

Zur Entwicklung von Brettsperrholzwänden mit eingeklebten schlanken
Lamellen aus ultrahochfestem Beton

Thomas Johannes Oberndorfer

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen
Universität München zur Erlangung eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer
2. Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Die Dissertation wurde am 04.08.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Engineering and Design am 01.02.2023 angenommen.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung von Wandelementen, die aus einem zusammengesetzten Querschnitt aus ultrahochfestem Beton und Holz bestehen. Dabei wird der ultrahochfeste Beton im Wandkern angeordnet, damit dieser überwiegend auf Normalkraft beansprucht wird, während das umliegende Holz die Zug- und Druckspannungen aufnimmt, die aus einer Momentenbeanspruchung resultieren. Die Wandelemente mit zusammengesetztem Querschnitt entsprechen Brettsperrholzwänden, werden wie Brettsperrholz hergestellt, jedoch werden an definierten Stellen im Produktionsprozess Holzlamellen durch Betonlamellen ersetzt. Der bewährte Produktionsprozess von Brettsperrholz bleibt dabei weitgehend unverändert. Um dies zu realisieren, ist es erforderlich ultrahochfesten Beton und Holz mit Klebstoffen, die bei der Herstellung von Brettsperrholz Anwendung finden, kraftschlüssig miteinander zu verkleben.

Ziel dieser Arbeit war es zu untersuchen, ob sich die beiden Materialien ultrahochfester Beton und Holz mit Klebstoffen, die in der Brettsperrholzherstellung üblich sind, kraftschlüssig verbinden lassen. Zudem wurde ermittelt, ob die Herstellung derartiger Wandbauteile im Maßstab 1:1 möglich ist um darauf aufbauend, durch den Vergleich von in Bauteilversuchen ermittelten Ergebnissen mit berechneten Ergebnissen, zu prüfen, ob die Berechnungsansätze, die es zur Berechnung von Brettsperrholzwänden gibt, auch für die Wände mit hybridem Querschnitt gültig sind.

Zunächst wurde eine Vielzahl kleinformatiger Druckscherversuche an verklebten Prüfkörpern aus ultrahochfestem Beton und Holz durchgeführt, deren Beurteilung der Bruchflächen weitgehend automatisch, basierend auf einem hyperspektralen Bildgebungssystem, erfolgte. Eine aus den kleinformatigen Druckscherversuchen hervorgehende vielversprechende Kombination aus Beton, Betonoberflächenbehandlung und Klebstoff bildete die Grundlage zur Herstellung von Wandsegmenten im Maßstab 1:1 im industriellen Umfeld. Die Wandsegmente mit unterschiedlichen Querschnittsaufbauten wurden zentrisch und exzentrisch geprüft. Darauf aufbauend erfolgte die analytische Modellierung der Bauteilversuche anhand verschiedener Methoden um berechnete Ergebnisse mit in den Versuchen bestimmten zu vergleichen.

Ausgehend von den durchgeführten kleinformatigen Druckscherversuchen sowie den Bauteilversuchen im Maßstab 1:1 geht einerseits hervor, dass eine kraftschlüssige Verbindung von ultrahochfestem Beton und Holz mit Klebstoffen, die in der Brettsperrholzindustrie üblich sind, möglich ist. Besonders sticht die Kombination aus einer geschliffenen Betonoberfläche und einem Ein-Komponenten Polyurethanklebstoff hervor. Andererseits konnte gezeigt werden, dass eine Herstellung in Bauteilgröße im industriellen Umfeld möglich ist und dass die Bauteile tragfähig sind. Den Bauteilversuchen folgend zeigte die analytische Modellierung, dass die Bauteile mit zusammengesetztem Querschnitt mit Methoden, die zur Berechnung von Brettsperrholz existieren, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Steifigkeitsparameter berechnet werden können. Eine analytische Parameterstudie auf Bemessungsniveau zeigt zum Teil erhebliche Tragfähigkeitssteigerungen, von bis zu 60 % bezogen auf den reinen Brettsperrholzquerschnitt, abhängig von verschiedenen Faktoren.

Abstract

The presented work deals with the development of wall elements comprised of ultrahigh performance concrete and timber. Within the wall cross section, the ultrahigh performance concrete is located at the center to primarily bear the occurring axial forces. The timber is surrounding the concrete core to bear compression and tensile forces resulting from out of plane bending moments. The wall elements with composite cross section correspond to cross laminated timber walls, are produced like cross laminated timber walls, but within the production process timber lamellas are replaced by premanufactured ultrahigh performance concrete lamellas. The changes within the well-known and established production process of cross laminated timber are to be reduced to a minimum. To realize this, it is inevitable to adhesively bond ultrahigh performance concrete to timber using adhesives that are commonly used in cross laminated timber production.

One objective of this work was to determine whether the two materials ultrahigh performance concrete and timber form a rigid adhesively bonded connection using adhesives commonly used in cross laminated timber production. Secondly, it was to demonstrate that the propagated production process can be realized. As a third objective it was to show, by comparison of analytically determined results and those achieved from experiments on wall segments at scale 1:1, that calculation models used to calculate cross laminated timber elements may also be used for the calculation of wall elements with a composite cross section.

To achieve the objectives, at first small-scale compression shear tests on adhesively bonded specimen comprised of different types of ultrahigh performance concrete, concrete surface treatments and adhesives were performed and their crack surfaces were almost automatically evaluated based on a hyperspectral imaging system. A highly promising combination resulting from the small-scale compression shear tests formed the basis to produce the wall segments at scale 1:1 in an industrial production environment. The manufactured wall segments with different cross sections were loaded centric and eccentric within the tests. Based on these, analytical modelling of the tests was performed using various calculation methods to compare calculated results with those determined in the tests.

Based on the small-scale shear tests as well as on the test on wall segments at scale 1:1 it was shown that a rigid adhesively bonded connection, using adhesives common in cross laminated timber production, between ultrahigh performance concrete and timber can be realized. Especially the combination of a ground concrete surface with a one-component polyurethane stands out. It was also demonstrated that the propagated production process is realizable within the premises of an industrial production. The tests on wall segments proof its load bearing capacity. Following the component tests, the analytical modeling showed that the components with composite cross-section can be calculated with methods existing for the calculation of cross laminated timber, taking into account the different stiffness parameters. An analytical parameter study at design level shows that a substantial increase in the load bearing capacity is possible, up to 60 % based on a homogenous cross laminated timber wall, depending on various factors and boundary conditions.

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner mehrjährigen Zeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer, dafür, dass ich basierend auf einer Idee einen Forschungsantrag erarbeiten und darauf aufbauend das zugehörige Forschungsprojekt, auf dem diese Arbeit basiert, bearbeiten durfte. Für die sehr gute Betreuung, die stete Diskussionsbereitschaft sowie die wertvollen Hinweise und Anregungen während der Bearbeitungszeit bedanke ich mich recht herzlich. Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter möchte ich für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse, die Übernahme des Korreferats, sowie die Diskussionsbereitschaft hinsichtlich holzbauspezifischer Themenfelder danken. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Besonderer Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Massivbau, den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Abteilungen Massivbau und Holzbau des Laboratoriums für den konstruktiven Ingenieurbau (LKI) und des MPA BAU der Technischen Universität München für die vielen interessanten Diskussionen und Anregungen, sowie die unschätzbar wertvolle Zeit im Klebstofflabor.

Bedanken möchte ich mich ebenso bei der Forschungsinitiative Zukunft Bau für die finanzielle Unterstützung der experimentellen Untersuchungen. Großer Dank geht an die Stemmer Imaging AG sowie die Perception Park GmbH für die hardware- und softwaretechnische Unterstützung im Rahmen der hyperspektralen Aufnahmen. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Peter Mestek für das Mentoring während der Bearbeitungszeit.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich ganz herzlich für Ihre Unterstützung. Besonderer Dank geht an meine liebe Frau Daniela, für ihre stete Unterstützung, Diskussionsbereitschaft, das entgegengebrachte Vertrauen und Verständnis.

Für Daniela, Fritz und Hannes

Inhalt

1	Einführung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Problemstellung	2
1.3	Ziele und Aufbau der Arbeit	3
2	Stand der Kenntnisse	5
2.1	Holz.....	5
2.1.1	Allgemeines	5
2.1.2	Chemischer Aufbau.....	5
2.1.3	Struktureller Aufbau	6
2.1.4	Holz als Baustoff.....	7
2.1.5	Einflussgrößen der mechanischen Eigenschaften	8
2.1.6	Mechanische Eigenschaften.....	10
2.1.7	Holz als Füge­teil	15
2.2	Ultrahochfester Beton	15
2.2.1	Allgemeines	15
2.2.2	Ausgangsstoffe und deren Wirkungsweise	16
2.2.3	Eigenschaften	20
2.2.4	Anwendung von ultrahochfestem Beton	22
2.3	Brettsper­rholz.....	22
2.3.1	Allgemeines	22
2.3.2	Brettsper­rholz als Baustoff.....	22
2.3.3	Herstellung.....	23
2.3.4	Berechnung	24
2.4	Klebeverbindungen	32
2.4.1	Allgemeines	32
2.4.2	Klebstoffe.....	37
2.4.3	Klebeverbindungen im Holzbau	43
2.4.4	Klebeverbindungen im Betonbau.....	47
2.5	Hyperspektrale Bildgebung.....	49
2.5.1	Grundlagen hyperspektraler Bildgebung	49
2.5.2	Anwendung hyperspektraler Bildgebung im Bauwesen	54
2.6	Berechnung gedrückter Stäbe	55
2.6.1	Allgemeines	55
2.6.2	Gedrungene und schlanke Druckstäbe	55
2.6.3	Spannungsproblem nach Theorie II. Ordnung und Verzweigungsproblem.....	56
2.6.4	Druckstäbe nach Theorie II. Ordnung.....	56
2.6.5	Verzweigungsproblem	62
2.7	Holz-Beton-Verbund.....	63
2.7.1	Allgemeines	63
2.7.2	Holz-Beton-Verbundwände	66
2.7.3	Geklebter Holz-Beton-Verbund.....	70
2.8	Zusammenfassung.....	76

3	Kleinmaßstäbliche Versuche	77
3.1	Allgemeines	77
3.1.1	Ziel der Versuche	77
3.1.2	Überlegungen zur Materialauswahl	77
3.1.3	Vorgehensweise	78
3.2	Scherversuche	78
3.2.1	Material und Methoden	78
3.2.2	Ergebnisse und Diskussion	89
3.2.3	Folgerungen	97
3.3	Delaminierversuche	98
3.3.1	Material und Methoden	98
3.3.2	Ergebnisse und Diskussion	99
3.3.3	Folgerungen	100
3.4	Zwischenfazit	101
4	Bauteilversuche	103
4.1	Allgemeines	103
4.2	Material und Methoden	103
4.2.1	Material	103
4.2.2	Prüfkörper und deren Herstellung	105
4.2.3	Versuchsaufbau und -durchführung	107
4.2.4	Versuchsumfang	108
4.2.5	Messtechnik	109
4.2.6	Auswertung	109
4.3	Ergebnisse und Diskussion	111
4.3.1	Zentrische Versuche	111
4.3.2	Exzentrische Versuche	114
4.4	Zwischenfazit	120
5	Analytische Modellierung	121
5.1	Geometrie, Materialkennwerte und Berechnungsannahmen	121
5.2	Zentrisch belastete Stäbe	122
5.2.1	Knicklasten für Stäbe mit zusammengesetztem Querschnitt	122
5.2.2	Knicklasten für den schubstarrten Stab mit effektiver Biegesteifigkeit	125
5.3	Exzentrisch belastete Stäbe	125
5.3.1	Betrachtung als Stab mit zusammengesetztem Querschnitt	125
5.3.2	Betrachtung als schubstarrer Stab mit effektiver Biegesteifigkeit	129
5.3.3	Vereinfachte Berechnung mittels Vergrößerungsfaktor	133
5.3.4	Betrachtung der zentrischen als exzentrische Versuche	134
5.4	Analytische Parameterstudie	135
5.5	Zwischenfazit	139
6	Zusammenfassung, Fazit und Ausblick	141
6.1	Zusammenfassung	141
6.2	Fazit	144
6.3	Ausblick	145
7	Bezeichnungen	147
8	Literaturverzeichnis	153
A	Scherversuche	163
A.1	Abmessungen und Parameter des verwendeten Holzes	163
A.2	Abmessungen und Parameter des verwendeten Betons	170
A.3	Festbetonkennwerte	174
A.4	Versuchsergebnisse der Scherversuche	176
B	Bauteilversuche	409
B.1	Holzkenwerte	409

B.2	Festbetonkennwerte	412
B.3	Versuchsergebnisse der Bauteilversuche	413
C	Analytische Modellierung	417
C.1	Quellcode zur Lösung der Differentialgleichung (5-11).....	417
C.2	Berechnung als Stab mit zusammengesetztem Querschnitt	418
C.3	Berechnung mit dem γ -Verfahren	421
C.4	Berechnung mit der Schubanalogie	424
C.5	Berechnung mit dem Vergrößerungsfaktor.....	427
C.6	Berechnungsbeispiel	428

Abschnitt 1

Einführung

1.1 Motivation

Einer der Ausgangsstoffe für die Herstellung von Beton ist das Bindemittel Zement. Zement ist heute weltweit die Substanz, die nach Wasser am meisten verwendet wird [107, S. 1]. Das bei der Herstellung und Verwendung von Zement freigesetzte klimaschädliche Treibhausgas CO₂ steht jedoch im Kontrast zu den Zielen des Klimaschutzes, die unter anderem das Pariser Abkommen vorgibt [17]. Einen direkten Einfluss auf die Reduktion des Umwelteinflusses haben laut [107, S. 29] Entscheidungen im Bereich Architektur, konstruktive Durchbildung und Statik, da diese Entscheidungen Themen wie die Dicke einer Wand oder die Anzahl an Stützen und Balken aus Stahlbeton in einem Gebäude betreffen. Ein Ansatz, um den Umwelteinfluss von Beton zu reduzieren, sind der Einsatz hochfester- und ultrahochfester Betone. Nach [84, S. 447] besitzen hochfeste Betone hervorragende mechanische Eigenschaften, was die erforderliche Fläche für lastabtragende Bauteile reduziert und damit auch das verbrauchte Material. Das Einsparpotential bei der Verwendung von hochfesten Betonen wird jedoch unterschiedlich bewertet, siehe beispielsweise [107, S. 30]. Ein anderer Ansatz, die Klimaschutzziele zu erreichen, sind nach [123, S. 3] die Auswahl und Verwendung von Baustoffen aus nachwachsenden Rohstoffen. Dabei spielt der Baustoff Holz eine maßgebende Rolle.

Im Rahmen dieser Arbeit werden daher die beiden Baustoffe Holz und hoch- bzw. ultrahochfester Beton kombiniert, um hochtragfähige Wandbauteile mit zusammengesetztem Querschnitt auszubilden. Die zu entwickelnden Wandbauteile weisen einen Wandkern aus ultrahochfestem Beton auf, der von Holz umgeben ist. Der Kern aus Beton nimmt dabei vorwiegend die auftretenden Vertikalkräfte auf, während das außenliegende Holz die Zug- und Druckkräfte aufnimmt, die beispielsweise durch Imperfektionen oder Windbelastung auftreten. Bild 1.1 zeigt einen möglichen Wandaufbau.

