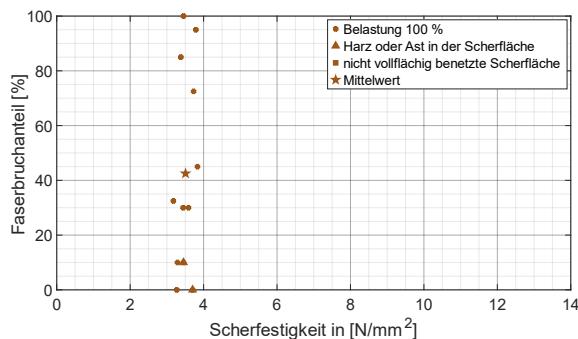


Abbildung 3-78: Faserbruchanteil vs. Scherfestigkeit (nass): Klammer mit 0 mm Überstand.

3.7.4.2 Analyse der Klebefuge

Abbildung 3-79 und Abbildung 3-80 zeigen beispielhafte Ansichten der mikroskopischen Untersuchungen. Dabei sind sie explizit nicht als repräsentativ für die jeweilige Konfiguration (Nagel vs. Klammer) zu betrachten, sondern lediglich für den Abstand zum überstehenden Randbalken. Abbildung 3-79 zeigt einen Prüfkörper, der nur wenige Zentimeter von diesem entfernt entnommen wurde, Abbildung 3-80 hingegen stammt aus fast 2 m Entfernung davon. Es wird deutlich, dass die planmässige Produktionsgenauigkeit von 2 mm einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der Klebefuge hat. In der Nähe des Überstandes war die Klebfugendicke sehr gross. Ausserdem war die Auftragsmenge nicht ausreichend, um diese Fugenstärke zu füllen. Dies lässt sich an den grossen Bereichen erkennen, die nicht mit Klebstoff gefüllt sind. Allerdings sind sowohl die Dreischichtplatte als auch der Duo-Balken mit Klebstoff benetzt, sie hatten also offenbar zumindest kurzzeitig Kontakt zueinander. In grösserer Entfernung hingegen ist die Klebefuge erheblich dünner. Allerdings sind auch hier viele Lufteinschlüsse zu erkennen.

In Abbildung 3-81 sind die Klebfugendicken der verklammerten Elemente mit 2 mm Produktionstoleranz über der Ständerlänge dargestellt, Abbildung 3-82 zeigt analog die vernagelten Elemente. In Abbildung 3-83 sind verklammerte und vernagelte Elemente zusammen abgebildet. Dabei wurden jeweils für jedes Element die Mittelwerte aus den vier Rippen inklusive ihrer Standardabweichung (halbtransparent hinterlegt) dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Klebfugendicke direkt am Kopfholzüberstand mit ca. 1.8 mm im Mittel knapp unterhalb des planmässigen Überstandes von 2 mm liegt. Bis zu einer Entfernung von ca. 50 cm nimmt die Klebfugendicke schnell und stark ab, anschliessend bleibt sie mit etwa 0.25 mm bis zum Ende des Elementes relativ konstant. In der Tendenz scheint die Klebfugendicke der vernagelten Elemente geringer zu sein als bei den verklammerten Varianten. Die beiden Kurven in hell- bzw. dunkelblau liegen durchgehend am unteren Ende der Messwerte. Allerdings sind die Streuungen recht gross, sodass die Unterschiede teilweise nicht signifikant sind. Im Vergleich zwischen den beiden genagelten Varianten weist diejenige mit geringerem Vorkraftniveau fast durchgehend eine geringere Klebfugendicke auf. Dieser Unterschied liegt jedoch im Streubereich der beiden Kurven. Innerhalb der verklammerten Elemente weist die Variante ohne Vorkraft innerhalb der ersten 50 cm die grösste Fugenstärke auf, gefolgt von denjenigen mit 100 % und 50 %. Im weiteren Verlauf des Ständers gibt es jedoch auch Wechsel dieser Reihenfolge. Insgesamt liegen die Werte auf einem sehr ähnlichen Niveau und Unterschiede liegen im Bereich der Standardabweichung.

Die Ergebnisse des Elements ohne planmässige Fertigungstoleranz sind analog zum vorherigen Diagramm in Abbildung 3-84 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Klebfugendicke nahe des Randbalkens sehr viel geringer ist als bei den Elementen mit Kopfholzüberstand, wobei ausserdem auch die kleinere Skala der Y-Achse zu beachten ist. Allerdings lässt sich auch hier eine dickere Klebefuge in der Nähe der Randbalken erkennen, und zwar sogar beidseitig. Dieser Unterschied ist jedoch auf einem sehr viel niedrigeren Niveau als bei den Varianten mit Überstand. Im Mittel liegt die Klebfugendicke dieser Konfiguration bei ca. 0.2 mm und damit etwa auf dem Niveau der vernagelten Elemente im Bereich ab 50 cm.

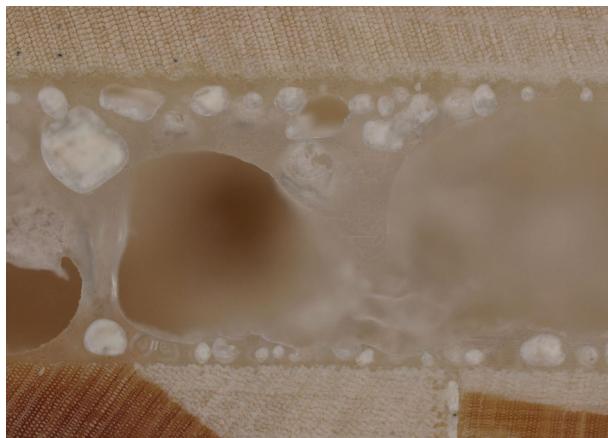


Abbildung 3-79: Mikroskopische Aufnahme der Klebefuge: G6-N-2-100-C-M1.



Abbildung 3-80: Mikroskopische Aufnahme der Klebefuge: G6-K-2-100-C-M11.

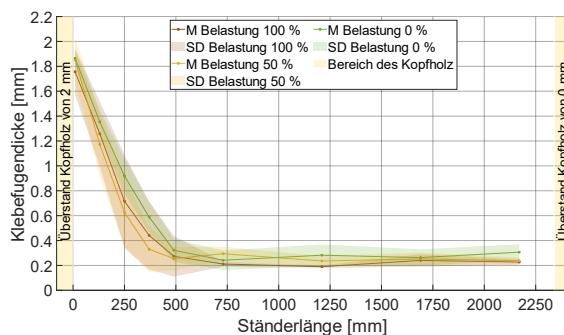


Abbildung 3-81: Klebefugendicke vs. Ständerlänge: Klammer mit 2 mm Überstand; M: Mittelwert; SD: Standardabweichungen.

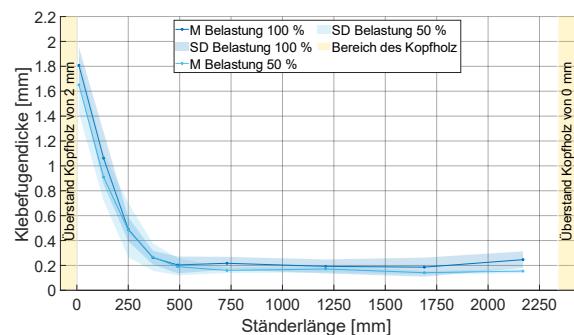


Abbildung 3-82: Klebefugendicke vs. Ständerlänge: Nägel mit 2 mm Überstand; M: Mittelwert; SD: Standardabweichungen.

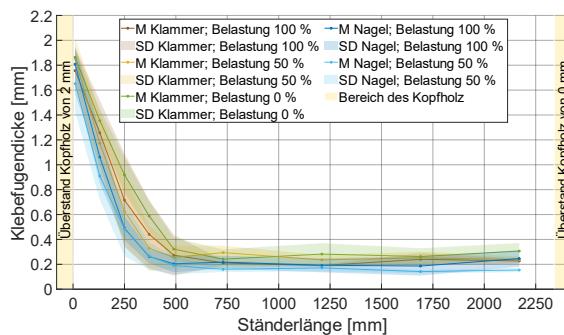


Abbildung 3-83: Klebefugendicke vs. Ständerlänge: Klammer und Nägel mit 2 mm Überstand; M: Mittelwert; SD: Standardabweichungen.

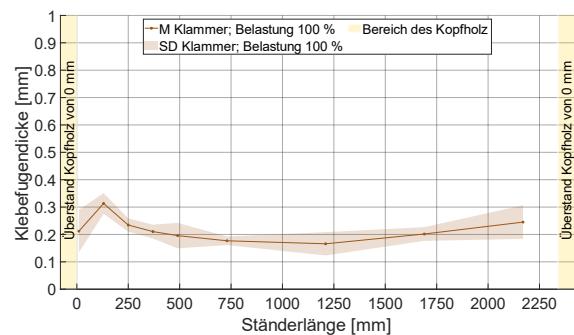


Abbildung 3-84: Klebefugendicke vs. Ständerlänge: Klammer mit 0 mm Überstand; M: Mittelwert; SD: Standardabweichungen.

