

Thomas Oberndorfer, Frank Hunger, Oliver Fischer

Ultra High Performing Timber Walls – Einsatz von schlanken Lamellen aus ultrahochfestem Beton in Brettsperrholzelementen zur Steigerung der Tragfähigkeit



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



Thomas Oberndorfer, Frank Hunger, Oliver Fischer

**Ultra High Performing Timber Walls –
Einsatz von schlanken Lamellen
aus ultrahochfestem Beton in
Brettsperrholzelementen zur Steigerung
der Tragfähigkeit**

F 3233

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2021

ISBN 978-3-7388-0628-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



Ultra High Performing Timber Walls - Einsatz von schlanken Lamellen aus ultrahochfestem Beton in Brettsperrholzelementen zur Steigerung der Tragfähigkeit

Schlussbericht zum Vorhaben SWD-10.08.18.7-17.23

Projektbearbeitung Thomas Oberndorfer, M.Sc., Frank Hunger, M.Sc.

Projektleitung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer

Forschungsstellen Technische Universität München
Lehrstuhl für Massivbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Zeitraum 07/2017 - 10/2019

Vorwort

Das Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative ZukunftBau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-17.23)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Für die Förderung sowie die Unterstützung zur Durchführung der dargestellten Arbeiten bedanken wir uns herzlich.

Darüber hinaus gilt unser besonderer Dank den Firmen Südbayerisches Portland Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co.GmbH, Dyckerhoff GmbH, Henkel & Cie AG, Sudholt Wasemann GmbH, Züblin Timber GmbH, Seeberger Friedl Planungsgesellschaft MBH und BBI Ingenieure GmbH für die Unterstützung des Forschungsprojektes, sei es mit dem unentgeltlichen zur Verfügung stellen von Material und Prüfgut oder der steten Bereitschaft zur Diskussion. Großer Dank gilt den am Projekt beteiligten Mitarbeitern des MPA Bau der Technischen Universität München sowie den wissenschaftlichen Hilfskräften und Studierenden für die Unterstützung bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen.

Zitiervorschlag:

Oberndorfer, T., Hunger, F., Fischer, O.(2020).Ultra High Performing Timber Walls - Einsatz von schlanken Lamellen aus ultrahochfestem Beton in Brettsperrholzelementen zur Steigerung der Tragfähigkeit. (Forschungsbericht). Lehrstuhl für Massivbau. Technische Universität München

Zusammenfassung

Diese Arbeit behandelt die Entwicklung von Bauteilen mit zusammengesetztem Querschnitt aus hoch- oder ultrahochfestem Beton und Holz. Besonderes Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Einsatz als Wandbauteil. Der schlanke, aus Beton bestehende, Wandkern trägt vorwiegend die auftretenden Normalkräfte ab. Das außenliegende Holz hindert den schlanken Wandkern durch eine Vergrößerung des Trägheitsmoments am Knicken und nimmt Druck- und Zugspannungen, die aus einer Momentenbeanspruchung resultieren, auf. Die Herstellung der Wandbauteile erfolgt im Rahmen der Brettsperrholzproduktion. Hierzu werden schlanke Platten oder Lamellen aus Beton vorgefertigt und vollständig in die Brettsperrholzproduktion integriert. Um diesen wirtschaftlichen Produktionsprozess zu ermöglichen, ist die Verklebung von Holz und Beton, mit Klebstoffen, die in der Brettsperrholzproduktion üblich und zugelassen sind, erforderlich.

Mittels kleinformiger Druckscherversuche wurde die Herstellung tragender Klebeverbindungen mit verschiedenen Klebstoffen, Betonen und (Nach-)Behandlungen der Betonoberflächen untersucht. Vielversprechende Ergebnisse erzielte eine geschliffene Betonoberfläche bei der Verwendung von einem Ein-Komponenten Polyurethanklebstoff, unabhängig vom verwendeten Beton. Die Arbeit behandelt primär das Kurzzeit-Tragverhalten, die durchgeführten Tastversuche zur Dauerhaftigkeit zeigten jedoch, dass eine dauerhafte Verklebung für die Anforderungen im Bauwesen möglich erscheint. Aufbauend auf den durchgeführten Verbundversuchen ist davon auszugehen, dass durch die Verklebung eine starre Verbindung zwischen Beton und Holz vorliegt. Die Bauteilversuche im Maßstab 1:1 wiesen zumeist ein duktiles Verhalten auf. Berechnete Dehnungen und Verformungen, basierend auf einem analytischen Modell, zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen.

Anhand der durchgeführten Versuche konnte gezeigt werden, dass eine kraftschlüssige Verklebung von Holz und hoch- bzw. ultrahochfestem Beton mit Klebstoffen, die in der Brettsperrholzproduktion verwendet werden, auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten möglich ist. Ebenso zeigte sich durch das Einkleben des Betonkerns eine Traglaststeigerung, welche von der anzusetzenden Lastexzentrizität sowie dem Einfluss von Effekten nach Theorie II. Ordnung abhängig ist.

Abstract

This work deals with the development of hybrid walls comprised of ultra-high performance concrete and timber. The walls consist of a slender concrete core which primarily bears axial forces. Surrounding timber prevents the core from buckling and absorbs tensile and compressive stresses resulting from bending moments. The economic production of the hybrid wall elements occurs in the industrial environment of cross laminated timber (CLT) production. To accomplish this, prefabricated concrete parts are integrated in the production of CLT. To enable this production process bonding of timber and concrete with standard glues in CLT production is inevitable.

The suitability of various adhesives, concrete types and concrete surface treatments for bonding was investigated by means of small-format compression shear tests. Promising results were achieved with a ground concrete surface in combination with a one-component polyurethane adhesive, independent of the used concrete type. Although the focus was on the short term load bearing behaviour, performed tactile tests regarding durability showed that durable bonding seems possible. Based on composite tests carried out, a rigid connection between timber and concrete can be assumed for calculation purposes. The tests on wall segments scale 1:1 mainly showed a ductile behaviour. The modelling of the tests was done analytically, solving the differential equation for theory of second order problems. This was accomplished with an effective bending stiffness of the hybrid cross section, accounting for shear deformation, based on shear analogy method. The calculation showed good accordance with the results from the experiments.

The performed experiments showed, that a bonded connection between timber and ultra-high performance concrete using standard glues in cross laminated timber production is possible. With the glued in concrete core the bearable load of the wall segments was increased. The amount of increase depends on the load eccentricity and second order effects.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Zielsetzung	2
2	Grundlegendes	4
2.1	Brettspertholz	4
2.1.1	Allgemein	4
2.1.2	Material	4
2.1.3	Herstellung	5
2.1.4	Tragwirkung	6
2.2	Ultrahochfester Beton	8
2.2.1	Allgemein	8
2.2.2	Festbetoneigenschaften	8
3	Scherversuche	10
3.1	Allgemeines	10
3.2	Material und Methoden	10
3.2.1	Versuchsaufbau	10
3.2.2	Versuchskörper	11
3.2.3	Material	13
3.2.4	Messtechnik	14
3.2.5	Versuchsdurchführung	14
3.3	Ergebnisse und Interpretation	15
3.3.1	Allgemeines und Bezeichnung	15
3.3.2	Verklebung mit Melamin Urethan Formaldehydharz	15
3.3.3	Verklebung mit Ein-Komponenten Polyurethanklebstoff	17
3.3.4	Verklebung mit Phenolresorcinformaldehydharz, Epoxidharz und Zwei-Komponenten Polyurethangießharz	20
3.4	Zwischenfazit	20

4	Delaminierversuche	22
4.1	Allgemeines	22
4.2	Material und Methoden	22
4.2.1	Versuchsaufbau	22
4.2.2	Versuchskörper	23
4.2.3	Material	23
4.2.4	Messtechnik	24
4.2.5	Versuchsdurchführung	24
4.3	Ergebnisse und Interpretation	25
4.4	Zwischenfazit	27
5	Verbundversuche	28
5.1	Allgemeines	28
5.2	Material und Methoden	29
5.2.1	Versuchsaufbau	29
5.2.2	Versuchskörper	30
5.2.3	Material	30
5.2.4	Messtechnik	31
5.2.5	Versuchsdurchführung	32
5.3	Ergebnisse und Interpretation	33
5.4	Zwischenfazit	45
6	Bauteilversuche	46
6.1	Allgemeines	46
6.2	Material und Methoden	46
6.2.1	Versuchsaufbau	46
6.2.2	Prüfkörper	47
6.2.3	Material	51
6.2.4	Messtechnik	51
6.2.5	Versuchsdurchführung	52
6.3	Ergebnisse und Interpretation	53
6.3.1	Versuche mit durchgängigem Wandkern aus Beton	53
6.3.2	Versuche mit alternierendem Wandkern aus Beton und Holz	58
6.3.3	Versagensarten	61
6.4	Zwischenfazit	65
7	Bemessungsvorschlag und Anschlussdetails	66
7.1	Modellierung der Bauteilversuche	66
7.1.1	Allgemeines	66
7.1.2	Verwendete Materialeigenschaften für die Modellierung	71
7.1.3	Zentrische Bauteilversuche	72

7.1.4	Exzentrische Bauteilversuche	73
7.1.5	Bemessungsvorschlag	76
7.1.6	Vergleichsbetrachtung	76
7.2	Anschlussdetail	79
8	Zusammenfassung und Ausblick	81
8.1	Zusammenfassung	81
8.2	Ausblick	83
	Literaturverzeichnis	86
A	Scherversuche	88
A.1	Diagramme zur Scherfestigkeit und Holzbruchanteil	88
A.2	Tabellarische Versuchsdaten	91
B	Delaminierungsversuche	130
C	Verbundversuche	139
D	Bauteilversuche	145

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Durch die zunehmende Verstädterung, sowie das Bevölkerungswachstum allgemein, sind die Städte gezwungen zu wachsen (United Nations & Social Affairs, 2019). Das Wachstum kann dabei in vertikaler oder horizontaler Richtung stattfinden (Janser, 2011). Vertikales Wachstum geht einher mit einem Anstieg der Gebäudehöhe. Mit steigender Gebäudehöhe nimmt die Belastung in den unteren Geschossen jedoch zu. Um Bauteile mit angemessenen Querschnittsabmessungen auszubilden, z. B. aus Gründen des Ressourcenverbrauchs, des erforderlichen Raumbedarfs für konstruktive Elemente und der Produktions- und Transportkapazitäten, welche die hohen Kräfte aufnehmen können, sind Hochleistungsmaterialien oder Materialkombinationen erforderlich.

Durch eine Reihe technischer Innovationen um die Jahrtausendwende rückte mehrgeschossiges Bauen mit Holz wieder stärker in den Fokus (Kaufmann *et al.*, 2017). Ebenso ist der vermehrte Einsatz von Holz aus Aspekten der Nachhaltigkeit anzustreben. Durch die moderne Klebstofftechnologie ist der Holzbau nicht mehr nur auf stabförmige Fachwerke begrenzt, sondern es können weitgespannte Konstruktionen mit Brettschichtholz oder flächige Bauteile aus Brettsperrholz (BSP) hergestellt werden. Diese finden als leistungsfähige Wand- und Deckenbauteile Einsatz. Der Baustoff Brettsperrholz hat sich auf dem Markt etabliert, was sich auch an der global prognostizierten Jahresleistung zwischen 2 und 2,5 Mio. m³ für das Jahr 2020 widerspiegelt (Jauk, 2019).

Um das Einsatzgebiet von Brettsperrholz und darauf basierenden Weiterentwicklungen, wie z. B. hybride Plattenaufbauten aus Holz/Holz, Holz/Beton oder Holz/Kunststoff, zu vergrößern und um neue Impulse im Holzbau zu setzen, beschäftigen sich bereits heute laut Schilliger (2019) eine Vielzahl von Forschungsprojekten mit dieser Thematik. Diese Arbeit leistet einen wesentlichen Beitrag zur Forschung zu hybriden Bauweisen mit vorgefertigten Bauteilen aus Holz und Beton und reiht sich damit in das Themengebiet mit ein. Untersucht

wird, ob sich Wandbauteile aus Brettspertholz mit hochfestem bzw. ultrahochfestem Beton ökonomisch sinnvoll verstärken lassen um so die statischen Eigenschaften zu verbessern.

1.2 Zielsetzung

Die Kombination von ultrahochfestem Beton (UHFB) und Holz in Wandelementen soll die Herstellung von schlanken und hoch tragfähigen vorgefertigten Wandbauteilen ermöglichen. Diese besitzen einen Kern aus UHFB der vorwiegend die auftretenden Normalkräfte aus den vertikalen Lasten aufnimmt. Der außenliegende Holzquerschnitt nimmt Zug- und Druckkräfte auf, die aus Wind und/oder Imperfektionen entstehen, und verhindert das Ausknicken des schlanken Betonkerns. Abbildung 1.1 zeigt einen beispielhaften Aufbau.

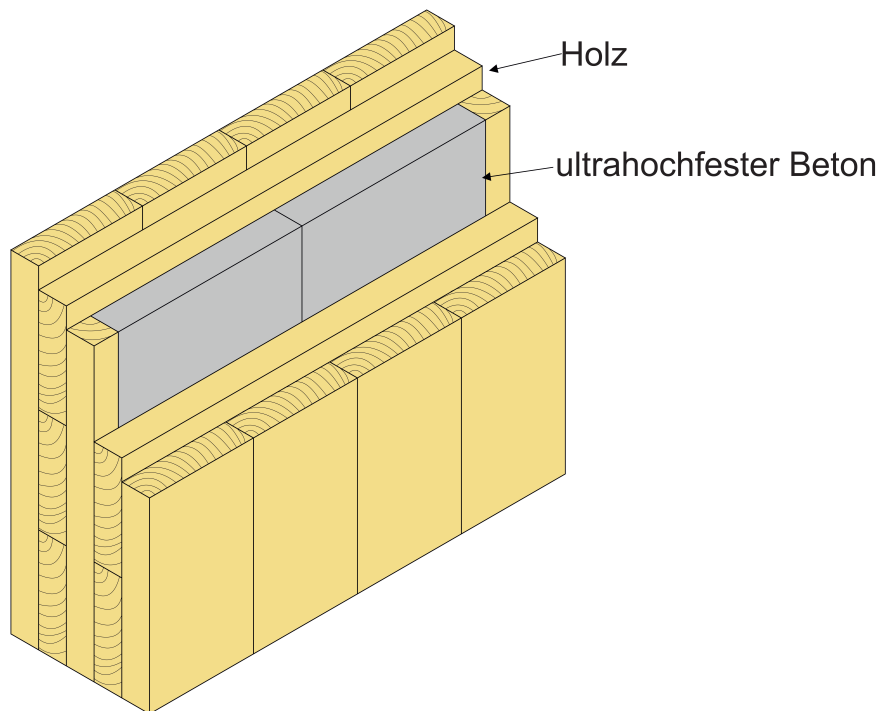


Abbildung 1.1: Beispielhafter Wandaufbau

Im Unterschied zu bekannten Verbindungsmöglichkeiten von Holz und Beton, wie z. B. das Ausgießen mit Ortbeton, die nachträgliche Verstärkung mittels Gießharzen oder die Anordnung von metallischen Verbindungsmitteln als Schubverbinder, werden die beiden Werkstoffe miteinander verklebt. Die industrielle Verklebung findet im Rahmen der Brettspertholzherstellung statt, der etablierte und ausgereifte Herstellungsprozess von BSP soll so wenig wie möglich verändert werden. Hierfür werden im Produktionsprozess von Brettspertholz einzelne Bretter aus Holz durch „Bretter aus Beton“ ersetzt.

Für die Herstellung der Wandelemente mit zusammengesetztem Querschnitt sind drei Schritte nötig. Zu Beginn produziert ein Betonfertigteilwerk die Platten oder Lamellen aus UHFB und liefert diese zu einem Brettsperrholzhersteller. Dieser legt die Bauteile aus Beton im regulären Produktionsprozess des Brettsperrholzes an zuvor definierte Stellen in die BSP Elemente ein. Nach dem Pressen der Wandelemente mit zusammengesetztem Querschnitt werden diese in herkömmlichen Holzbearbeitungszentren maschinengesteuert abgebunden.

Um den industriell optimierten Herstellungsprozess von BSP nicht durch zusätzlichen technischen Aufwand und damit verbundenen wirtschaftlichen Folgen zu belasten, ist es zwingend erforderlich das Einbringen der Lamellen aus ultra- hochfester Beton (UHFB) vollständig in den Herstellungsprozess des BSP zu integrieren. Das erfordert die Verwendung von zugelassenen Klebstoffsystemen, die sich in der Brettsperrholzherstellung etabliert haben.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, zu klären, ob Wandbauteile mit zusammengesetztem Querschnitt mit dem zuvor beschriebenen Produktionsprozess herstellbar sind, und darauf aufbauend, Berechnungsansätze für das Kurzzeittragverhalten zu erarbeiten.

2 Grundlegendes

2.1 Brettsperrholz

2.1.1 Allgemein

Der Begriff „Brettsperrholz“ wird erstmals im Jahr 1981 von Dröge & Stoy (1981) genannt und laut Brandner *et al.* (2016) wurden bereits 1995 die ersten Wohngebäude damit errichtet. Die Industrie erkannte das Potenzial des Werkstoffs und investierte in Forschung und Entwicklung sowie in Produktionskapazitäten. Mittlerweile ist BSP ein im Holzbau etablierter Baustoff mit hohem Vorfertigungsgrad, was sich zum einen an dem geschätzten globalen Jahresausstoß für das Jahr 2019 zwischen 1,6 und 1,8 Mio. m³ (Jauk, 2019) und zum anderen an der Tatsache, dass der Baustoff Einzug in die Normung gefunden hat, zeigt.

2.1.2 Material

„Brettsperrholz ist ein tragendes Holzprodukt, das aus mindestens drei rechtwinklig verklebten Lagen besteht und stets Brettlagen und möglicherweise auch Lagen aus Holzwerkstoffen enthält“ (DIN EN 16351). Die Dicke der einzelnen Brettlagen beträgt meistens zwischen 20 mm und 40 mm, in Abhängigkeit der Lagenanzahl ergeben sich Elementdicken zwischen 60 mm und 400 mm (Kaufmann *et al.*, 2017). Die maximalen Abmessungen der einzelnen Elemente sind herstellerabhängig, die größte derzeit errichtete Produktionsanlage in Großbritannien kann Elemente mit einer maximalen Größe von 6 m x 20 m produzieren (Ebner, 2017). Abbildung 2.1 zeigt einen beispielhaften fünflagigen Aufbau eines Brettsperrholzelements.

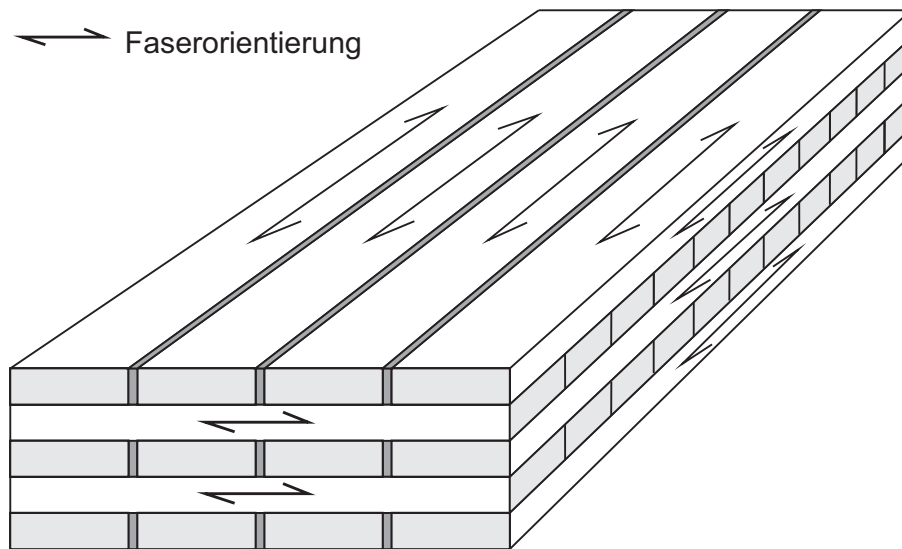


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines Brettsperrholzelements nach Brandner *et al.* (2016)

2.1.3 Herstellung

Abbildung 2.2 stellt den Herstellungsprozess von Brettsperrholz schematisch dar. Nachfolgend sind die einzelnen zur Herstellung erforderlichen Schritte beschrieben: Ausgangsbasis sind i. d. R. technisch getrocknete Bretter aus Nadelholz, meistens Fichte. Jedoch finden auch andere Holzarten Verwendung, zum Beispiel Kiefer oder Tanne. Im zulässigen Holzfeuchtebereich erfolgt eine maschinelle oder visuelle Festigkeitssortierung. Festigkeitsreduzierende oder die Optik beeinträchtigende Fehlstellen werden ausgekappt und die einzelnen Brettabschnitte anschließend mittels Keilzinkenverbindung zu Lamellen mit der gewünschten Länge gestoßen, sowie anschließend auf die erforderliche Dicke gehobelt. Der Aufbau eines Brettsperrholzelements erfolgt lagenweise. Nach dem Einlegen einer Lage in das Pressbett wird der Klebstoff maschinell aufgetragen. Als Klebstoffe kommen zumeist Ein-Komponenten Polyurethanklebstoff (PU) oder Melamin Urethan Formaldehydharz (MUF) zum Einsatz, da diese schnell aushärten und transparente Klebefugen ausbilden. Der erforderliche Pressdruck wird hydraulisch oder im Vakuumverfahren erzeugt. Nach dem Aushärten des Klebstoffs und einer Nachlagerung erfolgt i. d. R. der maschinelle Abbund, z. B. Aussägen von Fenster- und Türöffnungen, Fräsen von Kabelkanälen, Bohren von Steckdosen, zum fertigen Element. (Wiegand *et al.*, 2012)

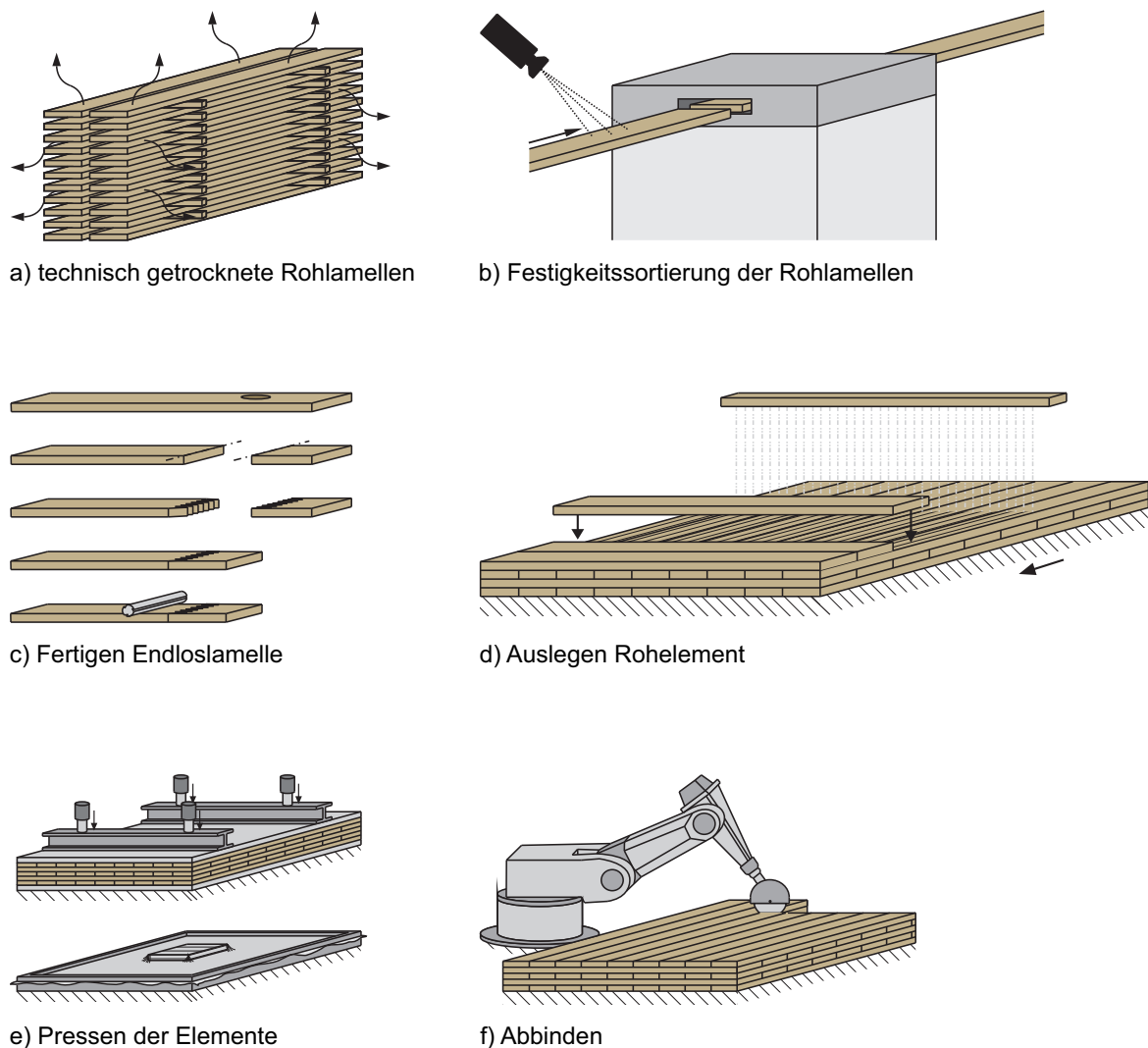


Abbildung 2.2: Herstellungsprozess von Brettsperrholz nach Wiegand *et al.* (2012)

2.1.4 Tragwirkung

Brettsperrholz wird sowohl für nichttragende als auch für tragende Bauteile, wie Wände und Decken eingesetzt. Der Lastabtrag kann, in Abhängigkeit der Lagerungssituation und der Bauteilgeometrie, einachsig oder zweiachsig erfolgen. Die einzelnen Brettlagen werden durch die flächige Verklebung kraftschlüssig miteinander verbunden und es entsteht ein statisch wirkender Querschnitt. Das anisotrope Materialverhalten von Holz fließt in die Ermittlung der Spannungsverteilung mit ein. Um diesem Verhalten Rechnung zu tragen, sind nur jene Brettlagen zu berücksichtigen, deren Faserrichtung parallel zur betrachteten Beanspruchungsrichtung verlaufen. Den quer dazu verlaufenden Brettlagen werden auch bei einer optionalen Schmalseitenverklebung keine Spannungen zugewiesen, wie Abbildung 2.3 zeigt. Die Spannungsermittlung kann basierend auf der schubstarrten Verbundtheorie, die Brettlagen sind in die jeweiligen Tragrichtungen starr miteinander verbunden und der Querschnitt bleibt

eben, als auch unter Berücksichtigung des nachgiebigen Verbund erfolgen. Nach Winter *et al.* (2008) ist die Berechnung nach der schubstarreren Verbundtheorie bei einem Verhältnis von Spannweite zu Elementdicke größer 20 für baupraktische Zwecke hinreichend genau. Bei der Verformungsberechnung sollte der Einfluss der schubweichen Querlagen, und der daraus resultierenden Schubverformung, auf die Gesamtverformung miteinbezogen werden. Hierfür existieren verschiedene Berechnungsmöglichkeiten, zum Beispiel die Schubanalogie oder das Gamma-Verfahren, diese sind ausführlich in (Wallner-Novak *et al.*, 2013), (Wallner-Novak *et al.*, 2018) und (Winter *et al.*, 2008) beschrieben.

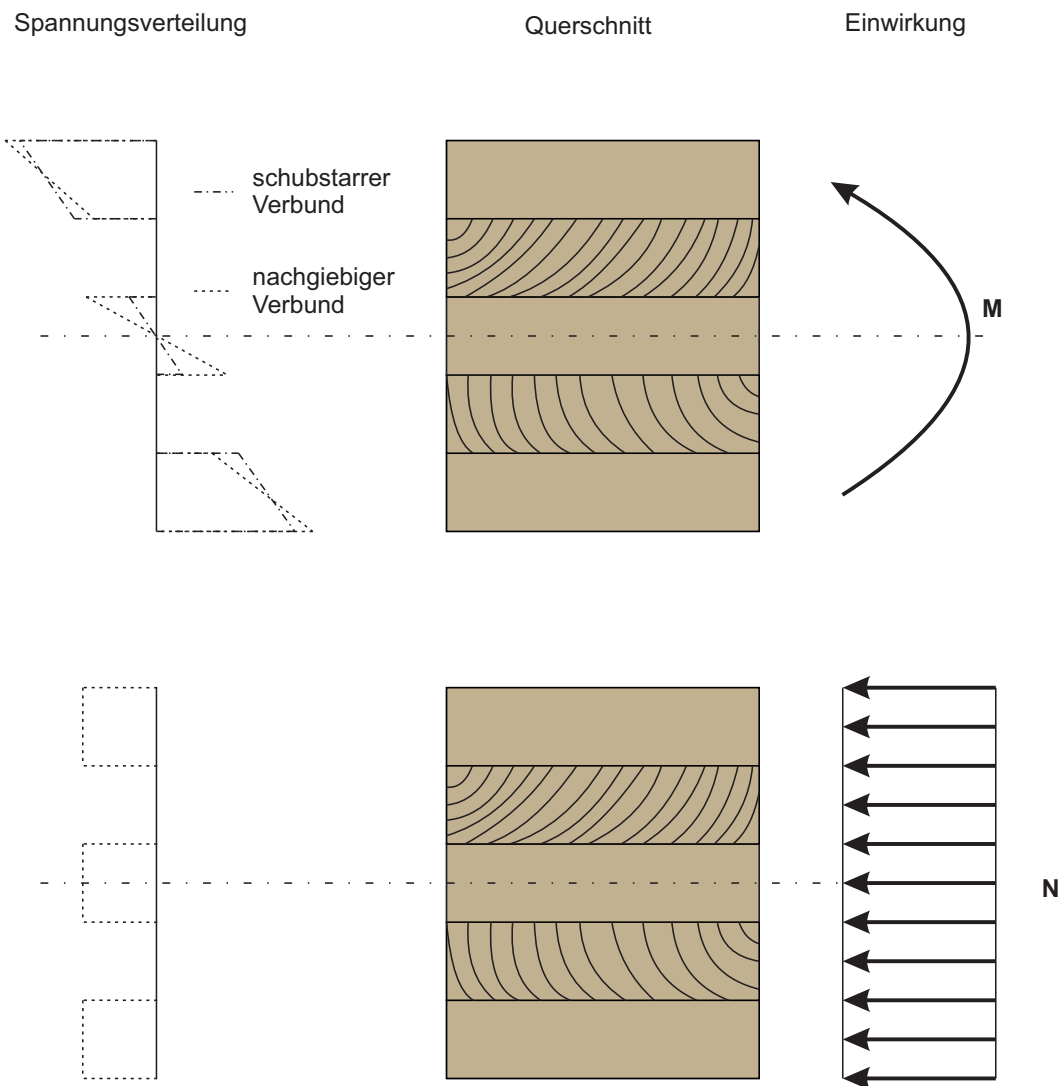


Abbildung 2.3: Schematisierte Spannungsverteilung im Brettsperrholzquerschnitt bei Biege- bzw. Normalkraftbeanspruchung nach Winter *et al.* (2008)

2.2 Ultrahochfester Beton

2.2.1 Allgemein

In den vergangenen 20 Jahren entwickelten verschiedene Stellen ultrahochfesten Beton (UHFB) mit Druckfestigkeiten von bis zu 200 N/mm^2 zur Anwendungsreife. Noch ist die Entwicklung und Regelung dieses Werkstoffs nicht abgeschlossen, was sich dadurch zeigt, dass zur Zeit in Deutschland eine Richtlinie und international eine Norm erarbeitet wird. Der relativ junge Baustoff UHFB zeichnet sich besonders durch seine hohe Druckfestigkeit aus, welche durch eine praktisch kapillarporenfreie Zementsteinmatrix erreicht wird. Um dies zu erreichen sind bei der Herstellung von UHFB zusätzlich zu den klassischen Bestandteilen von Beton, Zement, Wasser und Gesteinskörnung, reaktive und/oder nicht reaktive Zusatzstoffe sowie Fließmittel und ggf. Stahlfasern zuzugeben. (Fehling *et al.*, 2014)

In diesem Abschlussbericht wird nur eine sehr kurze Einführung gegeben, genaueres ist z. B. (Fehling *et al.*, 2014), (Lechner, 2018) und (Sagmeister, 2017) zu entnehmen.

2.2.2 Festbetoneigenschaften

Die Festbetoneigenschaften von UHFB unterscheiden sich deutlich von normalfestem Beton. Abbildung 2.4 zeigt typische Spannungs-Dehnungsbeziehungen von normal-, hoch- und ultra- hochfestem Beton. Zum einen erreicht der ultrahochfeste Beton eine deutlich höhere Bruchspannung von bis zu 200 N/mm^2 , zum anderen unterscheidet sich die Art des Versagens. Während normalfester Beton unter eindimensionaler Druckbeanspruchung duktil versagt, ist das Versagen von UHFB spröde. Die Zugabe von Stahlfasern verbessert den Nachbruchbereich des ultrahochfesten Betons merklich. Der E-Modul liegt in einem Bereich von 45.000 bis 55.000 N/mm^2 . Dieser ist damit ebenfalls höher als bei normalfestem Beton, was an dem steileren Anstieg der Spannungs-Dehnungslinie zu erkennen ist. Charakteristisch für ultrahochfesten Beton unter einaxialer Druckbeanspruchung ist die weitestgehend lineare Beziehung zwischen Spannung und Dehnung bis kurz vor Erreichen der Bruchspannung. (Fehling *et al.*, 2014)

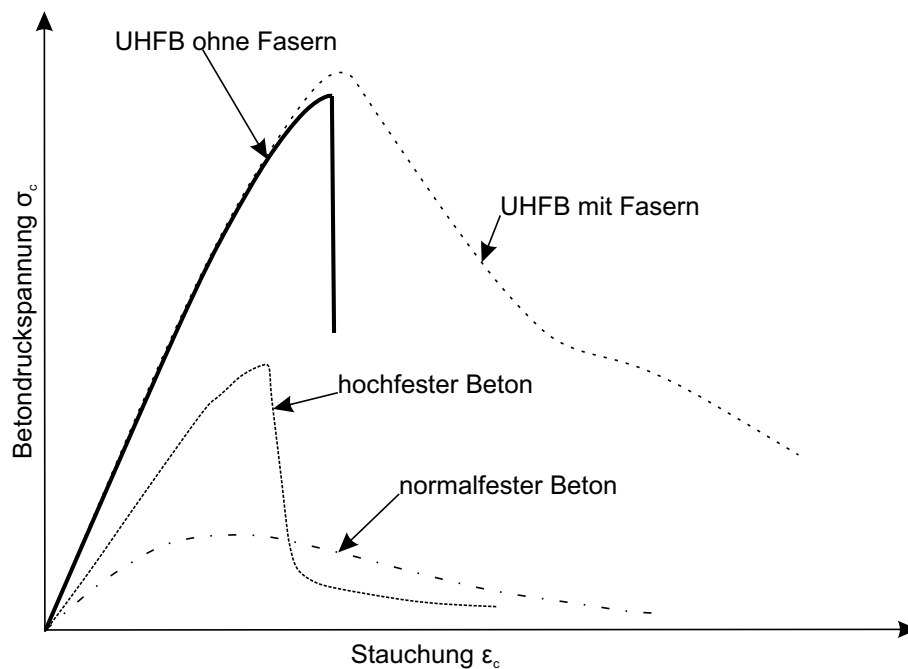


Abbildung 2.4: Typische Spannungs-Dehnungslinien, normal-, hoch- und ultrahochfeste Betone nach Leutbecher (2008)

Neben der Druckfestigkeit ist auch die Zugfestigkeit von UHFB im Vergleich zu normalfestem Beton höher. Jedoch ist zu beachten, dass es keinen gültigen Materialkennwert „Zugfestigkeit“ gibt, da diese von vielen Faktoren, z. B. der Prüfmethode, dem Probekörpervolumen, dem Maßstabseffekt und der Vorlagerungsart der Betonkörper abhängig ist. Neben der Zugfestigkeit ist auch die Oberflächenhaftzugfestigkeit des UHFB, aufgrund des dichten Porengefüges, höher als bei Normalbeton. Hierdurch eignet sich UHFB gut zum Verkleben. (Sagmeister, 2017)

3 Scherversuche

3.1 Allgemeines

Zu Beginn der Arbeit wurde anhand kleinformatiger Druckscherversuche geprüft, ob eine kraftschlüssige Verklebung von Holz und UHFB mit Klebstoffen, die bereits für die Herstellung tragender Holzbauteile auf Grundlage einschlägiger Normen zugelassen sind und in der Brettsperrholzherstellung Anwendung finden, möglich ist. Da unklar war, ob eine derartige Verklebung realisierbar ist, kamen weitere, entweder im Holzbau oder im Betonbau bereits eingesetzte Klebstoffe zum Einsatz. Die Versuche wurden in einem iterativen Prozess durchgeführt, bei jeder Serie wurden die Erkenntnisse aus den Vorgängerserien berücksichtigt.

3.2 Material und Methoden

3.2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau für die Druckscherversuche ist in Anlehnung an DIN EN 16351 oder DIN EN 14080 jeweils Anhang D aufgebaut. Dieser besteht aus einer Schervorrichtung, durch welche die Prüfkraft auf den Körper übertragen wird. Um etwaige Schiefstellungen auszugleichen war eine Seite der Prüfvorrichtung mit einer Kalotte versehen. Abbildung 3.1 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus sowie den gesamten Versuchsaufbau mit eingebautem Prüfkörper. Beim Einbau der Prüfkörper war darauf zu achten, dass die Klebefuge unmittelbar an das Stahlaulager anschließt. Das Abscheren fand parallel zur Faser statt.

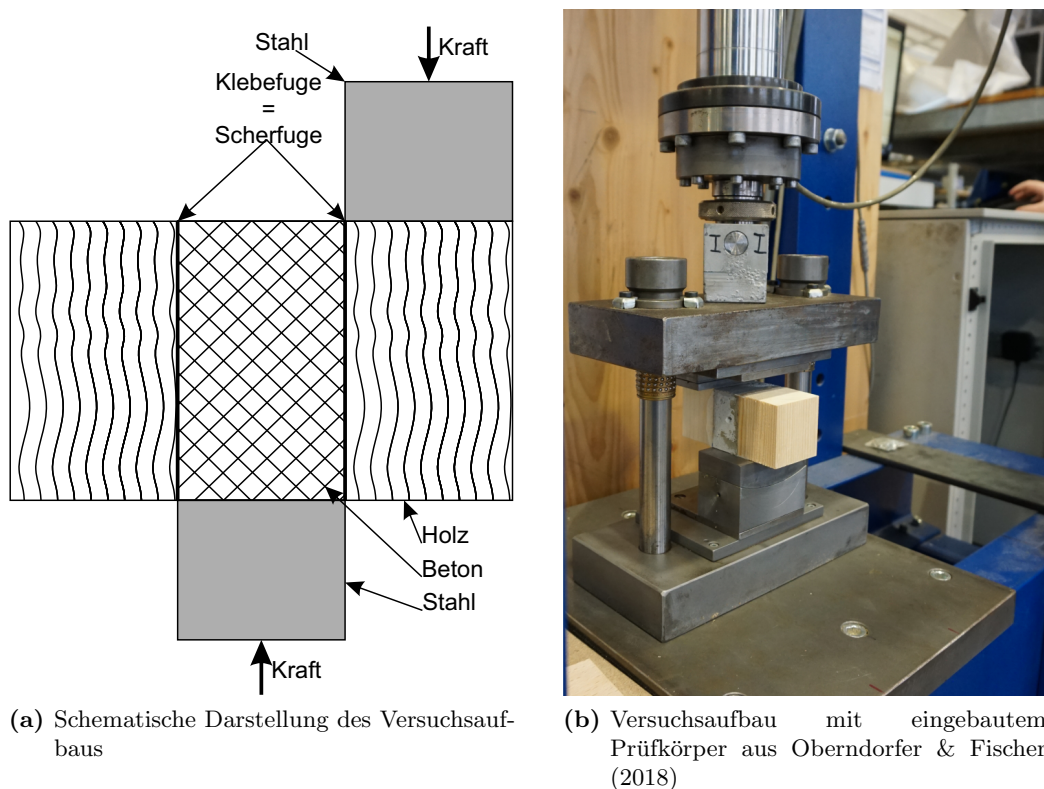


Abbildung 3.1: Versuchsaufbau der Druckscherversuche

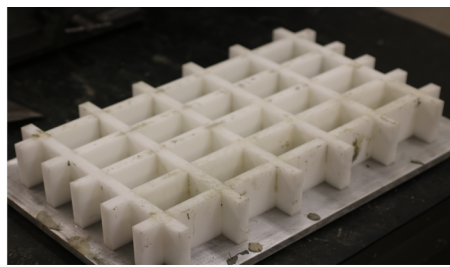
3.2.2 Versuchskörper

Die Versuchskörper waren aus drei Lagen aufgebaut. Eine Lage aus Beton war beidseitig mit Holz verklebt. Die einzelnen Lagen waren jeweils ca. 30 mm stark und die Würfel besaßen die Abmessungen von 50 mm x 50 mm. Die genauen Abmessungen jedes Prüfkörpers sind Anhang A zu entnehmen.

Das verwendete Holz wurde für die Herstellung einzelner Prüfkörper unmittelbar vor dem Verkleben gehobelt und auf Maß geschnitten. Ein Auftrennen größerer Verbundplatten in einzelne Prüfkörper wäre technologisch schwer umsetzbar gewesen und hätte sich auf die Prüfkörper im Hinblick auf einen Wassereintrag in das Holz oder einen Wärmeeintrag in das Holz und die Klebefuge als nachteilig erwiesen. Die Herstellung der Betons für die Prüfkörper erfolgte mit einem Mischer der Firma Hobart sowie einer eigens hergestellten Schalung aus Polyoxymethylen (POM), pro Betonage wurden 20 Betonscheiben hergestellt. Die beiden Vorrichtungen zeigt Abbildung 3.2.



(a) Hobart Mischer



(b) Schalung für Betonscheiben

Abbildung 3.2: Gerätschaften zur Herstellung der Betonscheiben

Vor dem Verkleben der Prüfkörper wurden die Oberflächen der Betonscheiben entweder schalglatt belassen und mit Aceton gereinigt, geschliffen oder sandgestrahlt. In Abbildung 3.3 sind die unterschiedlichen Oberflächen dargestellt. Bei den schalglatten Oberflächen konnte ein Unterschied festgestellt werden, ob die Schalung vor der Betonage eingefettet wurde oder nicht. Abbildung 3.3 zeigt oben rechts eine Oberfläche mit Verwendung von Schalfett, im Vergleich dazu ist oben links die Oberfläche einer ungefetteten Schalung zu sehen. Die Betonscheiben wurden mit einer Probenschleifmaschine der Firma „Form und Test“ geschliffen. Zum Sandstrahlen kam Stahlschlacke mit einer Sieblinie von 0,6 bis 1,4 mm zum Einsatz. Die Strahldüse wurde von Hand geführt. Die Reinigung der mechanisch bearbeiteten Oberflächen erfolgte mit Druckluft sowie Wasser und Bürste.



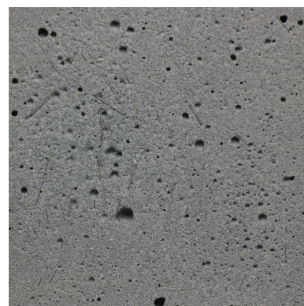
(a) schalglatt, ungefettet



(b) schalglatt, gefettet



(c) geschliffen



(d) sandgestrahlt

Abbildung 3.3: Unterschiedliche Betonoberflächen vor der Verklebung

Die von Hand aufgetragene Klebstoffmenge betrug bei allen Versuchskörpern 400 g/m^2 . Das Pressen der Prüfkörper erfolgte mit hydraulischen Zylindern bei einem Pressdruck von $0,75 \pm 0,1 \text{ N/mm}^2$, welcher mindestens über die Mindestpressdauer gemäß Herstellerangaben konstant gehalten wurde. Abbildung 3.4 zeigt das hydraulische Pressbett beim Pressen von Versuchskörpern.

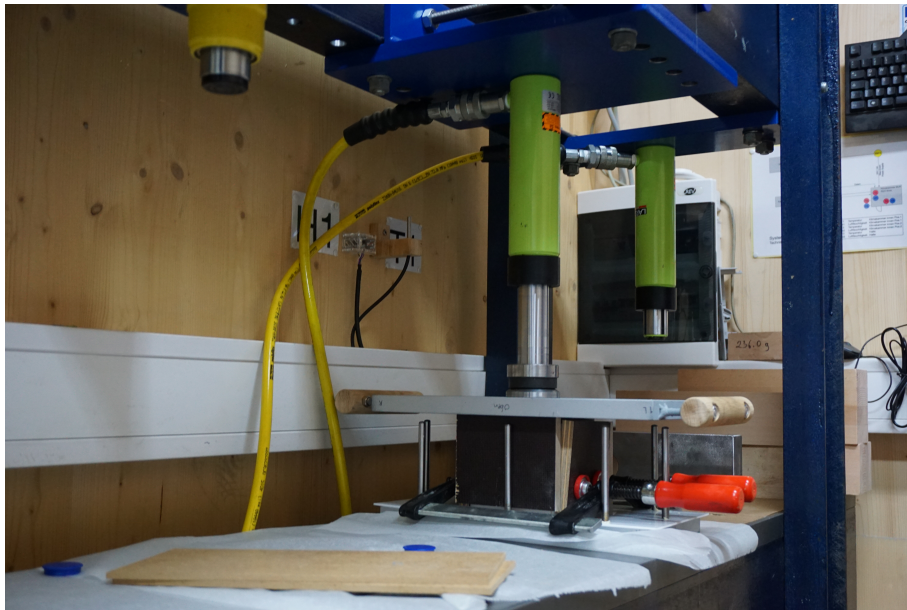


Abbildung 3.4: Herstellung - Aufbringen des erforderlichen Pressdrucks

Pro Serie, d. h. aus jeder Kombination der unterschiedlichen Klebstoffe, Betone und Betonoberflächen, wurden acht Scherflächen untersucht. Insgesamt ergab sich ein Prüfumfang von 38 Serien.

3.2.3 Material

Für die Prüfkörper wurde aus Fichtenholzlamellen der Festigkeitsklasse C24 nach DIN EN 338 fehler- und astfreie Abschnitte mit geradem Faserverlauf ausgekappt. Der Mittelwert der Rohdichte über alle Prüfkörpern gemittelt betrug 413 kg/m^3 bei einer Standardabweichung von 31 kg/m^3 . Die Holzfeuchte, die Jahrringlage und die Jahrringbreite sind Anhang A zu entnehmen.

Insgesamt kamen drei Betone zum Einsatz. Zwei wurden mittels eines Compounds sowie den dazugehörigen Zusatzstoffen hergestellt, die dritte Mischung war eine Labormischung, bei der alle erforderlichen Stoffe von Hand gemischt waren. Es wurden Betone mit und ohne Stahlfasern untersucht. Der Mittelwert (Mw), sowie die Standardabweichung (Std) der Materialeigenschaften für die einzelnen Betone C1 bis C3 können Tabelle 3.1 entnommen

werden. Die Materialeigenschaften wurden an Luft gelagerten Prismen mit Abmessungen von 40 mm x 40 mm x 160 mm bestimmt.

Tabelle 3.1: Festbetoneigenschaften der Druckscherversuche

Beton	Druckfestigkeit		Biegezugfestigkeit	
	[N/mm ²]		[N/mm ²]	
	Mw	Std	Mw	Std
C1 ohne Fasern (C1oF)	112,51	5,01	14,22	0,17
C1 mit Fasern (C1)	150,19	5,29	17,39	1,98
C2 mit Fasern (C2)	245,52	11,64	36,73	0,77
C3 mit Fasern (C3)	217,37	1,13	42,30	2,22

Folgende Klebstoffe wurden hinsichtlich ihrer Eignung untersucht, für jede Klebstoffart kam ein Typ zum Einsatz:

- Ein-Komponenten Polyurethanklebstoff (PU)
- Melamin Urethan Formaldehydharz (MUF)
- Phenolresorcinformaldehydharz (PRF)
- Zwei-Komponenten Polyurethangießharz (PUR)
- Epoxidharz (EP)

3.2.4 Messtechnik

Während des Versuchs zeichnete die Prüfmaschine die aufgebrachte Kraft auf. Das Bruchbild wurde in Anlehnung an DIN EN 14080 Anhang D augenscheinlich bewertet. Neben dem reinen Faserbruchanteil wurde ebenso der Betonbruchanteil und der Klebstoffbruchanteil beurteilt.

3.2.5 Versuchsdurchführung

Die Druckscherversuche in Anlehnung an DIN EN 14080 Anhang D wurden mit einem 50 kN Hydraulikzylinder geregelt und mit einer Geschwindigkeit von 6 mm/min durchgeführt.

3.3 Ergebnisse und Interpretation

3.3.1 Allgemeines und Bezeichnung

Dieser Abschnitt gliedert sich in drei Unterabschnitte. In den Unterabschnitten eins und zwei werden die erzielten Ergebnisse für die mit PU bzw. MUF verklebten Prüfkörper detailliert dargestellt. In Unterabschnitt drei sind in verkürzter Form die Ergebnisse der mit PRF, EP und PUR verklebten Prüfkörper aufgeführt, da es sich hier um Klebstoffe handelt die im Baubereich bereits eingesetzt werden, jedoch keine Standardklebstoffe der Brettsperrholzherstellung sind. Die bei den Versuchsbezeichnungen verwendeten Abkürzungen zeigt Abbildung 3.5.

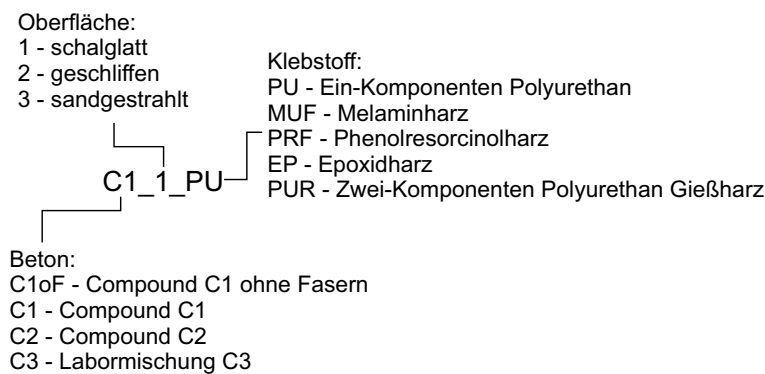


Abbildung 3.5: Versuchsbezeichnung der Scherversuche

3.3.2 Verklebung mit Melamin Urethan Formaldehydharz

Abbildung 3.6 zeigt die Ergebnisse der mit MUF verklebten Prüfkörper. Die Scherfestigkeit ist auf der linken y-Achse in schwarz und der Holzbruchanteil auf der rechten y-Achse in grau aufgetragen. Als Holzbruch wird gewertet, wenn klar ersichtlich Holzfasern auf dem Beton haften. Im Boxplotdiagramm sind das Minimum und das Maximum, das 25 % und 75 % Quantil sowie der Median dargestellt. Links bzw. rechts daneben sind in Punkten die Rohdaten gezeigt. Ein Versuch wird als gut bezeichnet, wenn ein hoher Wert an Holzbruchanteil vorliegt und eine hohe Scherfestigkeit aufweist.