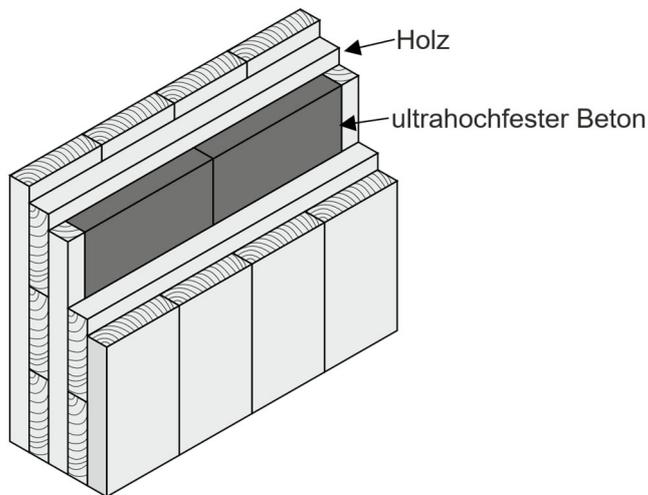


Bild 1.1: Möglicher Wandaufbau, in Anlehnung an [83]

Die Kombination aus Holz und Beton ist bekannt und wird in der Praxis eingesetzt. Um die beiden Werkstoffe kraftschlüssig miteinander zu verbinden, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Im Unterschied hierzu sollen in dieser Arbeit bei den Wandbauteilen Holz und Beton miteinander verklebt werden. Die Herstellung derartiger Wandbauteile soll im Rahmen der Brettsperrholzherstellung erfolgen. Dabei soll der industrialisierte Produktionsprozess von Brettsperrholz – wenn möglich – nur geringfügig verändert werden, sodass die existierende Prozessinfrastruktur nutzbar ist. Zur Herstellung der Wandbauteile werden einzelne Bretter aus Holz durch Bretter aus Beton ersetzt.

Der Produktionsprozess gliedert sich in drei Schritte: Anfangs produziert ein Betonfertigteilwerk Platten oder Lamellen aus ultrahochfestem Beton und liefert diese zum Brettsperrholzhersteller. Zur Produktion der Wandelemente legt dieser die Platten oder Lamellen aus ultrahochfestem Beton im regulären Produktionsprozess an zuvor definierten Stellen in die Rohelemente ein. Nach dem Pressen und Aushärten der Wandelemente folgt der Abbund.

Damit der vorgeschlagene Herstellungsprozess nicht mit zusätzlichem technischem Aufwand verbunden ist, ist es erforderlich, Holz und ultrahochfestem Beton mit Klebstoffen zu verkleben, die in der Brettsperrholzproduktion Anwendung finden.

1.2 Problemstellung

Die Grundlagen für die zu produzierenden Wandbauteile sind bereits teilweise existent. So sind der Werkstoff Brettsperrholz mit seinem dazugehörigen Produktionsprozess sowie die für die jeweiligen Bauteile erforderlichen Bemessungsgrundlagen bekannt. Zum jetzigen Zeitpunkt ist jedoch unklar, ob sich der Herstellungsprozess für die beschriebenen Bauteile mit zusammengesetztem Querschnitt realisieren lässt und ob die Berechnungsansätze für Brettsperrholz auch für Wandbauteile mit zusammengesetztem Querschnitt aus Holz und ultrahochfestem Beton gültig sind. Auch existieren viele Untersuchungen zu Holz-Beton-Verbundbauteilen. Die neu

erscheinende Technische Spezifikation für die Bemessung von Holz-Beton-Verbundbauteilen [134] regelt diese Bauweise und enthält auch Regeln für Wandbauteile aus Holz-Beton-Verbund; geklebte Verbindungen führt sie allerdings nicht auf. Forschungsarbeiten zum Thema geklebte Holz-Beton-Verbundbauteile behandeln fast ausschließlich Klebstoffe, die nicht in der Brettsperrholzproduktion üblich sind; auch unterscheidet sich der Verklebungsprozess von dem hier gewählten.

1.3 Ziele und Aufbau der Arbeit

Zur Realisierung der vorgestellten Idee ist eine Vielzahl an Aspekten zu betrachten. Neben der grundsätzlichen Herstellbarkeit und dem Tragverhalten sind die Aspekte der Dauerhaftigkeit der Klebefuge, des Langzeittragverhaltens, des Brandschutzes, bauphysikalische als auch baukonstruktive Themen zu erörtern. Im Rahmen dieser Arbeit liegt das Hauptaugenmerk auf der Verklebung von Holz und ultrahochfestem Beton sowie Untersuchungen zum kurzzeitigem Tragverhalten.

Die vorgelegte Arbeit trägt zur Umsetzung der vorgestellten Idee in mehrerlei Hinsicht bei: Erstes Ziel ist zu zeigen, dass eine kraftschlüssige Verbindung von Holz und ultrahochfestem Beton mit Klebstoffen, die in der Herstellung von Brettsperrholz Anwendung finden, möglich ist. Zweitens ist zu demonstrieren, dass die Herstellung dieser Bauteile im industriellen Maßstab realisierbar ist. Drittes Ziel ist zu überprüfen, ob die existierenden Methoden zur Berechnung von Brettsperrholz in minimal angepasster Weise auch für die Berechnung von Wänden mit zusammengesetztem Querschnitt aus Holz und ultrahochfestem Beton anwendbar sind.

Die Arbeit gliedert sich in sechs Abschnitte: Nach der Einführung in Abschnitt 1 folgen in Abschnitt 2 die Grundlagen zu den jeweiligen Werkstoffeigenschaften, zu den Klebstoffen und zum Berechnen gedrückter Stäbe sowie zum Stand der Forschung bei geklebten Holz-Beton-Verbundbauteilen. Um zu bestimmen, ob sich Holz und ultrahochfester Beton mit Klebstoffen, die in der Brettsperrholzherstellung üblich sind, kraftschlüssig verbinden lassen, beschreibt Abschnitt 3 die Durchführung und Auswertung kleinformatischer Scherversuche, bei denen unterschiedliche Kombinationen von Beton, Betonoberflächenbehandlung und Klebstoff zum Einsatz kamen. Vorgestellt wird dabei auch eine im Rahmen der Arbeit erstmals für Holz-Beton-Verbund angewandte Methode zur automatisierten Bestimmung der Bruchflächenanteile, die auf der hyperspektralen Bildgebung basiert. Aufbauend auf den kleinformatischen Versuchen stellt Abschnitt 4 einerseits den Prozess zur Herstellung von Prüfkörpern im Maßstab 1:1 dar und präsentiert andererseits die Ergebnisse der Bauteilversuche. In Abschnitt 5 wird anhand des Vergleichs von berechneten Verformungen und Dehnungen mit in den Bauteilversuchen erzielten Werten geprüft, welche Berechnungsmodelle sich für die Berechnung von Wandbauteilen mit zusammengesetztem Querschnitt aus Holz und Beton eignen. Ebenso ist eine analytische Parameterstudie Bestandteil von Abschnitt 5, um das Potential zu zeigen, das durch das Einkleben von schlanken Lamellen oder Platten aus ultrahochfestem Beton in Brettsperrholzelemente entsteht. Abschnitt 6 umfasst eine Zusammenfassung und gibt einen Ausblick.

Abschnitt 2

Stand der Kenntnisse

2.1 Holz

2.1.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt stellt die materialspezifischen Grundlagen des Baustoffs Holz dar. Die Inhalte sind weitestgehend Standardwerken entnommen, weitergehende Informationen sind nachzulesen in [80], [79, S. 813-897], [82], [75] und [58]; tiefergehende Informationen sind gesondert gekennzeichnet.

2.1.2 Chemischer Aufbau

Unabhängig von der Art bestehen alle Hölzer aus ca. 50 % Kohlenstoff, ca. 6 % Wasserstoff, 43 % oder mehr Sauerstoff, einem kleinen Teil Stickstoff sowie mineralischen Bestandteilen. Trotz nahezu identischer Anteile an Elementarbestandteilen unterscheiden sich die Holzarten deutlich in ihrem chemischen Aufbau. Die chemischen Hauptbestandteile, die zusammen ca. 97 % bis 99 % des Zellwandaufbaus ausmachen, sind Holocellulose, bestehend aus Cellulose, Hemicellulose, sowie Lignin. Die chemischen Nebenbestandteile des Holzes sind überwiegend Zellinhaltsstoffe. Bei Fichte liegt der Anteil an Cellulose zwischen 38 % und 58 % und der Ligninanteil bei ca. 28 % [27].

Zellulose ist der Hauptbestandteil der pflanzlichen Zellwand und verleiht dem Holz seine hohe Zugfestigkeit. Es ist ein linear aufgebautes Polymer aus Glucosemolekülen, mit einem Polymerisationsgrad von 5.000 bis 10.000 [129, S. 18]. Die einzelnen Glucosemoleküle sind mittels Sauerstoffbrückenbindung zu Makromolekülen verknüpft. Bild 2.1 zeigt den Aufbau eines Zellulosemoleküls.

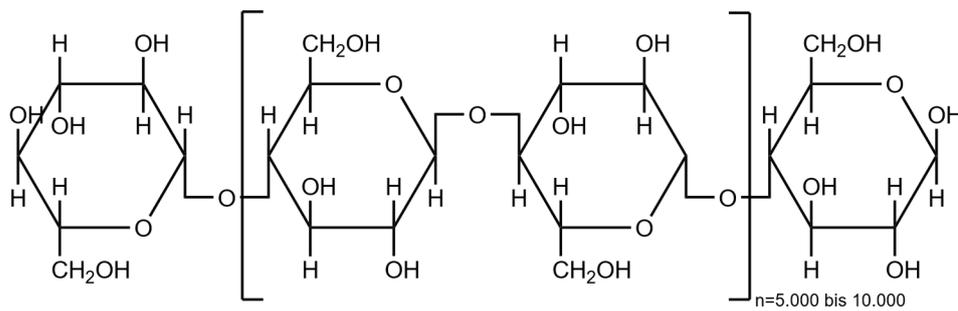


Bild 2.1: Zellulosemolekül nach [129, S. 39]

Zwischen den einzelnen Makromolekülen wirken Wasserstoffbrückenbindungen, es lagern sich zwischen 60 und 70 Zellulosemoleküle zu Mikrofibrillen zusammen. Zellulose ist aufgrund der OH-Gruppen sehr hygroskopisch und stets wasserhaltig, da Wasser in die Hohlräume zwischen den Fibrillen eindringen kann. Die Folgen hiervon sind Quellungsbewegungen und die Reduktion einiger mechanischer Eigenschaften des Holzes.

Die ebenfalls aus Zuckermolekülen aufgebaute Hemizellulose unterscheidet sich durch unterschiedliche Zuckeraufbauten und kürzere sowie weiter verzweigte Molekülketten von der Zellulose. Hemizellulose liegt vorwiegend ohne erkennbare Struktur vor und ist wegen des fehlenden Verbunds relativ flexibel. Sie trägt zur Elastizität des Holzes bei.

Lignin ist ein dreidimensional vernetztes, unelastisches Molekül, das den Zellwänden Steifigkeit und Druckfestigkeit verleiht. Es inkrustiert die saccharidischen Holzbestandteile, worauf seine Wirkung als interfibrillare Kittsubstanz beruht.

Zusätzlich zu den Hauptbestandteilen enthält Holz Nebenbestandteile wie Zucker, Stärke, Eiweiß, Harze, Wachse, Gerb- und Mineralstoffe. Abhängig von der Art und der vorhandenen Menge der Nebenbestandteile beeinflussen diese die Eigenschaften und Verwendbarkeit des Holzes.

2.1.3 Struktureller Aufbau

Der strukturelle Aufbau von Holz gliedert sich in drei Ebenen: Die Makrostruktur, die mit dem bloßen Auge erkennbar ist; die unter dem Mikroskop erkennbare Mikrostruktur sowie die Submikrostruktur, die erst unter dem Elektronenrastermikroskop sichtbar ist. Alle Strukturmerkmale beeinflussen die Holzeigenschaften gleichermaßen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Makrostruktur detaillierter betrachtet, da sich diese mit bloßem Auge erkennen lässt. Auch lassen sich die für die Bemessung von tragenden Bauteilen relevanten Beziehungen daran erörtern. Beim Betrachten des Querschnitts eines Nadelholzbaums, wie in Bild 2.2 illustriert, sind unterschiedliche Schichten zu erkennen.

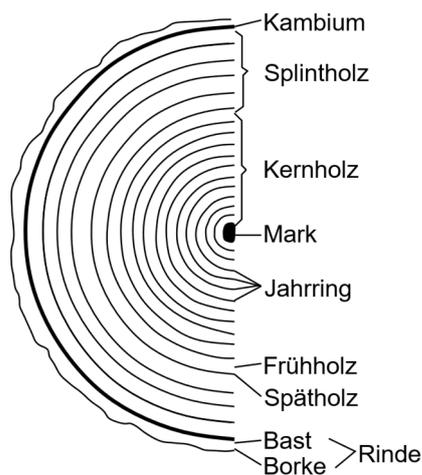


Bild 2.2: Querschnitt eines Holzstammes nach [79, S. 823]

Die Außenrinde oder Borke enthält die gerissenen und abgestorbenen Schichten der ehemals innen liegenden lebenden Schicht der Rinde, dem Bast. Das Kambium ist eine dünne Schicht, in der das Wachstum des Baumes erfolgt. Den größten Teil des Stammes bildet die Holzmasse. In ihrem Inneren befindet sich der Markstrahl mit einem Durchmesser von 1 mm bis 2 mm, der zur Wasserleitung und Speicherung dient und relativ früh abstirbt.

Die Holzmasse besteht aus Splint- und Kernholz. Das Splintholz ist im Stammquerschnitt außen angeordnet und besteht aus lebenden Zellen, welche das Wasser im Baum leiten. Das Kernholz liegt im Inneren des Stammquerschnitts und besteht aus abgestorbenen Zellen. Die Verkernung ändert nicht Struktur und Aufbau der Zellen. Die Jahrringe, die im Splint- und im Kernholz sichtbar sind, zeigen die periodische Aktivität des Kambiums. Ein Jahrring besteht aus Früh- und Spätholz. Im Frühholz findet der Wassertransport statt, deshalb sind die Zellwände dünn ausgebildet und es gibt ein großes Porenvolumen. Das Spätholz dient der Festigung und besitzt daher dicke Zellwände und ein geringes Porenvolumen.

2.1.4 Holz als Baustoff

Nach [80, S. 4] ist die Struktur des Holzes vergleichbar mit der eines Röhrenbündels, das parallel zum Stamm verläuft. Aufgrund der einem Röhrenbündel ähnlichen Struktur unterscheiden sich die Holzeigenschaften in die jeweiligen Richtungen. Der Werkstoff Holz besitzt ein ausgeprägt anisotropes Materialverhalten. Die Holzeigenschaften sind gezeichnet von den anatomischen Hauptrichtungen des Baumes: longitudinal, radial und tangential. Dies illustriert Bild 2.3. Zudem ist Holz ein inhomogener Baustoff. Die Baustoffeigenschaften variieren von Baum zu Baum sowie entlang des Stammes und über den Querschnitt.

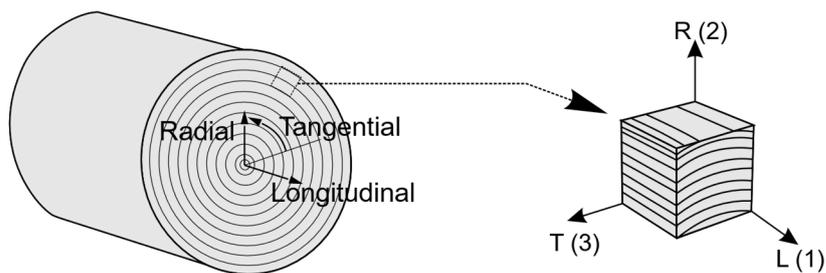


Bild 2.3: Anatomische Haupttrichtungen von Holz in Anlehnung an [97, S. 54]

Um Holz als Baustoff effizient zu verwenden, werden die einzelnen, aus den Bäumen herausgetrennten Bretter nach Güte sortiert. Die Anforderungen an den Sortierprozess regelt DIN EN 14081 Teil 1 [141]. Zulässig ist eine visuelle und eine maschinelle Sortierung der Bretter. DIN EN 14081 Teil 1 [141] führt in Anlage A die Kriterien auf, die beim visuellen Sortierprozess zu betrachten sind bzw. in einer nationalen Sortiernorm geregelt sein müssen. DIN 4074 Teil 1 [132] ist die in Deutschland aktuell gültige Sortiernorm zum visuellen Sortieren von Holz, welche die Anforderungen der DIN EN 14081 Teil 1 [141] erfüllt. Die Merkmale, anhand derer Bretter in die Sortierklassen S7, S10 und S13 einsortiert werden, sind in Tabelle 2.1 mit (S) gekennzeichnet. Aufbauend auf DIN EN 1912 [144] werden die Bretter in Abhängigkeit von Herkunft und Holzart sowie der Sortierklasse einer Festigkeitsklassen zugeordnet, z. B. C16, C24 oder C30. Die jeweiligen Festigkeitsklassen haben Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften, die in DIN EN 338 [149] aufgeführt und zur Bemessung von tragenden Bauteilen aus Holz herangezogen werden.