3.8 Diskussion und Schlussfolgerung

3.8.1 Kleinformatige Laborverklebungen

Die kleinformatigen Laborverklebungen haben gezeigt, dass die Verklebungen G1, G2 und G5 innerhalb der verwendeten Rahmenbedingungen die Anforderungen der SN EN 14080:2013 nicht erfüllen. Die Verklebungen G1 und G2 wiesen eine zu dicke Klebefuge auf, was beim Aushärten des Klebstoffes zu massiver Blasenbildung führte. Dies beeinträchtigt die Klebefugenfestigkeit, weswegen die normativen Anforderungen nicht eingehalten werden können. Die Verklebungen G5 erreichten die vorgegebene maximale Klebefugendicke von 300 µm, konnten die Anforderungen an die Scherfestigkeit jedoch nicht erfüllen. Die Verklebungen G3 sowie G4 konnten diese Anforderungen erfüllen und erreichten zudem die vorgegebene maximale Klebefugendicke von 300 µm.

Die Tatsache, dass kein signifikanter Einfluss der Klammerkonfiguration auf die Scherfestigkeit festgestellt werden konnte, lässt sich u. a. damit begründen, dass die Scherfestigkeit isoliert betrachtet nur bedingt aussagekräftig ist, da bei einem reinen Holzbruch die Scherfestigkeit der Klebefuge höher ist als die des Holzes. Ausserdem weist das Holz eine grosse Varianz in der Scherfestigkeit auf und für eine kombinierte Betrachtung der Scherfestigkeit in Abhängigkeit des Faserbruchanteils wäre mehr als nur eine Verklebung notwendig.

Die geringfügig höheren Scherfestigkeiten der Prüfkörper, die mit Klammer geprüft wurden, sind ausdrücklich nicht auf die Verbindung durch die Klammer zurückzuführen, da diese eine deutlich geringere Festigkeit aufweist als die Verklebung selbst. Stattdessen wird die gleichmässigere Klebstoffdicke in diesem Bereich dafür verantwortlich gemacht (vgl. Kapitel 3.7.1.3). Es haben sich dadurch weniger Ausreisser mit sehr tiefen Festigkeiten ergeben, siehe Abbildung 3-39 bis Abbildung 3-43.

Die Zunahme der Klebfugendicke in der Mitte der Verklebung bei der Verklebung G1 kann durch die hohe Viskosität des verwendeten Klebstoffes erklärt werden. Da sich bei der Klammerpressverklebung nur ein geringer Pressdruck von idealerweise $0,1 \text{ N/mm}^2$ einstellt, könnte die hohe Viskosität dazu führen, dass in der Mitte des Prüfkörpers der Druck nicht ausreicht, um den hochviskosen Klebstoff genügend zu komprimieren, was zu einer dickeren Fuge führt. Die konstante und vergleichsweise geringe Klebfugendicke der Verklebungen G3 und G4 kann entsprechend mit der sehr niedrigen Viskosität des dort verwendeten Klebstoffs erklärt werden.

Die Zunahme der Klebfugendicke am Rand der Verklebung bei den Verklebungen G2 könnte an einer Vorverformung der Dreischichtplatte liegen, da diese nicht unmittelbar vor der Verklebung geschliffen wurde, sondern ab Werk. In der Lagerzeit kann durch Feuchteänderung eine Verkrümmung der Platte stattfinden, welche durch den geringen Pressdruck nicht kompensiert werden konnte.

3.8.2 Grossformatige Praxisverklebungen Teil I

Die grossformatigen Praxisverklebungen haben gezeigt, dass die Verklebungen mittels Handverklammerung und Verklammerung mittels Slider unter den verwendeten Rahmenbedingungen eine unzureichende Qualität der Klebefuge hervorbringen. Bei den Verklebungen mittels Verklammerung durch die Portalanlage zeigten die Prüfkörper von Holzbauer 1 mit den Klebstoffen G3 und G4 Potential. Die Vorkraft von etwa 800 N der Portalanlage des Holzbauers 1 scheint einen positiven Effekt auf die Verklebung zu haben. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass diese zusätzliche Vorkraft zwar nicht von den Klammern aufgebracht wird, aber durch deren Ausziehwiderstand im System gehalten werden kann und somit ein grösserer Pressdruck zustande kommt. Bei der Portalanlage von Holzbauer 3 wirkt keine zusätzliche Kraft durch das Aggregat auf das Element. Dies könnte ein Grund sein, weshalb die Resultate aus diesen Verklebungen deutlich schlechter ausgefallen sind. Im Generellen ist die Qualität der Verklebungen von vielen Parametern abhängig, welche in der Praxis nur schwer kosteneffizient kontrollierbar sind. Die Versuchsserien zeigen daher, dass keine ausreichende Qualität der Verklebung mittels Verklammerung von Hand oder mit dem Slider und einem 1K-PUR (G3, G4, G5) erreicht werden konnte.

Beim Vergleich zwischen den Varianten ein- und zweireihige Verklammerung konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Allerdings sind die Vergleiche der verschiedenen Varianten dieser Versuchsreihe auch kritisch zu betrachten, da z. B. die Planität des Rahmens einen essenziellen Einfluss auf die Verklebungsqualität hat und diese im Rahmen dieser Versuchsserie nicht erfasst wurde.

Da bei der Analyse der Klebfugendicke festgestellt wurde, dass trotz einseitigem Raupenauftrag beide Holzoberflächen mit Klebstoff benetzt waren, kann davon ausgegangen werden, dass die beiden Elemente während der Verklebungsphase einmal Kontakt zueinander hatten. Darüber hinaus deutet die sichtbare Fase des Massivholzes auf eine zu geringe Hobeltiefe im Verhältnis zur Qualität des verwendeten Holzes (Planität, Verdrehung, Verkrümmung) hin.

3.8.3 Grossformatige Laborverklebungen

Die grossformatigen Laborverklebungen haben deutlich gemacht, dass Fertigungstoleranzen sich negativ auf die Scherfestigkeit und die Klebfugendicke der Klammerpressverklebung auswirken. Die geprüften Kopfholzüberstände von 5 mm liefern über die gesamte Elementlänge und für alle untersuchten Klebstoffe unzureichende Ergebnisse, sind jedoch auch in der Regel nicht realistisch. Die

Produktionstoleranzen von 2 mm hingegen können durchaus in der Praxis auftreten, daher sind diese Ergebnisse von besonderem Interesse. Zunächst lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass die nach ÖNORM B 1995-1-1:2023 ausgeführte Schraubpressverklebung auch mit diesen Toleranzen funktioniert, da mit den Schrauben ein ausreichender Pressdruck erzeugt werden kann, um die Dreischichtplatte auf den Ständer zu drücken. Im Vergleich dazu ist der Pressdruck, der mit Klammern erzeugt werden kann, sehr gering und es ergeben sich deutlich grössere Klebfugendicken und niedrigere Scherfestigkeiten. Dabei werden die normativen Anforderungen weitgehend nicht erfüllt.

Selbst ohne Produktionstoleranzen führt die Verwendung von 2K-PUR Klebstoffen grösstenteils zu unzureichenden Ergebnissen. Diese Ergebnisse lassen sich mit einer Kombination aus der Auftragsmenge und der Klebstoffviskosität erklären. Grundsätzlich funktionieren die 2K-PUR Klebstoffe auch bei grossen Fugendicken und niedrigem Pressdruck. Da die Auftragsmenge jedoch so gewählt wurde, als gäbe es keine Ungenauigkeiten, war an vielen Stellen schlichtweg zu wenig Klebstoff vorhanden, wodurch keine vollflächige Benetzung der Scherflächen resultierte. Aufgrund der hohen Kosten des 2K-PUR würde dieses Problem vermutlich auch in der Praxis so auftreten. Darüber hinaus spielt die Viskosität eine entscheidende Rolle: Durch den geringen Anpressdruck der Klammern kann Klebstoff mit einer hohen Viskosität beim gewählten Raupenaufrag nicht ausreichend verteilt werden, selbst wenn die Auftragsmenge ausreichend ist. Ist die Viskosität hingegen sehr niedrig, könnte der Klebstoff vom Bauteil herunterfliessen.

Für eine funktionierende Klammerpressverklebung unter Verwendung eines 2K-PUR Klebstoffes, die auch Fertigungstoleranzen von bis zu 2 mm aufnehmen kann, müsste also eine ausreichende Auftragsmenge für eine durchgehende Fuge mit 2 mm Dicke vorhanden sein. Diese müsste vollflächig aufgetragen werden und der Klebstoff eine ausreichend hohe Viskosität aufweisen, sodass er nicht vom Bauteil läuft. Dabei würden zwar entsprechend grosse Klebfugendicken entstehen, die Scherfestigkeiten und Holzfaserbruchanteile würden jedoch mit grosser Wahrscheinlichkeit den normativen Anforderungen gerecht werden. Diese Form der Anwendung ist aus Sicht der Autoren praxisfern und unwirtschaftlich.