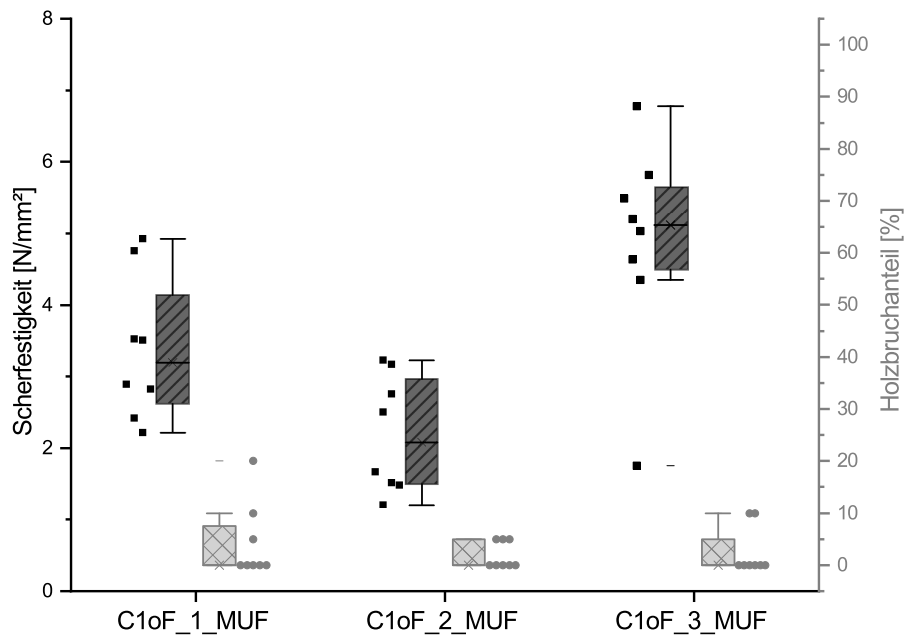


Abbildung 3.6: Scherfestigkeit und Holzbruchanteil der mit Melaminharz und Beton aus Compound 1 ohne Stahlfasern verklebten Prüfkörper für die drei unterschiedlichen Betonoberflächen

Die erreichte Scherfestigkeit liegt bei den Versuchskörpern mit schalglatter und geschliffener Oberfläche zwischen ca. $1,0 \text{ N/mm}^2$ und $5,0 \text{ N/mm}^2$. Bei der sandgestrahlten Oberfläche fällt die Scherfestigkeit im Bereich zwischen $5,0 \text{ N/mm}^2$ und $7,0 \text{ N/mm}^2$ etwas höher aus, jedoch gibt es einen Ausreißer mit $2,0 \text{ N/mm}^2$. Unabhängig von der verwendeten Betonoberfläche beträgt der Holzbruchanteil maximal 20 %, wie beispielsweise in Abbildung 3.7 dargestellt.

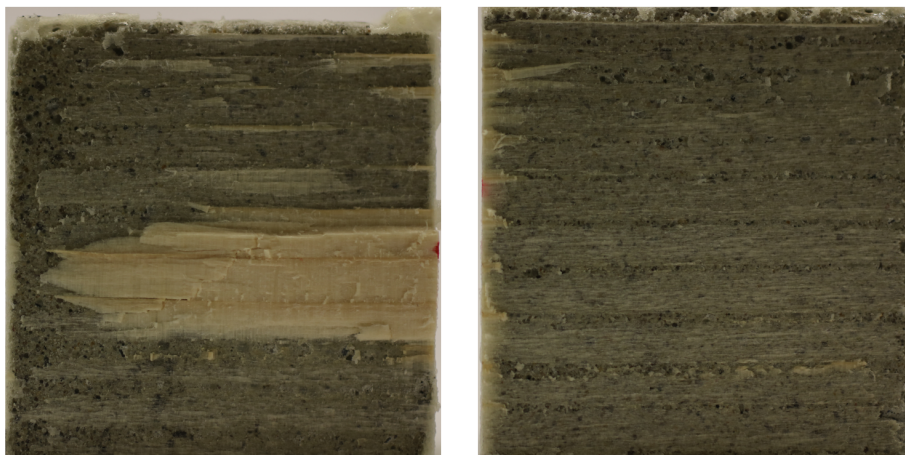


Abbildung 3.7: Zwei beispielhafte Bruchbilder einer Verklebung mit Melaminharz

Das oben gezeigte Verhalten deutet wegen der geringen Scherfestigkeit sowie des geringen Holzbruchanteils auf einen geringen Haftverbund zwischen Klebstoff und Betonober-

fläche hin. Eine mögliche Erklärung hierfür kann sein, dass MUF ein saures Milieu zum Aushärten benötigt und der Beton hoch alkalisch ist (Dunky & Niemz, 2002). Dadurch wird der Aushärtungsprozess des Klebstoffs gestört und es stellt sich eine unzureichende Verbindung mit dem Beton ein. Deshalb wird der MUF in den folgenden Versuchen nicht weiter betrachtet.

3.3.3 Verklebung mit Ein-Komponenten Polyurethanklebstoff

In Abbildung 3.8 sind die erzielten Ergebnisse der Versuche mit einem PU und dem nicht faserverstärkten Beton dargestellt. Die Mediane der erzielten Scherfestigkeit liegen bei ca. $6,5 \text{ N/mm}^2$ bei der schalglatten und der geschliffenen Oberfläche, während bei der sandgestrahlten Oberfläche ein geringfügig niedrigerer Wert erzielt wurde. Die Holzbruchanteile schwanken zwischen 0 % und 100 %, die Mediane liegen im Bereich von 0 % bis etwa 15 %.

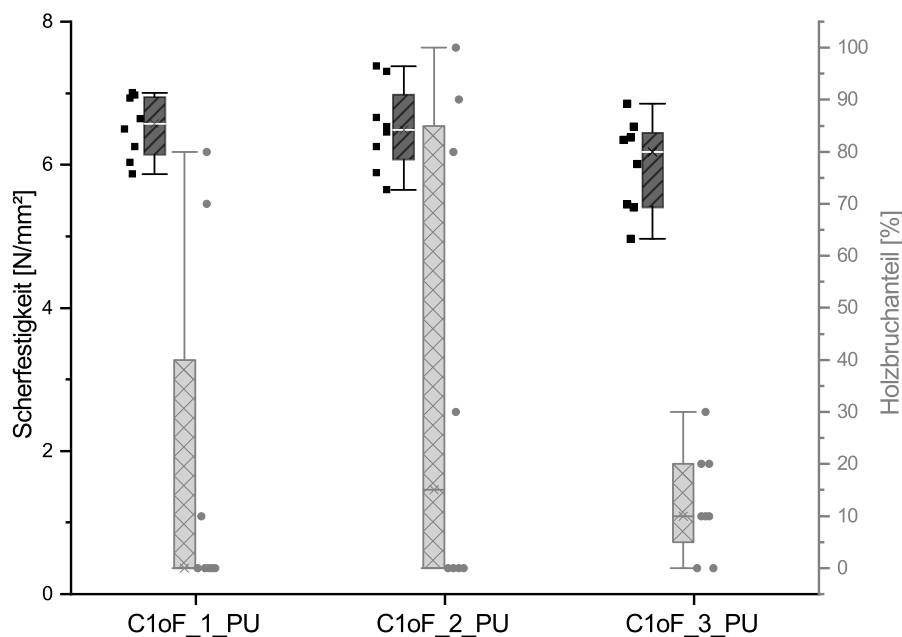


Abbildung 3.8: Scherfestigkeit und Holzbruchanteil der mit Polyurethan und Beton aus Compound 1 ohne Stahlfasern verklebten Prüfkörper für die drei unterschiedlichen Betonoberflächen

Neben Holzausbruch war auch Betonausbruch zu beobachten. Der Mittelwert des Betonausbruchs betrug bei der schalglatten Oberfläche 62,5 % und bei der geschliffenen Oberfläche 56,9 %. Dies ist auch in den dargestellten Bruchbildern in Abbildung 3.9 zu erkennen. Links im Bild ist ein Bruchbild mit einem geschätzten Holzbruchanteil von 70 % und rechts im Bild ein Betonbruchanteil von 60 % zu sehen.

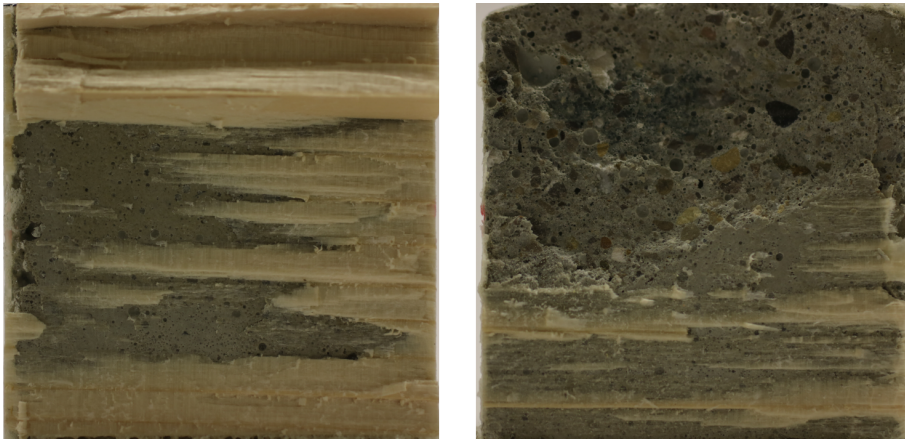


Abbildung 3.9: Zwei beispielhafte Bruchbilder der Kombination aus PU mit nicht faserverstärktem Beton

Die Abbildungen 3.10 und 3.11 zeigen die Versuchsergebnisse mit den faserbewehrten Betonen. Unabhängig vom Beton liegen die Mediane der Scherfestigkeiten bei ca. $9,0 \text{ N/mm}^2$ bei der schalglatten und bei der geschliffenen Oberfläche. Bei der sandgestrahlten Oberfläche liegt der Scherfestigkeitsmedian niedriger, bei ca. $8,0 \text{ N/mm}^2$ bei Beton C1 und ca. $6,0 \text{ N/mm}^2$ bei Beton C2. Die Mediane des Holzbruchanteils liegen bei Beton C1 bei ca. 75 % und bei Beton C2 bei ca. 95 %. Im Vergleich zu Beton C2 ist der Interquantilabstand bei Beton C1 größer. Es zeigt sich, dass der Holzbruchanteil bei den schalglatten Oberflächen kleiner ist und in einem größeren Bereich streut als bei der geschliffenen Oberfläche. Bei den sandgestrahlten Oberflächen stellt sich ein Holzbruchanteil von 35 % bei Beton C1 und von 50 % bei Beton C2 ein. Ebenso schwanken hier die Einzelwerte in einem Bereich zwischen 0 % und 100 %.

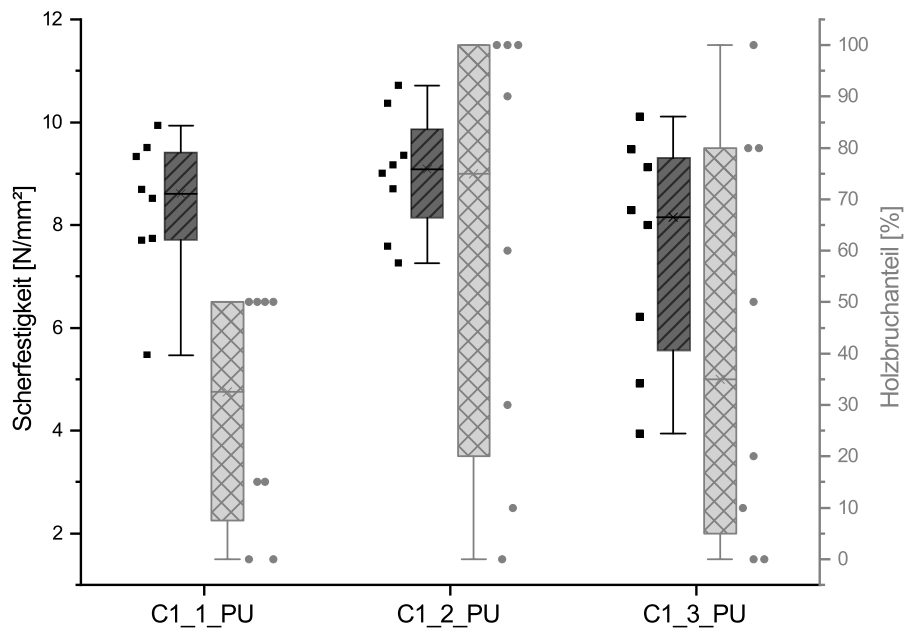


Abbildung 3.10: Versuchsergebnisse Ein-Komponenten Polyurethanklebstoff mit Beton C1 für unterschiedliche Betonoberflächen

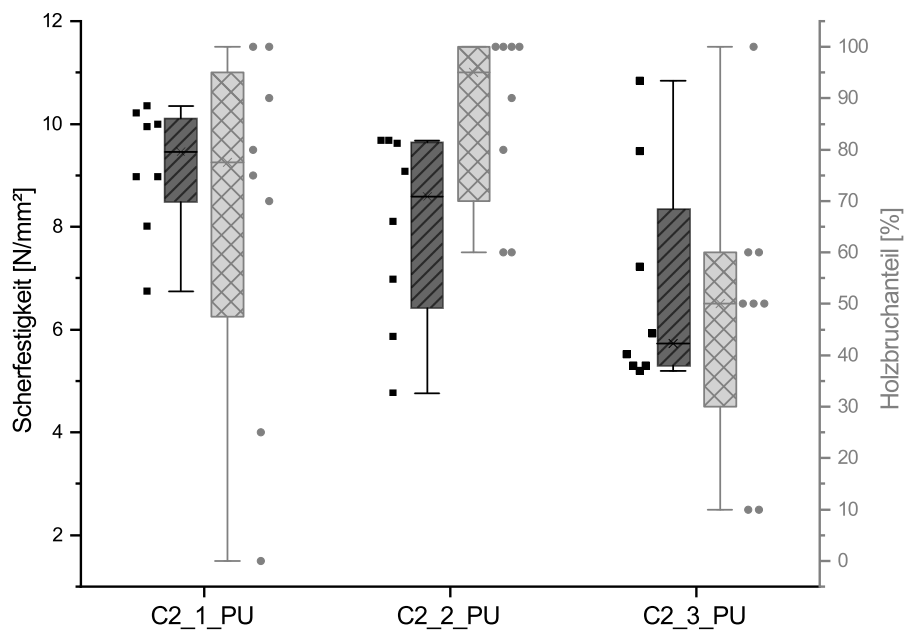


Abbildung 3.11: Versuchsergebnisse Ein-Komponenten Polyurethanklebstoff mit Beton C2 für unterschiedliche Betonoberflächen

Eine mögliche Erklärung für die im Vergleich zur schalglatten und geschliffenen Oberfläche geringen Scherfestigkeit in Kombination mit den geringen Holzbruchanteilen bei der sandgestrahlten Oberfläche ist, dass die Rautiefen nach dem Sandstrahlen die zulässigen Klebefugen-

dicken überschreiten und der Klebstoff aus diesem Grund keinen ausreichenden Haftverbund mehr ausbilden kann.

3.3.4 Verklebung mit Phenolresorcinaldehydharz, Epoxidharz und Zweikomponenten Polyurethangießharz

Tabelle 3.2 führt den Median der Scherfestigkeit in $[N/mm^2]$ und des Holzbruchanteils in $[%]$ für die mit PRF, EP und PUR verklebten Prüfkörper für die unterschiedlichen Betone und Betonoberflächen auf. PRF scheint sich nicht zur Verklebung von Holz und ultrahochfestem Beton zu eignen, was sich an den niedrigen Scherfestigkeiten und geringen Holzbruchanteilen zeigt. Ähnliches wird auch von Schäfers (2010) berichtet. Bei der Verklebung mit EP konnten gute Ergebnisse, mit Scherfestigkeiten um $8,0 N/mm^2$ und Holzbruchanteilen zwischen 45% und 80% erzielt werden. Hier scheint sich Beton C1 unabhängig von der verwendeten Betonoberfläche besser zu eignen als Beton C2. Die mit PUR verklebten Prüfkörper erzielten Scherfestigkeiten von bis zu $9,1 N/mm^2$ bei einem Holzbruchanteil zwischen 30% und 82,5%. Auch dieser Klebstoff scheint für eine Verklebung von Holz und Beton geeignet zu sein. Die Ergebnisse sind in Anhang A als Boxplot Diagramme dargestellt, ebenso wie die expliziten Versuchsdaten.

Tabelle 3.2: Median der Scherfestigkeit (SF) $[N/mm^2]$ und des Holzbruchanteils (HB) $[%]$ für mit PRF, EP und PUR verklebte Prüfkörper

Klebstoff	Beton	Oberfläche					
		schalglatt		geschliffen		sandgestrahlt	
		SF	HB	SF	HB	SF	HB
PRF	C1 ohne Fasern	5,9	10,0	6,6	40,0	7,0	22,5
	C3	4,6	10,0	7,5	27,5	5,1	10,0
EP	C1	9,5	60,0	8,8	80,0	8,8	67,5
	C2	7,3	45,0	8,1	67,5	8,0	55,0
PUR	C1	9,1	70,0	9,0	45,0	8,5	30,0
	C2	9,0	65,0	8,8	82,5	8,5	50,0

3.4 Zwischenfazit

Für die Verklebung von Holz mit UHFB scheint sich MUF nicht zu eignen, was in den sehr niedrigen Scherfestigkeiten und Holzbruchanteilen begründet ist. Damit wird dieses Klebstoffsystem, dass für die Herstellung von Brettsperrholz zugelassen und industriellen Maßstab angewendet wird, bei den weiteren Untersuchungen nicht weiter betrachtet. Mit dem PU-Klebstoffsystem konnten zufriedenstellende Scherfestigkeiten und Holzbruchanteile erzielt werden. Dieses zugelassene Klebstoffsystem, das im industriellen Maßstab für die Herstellung von BSP eine breite Verwendung findet, wirkt besonders gut bei geschliffenen Oberflächen. Bei schalglatten und gereinigten Oberflächen können die erzielten Ergebnisse sehr schwanken. Die hier eingesetzten sandgestrahlten Oberflächen zeigten im Vergleich zu den beiden anderen Oberflächen schlechtere Ergebnisse. Aus diesen Gründen wurden die weiteren Untersuchungen mit einem PU, mit den Betonen C1 und C2 mit schalglatter und geschliffener Oberfläche durchgeführt. Der zugelassene PRF-Klebstoff, der für die Brettsperrholzherstellung kaum Anwendung findet, zeigt bei mittleren Scherfestigkeiten geringe Holzbruchanteile, daher wird dieses Klebstoffsystem aus den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Die beiden Gießharzsysteme EP und PUR werden auf Grundlage der guten Scherfestigkeiten in Verbindung mit hohen Holzbruchanteilen bei den Delaminierungsversuchen mit betrachtet. Für die Herstellung von Wandbauteilen werden diese Klebstoffsysteme jedoch nicht weiter betrachtet, da dies zusätzliche Bearbeitungsschritte erfordern würde, was der Zielsetzung der Arbeit entgegen steht.

4 Delaminierungsversuche

4.1 Allgemeines

Hauptaugenmerk dieses Forschungsprojektes lag auf der Machbarkeit und dem kurzzeitigen Tragverhalten von Wandbauteilen mit zusammengesetztem Querschnitt. Mittels Delaminierungsversuchen sollte zu einem frühen Projektzeitpunkt untersucht werden, ob mit den in Frage kommenden Klebstoffsystemen auch eine dauerhafte Verklebung von Holz und Beton möglich ist. Hierbei wird im Holz ein Feuchtegefälle erzeugt, was zu Zugspannung senkrecht zur Klebefuge führt. Bei ungenügendem Haftverbund der Verklebung tritt Delaminierung auf und die Schichten lösen sich teilweise voneinander. Diese Versuche stellen aufgrund des geringen Probenumfangs nur Tastversuche dar und können lediglich Tendenzen aufzeigen.

4.2 Material und Methoden

4.2.1 Versuchsaufbau

Da der Aufbau von herkömmlichen Brettsper Holz hier als Grundlage zu verstehen ist, sollten sich die Prüfverfahren wesentlich an dem in DIN EN 16351 beschriebenen Verfahren orientieren. Für die Delaminierungsprüfung ist dies das Verfahren nach Anhang A in DIN EN 16351. Das dort beschriebene Verfahren kann aber nicht bedenkenlos angewendet werden, insbesondere, weil bei der Wässerungsphase mit Über- und Unterdruck gearbeitet wird. Es besteht die Gefahr, dass auf Grund der sehr dichten Gefügestruktur des Betons, dieser durch die sehr starken Druckwechsel Schaden nehmen und das Resultat verfälschen würde. Dazu wurde für die Wässerungsphase das alternativ für die Delaminierungsprüfungen für Keilzinken nach DIN EN 14080 Anhang B.3 oder DIN EN 301 Anhang A verwendete Verfahren angewendet.

Der Versuchsaufbau für die Delaminierungsversuche bestand aus drei Teilen. Zum einen aus zwei Wasserbädern, eines davon brachte Wasser zum Kochen und hielt die Wassertemperatur aufrecht, das andere Wasserbad war mit 20° C kaltem Wasser gefüllt. Zum anderen aus einem

Ofen zum Trocknen der Prüfkörper bei dem die Temperatur und die Luftzirkulation geregelt werden konnte.

4.2.2 Versuchskörper

Die dreilagig aufgebauten Prüfkörper mit Abmessungen von 10 cm x 10 cm sind in Abbildung 4.1 zu sehen. Die 30 mm dicken Betonscheiben wurden aus größeren Betonlamellen, welche in einer Stahlschalung hergestellt waren, herausgetrennt. Das aufgeklebte Holz hatte eine Dicke von ca. 40 mm. Die genauen Prüfkörperabmessungen sind in Anhang B aufgeführt. Die Oberflächenbehandlung von Holz und Beton sowie die Verklebung war affin zu den Scherversuchen, siehe Abschnitt 3.2.2. Die sandgestrahlte Betonoberfläche wurde auf Grund der Erkenntnisse aus den Scherversuchen nicht weiter untersucht. Nach dem Verkleben betrug die Aushärtedauer bei allen Prüfkörpern ca. 14 Tage, bevor die Prüfkörper weiter bearbeitet wurden. Damit die Hirnholzflächen wie in Abbildung 4.1 gut zu erkennen waren, wurden alle Flächen von Hand mit einem Trennschleifer geschliffen. Die Prüfkörperbezeichnung ist analog zu den Scherversuchen. Die letzte Ziffer gibt an, um welchen Prüfkörper es sich handelt. Pro Kombination aus Beton, Klebstoff und Oberfläche wurden 2 Prüfkörper geprüft, es ergeben sich pro Serie 4 Klebefugen.



Abbildung 4.1: Prüfkörper Delaminierungsversuche

4.2.3 Material

Die Festbetoneigenschaften, Mittelwert (Mw) und Standardabweichung (Std) der verwendeten Betone C1 und C2 sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Tabelle 4.1: Festbetoneigenschaften Delaminierungsversuche

	Druckfestigkeit		Biegezugfestigkeit	
	[N/mm ²]		[N/mm ²]	
Beton	Mw	Std	Mw	Std
C1	132,9	8,3	16,2	2,0
C2	238,9	7,8	31,3	3,4

Für die Prüfkörper wurde aus, unter Normklima gelagerten, Lamellen der Festigkeitsklasse C24 nach DIN EN 338 fehler- und astfreie Abschnitte mit geradem Faserverlauf ausgekappt. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse aus den Scherversuchen wurde ein PU, ein PUR sowie ein EP untersucht.

4.2.4 Messtechnik

Als Messtechnik wurden eine Waage, zum Wiegen der Prüfkörper während des Trocknens, sowie ein Stahllineal, zum Aufzeichnen der Länge der Fugenöffnungen, verwendet.

4.2.5 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgte in Anlehnung an DIN EN 301 Anhang A. Die Prüfkörper kochten sechs Stunden in Wasser, lagerten eine Stunde in 20° C kaltem Wasser und wurden anschließend in einem Ofen bei einer Temperatur von 60 ± 3° C getrocknet. Normgerecht sind die Prüfkörper auf eine Holzfeuchte von 19 %, mindestens jedoch 18 Stunden zu trocknen. Anhand der gewogenen Prüfkörper wurde auf die Holzfeuchte zurückgeschlossen. Das Zielgewicht bei 19 % Holzfeuchte ergab sich nach Gleichung 4.1, wobei das Gewicht des Klebstoffs unberücksichtigt blieb und die Masse des Betons als konstant betrachtet wurde. Grundlage für die Berechnung war die Annahme, dass das Holz vor dem Verkleben eine Holzfeuchte von 12 % besaß.

$$m_{Ziel} = \frac{m_{Pruefk.} - m_{Beton}}{1,12} \cdot 1,19 + m_{Beton} \quad (4.1)$$

mit:

m_{Ziel}	Zielgewicht nach dem Trocknen
$m_{Pruefk.}$	Gewicht des Prüfkörpers vor der Versuchsdurchführung bei 12 % Holzfeuchte
m_{Beton}	Gewicht des Betons

Die Prüfkörper trockneten im Ofen und wurden anschließend gewogen. Besaßen diese ein geringeres Gewicht als das Zielgewicht bei 19 % Holzfeuchte endete der Trocknungsvorgang, unabhängig von der Dauer. Das Anzeichnen von Fugenöffnungen fand unmittelbar im Anschluss statt, dabei wurden die Kriterien in Anlehnung an DIN EN 16351 Anhang A angewendet.

4.3 Ergebnisse und Interpretation

Die Trocknungsdauer der Prüfkörper im Ofen betrug ca. 16 Stunden, die minimale Trocknungsdauer von 18 Stunden wurde wegen der deutlichen Unterschreitung der Zielfeuchte nicht berücksichtigt. Das anschließende Wiegen ergab, dass das Gewicht der Prüfkörper unter dem Ausgangsgewicht lag. Der Trocknungsvorgang wurde beendet und die Fugenöffnungen angezeichnet. Damit ließ sich die Delaminierung in [%] bezogen auf die Fugenlänge nach Gleichung 4.2 berechnen (DIN EN 16351).

$$D = \frac{l_1}{l_2} \cdot 100 \quad (4.2)$$

mit:

D	Delaminierung [%]
l_1	Gesamtlänge der Fugenöffnung [mm]
l_2	Gesamtlänge der Fuge [mm]

Die Abbildungen 4.2 und 4.3 zeigen die Ergebnisse der mit PU verklebten Prüfkörper mit Beton C1 und C2. In den Diagrammen sind der Minimal- und Maximalwert sowie der Mittelwert und rechts daneben die Verteilung der Rohdaten dargestellt. Als Rohdaten sind die Prozentsätze der Delaminierung für jede einzelne der vier Fugen eines Prüfkörpers bezeichnet. Bei den Versuchen mit Beton C1 liegen die Mittelwerte der Delaminierung bei der schalglatten Oberfläche für die zwei Prüfkörper bei 29,1 % und 48,2 %. Hingegen sind die Mittelwerte bei der geschliffenen Oberfläche mit 1,3 % und 9,2 % deutlich geringer. Ebenfalls ist bei der geschliffenen Oberfläche die Streuung zwischen den Extremalwerten deutlich geringer. Die Mittelwerte der Delaminierung schwanken bei den Versuchen mit Beton C2 in einem Bereich, zwischen 20,3 % und 58,3 %. Bei Beton C2 ist jedoch die Streuung der einzelnen Ergebnisse größer als bei den Versuchen mit Beton C1. So liegen die Extrema bei Beton C2 meist bei 0 % am unteren Rand oder 100 % am oberen Rand. Lediglich Versuch C2_1_PU_1 besitzt mit ca. 45 % Delaminierung ein verhältnismäßig geringen Maximalwert.

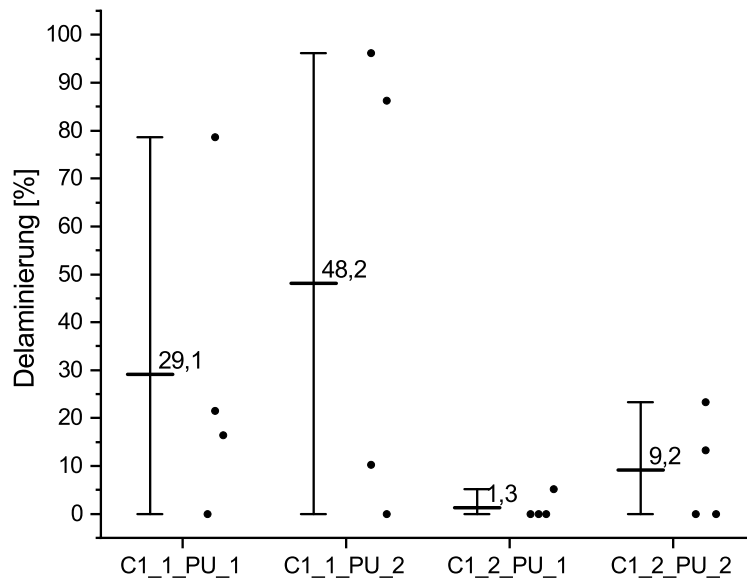


Abbildung 4.2: Ergebnisse Beton C1 mit PU-Klebstoff für die zwei verwendeten Betonoberflächenbehandlungen

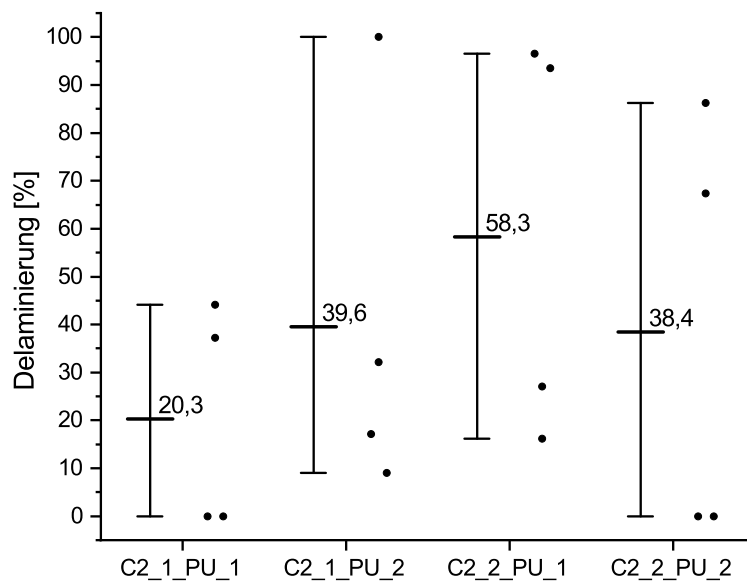


Abbildung 4.3: Ergebnisse Beton C2 mit PU-Klebstoff für die zwei verwendeten Betonoberflächenbehandlungen

Abbildung 4.4 zeigt die Klebefugen der geprüften Körper aus Beton C1 mit schalglatte Oberfläche und verklebt mit PU. Zu erkennen ist, dass sich die zwei Seiten eines Prüfkörpers unabhängig voneinander verhalten können. Das äußerte sich dadurch, dass die Fuge auf einer Seite des Prüfkörpers vollständig geöffnet sein konnte, während hingegen bei der gleichen Fuge auf der anderen Seite des Prüfkörpers keine Fugenöffnung auftrat.



(a) Prüfkörper 1, Seite 1



(b) Prüfkörper 2, Seite 1



(c) Prüfkörper 1, Seite 2



(d) Prüfkörper 2, Seite 2

Abbildung 4.4: Prüfkörper aus Beton C1 mit schalglatter Betonoberfläche verklebt mit PU nach dem Trocknungsvorgang

Bei den Versuchen mit dem PUR Klebstoff öffnete sich bei den meisten Prüfkörpern bereits nach mehreren Stunden im kochenden Wasser die Fuge vollständig und die drei Schichten lagen einzeln vor. Die Verklebung mit Epoxidharz lieferte im Vergleich hierzu bessere Ergebnisse. Mit der geschliffenen Oberfläche konnten bei der Verklebung mit Epoxidharz geringere Werte der Delaminierung erzielt werden als bei der schalglatten Oberfläche. Die Ergebnisse sind an dieser Stelle kurz aufgeführt, da es sich hierbei jedoch um Klebstoffe handelt, die nicht standardmäßig in der Brettsperrholzherstellung verwendet werden, sind die Ergebnisse detailliert Anhang B zu entnehmen.

4.4 Zwischenfazit

Bei diesen Untersuchungen zeigten sich deutliche Unterschiede bei den verwendeten Klebstoffen und Betonen. Insbesondere erscheint die Verwendung von Beton C1 mit einer geschliffenen Oberfläche in Kombination mit einem PU vielversprechend. In Verbindung mit der Einschätzung aus Abschnitt 3.4 wird für die Herstellung von Wandbauteilen und für weitere Untersuchungen lediglich das PU-Klebstoffsystem Anwendung finden.

5 Verbundversuche

5.1 Allgemeines

Die in Kapitel 3 beschriebenen kleinformatischen Scherversuche dienten dazu, die grundsätzliche Verklebungseignung von Beton, Holz und Klebstoffen, sowie die Machbarkeit der Verklebung, zu untersuchen. Bei der Herstellung kleinformatischer Prüfkörper kann es zu prozesstechnischen Ungenauigkeiten in der Ausbildung der Klebfuge, insbesondere der Klebfugendicke, kommen. Um den Einfluss prozesstechnischer Ungenauigkeiten zu reduzieren und um das Verbindungsverhalten selbst zu untersuchen wurden die hier beschriebenen Verbundversuche mit größerer Klebefugenlänge durchgeführt. Wie Abbildung 5.1 zeigt, ist das Verbindungsverhalten einzelner Teilquerschnitte eines zusammengesetzten Bauteils, sowohl für die Spannungsverteilung in jedem Teilquerschnitt, als auch für die Steifigkeitseigenschaften des Gesamtbauteils, von Bedeutung. Bei starrem Verbund der einzelnen Teilquerschnitte verhält sich der Gesamtquerschnitt homogen und es tritt keine Relativverschiebung zwischen den einzelnen Teilquerschnitten auf. Ist hingegen kein Verbund vorhanden, wirkt jeder Teilquerschnitt für sich selbst und es tritt, insbesondere an den Rändern, eine große Relativverschiebung auf. Der nachgiebige Verbund stellt eine Mischlösung dar. In Abhängigkeit der Verbindungssteifigkeit bildet sich die Spannungsverteilung in den einzelnen Teilquerschnitten aus und an den Rändern tritt eine Relativverschiebung auf.

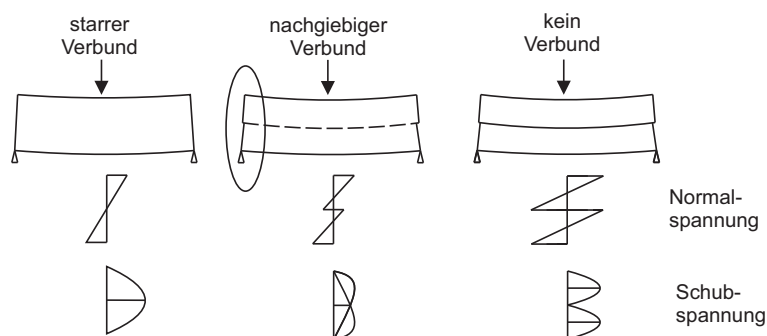


Abbildung 5.1: Auswirkung des Verbunds auf die Spannungsverteilung nach Winter *et al.* (2008)

5.2 Material und Methoden

5.2.1 Versuchsaufbau

Das Verbindungsverhalten und die Eignung größerer Verklebungslängen wurde in Anlehnung an DIN EN 408 mit um 14° geneigten Druckscherversuchen untersucht. Den dazugehörigen Versuchsaufbau zeigt Abbildung 5.2. Hierzu waren zwei Stahlplatten in einer Standardprüfmaschine befestigt, die untere war mit einem Stahlprofil versehen, welches sicherstellte, dass die Prüfkörper immer gleich eingebaut waren. Ein auf den Prüfkörper aufgesetzter Stahlschuh glich die Neigung aus und leitete die Kraft in den Prüfkörper ein.

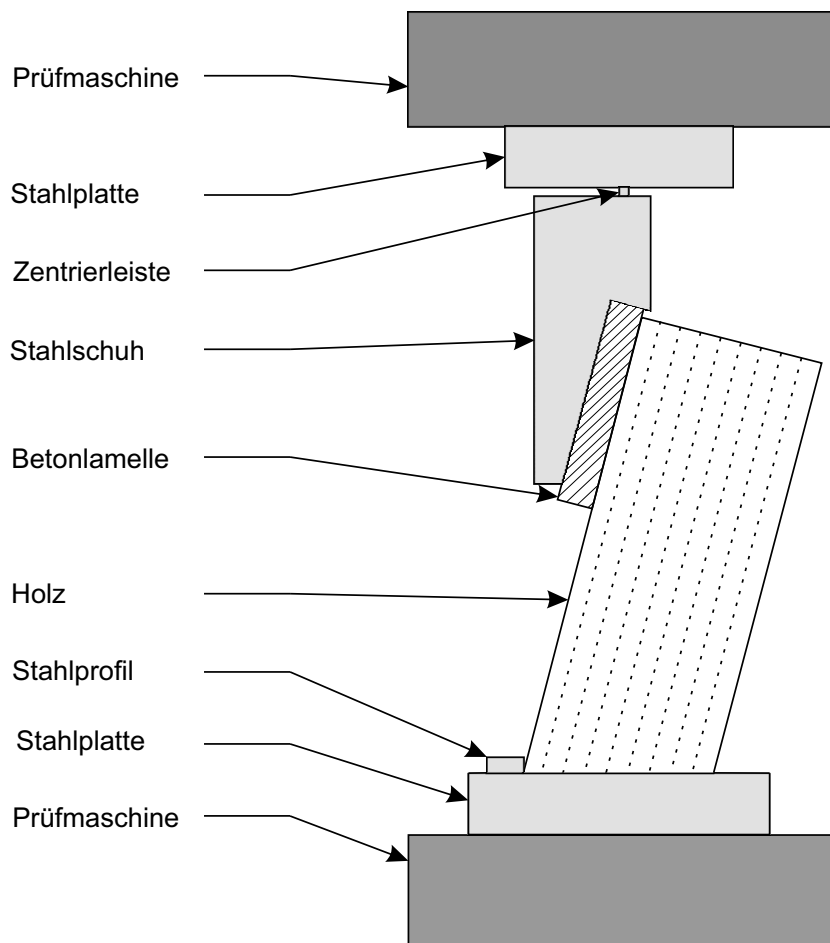


Abbildung 5.2: Schematischer Versuchsaufbau der Verbundversuche

Eine Zentrierleiste diente dazu die aufgebrachte Kraft durch den Schwerpunkt der Klebefuge zu leiten. Damit sollten Querkzugspannungen an der Klebefuge weitestgehend vermieden werden. Die Position der Zentrierleiste ergab sich in Abhängigkeit der untersuchten Klebefugenlänge. Für die hier gewählten Klebefugenlängen sind die unterschiedlichen Positionen der Zentrierleiste in Abbildung 5.3 dargestellt.

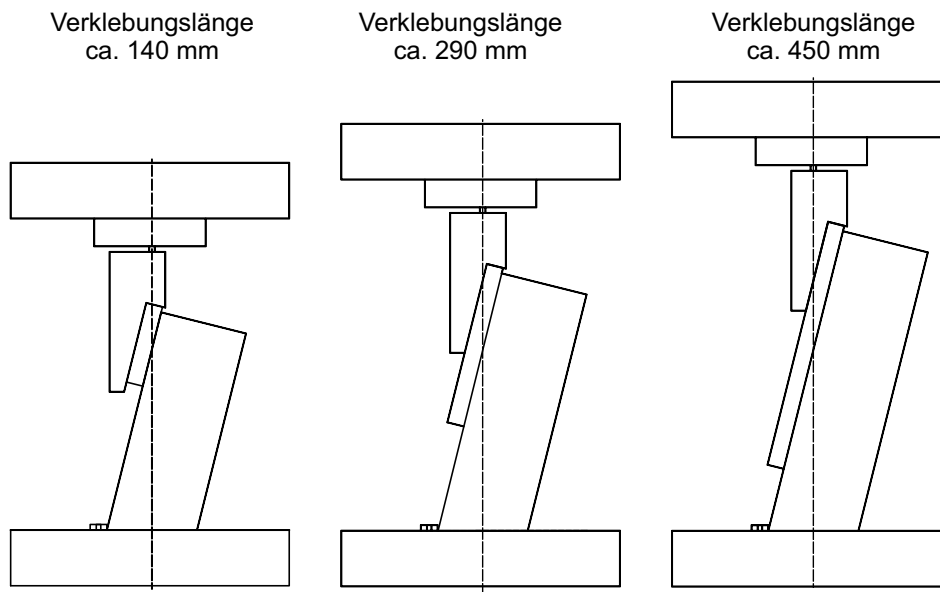


Abbildung 5.3: Anordnung der Zentrierleiste bei den Verbundversuchen

5.2.2 Versuchskörper

Die Versuchskörper bestanden aus Brett-schichtholz mit Querschnittsabmessungen von 10 cm x 16 cm und einer aufgeklebten Betonscheibe, die einen Zentimeter über das Brett-schichtholz überstand. Die Abmessungen der Betonscheiben betrugen 10 cm x 3 cm. Die Länge des Brett-schichtholzes und der Betonscheibe variierten in Abhängigkeit der Verklebungslänge. Die Verklebungslängen betrugen ca. 140 mm, 290 mm und 450 mm. Pro Verklebungslänge und Betonoberflächenbehandlung wurden drei Versuchskörper hergestellt und geprüft.

Die Herstellung der Betonscheiben erfolgte mit einer Stahlschalung um eine hohe Präzision und Ebenheit der Flächen zu erzielen. Vor dem Verkleben der Betonscheiben wurden deren Oberflächen entweder schalglatt belassen und mit Aceton abgerieben oder geschliffen und mit Druckluft sowie Wasser und Bürste gereinigt. Das Brett-schichtholz wurde unmittelbar vor dem Verkleben gehobelt. Als Klebstoff kam bei allen Versuchen ein PU, der bei den Scher- und Delaminierungsversuchen vielversprechende Ergebnisse lieferte, zum Einsatz. Der Klebstoffauftrag betrug 400 g/m^2 und der Pressdruck $0,75 \pm 0,1 \text{ N/mm}^2$. Überschüssiger und ausgetretener Klebstoff wurde nach dem Aushärten mechanisch entfernt.

5.2.3 Material

Von dem im Fachhandel bezogenen Fichtenbrett-schichtholz der Festigkeitsklasse GL24c gemäß DIN EN 14080 wurden möglichst fehler- und astfreie Bereiche verwendet. Die Holzeigenschaften wurden nicht versuchstechnisch bestimmt, sondern die jeweilige normativ vorgeschriebene charakteristische Festigkeit herangezogen. Gemäß DIN EN 14080 müssen

die Randlamellen des kombiniert aufgebauten Brettschichtholz die Anforderungen der Festigkeitsklasse C24 nach DIN EN 338 erfüllen und besitzen demnach eine charakteristische Schubfestigkeit in Faserrichtung von $4,0 \text{ N/mm}^2$.

Die Betonscheiben waren aus Beton mit einer über alle Versuche gemittelten Druckfestigkeit von $140,5 \text{ N/mm}^2$ und einer Biegezugfestigkeit von $16,6 \text{ N/mm}^2$ hergestellt. Die Bestimmung der Betonfestigkeit fand kurz nach den durchgeführten Verbundversuchen an Prismen mit den Abmessungen $160 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ statt. Prismen als auch Betonscheiben wurden während des Erhärtens bei den gleichen konstanten Klimabedingungen gelagert.

5.2.4 Messtechnik

Als Messtechnik kam ein optisches Messsystem und redundant induktive Wegaufnehmer und Dehnmessstreifen (DMS) zum Einsatz. Insgesamt waren vier Wegaufnehmer am Holz angebracht. Diese waren auf beiden Seiten des Prüfkörpers jeweils am Anfang und am Ende der Klebeverbindung angeordnet. Ein am Beton aufgeklebter Winkel diente als Festpunkt für den jeweiligen Wegaufnehmer. Die Dehnung im Beton wurde mit DMS aufgezeichnet. Unabhängig von der Klebefugenlänge zeichneten drei über die Klebefugenlänge verteilte DMS die Dehnungen im Beton auf. An jedem ersten Versuchskörper einer Serie waren über die Dicke der Betonscheiben zwei Reihen DMS angeordnet, an den weiteren Versuchskörpern einer Serie nur die untere Reihe. Abbildung 5.4 links zeigt die Position der oben beschriebenen Messtechnik.

Das optische Messsystem zeichnete entlang der Klebefuge Punktbewegungen von aufgeklebten Messpunkten auf. Der Abstand der Messpunkte zur Klebefuge betrug ca. 5 mm auf dem Holz und dem Beton. Zusätzlich war eine weitere Reihe an Messpunkten auf dem Beton im Abstand von ca. 25 mm zur Klebefuge angeordnet. Der Punktabstand entlang der Klebefuge betrug ca. 2 cm . Ein Kamerasystem zeichnete die gesamte Versuchsdurchführung auf und darauf aufbauend konnte mittels digitaler Bildkorrelation die Bewegungen jedes Messpunktes berechnet werden. Hiermit wurden die Verschiebungen und Dehnungen an den jeweiligen Stellen berechnet.

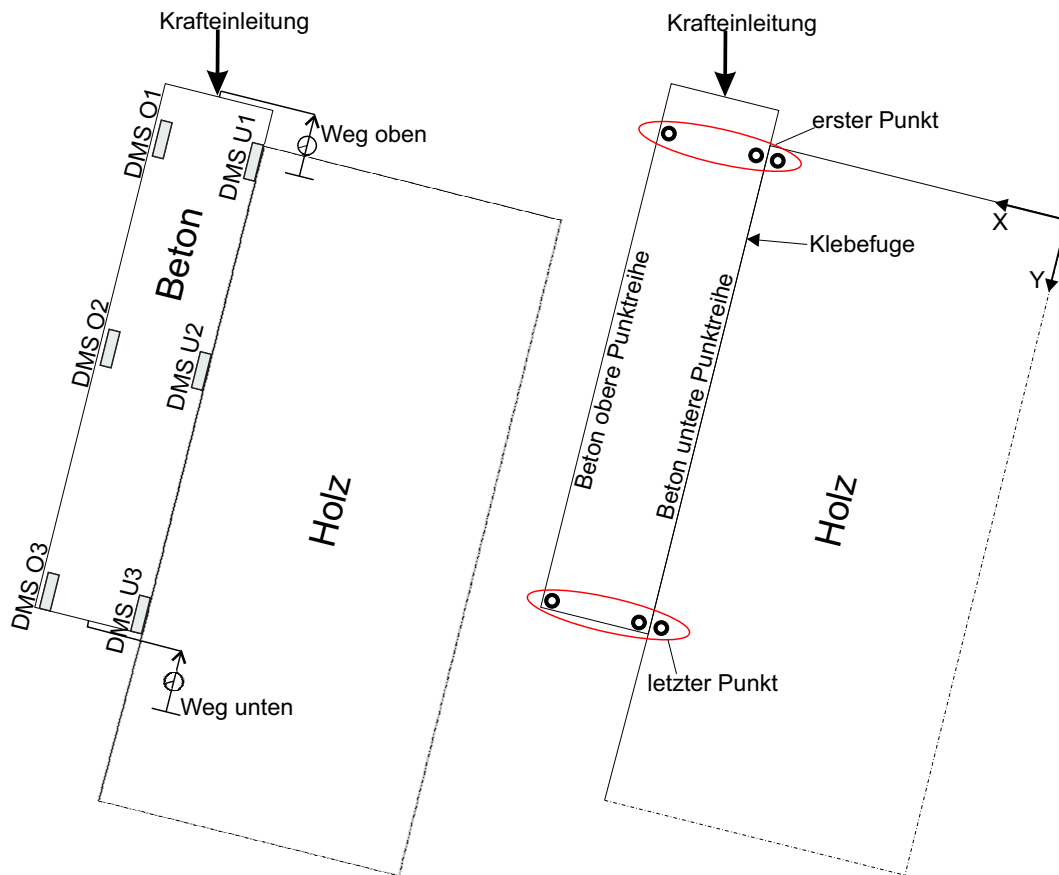


Abbildung 5.4: Anordnung der Messtechnik bei den Verbundversuchen, konventionelle Messtechnik links, optische Messtechnik rechts

5.2.5 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden in einer Standardprüfmaschine mit 600 kN Maximalkraft mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/min lagegeregelt bis zum Versagen gefahren. Die nach dem Einbau der Prüfkörper aufgebrachte Vorkraft betrug 3 kN, anschließend wurde die Messtechnik tariert und der Versuch gestartet.

5.3 Ergebnisse und Interpretation

Bezeichnung

Die Schematik zur Bezeichnung der Versuchskörper zeigt Abbildung 5.5.

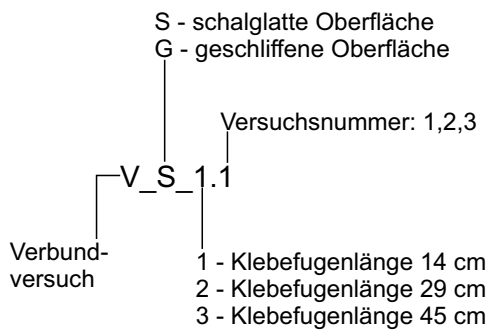


Abbildung 5.5: Versuchskörperbezeichnung der Verbundversuche

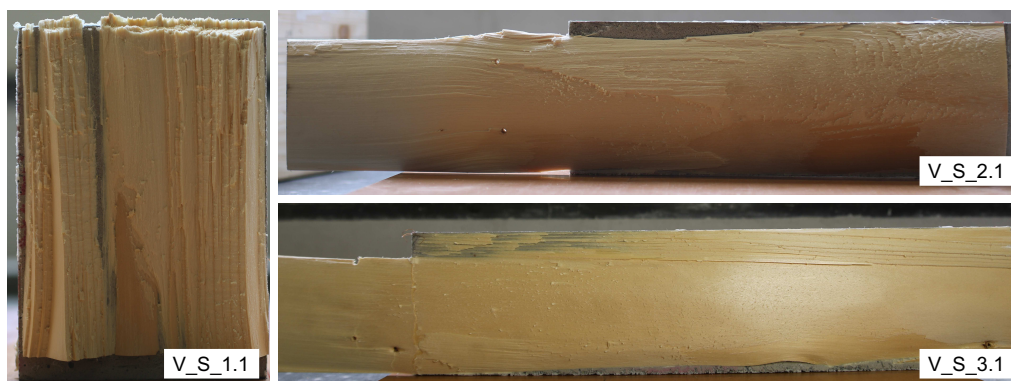
Bruchlasten und Bruchbilder

Tabelle 5.1 führt die Bruchlasten aller Verbundversuche auf. Als Bruchlast ist hier die Maschinenkraft angegeben, bei der das Versagen eintrat. Der Mittelwert der Bruchlasten für die Versuche mit einer Verklebungslänge von ca. 140 mm beträgt bei der schalglatten Oberfläche 91,6 kN und bei der geschliffenen Oberfläche 79,5 kN. Bei dieser Verklebungslänge ist jedoch in jeder Serie jeweils ein Versuchskörper als Ausreißer zu betrachten. Mit zunehmender Verklebungslänge steigt die Bruchkraft mit an und beträgt im Mittel bei den Versuchen mit 450 mm Verklebungslänge 211,6 kN bei der schalglatten und 223,8 kN bei der geschliffenen Oberfläche.