2.1.5 Einflussgrößen der mechanischen Eigenschaften

Da Holz ein natürlich gewachsener Baustoff ist, unterliegen die Baustoffeigenschaften von Holz großen Streuungen. Die Einflussgrößen auf die Baustoffeigenschaften, wozu in dieser Arbeit die elastischen Eigenschaften und die Materialfestigkeiten zählen, sind mannigfaltig. Sie lassen sich baustoffspezifischen und versuchsabhängigen Einflüssen zuordnen.

Nach [37, S. 15-18] sind die baustoffspezifischen Einflussgrößen in wachstumsbedingte, herstellungsbedingte und unmittelbare bzw. mittelbare zu unterteilen.

Die wachstumsbedingten Einflussgrößen selbst lassen sich in drei hierarchische Stufen gliedern. Auf Stufe eins sind die unmittelbaren erb-, wachstums- und umweltbedingten Einflüsse. Dies sind Faktoren wie die endogene Veranlagung, die Bodenbeschaffenheit, die Witterung, die Durchforstung, die Dichte des Bestandes sowie die soziologische Stellung des Baumes im Bestand. Stufe zwei umfasst Faktoren im Bereich der chemischen Eigenschaften sowie des mikroskopischen Feinbaus, die sich als Folge der ersten Stufe einstellen. Beispiele sind die Anteilsverhältnisse der chemischen Baustoffe, insbesondere der Ligningehalt, die Zellwanddicke und das Porenvolumen. In Stufe drei sind Kenngrößen angesiedelt, die über die Elemente der zweiten Stufe hinausgehen und mit dem Auge gut erkennbar sind. Dies sind die Holzstruktur und Holzfehler beschreibenden Merkmale, die Tabelle 2.1 aufführt.

Tabelle 2.1: Kenngrößen der wachstumsbedingten Einflussgrößen

Holzstruktur	Holzfehler
Rohdichte	Ästigkeit (S)
Jahrringbreite (S)	Faserverlauf abweichend von Brettlängsachse (S)
Spätholzanteil	Druckholz (S)
	Harzgallen und andere Wuchsfehler
	Risse (S)
	Pilz und Insektenbefall (S)

Zu den herstellungsbedingten Einflussgrößen zählen unter anderem die Querschnittsabmessungen des verwendeten Brettes, der Jahrringverlauf im Brettquerschnitt, die Keilzinkung sowie zusätzliche am Prüfkörper nicht feststellbare Einwirkungen wie das Alter des Baumes, die Fällzeit und Einflüsse beim Fällen.

Mittelbare und unmittelbare Einflussgrößen sind Holztemperatur und Holzfeuchte. Im hygrokopischen Bereich unterhalb des Fasersättigungspunktes sind die mechanischen Eigenschaften umgekehrt proportional zur Holzfeuchte, oberhalb des Fasersättigungsbereichs treten kaum noch Änderung auf. Nach [47, A4/16] beträgt die Änderung der Druckfestigkeit in Faserrichtung bei fehlerfreiem Holz pro 1 % Holzfeuchteänderung 6 %. Aufgrund der unterschiedlichen Wirkung, die das eingelagerte Wasser je nach Beanspruchung hervorruft, ist die Veränderung bei den Beanspruchungsarten unterschiedlich. Einen Überblick über die jeweiligen Änderungsraten gibt Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2: Änderungen der Eigenschaften von fehlerfreiem Holz bei einem Prozent Änderung der Holzfeuchte bei einer Ausgangsfeuchte von 12 % [47, A4/16]

Eigenschaft	Änderung [%]
Biegung	4,0
Zug in Faserrichtung	2,5
Zug rechtwinklig zur Faserrichtung	2,0
Druck in Faserrichtung	6,0
Druck rechtwinklig zur Faserrichtung	5,0
Schub	2,5
E-Modul in Faserrichtung	1,5

Die Holztemperatur beeinflusst die mechanischen Eigenschaften ebenfalls umgekehrt proportional. Bei den im Baubereich üblich vorherrschenden Temperaturen kann der Einfluss der Holztemperatur jedoch vernachlässigt werden. [80, S. 49]

Versuchsabhängige Einflussgrößen sind nach [58, S. 200-206] die Art der Lastaufbringung, die Richtung der Last in Bezug auf die Faserorientierung des Holzes und die Geschwindigkeit der

Lastaufbringung. Zudem beeinflussen [80, S. 40] zufolge auch Probengröße und -form die ermittelten mechanischen Eigenschaften.

2.1.6 Mechanische Eigenschaften

Nach [82, S. 266] ist „die Elastizität die Eigenschaft fester Körper, einer durch äußere Kräfte bewirkten Verformung entgegenzuwirken.“ Als Festigkeit ist die Spannung definiert, die sich aus der maximalen Kraft beim Versagen oder einer definierten Dehnung ergibt [82, S. 336]. Wie beschrieben, hängen die ermittelten mechanischen Eigenschaften von vielen Faktoren ab. Da in dieser Arbeit Brettsperrholzbauteile betrachtet werden, sind die mechanischen Eigenschaften parallel und senkrecht zur Faser von Interesse. Nachfolgend sind die für diese Arbeit relevanten Eigenschaften kurz beschrieben.

2.1.6.1 Zug- und Druckfestigkeit

Bild 2.4 zeigt den Verlauf der Druck- und Zugfestigkeit längs und quer zur Faser von fehlerfreiem Holz, ermittelt an kleinen Proben. Bei einer Zugbeanspruchung verhält sich Holz parallel zur Faser fast ausschließlich linear-elastisch, erst bei großen Dehnungen tritt plastisches Verhalten auf. Zugbrüche kündigen sich bei statischer Lastaufbringung und gesundem Holz durch Knistern an [75, S. 27]. Holzfehler, z. B. Äste, reduzieren die Zugfestigkeit deutlich. Dies zeigt ein Vergleich der Zugfestigkeit von Fichtenholz nach DIN 68364 [133] und DIN EN 338 [149]. Die an kleinen fehlerfreien Proben ermittelte Zugfestigkeit nach DIN 68364 [133] beträgt im Mittel 95,0 N/mm², wohingegen die in DIN EN 338 [149] aufgeführte charakteristische Zugfestigkeit der üblichen Festigkeitsklasse C24 mit 14,5 N/mm² deutlich geringer ist. Zudem kommt es bei fehlerbehaftetem Holz zu schlagartigem Versagen. Unter Druckbeanspruchung verhält sich Holz parallel zur Faser weitgehend linear-elastisch. Nach dem Überschreiten der Proportionalitätsgrenze besitzt Holz unter Druck ein ausgeprägt plastisches Verhalten. Ein Druckversagen kündigt sich ebenfalls durch Knistern an [75, S. 25]. Holzfehler beeinflussen die Druckfestigkeit nicht in gleichem Ausmaß wie die Zugfestigkeit. Der Mittelwert der Druckfestigkeit von Fichte beträgt nach DIN 68364 [133] 45,0 N/mm². Die charakteristischen Werte, die zur Bemessung tragender Holzbauteile nach DIN EN 338 [149] in Abhängigkeit der Festigkeitsklasse angesetzt werden dürfen, sind geringer; sie liegen im Bereich zwischen 17,0 N/mm² für Festigkeitsklasse C16 und 24,0 N/mm² für Festigkeitsklasse C30. Tabelle 2.3 vergleicht unterschiedliche mechanische Eigenschaften von Holz.

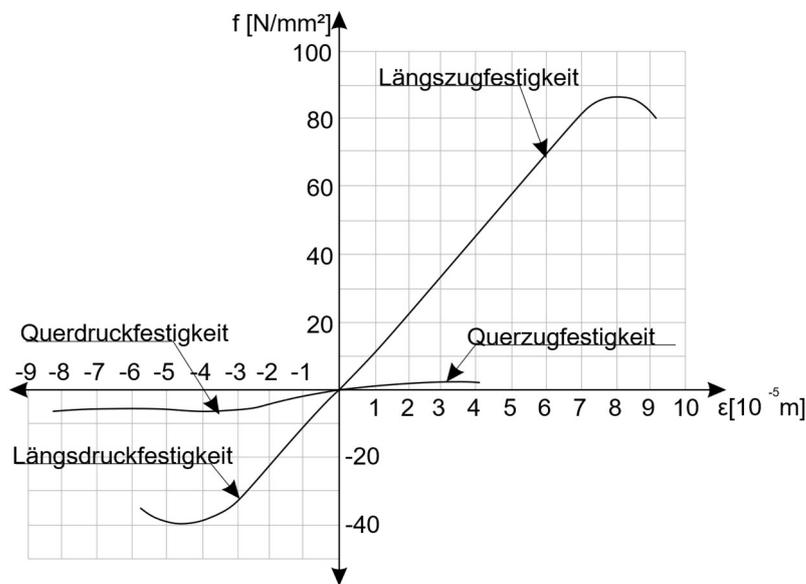


Bild 2.4: Spannungs-Dehnungsbeziehung für die Druck- und Zugspannung längs und quer zur Faser an kleinen fehlerfreien Proben nach [20, S. 32]

Wie aus Bild 2.4 hervorgeht, sind die Querzug und Querdruckfestigkeit deutlich geringer als in Faserlängsrichtung, was der Anisotropie des Holzes geschuldet ist. Nach [82, S. 380] beträgt die Querzugfestigkeit nur etwa 3 % bis 4 % der Längszugfestigkeit. In DIN EN 338 [149] ist die charakteristische Querzugfestigkeit von Holz mit $0,4 \text{ N/mm}^2$ angegeben. Im Vergleich dazu ist die Querdruckfestigkeit etwas größer und beträgt nach DIN EN 338 [149] für in Deutschland übliche Festigkeitsklassen zwischen $2,2 \text{ N/mm}^2$ und $2,7 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 2.3: Zug- und Druckfestigkeit von Holz nach DIN 68364 [133] und DIN EN 338 [149]

Festigkeitseigenschaft [N/mm^2]		DIN 68364	DIN EN 338		
		MW	C16	C24	C30
Zug in Faserrichtung	$f_{t,0}$	95,0	8,5	14,5	19
Zug rechtwinklig zur Faserrichtung	$f_{t,90}$		0,4	0,4	0,4
Druck in Faserrichtung	$f_{c,0}$	45,0	17,0	21,0	24,0
Druck rechtwinklig zur Faserrichtung	$f_{c,90}$		2,2	2,5	2,7

Der Anstieg der Spannungs-Dehnungslinie im linear-elastischen Bereich kennzeichnet den E-Modul. Anhand der einzelnen Spannungs-Dehnungsverläufe ist ersichtlich, dass der E-Modul für Zug- und Druckbeanspruchung quer zur Faser deutlich kleiner ist als in Faserlängsrichtung.

2.1.6.2 Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit von Holz ist eine von der Druck- und Zugfestigkeit abhängige Größe. Bei einer Biegebeanspruchung verhält sich Holz bis zum Erreichen der Proportionalitätsgrenze auf der gedrückten Querschnittsseite linear-elastisch. Wegen des unterschiedlichen Druck- und

Zugspannungsverhaltens ist das Verhalten nach dem Überschreiten der Proportionalitätsgrenze auf der gedrückten Querschnittsseite nichtlinear. Die Spannung auf der gezogenen Querschnittsseite nimmt weiter zu, während die Spannung auf der gedrückten Seite nicht ansteigt. Dies führt zu einer Verschiebung der Nulllinie hin zur Zugseite. Wegen der hohen Zugspannungen tritt häufig ein Biegezugbruch auf. [82, S. 384-388] Insbesondere Äste und Holzfehler auf der gezogenen Seite wirken sich negativ auf die Biegefestigkeit aus. So ist nach DIN 68364 [133] der Mittelwert der Biegefestigkeit von fehlerfreiem Holz $80,0 \text{ N/mm}^2$; die charakteristische Biegefestigkeit von mit Fehlern behaftetem Holz nach DIN EN 338 [149] beträgt bei der Festigkeitsklasse C24 $24,0 \text{ N/mm}^2$.

2.1.6.3 Schubfestigkeit

Bild 2.6 zeigt die Spannungs-Dehnungslinie von kleinen fehlerfreien Proben unter Schubbeanspruchung längs und quer zur Faser. Die hier betrachtete Beanspruchung in Querrichtung wird auch als Rollschub bezeichnet. Rollschub entspricht einer Schubbeanspruchung in radial-tangentialer Ebene, und kann als ein übereinander gleiten der einzelnen Röhren aufgefasst werden. Hierzu zeigt Bild 2.5 exemplarisch in Teilbild a) den Ausgangszustand eines nicht durch Rollschub beanspruchten Elements, in Teilbild b) ist der verzerrte Zustand nach dem Aufbringen einer Rollschubbeanspruchung dargestellt.

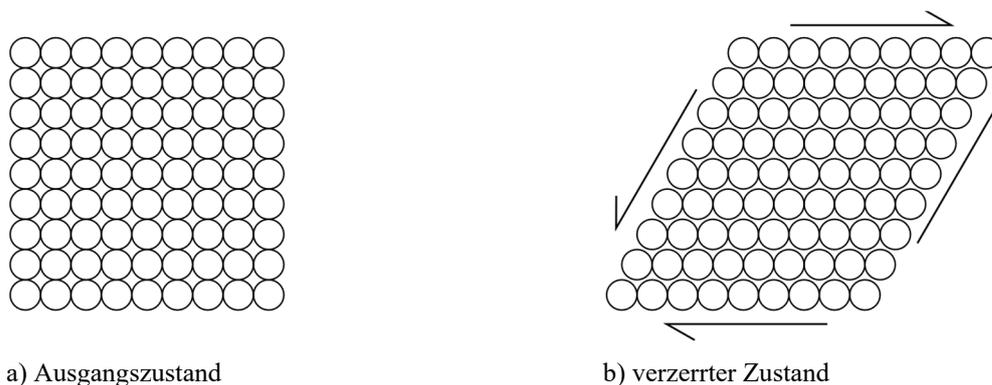


Bild 2.5: Verzerrung infolge einer Rollschubbeanspruchung

Rollschub kann auftreten, wenn Brettsperrholzplatten senkrecht zur Plattenebene auf Biegung beansprucht werden. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die Schubfestigkeit in Faserlängsrichtung höher ist als die Rollschubfestigkeit; generell ist die Schubfestigkeit deutlich geringer als die Zug- oder Druckfestigkeit. Der Mittelwert der Schubfestigkeit in Faserlängsrichtung nach DIN 68364 [133] beträgt $10,0 \text{ N/mm}^2$, die charakteristischen Werte nach DIN EN 338 [149] liegen im Bereich von $4,0 \text{ N/mm}^2$. Nach [75, S. 31] liegt die charakteristische Rollschubfestigkeit im Bereich zwischen $0,7 \text{ N/mm}^2$ und $1,25 \text{ N/mm}^2$, zur Rollschubfestigkeit gibt DIN 68364 [133] keine Werte an. Der Schubmodul in Faserlängsrichtung der im Mittel mit 690 N/mm^2 angegeben ist, ist um ein Vielfaches höher als der Rollschubmodul, der nach [39, S. 321] zwischen 40 N/mm^2 und 80 N/mm^2 liegt.