3.8.4 Grossformatige Praxisverklebungen Teil II

Die grossformatigen Praxisverklebungen Teil II haben gezeigt, dass Vorkräfte aus den Aggregaten von Portalanlagen einen positiven Einfluss auf die Verklebungsqualität von Pressverklebungen mit Klammern oder Nägeln haben. Allerdings ist dieser Effekt nicht ausreichend, um Produktionstoleranzen, hier in Form eines 2 mm überstehenden Randbalkens eines Rippendeckenelementes, auszugleichen. Erst ab etwa 50 cm Entfernung vom Überstand werden die normativen Anforderungen an die Verklebung erfüllt. Ausserdem scheint es, als würde der positive Effekt der Vorkräfte ab einem bestimmten Niveau stagnieren. Dies liesse sich mit der These begründen, dass die aufgebrachte Vorkraft des Aggregates über den Ausziehwiderstand der eingeschossenen Verbindungsmittel im System gehalten wird. Überschreitet die Vorkraft also den Ausziehwiderstand, löst sich das Verbindungsmittel entsprechend ein Stück weit, sodass sich keine weitere Zunahme des Anpressdrucks ergibt und damit auch keine weitere Steigerung der Verklebungsqualität. Dies scheint beispielsweise bei den verklammerten Varianten der Fall gewesen zu sein (vgl. Abbildung 3-73). Dort wiesen die 50 %- und 100 %-Varianten eine sehr ähnliche Verklebungsqualität auf, obwohl (neben den Relativwerten) auch die Absolutwerte der Vorkräfte sehr unterschiedlich waren. Ausserdem war die Klebefuge nicht vollständig gefüllt, obwohl auch die Dreischichtplatte mit Klebstoff benetzt war, d. h. sie wurde zwischenzeitig durch die Vorkraft auf den Balken gedrückt, hat sich jedoch wieder gelöst, da die Kraft nicht im System gehalten werden konnte. Mit dieser Theorie lässt sich auch erklären, warum bei den vernagelten Elementen insgesamt eine etwas bessere Verklebungsqualität festgestellt wurde als bei den verklammerten Varianten: Da es sich bei den verwendeten Nägeln um Rillennägel handelte, kann davon ausgegangen werden, dass deren Ausziehwiderstand grösser ist als derjenige der Klammern. Somit kann eine grössere Kraft als Anpressdruck im System gehalten werden, obwohl die Vorkraft der 100 %-Variante der Klammern grösser war. Dadurch kann der Überstand schneller geschlossen werden und die Klebfugendicke kleiner gehalten werden. Diese Thesen müssen im Rahmen von weiteren Untersuchungen bestätigt oder widerlegt werden.

Zur Auswertung der Nassscherversuche, also zum Verhalten der Verklebung unter anspruchsvollen Temperatur- und Feuchtebedingungen, lässt sich folgendes sagen: Es wurden keine direkten Vergleiche zwischen der reinen Holzscherfestigkeit und der Klebfugenfestigkeit gemacht, allerdings deutet

die grosse Streuung des Holzfaserbruchanteils bei annähernd identischen Scherfestigkeiten darauf hin, dass beide Festigkeiten auf einem ähnlichen Niveau liegen. Daher würde sich vermutlich ein hoher Wert für $rel. f_{v,b,mean}$ ergeben. Die grosse Anzahl von Adhäsionsbrüchen im Vergleich zu den Trockenscherversuchen spricht dafür, dass die Temperatur- und Feuchtebelastung insbesondere die Adhäsion zwischen Klebstoff und Holz negativ beeinflusst hat.

Für eine ausreichende Verklebungsqualität reichen die geprüften Vorkräfte bei den als üblich eingestuften Produktionstoleranzen nicht aus und können mit grosser Wahrscheinlichkeit auch nicht entsprechend gesteigert werden. Eine Möglichkeit, die Pressverklebung mit Klammern und Nägeln jedoch trotzdem so auszuführen, dass die Verklebung zuverlässig funktioniert, könnte sein, die Produktionstoleranzen zu beschränken. Dies wird beispielsweise auch in der ÖNORM B 1995-1-1:2023 für die Schraubpressverklebung gemacht, allerdings müssten die Vorgaben aufgrund des geringeren Pressdruckes für die Klammerpressverklebung noch schärfere sein. Eine Möglichkeit wäre es, die Holzrahmen vor der Verklebung planzufräsen oder zumindest sicherzustellen, dass die Toleranzen innerhalb der noch zu definierend Anforderungen liegen. Vor allem das Planfräsen stellt jedoch ein grosses Hemmnis für die Anwendung in der Praxis dar, da viele Holzbaubetriebe erstens gar nicht die Möglichkeit dazu haben und selbst mit den entsprechenden Anlagen ein Zeit- und Kostenaufwand entsteht, der die Wirtschaftlichkeit der Anwendung deutlich verschlechtert.

4 Fazit und Ausblick

Das Forschungsprojekt hat gezeigt, dass der durch Klammern erzielbare Anpressdruck sehr gering ist. Zwar gibt es Unterschiede zwischen verschiedenen Klammern, allerdings ist die materialbedingte Streuung des Holzes im Vergleich dazu sehr hoch und wirkt sich entsprechend auf den Anpressdruck aus. Demnach ist es in Bezug auf den Anpressdruck entscheidender, wo bzw. an welcher Stelle des Holzes geschossen wird, als mit welcher Klammer. Zusätzliche Vorkräfte, die durch das Eigengewicht des Bedieners oder eines Sliders erzeugt werden, sind schwer zu standardisieren und können aufgrund von Exzentrizitäten (Bediener steht auf oder zwischen den Balken) auch negative Auswirkungen haben. Obwohl Vorkräfte aus den Aggregaten von Portalanlagen wiederholbar und hilfreich sind, bleibt deren positiver Effekt dennoch vergleichsweise gering.

Unter optimalen Laborbedingungen und einem Klebstoffauftrag mit Spachtel zeigte sich, dass die Verklebung mit 1K-PUR Klebstoffen in annehmbarer Weise funktioniert. Allerdings erwiesen sich diese Klebstoffe bei praxisnahen Elementverklebungen mit Produktionstoleranzen als überwiegend ungeeignet. Im Gegensatz dazu ermöglichen 2K-PUR Klebstoffe eine funktionierende Verklebung auch bei geringem Pressdruck und grossen Fugendicken, vorausgesetzt, die zu verklebenden Flächen sind ausreichend benetzt. Eine wirtschaftliche und funktionale Kombination aus Auftragsmenge, Auftragsweise und Viskosität für 2K-PUR Klebstoffe konnte jedoch nicht gefunden werden.

Die Anwendung der Klammerpressverklebung mittels Handverklammerung wird in der Praxis als nicht realistisch eingeschätzt. Es wird vorgeschlagen, die Schraubpressverklebung gemäss ÖNORM B 1995-1-1:2023 oder E DIN 1052-10:2023 zu verwenden. Eine Verklammerung oder Vernagelung auf der Portalanlage mit zusätzlichem Druck ist bei planen Elementen ohne Kopfholzüberstand denkbar, wobei jedoch ein sehr schmales Prozessfenster zu berücksichtigen ist. Jede Firma müsste die Qualitäts sicherung individuell nachweisen. Diese Annahme basiert jedoch auf Ergebnissen von lediglich zwei unterschiedlichen Firmen, was ihre Aussagekraft einschränkt. Daher ist eine grössere Varianz von Firmen und ein erweitertes Prüfvolumen notwendig, um zuverlässigere und allgemeingültigere Aussagen treffen zu können. Zukünftige Forschung sollte sich darauf konzentrieren, diese Variabilität zu untersuchen und robuste, reproduzierbare Verfahren zu entwickeln, die den Anforderungen der industriellen Praxis gerecht werden.

5 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt. Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Institutsleiters für Holzbau, Tragwerke und Architektur und des Projektverantwortlichen gültig.

Dieser Bericht besteht aus 94 Seiten.

6 Literaturverzeichnis

ÖNORM B 1995-1-1:2023 (2023). *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau - Konsolidierte Version mit nationalen Festlegungen, nationalen Erläuterungen und nationalen Ergänzungen zur Umsetzung der Önord EN 1995-1-1*. Austrian Standards International. Austrian Standards plus GmbH.

Besmer. (2019). *Schraubenpressverklebung im Holzbau*. Besmer Holzingenieure GmbH.

Brandmair, A., Clauss, S., Hass, P. & Niemz, P. (2012). Verklebung von Laubhölzern mit 1K-PUR-Klebstoffen für den Holzbau. *Bauphysik*, 34(5), 210-216. <https://doi.org/10.1002/bapi.201200025>

Brockmann, W., Geiss, P. L., Klingen, J. & Schröder, B. (2005). *Klebtechnik: Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren*. Wiley-VCH.

prEN 1995-3:2023 (September 2023). *Entwurf: Eurocode 5 - Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 3: Ausführung*. CEN Europäisches Komitee für Normung. Europäisches Komitee für Normung.

ETA-16/0101 (September 2019). *Dowel-type fasteners with resin coating: PREBENA tack staples d = 1,52 mm d = 1,80 mm d = 2,00 mm*. DIBT Deutsches Institut für Bautechnik. Deutsches Institut für Bautechnik.

DIN 1052-1:1988 (April 1988). *Holzbauwerke - Teil 1: Berechnung und Ausführung*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH.

E DIN 1052-10:2023 (März 2023). *Entwurf: Holzbauwerken - Herstellung und Ausführung von Holzbauwerken - Teil 10: Ergänzende Bestimmungen zu Verbindungsmitteln und nicht europäisch geregelten geklebten Produkten und Bauarten*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. n.p.

EAD 130320-00-0304 (June 2018). *Glued Laminated Timber Made of Solid Hardwood*. EOTA European Organisation for Technical Assessment. European Organisation for Technical Assessment.

Frihart, C. R. (2015). Introduction to special issue: wood adhesives: past, present, and future. *Forest Products Journal*(Vol. 65, No.1/2), 4-8.