Tabelle 5.1: Erzielte Bruchlasten bei den Verbundversuchen

Verklebungslänge [mm]	Versuchskörper	Bruchlasten	
		[kN]	
		schalglatte Oberfläche	geschliffene Oberfläche
140	1	118,1	103,8
	2	58,9	50,0
	3	97,9	84,6
290	1	120,5	137,5
	2	158,5	154,4
	3	126,1	198,0
450	1	221,0	234,2
	2	196,5	252,6
	3	217,3	184,6

Das Versagen trat, außer bei zwei Versuchen, im Holz auf. Abbildung 5.6 zeigt charakteristische Bruchbilder der unterschiedlichen Verklebungslängen. Bei den Versuchen mit 140 mm Klebefugenlänge versagte das Holz unmittelbar im Bereich unterhalb der Klebefuge. Bei den Klebefugenlängen von 290 mm und 450 mm scherte überwiegend der gesamte Holzquerschnitt ab.

**Abbildung 5.6:** Versuchskörper nach Versuchsdurchführung

Die zwei Versuche V_S.1.2 und V_G.1.2 versagten im Vergleich zu den anderen Versuchen mit gleicher Klebefugenlänge bei deutlich geringerer Bruchlast. Bei Versuch V_G.1.2 lag die

Bruchlast bei 50,0 kN und bei Versuch V_S.1.2 bei 58,9 kN. Die Bruchbilder der beiden Versuche zeigt Abbildung 5.7. Bei Versuch V_S.1.2 ist ein sehr geringer Anteil an Holzbruch von ca. 10% zu erkennen, wohingegen bei Versuch V_G.1.2 ca. 90% Holzbruch auftrat.



(a) Versuch V_S.1.2



(b) Versuch V_G.1.2

Abbildung 5.7: Bruchbilder der Versuche V_S.1.2 und V_G.1.2

Die geringen Bruchlasten der Versuche V_G.1.2 und V_S.1.2 ließen vermuten, dass durch ungewollte Exzentrizitäten Querkzug im Verbundsystem auftrat. Abbildung 5.8 zeigt die Veränderung des Punktabstandes des obersten Messpunktes senkrecht zur Klebefuge bezogen auf den Ausgangswert der Serien V_G.1. Ein negativer Wert entspricht einer Verkürzung des Abstandes und Querkdruck, während ein positiver Wert Querkzug widerspiegelt.

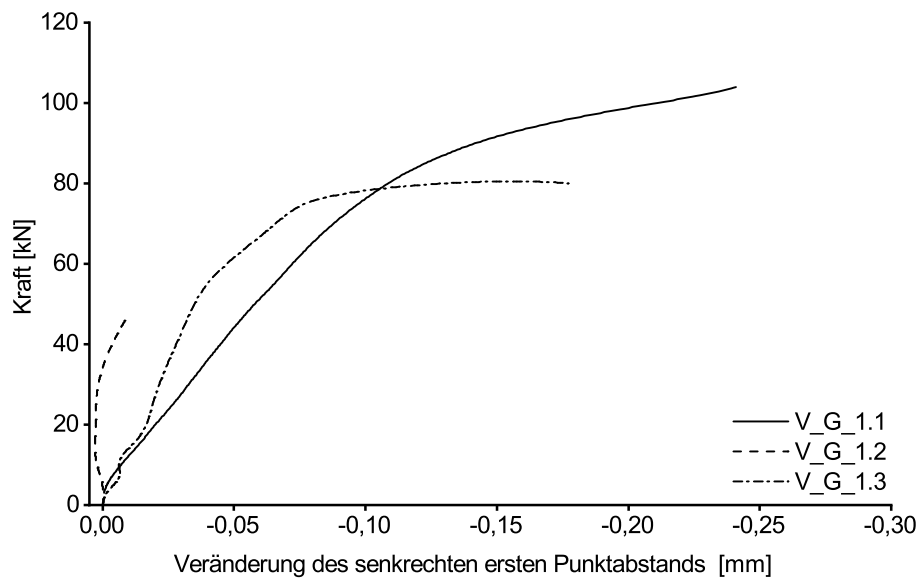


Abbildung 5.8: Veränderung des senkrechten ersten Punktabstands der Serie V_G.1

In Abbildung 5.8 ist bei Serie V_G.1 zu erkennen, dass die Änderung des Punktabstands bei Versuch V_G.1.2 im Vergleich zu den beiden anderen Versuchen dieser Serie deutlich kleiner ausfällt bzw. teilweise sogar positiv ist. Das kann ein Anzeichen für Querkzug sein, welcher sich, durch die sehr geringe Querkzugfestigkeit negativ auf die Schubfestigkeit des Holzes auswirkte. Die unter Höchstlast vorherrschende Schubspannung ergab, nach Gleichung 5.3 berechnet, $3,66 \text{ N/mm}^2$ und lag geringfügig unter der von DIN EN 338 geforderten charakteristischen Schubfestigkeit von $4,0 \text{ N/mm}^2$.

$$\tau_{max} = \frac{F_{max} \cdot \cos 14^\circ}{b \cdot l_{Kleb}} = \frac{50,022 \cdot 10^3 \cdot \cos 14^\circ}{100 \cdot 132,5} = 3,66 \text{ N/mm}^2 \quad (5.1)$$

mit:

τ_{max}	maximale Schubspannung
F_{max}	maximale Maschinenkraft
b	Breite der Klebefläche
l_{Kleb}	exakte Länge der Klebefuge

Bei Serie V_S.1 war die Veränderung des Punktabstands für alle drei Versuche ähnlich, was Abbildung 5.9 zeigt. Aus diesem Grund wird vermutet, dass es z. B. durch Verunreinigungen der Beton- oder Holzoberfläche oder Ungenauigkeiten bei der Herstellung, zu einem Versagen im Haftverbund kam.

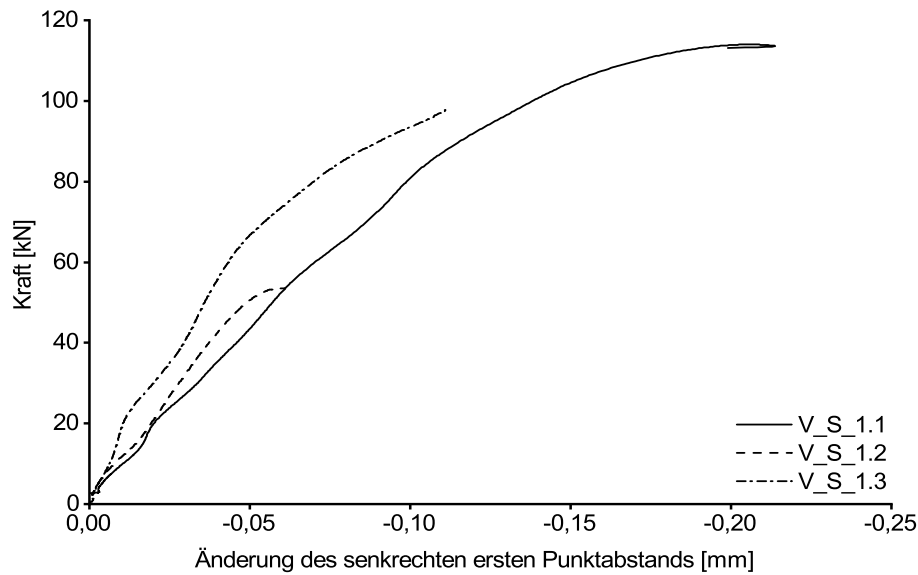


Abbildung 5.9: Veränderung des senkrechten ersten Punktabstands der Serie V_S_1

Relativverschiebung

Anhand der mit den Wegaufnehmern aufgezeichneten Relativverschiebung sollte die mit dem optischen Messsystem bestimmte Relativverschiebung verifiziert werden. Zum Vergleich der beiden Messsysteme wurden ausschließlich die Ergebnisse der auf der vorderen Seite angebrachten Wegaufnehmer berücksichtigt. Die mit den Wegaufnehmer auf der Rückseite des Prüfkörpers aufgezeichnete Relativverschiebung ist in Anhang C mit aufgeführt. Abbildung 5.10 zeigt exemplarisch für Versuch V_G_2.2 die mit den Wegaufnehmern gemessene sowie mit dem optischen Messsystem bestimmte Relativverschiebung. Im Lasteinleitungsbereich, d. h. Wegaufnehmer oben und erster Messpunkt beim optischen System, stimmen die Ergebnisse der zwei Messsysteme nicht überein. Eine mögliche Ursache ist die zusätzliche Schubverzerrung im Holz, welche eine Erhöhung der Relativverschiebung bewirkt, die von den Wegaufnehmern berücksichtigt wird.

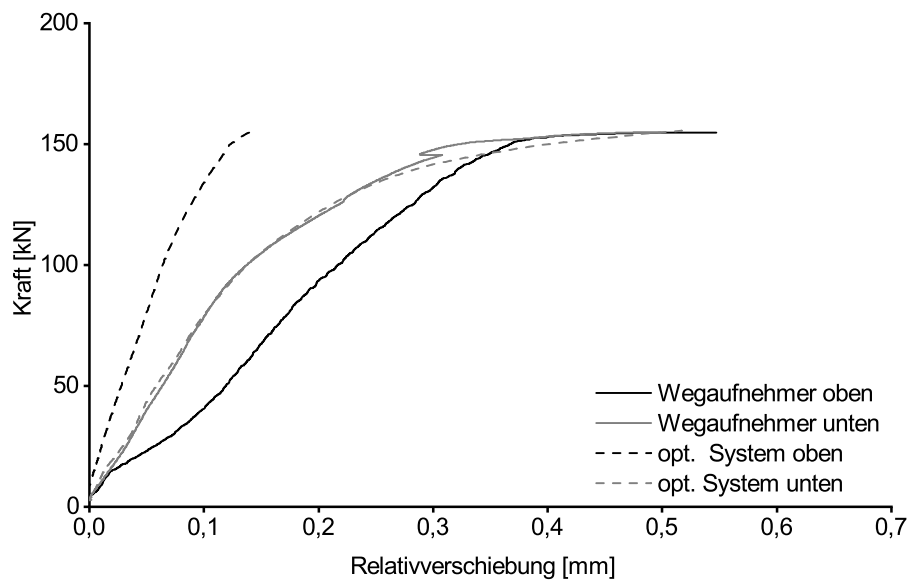


Abbildung 5.10: Relativverschiebung zwischen Holz und Beton, Vergleich der Wegaufnehmer mit dem opt. Messsystem

Die mit dem optischen System ermittelte Relativverschiebung basiert auf den Punktbewegungen der Messpunkte die jeweils ca. 5 mm von der Klebefuge entfernt lagen. Der Wegaufnehmer im Lasteinleitungsbereich war in einem größeren Abstand zur Klebefuge angebracht. Abbildung 5.11 zeigt, in einem Bildausschnitt, den jeweiligen Messpunktabstand senkrecht zur Klebefuge. Anhand zusätzlicher Versuche wurde versucht den Einfluss des senkrechten Abstands des Betrachtungspunktes zur Klebefuge zu quantifizieren.

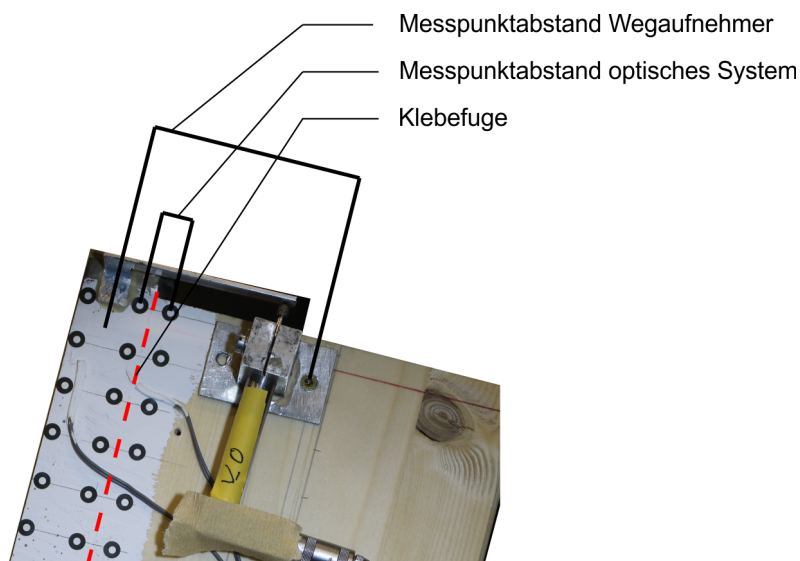


Abbildung 5.11: Unterschiedliche senkrechte Abstände zur Klebefuge von Wegaufnehmer und optischem Messpunkt

Einfluss des Messpunktabstands senkrecht zur Klebefuge auf die Relativverschiebung

Um den Anteil der Schubverzerrung des Holzes zu quantifizieren, der bei der Messung mittels der induktiven Wegaufnehmer durch den größeren Abstand zur Klebefuge auftritt, wurden zusätzliche Versuche durchgeführt. Der Versuchsaufbau dieser Versuche, die verwendeten Materialien, die Durchführung und die Herstellung der Prüfkörper waren affin zu den Verbundversuchen mit einer Verklebungslänge von ca. 290 mm. Um den Einfluss des Messpunktabstands senkrecht zur Klebefuge auf die Relativverschiebung zu untersuchen wurden eine größere Anzahl an Messpunkten auf dem Brettschichtholz in unterschiedlichem Abstand zur Klebefuge angebracht, wie in Abbildung 5.12 dargestellt. Der grau markierte Bereich kennzeichnet die Position des Fixpunktes für den Wegaufnehmer.

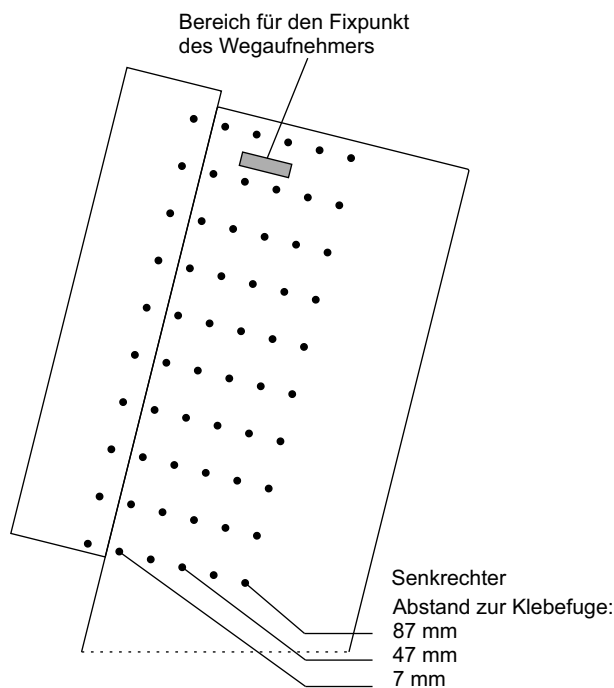


Abbildung 5.12: Anordnung von Messpunkten bei zusätzlich durchgeführten Versuchen

Abbildung 5.13 zeigt exemplarisch für einen zusätzlichen Versuch die Entwicklung der Relativverschiebung in Abhängigkeit des Messpunktabstands zur Klebefuge für die erste, der Lasteinleitung am nächsten gelegenen, Messpunktreihe. Im Diagramm sind die betrachteten Punkte zusätzlich grafisch dargestellt. Die Unterschiede zeichnen sich deutlich ab, so beträgt die maximale Relativverschiebung, ermittelt mit dem Messpunkt im Abstand von 87 mm ca. das sechsfache des Messpunktes im Abstand von 7 mm.

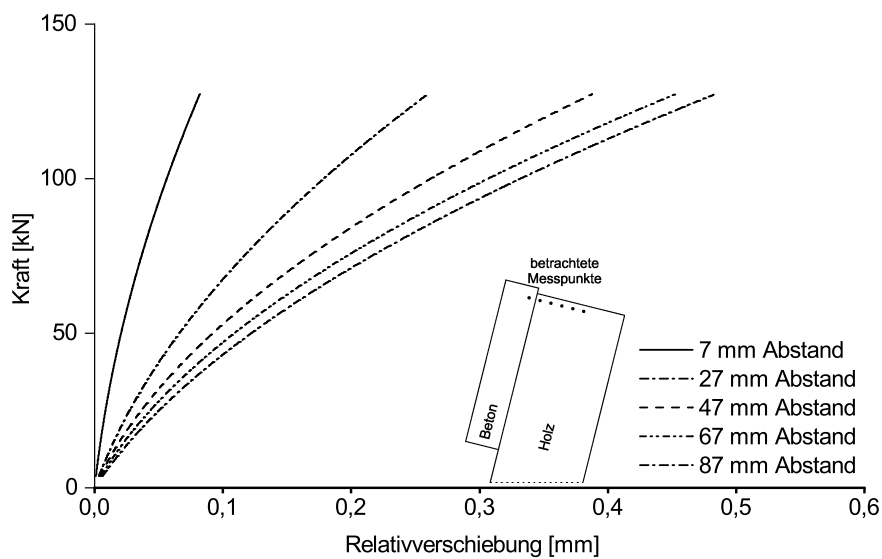


Abbildung 5.13: Entwicklung der Relativverschiebung mit zunehmendem Abstand des Messpunktes auf dem Holz

Ein Vergleich der optisch bestimmten Relativverschiebung der Verbundversuche von Serie V_G.2 mit den zusätzlich durchgeführten Versuchen am ersten Messpunkt zeigt, dass die Relativverschiebung gut übereinstimmt, es jedoch auch zu größeren Abweichungen kommen kann. Dies stellt Abbildung 5.14 dar. Hier sind die Ergebnisse der zusätzlichen Versuche in schwarz und die der Verbundversuche in grau dargestellt. Die unterschiedlichen Stricharten kennzeichnen die jeweiligen Versuche. Darauf aufbauend wird davon ausgegangen, dass die mit den Wegaufnehmern gemessene Relativverschiebung mit den zusätzlichen Versuchen in Verbindung gebracht werden kann.

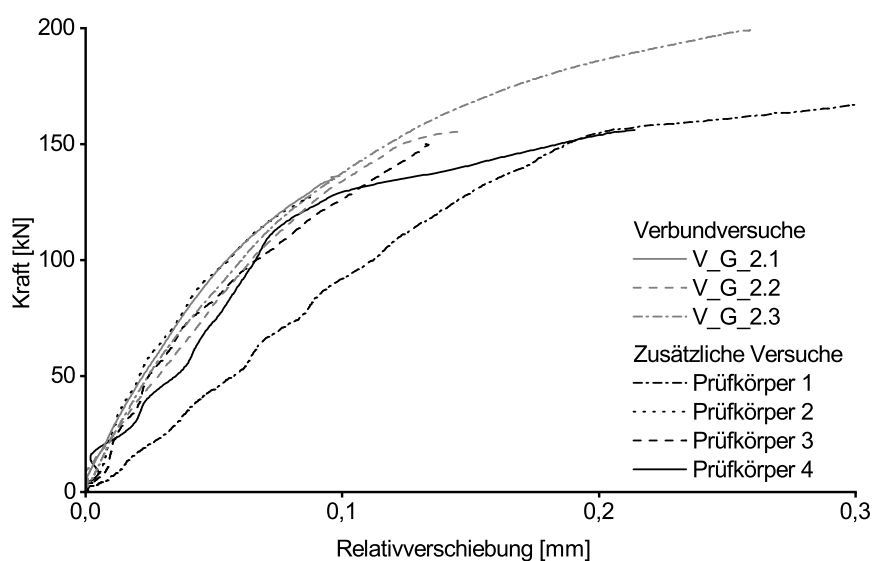


Abbildung 5.14: Vergleich der Testversuche mit den Verbundversuchen der Serie V_G.2

Wie Abbildung 5.11 zu entnehmen ist, liegt der Festpunkt der Wegaufnehmer zum Aufzeichnen der Relativverschiebung in der Nähe der dritten optischen Messpunktreihe, in einem Abstand zur Klebefuge von ca. 47 mm. Aus Abbildung 5.14 geht hervor, dass die zusätzlich durchgeführten Versuche ähnlich zu den Verbundversuchen sind. Abbildung 5.15 stellt die mit den Wegaufnehmern gemessene Relativverschiebung der Verbundversuche von Serie V_G_2 in Relation zur berechneten Relativverschiebung der zusätzlichen Versuche für einen Messpunkt Abstand von 47 mm zur Klebefuge dar. Wie sich zeigt, ist die mit den Wegaufnehmern gemessene Relativverschiebung etwas geringer als die mit dem optischen Messsystem berechnete. Gründe hierfür könnten sein, dass der Wegaufnehmer einen geringeren Abstand senkrecht zur Klebefuge, einen größeren Abstand zum Lasteinleitungspunkt besaß und die Materialeigenschaften im Holz variierten.

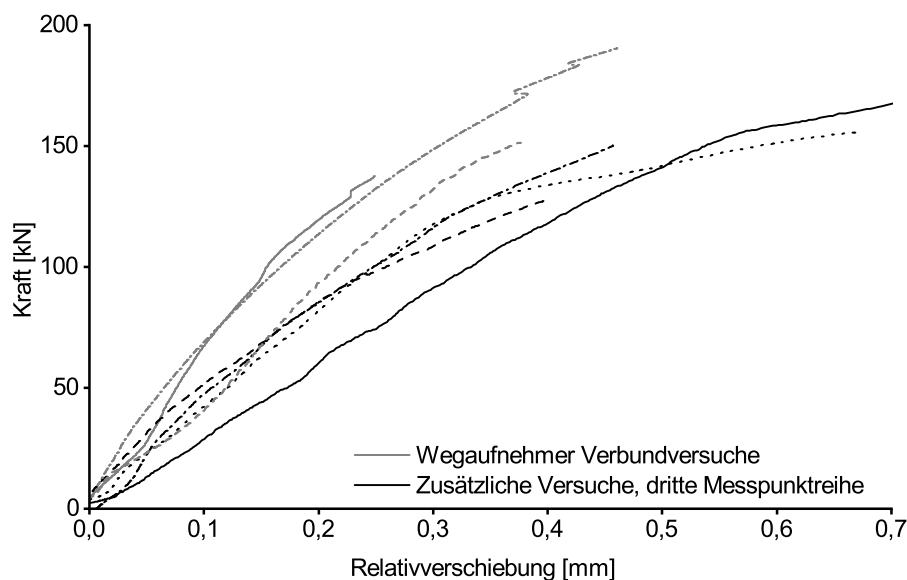


Abbildung 5.15: Vergleich der Relativverschiebungen gemessen mit den Wegaufnehmern und mit dem optischen System bei den zusätzlichen Versuchen

Einfluss des betrachteten Punktes entlang der Klebefuge

Wie Abbildung 5.16 exemplarisch für Versuch V_G_2.2 zeigt, besitzt der Abstand des Messpunktes zur Lasteinleitung entlang der Klebefuge einen Einfluss auf das gemessene Ergebnis. Abbildung 5.16 stellt die mit dem optischen Messsystem ermittelte Relativverschiebung an den Punkten 1, 7 und 14 entlang der Klebefuge dar. Diese sind im Diagramm grafisch dargestellt. Wie sich zeigte, ist die Relativverschiebung in der Klebefugenmitte am geringsten, während am Ende der Klebefugenlänge die größte Verschiebung auftrat.

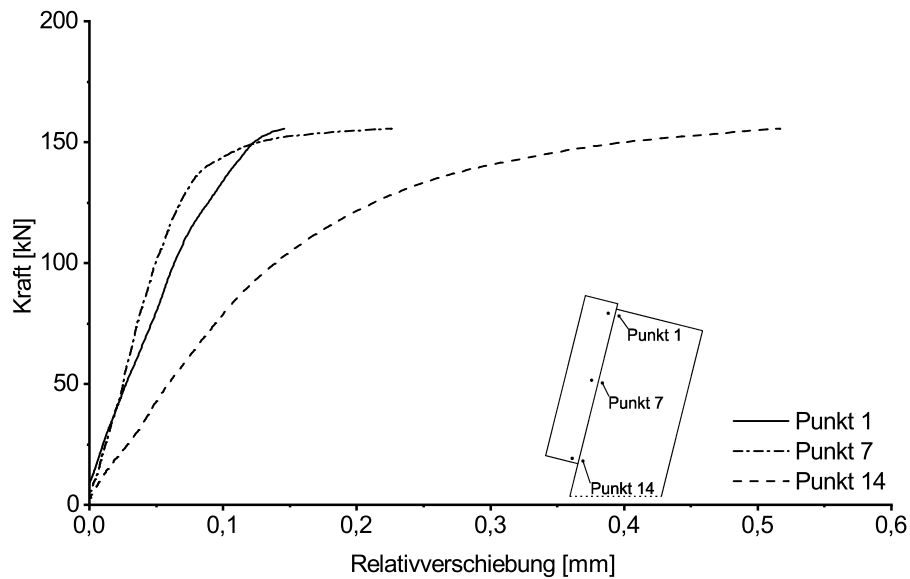


Abbildung 5.16: Relativverschiebung entlang der Klebefuge

Relativverschiebung in Klebefugenmitte

Um die zuvor genannten Einflüsse, senkrechter Abstand zur Klebefuge und Abstand zur Lasteinleitung entlang der Klebefuge, zu minimieren werden nachfolgend die Relativverschiebung in der Mitte der Klebefugenlänge betrachtet. Abbildung 5.17 zeigt die Relativverschiebung in Klebefugenmitte für alle durchgeführten Verbundversuche aufgetragen gegen die aufgebrachte Maschinenkraft. Der Versuch V_S-1.3 ist nicht dargestellt. Es zeigt sich, dass die Relativverschiebung in Klebefugenmitte beim Versagen mit bis zu 0,25 mm, unabhängig von der Klebefugenlänge und der Betonoberfläche, sehr gering ist.

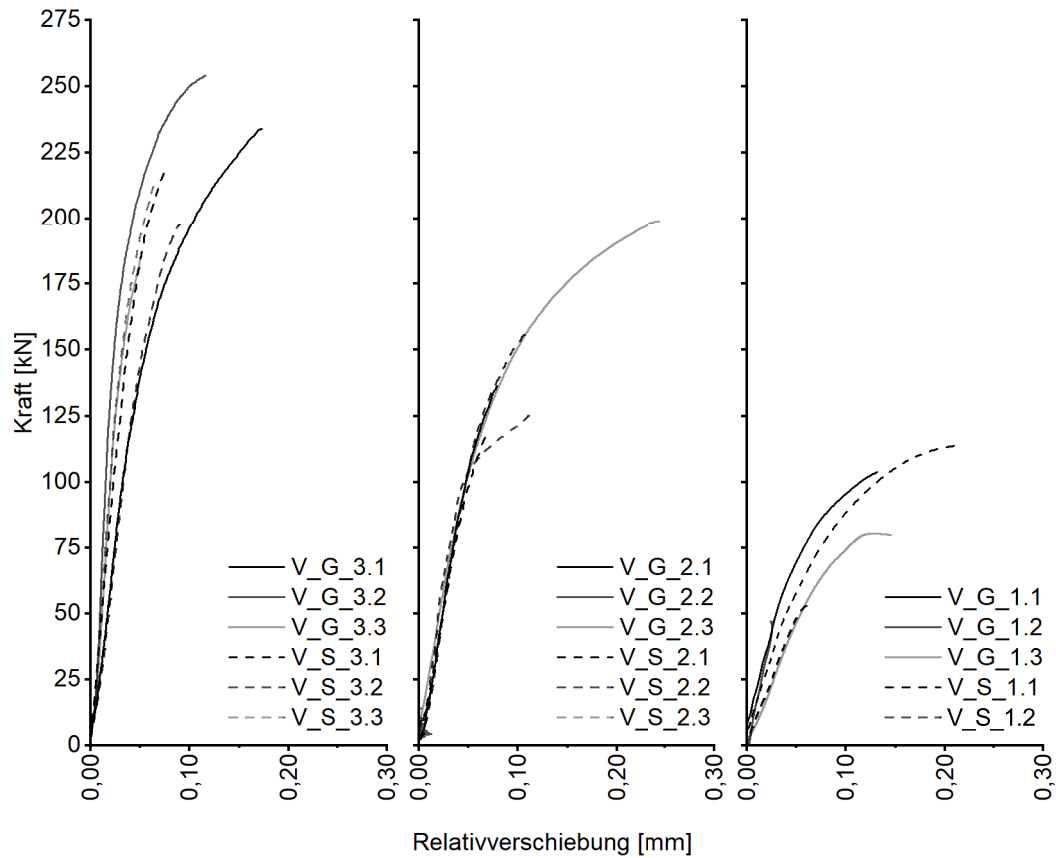


Abbildung 5.17: Relativverschiebung in Klebefugenmitte

Dehnungsmessung

Wie zuvor beschrieben, sollten die mit dem optischen Messsystem erzielten Ergebnisse mit Hilfe von DMS validiert und zudem anhand der Dehnungsverläufe entlang der Klebefuge auf die im jeweiligen Bauteil vorherrschende Normalkraft geschlossen werden. Abbildung 5.18 zeigt die Betondehnung in Abhängigkeit der Maschinenkraft an den jeweiligen Messstellen, exemplarisch für Versuch V_G_3.1. Die durchgezogene Linie stellt die mit dem DMS gemessene Dehnung dar, während die gestrichelte Linie den anhand des optischen Systems bestimmten Dehnungsverlauf darstellt. Wie sich zeigt, spiegeln die mit dem optischen System bestimmten Dehnungen den Verlauf der mit den DMS bestimmten Dehnungen gut wider. Die mit den DMS gemessenen Dehnungen sind für alle Versuche in Anhang C aufgeführt

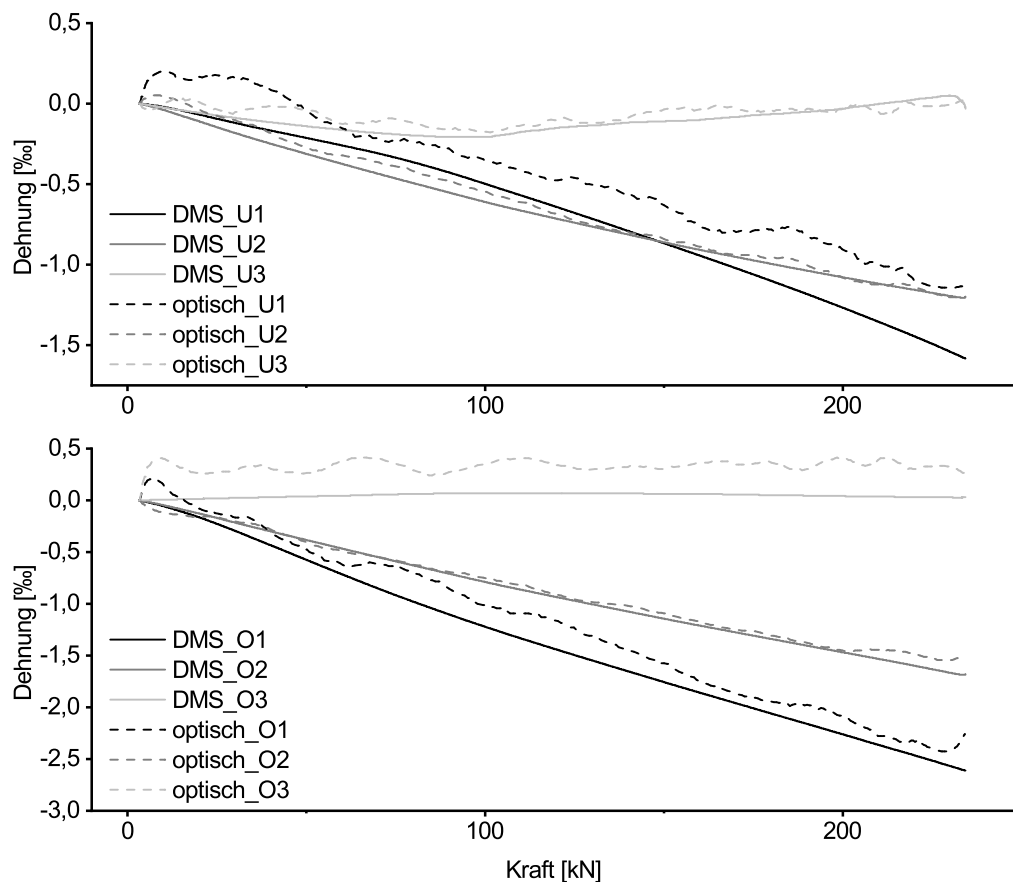


Abbildung 5.18: Vergleich der mit den DMS gemessenen und mit dem optischen System bestimmten Dehnungen bei Versuch V_G_3.1

Abbildung 5.19 zeigt exemplarisch für Versuch V_G_3.1 den Dehnungsverlauf in der Betonplatte entlang der Klebefuge. Die untere Messpunktreihe ist an der Klebefuge angeordnet, die obere auf der gegenüberliegenden Seite. Die Ergebnisse der oberen Punktreihe sind als durchgezogene Linie, die der unteren Punktreihe als gestrichelte Linie dargestellt. Schwarz sind die erzielten Ergebnisse bei 90 % und grau 25 % der Bruchlast. Im gleichen Farbschema sind die Ergebnisse der DMS, untere Messstellen als Punkte, obere als Quadrate dargestellt. Auch hier zeigt sich die gute Übereinstimmung der mit den DMS gemessenen und mit dem optischen System bestimmten Dehnungen. Wie sich zeigte, lag bereits an der Lasteinleitungsstelle keine konstante Spannungsverteilung vor, da sowohl die mit den DMS als auch die mit dem optischen System bestimmte Dehnung für die untere und obere Betrachtungsreihe unterschiedlich sind. Der Dehnungsverlauf auf der unteren Seite der Betonplatte verläuft mit einigen Ausreißern weitgehend linear, während der Dehnung auf der oberen Seite bis zu einem Abstand von ca. 160 mm zur Lasteinleitung - entspricht Betrachtungspunkt 8 - zunimmt und anschließend abfällt. Dieses Verhalten kann bei allen Versuchen mit einer Klebefugenlänge von ca. 450 mm beobachtet werden. Bei den Versuchen mit der geringeren Verklebungslängen ist dieses Verhalten zum Teil zu beobachten, jedoch nicht so ausgeprägt. Der Grund für die-

sen Verlauf wird im Versuchsaufbau selbst, der natürlichen Streubreite der Steifigkeiten auch innerhalb eines Brettes entlang deren Längsachse, sowie teilweise den Verdübelungseffekten durch die Äste (Ehlbeck *et al.*, 1987) sowie einer Überlagerung dieser Effekte gesehen.

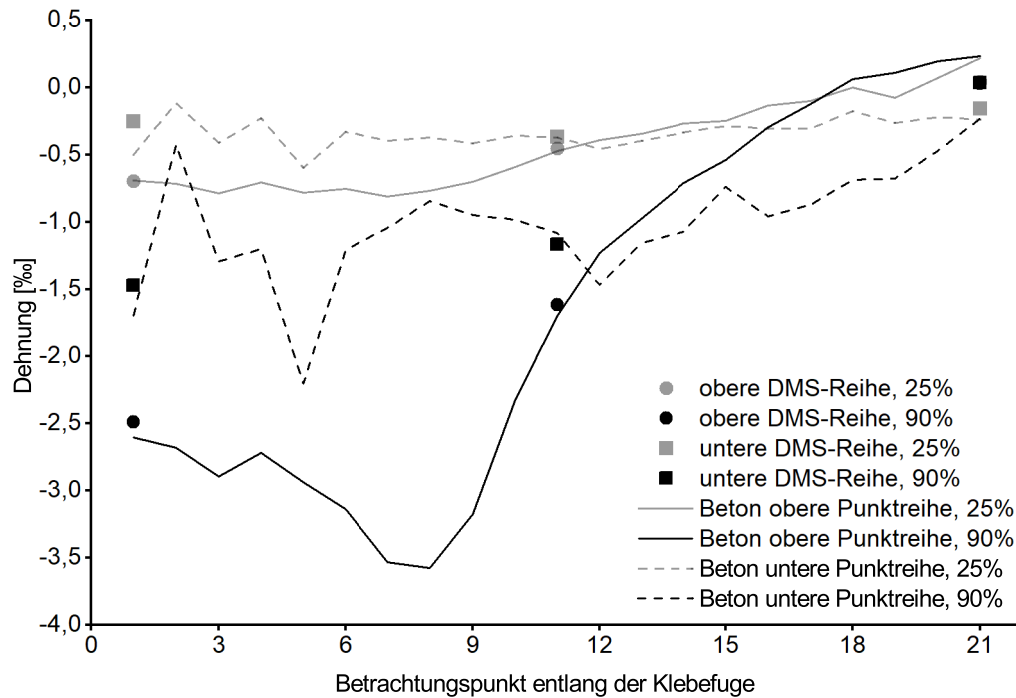


Abbildung 5.19: Verlauf der Betondehnung entlang der Klebefuge für Versuch V_G_3.1

5.4 Zwischenfazit

Anhand der Verbundversuche wurden größere Verklebungslängen sowie das Verbindungsverhalten selbst untersucht. Die durchgeführten Versuche zeigten, dass die Klebeverbindung nicht das schwächste Glied darstellt, sondern das Holz, da hier das häufigste Versagen auftrat. Wichtig ist es jedoch darauf zu achten, die Klebefuge keinesfalls auf Querzug zu beanspruchen. Zudem kann aufgrund der geringen Relativverschiebung, die sich zwischen Holz und Beton einstellt, für eine Bauteilberechnung von einer starren Verbindung ausgegangen werden.

6 Bauteilversuche

6.1 Allgemeines

In diesem Kapitel sind die zentrisch und exzentrisch belasteten Bauteilversuche im Maßstab 1:1 beschrieben, anhand derer das reale Bauteilverhalten untersucht wurde. Diese Versuche dienen als Grundlage für den Bemessungsvorschlag.

6.2 Material und Methoden

6.2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau bestand aus zwei 50 cm langen Rollenkipplagern in Bauteilebene, die am Wandkopf und Wandfuß fest mit einer Prüfmaschine verschraubt wurden. Dadurch erfolgte die gelenkige Lagerung der Prüfkörper senkrecht zur Bauteilebene. In den 20 cm breiten Rollenkipplagern konnten die Prüfkörper zentrisch und exzentrisch angeordnet werden. Abbildung 6.1 zeigt die unterschiedlichen Positionen der Versuchskörper im Rollenkipplager für die zentrischen, die 10 mm und 20 mm exzentrischen Bauteilversuche.

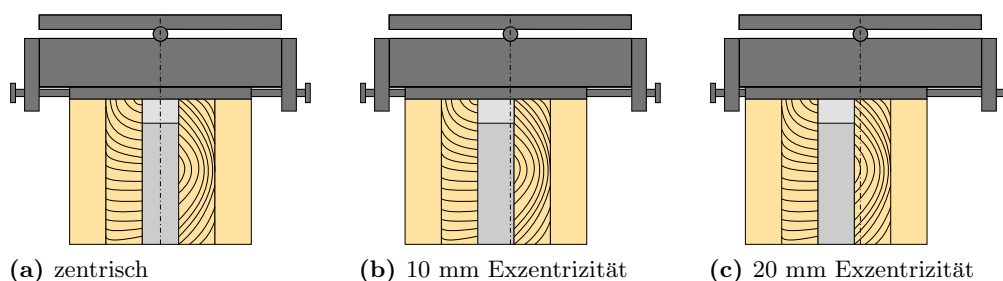


Abbildung 6.1: Anordnung des Prüfkörpers im Lager am Wandkopf für unterschiedliche Exzentrizitäten

In Abbildung 6.2 ist links der schematische Aufbau eines zentrischen Versuchs und rechts der tatsächliche Aufbau eines exzentrischen Versuchs dargestellt. Um die Prüfkörper mit Hebe-

zeugen zu bewegen und im Versagensfall gegen Herausfallen aus der Prüfmaschine zu sichern, war ca. 30 cm unterhalb des Wandkopfs ein Kantholz horizontal über die gesamte Wandlänge angebracht. Mit einer Rundschlinge, die das Kantholz umfasste, wurden die Prüfkörper in der Prüfmaschine gesichert. Dies ist ebenfalls in Abbildung 6.2 rechts zu sehen.

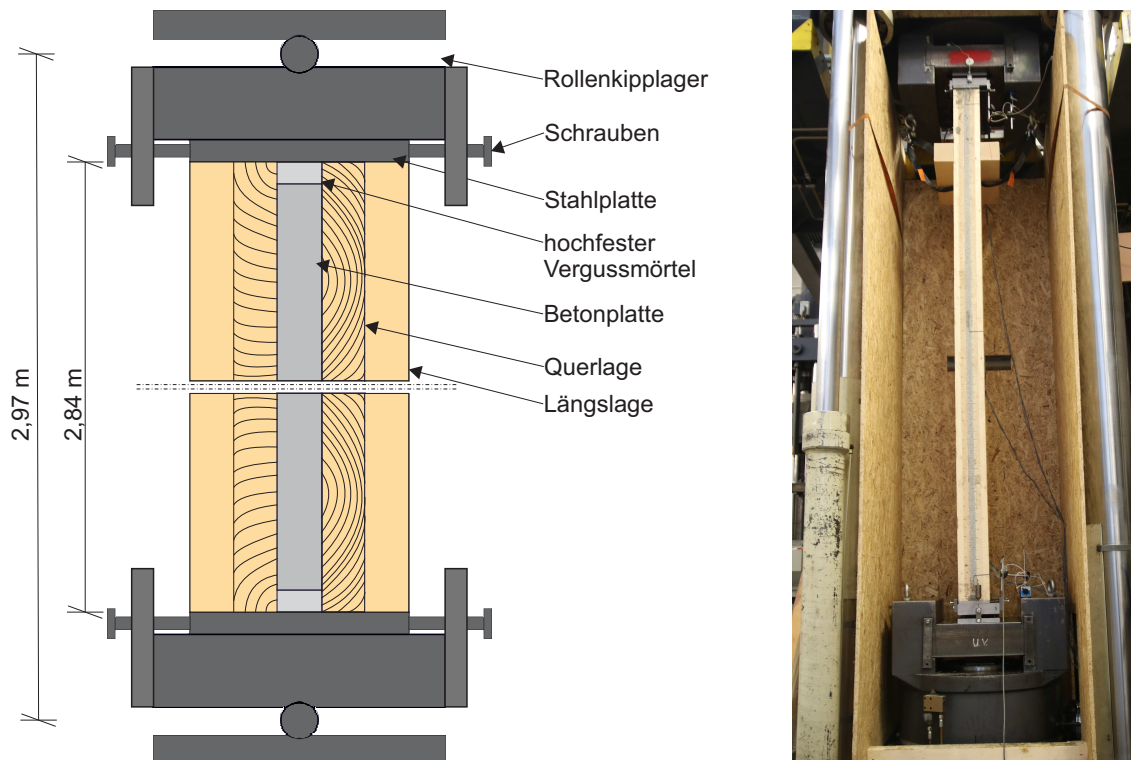


Abbildung 6.2: Schematische Darstellung eines zentrischen und tatsächlicher Versuchsaufbau eines exzentrischen Bauteilversuchs

6.2.2 Prüfkörper

Aufbau und Abmessungen

Die drei untersuchten Prüfkörperaufbauten waren alle aus insgesamt fünf Lagen, davon drei Längslagen und zwei Querlagen, aufgebaut, siehe Abbildung 6.3. Der Wandkern, bzw. die mittlere Längslage, war entweder durchgängig aus Beton oder alternierend aus Holz und Beton ausgebildet. Die Dicke des durchgängigen Wandkerns betrug 30 mm oder 45 mm, bei dem alternierendem Aufbau war der Kern 30 mm dick. Die äußeren beiden Längslagen und die zwei Querlagen bestanden immer aus Holz mit einer Dicke von 30 mm. Alle Prüfkörper waren 2,84 m hoch und mit durchgängigem Kern 500 mm lang oder mit dem alternierenden Kern 400 mm lang. Der Abstand zwischen den Knickpunkten der gelenkigen Lagerung betrug 2,97 m. Um die maschinelle Bearbeitung der Prüfkörper mit Holzbearbeitungsmaschinen zu ermöglichen war die mittlere Lage aus Beton am oberen und unteren Wandende jeweils um

ca. 20 mm zurückversetzt. Der entstandene Spalt zwischen Holz und Beton wurde mit einem gängigen hochfesten Vergussmörtel verfüllt.

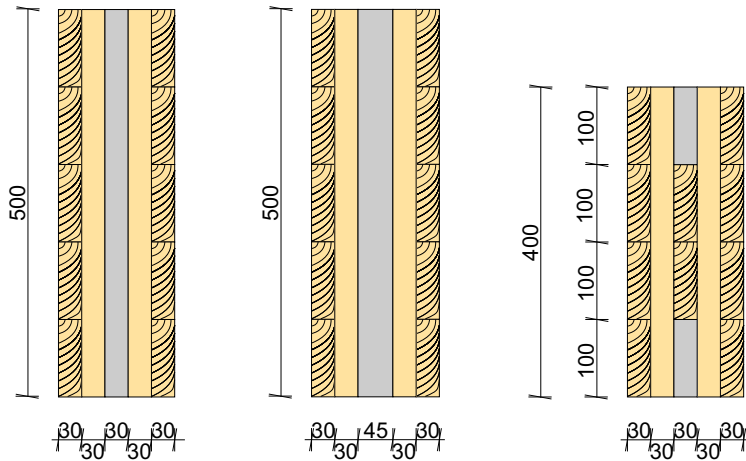


Abbildung 6.3: Querschnitte der untersuchten Prüfkörper

Herstellung

Die Fertigung der Rohplatten aus Beton mit einer Länge von 2,85 m, einer Breite von 600 mm und einer Dicke von 31 mm oder 45 mm fand in einem Betonfertigteilwerk statt. Zwei unterschiedliche Schalmaterialien, eine Holzschalung und eine Schalung aus POM, wurden verwendet. Zuerst wurden die 45 mm dicken Betonplatten mit einer Holzschalung hergestellt. Um ein Schüsseln der Betonplatten zu verhindern erfolgte die Betonage stehend über die Breite von 600 mm. Anschließend wurden die Platten mit einer Flächenschleifmaschine zur Steinbearbeitung geschliffen. Abbildung 6.4 zeigt eine Betonplatte während des Schleifens. Das anschließende Vermessen der geschliffenen Platten ergab Ebenenabweichungen von bis zu $\pm 2 \text{ mm}$. Aus diesem Grund wurden die 31 mm dicken Betonplatten mit einer gehobelten POM Schalung hergestellt. Diese sollte bereits bei der Herstellung der Rohplatten eine größere Genauigkeit besitzen. Nach dem Schleifen hatten diese Platten Ebenenabweichungen von ca. $\pm 0,5 \text{ mm}$, jedoch waren auch hier einzelne Ausreißer von bis zu ca. 1 mm vorhanden. Vor dem Verkleben wurden die Platten auf das entsprechende Maß von 500 mm x 2,8 m zugeschnitten und zu einem Brettsper Holzwerk transportiert.

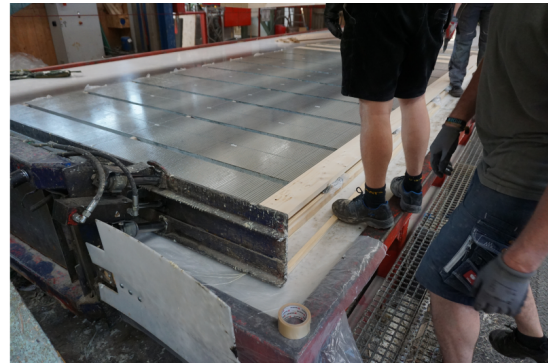


Abbildung 6.4: Betonplatte auf Flächenschleifmaschine

Nach dem Reinigen der Betonplatten mit Wasser und Druckluft sowie dem Aufkleben der DMS in einer speziell dafür vorgesehenen Vertiefung erfolgte die Herstellung der Wandelemente, siehe Abbildung 6.5. Die Betonplatten wurden im Anschluss an das automatische Auslegen der ersten beiden Lagen aus Holz, sowie dem Klebstoffauftrag, eingelegt. Danach folgten die restlichen zwei Lagen aus Holz. Die Klebstoffauftragsmenge betrug zwischen allen Lagen 170 g/m^2 und die offene Wartezeit 50 Minuten. Aus zwei hergestellten und im Vakuumpressverfahren gepressten Rohplatten, wurden die einzelnen Prüfkörper computer-gesteuert herausgetrennt. Aus Sicherheitsgründen hielt das Sägeblatt einen Abstand von ca. 20 mm zum Beton ein.



a) Eingelegte Betonplatten mit Klebstoffauftrag



b) Auslegen der weiteren Lagen



c) fertiges Rohelement vor Pressen



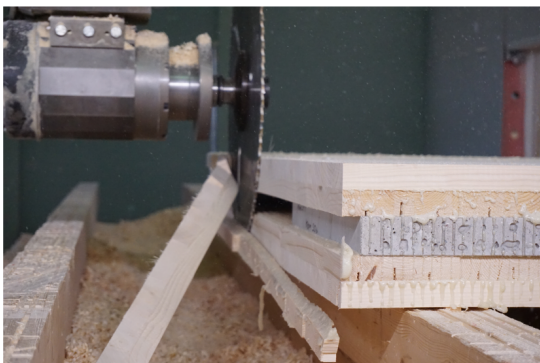
d) Pressen im Vakuumbett



e) gepresstes Element



f) Ausheben des Elements



g) CNC gesteuerter Zuschnitt



h) CNC gesteuerter Zuschnitt

Abbildung 6.5: Herstellung der Wandelemente

Um an den Schmalseiten eine bündige Kante von Holz und Beton zu erhalten erfolgte dieser Zuschnitt manuell. Im Anschluss daran konnte das seitliche Kantholz befestigt und der Spalt zwischen Holz und Beton mit Vergussmörtel vergossen werden.

Versuchskörperbezeichnung

Abbildung 6.6 stellt die verwendete Versuchsbezeichnung der Bauteilversuche dar.

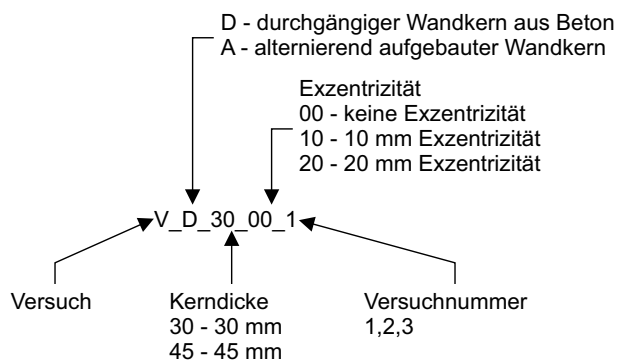


Abbildung 6.6: Schematik zur Bezeichnung der Bauteilversuche

6.2.3 Material

Laut Herstellerangaben kam Fichtenholz mit einer Festigkeitsklasse von C24 nach DIN EN 338 zum Einsatz. Die Festigkeitseigenschaften wurden nicht an Versuchen bestimmt.

Der verwendete Beton hatte eine über alle Bauteile gemittelte Zylinderdruckfestigkeit von 133 N/mm^2 und der Elastizitätsmodul betrug 46774 N/mm^2 . Die Druckfestigkeit und der E-Modul wurden nach DIN EN 12390-13 und DIN EN 12390-3 bestimmt.

Zur Herstellung der Wandelemente kam ein PU Klebstoff des Brettspertholzproduzenten zum Einsatz. Es handelte sich hierbei um ein Produkt der gleichen Klebstofflinie, wie in den Laborversuchen, jedoch mit einer längeren Verarbeitungszeit.