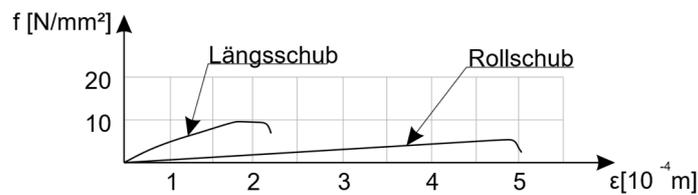


Bild 2.6: Spannungs-Dehnungsbeziehung für Längsschub- und Rollschubspannung an kleinen fehlerfreien Proben nach [20, S. 32]

2.1.6.4 Weitere Eigenschaften

Die beschriebenen mechanischen Eigenschaften werden alle im Kurzzeitversuch bestimmt. Da Holz ein ausgeprägt zeitabhängiges Verhalten besitzt, sind die mechanischen Eigenschaften auch von der Beanspruchungsart, dem Belastungsgrad und der Holzfeuchte abhängig, welche sich mit der Zeit verändern. Als Dauerstandsfestigkeit ist die Festigkeit definiert, die bei unendlich langer statischer Belastung gerade noch aufgenommen werden kann. Bei fehlerfreiem Fichtenholz beträgt die Biegedauerstandsfestigkeit im normalen Innenklima nach [80, S. 50] etwa 60 % der im Kurzzeitversuch bestimmten; mit zunehmender, insbesondere wechselnder Holzfeuchte wird die Dauerstandsfestigkeit noch geringer.

Die Anfangsverformung nimmt bei einem durch eine äußere Last dauerhaft beanspruchtem Bauteil mit der Zeit zu. Diese als Kriechen bezeichnete Verformungszunahme ist bei Bauteilen aus Holz abhängig von der Beanspruchungsart, wie Bild 2.7 zeigt. Der Kriechfaktor ist das Verhältnis der Gesamtverformung bezogen auf die elastische Anfangsverformung. Bei Torsion ist die Verformungszunahme am größten, bei Zug am kleinsten. Die Kriechfaktoren bei Biege- oder Druckbeanspruchung sind ähnlich.

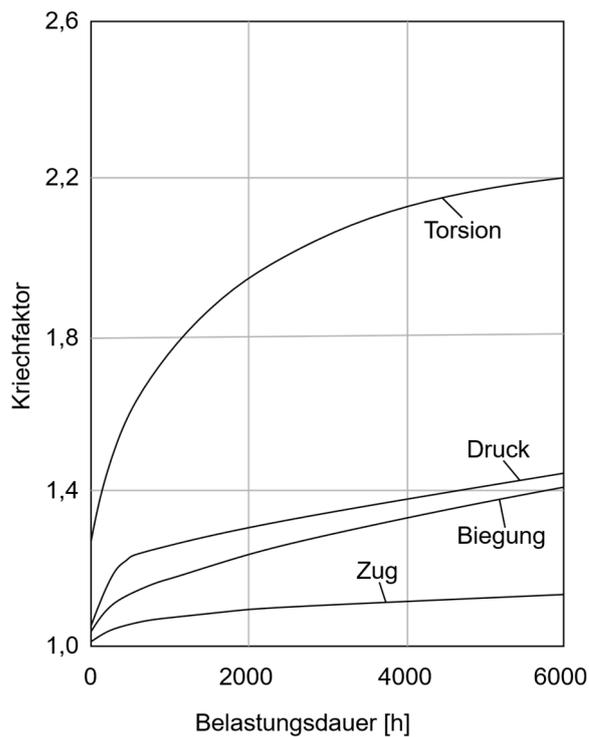


Bild 2.7: Einfluss der Beanspruchungsart auf die Kriechverformung nach [40, S. 216]

Weiter beeinflussen der Belastungsgrad und die Holzfeuchte die Kriechverformung, wie Bild 2.8 und Bild 2.9 darlegen. Nach [40, S. 219] betragen die Kriechfaktoren von Vollholz im konstanten Innenklima unter konstanter Biegebeanspruchung nach 10^5 Stunden im Mittel etwa 1,5. Im natürlichen Außenklima wurden bei Vollholz nach mehrjähriger Biegebeanspruchung Kriechfaktoren zwischen 2,5 und 5,0 festgestellt. Ebenso wirkt sich die Art der Feuchtebeanspruchung auf den Kriechfaktor aus. Dauerhaft hohe oder geringe Feuchtigkeitsgrade führen zu geringeren Kriechfaktoren, wohingegen bei einer wechselnden Feuchtebeanspruchung mit einer Zunahme der Kriechfaktoren zu rechnen ist, wie Bild 2.8 illustriert.

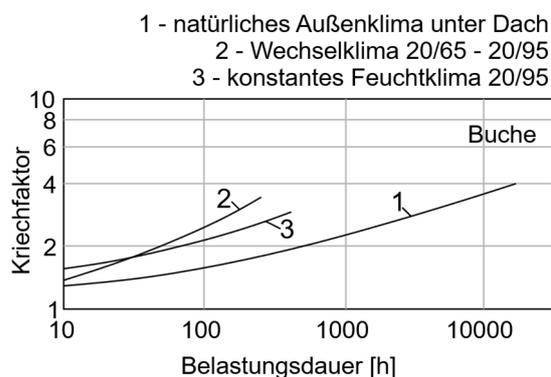


Bild 2.8: Einfluss der Klimabeanspruchung auf die Kriechfaktoren nach [40, S. 220]

Der Belastungsgrad ist definiert als das Verhältnis der aufgebrauchten Spannung zur statischen Kurzzeitfestigkeit und ist in % angegeben. Mit steigendem Belastungsgrad nimmt die Kriechverformung zu.

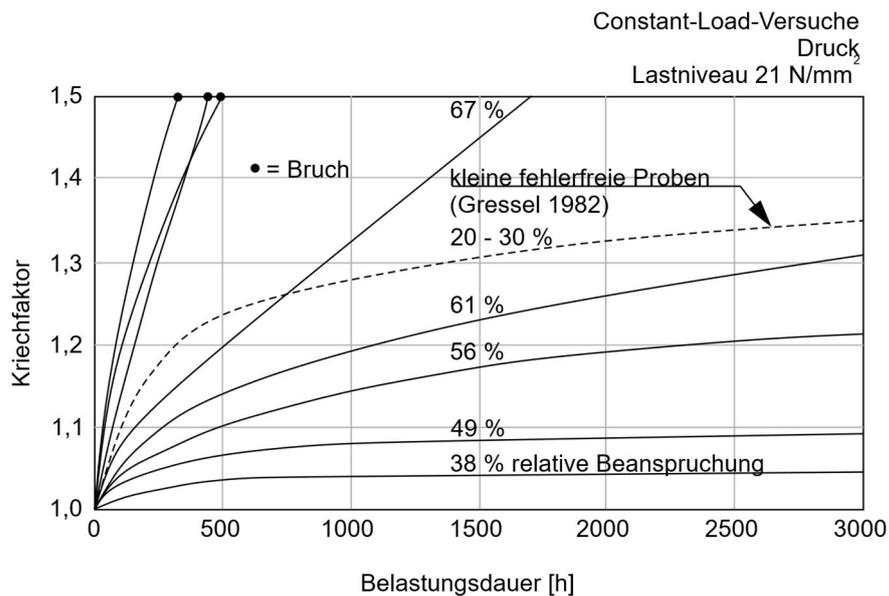


Bild 2.9: Einfluss des Belastungsgrades bei Druckversuchen auf die Kriechverformung nach [38, S. 248]

2.1.7 Holz als Füge­teil

Die Abmessungen von Bauteilen aus Holz sind, ohne weiterverarbeitende Schritte, durch das natürliche Wachstum begrenzt. Um Bauteile aus Holz herzustellen, die unabhängig von der einzelnen Größe des gewachsenen Baums sind, werden Holzleimbauteile hergestellt. Die Verklebungseigenschaften von Holz sind nach [43, S. 729] von seinem faserig-porösen Aufbau geprägt. Die für eine Verklebung wichtigen Eigenschaften von Holz sind die anatomische Struktur, der Gehalt an Holz­inhaltsstoffen, die Holz­dichte und die Holz­feuchte [129, S. 35]. Je nach Ausprägung dieser Merkmale eignet sich Holz besser oder schlechter zum Verkleben. Dieses Thema vertieft Abschnitt 2.4.3.

2.2 Ultrahochfester Beton

2.2.1 Allgemeines

Ultrahochfester Beton (UHFB) ist eine Weiterentwicklung von Normalbeton. Seine Entwicklung zur Anwendungsreife hat in den späten 1990er Jahren begonnen [26, S. 121]. Unabhängig von der Art des Betons, ob Normalbeton oder UHFB, basieren Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton als zementgebundenem Werkstoff auf der durch Hydratation gebildeten Calciumsilikathydratphasen (C-S-H Phasen). Im Vergleich zu Normalbeton zeichnet sich UHFB durch seine höhere Druckfestigkeit, Dichtigkeit und Beständigkeit aus. Diese erhält der Beton durch eine gesteigerte Gefügeverdichtung [94, S. 29]. Um einen UHFB mit einer Druckfestigkeit im Bereich zwischen 150 N/mm² und 200 N/mm² zu erhalten, führt [26, S. 119-120] folgende Prinzipien auf:

- Einsatz von Gesteinskörnungen mit reduziertem Korndurchmesser, um Spannungskonzentrationen zu vermeiden, die große Gesteinskörnungen hervorrufen.

- Optimierung der Packungsdichte der Zuschlagstoffe.
- Die verwendete Zementmenge soll Wasser vollständig binden.
- Feine Stahlfasern sollen dem Beton zugegeben werden, um ein duktileres Verhalten sicherzustellen.

Die Entwicklung und insbesondere die Normung von UHFB ist noch nicht abgeschlossen. International gibt es einige Normen zu UHFB, beispielsweise in Frankreich [130] und Japan [154], in der Schweiz existiert ein Merkblatt [155] und in Deutschland wird aktuell an einer Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) gearbeitet [124].

Der folgende Abschnitt basiert auf Standardwerken und beschreibt die Ausgangsstoffe zur UHFB-Herstellung, deren Wirkungsweise und wichtige Eigenschaften von UHFB. Weiterführende Informationen finden sich in [25, 26, 94, 99, 100, 102].

2.2.2 Ausgangsstoffe und deren Wirkungsweise

2.2.2.1 Zement

Substanzieller Ausgangsstoff von UHFB ist Zement. Häufig wird UHFB mit reinem Portlandzement (Cem I nach DIN EN 196 [145]) hergestellt. Portlandzement entsteht durch die Vermahlung von Portlandzementklinker und Gips oder Anhydrit. Portlandzementklinker selbst besteht aus Tricalciumsilikat ($3 CaO \cdot SiO_2$), Dicalciumsilikat ($2 CaO \cdot SiO_2$), Tricalciumaluminat ($3 CaO \cdot Al_2O_3$), und Calciumaluminatferrat ($4 CaO (Al_2O_3, Fe_2O_3)$). Dabei bilden Tricalciumsilikat und Dicalciumsilikat mit ca. 80 % Anteil am Portlandzementklinker den Hauptbestandteil; sie sind nach Zugabe von Wasser maßgebend für die Festigkeitsentwicklung. Portlandzement besteht aus 58 – 66 % Calciumoxid (CaO), 18 – 26 % Siliziumdioxid (SiO₂), 4 – 10 % Aluminiumoxid (Al₂O₃) und 2 – 5 % Eisen(III)-oxid (Fe₂O₃). [6, S. 338-341] Es gibt Zemente mit unterschiedlichen Festigkeitsklassen. Zur Herstellung von UHFB eignen sich Zemente der Festigkeitsklassen 42,5 R und 52,5 R bevorzugt mit hohem Sulfatwiderstand und geringer Hydratationswärme [26, S. 125].

2.2.2.2 Reaktive Zuschlagstoffe

Neben Zement enthält UHFB häufig reaktive Zuschlagstoffe, die ebenfalls festigkeitsbildend sind. Das sind Silikastaub oder Hüttensand [26, S. 126-127].

Silikastaub

Silikastaub, dessen Hauptbestandteil Siliziumdioxid ist, kann in zwei Formen in UHFB zum Einsatz kommen – als Mikrosilika oder als Nanosilika.

Mikrosilika gemäß DIN EN 13263-1 [139] fällt als Nebenprodukt aus Filtern des Schmelzprozesses zur Herstellung von Siliziummetall und Ferrosilizium-Legierungen an. Es besteht aus sehr feinen glasig-kugelförmigen Partikeln mit einer mittleren Teilchengröße kleiner 1 µm. Mikrosilika wirkt auf zwei Arten im Beton: Einerseits tritt als Folge einer Wärmebehandlung des Betons eine puzzolanische Wirkung auf, wodurch zusätzliche festigkeitsbildende Calciumsilikathydrate gebildet werden, was die Kapillarporen ebenfalls reduziert [45, S. 288]. Ohne Wärmebehandlung

des Betons wirkt Mikrosilika andererseits aufgrund seiner Feinheit überwiegend als Füller und verringert den Porenraum zwischen den Zementpartikeln und der Gesteinskörnung. Aufgrund seiner Feinheit und der puzzolanischen Reaktion verfestigt Mikrosilika [6, S. 346] zufolge zusätzlich die Mikrostruktur der Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung, was den Verbund erheblich verbessert. Mikrosilika führt jedoch zu sehr zähen und klebrigen Mischungen [94, S. 30]. Zudem ist für [116, S. 65] der Einsatz von Mikrosilika aufgrund der variierenden Partikelgröße und den damit verbundenen Schwankungen der Materialeigenschaften problematisch.

Nanosilika sind synthetisch hergestellte Siliziumdioxide mit einer mittleren Teilchengröße von 25 nm nach [6, S. 346] bzw. Teilchengrößen zwischen 200 nm und 12.000 nm nach [116, S. 65]. Nanosilika ist damit im Vergleich zu Mikrosilika noch feiner und wegen der daraus resultierenden hohen aktiven Oberfläche noch reaktiver hinsichtlich der Bildung zusätzlicher C-S-H Phasen [6, S. 346]. Da Nanosilika synthetisch hergestellt wird, sind die chemischen und physikalischen Eigenschaften wesentlich konstanter als bei Mikrosilika [116, S. 66].

Hüttensand

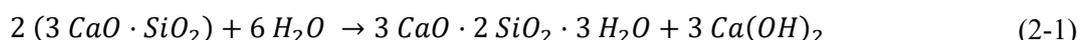
Hüttensand ist eine granuliert Hochofenschlacke, die ein latent hydraulisches Erhärtungsvermögen besitzt und mit Wasser reagieren kann. Hüttensand kann als Ersatz für Portlandzement verwendet werden, was jedoch zu einer Festigkeitsreduktion führt. Dem kann über die Mahlfeinheit gegengesteuert werden. Bei der Verwendung von Hüttensand im Beton hat die Art und Menge des verwendeten Fließmittels großen Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung von UHFB. [34, S. 374]

2.2.2.3 Inerte Zuschlagstoffe

Um die optimale Packungsdichte von UHFB zu erreichen, werden häufig unterschiedlich feine Quarzmehle verwendet. Quarzmehl ist als Handelsware in unterschiedlich feinen Körnungen verfügbar und weist eine hohe Kornfestigkeit auf. Daneben kommen noch Sande und Kiese, meist aus festen Gesteinen wie Basalt, zum Einsatz. [100, S. 127-128]

2.2.2.4 Wasser

Durch Zugabe von Wasser werden die trockenen Bestandteile des Betons eingebunden, es bildet sich der flüssige Zementleim und der Beton wird verarbeitbar. Ebenso beginnt die Hydratisierung des Zements. Es bilden sich die C-S-H-Phasen aus, die dem Beton die Festigkeit verleihen. Reaktionsgleichung (2-1) stellt sehr vereinfacht die Reaktion von Tricalciumsilikat mit Wasser zu Calciumsilikathydrat und Calciumhydroxid (Portlandit) dar. Die exakte Ausbildung der Silikathydrate hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dies sind z. B. das Verhältnis von Calcium zu Silizium, die Temperatur, die auf den Zement bezogene Wasserzugabemenge, etc.