Fürst, H. M. (2019). *Überprüfung und Optimierung der Regelungen für steifen- und plattenförmige Schraubpressverklebungen in ÖNORM B 1995-1-1* [Masterarbeit]. Technische Universität Graz, Graz.

Habenicht, G. (2016). *Kleben - erfolgreich und fehlerfrei: Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie* (7. Aufl. 2016). *SpringerLink Bücher*. Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-14696-2>

holzprojekte. (2022). *Schraubpressverklebung: Merkblatt*. holzprojekte AG.

Kairi, M. (Hrsg.) (2000). *Schraubenverleimungen erlauben neue Möglichkeiten im Ingenieurholzbau*. In: *Holzbauforum conference proceedings*. Garmisch-Partenkirchen, Germany.

Kairi, M., Kaloinen, E., Koponen, S., Nokelainen, T., Fonselius, M. & Kevarinmäki, A. (1999). *Screw gluing Kerto-LVL structures with polyurethane*. Helsinki Univ. of Technology.

Kälin, D. & Hadorn, J. (2023). *Qualitätssicherung von Klammerpressverklebungen* (Nr. 0801 / 1241 / 23 / 0) [Semesterarbeit]. Berner Fachhochschule, Biel.

Pirmin Jung. (o. D.). *Schraubenpressklebung im Holzbau: Merkblatt intern + extern*. Pirmin Jung.

Radovic, B. & Rothkopf, C. (2003). Eignung von 1K-PUR-Klebstoffen für den Holzbau unter Berücksichtigung von 10-jähriger Erfahrung. *Bauen mit Holz*(6).

Rug, W., Gümmer, K. & Gehring, S. (2010). Schraubenpressklebung mit Nagelschrauben. *Bautechnik*, 87(1), 33-43. <https://doi.org/10.1002/bate.201010004>

Schiere, M., Franke, S. & Franke, B. (2018). *Investigation and analysis of press glued connections for timber structures*. Bern University of Applied Sciences. https://www.researchgate.net/profile/Steffen-Franke-2/publication/328630827_Investigation_and_analysis_of_press_glued_connections_for_timber_structures/links/5bd96fcc92851c6b279bc34b/Investigation-and-analysis-of-press-glued-connections-for-timber-structures.pdf

SN EN 14080:2013 (Juni 2014). *Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen*. SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

SN EN 1382:2016 (Juni 2016). *Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmittern*. SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

SN EN 1383:2016 (Juni 2016). *Holzbauwerke - Prüfverfahren - Prüfung von Holzverbindungsmittern auf Kopfdurchziehen*. SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

SN EN 14358:2016 (July 2016). *Holzbauwerke - Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte*. SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

SN EN 17334:2021 (Juni 2021). *Eingeklebte Stangen in tragenden geklebten Holzprodukten - Prüfung, Anforderungen und Scherfestigkeitsklassifizierung*. SNV Schweizerische Normen-Vereinigung. Schweizerische Normen-Vereinigung.

SN EN 14592:2022 (November 2022). *Holzbauwerke - Stiftförmige Verbindungsmitte - Anforderungen*. SNV Schweizerische Normen-Vereinigung. Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein.

SN EN 15425:2023 (Februar 2023). *Klebstoffe - Einkomponenten-Klebstoffe auf Polyurethanbasis Klebstoffe - Einkomponenten-Klebstoffe auf Polyurethanbasis (PUR) für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen*. SNV Schweizerische Normen-Vereinigung. Schweizerische Normen-Vereinigung.

SN EN 301:2023 (Februar 2023). *Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen*. SNV Schweizerische Normen-Vereinigung. Schweizerische Normen-Vereinigung.

Timbatec. (2014). *Klammerpressverklebung: Prebena, Uetendorf*. Timbatec Holzbauingenieure Schweiz AG.

7 Anhang

7.1 Konfigurationen kleinformative Laborverklebungen

Tabelle 7-1: Auflistung der verschiedenen Konfigurationen der kleinformativen Laborverklebungen. Für jede Konfiguration wurden aus dem grossen Prüfkörper 12 kleine geschnitten, welche auf Abscheren getestet wurden.

Prüfkörpername	Klebstoff	Klammer	Klammer-Winkel abweichend von der Faser-längsrichtung	Klebstoffmenge [g pro m ²]
G1-Ref.	G1	-	-	326
G1-Z64-90	G1	Z64CSVHA-ETA	90°	323
G1-Z64-45	G1	Z64CSVHA-ETA	45°	331
G1-Q63-90	G1	Q63CSVHA-ETA	90°	299
G1-Q63-45	G1	Q63CSVHA-ETA	45°	320
G1-QL63-90	G1	QL63CSVHA-ETA	90°	313
G1-QL63-45	G1	QL63CSVHA-ETA	45°	315
G2-Ref.	G2	-	-	313
G2-Z64-90	G2	Z64CSVHA-ETA	90°	273
G2-Z64-45	G2	Z64CSVHA-ETA	45°	273
G2-Q63-90	G2	Q63CSVHA-ETA	90°	307
G2-Q63-45	G2	Q63CSVHA-ETA	45°	305
G2-QL63-90	G2	QL63CSVHA-ETA	90°	294
G2-QL63-45	G2	QL63CSVHA-ETA	45°	289
G3-Ref.	G3	-	-	260
G3-Z64-90	G3	Z64CSVHA-ETA	90°	250
G3-Z64-45	G3	Z64CSVHA-ETA	45°	240
G3-Q63-90	G3	Q63CSVHA-ETA	90°	232
G3-Q63-45	G3	Q63CSVHA-ETA	45°	219
G3-QL63-90	G3	QL63CSVHA-ETA	90°	247
G3-QL63-45	G3	QL63CSVHA-ETA	45°	255
G4-Ref.	G4	-	-	200 ¹
G4-Z64-90	G4	Z64CSVHA-ETA	90°	200 ¹
G4-Z64-45	G4	Z64CSVHA-ETA	45°	200 ¹
G4-Q63-90	G4	Q63CSVHA-ETA	90°	200 ¹
G4-Q63-45	G4	Q63CSVHA-ETA	45°	200 ¹
G5-Ref.	G5	-	-	190 ¹
G5-Z64-90	G5	Z64CSVHA-ETA	90°	190 ¹
G5-Z64-45	G5	Z64CSVHA-ETA	45°	190 ¹
G5-Q63-90	G5	Q63CSVHA-ETA	90°	190 ¹
G5-Q63-45	G5	Q63CSVHA-ETA	45°	190 ¹

¹ Zielwerte, welche auf ± 5 g erreicht wurden.

7.2 Konfigurationen grossformatige Praxisverklebungen Teil I

Die in der folgenden Tabelle aufgeführten Klebstoffmengen wurden mittels Wiegen der Kartusche vor und nach dem Klebstoffauftrag auf jeden Ständer und der Oberfläche des Ständers berechnet. Der angegebene Bereich zeigt die geringste bis zur grössten Auftragsmenge von den vier Ständern. Die Holzfeuchte der Dreischichtplatten wurde an je 3 Stellen gemessen und die Holzfeuchte der Ständer jeweils an 2 Stellen. Der Mittelwert über sämtliche Ständer einer Verklebung dient als Vergleich der Feuchten.

Tabelle 7-2: Übersicht der grossformatigen Praxisverklebungen Teil I mit der Klammer: Z64CSVHA-ETA. Für jede Konfiguration wurden aus dem grossen Prüfkörper 22 Trockenscherprüfkörper und 12 Mikroskopieprüfkörper entnommen.

Prüfkörpername	Klebstoff	Holzbauer	Klammer-Winkel abweichend von der Faserlängsrichtung	Klebstoffmenge [g pro m ²]	Feuchtegehalt der Ständer (Mittelwert) [%]
Hb1-G3-M	G3	1	~30°-60°	176-219	-
Hb1-G3-P	G3	1	60°	235-294	-
Hb1-G4-M	G4	1	~30°-60°	294-363	13.6
Hb1-G4-P	G4	1	60°	283-427	13.6
Hb1-G5-M	G5	1	~30°-60°	203-401	13.6
Hb1-G5-P	G5	1	60°	192-310	13.8
Hb2-G3-M	G3	2	~30°-60°	166-246	9.5
Hb2-G3-S	G3	2	30°	182-294	9.7
Hb2-G4-M	G4	2	~30°-60°	208-267	9.1
Hb2-G4-S	G4	2	30°	256-310	9.8
Hb2-G5-M	G5	2	~30°-60°	139-214	10.5
Hb2-G5-S	G5	2	30°	214-235	10.1
Hb3-G3-S	G3	3	30°	192-251	14.3
Hb3-G3-P	G3	3	60°	139-230	14.7
Hb3-G4-S	G4	3	30°	203-246	14.2
Hb3-G4-P	G4	3	60°	208-347	15.1
Hb3-G5-S	G5	3	30°	246-283	14.3
Hb3-G5-P	G5	3	60°	267-337	14.7

7.3 Dokumentation Verklebungsparameter der grossformatigen Praxisversuche

Bei den grossformatigen Praxisverklebungen wurde die Zeit, Klebstoffauftrag sowie Holzfeuchte der Platten und Ständer dokumentiert. Die Positionen der gemessenen Holzfeuchten sind in Abbildung 7-1 dargestellt.