6.2.4 Messtechnik

Um das Verhalten der Bauteilversuche zu beschreiben, waren die Versuchskörper mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet. Mit Laserdistanzsensoren wurde die horizontale Verformung der Bauteile in Wandmitte und in den Viertelpunkten gemessen. In Wandtiefenrichtung waren die DMS in Wandmitte sowie am Wandende und über die Wandhöhe jeweils am Wandkopf, am Wandfuß sowie in Wandmitte angeordnet. Abbildung 6.7 zeigt die Position der DMS auf den Prüfkörpern. Mittig ist die Frontalansicht dargestellt, die beiden Seiten sind nach

außen geklappt. In Abbildung 6.7 sind zusätzlich die Positionen der DMS eingezeichnet, die vorne und hinten stirnseitig an den Betonplatten des Wandkerns angebracht waren.

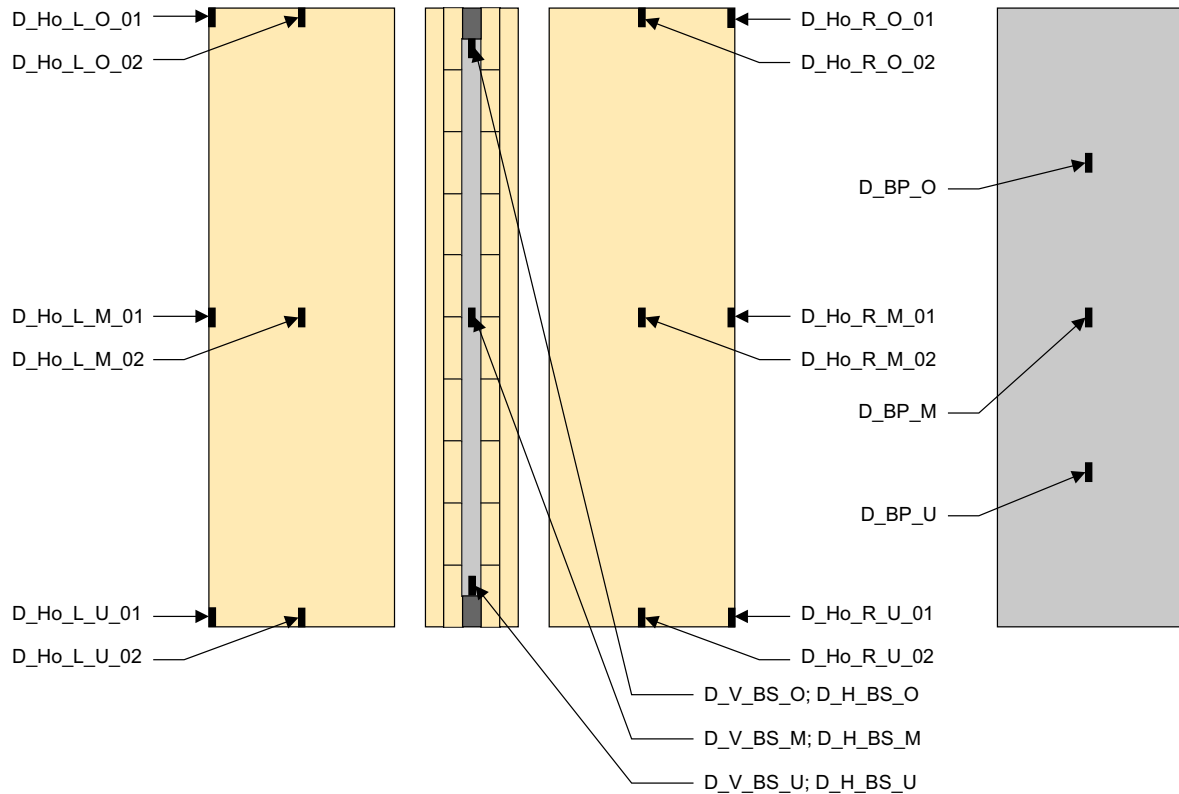


Abbildung 6.7: Anordnung der DMS

Zusätzlich waren drei DMS seitlich auf der Betonplatte angebracht und mit in das Wandbauteil eingeklebt, wie Abbildung 6.7 rechts zeigt. Ein DMS war in Wandmitte, die anderen beiden in den Viertelpunkten angeordnet. In Abhängigkeit der Einbaurichtung des Prüfkörpers befanden sich die DMS entweder auf der Zug- oder Druckseite der Betonplatte.

6.2.5 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden in einer Standardprüfmaschine, mit einer maximalen Druckkraft von 6 MN, durchgeführt. Die Kraftaufbringung erfolgte lagegerecht mit einer Geschwindigkeit von 0,002 mm/s. Die manuell aufgebrachte Vorkraft betrug zwischen 5 kN und 8 kN.

Von den Versuchen mit 30 mm dickem durchgängigem Betonkern wurden von jeder Exzentrizität drei Versuche durchgeführt. Die zwei anderen Aufbauten dienen als Tastversuche, von denen jeweils ein zentrischer und ein exzentrischer Versuch mit reduzierter Messtechnik durchgeführt wurde. Die Gesamtanzahl an Versuchen lag bei 13 Stück.

6.3 Ergebnisse und Interpretation

6.3.1 Versuche mit durchgängigem Wandkern aus Beton

Zentrische Versuche

Abbildung 6.8 zeigt die Kraft aufgetragen gegen die horizontale Verformung in Wandmitte (links) und das Kraft-Weg-Diagramm (rechts) der zentrischen Versuche mit 30 mm und 45 mm dickem Wandkern. Die Kraft stieg ohne nennenswerte horizontale Verformung an, bis kurzzeitig ein Plateau erreicht wurde und der Prüfkörper ausknickte, was zu einer starken Zunahme der horizontalen Verformung und einem Kraftabfall führte. Beim Kraft-Weg-Diagramm ist dieses Verhalten noch deutlicher zu erkennen. Die Kraft stieg linear bis zum Maximum an und fiel schlagartig ab. Die Versuche V_D.30.00.1 und V_D.30.00.2 erreichten ein Lastmaximum von 1677 kN und 1689 kN. Hingegen konnte Versuch V_D.30.00.3 nur eine Kraft von 1327 kN erzielen. Der Versuch mit dem 45 mm dicken Betonkern V_D.45.00.1 knickte bei einer Kraft von 1822 kN aus.

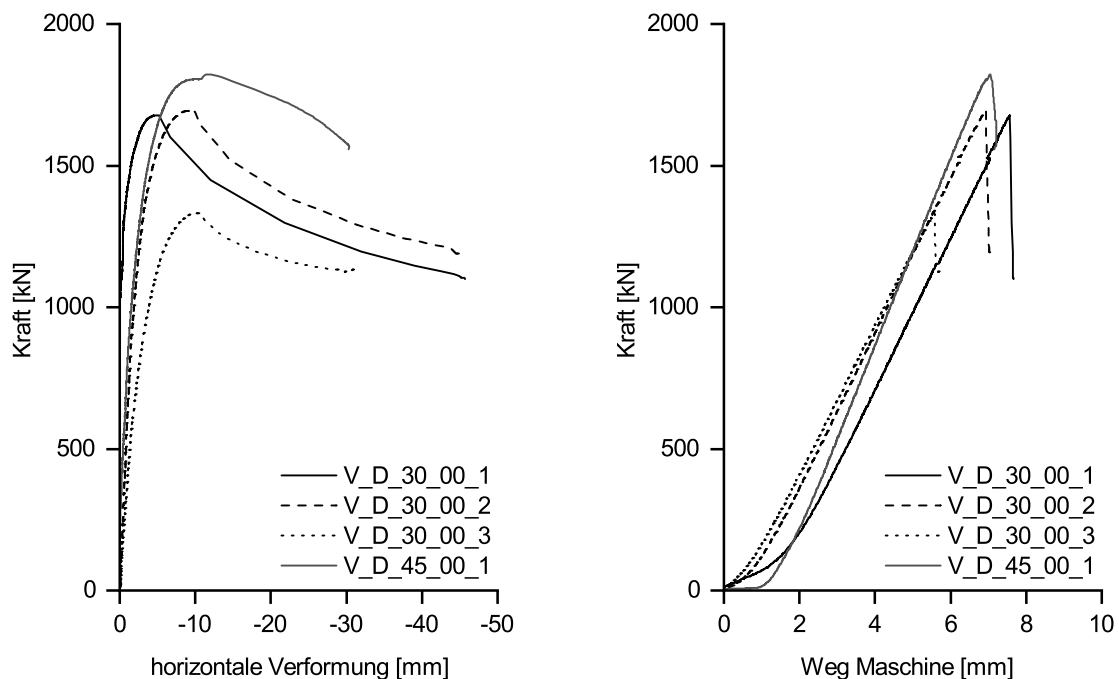


Abbildung 6.8: Kraft-horizontale Verformung und Kraft-Weg Diagramm der zentrischen Versuche

Die Dehnungsverläufe in Wandmitte sind für alle vier Versuche ähnlich, weshalb hier exemplarisch Versuch V_D.30.00.2 näher betrachtet wird. Dieser Versuch knickte vom Betrachter aus gesehen nach rechts aus. Dies spiegeln die Holzdehnungen, wie in Abbildung 6.9 dargestellt, wider. Die Dehnungen steigen auf beiden Wandseiten annähernd linear an, bis es zum Aus-

knicken des Prüfkörpers kommt und die auf der rechten Wandseite angeordneten DMS eine Zugbeanspruchung erfahren. Die maximale Druckdehnung des Holzes betrug $-3,8\text{‰}$ und die maximale Zugdehnung $2,0\text{‰}$. Ebenso zeigt sich, dass die Beanspruchung über die Wandtiefe gleich ist. Bei diesem Versuch waren die DMS auf der Betonplatte im gedrückten Bereich angeordnet. In Abbildung 6.9 ist zu sehen, dass die Betondehnungen unmittelbar in Wandmitte linear bis zum Erreichen der Knicklast verlaufen. Der DMS D_BP_M weist bei gleicher Kraft etwas größere Dehnungen auf, da dieser nicht zentrisch wie die DMS an den Schmalseiten, sondern exzentrisch weiter im gedrückten Bereich lag.

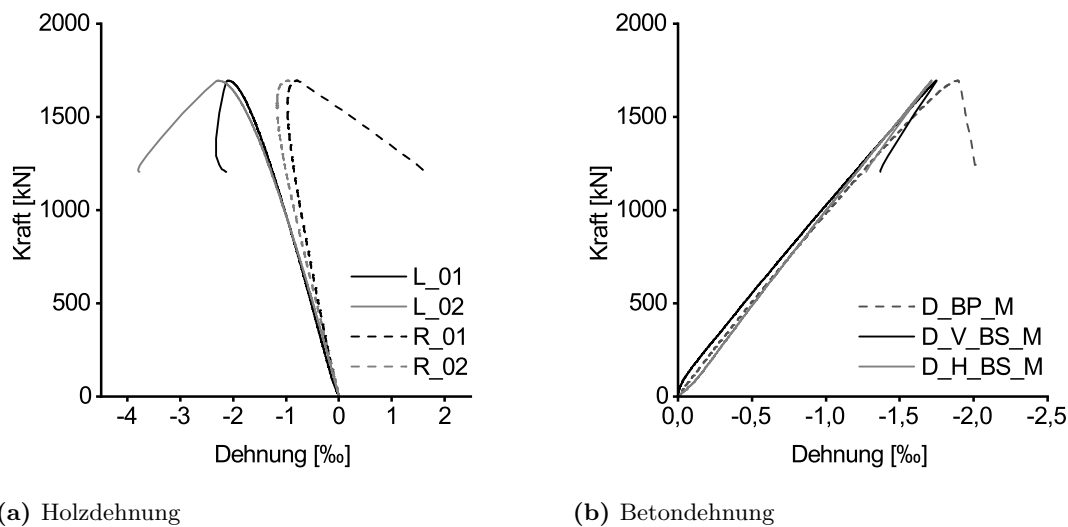


Abbildung 6.9: Dehnungen in Wandmitte bei Versuch V_D_30_00_2

10 mm exzentrische Versuche

In Abbildung 6.10 ist links die horizontale Verformung in Wandmitte gegen die Kraft angetragen und rechts ist das Kraft-Weg-Diagramm dargestellt. Mit zunehmender Kraft stieg die horizontale Verformung in Wandmitte an. Zu Beginn erfolgte der Anstieg linear und flachte dann im oberen Bereich ab. Versuch V_D_45_10_1 erreichte eine Maximalkraft von 1330 kN und wurde manuell abgebrochen. Bei den Versuchen V_D_30_10_1 und V_D_30_10_2 konnte ein duktiler Bauteilverhalten beobachtet werden. Bei Erreichen der Maximallast, 925 kN bei V_D_30_10_1 und 1025 kN bei V_D_30_10_2, versagten die Prüfkörper nicht, sondern die Kraft nahm wieder ab, während die horizontale Verformung zunahm. Gleiches ist auch im Kraft-Weg Diagramm zu erkennen. Der Versuch V_D_30_10_3 versagte bei einer Kraft von 908 kN schlagartig.

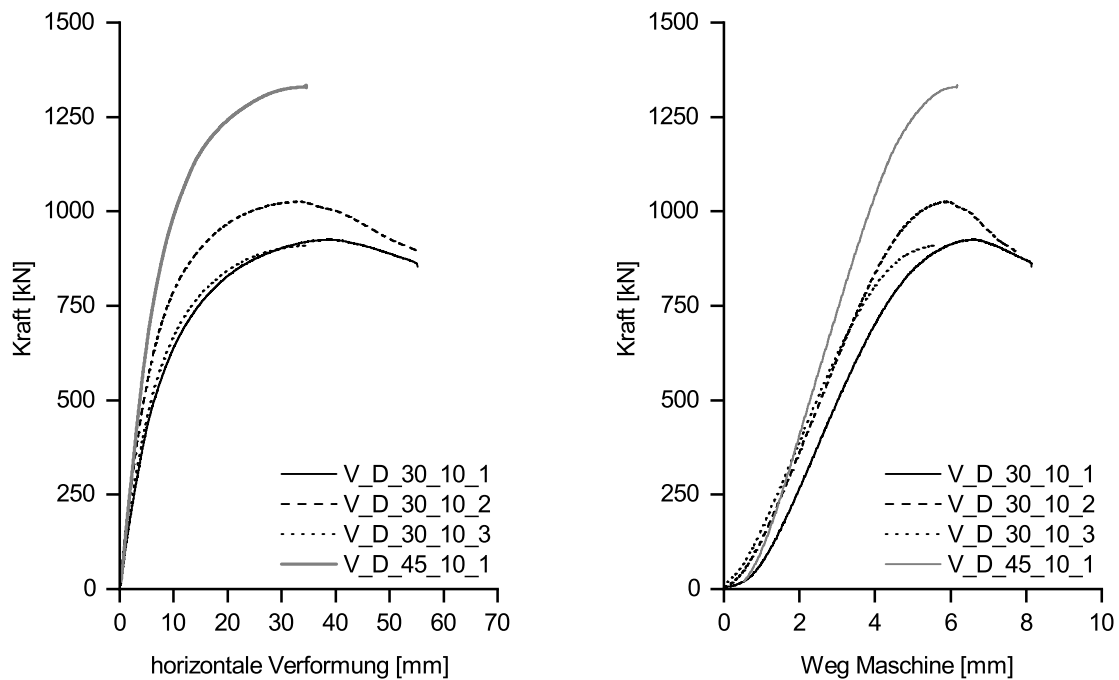


Abbildung 6.10: Kraft-horizontale Verformung und Kraft-Weg Diagramm der 10 mm exzentrischen Versuche

Die Dehnungsverläufe in Wandmitte der vier Versuchskörper sind affin, weshalb exemplarisch die Ergebnisse von Versuch V_D.30.10.1 gezeigt werden. Die exzentrischen Prüfkörper waren so eingebaut, dass das Ausbauchen vom Betrachter aus gesehen nach links erfolgte. Wie in Abbildung 6.11 zu sehen ist, erfahren die DMS auf der rechten Wandseite eine Druckdehnung und auf der linken Wandseite eine Zugdehnung. Der Verlauf der Druckdehnungen ist im Vergleich zu den Zugdehnungen flacher. Im Bereich der Zugzone erfahren die DMS bis zu einer Kraft von ca. 600 kN keine Dehnung, darüber hinaus nehmen die Dehnungen nichtlinear zu. Die maximale Dehnung in der Zugzone liegt bei 3,6 ‰ und in der Druckzone bei -4,0 ‰. Die Betondehnungen steigen linear bis zum Erreichen der Maximallast an. Bei diesem Versuch sind die DMS auf der Betonplatte im Druckbereich angeordnet und der DMS D_BP_M erfährt mit einer Dehnung von -1,3 ‰ eine geringfügig höhere Beanspruchung als die direkt in Wandmitte angebrachten DMS D_V_BS_M und D_H_BS_M mit ca. -1,0 ‰.

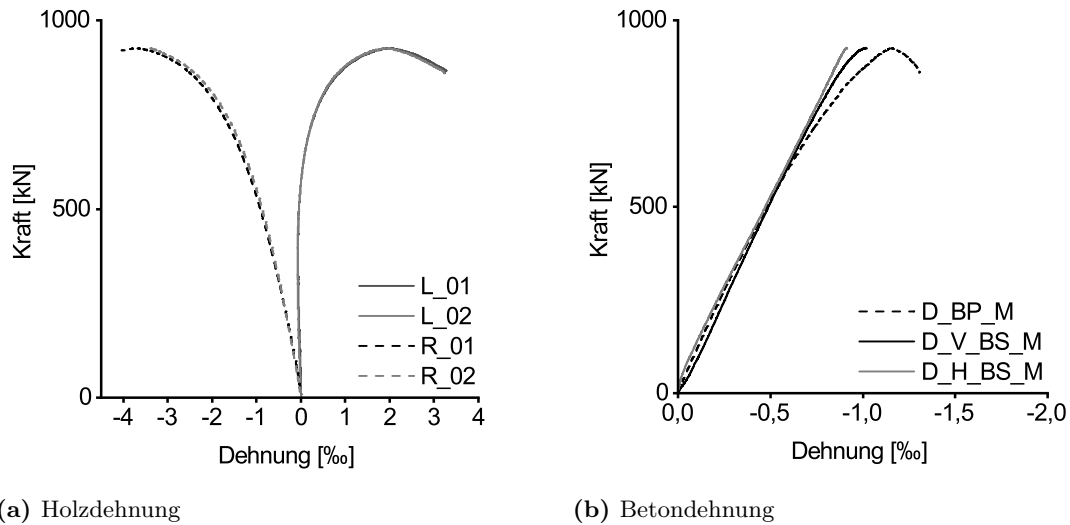


Abbildung 6.11: Dehnungen in Wandmitte bei Versuch V_D_30_10_1

20 mm exzentrische Versuche

Die Ergebnisse der Versuche mit 20 mm Exzentrizität sind ähnlich zu denen mit 10 mm Exzentrizität, jedoch wurden geringere Maximallasten erreicht, wie Abbildung 6.12 zeigt. Versuch V_D_30_20_1 versagte schlagartig bei 728 kN. Vor dem Versagen war zweimal ein lautes Knacken zu hören, welches von einem Kraftabfall begleitet wurde. Versuch V_D_30_20_2 versagte ohne Vorankündigung bei 703 kN. Bei Versuch V_D_30_20_3 war ein duktiler Bauteilverhalten zu beobachten, die Maximalkraft betrug hier 833 kN. Bei einer Restkraft von 800 kN wurde der Versuch manuell abgebrochen.

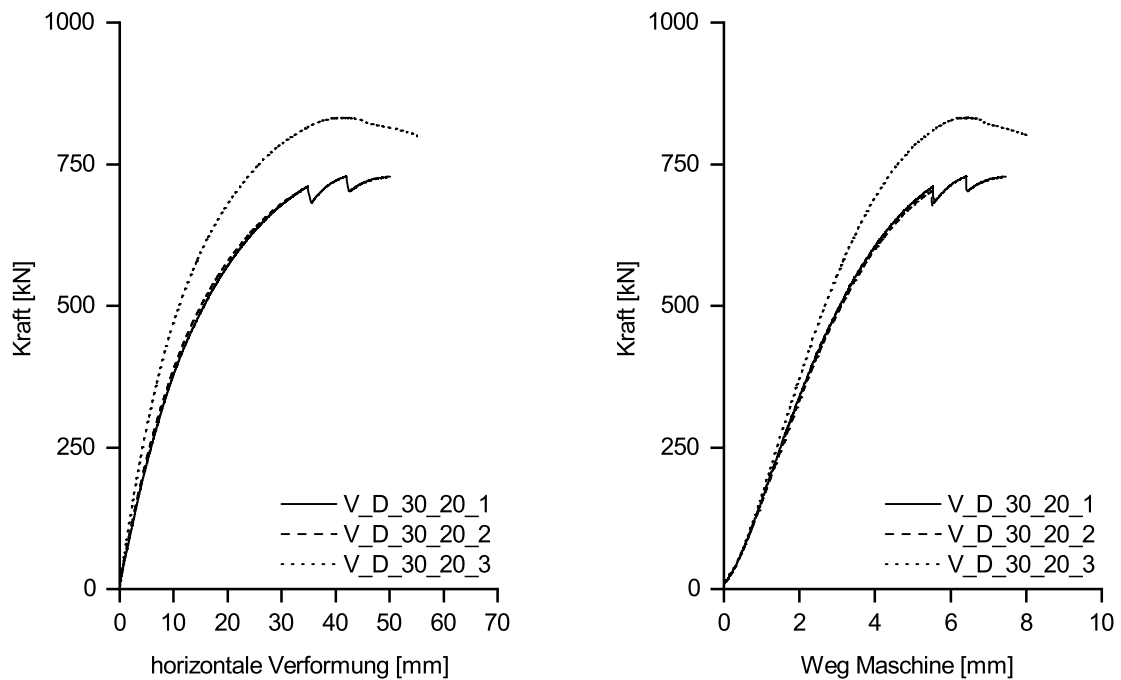
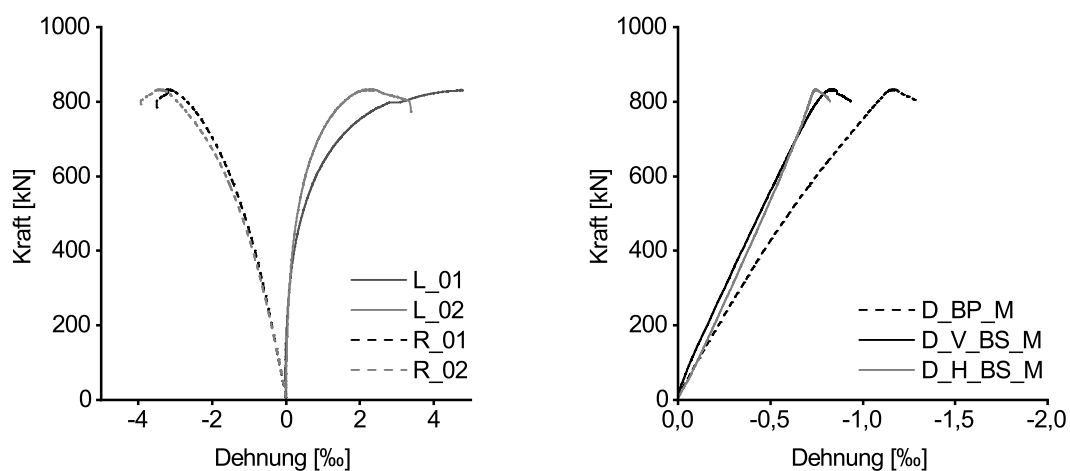


Abbildung 6.12: Kraft-horizontale Verformung und Kraft-Weg Diagramm der 20 mm exzentrischen Versuche

Wie in Abbildung 6.13 für Versuch V_D.30.20.3 dargestellt, sind die Dehnungsverläufe für die Holz- und Betondehnung in Wandmitte affin zu den Verläufen mit 10 mm Exzentrizität. Bei den Versuchen V_D.30.20.1 und V_D.30.20.2 sind diese Verläufe bis zum Versagen, trotz der unterschiedlichen Versagensart ähnlich.



(a) Holzdehnung

(b) Betondehnung

Abbildung 6.13: Dehnungen in Wandmitte bei Versuch V_D.30.20.3

6.3.2 Versuche mit alternierendem Wandkern aus Beton und Holz

Zentrischer Versuch

Die Ergebnisse des zentrisch belasteten Versuchs mit alternierend aufgebautem Wandkern zeigt Abbildung 6.14. Die Knicklast betrug bei diesem Versuch 1070 kN, einhergehend mit dem Ausknicken sind ein schlagartiger Lastabfall, sowie die Zunahme der horizontalen Verformung in Wandmitte.

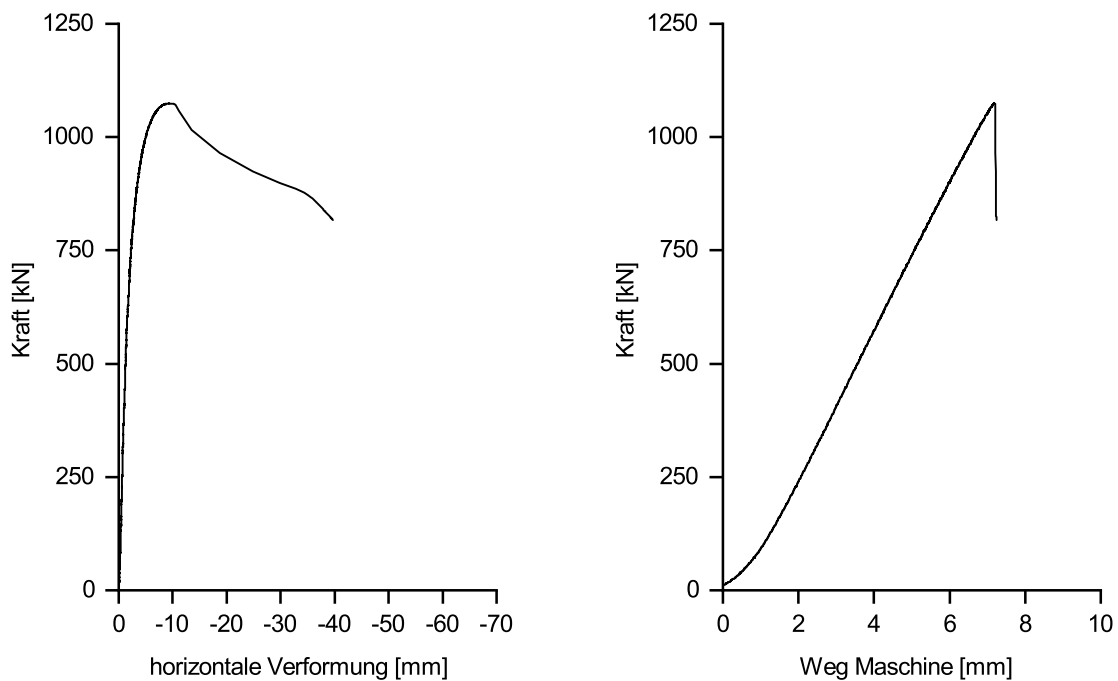


Abbildung 6.14: Kraft-horizontale Verformung und Kraft-Weg Diagramm des zentrischen Versuchs

Abbildung 6.15 stellt die Verläufe der Holzdehnung und Betondehnung dar. Die Betondehnung wurde nur an der im Querschnitt hinten angeordneten Betonlamelle aufgezeichnet. Die Verläufe sind affin zu denen mit durchgängigem Kern. Alle Dehnungen stiegen linear an und vor Erreichen der Knicklast erfuhren die außenliegenden auf der Zugseite angeordneten DMS eine Zugbeanspruchung. Die Betondehnung verläuft linear und fällt nach dem Ausknicken schlagartig ab.

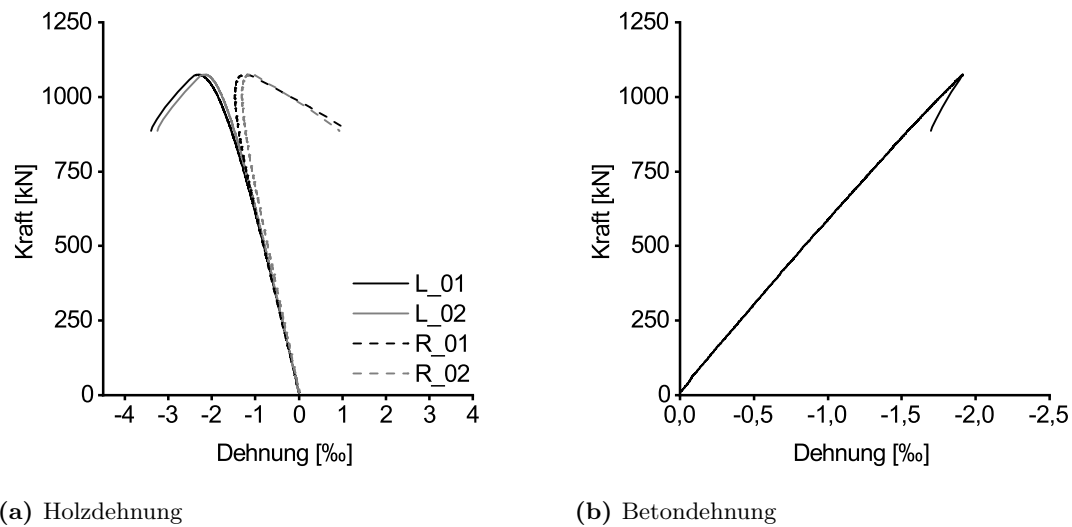


Abbildung 6.15: Dehnungen in Wandmitte bei Versuch V_A_30_00_1

10 mm exzentrischer Versuch

Der Versuch mit alternierend aufgebautem Wandkern und 10 mm exzentrisch angeordneter Belastung zeigte ein identisches Verhalten wie die Versuche mit durchgängigem Betonkern. Die Maximalkraft betrug 733 kN, der Prüfkörper zeigte ein duktiles Bauteilverhalten. In Abbildung 6.16 ist das dazugehörige Kraft-Verformungsdiagramm und Kraft-Wegdiagramm dargestellt.

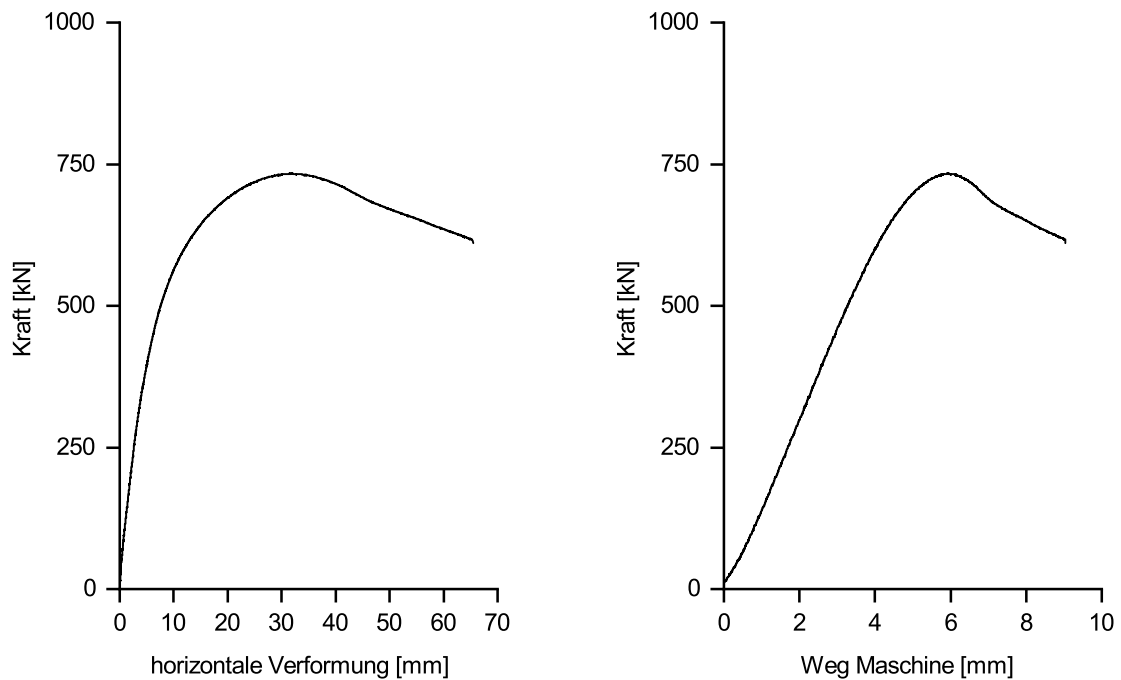
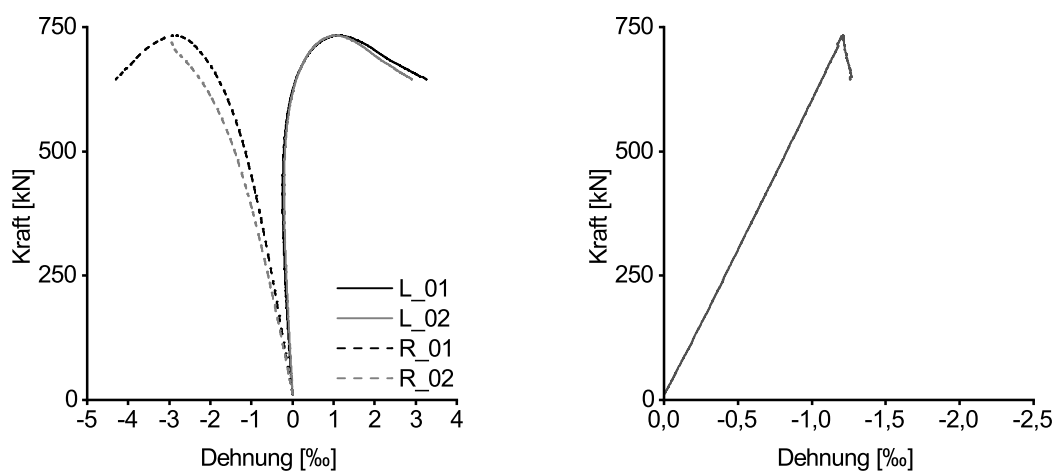


Abbildung 6.16: Kraft-horizontale Verformung und Kraft-Weg Diagramm des exzentrischen Versuchs

Die Dehnungsverläufe in Wandmitte zeigt Abbildung 6.17. Die Verläufe sind identisch zu den anderen exzentrischen Versuchen. Die maximale Betondehnung betrug $-1,2 \text{ ‰}$ und die Holzdehnung bei Erreichen der Maximallast betrug auf der gezogenen Seite $1,1 \text{ ‰}$ und auf der gedrückten Seite $-2,8 \text{ ‰}$.



(a) Holzdehnung

(b) Betondehnung

Abbildung 6.17: Dehnungen in Wandmitte bei Versuch V_A_30_10_1

6.3.3 Versagensarten

Duktiles Versagen

Duktiles Versagen war dadurch gekennzeichnet, dass nach dem Erreichen der Maximallast die Kraft wieder abfiel und die horizontale Verformung in Wandmitte zunahm. Während der Versuchsdurchführung war im oberen Lastbereich ein lautes Knacken zu vernehmen. Beim Ausbau der Versuchskörper waren in Wandmitte in den äußersten Holzlamellen der gestauchten Seite Druckfalten augenscheinlich erkennbar. Abbildung 6.18 zeigt exemplarisch für Versuch V_D_30_10_2 die Druckfalten in Wandmitte.

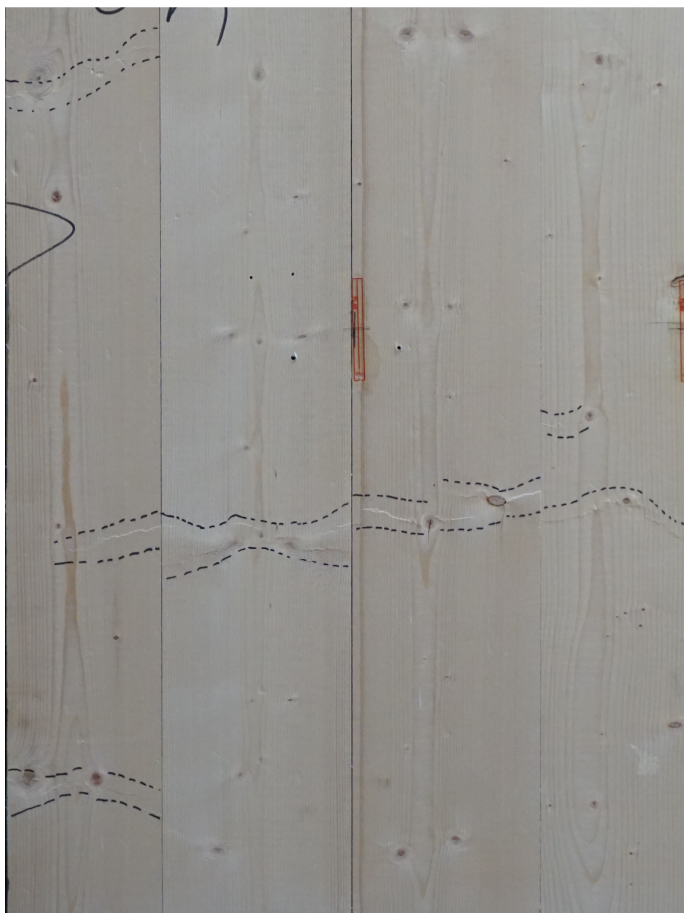


Abbildung 6.18: Druckfalten der äußersten Holzlamellen in Wandmitte bei Versuch V_D_30_10_2

Schlagartiges Versagen

Beim schlagartigem Versagen versagt der Prüfkörper ohne Vorankündigung bei Erreichen der Bruchlast. Dieses Verhalten trat bei drei exzentrisch belasteten Prüfkörpern auf. Abbildung 6.19 zeigt die drei Prüfkörper unmittelbar nach dem Versagen. Zu erkennen war, dass bei

diesen Versuchen die Klebefuge zwischen Holz und Beton versagte, da der Bruch in dieser Grenzfläche stattfand.

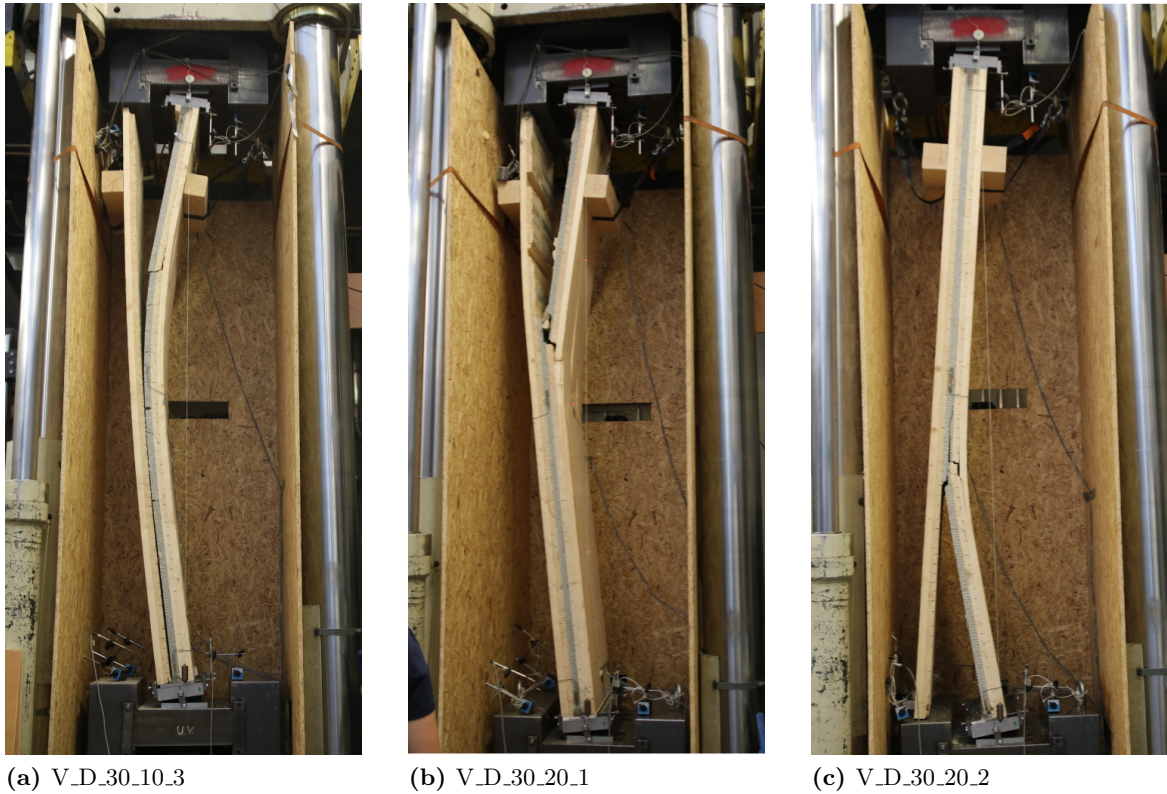


Abbildung 6.19: Versuchskörper nach schlagartigem Versagen

Bei Versuch V_D_30_20_2 wurden während der Versuchsdurchführung am unteren Rollenkipplager im Sekundentakt Fotos aufgezeichnet. Abbildung 6.20 zeigt vier Bilder im Lagerbereich unmittelbar vor dem Versagen. In Teilbild a) ist noch kein Riss zu erkennen. Teilbild b) weist bereits einen Riss zwischen dem Kern aus Beton und Holz auf. Dieser Riss vergrößert sich bis zum Teilbild d) und ist hier gut ersichtlich. Im nächsten von der Kamera aufgezeichneten Bild, welches nicht mehr dargestellt ist, trat bei dem Prüfkörper das Versagen auf, wie in Abbildung 6.19 Teilbild c) dargestellt.

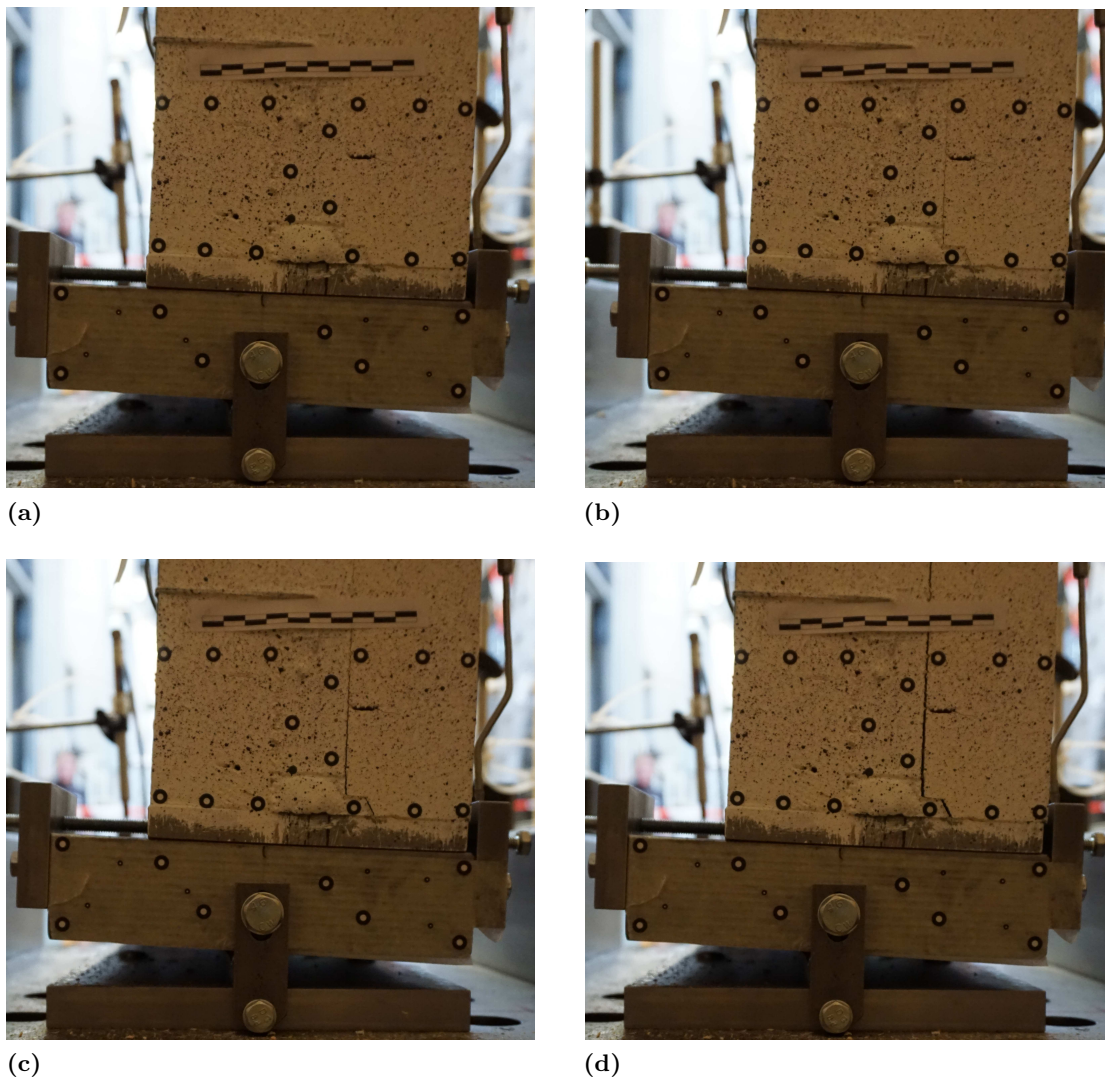


Abbildung 6.20: Rissentwicklung am Wandfuß bei Versuch V.D.30.20.2

Eine mögliche Ursache hierfür könnte sein, dass es der Lagerkonstruktion geschuldet, zu einer Querkzugbeanspruchung der Klebefuge kam. Das aufgebrachte Moment führt zu einer Verkrümmung des Bauteils. Die Holzlamellen auf der gezogenen Bauteilseite haben das Bestreben sich der Bauteilkrümmung zu entziehen. Hierdurch und durch die im System vorherrschenden Querkräfte, resultierend aus dem Biegemoment, entstehen horizontale Kräfte. Die horizontalen Kräfte müssen vom Prüfkörper über die aufgeschraubte Stahlplatte in die Lagerkonstruktion geleitet werden. Abbildung 6.21 veranschaulicht die Lagersituation am Wandkopf im verformten Zustand. Solange der gesamte Wandquerschnitt im Auflagerbereich überdrückt ist, verkeilen sich die Holzlamellen auf der gezogenen Querschnittseite mit der Stahlplatte und können so horizontale Kräfte ableiten. Ist der Querschnitt nicht überdrückt, kann sich die Wirkung der Verkeilung nicht oder nur unzureichend einstellen und die Horizontalkräfte können nicht an die Lagerkonstruktion abgegeben werden. Die vorherrschenden

den Horizontalkräfte werden als Querkzugkräfte im Querschnitt weitergeleitet, bis sie in die Lagerkonstruktion abgegeben werden können. Überschreiten die Querkzugkräfte die von der Klebefuge aufnehmbaren Querkzugkräfte, tritt ein Versagen in der Klebefuge ein. (Maierbeck, 2020)

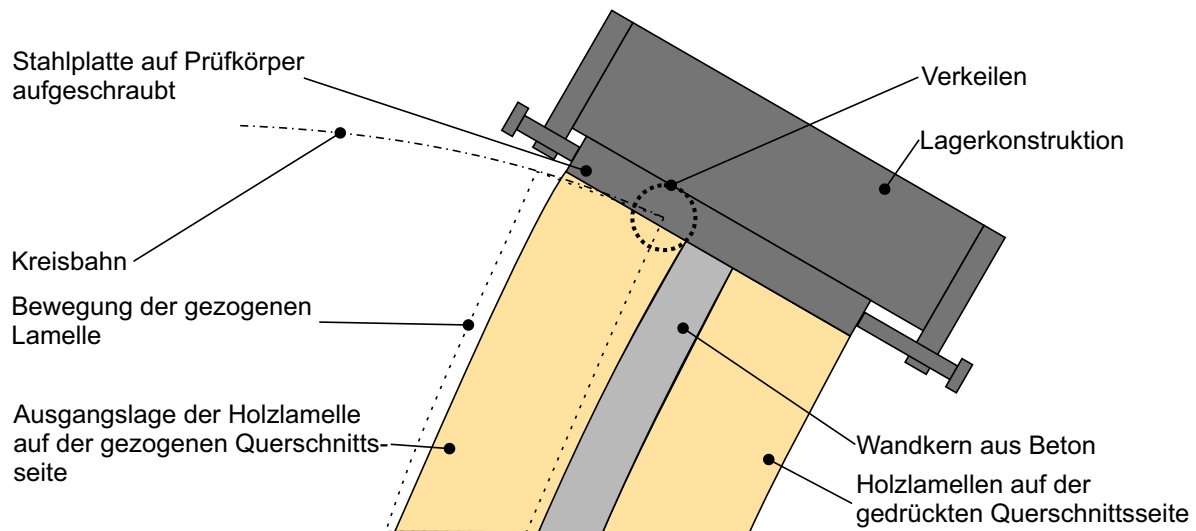


Abbildung 6.21: Lagersituation im verformten Zustand nach Maierbeck (2020)

Dies ist auch anhand der Dehnungsverläufe der gezogenen Querschnittsseite im Auflagerbereich des Wandfußes und Wandkopfs zu erkennen. Abbildung 6.22 zeigt die aus beiden DMS gemittelten Dehnungsverläufe für die Versuche mit 10 mm Exzentrizität, grau dargestellt, und 20 mm Exzentrizität in schwarz. Die gestrichelte Linie kennzeichnet diejenigen Versuche, bei denen das schlagartige Versagen am Wandfuß oder am Wandkopf auftrat. Im Bereich des Wandfußes versagte Versuch V_D.30.20.2, schwarz gestrichelte Linie, die Dehnung ist hier im Vergleich zu allen anderen Versuchen sogar positiv, was den Rückschluss zulässt, dass der Querschnitt nicht vollständig überdrückt war. Im Bereich des Wandkopfs zeichnet sich dieses Verhalten nicht so deutlich ab. Die zwei Versuchskörper die im Bereich des Wandkopfs versagten zeigen eine mittlere Dehnung von knapp über 0 ‰. Die Versuche mit 10 mm Exzentrizität weisen deutliche Druckstauchungen auf, während hingegen die Versuche mit 20 mm Exzentrizität eine geringere Dehnung erfahren haben. Aus diesem Grund wird angenommen, dass bei den Versuchen V_D.30.10.3 und V_D.30.20.1 neben den geometrischen Randbedingungen auch qualitative Schwankungen in der Verklebung ursächlich für das schlagartige Versagen sein könnten. Ähnliches wird auch von Maierbeck (2020) beschrieben.

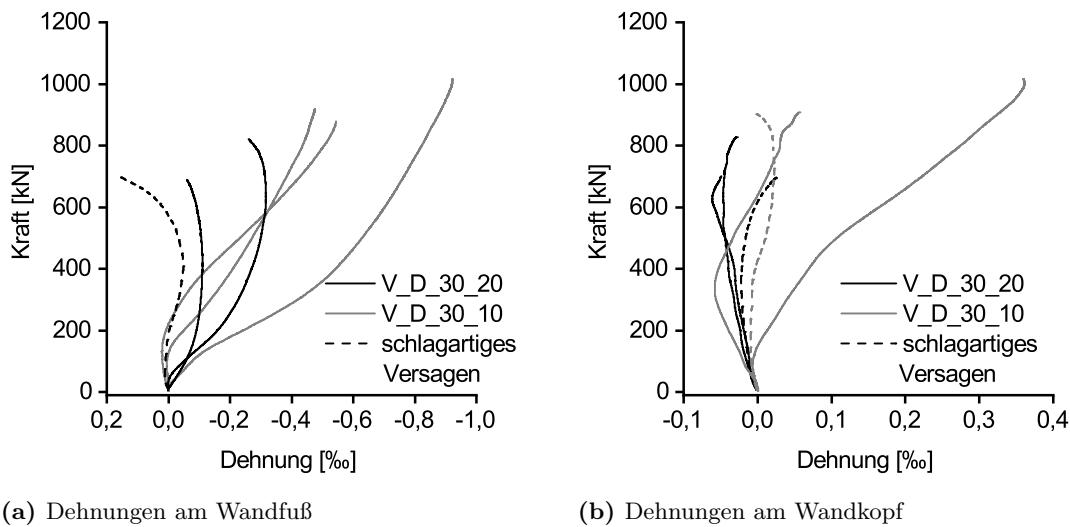


Abbildung 6.22: Dehnungen am auf der gezogenen Seite am Wandfuß und am Wandkopf für die Versuche mit 10 mm und 20 mm Exzentrizität

Ebenfalls zeigten die zentrisch belasteten Versuche ein schlagartiges Versagen, was charakteristisch für Stabilitätsprobleme ist. Nach dem Ausbau der Prüfkörper war keine Materialschädigung augenscheinlich zu vernehmen.