Neben dem Tricalciumsilikat hydratisieren ebenfalls Dicalciumsilikat, Tricalciumaluminat und Calciumaluminatferrat. Insbesondere der exakte chemisch-mineralogische Aufbau der Kristallstruktur der festigkeitsverleihenden Calciumsilikathydrate ist bis heute noch nicht geklärt [6, S. 351]. Nach [119, S. 129] sind die C-S-H-Phasen strukturell unvollkommene Formen von Tobermorit, ebenfalls einem Calciumsilikathydratmineral. Tobermorit ist ein Schichtmineral,

aufgebaut aus CaO-Teilschichten, die zwischen silikatischen Schichten angeordnet sind [6, S. 353]. Die idealisierte Struktur präsentiert Bild 2.10.

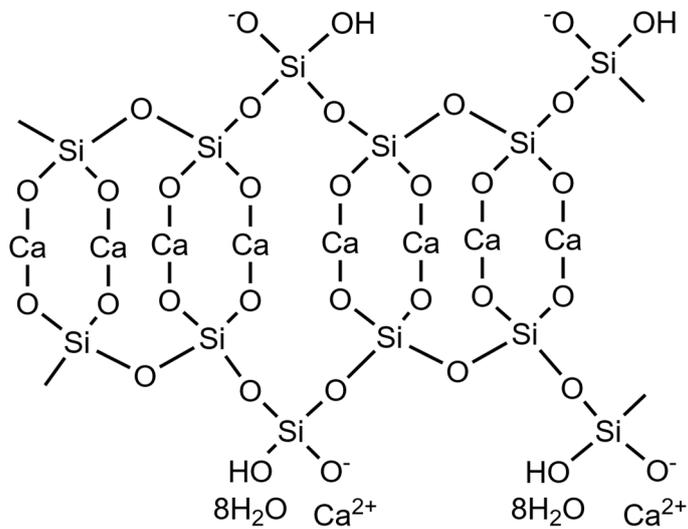


Bild 2.10: Schematische Darstellung der idealisierten Struktur von Tobermorit nach [119, S. 135]

Die Menge an Zugabewasser ist entscheidend für die Verarbeitbarkeit und die spätere Festigkeit des Betons. Für die vollständige Bildung der Hydratphasen benötigt Zement zwischen 25 % und 30 % Wasserzugabe bezogen auf die Zementmenge. Bei dieser Wassermenge ist keine Verarbeitung des Betons möglich. Erst bei einer Wasserzugabemenge von 40 % bezogen auf die Zementmenge entsteht verarbeitbarer Beton und die Zementpartikel hydratisieren vollständig. Mit darüber hinauszunehmender Wasserzugabemenge entstehen Kapillarporen, die die Festigkeit des Festbetons reduzieren. [6, S.366-367] Bild 2.11 zeigt links die im Wasser befindlichen Zementkörner und rechts die daraus entstehenden Gefüge im Festbeton bei unterschiedlichen Wasserzugabemengen.

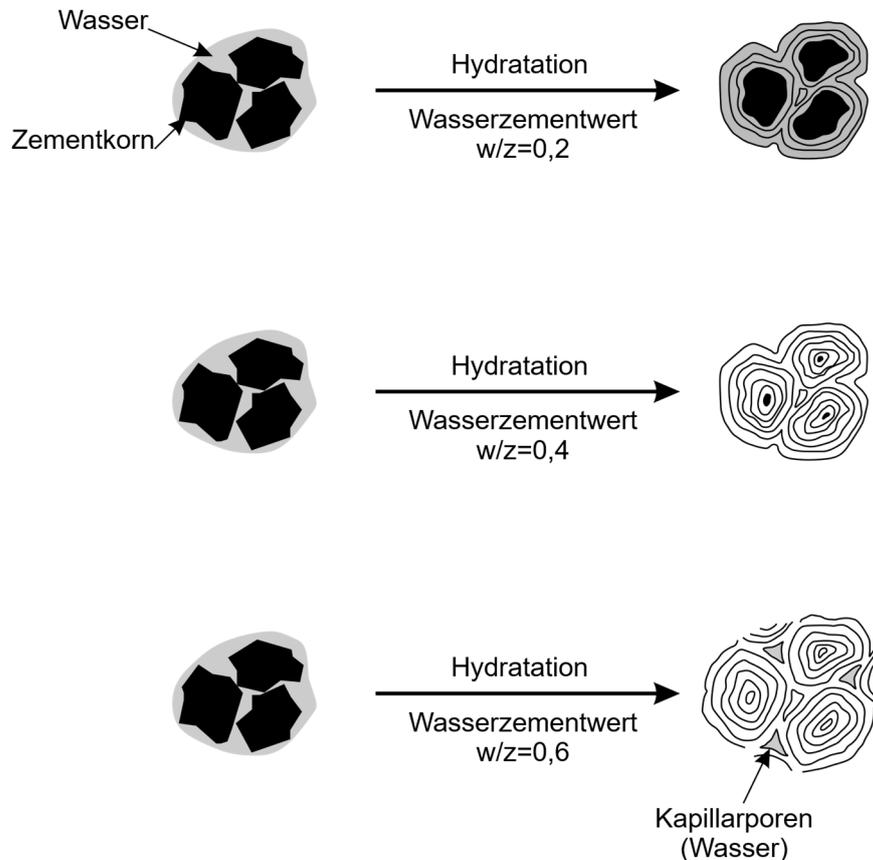


Bild 2.11: Schematische Darstellung der Erhärtung von Zementen bei Mengen der Wasserzugabe bezogen auf die Zementmenge nach [120, S. 127]

Die Wasserzugabemenge bezogen auf die Zementmenge ist bei UHFB von untergeordneter Rolle, da die zusätzlichen reaktiven Zuschlagstoffe ebenso einen Wasseranspruch besitzen. Bei UHFB sind Wasserzugabemengen von ca. 20 % bezogen auf die Bindemittelmenge üblich. [26, S.122] Wie Bild 2.11 oben zeigt, hydratisieren die Zementpartikel durch die geringe Wasserzugabemenge nicht vollständig, sondern liegen als hochfeste Gesteinskörnung unhydratisiert im UHFB vor. Zudem sind keine Kapillarporen vorhanden. Um bei derartig geringen Wasserzugabemengen einen verarbeitbaren Beton herzustellen, sind Fließmittel erforderlich. [6, S.550]

2.2.2.5 Zusatzmittel

Wichtigstes Zusatzmittel im UHFB sind Fließmittel. Sie sorgen dafür, dass UHFB trotz der geringen Wassermenge verarbeitbar wird. Für UHFB eignen sich hochwirksame Fließmittel auf Polycarboxylatetherbasis. Fließmittelmoleküle sind negativ geladenen Polymere, bestehend aus einer Haupt- und mehreren Seitenketten, die sich an die positiv geladenen Oberflächen der Hydratphasen anschmiegen und sich dann gegenseitig abstoßen, wie Bild 2.12 zeigt.

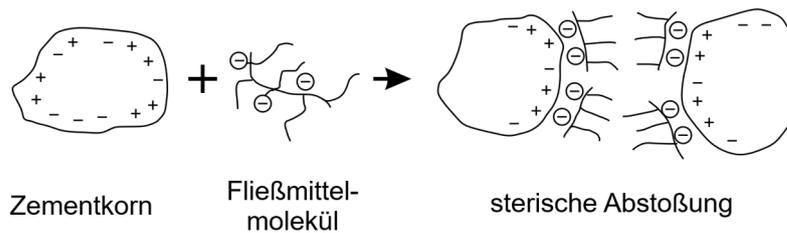


Bild 2.12: Wirkungsmechanismus von Fließmitteln auf Polycarboxylatbasis: sterische Abstoßung der Seitenketten nach [6, S. 381]

Die Abstoßungswirkung beruht auf einer elektrostatischen Abstoßung der negativ geladenen Fließmittelmoleküle untereinander und auf der sterischen Abstoßung der Seitenketten der Fließmittelmoleküle. [6, S. 381-382]

2.2.2.6 Fasern

Fasern, insbesondere hochfeste Mikrostaalfasern, werden UHFB zugegeben, um das Nachbruchverhalten positiv zu beeinflussen. Näheres hierzu findet sich in Abschnitt 2.2.3.2.

2.2.3 Eigenschaften

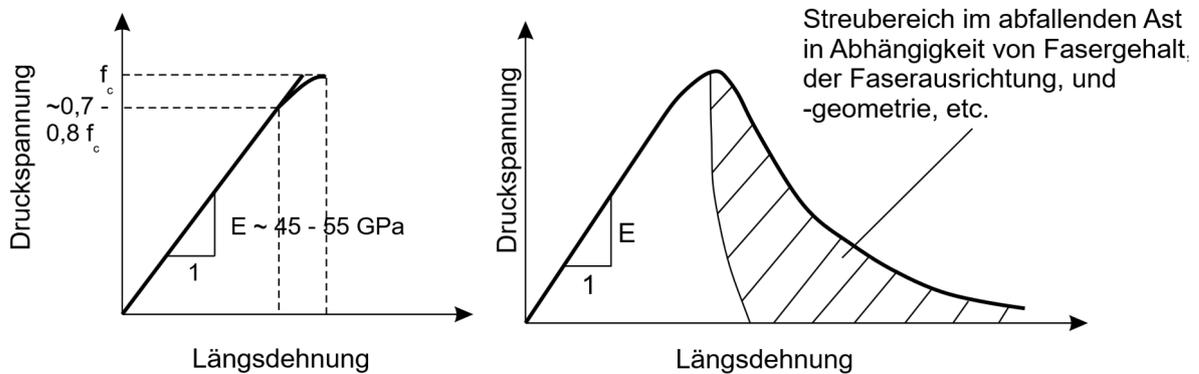
2.2.3.1 Fügetechnische Eigenschaften

Beton zählt nach [43, S. 736] zu den porösen Werkstoffen, bei denen für die Verklebung vor allem Porosität, Verformungsverhalten sowie Lösungsmittelbeständigkeit eine Rolle spielen. Weitere für die Verklebung von Beton wichtige Eigenschaften führt Abschnitt 2.4.4 auf.

2.2.3.2 Druck- und Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul

UHFB besticht durch seine hohe Druckfestigkeit. Derzeit gibt es in Deutschland keine festgelegte Druckfestigkeit, ab wann ein Beton als ultrahochfest gilt. In Frankreich und Deutschland muss ein Beton mindestens eine charakteristische Zylinderdruckfestigkeit von 130 MPa aufweisen, um als ultrahochfest zu gelten. Das Verhältnis von Durchmesser zu Höhe der Prüfzylinder soll 1:2 betragen [124, S. 29, 131, S. 33]. In der Schweiz muss eine charakteristische Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen von mehr als 120 MPa erreicht werden [155, S. 7]; die japanischer Normung sieht eine charakteristische Zylinderdruckfestigkeit von 180 MPa vor [154, S. 13]. Im Vergleich zu Normalbeton weist UHFB im einaxialen Druckversuch bis kurz vor Erreichen der Bruchlast ein nahezu linear elastisches Materialverhalten auf, wie auch Bild 2.13 zeigt. Unabhängig davon, ob dem UHFB Fasern zugegeben sind oder nicht, liegt der E-Modul nach [26, S. 133] im Bereich zwischen 45 bis 55 GPa. Beim eindimensionalen Druckversuch weist UHFB zumeist ein sprödes Versagen auf und der Beton versagt bei Erreichen der Maximalkraft schlagartig. Die dazugehörige Spannungs-Dehnungsbeziehung ist in Bild 2.13, Teilbild a) zu sehen. Die Zugabe von Staalfasern beeinflusst besonders das Nachbruchverhalten. Das Überschreiten der maximalen Druckfestigkeit führt nicht mehr zum schlagartigen Versagen, sondern die Dehnung nimmt weiter zu, während die Spannung langsam abfällt. Das Verhalten des abfallenden Astes ist abhängig vom Fasergehalt, der Fasergeometrie, der Faserorientierung, etc. Bild 2.13, Teilbild b) zeigt die Spannungs-Dehnungsbeziehung von faserbewehrtem UHFB im einaxialen Druckversuch mit dem dazugehörigem Streubereich des abfallenden Astes. Die Bruchdehnung ist nach [26, S. 133-134]

von der verwendeten Gesteinskörnung abhängig. Feinkornbeton mit Größtkorndurchmesser von 2 mm weist eine Bruchdehnung typischerweise im Bereich zwischen 4 und 4,4 ‰ auf, während bei Grobkornbeton Bruchdehnungen bei 3,5 ‰ zu beobachten waren.



a) Ohne Faserzugabe, nach [26, S. 133]

b) Mit Faserzugabe nach [18, S. 65]

Bild 2.13: Spannungs-Dehnungsbeziehung von UHFB bei Druckbeanspruchung mit und ohne Fasern

Nach [94, S. 56] gibt es keinen allgemein gültigen Materialkennwert „Zugfestigkeit“ von Beton. Dies bedingt sich durch die Einflussfaktoren auf die Zugfestigkeit, unter anderem die Prüfmethode, das Probekörpervolumen, den Maßstabeffekt und die Art der Lagerung der Prüfkörper, vgl. [94, S. 57-68]. Nach [26, S. 140] liegt die Biegezugfestigkeit von UHFB ohne Faserbewehrung, ermittelt an Prismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm, in einem Bereich zwischen 13 N/mm² und 17 N/mm². Ähnliches berichtet [94, S. 56]. Betone ohne Faserbewehrung weisen ein sehr sprödes Versagen auf. Wegen der hohen Festigkeit der Matrix verlaufen die Risse durch die Gesteinskörnung. Eine Faserzugabe steigert die Zugfestigkeit des Betons, hier waren Biegezugfestigkeiten zwischen 15 N/mm² und 40 N/mm² zu erreichen und, je nach zugefügter Fasermenge, ein duktileres Versagen zu erzielen.

2.2.3.3 Quellen, Schwinden und Kriechen

Wie der Baustoff Holz schwindet und kriecht auch UHFB. Quellen von UHFB spielt im Baubereich eine untergeordnete Rolle und wird nicht weiter betrachtet. Schwinden ist die Volumenreduktion durch den Wasserverlust. Beim chemischen Schwinden wird das Wasser chemisch zur Bildung der Hydratphasen gebunden; beim physikalischen Schwinden trocknet das im Beton vorhandene Überschusswasser aus. Aufgrund der geringen Wasserzugabemenge bei UHFB ist praktisch kein Überschusswasser vorhanden und damit tritt in nur sehr geringem Umfang physikalisches Schwinden auf. Bei kapillarporenfreiem UHFB ist von einem Gesamtschwindmaß zwischen 0,6 mm/m und 0,9 mm/m auszugehen. Durch eine Wärmebehandlung, Lagerung der Bauteile über ca. 48 Stunden bei einer Temperatur bei ca. 75° C und 90° C, lässt sich das Schwindmaß annähernd auf null reduzieren. Einen ebenso großen Einfluss hat eine Wärmebehandlung auf das Kriechen. Ohne Wärmebehandlung liegt die Kriechzahl zwischen 0,6 und 1,4; mit Wärmebehandlung lässt sich die Kriechzahl auf Werte zwischen 0,2 bis 0,4 reduzieren. Bis zu einer Spannung von ca. 60 % der Kurzzeitfestigkeit tritt lineares Kriechen auf, höhere Belastungsgrade führen zu deutlichen Nichtlinearitäten. [26, S. 146-148]

2.2.4 Anwendung von ultrahochfestem Beton

Die Anwendungsfelder von ultrahochfestem Beton sind mannigfaltig. Im Bereich des Maschinenbaus wird ultrahochfester Beton beispielsweise zur Herstellung von Maschinenfundamenten wegen seiner guten Dämpfungseigenschaften eingesetzt, siehe hierzu [94]. Im Bauwesen wurden einerseits bereits Stützen, Wandscheiben, Plattenbalken, Platten sowie deren Verbindung untersucht, siehe beispielsweise [30, 31, 46, 64]. Andererseits sind etliche Projekte, insbesondere Fassaden bereits gebaut, wie aus [53, 95] hervorgeht. Weiterhin ist die Anwendung von ultrahochfestem Beton im Brückenbau von Interesse, sowohl für Fußgängerbrücken wie aus [26] und etlichen gebauten Beispielen hervorgeht, siehe hierzu [52], oder aber auch für hochbelastete Bahnbrücken [32].