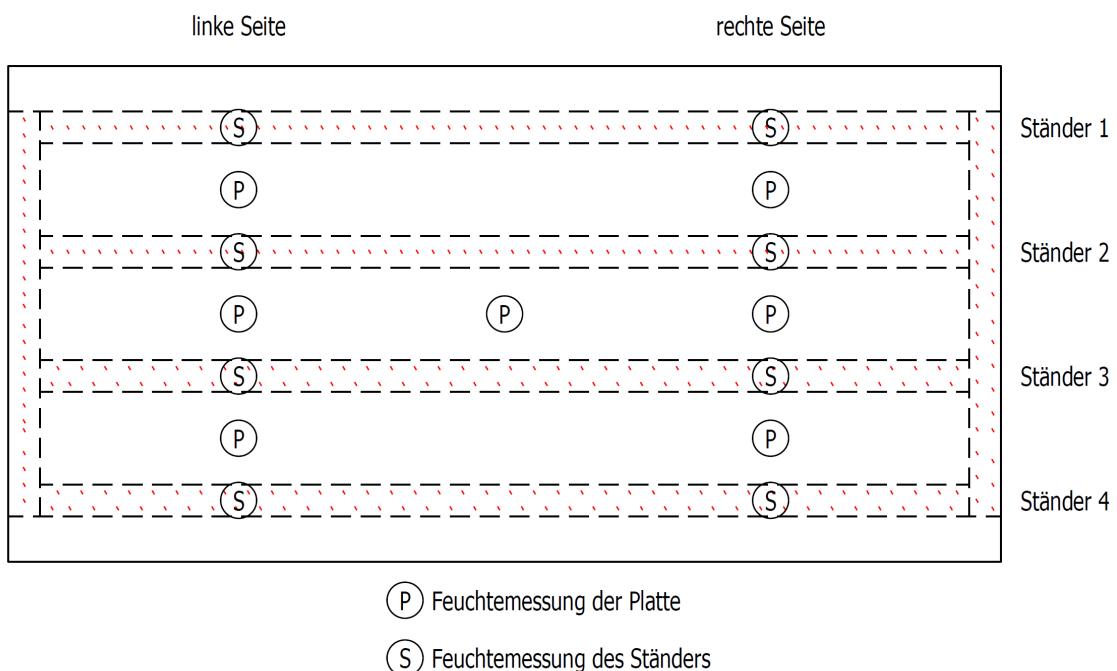


Abbildung 7-1: Position der Feuchtemessungen der Platte und Ständer.

7.3.1 Verklebung bei Holzbauer 1

Sämtliche Prüfkörper wurden am selben Tag von 7:30 bis 9:20 hergestellt. Vor der ersten Verklebung um 07:20 betrug die Temperatur 21 °C bei einer rel. Luftfeuchtigkeit von 57 %. Nach der letzten Verklebung betrug die Temperatur 22 °C bei einer rel. Luftfeuchtigkeit von 50 %.

Tabelle 7-3: Prüfkörper Hb1-H-M.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkar-tusche[g]	Klebstoff-auftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					860	
Klebstoffauftrag	07:38	4	-	-	827	176
	07:39	3	-	-	788	208
	07:40	2	-	-	748	214
	07:42	1	-	-	707	219
Auflegen der Platte	07:45	3-4	10.4	-	Mittelwert:	204
Verkammern der Platte	07:51	2-3	11.7	-		
fertig Element	08:05	1-2	11.2	-		

Tabelle 7-4: Prüfkörper Hb1-H-P.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkar-tusche[g]	Klebstoff-auftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					672	
Klebstoffauftrag	07:56	4	-	-	617	294
	-	3	-	-	567	267
	-	2	-	-	517	267
	08:02	1	-	-	473	235
Auflegen der Platte	08:09	3-4	11.8	-	Mittelwert:	266
Verkammern der Platte	-	2-3	12.2	-		
fertig Element	-	1-2	12.2	-		

Tabelle 7-5: Prüfkörper Hb1-J-M.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkar-tusche[g]	Klebstoff-auftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					1616	
Klebstoffauftrag	08:47	1	12.6	13.8	1548	363
	-	2	12.8	13.8	1493	294
	-	3	13.2	13.9	1437	299
	08:50	4	14.5	13.8	1369	363
Auflegen der Platte	08:56	1-2	-	11.7	Mittelwert:	330
Verkammern der Platte	-	2-3	-	11.3		
fertig Element	-	3-4	-	11.7		

Tabelle 7-6: Prüfkörper Hb1-J-P.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkartusche[g]	Klebstoffauftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					1310	
	09:10	4	13.4	13.4	1257	283
Klebstoffauftrag	-	3	14.3	13.5	1192	347
	-	2	12.9		1115	411
	09:15	1	13.7	13.9	1035	427
Auflegen der Platte	09:16	3-4	12.1	-	Mittelwert:	367
Verklemmen der Platte	-	2-3	11.8	-		
fertig Element	-	1-2	12.5	-		

Tabelle 7-7: Prüfkörper Hb1-C-M.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkartusche[g]	Klebstoffauftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					-	
	08:36	4	13.4	13.4	1486	-
Klebstoffauftrag	-	3	13.7	13.2	1431	294
	-	2	13.7	13.5	1393	203
	08:38	1	14.1	13.5	1318	401
Auflegen der Platte	08:41	3-4		11.5	Mittelwert:	299
Verklemmen der Platte	08:44	2-3		11.7		
fertig Element	08:52	1-2		11.4		

Tabelle 7-8: Prüfkörper Hb1-C-P.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkartusche[g]	Klebstoffauftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag				14. 8	1774	
	08:03	4		14.2	1738	192
Klebstoffauftrag	-	3		13.6	1693	240
	08:05	2			1635	310
	-	1	12.6		1585	267
Auflegen der Platte	08:11	3-4		11.8	Mittelwert:	252
Verklemmen der Platte	-	2-3		12		
fertig Element	-	1-2		11.9		

7.3.1 Verklebung bei Holzbauer 2

Sämtliche Prüfkörper wurden am selben Tag von 10:30 bis 12:20 hergestellt. Vor der ersten Verklebung um 10:16 betrug die Temperatur 21 °C bei einer rel. Luftfeuchtigkeit von 55 %. Nach der letzten Verklebung betrug die Temperatur 24 °C bei einer rel. Luftfeuchtigkeit von 40 %.

Tabelle 7-9: Prüfkörper Hb2-H-M.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkar-tusche [g]	Klebstoff-auftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					861	
	11:15	1	9.3	9.1	830	166
Klebstoffauftrag	-	2	8.8	8.5	785	240
	-	3	10.2	10.4	739	246
	11:20	4	9.8	9.6	701	203
Auflegen der Platte	11:22	1-2		12.2	Mittelwert:	214
Verkammern der Platte	11:23	2-3		12.3		
fertig Element	-	3-4		11.7		

Tabelle 7-10: Prüfkörper Hb2-H-S.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkar-tusche [g]	Klebstoff-auftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					661	
	11:34	4	9.2	9.8	607	288
Klebstoffauftrag	-	3	11.1	10.1	573	182
	-	2	9.5	9.2	518	294
	-	1	9.5	9.2	472	246
Auflegen der Platte	11:37	3-4	12.1		Mittelwert:	252
Verkammern der Platte	11:45	2-3		13.6		
fertig Element	-	1-2		11.9		

Tabelle 7-11: Prüfkörper Hb2-J-M.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkar-tusche [g]	Klebstoff-auftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					416	
	10:30	4	9.9	9.5	372	235
Klebstoffauftrag	-	3	8.2	8.5	333	208
	-	2	7.7	7.7	286	251
	10:34	1	10.5	11	236	267
Auflegen der Platte	-	3-4	11.3		Mittelwert:	240
Verkammern der Platte	10:40	2-3		11.2		
fertig Element	10:45	1-2		11.1		

Tabelle 7-12: Prüfkörper Hb2-J-S.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkartusche [g]	Klebstoffauftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					746	
	10:50	1	9.9	10.2	691	294
Klebstoffauftrag	-	2	9.3	9.4	633	310
	-	3	10	10.1	585	256
	10:52	4	9.5	9.6	529	299
Auflegen der Platte	10:54	1-2		12.2	Mittelwert:	290
Verklemmen der Platte	10:57	2-3		12.6		
fertig Element	11:03	3-4		11.1		

Tabelle 7-13: Prüfkörper Hb2-C-M.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkartusche [g]	Klebstoffauftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					747	
	12:05	4	7.7	8.8	721	139
Klebstoffauftrag	-	3	13.1	13.6	685	192
	-	2	12.8	12.3	647	203
	-	1	7.7	7.8	607	214
Auflegen der Platte	12:08	3-4	11.0		Mittelwert:	187
Verklemmen der Platte	12:10	2-3		11.4		
fertig Element	12:15	1-2		11.4		

Tabelle 7-14: Prüfkörper Hb2-C-S.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkartusche [g]	Klebstoffauftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					-	-
	12:12	4	9.6	9.8	-	-
Klebstoffauftrag	-	3	10.8	11.9	496	-
	-	2	8.5	9.3	456	214
	12:16	1	10.1	10.9	412	235
Auflegen der Platte	12:18	3-4	11.4		Mittelwert:	224
Verklemmen der Platte	12:19	2-3		10.8		
fertig Element	12:23	1-2		10.8		

7.3.1 Verklebung bei Holzbauer 3

Sämtliche Prüfkörper wurden am selben Tag von 7:30 bis 8:40 hergestellt (wobei bei zwei Prüfkörper keine Zeiten dokumentiert wurden). Vor der ersten Verklebung um 07:16 betrug die Temperatur 22 °C bei einer rel. Luftfeuchtigkeit von 50 %. Dasselbe Klima wurde auch nach der letzten Verklebung um 10:00 gemessen.