6.4 Zwischenfazit

Als Fazit der hier durchgeführten Bauteilversuche kann gezogen werden, dass eine Herstellung von Wänden mit zusammengesetztem Querschnitt im industriellen Umfeld möglich ist. Große Sorgfalt ist hinsichtlich der Toleranzen zu wahren, besonders dann, wenn in einem Wandelement sowohl Betonelemente als auch Holz im Kern verbaut wird. Aus den Versuchen geht hervor, dass ein duktiles Bauteilversagen möglich und Querkraft auf die Klebefuge zu vermeiden ist.

7 Bemessungsvorschlag und Anschluss-details

7.1 Modellierung der Bauteilversuche

7.1.1 Allgemeines

Die Modellierung der Bauteilversuche erfolgte analytisch mit dem bekannten Formelwerk zur Bestimmung von Knicklasten für zentrisch gedrückte Stäbe, sowie der Lösung der Differentialgleichung nach Theorie II. Ordnung für exzentrisch belastete Stäbe. Bei der analytischen Modellierung wurden vereinfacht ideale Auflagerbedingungen angenommen. Versteifende Effekte aus den Auflagern, z. B. die Verwendung von Stahl anstelle von Holz im Lagerbereich und die aus den Reibungskräften entstehenden rückdrehenden Momente, blieben unberücksichtigt.

Zur Modellierung der Bauteilversuche wurde das System durch einen zentrisch und exzentrisch gedrückten Pendelstab idealisiert, wie Abbildung 7.1 zeigt. Die Länge der Pendelstäbe betrug 2,97 m, die Exzentrizität war analog zu den Versuchen mit 10 mm bzw. 20 mm angesetzt.

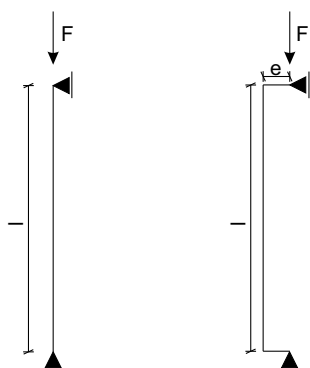


Abbildung 7.1: Statische Systeme der modellierten Pendelstäbe

Zur Untersuchung der zentrisch belasteten Wandelemente wird die im Versuch ermittelte Knicklast mit der rechnerisch bestimmten verglichen. Die rechnerische Ermittlung der Knick-

last erfolgte mithilfe der bekannten Euler-Formeln. Nach Winter *et al.* (2008) wurde anstelle der Biegesteifigkeit EI die effektive Biegesteifigkeit efB , welche die Schubverformungen des Aufbaus berücksichtigt, angesetzt, wie in Gleichung 7.1 aufgeführt.

$$P_{ki} = \frac{\pi^2}{s_k^2} \cdot efB \quad (7.1)$$

mit:

P_{ki}	kritische Knicklast
s_k	Knicklänge
efB	effektive Biegesteifigkeit

Bei schlanken Bauteilen unter Normalkraftbeanspruchung, führt die Verformung des Bauteils zu einer Vergrößerung der Schnittgrößen (Theorie II. Ordnung). Dieser Effekt war für die Modellierung der Versuche zu berücksichtigen. Bei den exzentrischen Versuchen wurde der Momenten- und Verformungsverlauf entlang der Länge l mit der Differentialgleichung nach Theorie II. Ordnung bestimmt. Gleichung 7.2 zeigt die allgemeine Differentialgleichung nach Theorie II. Ordnung für die in Abbildung 7.1 rechts dargestellte exzentrisch belastete Pendelstütze. Unter Berücksichtigung der vorherrschenden Randbedingungen konnte die Verformung für jeden Punkt x im System mit Gleichung 7.3 bestimmt werden.

$$w^{II}(x) + \alpha^2 w(x) = -\alpha^2 \cdot e \quad (7.2)$$

$$w_{II}(x) = \frac{e - e \cos(\alpha l)}{\sin(\alpha l)} \cdot \sin(\alpha x) + e \cos(\alpha x) - e \quad (7.3)$$

mit

α^2	Stabkennzahl; $\alpha^2 = \frac{F}{EI}$
$w_{II}(x)$	Verformung an der Stelle x nach Theorie II. Ordnung
l	Länge
e	Exzentrizität

Mit der nach Gleichung 7.3 bestimmten Verformung ergab sich der zugehörige Momentenverlauf nach Gleichung 7.4 aus dem sich wiederum der Querkraftverlauf nach Gleichung 7.5 bestimmen ließ.

$$M_{II}(x) = F \cdot e + F \cdot w(x) = F \cdot \left(\frac{e - e \cos(\alpha l)}{\sin(\alpha l)} \cdot \sin(\alpha x) + e \cos(\alpha x) \right) \quad (7.4)$$

$$Q_{II}(x) = F \cdot \left(\frac{e - e \cos(\alpha l)}{\sin(\alpha l)} \cdot \cos(\alpha x) - e \sin(\alpha x) \right) \quad (7.5)$$

mit

α^2	Stabkennzahl; $\alpha^2 = \frac{F}{EI}$
F	aufgebrachte Kraft
l	Länge
e	Exzentrizität

Um die aus der Schubverformung resultierende zusätzliche Verformung zu berücksichtigen wurde anstelle der Biegesteifigkeit EI die effektive Biegesteifigkeit efB zur Lösung der Gleichungen 7.3, 7.4 und 7.5 verwendet. Die effektive Stabkennzahl nach Gleichung 7.6 ergab sich zu:

$$\alpha_{ef}^2 = \frac{F}{efB} \quad (7.6)$$

mit

F	aufgebrachte Kraft
efB	effektive Biegesteifigkeit

Die Ermittlung der effektiven Biegesteifigkeit beruhte auf den Ansätzen der Schubanalogie. Nachfolgend ist entsprechendes Formelwerk aufgeführt, welches Winter *et al.* (2008) zu entnehmen ist. Hierfür wurden die Eigenanteile nach Gleichung 7.7 und die Steineranteile nach Gleichung 7.8 der Biegesteifigkeit ebenso wie die Ersatzschubsteifigkeit nach Gleichung 7.9 des Gesamtquerschnitts bestimmt. Die effektive Biegesteifigkeit ergab sich in Abhängigkeit des statischen Systems nach Gleichung 7.10.

$$B_A = \sum_{i=1}^n (E_i \cdot \frac{d_i^3}{12}) \quad (7.7)$$

$$B_B = \sum_{i=1}^n (E_i \cdot d_i \cdot z_{s,i}^2) \quad (7.8)$$

mit

E_i	E-Modul der jeweiligen Lage
d_i	Dicke der jeweiligen Lage
$z_{s,i}$	Abstand der jeweiligen Lage zum Gesamtschwerpunkt des Querschnitts

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{a^2} \left\{ \frac{d_1}{2 \cdot G_1} + \sum_{i=2}^{n-1} \left(\frac{d_i}{G_i} \right) + \frac{d_n}{2 \cdot G_n} \right\} \quad (7.9)$$

mit

G_i	Schubmodul der jeweiligen Lage parallel zur betrachteten Tragrichtung
d_i	Dicke der jeweiligen Lage
a	Abstand der äußersten, parallel zur betrachteten Tragrichtung, verlaufenden Schichten

$$efB = B_A + B_B \cdot \frac{1}{1 + \frac{B_B \cdot \pi^2}{S} \cdot s_k^2} \quad (7.10)$$

mit

B_A	Eigenanteile
B_B	Steineranteile
S	Ersatzschubsteifigkeit
s_k	Knicklänge

Aufbauend auf dem Momenten- und Querkraftverlauf ergaben sich die Normal- und Schubspannungsverläufe aus den Gleichungen 7.11, 7.12 und 7.13. Vereinfacht wurden diese Verläufe unter Berücksichtigung der schubstarken Verbundtheorie berechnet, da dies nach Winter *et al.* (2008) bei baupraktisch relevanten Abmessungen ausreichend genaue Ergebnisse liefert. Zur Bestimmung der Spannung an einer bestimmten Stelle i im Querschnitt, wurden die Materialparameter der jeweiligen Schicht verwendet.

$$\sigma_m = \frac{M_{II}}{B} \cdot E_i \cdot \frac{d_i}{2} \quad (7.11)$$

$$\sigma_c = \frac{F}{D} \cdot E_i + \frac{M_{II}}{B} \cdot E_i \cdot z_{s,i} \quad (7.12)$$

mit

σ_m	Biegespannung
σ_c	Normalspannung
F	einwirkende Normalkraft
M_{II}	Biegemoment nach Theorie II. Ordnung
B	Biegesteifigkeit des gesamten Querschnitts, $B = B_A + B_B$
D	Dehnsteifigkeit des gesamten Querschnitts, $D = \sum E_i \cdot A_i$
E_i	E-Modul der Schicht i
d_i	Dicke der Schicht i
$z_{s,i}$	Schwerpunktabstand der betrachteten Lamelle zum Querschnittsschwerpunkt

$$\tau_R = \frac{V_{II}}{a} \quad (7.13)$$

mit

τ_R	Rollschubspannung
V_{II}	Querkraft nach Theorie II. Ordnung
a	Abstand der äußersten, parallel zur betrachteten Tragrichtung, verlaufenden Schichten

Mit den nach Gleichung 7.11, 7.12 und 7.13 ermittelten Spannungen wurden die Spannungsnachweise nach Gleichung 7.14 und 7.15 geführt. Die maximale Tragfähigkeit wurde iterativ durch die stetige Erhöhung der einwirkenden Kraft F bestimmt. Beim Überschreiten der Nachweisbedingung erfolgte der Abbruch des iterativen Prozesses. Zudem wurde die horizontale Verformung in Wandmitte ausgegeben.

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_m}{f_m} \leq 1 \quad (7.14)$$

$$\frac{\tau_R}{f_{v,R}} \leq 1 \quad (7.15)$$

mit

σ_m	Biegespannung
σ_c	Normalspannung
τ_R	Rollschubspannung
f_c	Druckfestigkeit
f_m	Biegefestigkeit
$f_{v,R}$	Rollschubfestigkeit

7.1.2 Verwendete Materialeigenschaften für die Modellierung

Zur Modellierung der Versuche wurden für den Beton die mit den Begleitversuchen bestimmten Materialparameter verwendet. Die Betondruckfestigkeit betrug im Mittel 133 N/mm² und der E-Modul 46800 N/mm². Mit einer Querdehnzahl von 0,2 ergab sich ein Schubmodul von 19500 N/mm².

Das verwendete Fichtenholz zur Herstellung der Prüfkörper erfüllte laut Herstellerangaben die Mindestfestigkeiten der Festigkeitsklasse C24 nach DIN EN 338. Die Nachrechnung der Versuche erfolgte jedoch mit den unterschiedlichen Festigkeitsklassen nach DIN EN 338. Der nicht normativ geregelte Rollschubmodul des Holzes wurde nach Winter *et al.* (2008) zu $G_{R,mean} = 0,1 \cdot G_{mean}$ bestimmt. Alle bei der Nachrechnung verwendeten Materialeigenschaften sind in Tabelle 7.1 aufgeführt.

Für beide Materialien kam ein linear-elastisches Materialgesetz zur Modellierung zum Einsatz. Für den Beton geht zum einen aus Kapitel 6.3 hervor, dass die im Beton hervorgerufenen Dehnungen im linear-elastischen Bereich sind, und zum anderen zeigte sich in den durchgeführten Begleitversuchen des Betons, dass die Spannungs-Dehnungslinie bis annähernd zum Bruch linear elastisch verläuft. Die Spannungs-Dehnungslinie von Holz ist unter Druckbeanspruchung bis zu ca. 70% der Druck-Bruchspannung linear und geht dann in einen gekrümmten Verlauf über. Unter Zugbeanspruchung verhält sich Holz weitestgehend elastisch (Petersen, 1992). Aufgrund der großen Streuungen der Materialeigenschaften des Holzes, wird hier vereinfachend ein linear-elastisches Materialgesetz für die Nachrechnung verwendet.

Tabelle 7.1: Verwendete Festigkeitseigenschaften für die Nachrechnung der Bauteilversuche

		Holz				Beton
Klasse		C24	C30	C40	C50	
Festigkeitseigenschaften [N/mm ²]						
Biegung	$f_{m,k}$	24,0	30,0	40,0	50,0	
Zug	$f_{t,0,k}$	14,5	19,0	26,0	33,5	
Druck	$f_{c,0,k}$	21,0	24,0	27,0	30,0	132,5
Schub	$f_{v,k}$	4,0	4,0	4,0	4,0	
Mittelwert des E-Moduls	$E_{m,0,mean}$	11.000	12000	14000	16000	46774
Mittelwert des Schubmoduls	G_{mean}	690	750	880	1000	19489
Rollschubmodul	$G_{R,mean}$	69	75	88	100	

7.1.3 Zentrische Bauteilversuche

In Tabelle 7.2 sind die in den Versuchen erzielten Knicklasten der zentrisch belasteten Versuche sowie die berechneten Knicklasten aufgeführt. Zur Modellierung wurden die in Kapitel 7.1.1 aufgeführten Formeln verwendet. Bei der Modellierung der Versuche mit alternierend aufgebauten Wandkern wurden die Materialeigenschaften von Beton und Holz für den Wandkern gemittelt. Es zeigt sich, dass die im Versuch erzielten Knicklasten für alle Versuche größer sind als die mit den Eigenschaften der Holzfestigkeitsklasse C24 berechneten.

Tabelle 7.2: Knicklasten [kN] der zentrischen Bauteilversuche

Versuchsergebnisse		Ergebnis der Nachrechnung mit Holzfestigkeitsklasse			
Versuch	Ergebnis	C24	C30	C40	C50
V_D_30_00_1	1677				
V_D_30_00_2	1693	1224	1329	1542	1752
V_D_30_00_3	1331				
V_D_45_00_1	1822	1399	1507	1727	1944
V_A_30_00_1	1070	961	1046	1216	1386

7.1.4 Exzentrische Bauteilversuche

Bei den exzentrischen Bauteilversuchen werden die rechnerisch ermittelten Dehnungen in Wandmitte im Holz und im Beton und die horizontale Wandverformung der im Versuch bestimmten gegenübergestellt. Abbildung 7.2 zeigt die im Versuch V_D_30_10_1 bestimmte Holz- und Betondehnung in schwarz bis zur erreichten Maximallast, sowie die rechnerisch bestimmten Dehnungen für die unterschiedlichen Holzfestigkeitsklassen in Grautönen. Es zeigt sich, dass sowohl im Versuch als auch bei der Berechnung die Betondehnungen in Querschnittsmitteln linear mit der Kraft anwachsen. Die berechneten Holzdruck- und zugdehnungen verlaufen affin zu den im Versuch bestimmten.

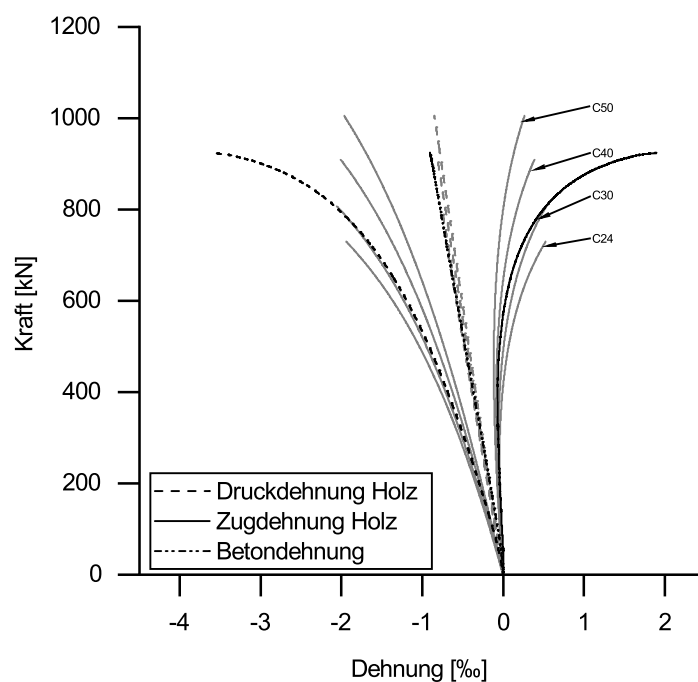


Abbildung 7.2: Vergleich der rechnerisch ermittelten Dehnung für verschiedene Holzfestigkeiten mit im Versuch V_D_30_10_1 bestimmten Dehnungen

Abbildung 7.3 zeigt die berechnete horizontale Verformung in Wandmitte für die verschiedenen Holzfestigkeiten und die dazugehörige im Versuch V_D_30_10_1 bestimmte Verformung. Auch hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung der beiden Verläufe. Wie bei den Dehnungsverläufen ist auch hier zu erkennen, dass der Übergang in den horizontalen Bereich nicht abgebildet werden kann, was auf eine Unterschätzung der Holzdruckfestigkeit bei der Modellierung zurückzuführen ist.

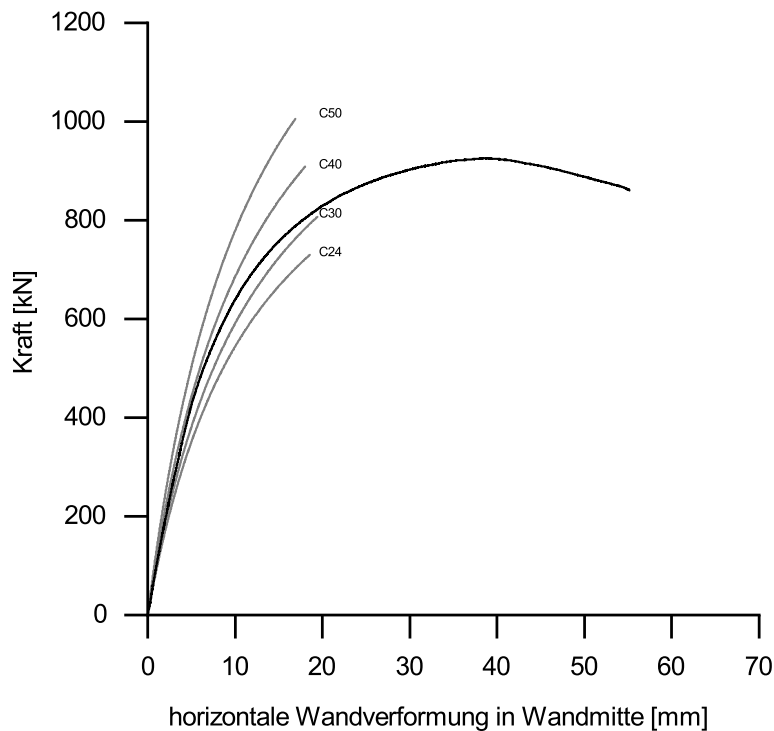


Abbildung 7.3: Vergleich der rechnerisch ermittelten horizontalen Verformung für verschiedene Holzfestigkeiten mit im Versuch bestimmter Verformung bei V_D_30_10_1

Die Abbildungen 7.4, 7.5 und 7.6 zeigen die Dehnungsverläufe sowie die Kraft-Verformungsdiagramme des Versuchs mit 45 mm dickem Betonkern, des alternierenden Aufbaus des Wandkerns sowie eines Versuchs mit 20 mm Exzentrizität. Auch bei diesen Versuchen zeigte sich eine gute Übereinstimmung des qualitativen Verlaufs der Versuchskurven mit den berechneten Ergebnissen.

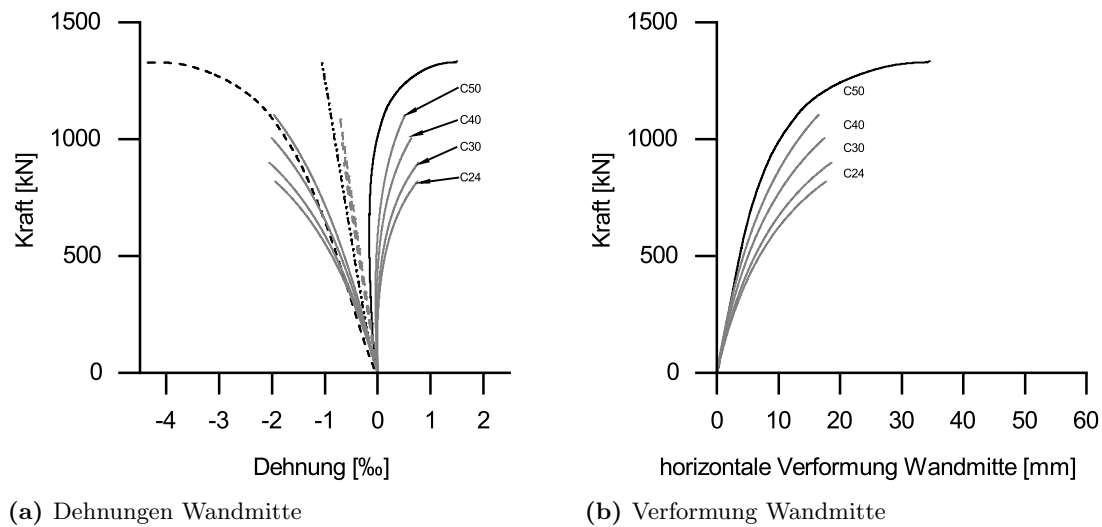


Abbildung 7.4: Vergleich der rechnerisch ermittelten Dehnungen und Verformungen für verschiedene Holzfestigkeiten mit im Versuch bestimmten Daten mit 45 mm Betonkern

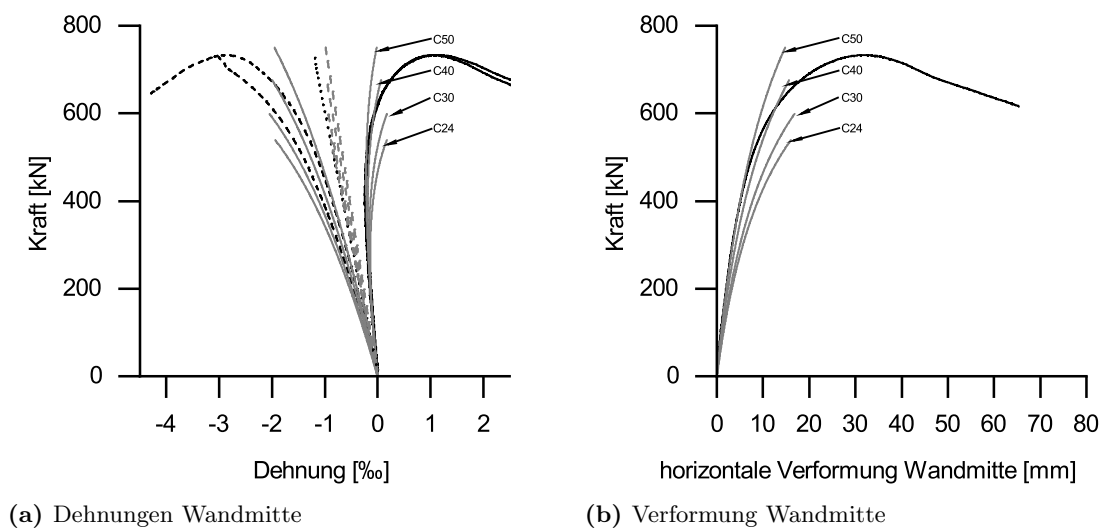


Abbildung 7.5: Vergleich der rechnerisch ermittelten Dehnungen und Verformungen für verschiedene Holzfestigkeiten mit im Versuch bestimmten Daten mit alternierendem Wandkern und 10 mm Exzentrizität

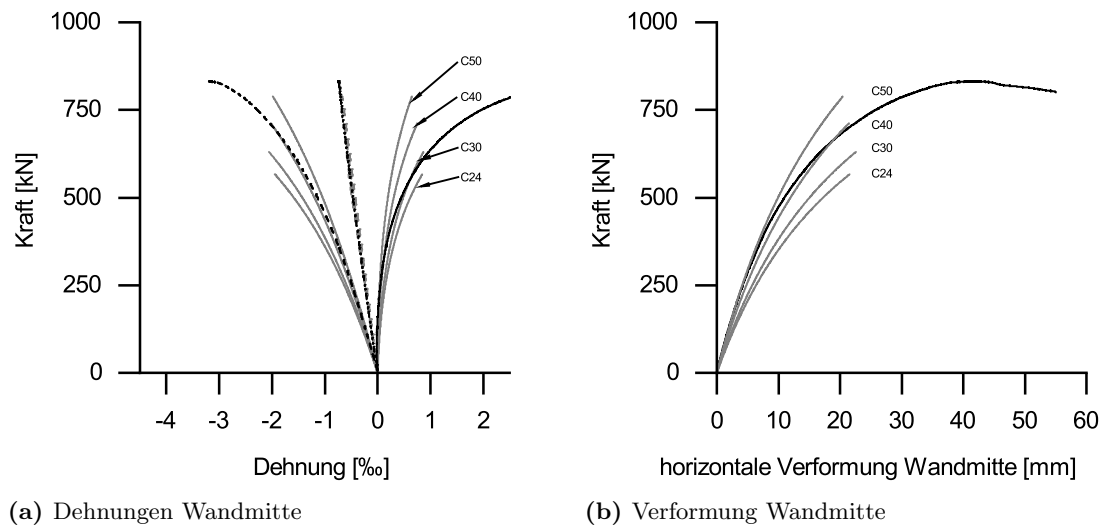


Abbildung 7.6: Vergleich der rechnerisch ermittelten Dehnungen und Verformungen für verschiedene Holzfestigkeiten mit im Versuch bestimmten Daten mit 30 mm Betonkern und 20 mm Exzentrizität

7.1.5 Bemessungsvorschlag

Aufbauend auf den durchgeführten Bauteilversuchen sowie der Modellierung dieser Versuche mit der Schubanalogie wird vorgeschlagen, Brettsperrholzwände mit zusammengesetztem Querschnitt abschnittsweise zu Bemessen. Im Bereich der eingeklebten Betonplatte kann die Bauteilsteifigkeit basierend auf der Schubanalogie unter Berücksichtigung der höheren Steifigkeitseigenschaften des Betons bestimmt werden. Darauf aufbauend lassen sich die Verformung sowie die Schnittgrößen bestimmen. Damit und mit den Bauteilsteifigkeiten kann die maximal vorherrschende Spannung ermittelt und mit den zulässigen Spannungen verglichen werden. Die Spannungsnachweise sollten für das Holz und den Beton geführt werden. Es ist darauf zu achten, dass der Betonkern vollständig überdrückt ist. Im Bereich des reinen Holzquerschnitts erfolgt die Bemessung mit den bekannten Verfahren.

7.1.6 Vergleichsbetrachtung

Um den Unterschied zwischen einer reinen Brettsperrholzwand und einer Wand mit zusammengesetztem Querschnitt aufzuzeigen, wird die rechnerische Tragfähigkeit von unterschiedlichen Wandaufbauten auf Bemessungsniveau verglichen. Das statische System entspricht dem in Abbildung 7.1 rechts. Betrachtet werden Exzentrizitäten von 10 mm und 20 mm und die Wandlänge beträgt 0,5 m. Die Wandaufbauten sind fünf lagig und weisen eine Querschnittsdicke von 15 cm und 32 cm auf. Die Lamellendicke beträgt für jede Lage 30 mm bei dem 15 cm dicken Wandaufbau, die Lamellendicken bei der 32 cm dicken Wand betragen 80-40-

80-40-80 mm. Die 80 mm dicken Lagen bestehen aus zwei 40 mm dicken Längslagen. Bei den Wänden mit zusammengesetztem Querschnitt ist die Kerndicke affin zur Kerndicke der homogenen Brettsperrholzwand. Die Bemessungswerte für das Holz werden nach den Gleichungen 7.16 und 7.17 sowie für den Beton nach 7.18, 7.19 und 7.20 berechnet. Grundlage für die Bestimmung der Bemessungswerte für das Holz bilden die Materialkennwerte für Fichte der Festigkeitsklasse C24 nach DIN EN 338 und für den Beton die aus den Begleitversuchen der Bauteilversuche bestimmten Eigenschaften. Für die E-Moduli werden die Mittelwerte verwendet. Die verwendeten Bemessungswerte sind in Tabelle 7.3 aufgeführt.

$$f_d = k_{mod} \cdot \frac{f_k}{\gamma_M} \quad (7.16)$$

$$E_d = \frac{E_{mean}}{\gamma_M} \quad (7.17)$$

mit

f_d	Spannung auf Bemessungsniveau
f_k	charakteristische Spannung
E_{mean}	Mittelwert des E-Moduls
$k_{mod} = 0,8$	Modifikationsbeiwert
$\gamma_M = 1,3$	Teilsicherheitsbeiwert

$$f_{c,d} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_M} \quad (7.18)$$

$$E_{c,d} = \frac{E_{mean}}{\gamma_M} \quad (7.19)$$

$$G_{c,d} = \frac{E_{mean}}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (7.20)$$

mit

$f_{c,d}$	Druckspannung auf Bemessungsniveau
$f_{c,k}$	charakteristische Druckspannung
E_{mean}	Mittelwert des E-Moduls
G	Schubmodul
$\alpha_{cc} = 0,85$	Dauerstandsbeiwert
$\nu = 0,2$	Querdehnzahl
$\gamma_M = 1,5$	Teilsicherheitsbeiwert

Tabelle 7.3: Verwendete Bemessungswerte in [N/mm²]

	Biegung	Zug	Druck	Rollschub	E-Modul	Schubmodul
Holz	14,77	12,92	8,61	0,5	8461	531
Beton			70,26		31183	12993

Tabelle 7.4 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen getrennt für die unterschiedlichen Wandaufbauten und Exzentrizitäten. Bei der 15 cm dicken Wand mit 10 mm Exzentrizität konnten rechnerische Tragfähigkeitssteigerungen von bis zu 29,41% und bei der 32 cm dicken Wand bis zu 71,38% im Vergleich zur reinen Brettsperrholzwand erzielt werden. Bei der Exzentrizität von 20 mm fällt die Tragfähigkeitssteigerung geringer aus.

Tabelle 7.4: Vergleich der rechnerischen Tragfähigkeit von Wänden mit homogenem und zusammengesetztem Querschnitt

Wandaufbau	15 cm		32 cm	
Exzentrizität	10 mm	20 mm	10 mm	20mm
Bemessungskraft reiner Holzquerschnitt [kN]	374	298	1410	1281
Bemessungskraft hybrider Querschnitt [kN]	484	370	2410	2061
Tragfähigkeitssteigerung [%]	29,41	24,16	71,38	60,89

Wie sich zeigt, kann durch das Einkleben der Betonplatten die Tragfähigkeit beträchtlich gesteigert werden. Die zu erzielende Tragfähigkeitssteigerung ist abhängig von der ausgeführten Dicke der eingeklebten Betonplatte, der anzusetzenden Lastexzentrizität und der Schlankheit der Wand selbst. Je geringer der Einfluss aus Theorie II. Ordnung ausfällt, desto mehr Einfluss gewinnt der Betonkern. Aus diesem Grund ist eine pauschale Aussage zur Tragfähigkeitssteigerung durch das Einkleben der Betonplatten nicht möglich.

7.2 Anschlussdetail

Abbildung 7.7 zeigt ein mögliches Anschlussdetail für einen Wand-Decken-Knoten. Das Deckenbauteil ist grau dargestellt und liegt auf der unteren Wand auf. Die aufgehende Wand steht auf der Decke auf. Um einen maschinengesteuerten Zuschnitt der Wandelemente zu ermöglichen, springen die eingeklebten Betonplatten zurück. Es entsteht so ein Versatz zwischen Holz und Beton. Zur Kraftdurchleitung durch die Decke sind Öffnungen im Deckenbauteil vorgesehen. In diese Öffnungen werden vorgefertigte „Betonschwerter“ gesteckt, welche über das Deckenbauteil hinaus in die angrenzenden Wände reichen. Um Fertigungstoleranzen auszugleichen sind die „Betonschwerter“ etwas kürzer ausgeführt, als der planmäßige Abstand zwischen den Betonplatten der übereinanderliegenden Wänden. Damit die in den Betonplatten vorhandene Normalkraft übertragen werden kann, wird der Spalt zwischen „Betonschwert“ und Betonplatte mit einem hochfestem Vergussmaterial ausgefüllt. Zudem ist darauf zu achten, dass keine Querkraftkräfte in der Klebefuge zwischen Holz und Beton entstehen. Um dies zu verhindern, wird vorgeschlagen, im Bereich der Betonplatten Stahlwinkel oder Kanthölzer zur Aufnahme horizontaler Kräfte anzuordnen.

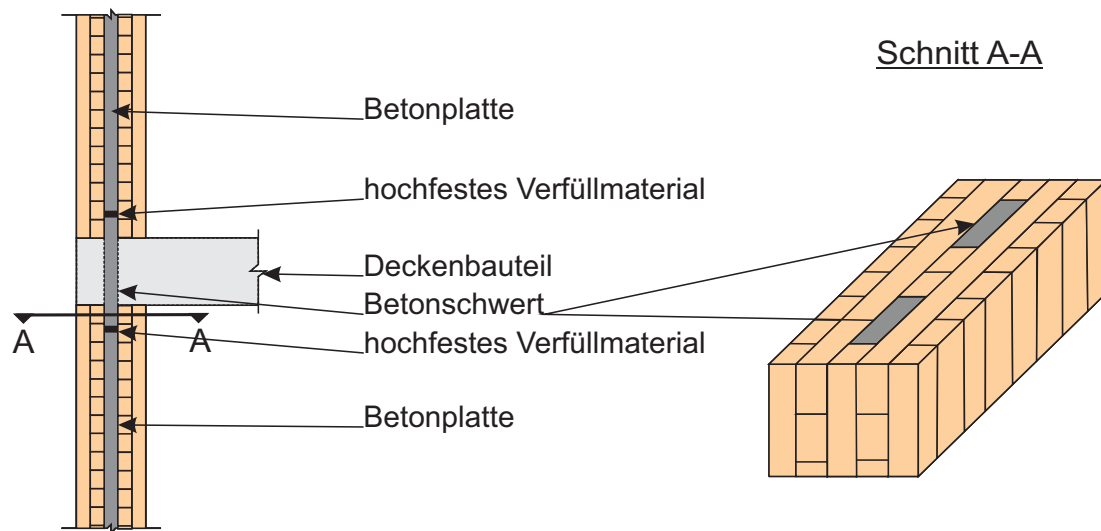


Abbildung 7.7: Anschlussdetail Wand-Decken-Knoten

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Anzahl hoher Gebäude in städtischen Bereichen, sowie dem immer mehr an Bedeutung gewinnenden Faktor des nachhaltigen Bauens bzw. des Bauens mit nachwachsenden Rohstoffen, werden in dieser Arbeit hybride Wandbauteile aus Holz und ultrahochfestem Beton (UHFB) betrachtet. So lassen sich für Wandbauteile besonders effiziente und hochtragfähige Lösungen durch die Kombination von Holz und ultrahochfestem Beton erreichen, in denen sich die Vorteile und Stärken beider Werkstoffe wirkungsvoll ergänzen. Die so entstehenden Hybrid-Wandelemente besitzen einen schlanken Wandkern aus Beton, der von Holz ummantelt ist. Der Betonkern nimmt vorwiegend die auftretenden Druckkräfte auf, während das umgebende Holz die aus Biegemomenten entstehenden Druck- und Zugkräfte mit entsprechendem inneren Hebelarm aufnimmt. Zudem bietet das Holz auch im Lastfall Brand einen „Schutzmantel“ für den hochtragfähigen Betonkern. Die wirtschaftliche Produktion der Wandbauteile findet im industriellen Umfeld der Brettsperrholzproduktion statt. Hierzu werden Betonplatten oder Betonlamellen, welche die gleiche Dicke besitzen wie das verwendete Holz für das Brettsperrholzelement vorgefertigt, und vollständig in den Produktionsprozess der Brettsperrholzherstellung integriert. Die Machbarkeit dieses Herstellungsprozesses hängt vor allem davon ab, ob eine dauerhafte kraftschlüssige Verbindung von Holz und ultrahochfestem Beton, mit in der Brettsperrholzproduktion üblichen Klebstoffen, möglich ist.

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war es, zu klären, wie eine solche kraftschlüssige Verbindung von Holz und ultrahochfestem Beton bei Verwendung von Standardklebstoffen der Brettsperrholzproduktion realisiert werden kann. Aufbauend darauf wurden Berechnungsansätze für Wände mit zusammengesetztem Querschnitt erarbeitet. Zur Schaffung einer experimentellen, wissenschaftlich abgesicherten Grundlage wird dabei sowohl das Kurzzeit-Tragverhalten der Verklebung als auch der fertiggestellten Hybrid-Bauteile selbst untersucht. Darüber hinaus werden in einer Reihe von Tastversuchen auch zeitabhängige Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit der Verklebung, wie z. B. Quellen und Schwinden des Holzes bei Feuchteänderung, betrachtet.

Um das Forschungsziel zu erreichen, wurde zunächst anhand kleinformatiger Versuche die Eignung verschiedener Klebstoffe, Betone und Betonoberflächen untersucht. Darauf aufbauend erfolgten mit vielversprechenden Kombinationen aus Klebstoff und Beton erste Grundlagenversuche zur Dauerhaftigkeit der Verklebung. Nachdem sich eine für den speziellen Anwendungszweck bevorzugt geeignete Kombination aus Klebstoff und Beton herauskristallisiert hatte, wurde unter weiterer Anwendung dieser Kombination das Verbindungsverhalten selbst charakterisiert. Schließlich wurde das Systemtragverhalten an Wandelementen im Maßstab 1:1 untersucht und abschließend unter Einbeziehung aller experimenteller und theoretischer Ergebnisse und Erkenntnisse ein geeigneter Bemessungsvorschlag für die Ingenieurpraxis erarbeitet. Ebenso werden in der Arbeit erste konzeptionelle Ideen zu Verbindungen und Anschlussdetails aufgezeigt.

Der Untersuchungsschwerpunkt zu Beginn des Forschungsvorhabens lag zunächst auf kleinformatigen Druckscherversuchen. Die Abmessungen der Prüfkörper betrug $5 \cdot 5 \text{ cm}^2$. Anhand dieser Versuche wurde die Eignung verschiedener Klebstoffe, Betone und Betonoberflächen zur Herstellung einer kraftschlüssigen Verbindung untersucht. Bewertungskriterien waren insbesondere die erzielte Scherfestigkeit und das dazugehörige Bruchbild. Ein geeignetes Bruchbild war gekennzeichnet durch einen hohen Holzbruchanteil. Unabhängig vom verwendeten Beton konnten vielversprechende Ergebnisse bei der Verwendung eines Ein-Komponenten-Polyurethanklebstoffs bei geschliffenen Betonoberflächen erzielt werden. Ebenfalls gute Ergebnisse zeigten sich beim verwendeten Epoxidharz sowie mit einem Polyurethaneißharz. Als ungeeignet erwiesen sich dagegen Melaminharz- und Phenolresorcinharzklebstoffe.

Mit den vielversprechenden Kombinationen aus Beton und Klebstoff wurden Tastversuchsreihen zur Delaminierungsbeständigkeit durchgeführt. Dabei waren jeweils gute Versuchsergebnisse charakterisiert durch keine bzw. nur eine geringe Fugenöffnung. Es zeigte sich, dass die erzielten Ergebnisse teilweise in einem sehr großen Bereich streuten und eine Reproduzierbarkeit nur bedingt möglich ist. So gab es Prüfkörper, bei denen keinerlei Fugenöffnung sichtbar war, während andere Prüfkörper bereits nach mehreren Stunden in kochendem Wasser vollständig getrennt waren. Eine generell geringe Fugenöffnung zeigte sich bei Verwendung von Beton C1 mit geschliffener Oberfläche und der Verklebung mit einem Ein-Komponenten-Polyurethanklebstoff.

Das Verbindungsverhalten der Klebefuge wurde durch Verbundversuche charakterisiert, bzw. es wurde geprüft, ob die Annahme eines starren Verbundes zwischen Holz und Beton zutreffend ist. Hierzu wurden um 14° geneigte Druckscherversuche an Prüfkörpern mit unterschiedlicher Klebefugenlänge von Holz und Beton durchgeführt. Die Prüfkörper bestanden aus Fichtenbrettschichtholz, das mit dem in den vorangegangenen Delaminierungsversuchen als geeignet identifizierten Ein-Komponenten-Polyurethanklebstoff und Betonlamellen mit schalglatter oder geschliffener Oberfläche des Betons C1 verklebt war. In diesen Versuchen traten jeweils im mittleren Bereich der Klebefugenlänge Relativverschiebungen zwischen et-

wa 0,1 mm und 0,3 mm bei Erreichen der Maximalkraft auf. Der Kraftanstieg verlief dabei jeweils bis zum Bruch weitestgehend linear, bis es schließlich unter Maximallast zu einem spröden Versagen kam. Das Versagen trat dabei überwiegend im Holz auf, unabhängig von der Ausbildung der Betonoberfläche (schalglatt oder geschliffen).

Untersuchungen an Bauteilen im Maßstab 1:1 gaben schließlich Aufschluss über die Systemtragwirkung und das Stabilitätsverhalten der schlanken Hybrid-Wandelemente. Die hierzu verwendeten Wandprüfkörper waren 2,84 m hoch, 0,5 m lang und besaßen einen vollständigen Wandkern aus Beton. Je nach verwendetem Betonkern ergaben sich Gesamtwanddicken von 15 cm bzw. 16,5 cm. Neben den Standardelementen wurden auch Wände mit alternierend aufgebautem Wandkern untersucht. Die Lastaufbringung erfolgte zentrisch und exzentrisch. In den zentrischen Versuchen trat jeweils erwartungsgemäß bei Erreichen der Knicklast ein vergleichsweise schlagartiges Versagen ein. Die exzentrischen Versuche, bei denen bereits zu Beginn entsprechende Biegeanteile eingeleitet wurden, führten im Grenzzustand grundsätzlich zu einem duktilen Bauteilverhalten. Bei Erreichen der Maximallast setzte kein schlagartiger Versagensprozess ein, sondern es zeigte sich in den weggesteuerten Versuchen jeweils eine Abnahme der Prüfkraft bei zunehmender horizontaler Verformung in Wandmitte. Deutlich zu erkennen waren dabei jeweils auf der Biegedruckseite „Druckfalten“ in den äußersten Holzlamellen.

Die Modellierung der Bauteilversuche mit dem Verfahren der Schubanalogie zeigte eine gute Übereinstimmung sowohl für die horizontalen Verformungen als auch bezüglich der sich einstellenden Dehnungen/Stauchungen in Wandmitte. Es wird daher vorgeschlagen Bereiche mit zusammengesetztem Querschnitt mit dem Verfahren der Schubanalogie zu bemessen und zusätzlich zu den Spannungsnachweisen für die Holzkomponenten auch Spannungsnachweise für den Beton zu führen. Bei den Anschlüssen ist konstruktiv darauf zu achten, dass keine Zugspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung entsteht. Die Lastdurchleitung durch das Deckenbauteil kann entweder mit vorgefertigten Stahl- oder Betonbauteilen erfolgen. Die Fertigungs- und Montagetoleranzen werden bauseits verpresst oder vermörtelt.

8.2 Ausblick

Die hier durchgeführten Untersuchungen sind als erster Schritt der Neuentwicklung vielversprechende, hochleistungsfähige Wandelemente in Holz-Beton-Hybridbauweise anzusehen. Behandelt wird die Entwicklung und die Beschreibung des Kurzzeittragverhaltens von Wandbauteilen mit einem verklebten Querschnitt aus Holz und ultrahochfestem Beton. In den durchgeführten Versuchen wurde zunächst das zeitabhängige Verhalten nur über erste Tastversuche zur Delaminierung grundsätzlich betrachtet. Insbesondere für die Dauerhaftigkeit der Klebeverbindung ist dabei das unterschiedliche Verhalten und die Verbundfugenbeanspruchung aus Quellen (Holz) und Schwinden (Holz und Beton) von besonderem Interesse. Auch

könnten Einflüsse aus unterschiedlichen Kriechprozessen von Holz und Beton die resultierende Lastverteilung im Querschnitt entsprechend verändern und zu Lastumlagerungen führen. Aus diesem Grund sollte in weiterführenden Untersuchungen ein wesentlicher Fokus auf der systematischen Analyse des zeitabhängigen Verhaltens der Wandelemente gelegt werden.

Die Verklebung von Holz und Beton fand in diesem Projekt überwiegend mit einem Ein-Komponenten-Polyurethanklebstoff und einem ultrahochfesten Beton statt. Um die Allgemeingültigkeit systematisch zu verifizieren, sollten weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Ein-Komponenten-Polyurethanklebstoffen und hochfesten und ultrahochfesten Betonen erfolgen.

Für eine praxisgerechte Anwendung von Wandbauteilen mit zusammengesetztem Querschnitt sind darüber hinaus noch einige baukonstruktive und bauphysikalische Fragestellungen zu klären. Interessant erscheinen hier z. B. die hygrothermischen Eigenschaften, insbesondere bei Anschlüssen, ebenso wie das Systemverhalten im Brandfall.

Vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft und dem Ziel möglichst viel der verwendeten Ressourcen wiederzuverwenden, gewinnt der Aspekt der Recyclierbarkeit einen immer größeren Einfluss. Insbesondere geklebte Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen scheinen hier von Interesse, da diese vor der Wiederverwendung zumeist sortenrein zu trennen sind. Im Hinblick auf die betrachteten geklebten Verbundbauteile könnte dies in einem mechanischen und bzw. oder thermischen Verfahren stattfinden. Auch dieser Aspekt sollte in weiteren Arbeiten vertiefend betrachtet werden.

Literaturverzeichnis

Veröffentlichungen

- Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G. & Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products* 74(3), S. 331–351.
- Dröge, G. & Stoy, K.-H. (1981). *Grundzüge des neuzeitlichen Holzbaues*. Berlin: Wilhelm Ernst.
- Dunky, M. & Niemz, P. (2002). *Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren* (1. Aufl.). Berlin: Springer.
- Ebner, G. (2017). BSP-Produktion verdoppelt sich bis 2020: Dann werden 1,2 Mio. m³ in Europa produziert. <https://www.holzkurier.com/holzprodukte/2017/06/brettsperrholzproduktion-in-europa-20162020.html>. Aufgerufen am 10.10.2020.
- Ehlbeck, J., Colling, F., Heimeshoff, B. & Kneidl, R. (1987). Biegefestigkeit von Brett-schichtholz in Abhängigkeit von Rohdichte, Elastizitätsmodul, Ästigkeit und Keilzinkung der Lamellen, der Lage der Keilzinkung sowie der Trägerhöhe, Teil A: Karlsruher Untersuchungen, Teil B: Münchener Untersuchungen.
- Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T. & Fröhlich, S. (2014). Ultrahochfester Beton UHPC. In: K. Bergmeister, F. Fingerloos, & J.-D. Wörner (Hrsg.), *Beton-Kalender 2013*, Volume 2, S. 117–239. Hoboken: Wiley.
- Janser, A. (2011). *Hochhaus: Wunsch und Wirklichkeit*. Ostfildern: Hatje Cantz.
- Jauk, G. (2019). 100.000m³-BSP-Werke als Standard: Ein umfassender Marktüberblick. https://www.holzbauaustria.at/markt/2019/11/100-000_m3-werke-als-standard-.html. Aufgerufen am 10.10.2020.
- Kaufmann, H., Krötsch, S. & Winter, S. (2017). *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau* (1. Aufl.). München: Edition Detail.

- Lechner, T. (2018). *Zur Anwendung von Verbunddübelleisten in schlanken Verbundträgern aus ultrahochfestem Beton*. Dissertation, Technische Universität München, München.
- Leutbecher, T. (2008). *Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem ultrahochfesten Beton (UHPC)*. Dissertation, Universität Kassel, Kassel.
- Maierbeck, S. (2020, Mai). *Numerische Abbildung von geklebtem Holz-Beton-Verbund*. Masterarbeit, Technische Universität München.
- Oberndorfer, T. & Fischer, O. (2018). Ultra High Performing Timber Elements. In: *22. Münchener Massivbauseminar*, S. 31–40. Förderverein Massivbau der Technischen Universität München.
- Petersen, C. (1992). *Statik und Stabilität der Baukonstruktionen: Elasto- und plasto-statische Berechnungsverfahren druckbeanspruchter Tragwerke ; Nachweisformen gegen Knicken, Kippen, Beulen* (2. Aufl.). Braunschweig: Vieweg.
- Sagmeister, B. (2017). *Maschinenteile aus zementgebundenem Beton* (1. Aufl.). Beuth Praxis. Berlin: Beuth Verlag.
- Schäfers, M. (2010). *Entwicklung von hybriden Bauteilen aus Holz und hochfesten bzw. ultrahochfesten Betonen: Experimentelle und theoretische Untersuchungen*. Dissertation, Universität Kassel, Kassel.
- Schilliger, E. (2019). Hochleistungswerkstoffe aus Sicht des Unternehmers. In: *Hochleistungswerkstoffe im Holzbau*, Tagungsband 51. Fortbildungskurs, Zürich, S. 25–27. Swiss Wood Innovation Network.
- United Nations, D. o. E. & Social Affairs, P. D. (2019). *World urbanization prospects: 2018: Highlights (ST/ESA/SER.A/421)*.
- Wallner-Novak, M., Augustin, M., Koppelhuber, J. & Pock, K. (2018). *Brettsperrholz Bemessung Band II: Anwendungsfälle*. Wien: pro:Holz Austria.
- Wallner-Novak, M., Koppelhuber, J. & Pock, K. (2013). *Brettsperrholz Bemessung: Grundlagen für Statik und Konstruktion nach Eurocode*. pro:Holz Austria.
- Wiegand, T., Seidel, A., Mestek, P., Werther, N. & Winter, S. (2012). *Bauen mit Brettsperrholz: Tragende Massivholzelemente für Wand, Decke und Dach* (3. Aufl.). Wuppertal: Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.
- Winter, S., Kreuzinger, H. & Mestek, P. (2008). *Holzbau der Zukunft. Teilprojekt 15. Flächen aus Brettstapeln, Brettsperrholz und Verbundkonstruktionen*. Reihe Holzbauforschung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Normen und Regelwerke

- DIN EN 301:2018-01, Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen; Deutsche Fassung EN 301:2017.
- DIN EN 338:2016-07, Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen; Deutsche Fassung EN 338:2016.
- DIN EN 408:2010-12, Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 408:2010+A1:2012
- DIN EN 12390-3:2019-10, Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2019
- DIN EN 12390-13:2014-06, Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul); Deutsche Fassung EN 12390-13:2013.
- DIN EN 14080:2013-09, Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen; Deutsche Fassung EN 14080:2013.
- DIN EN 16351:2015-12, Holzbauwerke - Brettsperrholz - Anforderungen; Deutsche Fassung EN 16351:2015.