2.3 Brettsperrholz

2.3.1 Allgemeines

Der Begriff Brettsperrholz wird [14, S. 333] zufolge erstmals im Jahr 1981 genannt. Durch Innovationen in der Klebstoff- und Produktionstechnologie sowie seinen vielen positiven Eigenschaften ist Brettsperrholz mittlerweile ein am Markt etablierter Baustoff. Dies lassen auch die Produktionszahlen erahnen [vgl. 50]. Der folgende Abschnitt beschreibt den Baustoff Brettsperrholz, soweit es für diese Arbeit relevant ist. Weitere Informationen sind beispielsweise [14, 125] zu entnehmen.

2.3.2 Brettsperrholz als Baustoff

In DIN EN 16351 [143] „Holzbauwerke-Brettsperrholz-Anforderungen“ ist Brettsperrholz definiert als „tragendes Holzprodukt, das aus mindestens drei rechtwinklig verklebten Lagen besteht und stets Brettlagen und möglicherweise auch Lagen aus Holzwerkstoffen enthält“. Bild 2.14 zeigt exemplarisch den Aufbau eines fünfplagigen Brettsperrholzelementes. Die Holzbretter zur Herstellung von Brettsperrholz müssen nach DIN EN 14081-1 [141] festigkeitssortiert und einer Festigkeitsklasse nach DIN EN 338 [149] zugeordnet sein. Für die Herstellung sind unterschiedliche Holzarten möglich, meistens kommt Fichte zum Einsatz. Die zulässige Dicke der einzelnen Lagen t_L beträgt zwischen 12 mm und 45 mm, in Europa sind Dicken von 20 mm, 30 mm und 40 mm üblich. Die zulässige Breite eines Brettes w_L beträgt nach DIN EN 16351 [143] zwischen 40 mm und 300 mm; laut [14, S. 335] sollte die Brettbreite mindestens das Vierfache der Brettstärke betragen. DIN EN 16351 [143] gibt eine maximale Elementdicke t_E von 500 mm an, Brettsperrholzelemente sind jedoch selten dicker als 300 mm bis 400 mm. Für die Verklebung der einzelnen Lagen sind unterschiedliche Klebstoffe zulässig. Bevorzugt werden Klebstoffe die eine helle Klebefuge erzeugen und schnell aushärten, wie Polyurethanklebstoffe oder Melamin Urea Formaldehydharze [73, S. 10]. Zu unterscheiden ist Brettsperrholz mit Schmalseitenverklebung und ohne Schmalseitenverklebung. Im Rahmen dieser Arbeit wird stets Brettsperrholz ohne Schmalseitenverklebung betrachtet. Hier darf der Brettzwischenraum w_G innerhalb einer Brettlage nach DIN EN 16351 [143] 6 mm nicht übersteigen.

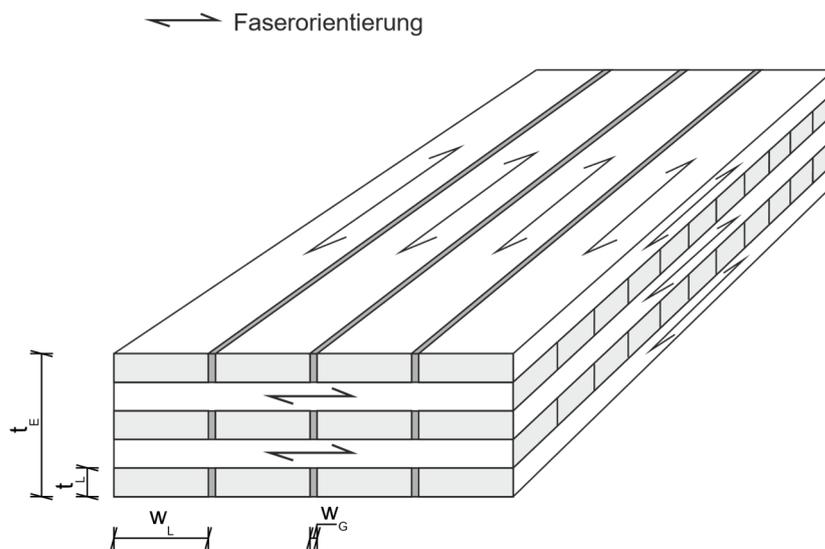


Bild 2.14: Aufbau eines Brettsperrholzelements nach [14, S. 335]

2.3.3 Herstellung

Die Herstellung von Brettsperrholz erfolgt in einem industrialisierten Prozess, der unterschiedlich gestaltet sein kann. Nachfolgend wird eine Möglichkeit beschrieben. Zunächst findet die Festigkeitssortierung der technisch getrockneten Rohlamellen statt. Dann werden die einzelnen Rohlamellen mittels Keilzinkenverbindung zu einer Endloslamelle verbunden. Von der Endloslamelle werden Abschnitte runtergekappt, welche die erforderlichen Abmessungen für das jeweilige Element besitzen. Zum Auslegen des Rohelements werden die einzelnen Lagen von Hand oder maschinell ausgelegt. Zwischen den einzelnen Brettlagen wird der Klebstoff maschinell aufgetragen. Ist das Rohelement ausgelegt, wird es entweder mit hydraulischen Pressen oder im Vakuumbettverfahren entsprechend den Vorgaben des Klebstoffherstellers gepresst. Die zulässigen Klebfugendicken sind abhängig vom verwendeten Klebstoff, üblich sind Bereiche zwischen 0,1 mm und 0,3 mm. Im Anschluss an das Aushärten des Klebstoffs folgt meist der maschinengebundene Abbund zum fertigen Element. Bild 2.15 zeigt exemplarisch den Herstellungsprozess von Brettsperrholz.

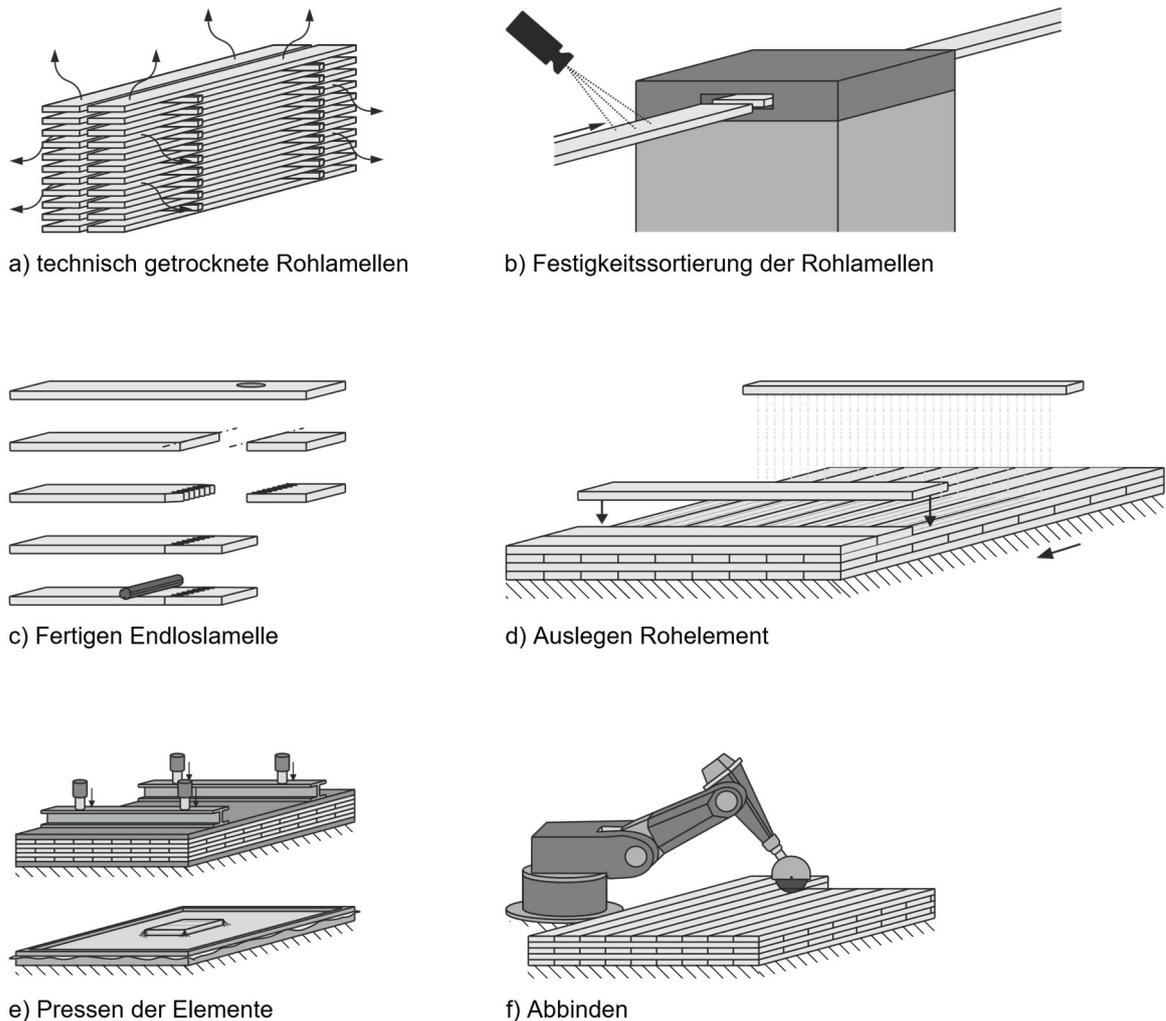


Bild 2.15: Herstellung von Brettsperrholz nach [73, S. 6-7]

2.3.4 Berechnung

2.3.4.1 Grundlegendes

Durch die kreuzweise verklebten Brettlagen können Brettsperrholzelemente Lasten sowohl als Platte oder als Scheibe abtragen. Für die Berechnung von Verformungen und Schnittgrößen und um darauf aufbauend die vorherrschenden Spannungen in den einzelnen Lagen zu bestimmen ist es erforderlich die Steifigkeiten und Schnittgrößen wie in [2] beschrieben in einem orthogonalen Koordinatensystem auszugeben. Dies zeigt Bild 2.16, sowie die im Rahmen der Arbeit weiterhin benötigten wichtigen Steifigkeiten. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Längsrichtung in x -Richtung definiert und die Querrichtung in y -Richtung. Diese Arbeit betrachtet Wandsegmente, die durch Vertikalkräfte in Scheibenebene in Längsrichtung und Horizontalkräfte die senkrecht dazu, in z -Richtung wirken, belastet werden. Aus diesem Grund sind nachfolgend die Steifigkeiten und Schnittgrößen in Längsrichtung (x -Richtung) von Bedeutung, die Steifigkeiten in Querrichtung werden vernachlässigt. Die Wandsegmente werden als Stützen betrachtet und besitzen eine definierte Breite b .

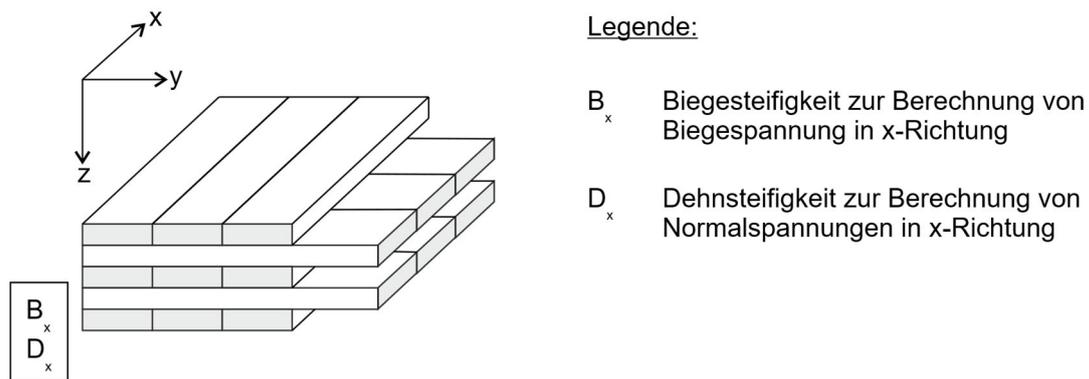


Bild 2.16: Definition von Steifigkeiten an Brettsperrholzelementen in Anlehnung an [2]

Durch den lagenweisen Aufbau der Brettsperrholzelemente entsteht bei einer Plattenbeanspruchung aufgrund der Anisotropie des Holzes eine Rollschubbeanspruchung der Querlagen. Wegen des geringen Rollschubmoduls von Holz ist der Ansatz der Bernoulli-Hypothese unter bestimmten Voraussetzungen nicht mehr zulässig. Als Orientierungsgröße hierfür wird das Verhältnis von Spannweite l zu Elementdicke d herangezogen, ist dieses kleiner als 20 sollten die Spannungen unter Berücksichtigung eines nachgiebigen Verbundes bestimmt werden. Ab einem Verhältnis $l/d > 20$ können die Spannungen nach der schubstarrten Theorie berechnet werden, da die starre Verbundtheorie dann hinreichend genaue Ergebnisse erzielt. Zur Berechnung der Verformungen wird, unabhängig des Verhältnisses l/d , empfohlen die Schubnachgiebigkeit zu berücksichtigen. [125]

Bei Brettsperrholz ohne Schmalseitenverklebung werden nur diejenigen Lagen berücksichtigt, welche parallel zur angreifenden Kraft verlaufen. Die Querlagen werden vernachlässigt. Bild 2.17 zeigt exemplarisch einen Brettsperrholzaufbau unter Momentenbeanspruchung sowie die dazugehörigen Spannungsverteilungen, einmal nach der schubstarrten Theorie und einmal unter Beachtung eines nachgiebigen Verbundes bestimmt. Zudem ist die aus einer Normalkraft resultierenden Spannungsverteilung mit dargestellt.