Tabelle 7-15: Prüfkörper Hb3-H-S.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkartusche [g]	Klebstoffauftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					696	
Klebstoffauftrag	-	4	14.5	13.8	658	203
	-	3	14.4	14.3	622	192
	-	2	14	14.6	575	251
	-	1	14.5	14.4	537	203
Auflegen der Platte	-	3-4	13	12.3	Mittelwert:	212
Verklemmen der Platte	-	2-3	12.3	12.5		
fertig Element	-	1-2	12.2	11.3		

Tabelle 7-16: Prüfkörper Hb3-H-P.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkartusche [g]	Klebstoffauftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					859	
Klebstoffauftrag	07:38	4	14.4	14.5	833	139
	-	3	14.3	13.8	790	230
	-	2	15.5	15	754	192
	07:43	1	14.7	15.5	718	192
Auflegen der Platte	07:44	3-4	11.3	12.7	Mittelwert:	188
Verklemmen der Platte	07:48	2-3	12.2	12.7		
fertig Element	-	1-2	11.9	12.3		

Tabelle 7-17: Prüfkörper Hb3-J-S.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkartusche [g]	Klebstoffauftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					204	
Klebstoffauftrag	08:29	4	13.4	14.4	160	235
	-	3	14.1	14.1	114	246
	-	2	14.3	14.4	76	203
	08:34	1	14.3	14.3	32	235
Auflegen der Platte	-	3-4	12.9	13.1	Mittelwert:	230
Verklemmen der Platte	-	2-3	13.6	13.5		
fertig Element	-	1-2	13.1	13.4		

Tabelle 7-18: Prüfkörper Hb3-J-P.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkartusche [g]	Klebstoffauftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					460	
	08:15	4	15	14	395	347
Klebstoffauftrag	-	3	15.6	15.2	342	283
	-	2	14.8	15.4	301	219
	-	1	14.6	16.3	262	208
Auflegen der Platte	08:22	3-4	12.1	11.3	Mittelwert:	264
Verklemmen der Platte	-	2-3	12	11.2		
fertig Element	-	1-2	12	11.9		

Tabelle 7-19: Prüfkörper Hb3-C-S.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkartusche [g]	Klebstoffauftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					267	
	-	4	14.6	13.1	221	246
Klebstoffauftrag	-	3	14.3	14.3	174	251
	-	2	15.6	14.7	121	283
	-	1	12.7	15	75	246
Auflegen der Platte	-	3-4	13.2	13.3	Mittelwert:	256
Verklemmen der Platte	-	2-3	13.3	13.3		
fertig Element	-	1-2	13.1	12.2		

Tabelle 7-20: Prüfkörper Hb3-C-P.

Arbeitsschritt	Zeit	Ständernummer / Plattenbereich	Feuchtegehalt auf der linken Seite [%]	Feuchtegehalt auf der rechten Seite [%]	Gewicht der Klebstoffkartusche [g]	Klebstoffauftrag [g pro m ²]
Vorbereiten Klebstoffauftrag					553	
	07:55	4	13.7	13.8	500	283
Klebstoffauftrag	-	3	14.6	14.9	443	304
	-	2	15.7	16.2	380	337
	08:00	1	15	13.7	330	267
Auflegen der Platte	-	3-4	12.8	11.8	Mittelwert:	298
Verklemmen der Platte	-	2-3	12.3	11.5		
fertig Element	08:08	1-2	12.4	12.3		

7.4 Beurteilung der Scherfestigkeit der grossformatigen Praxisversuche Teil I

7.4.1 Beurteilung des Standortes der Verkammerung

Zur Beurteilung, wie gross der Randeinfluss auf die Verklebung ist, wurden sämtliche Prüfkörper bis und mit einem Abstand vom Rand von ca. 25 cm gegenüber dem Rest der Prüfkörper verglichen, vgl. Abbildung 7-2. Die Abbildungen Abbildung 7-3 bis Abbildung 7-5 zeigen den Vergleich zwischen den Mittel- und Randprüfkörpern von sämtlichen Prüfkonfigurationen. Zur besseren Übersicht wurden die vielversprechenden Konfigurationen mit der Verkammerung der Portalanlage von Holzbauer 1 einzeln in der Abbildung 7-6 bis Abbildung 7-8 dargestellt.

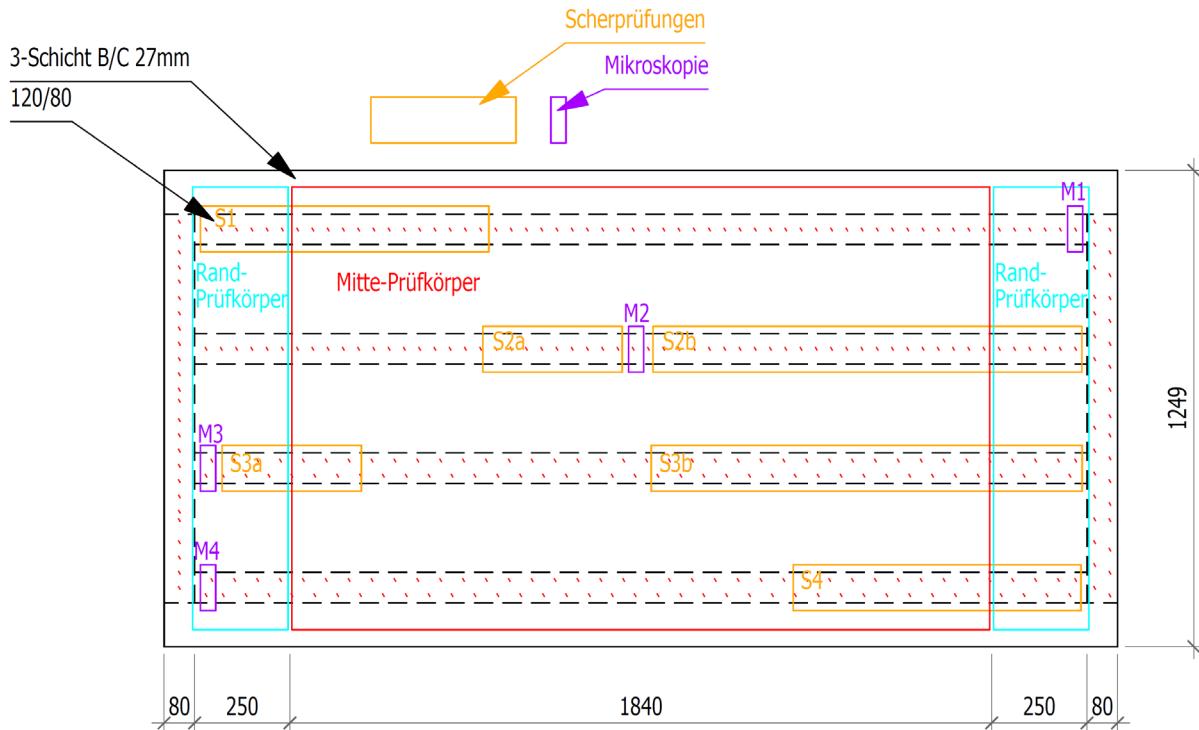


Abbildung 7-2: Einteilung der Prüfkörper in Mittlere-Prüfkörper und dem Rest.

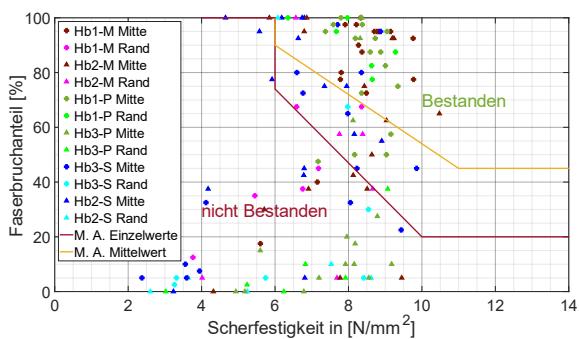


Abbildung 7-3: Vergleich der Radprüfkörper zu den Mitte-Prüfkörper bezogen auf die Scherfestigkeit der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G3.

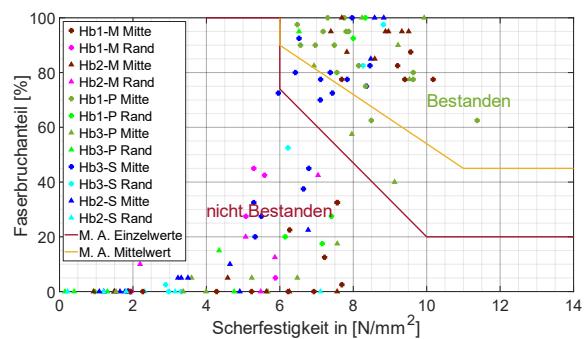


Abbildung 7-4: Vergleich der Radprüfkörper zu den Mitte-Prüfkörper bezogen auf die Scherfestigkeit der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G4.