A Scherversuche

A.1 Diagramme zur Scherfestigkeit und Holzbruchanteil

In diesem Anhang sind die Ergebnisse der nicht in Kapitel 3 dargestellten kleinformatischen Scherversuche in Diagrammform aufgeführt. Die Scherfestigkeit ist auf der linken y-Achse in rot und der Holzbruchanteil auf der rechten y-Achse in blau aufgetragen. Als Holzbruch wird nur gewertet, wenn klar ersichtlich Holzfasern auf dem Beton haften. Im Boxplotdiagramm sind das Minimum und das Maximum, das 25 % und 75 % Quantil sowie der Median dargestellt. Links bzw. rechts daneben sind in Punkten die Rohdaten gezeigt. Links bzw. rechts daneben sind in Punkten die Rohdaten gezeigt.

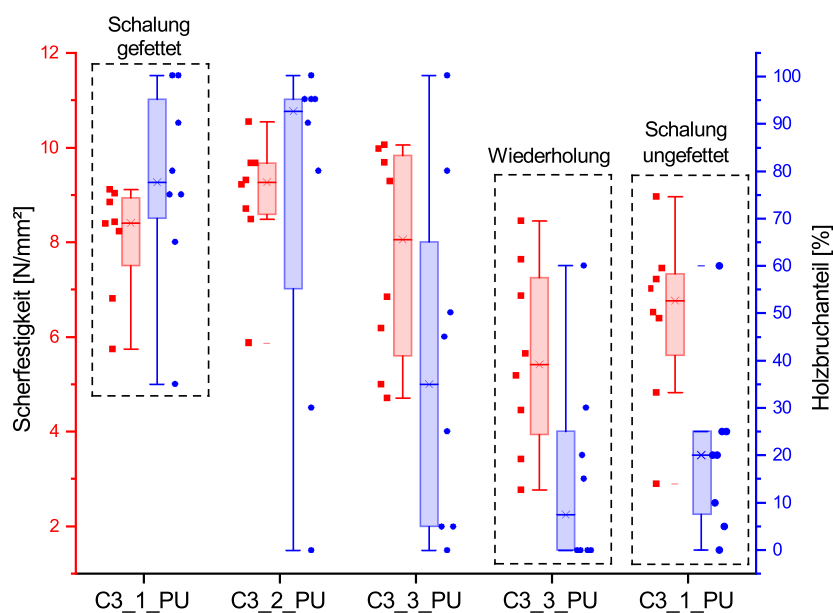


Abbildung A.1: Versuchsergebnisse Ein-Komponenten Polyurethklebstoff mit Beton C3

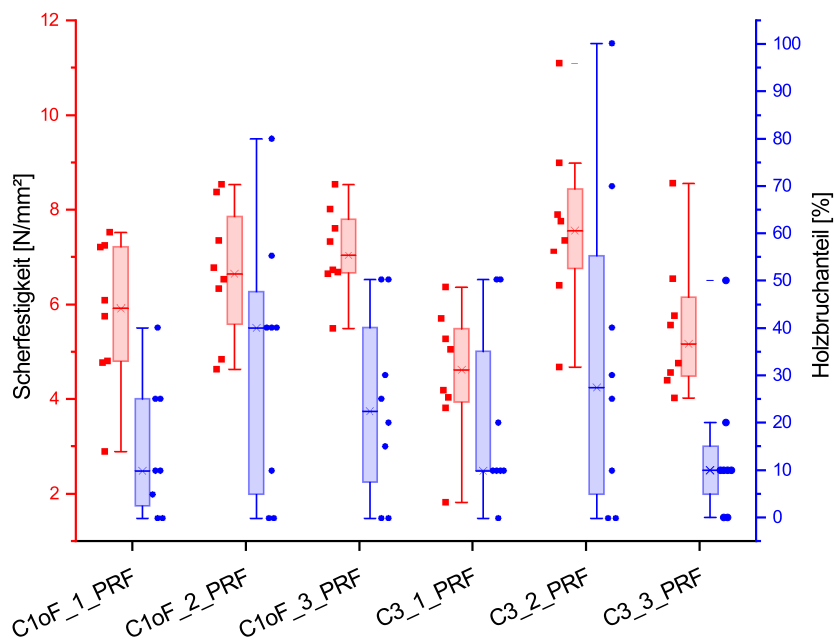


Abbildung A.2: Versuchsergebnisse Phenolresorcinharz

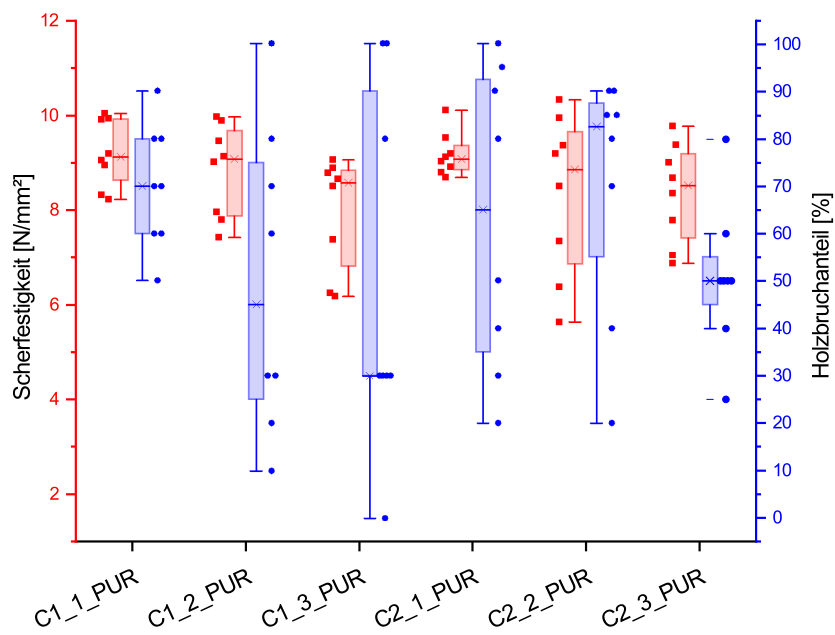


Abbildung A.3: Versuchsergebnisse Polyurethangießharz

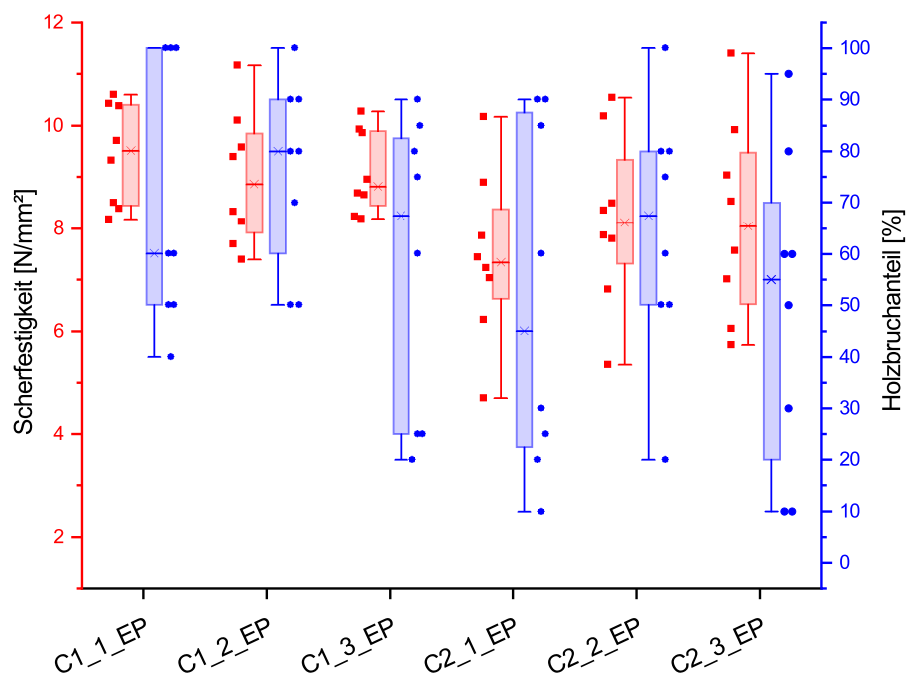


Abbildung A.4: Versuchsergebnisse Epoxidharz

A.2 Tabellarische Versuchsdaten

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse aller Versuchsserien in tabellarischer Form dargestellt. Die Prüfkörperbezeichnung ist in Abbildung A.5 kurz aufgezeigt.

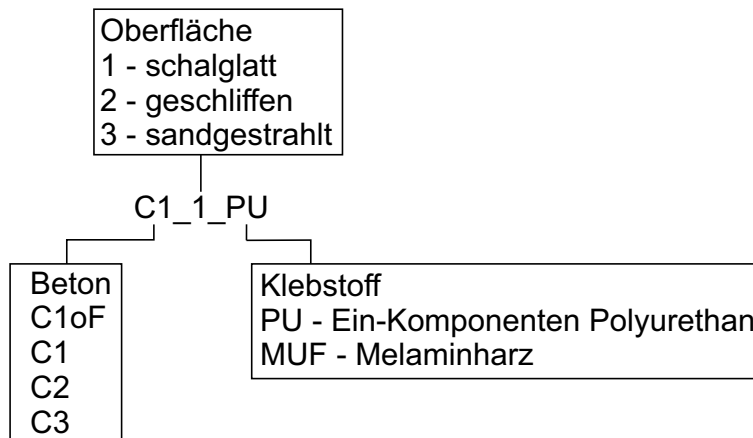


Abbildung A.5: Versuchsbezeichnung Scherversuche

Ergebnisse der Versuchsserie: 001_C1oF_1_PU

	Serien Nr.	Beton		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	001	C1 - ohne Fasern		schalglatt		PU	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
001	167,80	49,82	49,77	29,82	110,70	14,37	
002	164,58	49,80	49,80	29,80	110,70	14,37	
003	169,34	49,77	49,70	29,80	110,70	14,37	
004	169,62	49,80	49,50	29,81	110,70	14,37	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
001_A	31,16	50,73	50,48	38,95	4,14	38	11,5
001_B	35,05	50,79	50,28	39,02	4,00	39	11,5
002_A	34,87	50,73	50,25	38,94	4,46	46	11,5
002_B	34,85	50,64	50,28	39,02	4,00	32,5	11,5
003_A	34,99	50,7	50,3	39	4,38	26	11,5
003_B	35,01	50,69	50,45	39,03	4,45	41	11,5
004_A	34,81	50,7	50,43	38,99	4,54	39	11,5
004_B	34,95	50,64	50,39	38,98	4,62	30	11,5
Klebstoff							
Datum der Verklebung	28.11.2017						
Bezeichnung	PU						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	13 min						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	19:51h						
Prüftag	05.12.2017						
Ergebnisse	Bruchbild						
	Bruchkraft [N]	Holzbruch [%]	Betonbruch [%]	Klebs-Holz [%]	Klebs-Beton [%]	Klebstoff [%]	
001_A	17300		50	25	25		
001_B	17200	80			20		
002_A	16500		100				
002_B	17400		90		10		
003_A	15500	70		30			
003_B	16100	10	60	30			
004_A	14900		100				
004_B	14500		100				

Ergebnisse der Versuchsserie: 003_C1oF_3_PU

	Serien Nr.	Betonmischung	Oberflächenbearb.	Klebstoff			
Bezeichnung	003	C1 - ohne Fasern	geschliffen	PU			
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
009	155,94	49,82	53,00	27,62	110,70	14,37	
010	166,11	49,80	53,77	28,75	110,70	14,37	
011	158,79	49,82	53,39	27,90	110,70	14,37	
012	158,35	49,80	53,63	28,10	110,70	14,37	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
009_A	34,49	50,70	50,10	38,13	4,55	57	11,5
009_B	33,68	50,50	50,09	38,19	4,82	45	11,5
010_A	34,15	50,53	50,36	38,21	5,20	60	11,5
010_B	35,35	50,46	50,03	38,16	5,00	60	11,5
011_A	33,73	50,48	50,00	38,68	4,73	50	11,5
011_B	33,57	50,48	50,03	38,47	4,91	46	11,5
012_A	33,76	50,66	50,32	38,12	4,45	50	11,5
012_B	34,95	50,46	50,03	38,22	4,80	48	11,5
Klebstoff							
Datum der Verklebung	28.11.2017						
Bezeichnung	PU						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	13 min						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	19:51h						
Prüftag	05.12.2017						
Ergebnisse		Bruchbild					
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
009_A	16100	90				10	
009_B	16300		90			10	
010_A	16600		95			5	
010_B	18200	30	70				
011_A	18400	100					
011_B	15600		100				
012_A	14100	80				20	
012_B	14700		100				

Ergebnisse der Versuchsserie: 002_C1oF_2_PU

	Serien Nr.	Beton	Oberflächenbearb.	Klebstoff			
Bezeichnung	002	C1 - ohne Fasern	sandgestrahlt	PU			
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
005	166,29	49,90	49,59	29,84	110,70	14,37	
006	167,30	49,88	49,70	29,69	110,70	14,37	
007	165,93	50,13	49,56	29,71	110,70	14,37	
008	168,36	49,80	49,44	29,75	110,70	14,37	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
005_A	33,95	50,45	50,39	38,03	4,38	20	11,5
005_B	34,48	50,5	50,28	38,06	4,67	12	11,5
006_A	33,58	50,47	50,43	38,12	4,33	21	11,5
006_B	34,31	50,58	50,29	37,99	4,25	21	11,5
007_A	33,47	50,45	50,49	38,05	5,09	23	11,5
007_B	34,44	50,48	50,65	38,03	4,42	21	11,5
008_A	33,86	50,49	50,46	38,12	4,38	17	11,5
008_B	34,17	50,45	50,54	38,03	4,92	18	11,5
Klebstoff							
Datum der Verklebung	28.11.2017						
Bezeichnung	PU						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	13 min						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	19:51h						
Prüftag	05.12.2017						
Ergebnisse		Bruchbild					
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
005_A	15800	10		90			
005_B	15700	30		60	10		
006_A	16200	20		80			
006_B	17000	10		75	15		
007_A	14900	10		75	15		
007_B	12300	20		80			
008_A	13300			85	15		
008_B	13400			95	5		

Ergebnisse der Versuchsserie: 004_C1oF_1_PRF

	Serien Nr.	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	004	C1 ohne Fasern		schalglatt		PRF	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
013	166,22	49,15	53,75	29,26	105,67	14,29	
014	165,57	49,10	53,80	29,30	105,67	14,29	
015	164,56	49,05	53,85	29,15	105,67	14,29	
016	165,76	49,14	53,75	29,24	105,67	14,29	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
013_A	39,31	50,53	50,11	38,14	2,13	55	11,5
013_B	37,33	50,48	50,10	38,13	1,87	64	11,5
014_A	39,79	50,44	50,21	38,09	1,95	68	11,5
014_B	40,62	50,40	49,98	38,01	2,35	62	11,5
015_A	39,33	50,36	49,98	38,07	1,95	72	11,5
015_B	40,66	50,59	50,12	38,13	2,35	58	11,5
016_A	40,30	50,44	50,03	38,14	1,96	76	11,5
016_B	40,68	50,58	50,02	38,10	2,45	69	11,5
Klebstoff							
Datum der Verklebung	08.12.2017						
Bezeichnung	PRF						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	21 min						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	67 h						
Prüfung	13.12.2017						
Ergebnisse		Bruchbild					
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
013_A	7140		30			70	
013_B	17800	40	50			10	
014_A	14100	5	50			45	
014_B	11800	10	35	5		50	
015_A	11700	25	15			60	
015_B	17700	25	70			5	
016_A	14900	10	45			45	
016_B	18500		15			85	

Ergebnisse der Versuchsserie: 005_C1oF_2_PRf

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	005	C1 ohne Fasern		geschliffen		PRF	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
017	148,45	49,18	53,78	26,18	105,67	14,29	
018	149,20	49,20	54,01	25,98	105,67	14,29	
019	152,18	49,23	53,91	26,78	105,67	14,29	
020	154,17	49,21	53,41	26,88	105,67	14,29	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
017_A	43,76	50,45	50,18	38,21	4,00	63	11,6
017_B	38,96	50,45	49,99	38,09	2,29	40	11,6
018_A	39,66	50,49	50,02	38,14	2,15	54	11,6
018_B	44,43	50,48	50,03	38,09	2,32	65	11,6
019_A	40,09	50,49	50,03	38,17	2,20	52	11,6
019_B	39,94	50,50	50,03	38,09	2,25	45	11,6
020_A	38,75	50,55	50,01	38,00	2,16	45	11,6
020_B	39,83	50,48	50,09	38,26	2,17	55	11,6
Klebstoff							
Datum der Verklebung	08.12.2017						
Bezeichnung	PRF						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	21 min						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	67 h						
Prüfung	13.12.2017						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
017_A	15500	55	45				
017_B	11900	40	40			20	
018_A	16600		100				
018_B	21000	40	60				
019_A	18100	80	20				
019_B	11400	10	40			50	
020_A	16000	40	60				
020_B	20600		100				

Ergebnisse der Versuchsserie: 006_C1oF_3_PRF

	Lfd. Nr	Betonmischung	Oberflächenbearb.	Klebstoff			
Bezeichnung	006	C1 ohne Fasern	sandgestrahlt	PRF			
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
021	162,80	49,21	53,78	29,10	105,67	14,29	
022	158,78	49,14	53,40	29,01	105,67	14,29	
023	162,73	49,20	53,94	29,08	105,67	14,29	
024	162,01	49,25	53,80	29,10	105,67	14,29	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
021_A	42,40	50,44	50,03	38,15	2,43	59	11,6
021_B	43,70	50,51	50,11	38,10	2,90	65	11,6
022_A	43,29	50,54	50,04	38,11	2,45	63	11,6
022_B	44,78	50,60	50,05	37,97	2,32	70	11,6
023_A	39,80	50,54	50,09	38,12	1,95	79	11,6
023_B	39,04	50,39	50,01	38,23	2,15	61	11,6
024_A	39,92	50,27	49,98	38,11	2,23	73	11,6
024_B	39,55	50,44	50,02	38,10	2,09	78	11,6
Klebstoff							
Datum der Verklebung	08.12.2017						
Bezeichnung	PRF						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	21 min						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	67 h						
Prüfung	13.12.2017						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
021_A	13500	20	10	40	30		
021_B	21000	15	15	20		50	
022_A	18700		100				
022_B	18000	30	10		60		
023_A	19700	25		30	45		
023_B	16500	50	10		40		
024_A	16300	50	15	15	20		
024_B	16400		45	30	25		

Ergebnisse der Versuchsserie: 007_C1oF_1_MUF

	Lfd. Nr	Betonmischung	Oberflächenbearb.	Klebstoff			
Bezeichnung	007	C1 ohne Fasern	schalglatt	MUF			
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
025	169,18	49,00	51,92	29,40	114,28	14,28	
026	166,93	49,16	51,73	29,13	114,28	14,28	
027	168,01	49,12	51,52	29,23	114,28	14,28	
028	169,63	49,18	51,79	29,34	114,28	14,28	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
025_A	42,33	50,58	50,15	38,06	2,42	76	11,6
025_B	36,52	50,50	49,95	37,98	3,53	37	11,6
026_A	38,73	50,47	50,05	38,10	2,36	41	11,6
026_B	37,86	50,48	50,10	38,08	2,52	34	11,6
027_A	38,01	50,51	50,05	38,06	2,64	32	11,6
027_B	37,65	50,52	50,06	38,11	2,77	29	11,6
028_A	37,69	50,49	50,05	38,09	2,58	30	11,6
028_B	39,05	50,48	50,11	38,07	2,61	46	11,6
Klebstoff							
Datum der Verklebung	13.12.2017						
Bezeichnung	MUF						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	7min						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	19:47h						
Prüfung	29.01.2018						
Ergebnisse	Bruchbild						
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
025_A	5430				100		
025_B	5920	10			90		
026_A	8620	5			95		
026_B	12100	20			80		
027_A	8660			60	40		
027_B	6940			20	80		
028_A	7100			30	70		
028_B	11700			10	90		

Ergebnisse der Versuchsserie: 008_C1oF_2_MUF

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	008	C1 ohne Fasern		geschliffen		MUF	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
029	160,16	49,22	51,86	27,42	114,28	14,28	
030	156,15	49,23	51,60	26,91	114,28	14,28	
031	155,22	49,36	51,73	26,52	114,28	14,28	
032	151,88	49,18	51,80	26,87	114,28	14,28	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
029_A	39,99	50,34	50,04	38,15	2,46	32	11,6
029_B	39,41	50,45	50,02	38,03	2,46	47	11,6
030_A	38,44	50,49	50,04	38,07	2,86	32	11,6
030_B	42,60	49,96	50,12	38,04	2,63	73	11,6
031_A	42,09	50,52	50,04	38,03	2,37	75	11,6
031_B	39,35	50,46	49,99	37,99	2,42	39	11,6
032_A	37,41	50,49	50,05	38,25	2,95	33	11,6
032_B	38,24	50,53	50,22	38,13	2,61	34	11,6
Klebstoff							
Datum der Verklebung	13.12.2017						
Bezeichnung	MUF						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	7min						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	19:47h						
Prüfung	29.01.2018						
Ergebnisse		Bruchbild					
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
029_A	3740				100		
029_B	2960				100		
030_A	3650	5			95		
030_B	7810				100		
031_A	6810				100		
031_B	7970	5			95		
032_A	4110				100		
032_B	6150	5			95		

Ergebnisse der Versuchsserie: 009_C1oF_3_MUF

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	009	C1 ohne Fasern		sandgestrahlt		MUF	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm ²]	Zugf. [N/mm ²]	
033	165,16	49,25	51,80	28,51	114,28	14,28	
034	166,12	49,18	51,92	28,66	114,28	14,28	
035	168,33	49,16	51,44	29,14	114,28	14,28	
036	163,49	49,18	51,89	28,60	114,28	14,28	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
033_A	39,88	50,59	50,08	38,09	2,48	40	11,8
033_B	38,70	50,50	50,08	38,08	2,32	39	11,8
034_A	37,83	50,57	50,05	38,12	2,65	29	11,8
034_B	39,75	50,53	50,04	38,02	2,32	35	11,8
035_A	37,19	50,50	50,10	38,10	2,73	25	11,8
035_B	38,55	50,50	50,08	38,13	2,52	38	11,8
036_A	37,95	50,45	50,01	38,06	2,67	35	11,8
036_B	43,00	50,47	50,08	38,07	2,32	74	11,8
Klebstoff							
Datum der Verklebung	13.12.2017						
Bezeichnung	MUF						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	7min						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm ²						
Presszeit	19:47h						
Prüfung	29.01.2018						
Ergebnisse	Bruchbild						
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
033_A	12400	10			90		
033_B	16700	10			90		
034_A	12800			100			
034_B	10700			50	50		
035_A	14300			100			
035_B	11400			100			
036_A	13500			100			
036_B	4320				100		

Ergebnisse der Versuchsserie: 010_C1oF_1_PUR

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	010	C1 ohne Fasern		schalglatt		PUR	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm ²]	Zugf. [N/mm ²]	
037	168,54	49,07	52,73	29,26	119,39	13,93	
038	169,21	49,17	52,65	29,48	119,39	13,93	
039	168,82	49,23	52,46	29,18	119,39	13,93	
040	167,77	49,16	52,62	29,24	119,39	13,93	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
037_A	49,39	50,64	50,05	39,03	2,45	45	11,8
037_B	43,89	50,48	50,10	39,02	2,38	58	11,8
038_A	44,99	50,49	50,00	38,97	2,43	60	11,8
038_B	43,42	50,68	50,23	39,01	2,33	58	11,8
039_A	43,54	50,54	50,07	39,05	2,38	64	11,8
039_B	43,47	50,52	50,06	39,04	2,42	74	11,8
040_A	44,03	50,45	50,08	39,01	2,45	66	11,8
040_B	49,36	50,48	50,05	38,98	2,43	55	11,8
Klebstoff							
Datum der Verklebung	01.02.2018						
Bezeichnung	PUR						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm ²						
Presszeit	24h						
Prüfung	15.02.2018						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
037_A	20300	50		50			
037_B	19900	70		30			
038_A	23400	50	50				
038_B	20300		100				
039_A	19500	100					
039_B	20200	80		20			
040_A	20100	20		10	10		
040_B	19600	30		20			

Ergebnisse der Versuchsserie: 011_C1oF_2_PUR

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	011	C1 ohne Fasern		geschliffen		PUR	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
041	166,24	49,26	52,80	28,74	119,39	13,93	
042	165,33	49,33	52,53	28,66	119,39	13,93	
043	165,95	49,18	52,14	28,78	119,39	13,93	
044	167,33	49,22	52,62	29,17	119,39	13,93	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
041_A	50,10	50,46	50,07	39,02	2,50	48	11,8
041_B	43,81	50,74	50,05	39,11	2,29	62	11,8
042_A	43,70	50,53	50,05	39,00	2,38	62	11,8
042_B	43,15	50,48	50,13	39,01	2,29	60	11,8
043_A	43,03	50,47	50,08	39,02	2,43	70	11,8
043_B	44,82	50,58	50,06	39,09	2,72	65	11,8
044_A	43,76	50,71	50,05	39,07	2,40	62	11,8
044_B	49,01	50,67	50,01	39,05	2,45	54	11,8
Klebstoff							
Datum der Verklebung	01.02.2018						
Bezeichnung	PUR						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	24h						
Prüfung	15.02.2018						
Ergebnisse		Bruchbild					
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
041_A	20400	85		15			
041_B	20500	100					
042_A	21500		100				
042_B	21900		100				
043_A	19700		100				
043_B	24300	90		10			
044_A	19100	50	30	20			
044_B	23800	90		10			

Ergebnisse der Versuchsserie: 012_C1oF_3_PUR

	Lfd. Nr	Betonmischung	Oberflächenbearb.	Klebstoff			
Bezeichnung	012	C1 ohne Fasern	sandgestrahlt	PUR			
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
045	164,08	49,12	52,28	28,71	119,39	13,93	
046	165,38	49,16	52,29	28,77	119,39	13,93	
047	164,42	49,22	52,51	28,51	119,39	13,93	
048	165,08	49,24	52,24	28,73	119,39	13,93	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
045_A	49,76	50,51	49,99	38,98	2,36	60	11,8
045_B	44,37	50,46	49,97	38,93	2,33	61	11,8
046_A	43,64	50,52	50,08	39,02	2,38	59	11,8
046_B	42,95	50,48	50,12	39,14	2,33	61	11,8
047_A	43,67	50,42	50,56	39,01	2,38	66	11,8
047_B	43,9	50,46	50,12	39,04	2,53	70	11,8
048_A	44,17	50,48	50,05	39,05	2,48	61	11,8
048_B	48,32	50,55	50,06	39,04	2,57	53	11,8
Klebstoff							
Datum der Verklebung	01.02.2018						
Bezeichnung	PUR						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	24h						
Prüfung	15.02.2018						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
045_A	21900	60		40			
045_B	18600	50	20	30			
046_A	21100		100				
046_B	22400	20	80				
047_A	21600	60	20	20			
047_B	19000	90		10			
048_A	16500	50	10		40		
048_B	23100	60	40				

Ergebnisse der Versuchsserie: 013_C3_1_PU

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	013	C3		schalglatt		PU	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
049	178,96	49,17	52,00	29,20	218,5	44,52	
050	174,74	49,10	51,70	29,30	218,5	44,52	
051	181,63	49,16	51,75	29,15	218,5	44,52	
052	178,62	49,01	52,14	29,15	218,5	44,52	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
049_A	40,98	50,68	50,00	38,01	2,48	62	11,10
049_B	40,65	50,47	50,00	38,23	2,33	63	11,10
050_A	41,68	50,54	50,07	38,15	2,38	70	11,10
050_B	41,10	50,30	50,03	38,12	2,26	65	11,10
051_A	40,96	50,34	50,06	38,18	2,27	64	11,10
051_B	40,93	50,34	49,99	37,99	2,27	71	11,10
052_A	40,74	50,40	50,20	38,17	2,33	65	11,10
052_B	41,24	50,35	50,10	38,10	2,45	69	11,10
Klebstoff							
Datum der Verklebung	06.12.2017						
Bezeichnung	PU						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	10 min						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	23h						
Prüfung	13.12.2017						
Ergebnisse	Bruchbild						
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
049_A	20700	35	5	50	10		
049_B	16700	65	15	10	10		
050_A	21700	75		20	5		
050_B	14100	90		10			
051_A	20200	75	10	5	10		
051_B	20600	80		15	5		
052_A	22100	100					
052_B	22300	100					

Ergebnisse der Versuchsserie: 014_C3.2_PU

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	014	C3		geschliffen		PU	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
053	172,45	49,10	51,34	28,35	218,5	44,52	
054	172,23	49,01	51,52	28,30	218,5	44,52	
055	170,97	49,05	51,09	28,04	218,5	44,52	
056	170,16	49,10	51,10	28,30	218,5	44,52	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
053_A	39,85	50,36	49,98	37,96	2,81	75	11,10
053_B	39,12	49,32	50,04	38,17	2,69	70	11,10
054_A	39,78	50,53	50,03	38,09	2,76	74	11,10
054_B	40,64	50,41	50,06	38,31	3,06	80	11,10
055_A	40,13	50,38	49,99	38,00	3,06	74	11,10
055_B	40,85	50,41	50,01	38,29	2,76	74	11,10
056_A	40,26	50,41	50,03	38,09	2,81	76	11,10
056_B	40,65	50,81	49,99	38,03	2,59	70	11,10
Klebstoff							
Datum der Verklebung	06.12.2017						
Bezeichnung	PU						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	10 min						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	23h						
Prüfung	13.12.2017						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
053_A	14400	95		5			
053_B	20800	100					
054_A	25800	90		10			
054_B	21300	30	55	5	10		
055_A	23700	95		5			
055_B	22800	95		5			
056_A	23700		75	25			
056_B	22600	80		20			

Ergebnisse der Versuchsserie: 015_C3_3_PU

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	015	C3		sandgestrahlt		PU	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
057	175,37	49,01	51,20	29,18	218,5	44,52	
058	177,53	49,18	51,97	29,00	218,5	44,52	
059	174,29	48,92	51,74	28,99	218,5	44,52	
060	171,84	49,24	51,68	28,84	218,5	44,52	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
057_A	41,54	50,41	50,04	38,15	1,67	50	11,10
057_B	42,29	50,45	50,04	38,02	1,58	54	11,10
058_A	41,61	50,43	50,18	38,13	1,54	54	11,10
058_B	41,33	50,21	50,00	38,09	1,51	53	11,10
059_A	42,09	50,36	50,04	38,13	1,80	55	11,10
059_B	41,79	50,40	50,05	38,12	1,62	50	11,10
060_A	41,44	50,42	50,19	38,05	1,51	54	11,10
060_B	41,55	50,37	50,03	38,11	1,57	48	11,10
Klebstoff							
Datum der Verklebung	06.12.2017						
Bezeichnung	PU						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	10 min						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	23h						
Prüfung	13.12.2017						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
057_A	23700	25	5	60	10		
057_B	24600	50	50				
058_A	24500	80	20				
058_B	22800	100					
059_A	16700	45		10	45		
059_B	15100			10	90		
060_A	11600	5			95		
060_B	12300	5			95		

Ergebnisse der Versuchsserie: 016_C3_3_PU

	Lfd. Nr	Betonmischung	Oberflächenbearb.	Klebstoff			
Bezeichnung	016	C3	sandgestrahlt	PU			
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
061	176,44	49,28	51,50	29,10	218,5	44,52	
062	170,11	49,26	51,37	28,60	218,5	44,52	
063	169,47	49,26	51,45	28,84	218,5	44,52	
064	171,93	49,39	52,15	28,96	218,5	44,52	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
061_A	37,27	50,62	51,68	37,07	2,90	38	11,10
061_B	42,22	50,58	50,10	37,07	2,55	56	11,10
062_A	36,43	50,50	51,65	37,19	2,82	38	11,10
062_B	40,22	50,45	50,11	37,04	2,35	50	11,10
063_A	37,07	50,45	51,81	37,05	2,76	32	11,10
063_B	40,61	50,46	50,25	37,15	2,48	52	11,10
064_A	37,07	50,47	51,70	37,06	2,73	41	11,10
064_B	34,24	50,47	50,15	37,07	3,80	38	11,10
Klebstoff							
Datum der Verklebung	14.12.2017						
Bezeichnung	PU						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	13 min						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	19:47h						
Prüfung	29.01.2018						
Ergebnisse	Bruchbild						
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
061_A	16900	60		40			
061_B	20800	30			70		
062_A	8420	20	20				60
062_B	6830	15					85
063_A	18800			60	40		
063_B	13900			10			90
064_A	12800			40			60
064_B	11000			40			60

Ergebnisse der Versuchsserie: 017_C3.1-ohne-Fett_PU

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	017	C3		schalglatt ohne Fett		PU	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
065	172,10	49,29	50,21	29,35	216,24	40,08	
066	172,04	49,36	50,42	29,25	216,24	40,08	
067	172,18	49,41	50,57	29,25	216,24	40,08	
068	173,13	49,22	50,43	29,21	216,24	40,08	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahringbreite [mm]	Jahringlage [°]	Feuchte [%]
065_A	37,41	50,51	51,69	37,25	2,63	32	11,10
065_B	41,93	50,67	50,04	37,08	2,33	56	11,10
066_A	34,81	50,56	50,08	37,09	3,16	33	11,10
066_B	41,05	50,51	50,07	37,04	2,48	55	11,10
067_A	34,62	50,56	50,07	37,06	3,16	29	11,10
067_B	41,00	50,59	50,07	37,07	2,43	50	11,10
068_A	34,28	50,47	50,05	37,10	3,63	31	11,10
068_B	40,28	50,46	50,05	37,08	2,43	53	11,10
Klebstoff							
Datum der Verklebung	14.12.2017						
Bezeichnung	PU						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	13 min						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	19:47h						
Prüfung	29.01.2018						
Ergebnisse	Bruchbild						
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
065_A	11900	25		5	75		
065_B	7140				100		
066_A	17800	20		60	20		
066_B	22100	25	10	10	55		
067_A	17300	20	20	60			
067_B	18400	60	30	10			
068_A	15700	10		15	75		
068_B	16000	5		20	75		

Ergebnisse der Versuchsserie: 018_C3_1_PRF

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	018	C3		schalglatt		PRF	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm ²]	Zugf. [N/mm ²]	
069	173,18	49,38	50,22	29,18	216,24	40,08	
070	171,63	49,15	50,64	29,20	216,24	40,08	
071	175,42	49,21	50,69	29,38	216,24	40,08	
072	171,73	49,17	50,52	29,27	216,24	40,08	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
069_A	36,86	50,37	49,98	38,97	4,07	22	11,1
069_B	37,17	50,48	50,00	39,03	4,07	29	11,1
070_A	39,93	50,43	49,99	39,10	3,38	65	11,1
070_B	40,24	50,37	50,00	39,03	3,13	53	11,1
071_A	36,15	50,34	50,14	39,01	4,46	50	11,1
071_B	35,12	50,52	49,97	39,08	5,18	54	11,1
072_A	41,08	50,84	49,93	39,09	2,83	65	11,1
072_B	36,23	50,45	50,03	39,00	4,23	50	11,1
Klebstoff							
Datum der Verklebung	31.01.2018						
Bezeichnung	PRF						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	15 min; 10 min geschlossene Wartezeit						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm ²						
Presszeit	24:20 h						
Prüfung	15.02.2018						
Ergebnisse	Bruchbild						
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
069_A	13000	50			50		
069_B	9970	10			90		
070_A	4500				100		
070_B	9380	10			90		
071_A	15600	20			80		
071_B	14000	50		10	40		
072_A	12400	10			90		
072_B	10300	10			90		

Ergebnisse der Versuchsserie: 019_C3.2_PRF

	Lfd. Nr	Betonmischung	Oberflächenbearb.	Klebstoff			
Bezeichnung	019	C3	geschliffen	PRF			
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
073	168,27	49,21	50,72	28,67	216,24	40,08	
074	170,06	49,16	50,67	28,70	216,24	40,08	
075	167,52	49,26	50,89	28,22	216,24	40,08	
076	172,40	49,27	50,60	28,80	216,24	40,08	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
073_A	38,60	50,37	50,04	39,12	4,00	22	11,1
073_B	38,16	50,41	50,04	39,03	4,08	25	11,1
074_A	40,13	50,38	50,02	39,07	2,75	65	11,1
074_B	40,07	50,39	49,99	39,21	2,89	69	11,1
075_A	35,78	50,11	49,90	38,98	4,58	50	11,1
075_B	36,22	50,34	50,11	39,07	4,31	48	11,1
076_A	40,02	50,52	50,07	39,07	2,75	62	11,1
076_B	36,32	50,88	50,08	39,04	4,08	23	11,1
Klebstoff							
Datum der Verklebung	31.01.2018						
Bezeichnung	PRF						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	15 min; 10 min geschlossene Wartezeit						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	24:20h						
Prüfung	15.02.2018						
Ergebnisse	Bruchbild						
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
073_A	11500	25			75		
073_B	19100	40			60		
074_A	19400		20		80		
074_B	22100	10	25		65		
075_A	18100	70			30		
075_B	17500	30		20	50		
076_A	27300			15	85		
076_B	15700	100					

Ergebnisse der Versuchsserie: 020_C3_3-PRF

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	020	C3		sandgestrahlt		PRF	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
077	169,09	49,20	50,73	28,84	216,24	40,08	
078	167,41	49,18	50,35	28,83	216,24	40,08	
079	170,00	49,34	50,60	29,02	216,24	40,08	
080	168,50	49,10	50,39	29,29	216,24	40,08	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
077_A	36,53	50,48	50,10	39,04	3,93	23	11,1
077_B	37,68	50,41	49,98	39,03	3,93	22	11,1
078_A	40,01	51,03	50,03	39,21	2,57	64	11,1
078_B	39,49	50,62	49,96	39,10	2,90	64	11,1
079_A	36,26	50,43	50,07	39,15	4,23	53	11,1
079_B	38,89	50,39	50,00	39,03	3,13	62	11,1
080_A	36,41	50,67	50,03	39,09	4,00	24	11,1
080_B	35,68	50,73	50,04	39,01	4,58	50	11,1
Klebstoff							
Datum der Verklebung	31.01.2018						
Bezeichnung	PRF						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	15 min; 10 min geschlossene Wartezeit						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	24:20h						
Prüfung	15.02.2018						
Ergebnisse		Bruchbild					
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
077_A	9910	10	10		80		
077_B	11200	10		25	65		
078_A	11700	20			80		
078_B	10800			20	80		
079_A	14200			10	90		
079_B	13700	10		10	80		
080_A	21000	10		10	80		
080_B	16000	50			50		

Ergebnisse der Versuchsserie: 021_C1_1_PU

	Lfd. Nr	Betonmischung	Oberflächenbearb.	Klebstoff			
Bezeichnung	021	C1	schalglatt	PU			
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
081	167,00	49,27	49,82	29,18	143,27	14,71	
082	166,08	49,28	50,05	29,31	143,27	14,71	
083	162,58	49,14	48,93	29,34	143,27	14,71	
084	169,55	49,35	50,60	29,20	143,27	14,71	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
081_A	41,22	50,56	50,01	38,03	2,52	54	11,1
081_B	38,62	50,61	50,04	38,25	3,05	67	11,1
082_A	39,97	50,45	50,07	38,05	2,55	56	11,1
082_B	38,83	50,74	50,08	38,26	2,65	70	11,1
083_A	42,27	50,68	49,99	37,98	2,50	60	11,1
083_B	42,26	50,62	50,08	38,36	2,15	64	11,1
084_A	39,23	50,59	50,06	38,01	2,64	60	11,1
084_B	43,24	50,77	50,09	37,99	2,15	59	11,1
Klebstoff							
Datum der Verklebung	06.02.2018						
Bezeichnung	PU						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	23:20h						
Prüfung	15.02.2018						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
081_A	23300	15		70	15		
081_B	20900	15	60		25		
082_A	13500	50		50			
082_B	21400		100				
083_A	18600	50	10	40			
083_B	18500	50		50			
084_A	23000		20	50	30		
084_B	24500	50		50			

Ergebnisse der Versuchsserie: 022_C1_2_PU

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	022	C1		geschliffen		PU	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm ²]	Zugf. [N/mm ²]	
085	159,54	49,31	48,95	28,59	143,27	14,71	
086	161,36	49,32	50,00	28,25	143,27	14,71	
087	162,75	49,23	50,29	28,65	143,27	14,71	
088	163,27	49,29	49,19	28,85	143,27	14,71	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
085_A	42,21	50,89	50,06	38,01	2,12	58	11,1
085_B	38,98	50,67	50,12	38,24	2,68	55	11,1
086_A	39,52	50,52	50,06	38,01	2,43	59	11,1
086_B	42,95	51,02	50,06	38,12	2,12	60	11,1
087_A	39,74	50,52	50,08	38,09	2,33	57	11,1
087_B	38,33	50,66	50,29	38,09	2,74	66	11,1
088_A	39,23	50,60	50,14	38,00	2,52	59	11,1
088_B	43,08	50,75	50,14	38,04	2,20	56	11,1
Klebstoff							
Datum der Verklebung	06.02.2018						
Bezeichnung	PU						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm ²						
Presszeit	23:20h						
Prüfung	15.02.2018						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
085_A	21000	90		10			
085_B	22100	10	90				
086_A	26400	30	70				
086_B	22200	60		40			
087_A	25500	100					
087_B	23000		100				
088_A	17600	100					
088_B	18400	100					

Ergebnisse der Versuchsserie: 023_C1_3_PU

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	023	C1		sandgestrahlt		PU	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
089	164,25	49,22	50,33	29,22	143,27	14,71	
090	163,72	49,26	49,81	29,31	143,27	14,71	
091	165,75	49,22	50,93	29,11	143,27	14,71	
092	164,99	49,23	50,41	29,14	143,27	14,71	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
089_A	43,17	51,09	50,05	38,05	2,20	62	11,1
089_B	40,05	50,49	50,13	38,01	2,28	56	11,1
090_A	39,85	50,89	50,06	37,99	3,79	56	11,1
090_B	42,23	50,52	50,17	37,92	2,17	68	11,1
091_A	39,57	50,45	50,06	38,08	2,72	73	11,1
091_B	40,08	50,57	50,06	37,98	2,19	64	11,1
092_A	41,80	50,52	50,05	38,05	2,23	65	11,1
092_B	39,79	50,66	50,06	38,09	2,65	67	11,1
Klebstoff							
Datum der Verklebung	06.02.2018						
Bezeichnung	PU						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	23:20h						
Prüfung	15.02.2018						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
089_A	12100			25	75		
089_B	19700	10		60	30		
090_A	22400	20	20	30	30		
090_B	24800	80		20			
091_A	23300	100					
091_B	20400	80			20		
092_A	15300	50		50			
092_B	9710			10	90		

Ergebnisse der Versuchsserie: 024_C2_1_PU

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	024	C2		schalglatt		PU	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm ²]	Zugf. [N/mm ²]	
093	179,82	49,27	50,21	29,18	239,54	36,73	
094	177,09	49,27	49,89	29,12	239,54	36,73	
095	178,91	49,20	50,26	29,23	239,54	36,73	
096	176,69	49,08	49,75	29,21	239,54	36,73	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
093_A	41,85	50,68	50,00	38,01	2,15	52	11,1
093_B	40,77	50,53	50,05	37,98	2,30	61	11,1
094_A	42,06	50,54	50,08	38,04	2,11	52	11,1
094_B	40,42	50,86	50,03	38,17	2,12	64	11,1
095_A	42,43	50,66	49,98	38,08	2,11	55	11,1
095_B	39,19	50,61	50,03	38,05	2,44	74	11,1
096_A	42,31	50,55	50,12	38,67	2,12	55	11,1
096_B	42,15	50,68	49,98	38,17	2,20	59	11,1
Klebstoff							
Datum der Verklebung	07.02.2018						
Bezeichnung	PU						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm ²						
Presszeit	100h						
Prüfung	15.02.2018						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
093_A	25500	90			10		
093_B	24500		75	25			
094_A	16600	100					
094_B	25100	70	10	20			
095_A	19700	100					
095_B	24600	75	20	5			
096_A	21900	80		20			
096_B	21900	25		65	10		

Ergebnisse der Versuchsserie: 025_C2_2_PU

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	025	C2		geschliffen		PU	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
097	174,78	49,28	50,22	28,68	239,54	36,73	
098	171,34	49,12	50,01	28,83	239,54	36,73	
099	171,70	49,35	49,41	28,59	239,54	36,73	
100	174,58	49,12	49,81	28,76	239,54	36,73	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
097_A	41,34	50,57	50,05	38,05	2,00	54	11,2
097_B	40,42	50,38	49,97	37,96	2,29	60	11,2
098_A	40,39	50,54	50,01	38,13	2,23	57	11,2
098_B	41,17	50,64	50,19	38,10	2,17	60	11,2
099_A	42,56	50,59	50,01	38,08	2,12	55	11,2
099_B	42,93	50,74	49,94	38,31	2,12	54	11,2
100_A	42,42	50,69	50,15	38,09	2,11	55	11,2
100_B	39,63	50,42	50,06	38,02	2,47	83	11,2
Klebstoff							
Datum der Verklebung	07.02.2018						
Bezeichnung	PU						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	100h						
Prüfung	15.02.2018						
Ergebnisse		Bruchbild					
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
097_A	17200	100					
097_B	23700	90	10				
098_A	11700	100					
098_B	19900	60				40	
099_A	23600	60			20	20	
099_B	14300	100					
100_A	22200	100					
100_B	23700	80			20		

Ergebnisse der Versuchsserie: 026_C2_3_PU

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	026	C2		sandgestrahlt		PU	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
101	178,68	49,22	50,57	29,06	239,54	36,73	
102	175,64	49,21	49,83	29,21	239,54	36,73	
103	177,13	49,28	50,34	29,04	239,54	36,73	
104	177,22	49,25	50,57	29,03	239,54	36,73	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
101_A	42,46	50,64	50,00	38,02	2,15	52	11,2
101_B	40,47	50,67	50,07	38,28	2,39	55	11,2
102_A	42,56	50,60	50,01	38,04	2,15	52	11,2
102_B	41,56	50,63	50,07	38,06	2,20	63	11,2
103_A	42,48	50,56	50,06	38,14	2,15	59	11,2
103_B	38,77	50,46	49,96	38,11	2,75	79	11,2
104_A	42,52	50,80	49,98	38,11	2,38	60	11,2
104_B	42,39	50,45	50,08	38,27	2,04	55	11,2
Klebstoff							
Datum der Verklebung	07.02.2018						
Bezeichnung	PU						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0,75±0,1 N/mm²						
Presszeit	100h						
Prüfung	15.02.2018						
Ergebnisse		Bruchbild					
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
101_A	12800	10		20	70		
101_B	23300	50	50				
102_A	13000	60		20	20		
102_B	13000	10		20	70		
103_A	13600	50		20	30		
103_B	17800	60		10	30		
104_A	14600	50		20	30		
104_B	26700	100					

Ergebnisse der Versuchsserie: 027_C1_1_PUR

	Lfd. Nr	Betonmischung	Oberflächenbearb.	Klebstoff			
Bezeichnung	027	C1	schalglatt	PUR			
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
105	167,71	49,37	50,69	29,26	151,18	19,43	
106	169,93	49,25	50,74	29,17	151,18	19,43	
107	171,67	49,47	51,72	29,16	151,18	19,43	
108	170,08	49,30	50,98	29,37	151,18	19,43	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
105_A	40,35	50,74	50,07	37,11	2,39	69	11,2
105_B	39,23	50,88	50,00	37,22	2,37	72	11,2
106_A	39,36	50,57	50,04	37,22	2,55	62	11,2
106_B	39,64	50,59	50,06	37,21	2,37	61	11,2
107_A	35,58	50,59	49,99	37,00	3,33	39	11,2
107_B	38,73	50,61	50,04	37,13	2,38	52	11,2
108_A	38,77	50,87	50,09	37,17	2,35	66	11,2
108_B	40,03	50,97	50,06	37,14	2,48	60	11,2
Klebstoff							
Datum der Verklebung	12.02.2018						
Bezeichnung	PUR						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0.75 ± 0.1 N/mm²						
Presszeit	23h						
Prüfung	19.02.2018						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
105_A	20300	70		30			
105_B	24500	60	5	35			
106_A	22600	80		20			
106_B	24700	50	10	40			
107_A	22100	80	10	10			
107_B	24500	60	10	30			
108_A	22300	70	10	50			
108_B	20500	90	5	5			

Ergebnisse der Versuchsserie: 028_C1_2_PUR

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	028	C1		geschliffen		PUR	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
109	166,48	49,54	50,43	28,81	151,18	19,43	
110	165,08	49,19	50,60	28,80	151,18	19,43	
111	162,92	49,29	50,63	28,11	151,18	19,43	
112	165,82	49,32	50,86	28,58	151,18	19,43	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahringbreite [mm]	Jahringlage [°]	Feuchte [%]
109_A	39,83	50,93	50,16	37,25	2,45	68	11,2
109_B	39,34	50,97	50,21	37,19	2,48	63	11,2
110_A	40,16	50,86	50,18	37,16	2,50	54	11,2
110_B	39,75	50,71	50,07	37,11	2,50	61	11,2
111_A	35,15	50,64	49,98	37,07	3,47	41	11,2
111_B	39,70	50,75	50,12	37,35	2,21	56	11,2
112_A	39,45	50,74	50,08	37,13	2,33	73	11,2
112_B	39,70	50,82	50,09	37,47	2,48	60	11,2
Klebstoff							
Datum der Verklebung	12.02.2018						
Bezeichnung	PUR						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0.75 +/- 0.1 N/mm²						
Presszeit	23h						
Prüfung	19.02.2018						
Ergebnisse		Bruchbild					
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
109_A	19300	100					
109_B	19700	70	30				
110_A	24300	80		20			
110_B	24500	20	10	70			
111_A	23300	30	15	55			
111_B	22200	60		40			
112_A	18300	30	20	50			
112_B	22500	10	5	65	20		

Ergebnisse der Versuchsserie: 029_C1_3_PUR

	Lfd. Nr	Betonmischung	Oberflächenbearb.	Klebstoff			
Bezeichnung	029	C1	sandgestrahlt	PUR			
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
113	169,00	49,30	50,96	29,19	151,18	19,43	
114	168,83	49,19	50,93	29,18	151,18	19,43	
115	168,75	49,38	51,28	29,19	151,18	19,43	
116	170,19	49,24	51,24	29,25	151,18	19,43	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
113_A	39,13	50,96	50,23	37,15	2,45	70	11,2
113_B	40,65	50,84	50,04	37,16	2,77	67	11,2
114_A	35,37	50,66	50,00	37,09	3,16	42	11,2
114_B	39,61	50,44	50,06	37,16	2,35	61	11,2
115_A	38,99	50,47	50,41	37,29	2,48	52	11,2
115_B	39,35	50,53	50,10	37,16	2,63	63	11,2
116_A	39,23	50,66	50,09	37,30	2,60	68	11,2
116_B	39,79	50,70	50,10	37,24	2,57	60	11,2
Klebstoff							
Datum der Verklebung	12.02.2018						
Bezeichnung	PUR						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0.75 ± 0.1 N/mm²						
Presszeit	23h						
Prüfung	19.02.2018						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
113_A	15200	100					
113_B	21900	30		60		10	
114_A	20900	80		20			
114_B	21600	30	50	15	5		
115_A	15400	100					
115_B	18200	30	50		20		
116_A	22300	30	50	20			
116_B	21300		100				