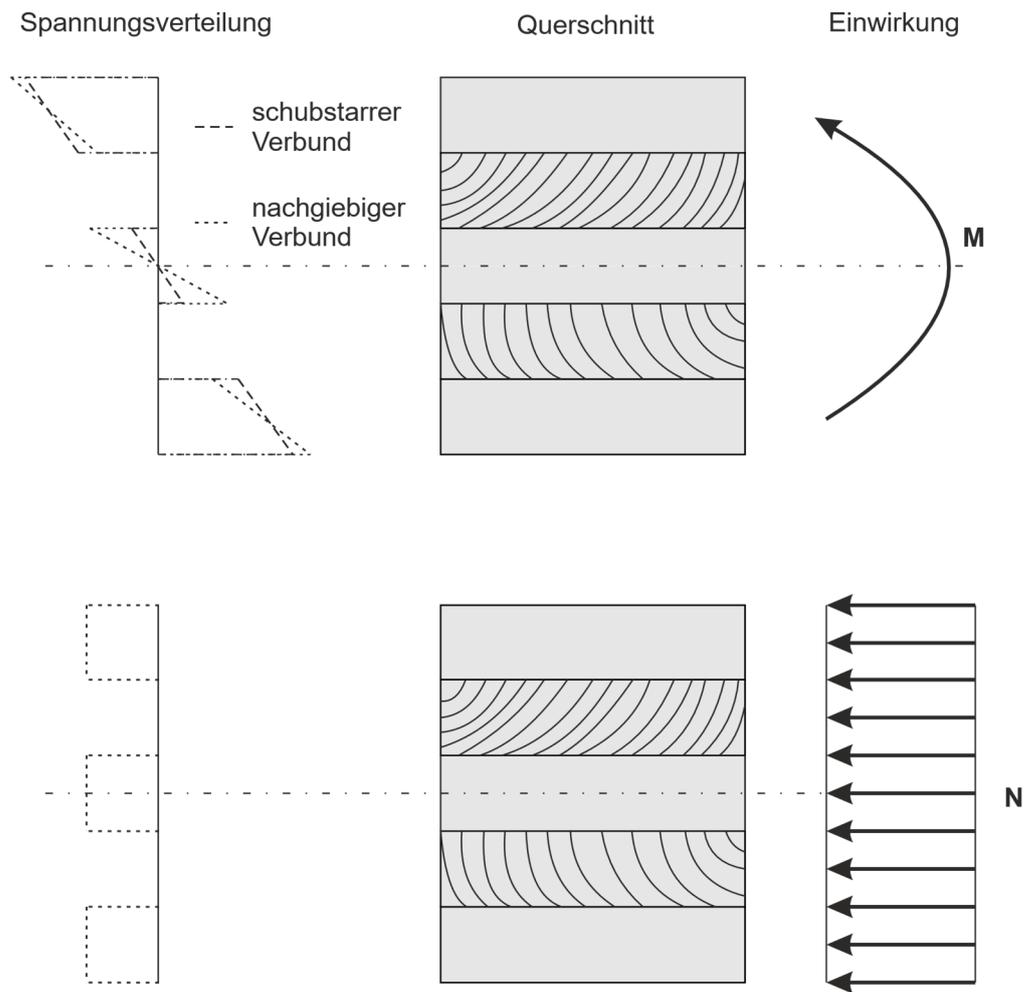


Bild 2.17: Spannungsverteilung Brettsperrholz bei unterschiedlichen Einwirkungen in Anlehnung an [125, S. 91]

2.3.4.2 Berechnung unter Berücksichtigung des nachgiebigen Verbundes - Grundlegendes

Aufgrund der sich kreuzenden Lagen aus Holz und der Anisotropie des Holzes ist bei Brettsperrholz, trotz der als starr geltenden Verbindung zwischen den einzelnen Lagen, von einer nachgiebigen Verbindung der einzelnen Lagen auszugehen. Die sich zusätzlich einstellende Verformung ist besonders bei der Ermittlung der Bauteilverformung zu berücksichtigen. Zur Berechnung von Bauteilen unter Berücksichtigung der zusätzlichen Verformung infolge des nachgiebigen Verbundes existieren unterschiedliche Möglichkeiten. Einen Beitrag für heutige Verfahren zur Berechnung von Stäben mit nachgiebig verbundenen Einzelteilen liefern die Arbeiten von Möhler [74]. Möhler [74] entwickelt die Differentialgleichungen für die Berechnung von Stäben mit zusammengesetztem Querschnitt aus zwei oder drei nachgiebig verbundenen Querschnitten, welche er für den Einfeldträger für die Lastfälle Gleichlast und Einzellast in Feldmitte löst. Die Schubnachgiebigkeit der einzelnen Teilquerschnitte wird vernachlässigt, berücksichtigt wird jedoch die sich einstellende Verschiebung der einzelnen Querschnittsteile aus der Schubnachgiebigkeit der Verbindungsmittel, mit denen die einzelnen Querschnittsteile verbunden sind.

Dies lässt sich auch auf Querschnitte mit starrer Verbindung der einzelnen Querschnittsteile, jedoch mit schubweichen Zwischenschichten, wie bei Brettsperrholz übertragen. Bild 2.18 zeigt die geometrischen Zusammenhänge und die Bezeichnungen für einen fünfteiligen Querschnitt, bei dem die drei schubstarken Schichten mittels zweier schubweicher Zwischenschichten verbunden sind, wie es bei einem fünfplagig aufgebauten Brettsperrholz der Fall ist. In Bild 2.18 sind die schubweichen Zwischenschichten grau dargestellt und bereits berücksichtigt, dass die zwei außenliegenden Schichten andere Materialeigenschaften aufweisen als die in der Mittellage angeordnete Schicht.

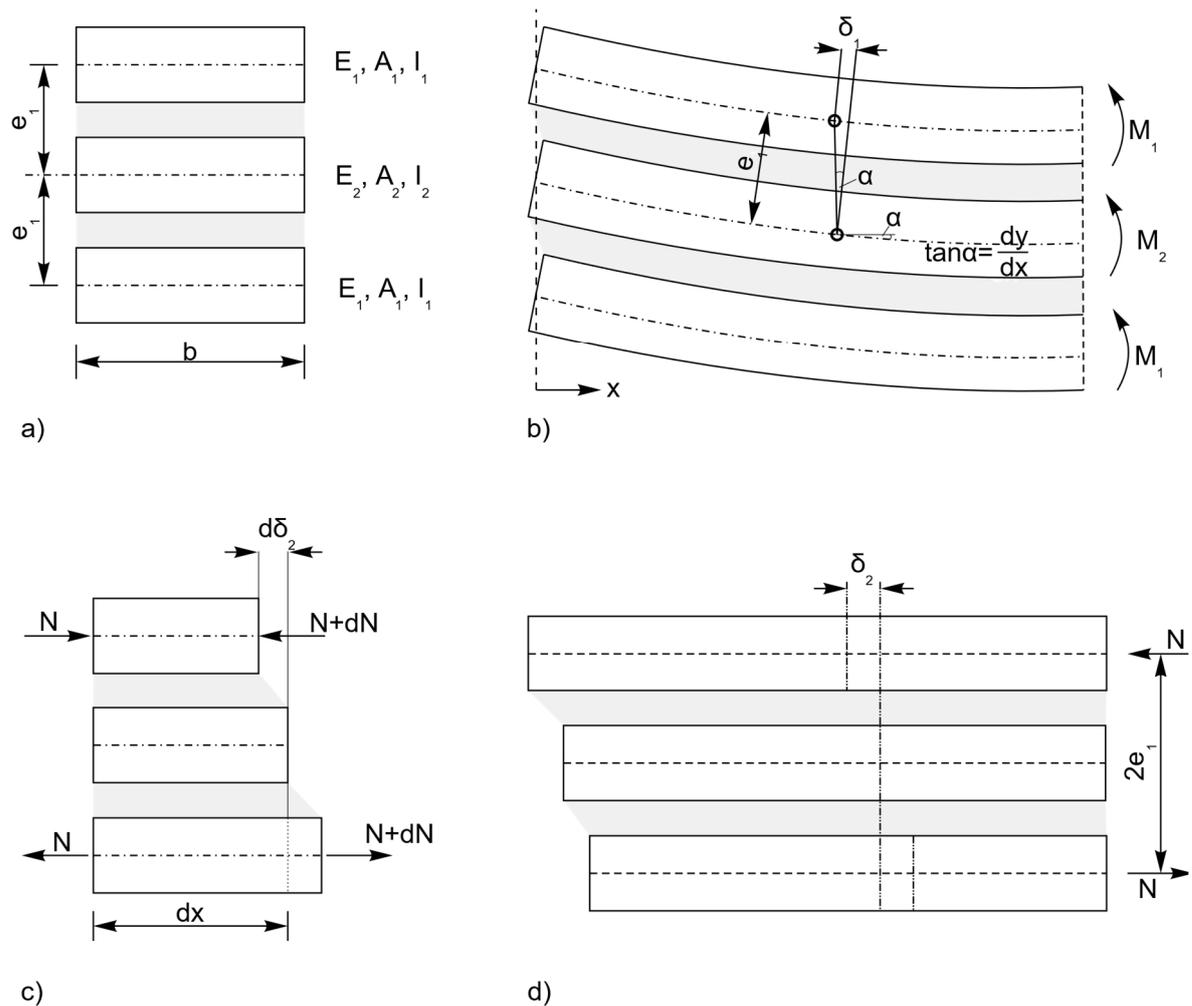


Bild 2.18: Geometrische Zusammenhänge am fünfflagigen, nachgiebig verbundenen Querschnitt nach [74, S. 16]

Die Gleichungen (2-2) und (2-3) geben das in [74] entwickelte Differentialgleichungssystem wieder, bei der die Verformung des Systems w mit der Verschiebung zwischen den einzelnen Querschnittsteilen δ gekoppelt ist. Auf eine Herleitung der Gleichungen wird verzichtet und auf [74] verwiesen.

$$\delta'' - \omega^2 \cdot \delta = e_1 \cdot w''' \quad (2-2)$$

$$w'' - \frac{\alpha^2}{e_1} \cdot \delta' = \frac{1}{E_1 I_V} \cdot M \quad (2-3)$$

Mit	δ	<i>Verschiebung zwischen den Schichten</i>
	w	<i>Verformung</i>
	ω	<i>Faktor</i>
	e_1	<i>Abstand der Schwerelinien</i>
	α	<i>Faktor</i>
	E_1	<i>E-Modul Baustoff I</i>
	I_V	<i>Trägheitsmoment des Gesamtquerschnitts bei starrem Verbund</i>
	M	<i>Biegemoment</i>

Die Faktoren ω und α in den Differentialgleichungen ergeben sich aus dem betrachteten Querschnitt und sind durch die Gleichungen (2-4) und (2-5) für den in Bild 2.18 dargestellten Aufbau wiedergegeben.

$$\omega^2 = \frac{C \cdot b}{E_1 A_1} \quad (2-4)$$

$$\alpha^2 = \frac{2 \cdot A_1 \cdot e_1^2}{I_V} \quad (2-5)$$

Mit	C	<i>Schubfedersteifigkeit</i>
	b	<i>Breite des betrachteten Querschnitts</i>
	A_1	<i>Fläche des außenliegenden Gurtes</i>

Unter Berücksichtigung der Belastung, des sich ergebenden Biegemoments sowie der Randbedingungen kann die Differentialgleichung gelöst werden, um beispielsweise einen auf Biegung beanspruchten Träger zu berechnen.

Basierend auf den genannten Annahmen und Grundlagen leiten sich der Abminderungsbeiwert γ sowie das gleichnamige γ -Verfahren ab. Mithilfe des Abminderungsbeiwertes γ werden die Steineranteile des mehrteiligen Querschnitts in Abhängigkeit der Verbundwirkung reduziert, um damit eine effektive Biegesteifigkeit zu berechnen. Hieraus entwickelte sich das γ -Verfahren, das auch normativ verankert ist, zur Berechnung von Bauteilen mit zusammengesetztem Querschnitt.

2.3.4.3 γ -Verfahren

Das in Eurocode DIN EN 1995-1-1 [147] Anhang B angegebene γ -Verfahren zur Berechnung von nachgiebig verbundenen Bauteilen geht, wie in Abschnitt 2.3.4.1 beschrieben, auf [74] zurück. [74] leitete das Verfahren an zwei- und dreiteiligen nachgiebig verbundenen Stäben her. Die Abnahme der Biegesteifigkeit aufgrund einer Verbundfuge berücksichtigt der Abminderungsfaktor γ . Der Abminderungsfaktor γ reduziert die Steineranteile, während die Eigenanteile der Biegesteifigkeit unverändert bleiben. Mit der Zeit wurde das Verfahren weiter verbessert und verallgemeinert, sodass es sich auch für Querschnitte mit einer größeren Schichtanzahl verwenden lässt, siehe [16, 126]. Wie in [125, S. 13] dargestellt, liefert das γ -Verfahren die exakte Lösung des Differentialgleichungssystems für folgende Randbedingungen:

- Statisch bestimmter Einfeldträger
- Sinusförmige Belastung
- Konstante Querschnitte (max. drei Teilquerschnitte)
- Gültigkeit der Bernoulli-Hypothese in den Teilquerschnitten
- Linear-elastisches Werkstoffverhalten
- Kontinuierlicher, konstanter Verbund
- Vernachlässigung der Schubverformung der Teilquerschnitte

Mit dem γ -Verfahren lassen sich auch Bauteile mit zusammengesetztem Querschnitt berechnen, bei denen die einzelnen Schichten schubstarr miteinander verbunden sind, es jedoch schubweiche Zwischenschichten gibt, wie bei Brettsper Holz. Für Brettsper Holz mit zwei bis drei Längslagen ergeben sich die γ -Werte nach [121, S. 34] zu:

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i}{l^2} \cdot \frac{d_j}{b \cdot G_{R,j}}} \quad (2-6)$$

Mit l *Spannweite*

d_j *Schichtdicke der betrachteten Zwischenschicht*

$G_{R,j}$ *Rollschubmodul der betrachteten Zwischenschicht*

Mit den γ -Werten der einzelnen Schichten lässt sich eine effektive Biegesteifigkeit des Stabes nach Gleichung (2-7) berechnen. [147, S. 122]

$$EI_{eff} = \sum_i (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot e_i^2) \quad (2-7)$$

Mit I_i *Flächenträgheitsmoment der Teilschicht i*

Mit der effektiven Biegesteifigkeit können dann die Verformungen und darauf aufbauend die Schnittgrößen und Spannungen in den jeweiligen Querschnitten bestimmt werden, siehe hierzu beispielsweise [121, 125]. Gleichung (2-6) gilt für Brettsper Holz mit bis zu drei Längslagen; für Aufbauten mit mehr als drei Längslagen ist das allgemeine γ -Verfahren, wie in [121, S. 181-183] und [126] beschrieben, anzuwenden.