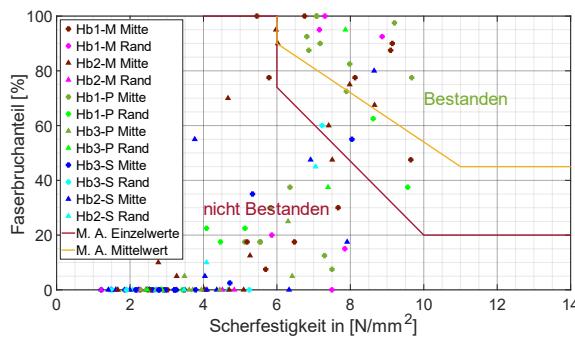


Abbildung 7-5: Vergleich der Radprüfkörper zu den Mitteprüfkörper bezogen auf die Scherfestigkeit der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G5.

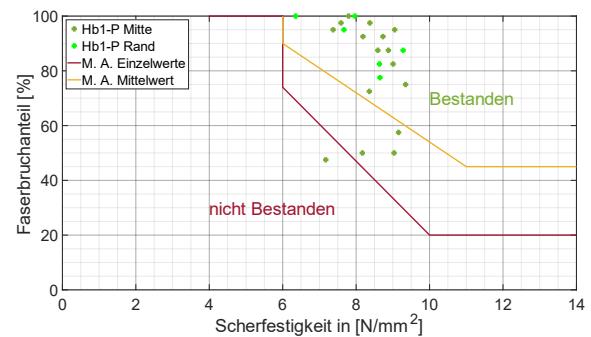


Abbildung 7-6: Vergleich der Radprüfkörper zu den Mitteprüfkörper bezogen auf die Scherfestigkeit der grossformatigen Praxisverklebung der Konfiguration Hb1-G3-P.

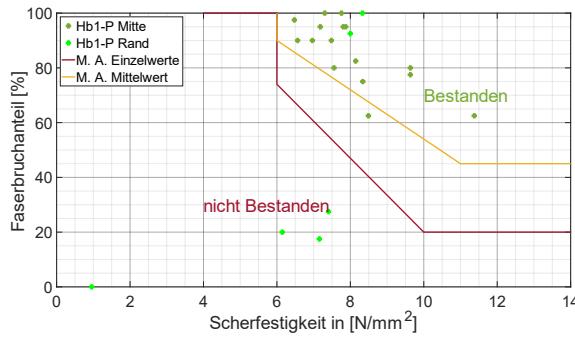


Abbildung 7-7: Vergleich der Radprüfkörper zu den Mitteprüfkörper bezogen auf die Scherfestigkeit der grossformatigen Praxisverklebung der Konfiguration Hb1-G4-P.

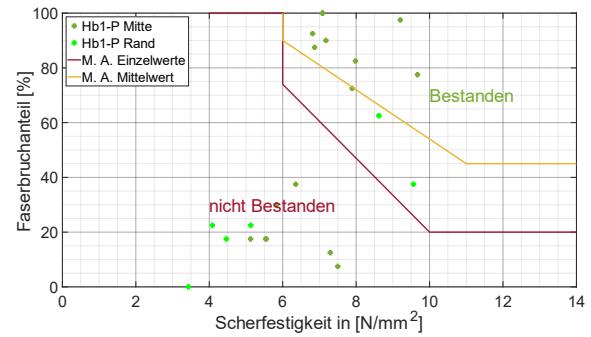


Abbildung 7-8: Vergleich der Radprüfkörper zu den Mitteprüfkörper bezogen auf die Scherfestigkeit der grossformatigen Praxisverklebung der Konfiguration Hb1-G5-P.

7.4.1 Vergleich der einreihigen und zweireihigen Verklammerung

Zur Beurteilung des Unterschiedes der einreihigen und zweireihigen Verklammerung, wurde ein Vergleich zwischen den mittigen Prüfkörper des Bereiches S2b (einreihig) und S3b (zweireihig) durchgeführt für die Verleugnungen mittels Protalanlage Hb1-P & Hb3-P, siehe Abbildung 7-9 bis Abbildung 7-11.

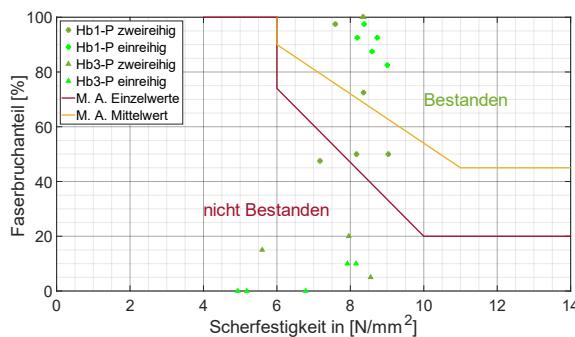


Abbildung 7-9: Vergleich der Verklammerung einreihig (Mitte-Prüfkörper der Bereiche S2b) und zweireihig (Mitte-Prüfkörper der Bereiche S3b) der Konfigurationen Hb1-G3-P & Hb3-G3-P.

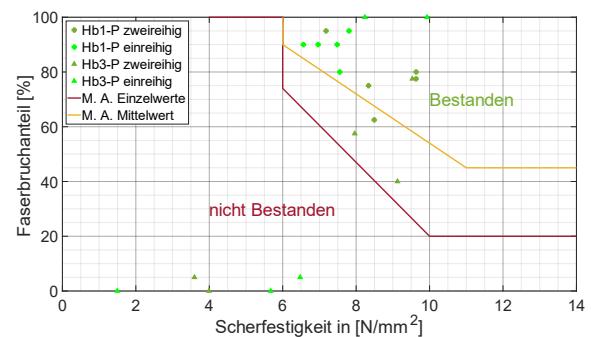


Abbildung 7-10: Vergleich der Verklammerung einreihig (Mitte-Prüfkörper der Bereiche S2b) und zweireihig (Mitte-Prüfkörper der Bereiche S3b) der Konfigurationen Hb1-G4-P & Hb3-G4-P.

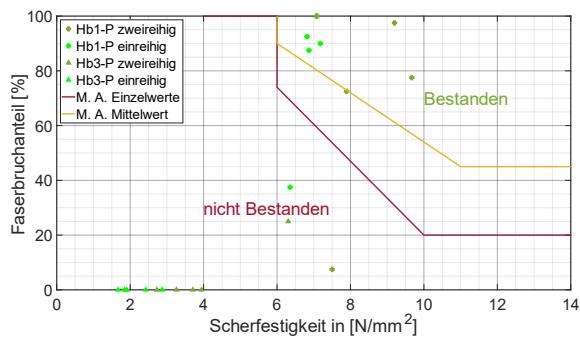


Abbildung 7-11: Vergleich der Verklammerung einreihig (Mitte-Prüfkörper der Bereiche S2b) und zweireihig (Mitte-Prüfkörper der Bereiche S3b) der Konfigurationen Hb1-G5-P & Hb3-G5-P.

7.5 Resultate der Klebfugendicke der grossformatigen Praxisversuche

Nachfolgend sind die Auswertungen der Klebfugendicke der grossformatigen Praxisverklebung für die Positionen M2-M4 aufgeführt.

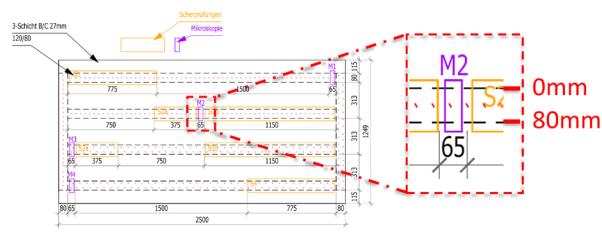


Abbildung 7-12: Position M2 der Mikroskopie bei den grossformatigen Praxisverklebung.

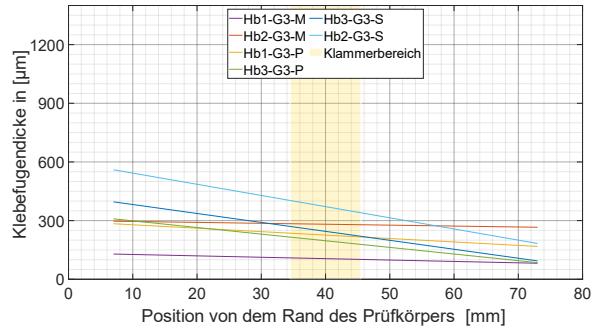


Abbildung 7-13: Verlauf der Klebfugendicke der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G3 an Position M2.

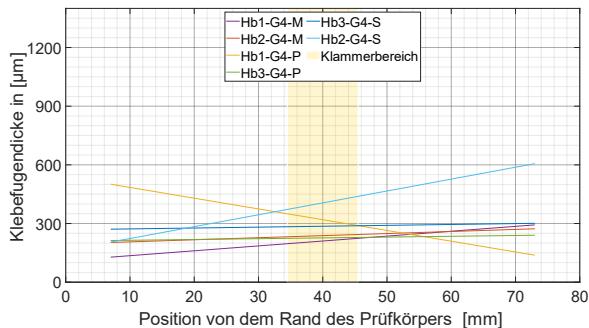


Abbildung 7-14: Verlauf der Klebfugendicke der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G4 an Position M2.