Ergebnisse der Versuchsserie: 030_C2_1_PUR

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	030	C2		schalglatt		PUR	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
117	177,94	49,38	49,78	29,37	235,23	35,79	
118	181,00	49,30	50,35	29,32	235,23	35,79	
119	177,39	49,45	49,96	29,17	235,23	35,79	
120	179,21	49,42	50,04	29,30	235,23	35,79	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
117_A	41,18	50,58	50,04	39,14	1,92	6	11,2
117_B	39,84	50,50	50,07	39,13	2,00	5	11,2
118_A	40,22	50,53	50,06	39,13	2,13	5	11,2
118_B	40,95	50,57	49,99	39,23	2,04	1	11,2
119_A	41,27	50,41	50,16	39,09	2,08	0,5	11,2
119_B	40,01	50,48	50,03	39,13	2,17	4	11,2
120_A	40,43	50,48	50,02	39,10	2,00	2	11,2
120_B	40,81	50,49	50,08	39,11	2,21	5	11,2
Klebstoff							
Datum der Verklebung	13.02.2018						
Bezeichnung	PUR						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0.75 +/- 0.1 N/mm²						
Presszeit	46h						
Prüfung	19.02.2018						
Ergebnisse		Bruchbild					
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
117_A	22400	50	40	10			
117_B	23400	30		70			
118_A	21400	100					
118_B	24900	40	20	30	10		
119_A	21700	95	5				
119_B	22300	80	10	10			
120_A	22700	20	60	20			
120_B	22000	90	10				

Ergebnisse der Versuchsserie: 031_C2_2_PUR

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	031	C2		geschliffen		PUR	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
121	176,60	49,29	50,18	28,51	235,23	35,79	
122	173,24	49,24	49,94	28,47	235,23	35,79	
123	176,25	49,23	49,98	28,73	235,23	35,79	
124	178,70	49,31	50,70	28,96	235,23	35,79	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
121_A	40,08	50,48	50,32	39,11	1,96	0	11,2
121_B	39,56	50,50	50,08	39,10	2,16	6	11,2
122_A	40,45	50,43	49,98	38,99	1,85	4	11,2
122_B	40,64	50,55	50,08	39,04	2,00	0	11,2
123_A	40,64	50,47	50,05	39,09	2,04	2,5	11,2
123_B	40,45	50,42	50,11	39,09	2,09	11	11,2
124_A	40,46	50,58	50,04	39,10	1,92	7	11,2
124_B	39,82	50,52	49,96	39,02	2,04	6	11,2
Klebstoff							
Datum der Verklebung	13.02.2018						
Bezeichnung	PUR						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0.75 +/- 0.1 N/mm²						
Presszeit	46h						
Prüfung	19.02.2018						
Ergebnisse		Bruchbild					
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
121_A	15700	80		20			
121_B	13900	40	5	55			
122_A	20900	20	60	20			
122_B	23000	90		10			
123_A	22600	90		10			
123_B	25400	85	5	10			
124_A	24500	85	5	10			
124_B	18100	70		30			

Ergebnisse der Versuchsserie: 032_C2_3_PUR

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	032	C2		sandgestrahlt		PUR	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm ²]	Zugf. [N/mm ²]	
125	176,82	49,34	49,78	29,16	235,23	35,79	
126	177,53	49,28	49,66	29,21	235,23	35,79	
127	179,14	49,11	50,15	29,23	235,23	35,79	
128	179,19	49,37	50,22	29,20	235,23	35,79	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
125_A	40,37	50,47	50,07	39,20	2,04	2	11,2
125_B	39,44	50,58	50,04	39,14	2,00	2	11,2
126_A	40,47	50,46	50,05	39,10	2,00	6	11,2
126_B	39,74	50,43	50,06	39,15	1,85	3	11,2
127_A	40,86	50,72	50,01	38,99	2,00	6	11,2
127_B	41,28	50,50	50,05	39,11	2,00	2	11,2
128_A	39,79	50,67	50,05	39,09	1,92	2	11,2
128_B	39,83	50,46	49,97	39,10	1,92	4	11,2
Klebstoff							
Datum der Verklebung	13.02.2018						
Bezeichnung	PUR						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0.75 ± 0.1 N/mm ²						
Presszeit	46h						
Prüfung	19.02.2018						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
125_A	23000	40	30		30		
125_B	17300	50		50			
126_A	23900	50		50			
126_B	16800	80		20			
127_A	22100	50	10	40			
127_B	20500	50		40	10		
128_A	19200	25	30	45			
128_B	21400	60		40			

Ergebnisse der Versuchsserie: 033_C1_1_EP

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	033	C1		schalglatt		EP	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
129	170,81	49,28	50,38	29,28	156,12	18,02	
130	166,83	49,04	49,88	29,15	156,12	18,02	
131	171,51	49,17	50,80	29,18	156,12	18,02	
132	170,94	49,15	50,37	29,18	156,12	18,02	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
129_A	44,42	50,80	50,11	39,15	1,68	58	11,2
129_B	43,94	50,78	50,02	39,16	1,90	58	11,2
130_A	43,82	50,64	50,16	39,22	1,54	50	11,2
130_B	44,16	50,91	50,09	39,20	1,57	49	11,2
131_A	36,73	50,67	50,11	39,05	5,09	57	11,2
131_B	37,69	50,72	50,12	39,15	4,73	59	11,2
132_A	37,03	50,85	50,15	39,15	4,75	59	11,2
132_B	44,00	50,67	50,12	39,11	1,74	60	11,2
Klebstoff							
Datum der Verklebung	15.02.2018						
Bezeichnung	EP						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0.75 ± 0.1 N/mm²						
Presszeit	4h						
Prüfung	19.02.2018						
Ergebnisse	Bruchbild						
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
129_A	23900	50		40	10		
129_B	26100	60	30		10		
130_A	25500	50	30	10	10		
130_B	22800	60	20		20		
131_A	20900	100					
131_B	20100	100					
132_A	25500	100					
132_B	20600	40	20	20	20		

Ergebnisse der Versuchsserie: 034_C1_2_EP

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	034	C1		geschliffen		EP	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
133	160,87	49,28	49,78	27,93	156,12	18,02	
134	155,87	49,24	49,46	27,24	156,12	18,02	
135	153,32	49,29	49,45	26,75	156,12	18,02	
136	149,18	49,43	50,03	27,43	156,12	18,02	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
133_A	44,09	51,02	50,12	39,11	1,82	59	11,2
133_B	44,24	50,88	50,13	39,13	1,65	56	11,2
134_A	43,84	50,68	50,20	39,25	1,66	57	11,2
134_B	44,19	51,06	50,36	39,12	1,61	55	11,2
135_A	37,66	50,84	50,09	39,05	4,92	59	11,2
135_B	36,72	50,64	50,16	39,17	5,09	56	11,2
136_A	37,03	50,73	50,18	39,23	5,00	60	11,2
136_B	44,33	50,88	50,08	39,08	1,79	61	11,2
Klebstoff							
Datum der Verklebung	15.02.2018						
Bezeichnung	EP						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0.75 +- 0.1 N/mm²						
Presszeit	4h						
Prüfung	19.02.2018						
Ergebnisse		Bruchbild					
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
133_A	23500	100					
133_B	27400	50	40	10			
134_A	24600	90	10				
134_B	19800	90		10			
135_A	18000	50		50			
135_B	20300	70	10	20			
136_A	19000	80		20			
136_B	23200	80		20			

Ergebnisse der Versuchsserie: 035_C1_3_EP

	Lfd. Nr	Betonmischung		Oberflächenbearb.		Klebstoff	
Bezeichnung	035	C1		sandgestrahlt		EP	
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm ²]	Zugf. [N/mm ²]	
137	165,62	49,12	49,75	29,17	156,12	18,02	
138	167,30	49,30	50,04	29,13	156,12	18,02	
139	167,97	49,28	50,19	29,29	156,12	18,02	
140	164,50	49,25	49,70	29,17	156,12	18,02	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
137_A	43,43	50,78	50,15	39,09	1,62	55	11,2
137_B	44,30	50,97	50,16	39,11	1,68	59	11,2
138_A	43,82	50,68	50,10	39,08	1,65	58	11,2
138_B	44,07	50,72	50,11	39,18	1,53	55	11,2
139_A	36,92	50,64	50,03	39,09	5,20	60	11,2
139_B	37,29	50,60	50,12	39,12	4,73	57	11,2
140_A	37,18	50,71	50,24	39,14	5,09	58	11,2
140_B	44,04	50,79	50,11	39,05	1,73	58	11,2
Klebstoff							
Datum der Verklebung	15.02.2018						
Bezeichnung	EP						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0.75 ± 0.1 N/mm ²						
Presszeit	4h						
Prüfung	19.02.2018						
Ergebnisse	Bruchbild						
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
137_A	20000	90		10			
137_B	25100	85	5	10			
138_A	24300	75	25				
138_B	21400	25	60	15			
139_A	21300	20		80			
139_B	20300	60	30	10			
140_A	21900	80		20			
140_B	24300	25	65	10			

Ergebnisse der Versuchsserie: 036_C2_1_EP

	Lfd. Nr	Betonmischung	Oberflächenbearb.	Klebstoff			
Bezeichnung	036	C2	schalglatt	EP			
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm ²]	Zugf. [N/mm ²]	
141	181,81	49,26	50,33	29,26	261,8	37,68	
142	180,33	49,25	49,67	29,44	261,8	37,68	
143	177,34	49,28	49,40	29,46	261,8	37,68	
144	175,67	49,09	49,46	29,20	261,8	37,68	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
141_A	40,15	50,71	50,07	38,56	3,06	66	11,2
141_B	42,79	50,79	50,12	38,61	2,23	65	11,2
142_A	42,67	50,62	50,21	38,49	2,12	60	11,2
142_B	42,69	50,51	50,21	38,69	2,00	57	11,2
143_A	40,25	50,65	50,14	38,45	2,94	67	11,2
143_B	42,35	50,58	50,06	38,49	2,11	53	11,2
144_A	40,82	50,72	50,14	38,63	2,89	64	11,2
144_B	42,92	50,54	50,22	38,63	2,15	77	11,2
Klebstoff							
Datum der Verklebung	15.02.2018						
Bezeichnung	EP						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0.75 ± 0.1 N/mm ²						
Presszeit	16h						
Prüfung	19.02.2018						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
141_A	21900	90		10			
141_B	17800	85		15			
142_A	15200	25	10	10	55		
142_B	19200	30		20	50		
143_A	17100	10	10	70	10		
143_B	18100	60	10		30		
144_A	11400	20		55	25		
144_B	24700	90		10			

Ergebnisse der Versuchsserie: 037_C2_2_EP

	Lfd. Nr	Betonmischung	Oberflächenbearb.	Klebstoff			
Bezeichnung	037	C2	geschliffen	EP			
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm²]	Zugf. [N/mm²]	
145	167,24	49,25	50,35	26,98	261,8	37,68	
146	167,52	49,32	50,34	26,64	261,8	37,68	
147	170,96	49,33	50,91	27,48	261,8	37,68	
148	163,21	49,34	50,63	26,12	261,8	37,68	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahringbreite [mm]	Jahringlage [°]	Feuchte [%]
145_A	41,08	50,85	50,17	38,70	3,00	65	12,2
145_B	42,82	50,78	50,15	38,65	2,22	68	12,2
146_A	42,96	50,62	50,37	38,53	2,12	58	12,2
146_B	42,67	50,53	50,36	39,20	2,04	58	12,2
147_A	40,17	50,61	50,19	38,91	2,89	68	12,2
147_B	42,26	50,77	50,38	38,61	2,07	52	12,2
148_A	40,85	50,61	50,06	38,58	2,89	65	12,2
148_B	42,96	50,87	50,00	38,78	2,08	65	12,2
Klebstoff							
Datum der Verklebung	15.02.2018						
Bezeichnung	EP						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0.75 ± 0.1 N/mm²						
Presszeit	16h						
Prüfung	19.02.2018						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
145_A	19200	20		80			
145_B	20900	50		50			
146_A	19400	80	5		15		
146_B	26000	80		20			
147_A	20600	100					
147_B	25100	50	20	30			
148_A	13200	75		25			
148_B	16800	60		40			

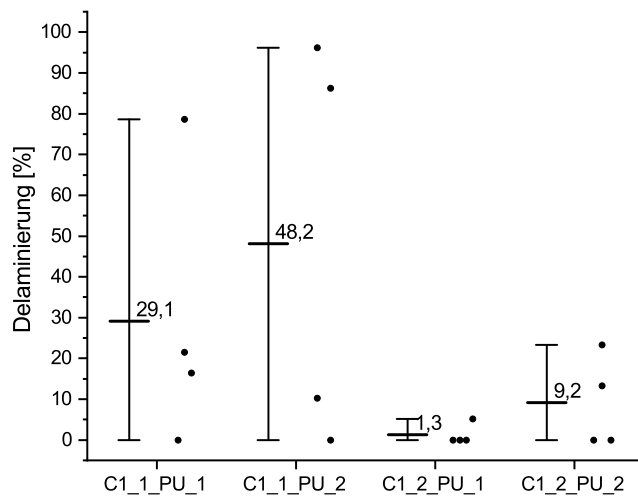
Ergebnisse der Versuchsserie: 038_C2_3_EP

	Lfd. Nr	Betonmischung	Oberflächenbearb.	Klebstoff			
Bezeichnung	038	C2	sandgestrahlt	EP			
Prüfkörper - Beton	Gewicht [g]	Länge [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	Druckf. [N/mm ²]	Zugf. [N/mm ²]	
149	178,23	49,24	50,91	29,30	261,8	37,68	
150	175,20	49,29	49,85	29,20	261,8	37,68	
151	175,64	49,23	49,80	29,13	261,8	37,68	
152	174,30	49,33	49,36	29,23	261,8	37,68	
Prüfkörper-Holz	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Jahrringbreite [mm]	Jahrringlage [°]	Feuchte [%]
149_A	40,81	50,85	50,40	38,65	3,33	59	12,2
149_B	43,24	50,88	50,31	38,86	2,17	66	12,2
150_A	43,24	50,64	50,15	38,47	2,16	60	12,2
150_B	42,79	50,50	50,18	38,57	2,04	56	12,2
151_A	40,07	50,55	50,19	38,59	2,83	73	12,2
151_B	42,42	50,71	50,26	38,58	2,00	54	12,2
152_A	41,72	51,15	50,16	38,73	2,80	61	12,2
152_B	43,93	50,65	49,97	38,61	2,04	64	12,2
Klebstoff							
Datum der Verklebung	15.02.2018						
Bezeichnung	EP						
Klima	20°C/65%rF						
Auftragsmenge	2g für 2 Scherflächen						
Verarbeitungszeit	5 min je Serie						
Pressdruck	0.75 ± 0.1 N/mm ²						
Presszeit	16h						
Prüfung	19.02.2018						
Ergebnisse							
	Bruchkraft [N]	Holzbruch	Betonbruch	Klebstoff auf Holz	Klebstoff auf Beton	Klebstoff	
149_A	14100	80		20			
149_B	18600	10					
150_A	17200	10					
150_B	28000	95	5				
151_A	20900	60	15	25			
151_B	24300	30	20	50			
152_A	14700	50		50			
152_B	22000	60		40			

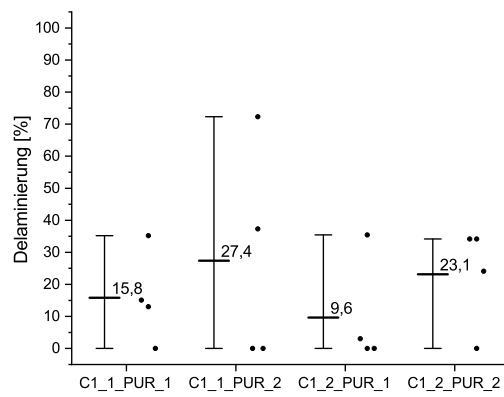
B Delaminierungsversuche

In diesem Anhang sind alle Ergebniss der Delaminierungsversuche in Diagrammform und im Anschluss daran die Rohdaten dargestellt.

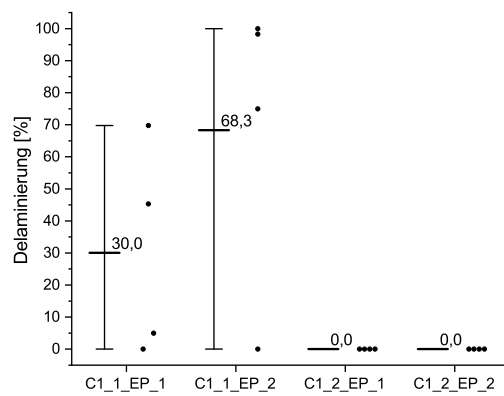
Ergebnisse der Versuche mit Beton C1



(a) Ergebnisse C1.PU

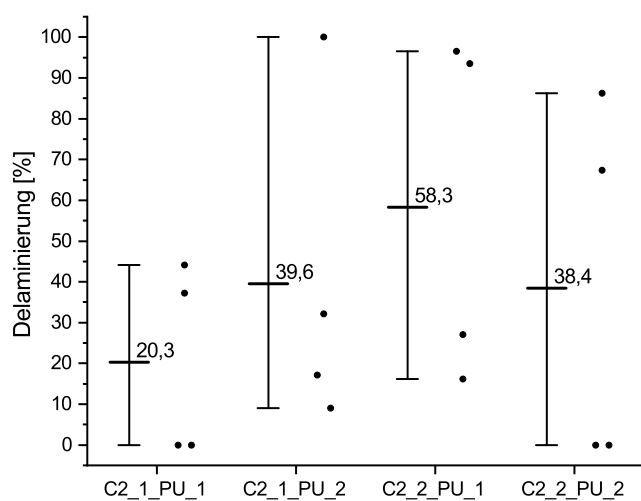


(b) Ergebnisse C1.PUR

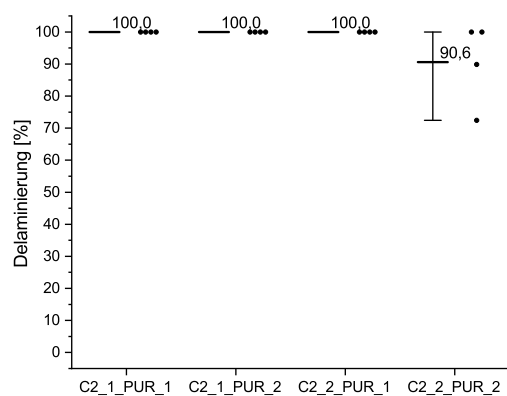


(c) Ergebnisse C1.EP

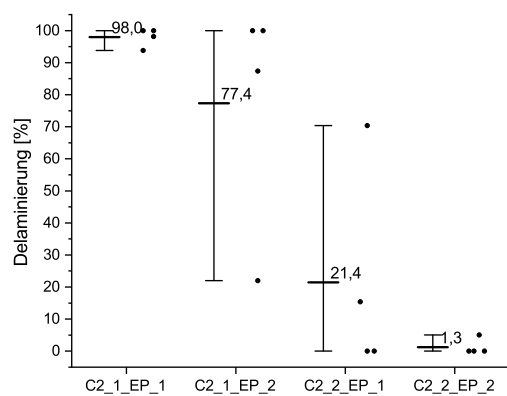
Ergebnisse der Versuche mit Beton C2



(a) Ergebnisse C2.PU



(b) Ergebnisse C2.PUR



(c) Ergebnisse C2.EP

Versuch C1_PU

Delaminierungsversuch												
Probekörperbezeichnung						Beton				Prüfkörpergewicht [g]		
						Gewicht [g]	L [mm]	B [mm]	T [mm]	Beginn	Ziel	Ende
C1	1	PU	01			708,36	99,60	98,45	29,90	1055,61	1077,31	1042,60
C1	1	PU	02			708,92	99,10	98,90	29,95	1061,08	1083,09	1044,20
C1	2	PU	01			665,70	99,00	98,60	27,96	1013,10	1034,81	993,80
C1	2	PU	02			673,74	99,52	98,70	28,40	1023,47	1045,33	1007,20
Klebefuge						Längen [mm]						
						Hirnholz	Fugenöffnung					
C1	1	PU	01	A	1	98,00	77,00					
C1	1	PU	01	B	1	97,90	21,00					
C1	1	PU	01	A	2	97,7	16,00					
C1	1	PU	01	B	2	97,7	0,00					
C1	1	PU	02	A	1	98,50	85,00					
C1	1	PU	02	B	1	98,80	95,00					
C1	1	PU	02	A	2	97,80	0,00					
C1	1	PU	02	B	2	98,00	10,00					
C1	2	PU	01	A	1	97,90	0,00					
C1	2	PU	01	B	1	98,01	0,00					
C1	2	PU	01	A	2	97,80	5,00					
C1	2	PU	01	B	2	98,20	0,00					
C1	2	PU	02	A	1	98,10	13,00					
C1	2	PU	02	B	1	98,40	23,00					
C1	2	PU	02	A	2	98,00	0,00					
C1	2	PU	02	B	2	98,30	0,00					

Beton:	
Druckfestigkeit [N/mm ²]	137,5
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	14,4

Versuch C1_PUR

Delaminierungsversuche												
Probekörperbezeichnung						Beton				Prüfkörpergewicht [g]		
						Gewicht [g]	L [mm]	B [mm]	T [mm]	Beginn	Ziel	Ende
C1	1	PUR	01			730,38	100,60	99,90	29,95	1024,80	1043,20	1011,20
C1	1	PUR	02			727,64	100,40	99,90	29,93	1019,80	1038,06	1003,20
C1	2	PUR	01			711,38	100,26	99,73	29,36	999,00	1016,98	987,20
C1	2	PUR	02			702,64	100,39	99,75	29,00	995,00	1013,27	977,80

Klebefuge						Längen [mm]	
						Hirnholz	Fugenöffnung
C1	1	PUR	01	A	1	99,51	35,00
C1	1	PUR	01	B	1	99,46	13,00
C1	1	PUR	01	A	2	99,28	15,00
C1	1	PUR	01	B	2	99,1	0,00
C1	1	PUR	02	A	1	99,55	0,00
C1	1	PUR	02	B	1	99,55	72,00
C1	1	PUR	02	A	2	98,91	0,00
C1	1	PUR	02	B	2	99,18	37,00
C1	2	PUR	01	A	1	98,71	35,00
C1	2	PUR	01	B	1	98,98	0,00
C1	2	PUR	01	A	2	99,18	3,00
C1	2	PUR	01	B	2	99,01	0,00
C1	2	PUR	02	A	1	99,48	34,00
C1	2	PUR	02	B	1	99,50	34,00
C1	2	PUR	02	A	2	99,19	0,00
C1	2	PUR	02	B	2	99,41	24,00

Beton:	
Druckfestigkeit [N/mm ²]	121,2
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	16,1

Versuch C1_EP

Delaminierungsversuche												
Probekörperbezeichnung						Beton				Prüfkörpergewicht [g]		
						Gewicht [g]	L [mm]	B [mm]	T [mm]	Beginn	Ziel	Ende
C1	1	EP	01			742,94	100,90	100,40	29,95	1041,40	1060,05	1039,60
C1	1	EP	02			738,88	100,65	100,39	29,93	1043,00	1062,01	1041,40
C1	2	EP	01			721,36	100,38	100,25	29,17	1018,00	1036,54	1014,80
C1	2	EP	02			724,60	101,30	100,25	29,12	1018,60	1036,98	1015,00

Klebefuge						Längen [mm]	
						Hirnholz	Fugenöffnung
C1	1	EP	01	A	1	100,32	70,00
C1	1	EP	01	B	1	99,76	5,00
C1	1	EP	01	A	2	99,26	45,00
C1	1	EP	01	B	2	99,12	0,00
C1	1	EP	02	A	1	99,99	0,00
C1	1	EP	02	B	1	100,01	75,00
C1	1	EP	02	A	2	99,77	99,77
C1	1	EP	02	B	2	99,70	98,00
C1	2	EP	01	A	1	99,47	0,00
C1	2	EP	01	B	1	99,95	0,00
C1	2	EP	01	A	2	99,34	0,00
C1	2	EP	01	B	2	99,71	0,00
C1	2	EP	02	A	1	99,83	0,00
C1	2	EP	02	B	1	99,88	0,00
C1	2	EP	02	A	2	99,15	0,00
C1	2	EP	02	B	2	99,54	0,00

Beton:	
Druckfestigkeit [N/mm²]	139,9
Biegezugfestigkeit [N/mm²]	19,3

Versuch C2_PU

Delaminierungsversuche												
Probekörperbezeichnung						Beton				Prüfkörpergewicht [g]		
						Gewicht [g]	L [mm]	B [mm]	T [mm]	Beginn	Ziel	Ende
C2	1	PU	01			772,04	101,00	99,95	29,96	1084,20	1103,71	1074,80
C2	1	PU	02			774,96	101,03	100,23	29,93	1075,40	1094,18	1068,40
C2	2	PU	01			749,00	101,07	100,00	28,88	1059,00	1078,38	1052,40
C2	2	PU	02			755,60	100,99	99,85	29,18	1052,00	1070,53	1043,80

Klebefuge						Längen [mm]	
						Hirnholz	Fugenöffnung
C2	1	PU	01	A	1	98,91	0,00
C2	1	PU	01	B	1	99,39	37,00
C2	1	PU	01	A	2	99,44	0,00
C2	1	PU	01	B	2	99,63	44,00
C2	1	PU	02	A	1	99,51	32,00
C2	1	PU	02	B	1	99,63	99,63
C2	1	PU	02	A	2	99,26	9,00
C2	1	PU	02	B	2	99,34	17,00
C2	2	PU	01	A	1	99,23	16,00
C2	2	PU	01	B	1	99,57	27,00
C2	2	PU	01	A	2	99,42	93,00
C2	2	PU	01	B	2	99,46	96,00
C2	2	PU	02	A	1	99,41	67,00
C2	2	PU	02	B	1	99,66	86,00
C2	2	PU	02	A	2	99,74	0,00
C2	2	PU	02	B	2	99,02	0,00

Beton:	
Druckfestigkeit [N/mm²]	248,4
Biegezugfestigkeit [N/mm²]	35,1

Versuch C2_PUR

Delaminierungsversuche												
Probekörperbezeichnung						Beton				Prüfkörpergewicht [g]		
						Gewicht [g]	L [mm]	B [mm]	T [mm]	Beginn	Ziel	Ende
C2	1	PUR	01			779,08	101,10	100,01	29,92	1051,60	1068,63	
C2	1	PUR	02			774,76	100,85	99,98	29,93	1048,40	1065,50	
C2	2	PUR	01			754,38	100,94	99,98	29,23	1028,60	1045,74	
C2	2	PUR	02			761,10	101,12	100,15	29,29	1036,20	1053,39	1015,60

Klebefuge						Längen [mm]	
						Hirnholz	Fugenöffnung
C2	1	PUR	01	A	1	99,40	99,40
C2	1	PUR	01	B	1	99,11	99,11
C2	1	PUR	01	A	2	99,43	99,43
C2	1	PUR	01	B	2	99,6	99,60
C2	1	PUR	02	A	1	99,25	99,25
C2	1	PUR	02	B	1	99,56	99,56
C2	1	PUR	02	A	2	98,94	98,94
C2	1	PUR	02	B	2	99,37	99,37
C2	2	PUR	01	A	1	99,30	99,30
C2	2	PUR	01	B	1	99,11	99,11
C2	2	PUR	01	A	2	98,81	98,81
C2	2	PUR	01	B	2	98,89	98,89
C2	2	PUR	02	A	1	99,15	99,15
C2	2	PUR	02	B	1	99,44	72,00
C2	2	PUR	02	A	2	99,40	99,40
C2	2	PUR	02	B	2	99,01	89,00

Beton:	
Druckfestigkeit [N/mm²]	237,1
Biegezugfestigkeit [N/mm²]	31,8

Versuch C2_EP

Delaminierungsversuche												
Probekörperbezeichnung						Beton				Prüfkörpergewicht [g]		
						Gewicht [g]	L [mm]	B [mm]	T [mm]	Beginn	Ziel	Ende
C2	1	EP	01			776,66	100,85	99,90	29,93	1062,00	1079,83	1054,60
C2	1	EP	02			784,52	101,07	100,36	29,90	1076,60	1094,86	1067,20
C2	2	EP	01			764,74	101,18	100,04	29,45	1026,40	1042,75	1018,00
C2	2	EP	02			762,16	101,05	100,14	29,43	1077,60	1097,32	1082,40

Klebefuge						Längen [mm]	
						Hirnholz	Fugenöffnung
C2	1	EP	01	A	1	99,40	99,40
C2	1	EP	01	B	1	99,85	98,00
C2	1	EP	01	A	2	99,89	99,89
C2	1	EP	01	B	2	100,22	94,00
C2	1	EP	02	A	1	100,09	100,09
C2	1	EP	02	B	1	99,54	87,00
C2	1	EP	02	A	2	100,07	100,07
C2	1	EP	02	B	2	99,99	22,00
C2	2	EP	01	A	1	97,53	0,00
C2	2	EP	01	B	1	100,93	71,00
C2	2	EP	01	A	2	97,22	15,00
C2	2	EP	01	B	2	100,13	0,00
C2	2	EP	02	A	1	99,43	5,00
C2	2	EP	02	B	1	99,64	0,00
C2	2	EP	02	A	2	99,66	0,00
C2	2	EP	02	B	2	100,09	0,00

Beton:	
Druckfestigkeit [N/mm²]	229,6
Biegezugfestigkeit [N/mm²]	26,9

C Verbundversuche

Tabellarische Versuchsergebnisse

Körper	Betonlamelle			Maschinen	Holz	Betonkennwerte		
	Länge	Breite	Dicke	kraft	bruch	f_{cm}	f_{cl}	E_{mean}
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
V_S.1.1	143,68	101,11	29,90	188,09	100	153	18,41	44179
V_S.1.2	143,35	98,275	29,90	58,86	10	138	15,95	45042
V_S.1.3	143,20	99,94	29,90	197,90	98	154	17,30	45561
V_S.2.1	294,60	100,18	29,90	120,49	95	135	15,95	38707
V_S.2.2	293,50	100,45	29,90	158,46	98	135	15,95	38707
V_S.2.3	294,25	100,26	29,90	126,073	85	133	17,59	40371
V_S.3.1	438,65	100,04	29,90	220,99	99	153	18,41	44179
V_S.3.2	438,38	100,60	29,90	196,47	60	138	15,95	45042
V_S.3.3	438,70	100,60	29,90	217,34	100	154	17,30	45561
V_G.1.1	143,46	99,56	26,80	103,81	98	136	14,58	41582
V_G.1.2	142,93	99,60	28,60	50,02	90	133	17,66	41665
V_G.1.3	143,42	99,52	28,05	84,65	98	138	15,99	42682
V_G.2.1	295,40	99,97	28,70	137,51	100	142	16,30	41336
V_G.2.2	294,50	100,47	28,87	154,39	100	142	16,30	41336
V_G.2.3	294,00	100,10	28,70	198,03	98	133	17,59	40371
V_G.3.1	445,10	100,65	28,63	234,15	100	138	15,99	42682
V_G.3.2	444,80	100,59	28,25	252,59	99	136	14,58	41582
V_G.3.3	445,50	99,86	28,31	184,57	100	133	17,66	41665

Ergebnisse konventionelle Messtechnik

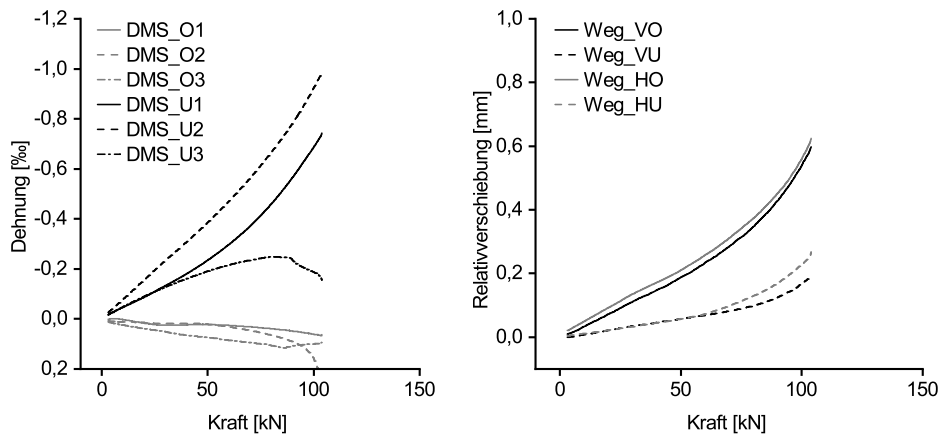


Abbildung C.1: Ergebnisse von Versuch V_G.1.1

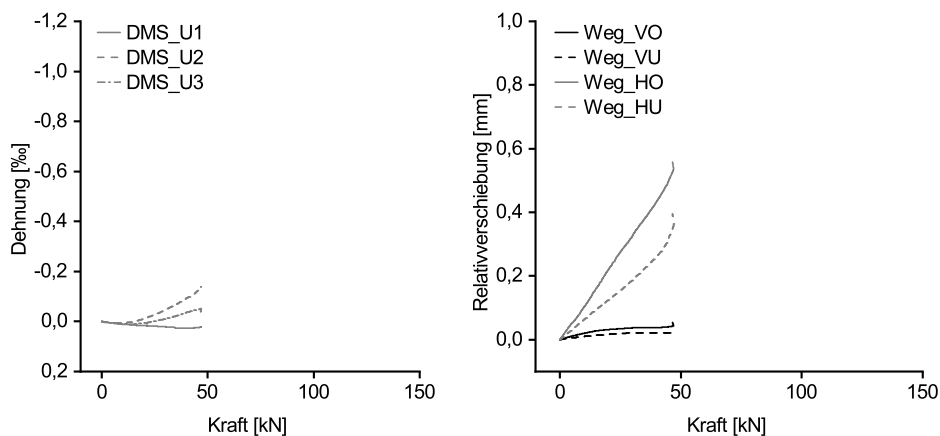


Abbildung C.2: Ergebnisse von Versuch V_G.1.2

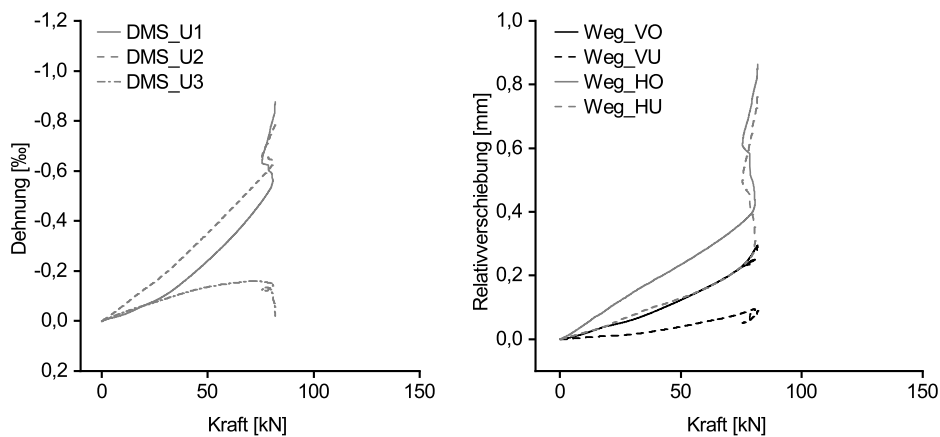


Abbildung C.3: Ergebnisse von Versuch V_G.1.3

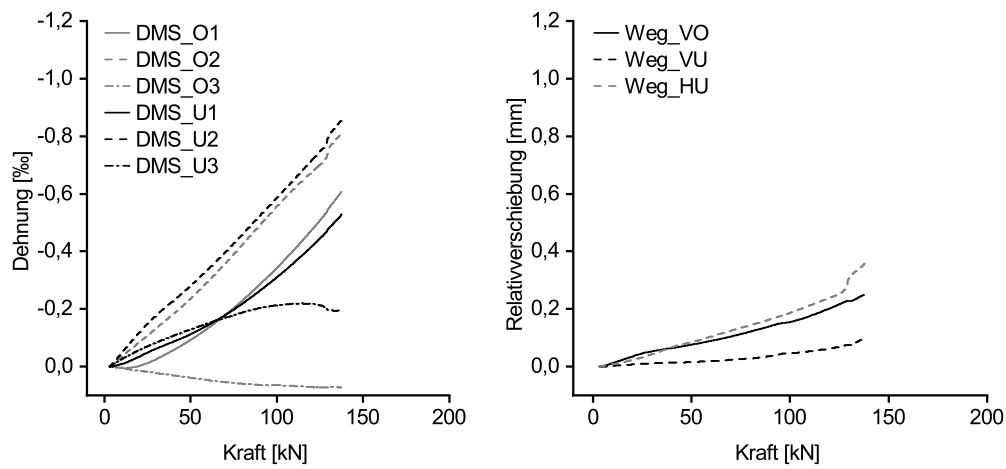


Abbildung C.4: Ergebnisse von Versuch V_G.2.1

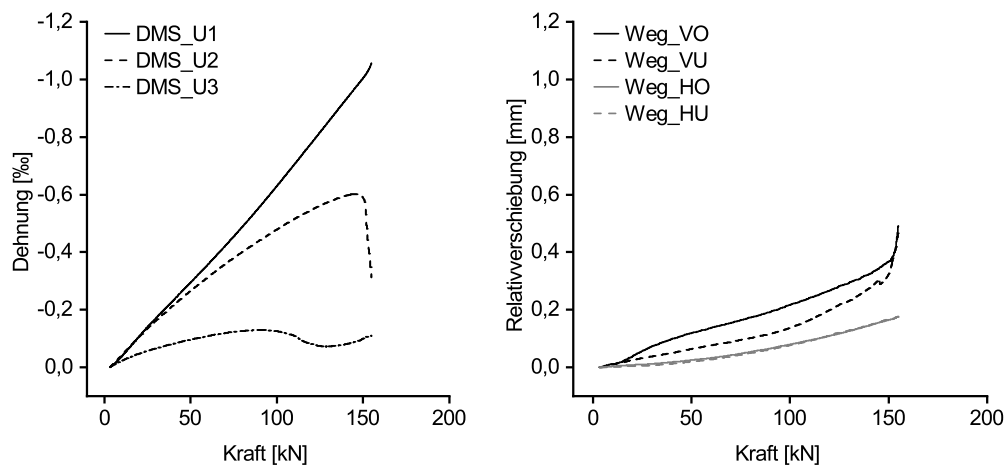


Abbildung C.5: Ergebnisse von Versuch V_G.2.2

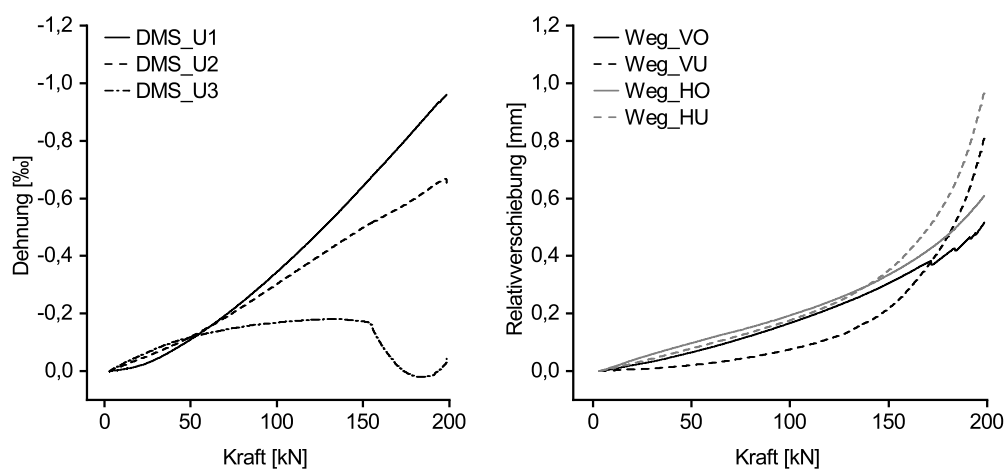


Abbildung C.6: Ergebnisse von Versuch V_G.2.3

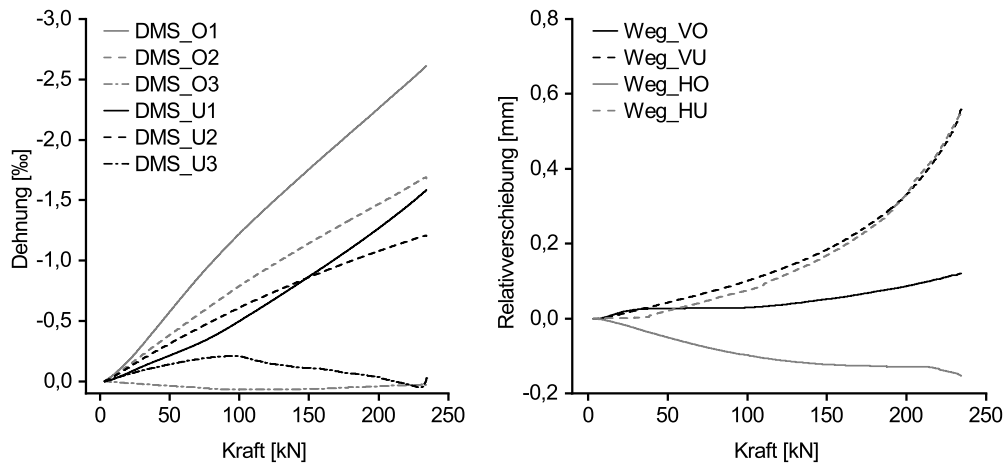


Abbildung C.7: Ergebnisse von Versuch V_G.3.1

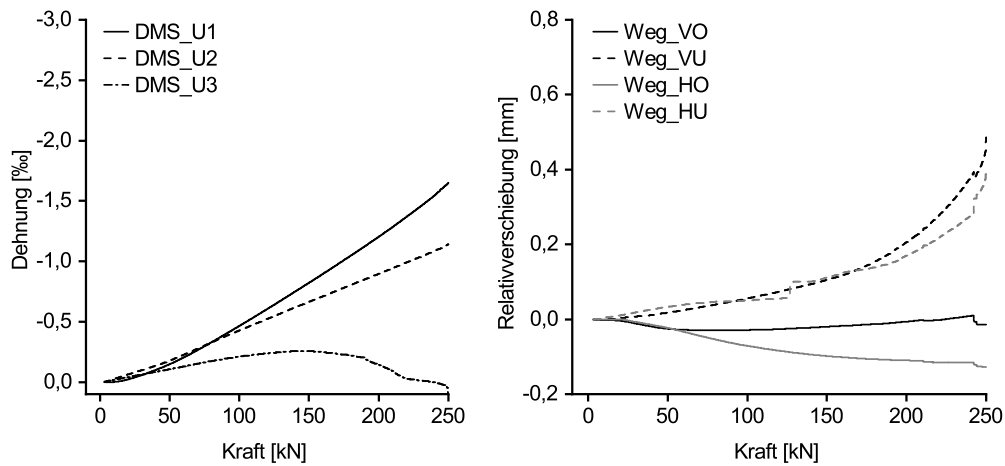


Abbildung C.8: Ergebnisse von Versuch V_G.3.2

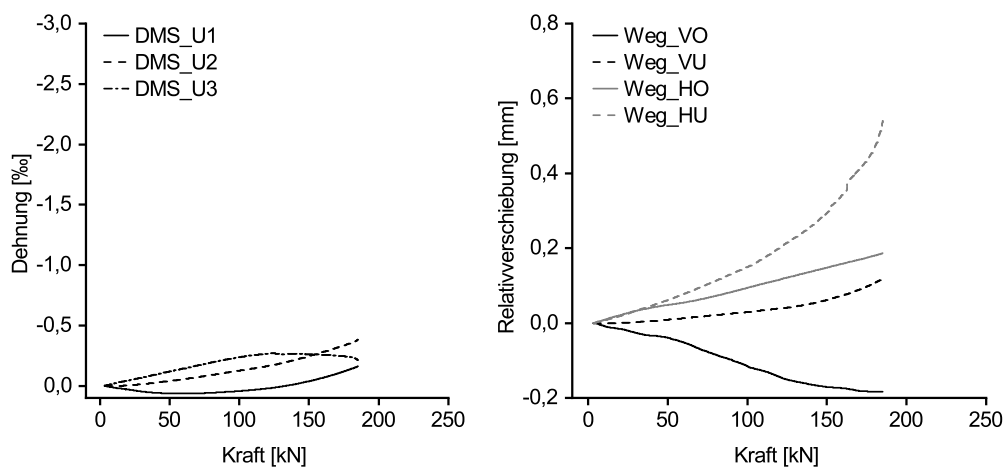


Abbildung C.9: Ergebnisse von Versuch V_G.3.3

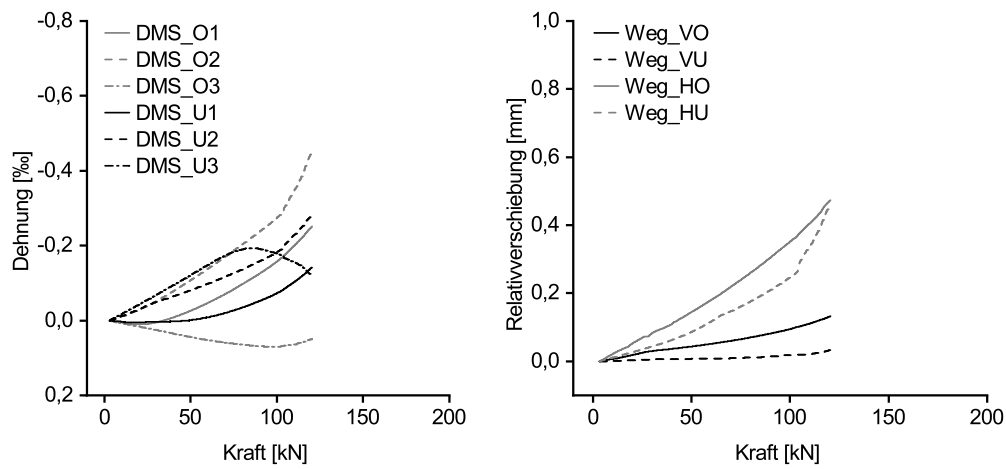


Abbildung C.10: Ergebnisse von Versuch V_S.2.1

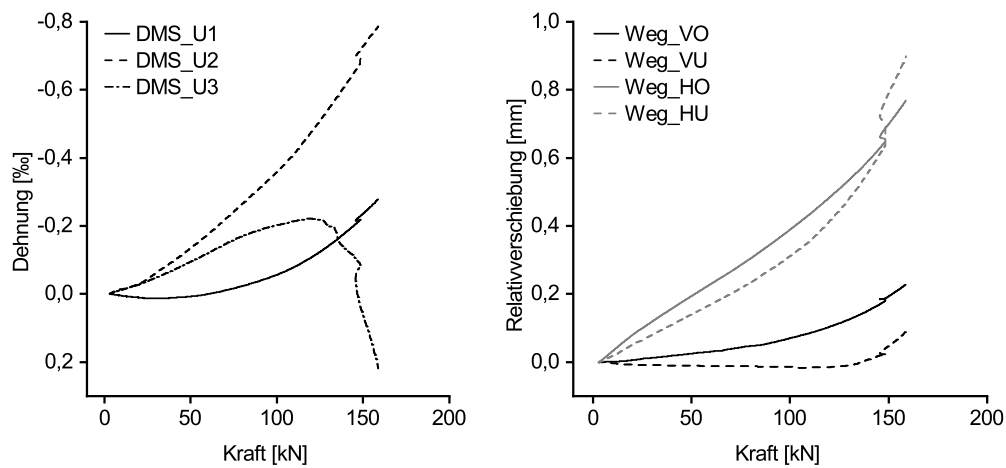


Abbildung C.11: Ergebnisse von Versuch V_S.2.2

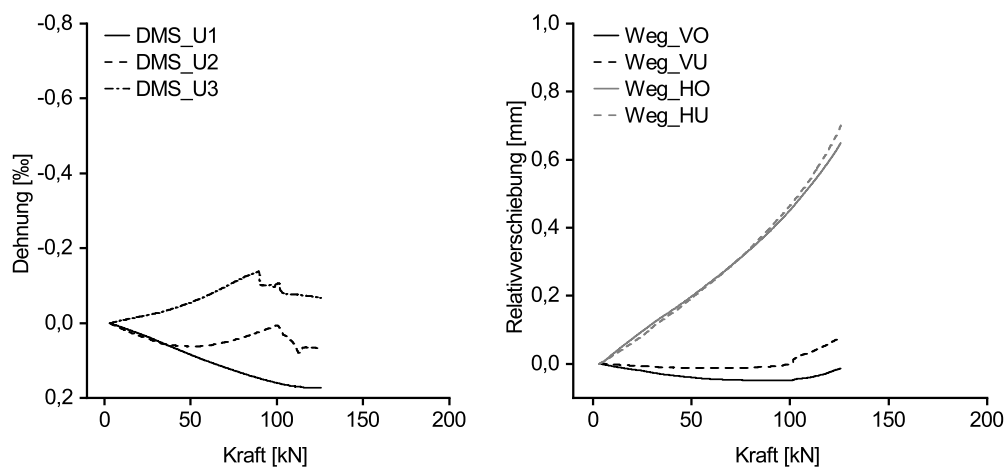


Abbildung C.12: Ergebnisse von Versuch V_S.2.3

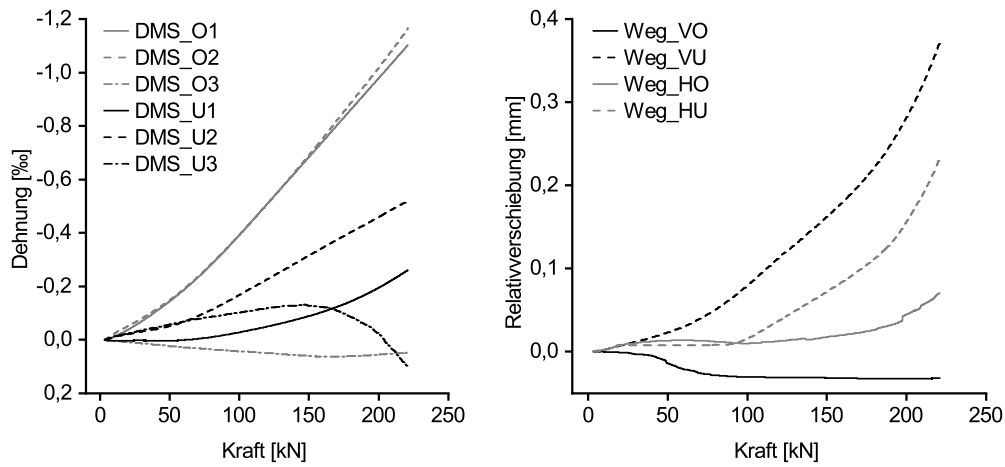


Abbildung C.13: Ergebnisse von Versuch V_S.3.1

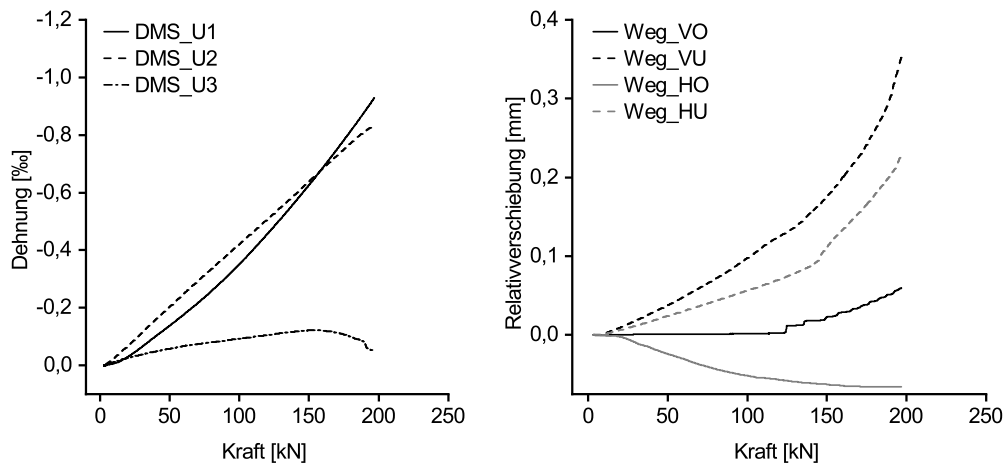


Abbildung C.14: Ergebnisse von Versuch V_S.3.2

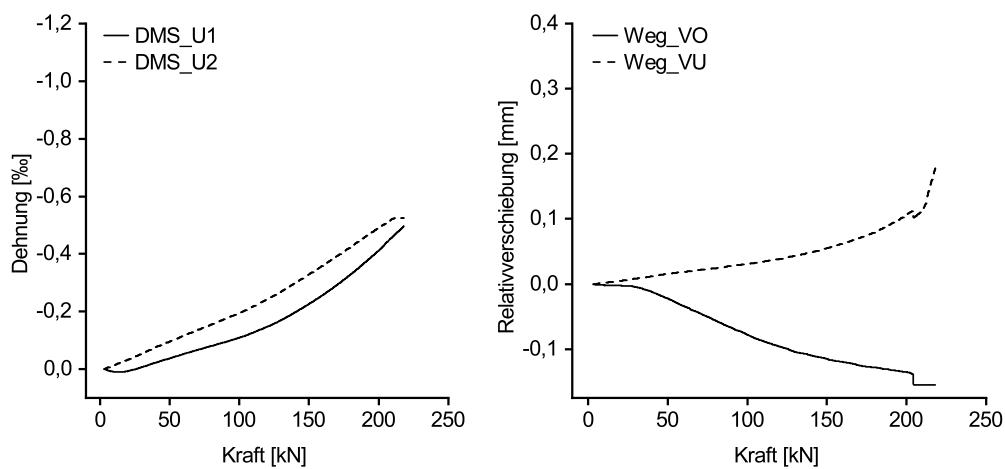


Abbildung C.15: Ergebnisse von Versuch V_S.3.3

D Bauteilversuche

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Bauteilversuche in Diagrammen dargestellt. Hierbei handelt es sich um nicht geglättete Rohdaten. Die Position der einzelnen Dehnmessstreifen sowie die dazugehörige Bezeichnung sind Abbildung D.1 zu entnehmen.