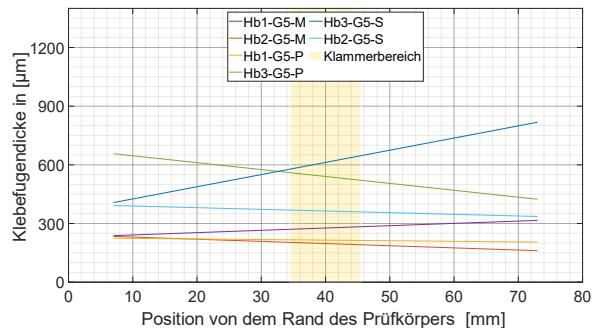


Abbildung 7-15: Verlauf der Klebfugendicke der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G5 an Position M2.

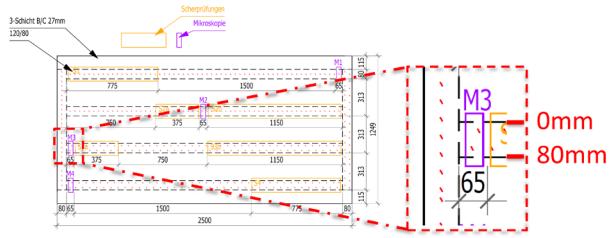


Abbildung 7-16: Position M3 der Mikroskopie bei den grossformatigen Praxisverklebung.

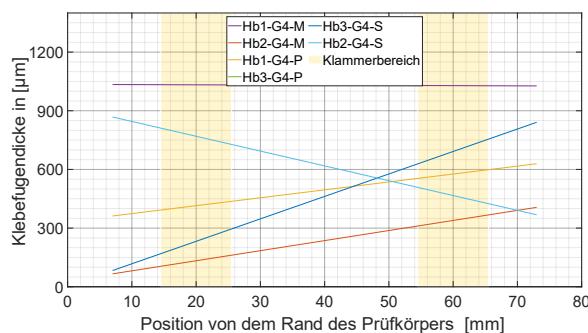


Abbildung 7-18: Verlauf der Klebfugendicke der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G4 an Position M3.

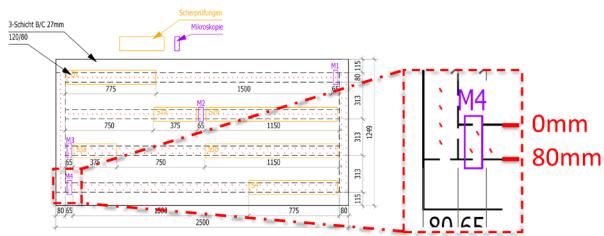


Abbildung 7-20: Position M4 der Mikroskopie bei den grossformatigen Praxisverklebungen.

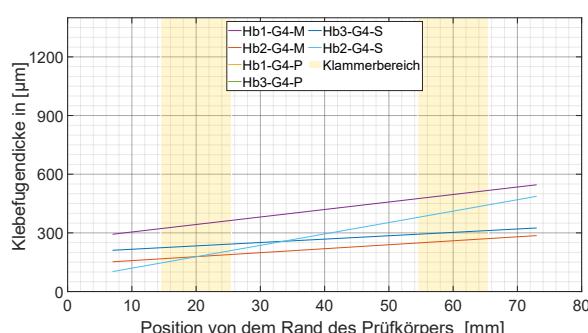


Abbildung 7-22: Verlauf der Klebfugendicke der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G4 an Position M4.

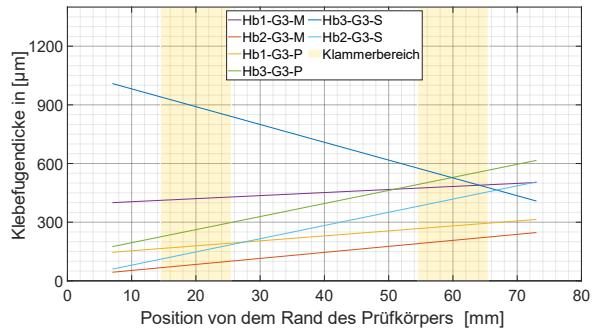


Abbildung 7-17: Verlauf der Klebfugendicke der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G3 an Position M3.

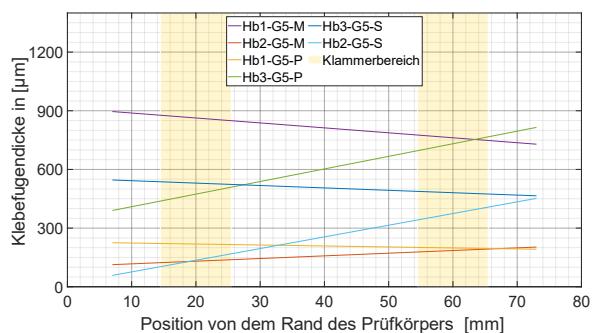


Abbildung 7-19: Verlauf der Klebfugendicke der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G5 an Position M3.

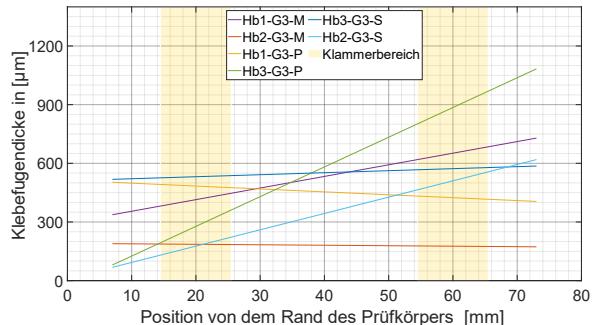


Abbildung 7-21: Verlauf der Klebfugendicke der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G3 an Position M4.

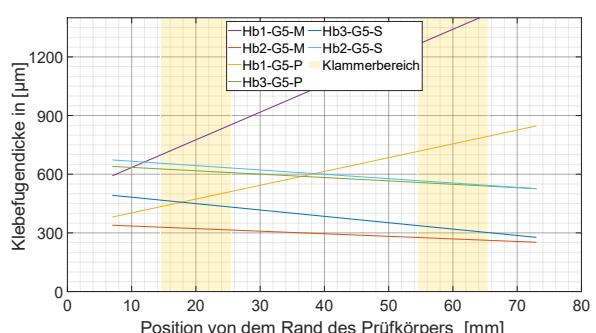


Abbildung 7-23: Verlauf der Klebfugendicke der grossformatigen Praxisverklebung mit dem Klebstoff G5 an Position M4.

7.6 Beurteilung der Scherfestigkeit der grossformatigen Praxisversuche Teil II

Zur Beurteilung der Scherfestigkeit nach EN 14080 werden in den Abbildung 7-24 und Abbildung 7-25 nur die Prüfkörper (S6, S8, S10 und S12) dargestellt, welche 75 cm Abstand von dem simulierten Überstand aufweisen (vergleich Abbildung 3-27). Nach diesem Abstand kann davon ausgegangen werden, dass der Überstand keinen Einfluss auf die Verklebung mehr aufweist. Bei Abbildung 7-26, welche die Referenzverklebung mit Verklammerung und ohne Überstand zeigt, werden alle Prüfkörper dargestellt.

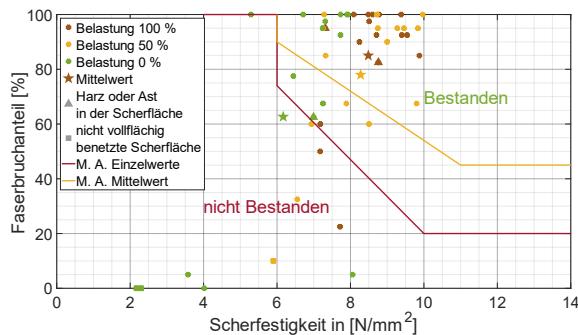


Abbildung 7-24: Vergleich der Verklammerung mittels unterschiedlichen zusätzlichen Auflasten und einem Überstand von 2 mm, wobei die Prüfkörper erst nach 75 cm Abstand vom Überstand entnommen wurden.

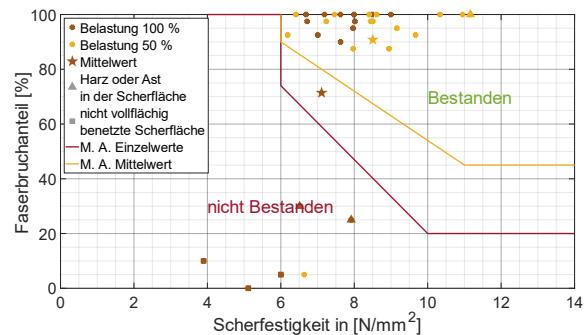


Abbildung 7-25: Vergleich der Vernagelung mittels unterschiedlichen zusätzlichen Auflasten und einem Überstand von 2 mm, wobei die Prüfkörper erst nach 75 cm Abstand vom Überstand entnommen wurden.

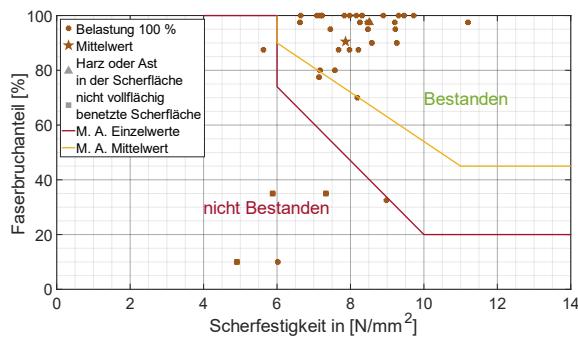


Abbildung 7-26: Referenzverklammerung bei 100 % Auflast.