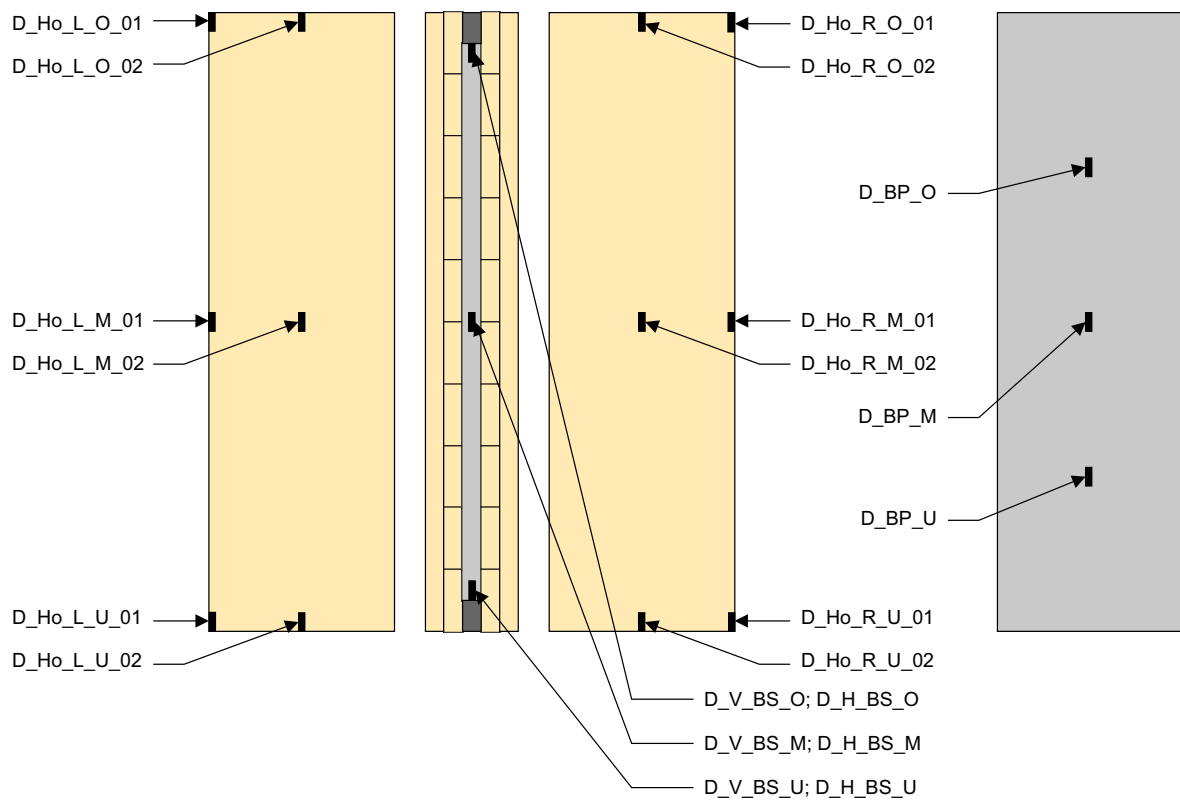
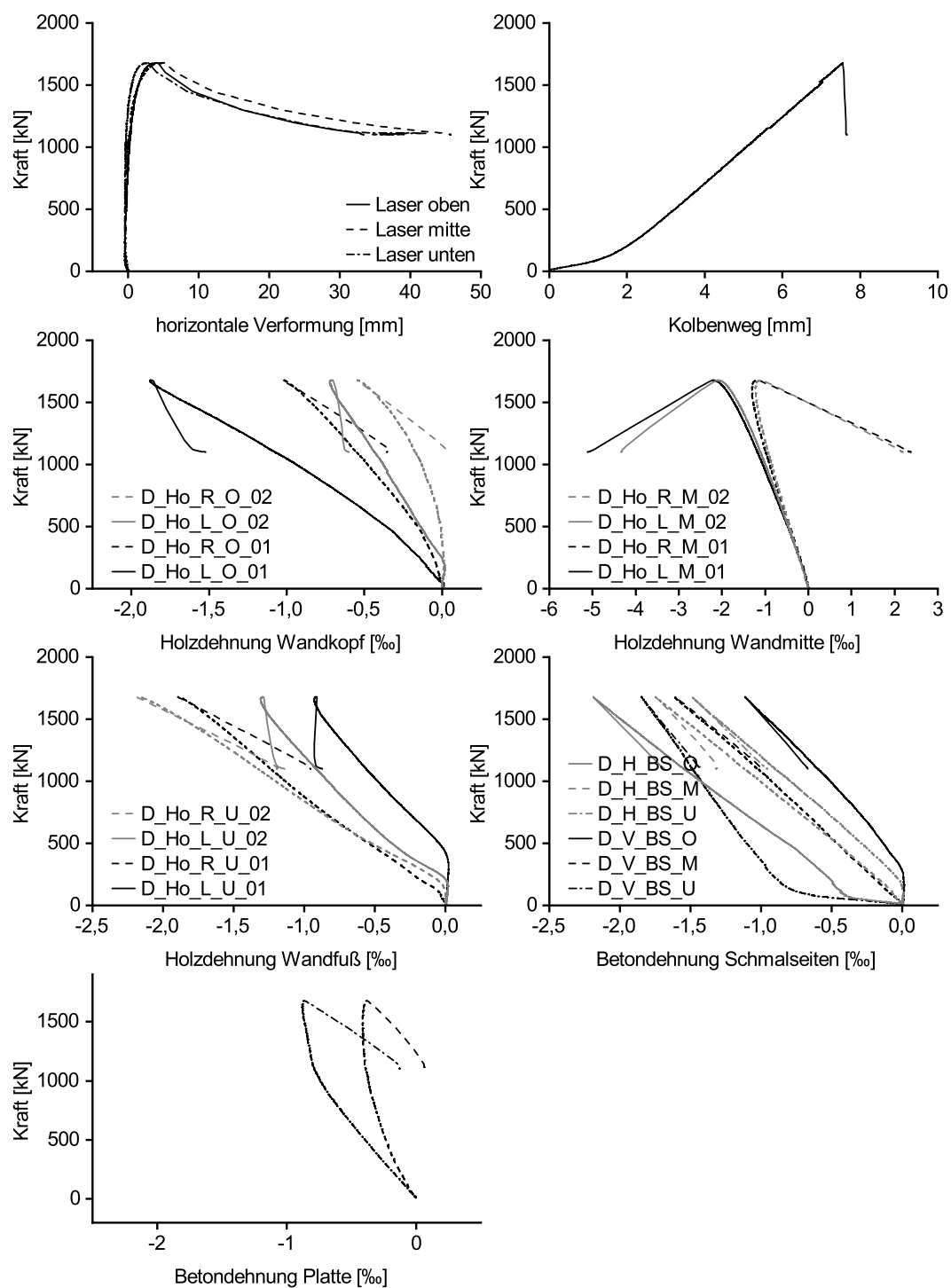
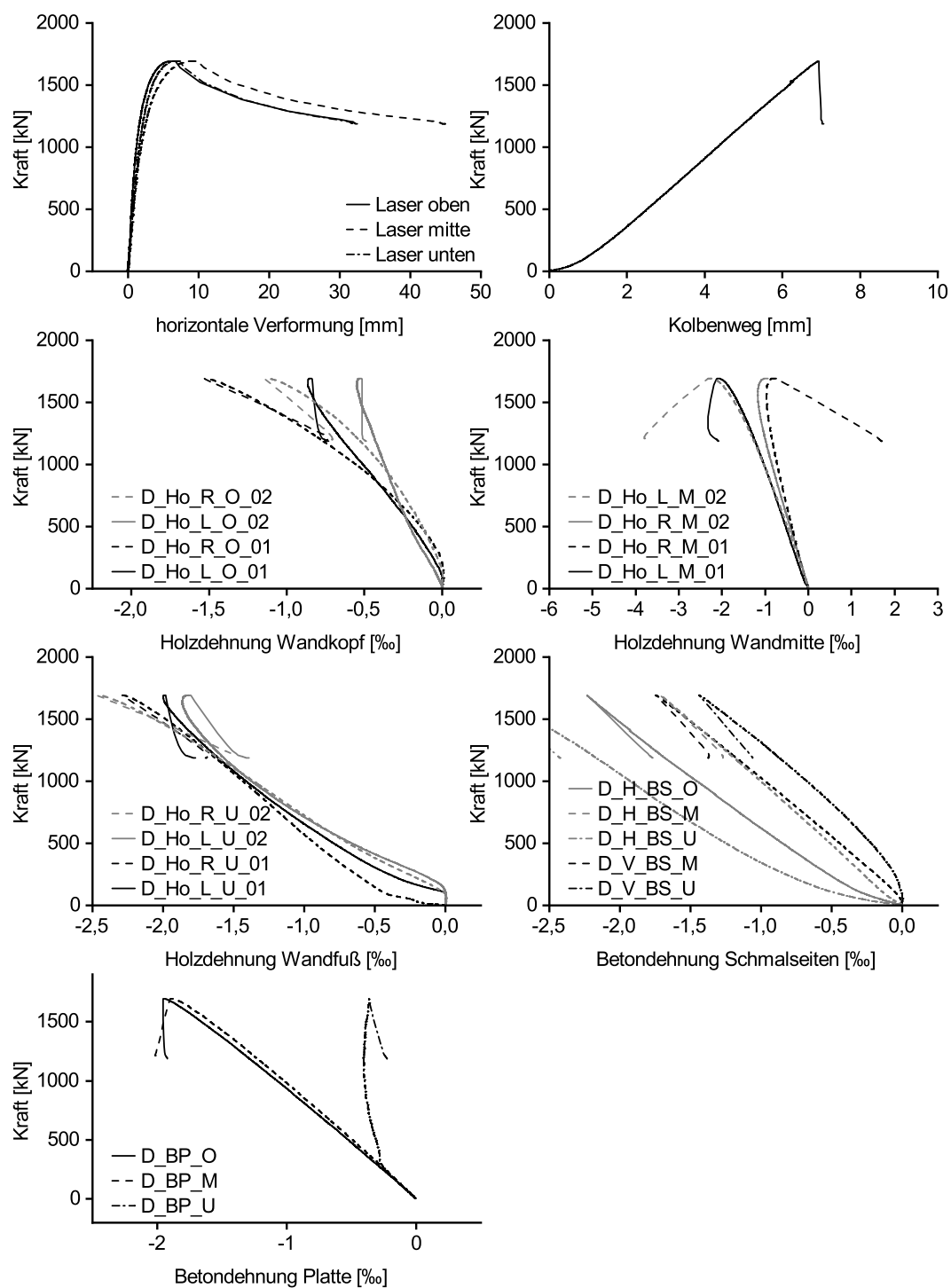


Abbildung D.1: Am Prüfkörper angebrachte Messtechnik

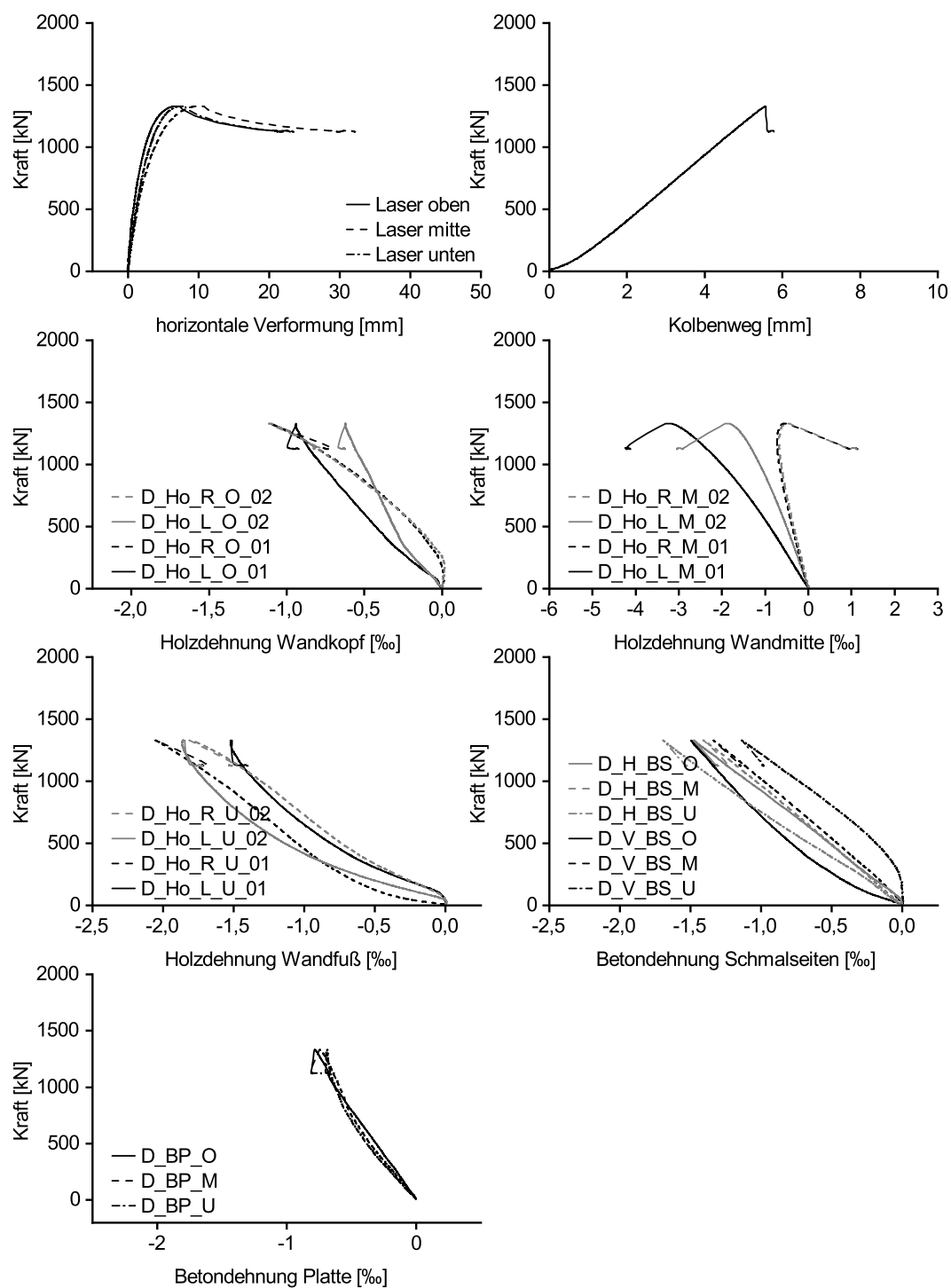
Ergebnisse von Versuch: V_D_30_00_1



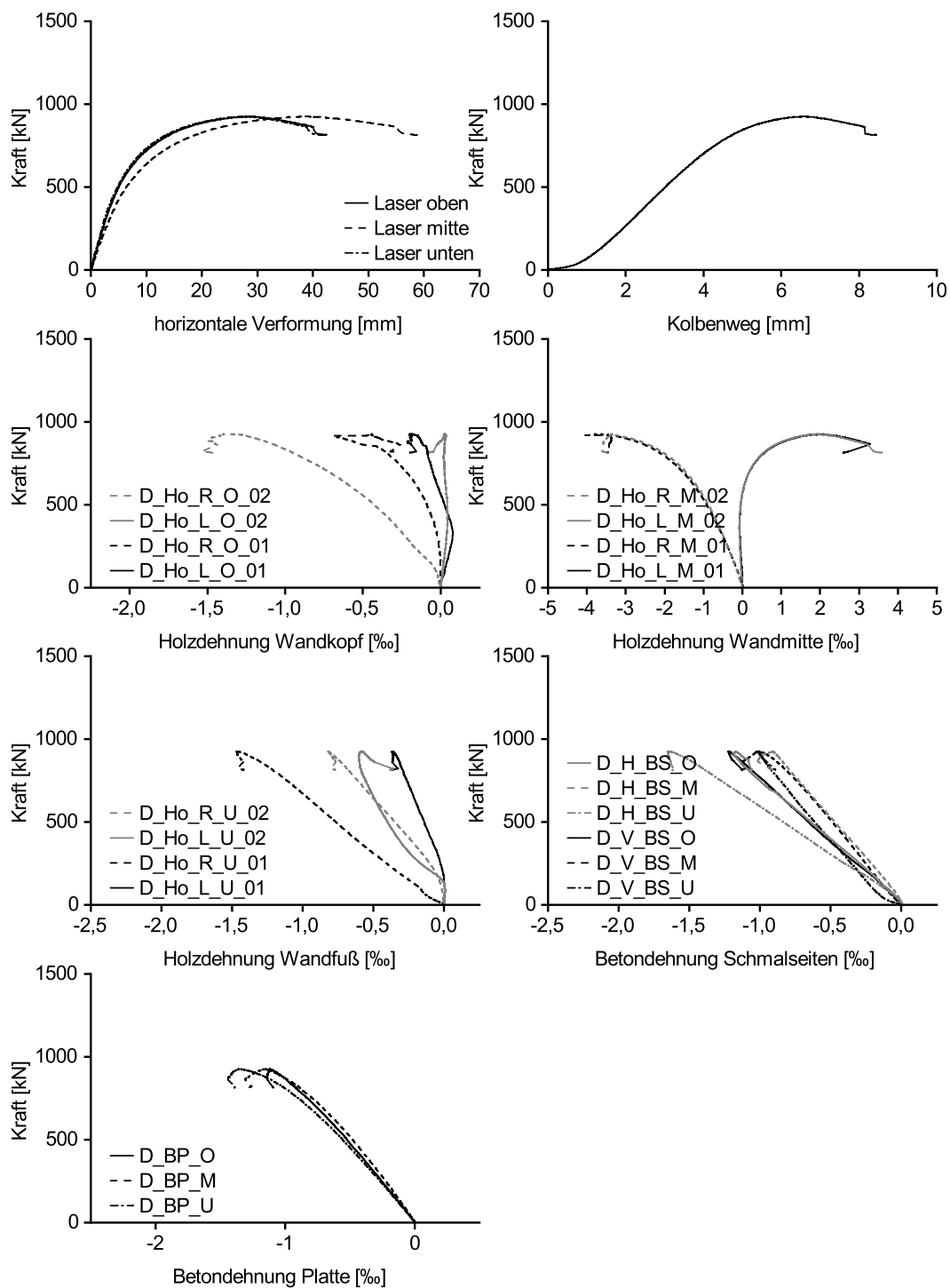
Ergebnisse von Versuch: V_D_30_00_2



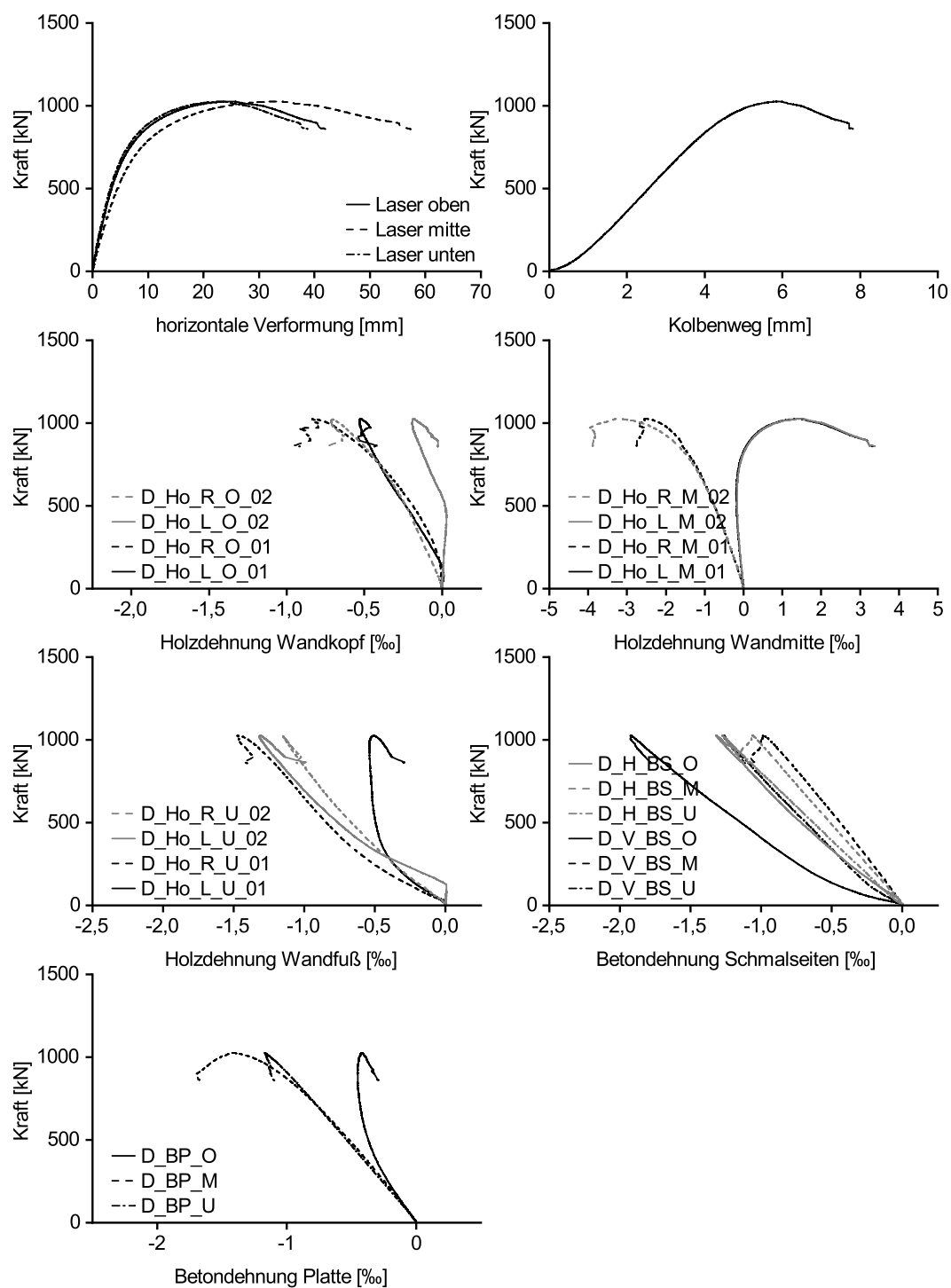
Ergebnisse von Versuch: V_D_30_00_3



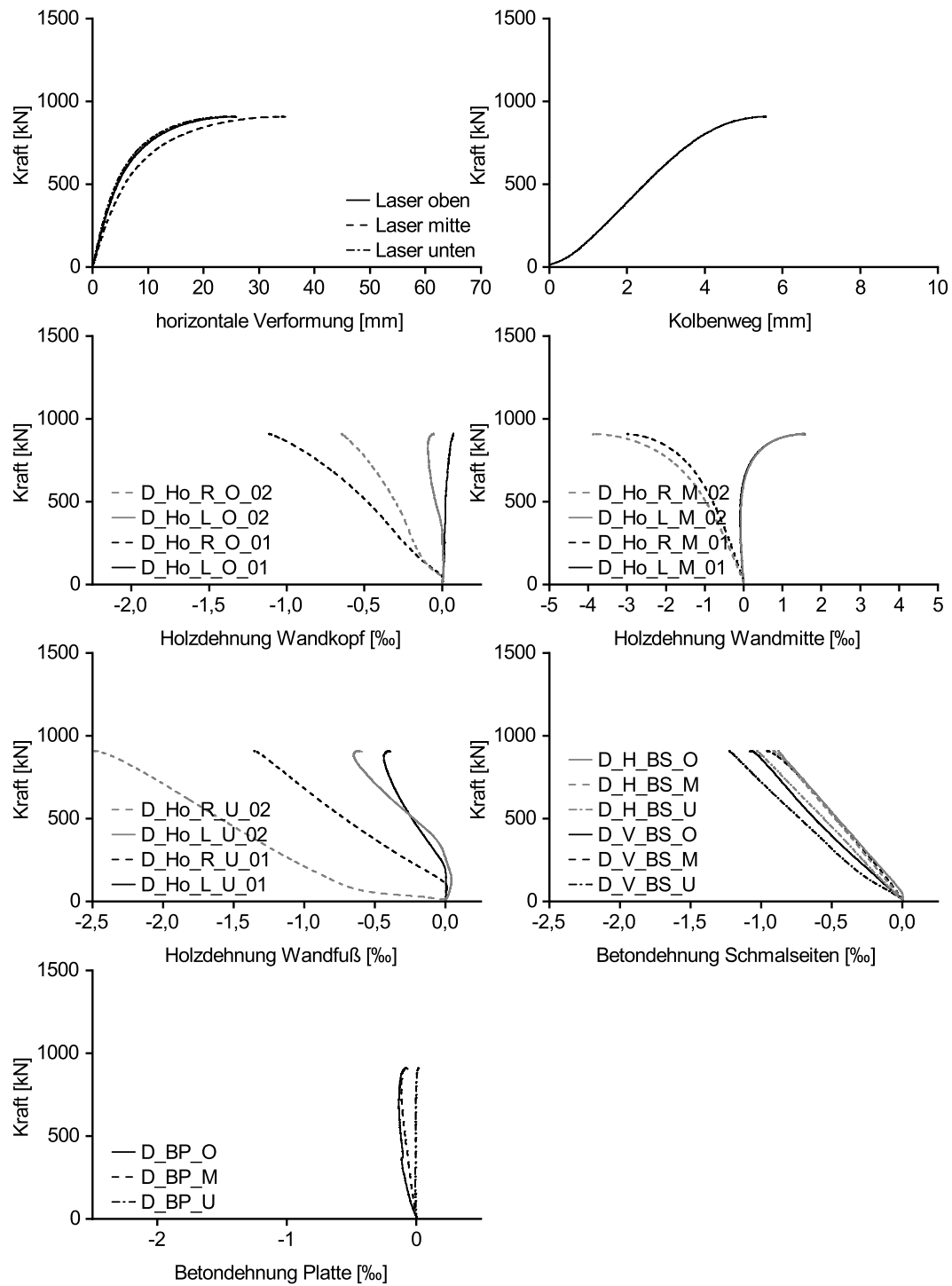
Ergebnisse von Versuch: V_D_30_10_1



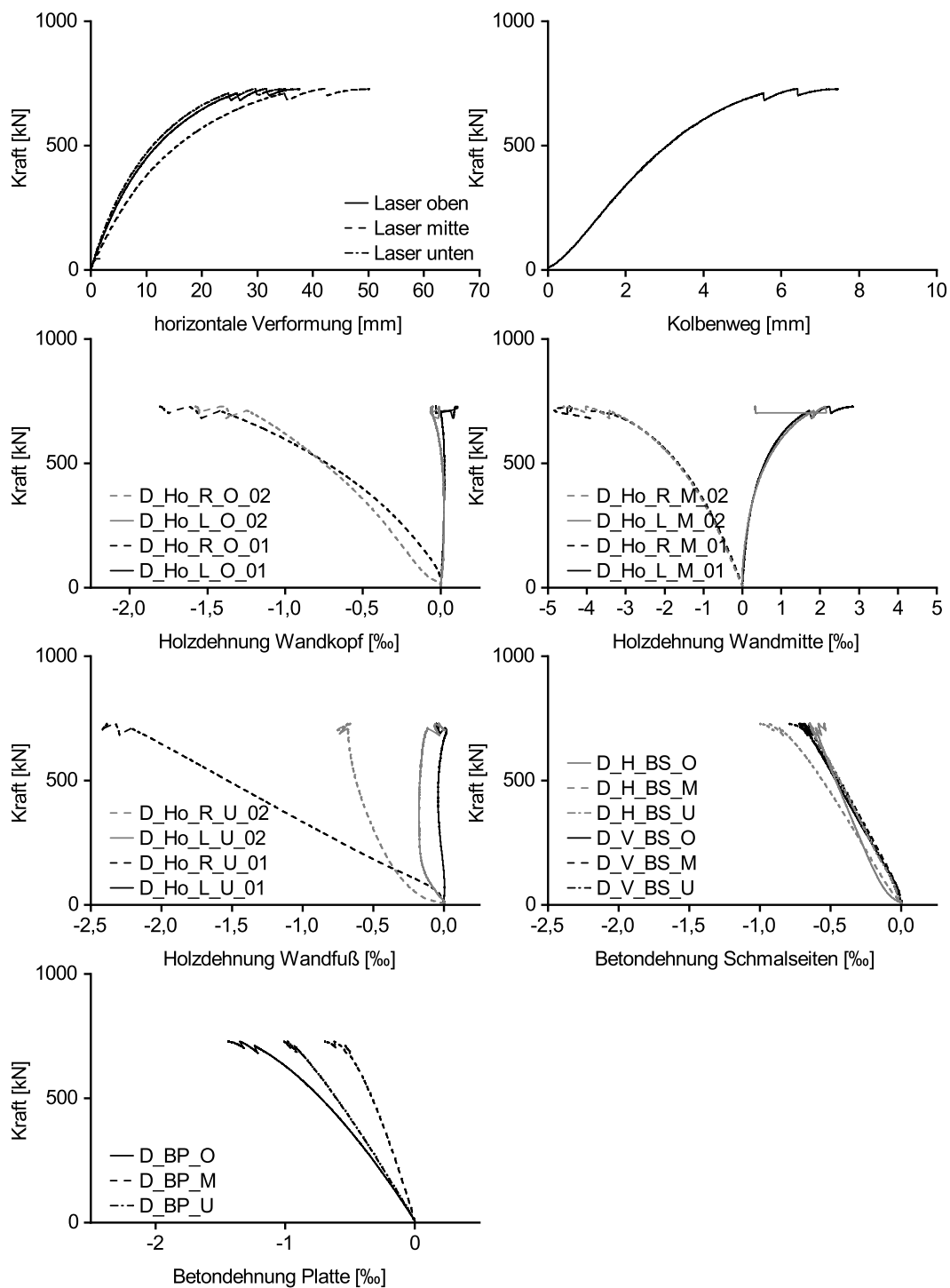
Ergebnisse von Versuch: V_D_30_10_2



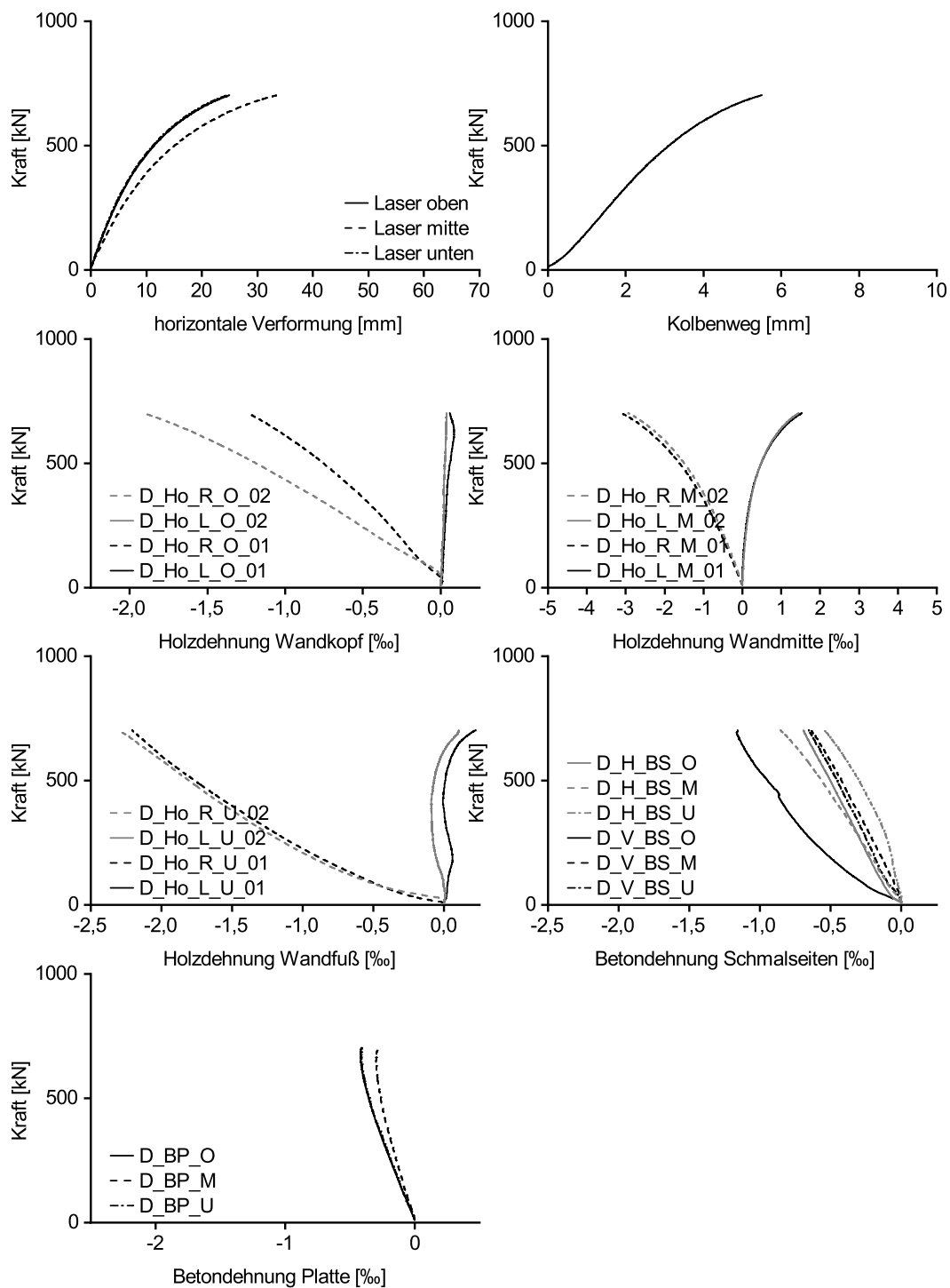
Ergebnisse von Versuch: V_D_30_10_3



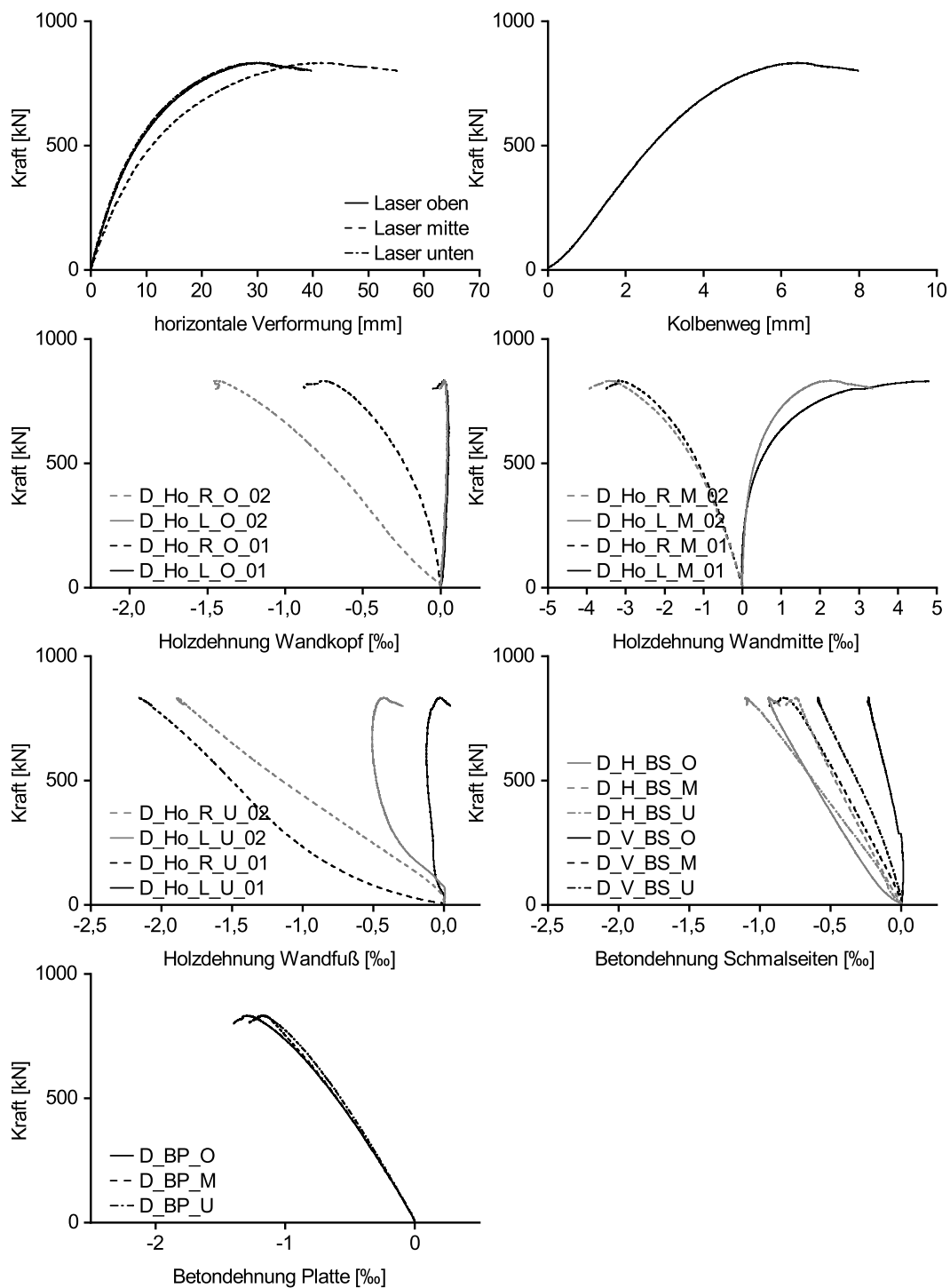
Ergebnisse von Versuch: V_D_30_20_1



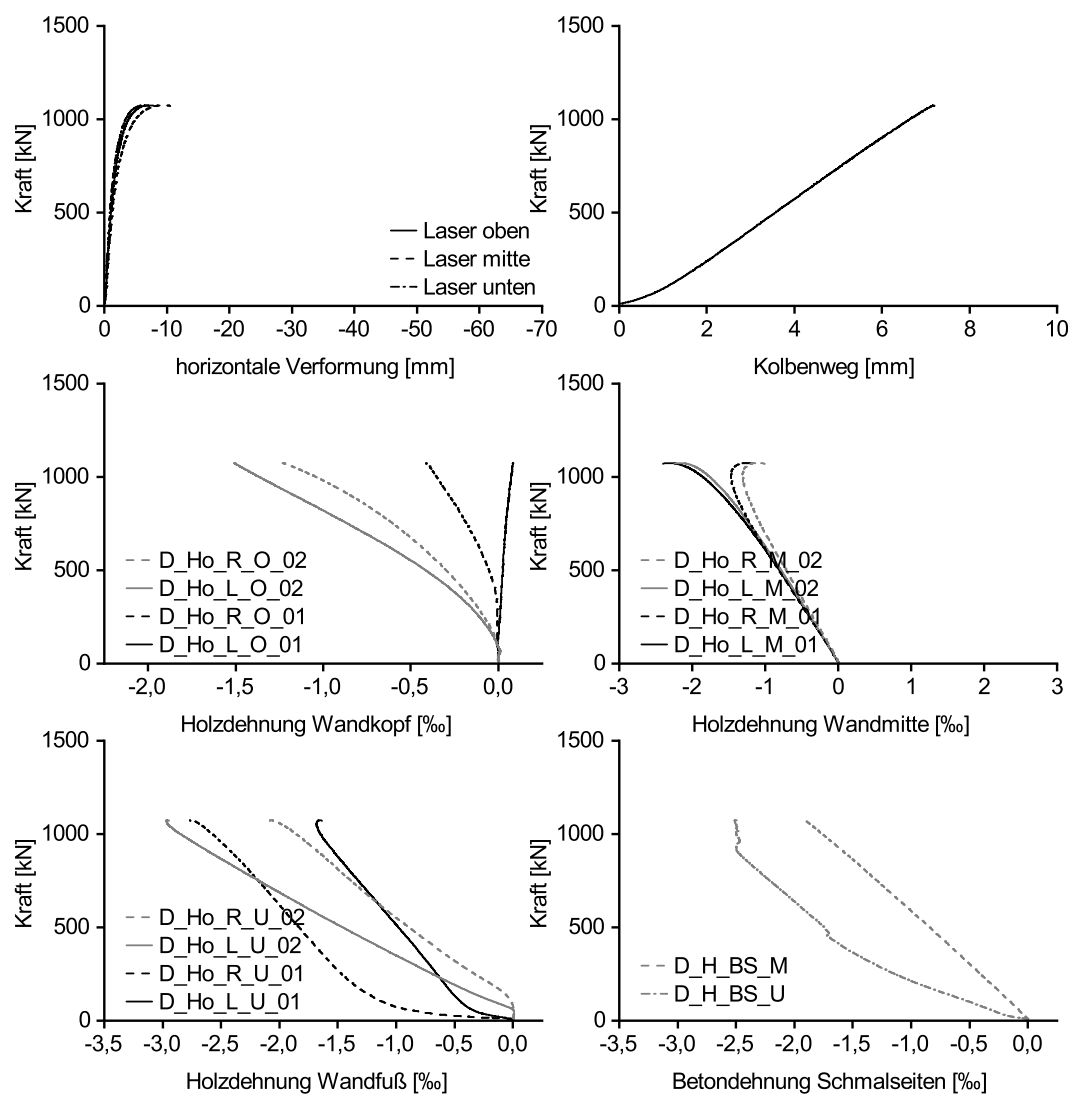
Ergebnisse von Versuch: V_D_30_20_2



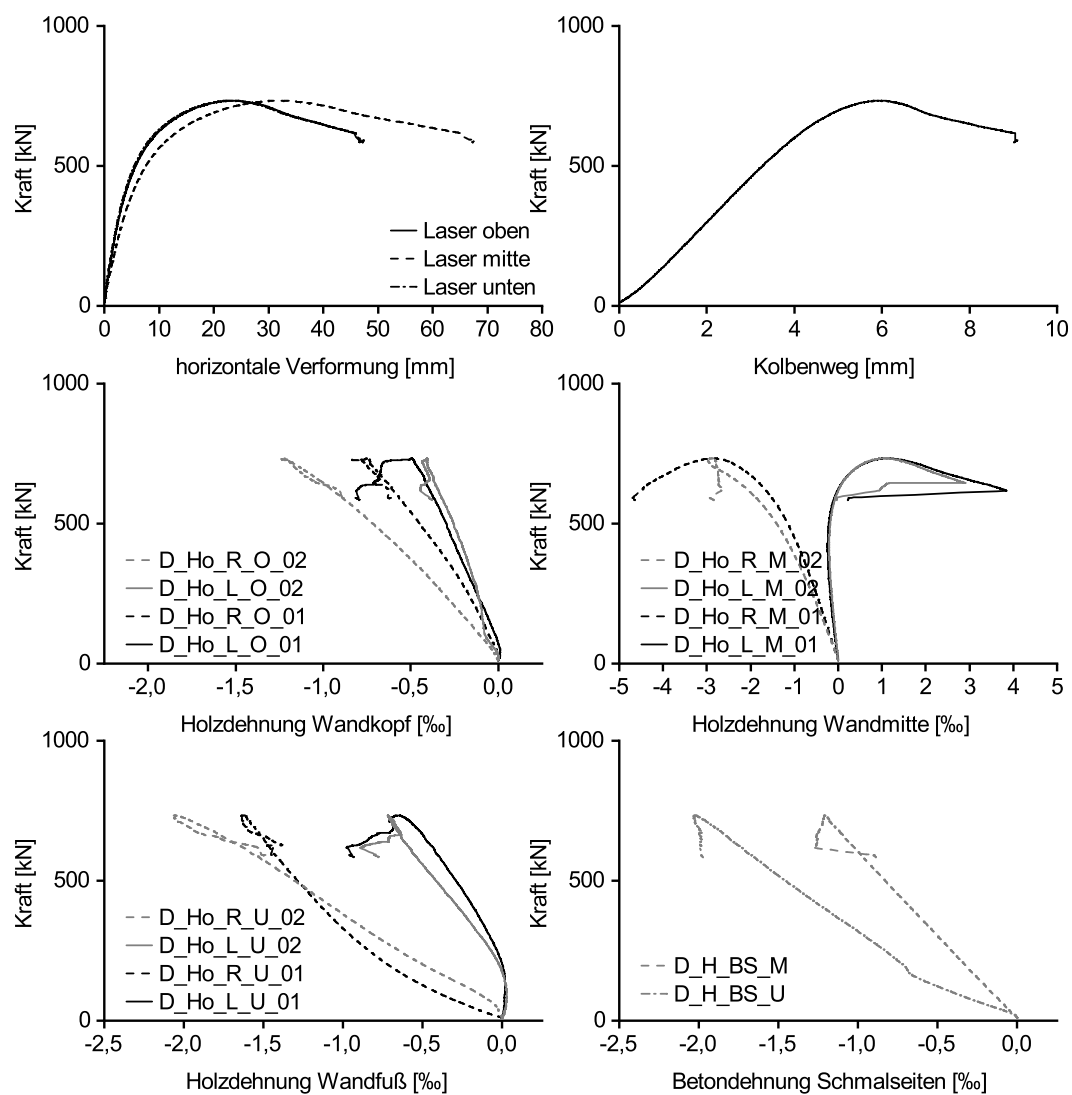
Ergebnisse von Versuch: V_D_30_20_3



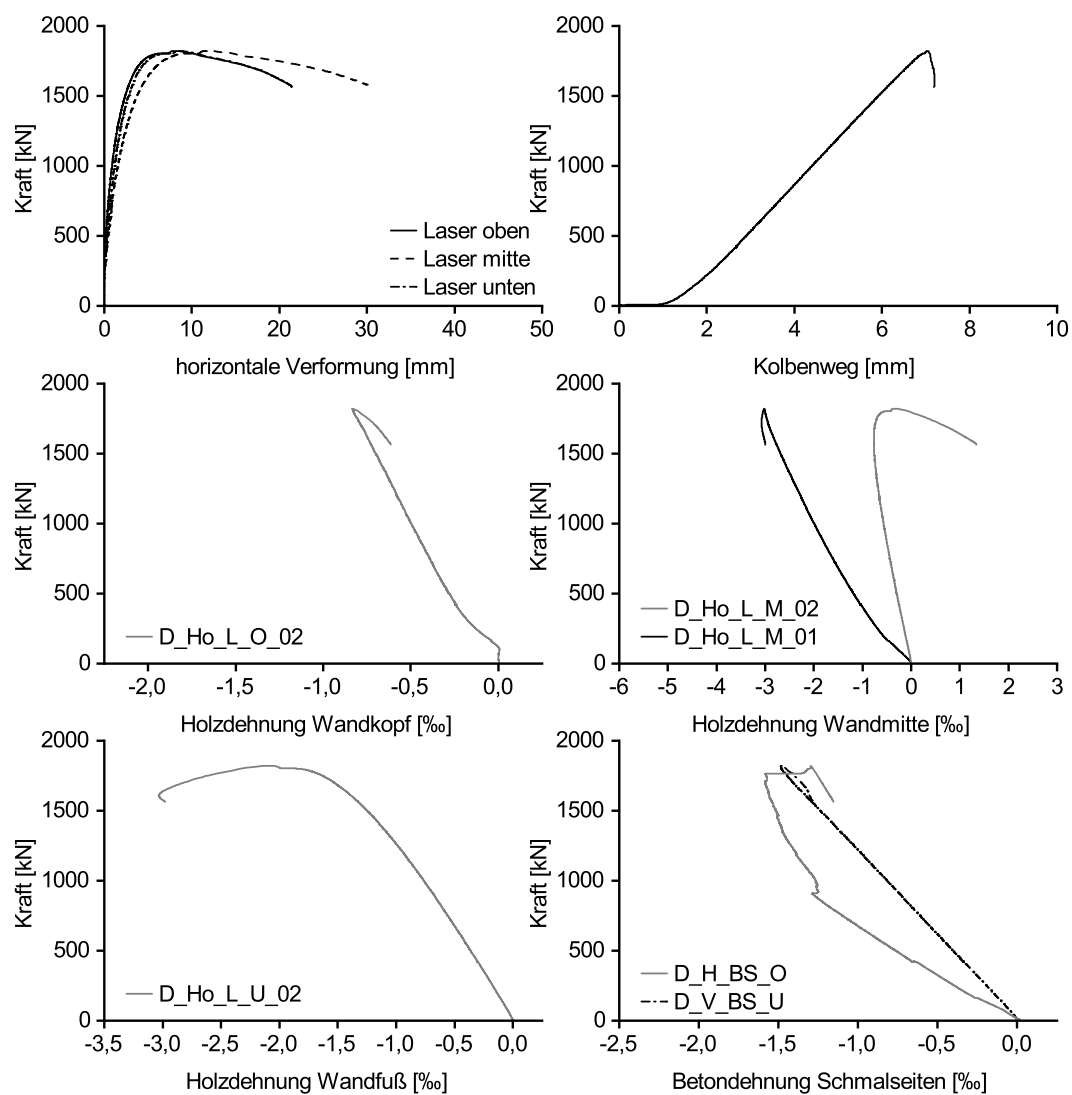
Ergebnisse von Versuch: V_A_30_00_1



Ergebnisse von Versuch: V_A_30_10_1



Ergebnisse von Versuch: V_D_45_00_1



Ergebnisse von Versuch: V_D_45_10_1