2.3.4.4 Schubanalogie

Bei der von Kreuzinger entwickelten Schubanalogie, die in [105, 125] erörtert ist, handelt es sich ebenfalls um ein Verfahren zur Berechnung von Bauteilen mit nachgiebig zusammengesetztem Querschnitt bzw. mit schubweichen Zwischenschichten. Bei diesem, eher für eine Berechnung mit einem Rechner orientierten Verfahren, wird ein beliebiger Verbundquerschnitt in einen ideellen Rechenquerschnitt mit mehreren Ebenen überführt. Für die Berechnung sind den einzelnen ideellen Ebenen unterschiedliche Eigenschaften zugewiesen, während die Verformung der einzelnen Ebenen an diskreten Punkten gekoppelt ist. Nach der Berechnung am ideellen System folgt die Rücktransformation der Schnittgrößen sowie die Spannungsermittlung in den einzelnen Schichten. Bei überwiegend auf Biegung beanspruchten Bauteilen wird der Verbundquerschnitt in einen ideellen Rechenquerschnitt mit zwei Ebenen überführt. Ebene A fasst die Biegesteifigkeiten zusammen, die aus den Eigenanteilen der einzelnen Schichten B_A resultieren, siehe Gleichung (2-8). Ebene B beinhaltet die Steineranteile der Biegesteifigkeit B_B , Gleichung (2-9), sowie die sich ergebende Ersatzschubsteifigkeit S , Gleichung (2-10). Bei der Ermittlung der Ersatzschubsteifigkeit können der nachgiebige Verbund von Verbindungsmitteln sowie schubweichen Zwischenschichten berücksichtigt werden. Bei vorwiegend auf Normalkraft beanspruchten Bauteilen empfehlen [105, S. 53-56, 125, S. 20] ein Dreiebenenmodell. Zusätzlich zu den zwei Ebenen des überwiegend auf Biegung beanspruchten Bauteils wird eine dritte Ebene eingeführt. Diese fasst die Dehnsteifigkeiten D der einzelnen Schichten zusammen, Gleichung (2-11).

$$B_A = \sum_i E_i \cdot I_i = \sum_i \frac{E_i \cdot d_i^3}{12} \quad (2-8)$$

$$B_B = \sum_i E_i \cdot A_i \cdot z_{s,i}^2 = \sum_i E_i \cdot d_i \cdot e_i^2 \quad (2-9)$$

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{a^2} \left\{ \sum_1^{n-1} \frac{1}{k_i} + \frac{d_1}{2 \cdot G_1} + \sum_2^{n-1} \frac{d_i}{G_i} + \frac{d_n}{2 \cdot G_n} \right\} \quad (2-10)$$

$$D = \sum_i E_i \cdot d_i \quad (2-11)$$

Mit	G	<i>Schubmodul</i>
	a	<i>Innere Hebelarm der Außenschichten in der betrachteten Richtung</i>
	d_i	<i>Schichtdicke der Schicht i</i>
	k_i	<i>Verschiebungsmodul eines Verbindungsmittels</i>

Nach [105, S. 53-56] ist die Anwendung des Dreiebenenmodells zur Berechnung von überwiegend auf Normalkraft beanspruchten Bauteilen jedoch mit Schwierigkeiten behaftet: So beeinflussen die Anzahl der verwendeten Knoten zum Koppeln der Verformungen und die Steifigkeitsverhältnisse der einzelnen ideellen Rechenquerschnitte das Ergebnis maßgeblich. Neben der Berechnung mit

dem Dreiebenenmodell ist es möglich ausgehend von der nach der Schubanalogie bestimmten Ersatzschubsteifigkeit, siehe [125, S. 104-105], eine effektive Biegesteifigkeit zu bestimmen, Gleichung (2-12).

$$EI_{eff} = B_A + B_{B,eff} = B_A + B_B \cdot \frac{1}{1 + \frac{B_B \cdot \pi^2}{S \cdot l_{eff}^2}} \quad (2-12)$$

Mit $B_{B,eff}$ *Effektiven Steineranteile*

l_{eff} *Knicklänge einer Pendelstütze*

Wie [125, S. 20] beschreibt, kann mit der Schubanalogie das Tragverhalten beliebiger Querschnittsaufbauten betrachtet werden; im Gegensatz zum γ -Verfahren ist sie nicht auf maximal dreischichtige Aufbauten begrenzt. Zudem liefert die Schubanalogie in Abhängigkeit des Querschnittsaufbaus sowie der Verteilung der Fugensteifigkeit die theoretisch exakte Lösung bzw. eine sehr gute Näherung.

Aufbauend auf der Bestimmung der Schnittgrößen erfolgt die Spannungsermittlung in den jeweiligen Schichten, siehe beispielsweise [125]. Die aus einem Biegemoment resultierenden Spannungen ergeben sich unter Berücksichtigung des nachgiebigen Verbundes gemäß den Gleichungen (2-13) und (2-14). Unterschieden wird dabei in einen Biegeanteil, der aus dem Eigenbiegemoment und einem Normalspannungsanteil, der aus den Steineranteilen resultiert.

$$\sigma_{m,M} = M_A \cdot \frac{E_i}{B_A} \cdot \frac{d_i}{2} = M \cdot \frac{B_A}{EI_{eff}} \cdot \frac{E_i}{B_A} \cdot \frac{d_i}{2} \quad (2-13)$$

$$\sigma_{c,M} = M_B \cdot \frac{E_i}{B_B} \cdot z_i = M \cdot \frac{B_{B,eff}}{EI_{eff}} \cdot \frac{E_i}{B_B} \cdot e_i \quad (2-14)$$

Mit $\sigma_{m,M}$ *Biegespannung die aus einem Biegemoment resultiert*

$\sigma_{c,M}$ *Normalspannung die aus einem Biegemoment resultiert*

M *Biegemoment*

M_A *Biegemoment in Ebene A*

M_B *Biegemoment in Ebene B*

Nach der schubstarrn Theorie ergeben sich die aus dem Biegemoment resultierenden Spannungen nach [125, S. 100] zu:

$$\sigma_{m,M} = M \cdot \frac{E_i}{B} \cdot \frac{d_i}{2} \quad (2-15)$$

$$\sigma_{c,M} = M \cdot \frac{E_i}{B} \cdot e_i \quad (2-16)$$

Mit B *Biegesteifigkeit (Schubanalogienomenklatur), $B = B_A + B_B$*

Die aus einer Normalkraft stammenden Spannung ergibt sich unabhängig davon, ob nach der schubstarrn oder der schubnachgiebigen Theorie zu rechnen ist nach Gleichung (2-17).

$$\sigma_{c,N} = N \cdot \frac{E_i}{D} \quad (2-17)$$

Mit $\sigma_{c,N}$ *Normalspannung die aus einer Normalkraft resultiert*

N *Normalkraft*

2.4 Klebeverbindungen

2.4.1 Allgemeines

Bei [43, S. 3] ist eine Klebeverbindung die Verbindung von Füge­teilen mit Klebstoff, deren schichtweisen Aufbau Bild 2.19 zeigt. Klebstoff ist gemäß DIN EN 923 [152] „ein nichtmetallischer Stoff, der Werkstoffe durch Oberflächenhaftung (Adhäsion) so verbinden kann, dass die Verbindung eine ausreichende innere Festigkeit (Kohäsion) besitzt“.

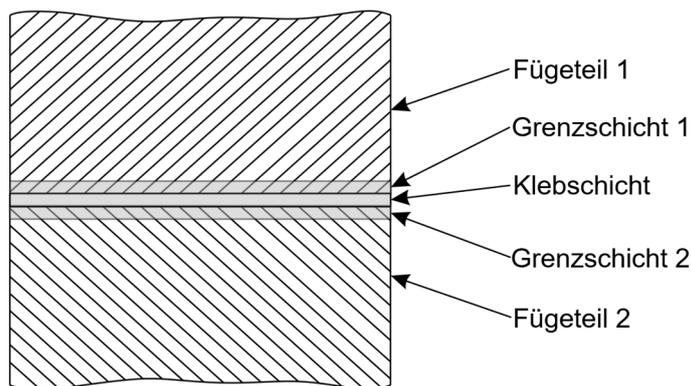


Bild 2.19: Aufbau einer Klebeverbindung nach [43, S. 315]

Relevant für die Festigkeit einer Klebeverbindung ist die Festigkeit der einzelnen Schichten, für die Gesamtfestigkeit ist das schwächste Glied maßgebend. Aufbauend auf der eingeführten Klebstoffdefinition sind zwei Arten von Bindungskräften für eine Klebeverbindung maßgebend – Kohäsionskräfte und Adhäsionskräfte.

Bindungskräfte resultieren aus unterschiedlichen Arten von chemischen oder physikalischen Bindungen. Die relevante chemische Bindung für Klebeverbindungen ist die kovalente Bindung. Hierbei teilen sich am Molekülbau beteiligte Atome die auf den außenliegenden Schalen befindlichen Elektronen, um Edelgaskonfiguration und damit ein möglichst geringes Energieniveau zu erhalten. Die Bindungsenergie der kovalenten Bindung beträgt zwischen 60 – 700 kJ/mol und die Reichweite der Bindungskräfte liegt im Bereich von 0,1 – 0,2 nm. Als physikalische bzw. zwischenmolekulare Bindungskräfte, welche durch elektrostatische Anziehungs- und Abstoßungskräfte hervorgerufen werden, sind die van-der-Waals-Kräfte maßgebend, die auf den drei Anteilen, Dipol-, Induktions- und Dispersionskräften beruhen, und die Wasserstoffbrückenbindungen. Dauerhafte Unterschiede der Elektronegativität der an der Molekülbildung beteiligten Atome führen zu einer Ladungsverschiebung innerhalb des Moleküls und damit zu einer Polarisierung. Darauf aufbauend können zwischen dauerhaft polarisierten Molekülen Dipolkräften auftreten. Bei unpolaren Molekülen verursacht ein polares Molekül eine Ladungsverschiebung und induziert einen Dipol. Dadurch wird das unpolare Molekül polar, wodurch sich Dipolkräfte ausbilden können, hier als Induktionskräfte bezeichnet. Dispersionskräfte beruhen ebenfalls auf Dipolkräften. Diese kommen aufgrund kurzfristiger Ladungsverschiebungen vor, welche durch die Bewegung der Elektronen selbst entstehen. Wasserstoffbrückenbindungen treten auf, wenn sich ein partiell positiv geladenes Wasserstoffatom eines Moleküls und ein freies Elektronenpaar am elektronegativen Atom des Nachbarmoleküls gegenseitig anziehen. Die Bindungsenergie bei Wasserstoffbrücken beruht im Wesentlichen auf elektrostatischem Charakter, zudem sind kovalente Bindungsanteile enthalten. Wasserstoffbrückenbindungen stellen daher eine besondere Art der Bindung dar. Generell sind die Bindungsenergien der physikalischen Bindungen geringer als die der chemischen Bindung. Tabelle 2.4 fasst die erzielbaren Bindungsenergien sowie die Reichweite der Bindungskräfte zusammen. [43, S. 316-322], [129, S. 20-24]

Tabelle 2.4 Bindungsarten mit zugehöriger Bindungsenergie und der Reichweite der Bindungskräfte nach [43, S. 316]

Bindungsart	Bindungsenergie [kJ/mol]	Reichweite der Bindungskräfte [nm]
Kovalente Bindung	60 – 700	0,1 – 0,2
Dipolkräfte	50 - 60	0,3 – 0,5
Induktionskräfte	2 - 10	0,3 – 0,5
Dispersionskräfte	5 -10	0,3 – 0,5
Wasserstoffbrückenbindung	< 50	0,3 – 0,5

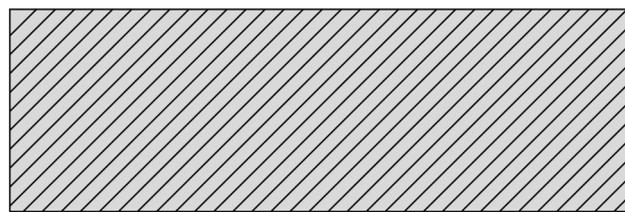
Nach [6, S. 69] und [43, S. 333] sind für die sich einstellenden Kohäsionskräfte die chemischen und die physikalischen Bindungen innerhalb eines Stoffes maßgebend.

Anders verhält es sich bei der Adhäsion. Nach [6, S. 69] kann Adhäsion durch physikalische oder chemische Bindungen bedingt sein. [43, S. 322] sieht die Ursprünge der Adhäsionsvorgänge in der Sorption, insbesondere in der Adsorption, die jedoch nicht mit der Adhäsion zu verwechseln ist. Adsorption ist die Anreicherung von Stoffen an den Grenzflächen fester oder flüssiger Körper als

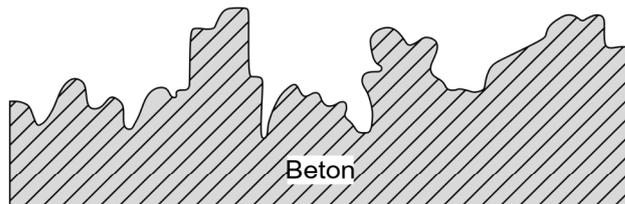
Gesamtheit vieler molekularer Einzelprozesse. Als Adhäsion bezeichnet [43, S. 322] das Haften eines ganzen Körpers an der Oberfläche eines anderen Körpers.

Es existieren viele experimentelle und theoretische Arbeiten zur Haftung von Klebstoffen an Fügeiteiloberflächen, jedoch gibt es keine universell anwendbare Adhäsionstheorie. Dies ist aufgrund der vielen Einflüsse auch unmöglich. [43, S. 324] Generell lassen sich die Mechanismen der Adhäsion in zwei Hauptgruppen unterteilen – die mechanische Adhäsion und die spezifische Adhäsion.[43, 96, 129]

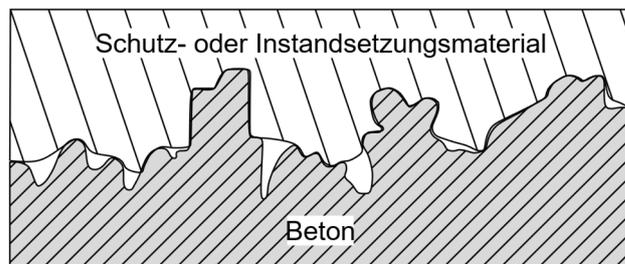
Bei der mechanischen Adhäsion handelt es sich um eine formschlüssige Verankerung. Diese erfolgt durch Eindringen des flüssigen Klebstoffs in Poren, Kapillaren sowie Hinterschneidungen der Fügeiteiloberfläche und anschließendem Aushärten. Ohne spezifische Adhäsion ist die übertragbare Kraft maximal so groß wie diejenige durch Formschluss mit unterschiedlichen Oberflächen. Als unterschiedliche Oberflächen sind die geometrische, die wahre und die wirksame Oberfläche zu nennen. Die geometrische Oberfläche ergibt sich aus den geometrischen Abmessungen der geklebten Fläche. Bei der wahren Oberfläche wird zusätzlich die durch die Rauheit bedingte Oberflächenvergrößerung berücksichtigt. Die wirksame Oberfläche berücksichtigt nur den Anteil der wahren Oberfläche, der durch den Klebstoff benetzt wird. Bild 2.20 stellt die unterschiedlichen Oberflächen eines Fügeiteils grafisch dar. Für [43, S. 736] ist bei Fügeiteilen mit poröser Oberfläche das Vorhandensein der mechanischen Adhäsion unbestritten.



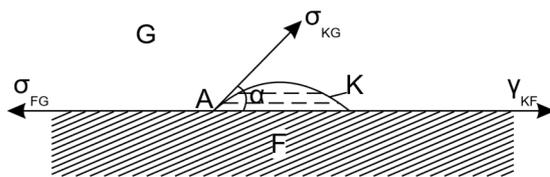
geometrische Oberfläche



wahre Oberfläche

wirksame Oberfläche als Summe der Kontaktfläche
zwischen Adherens und Adhäsiv**Bild 2.20:** Darstellung (schematisch) von geometrischer, wahrer und wirksamer Oberfläche nach [90, S. 48]

Der spezifischen Adhäsion werden thermodynamische Mechanismen, molekularphysikalische Mechanismen und chemische Bindungen zugeschrieben. Als molekularphysikalische Mechanismen sind die entstehenden, bereits aufgeführten physikalischen Bindungen zu nennen. Zu den chemischen Bindungen zählen die kovalenten Bindungen, die sich zwischen den Klebstoff- und Oberflächenatomen des Fügeteils einstellen. Diese Bindungsart führt zu Bindungszuständen, die der chemischen Bindung in Molekülen entsprechen. Bei den thermodynamischen Mechanismen ist insbesondere die Benetzung hervorzuheben. Damit die chemischen und physikalischen Bindungskräfte wirken, müssen die zu verbindenden Oberflächen auf den dementsprechend geringen Abstand zueinander gebracht werden. [43, S. 336] Für die Benetzung einer Oberfläche sind die Oberflächenspannungen bzw. die Grenzflächenspannung der beteiligten Stoffe entscheidende Parameter. Bild 2.21 zeigt einen aufgetropften Flüssigkeitstropfen auf einer Oberfläche.



- K = Klebstoff (flüssig)
- F = Füge teil
- G = Gasatmosphäre der Umgebung
- α = Benetzungswinkel
- σ = Oberflächenspannung des Füge teils
- σ_{FG} = Oberflächenspannung des flüssigen Klebstoffes
- γ_{KF} = Grenzflächenspannung zwischen Füge teiloberfläche und dem flüssigen Klebstoff

Bild 2.21: Oberflächen- und Grenzflächenspannung bei Benetzungsvorgängen nach [43, S. 337]

In dem Dreiphasen-Gemisch aus Gas (Luft), flüssigem Klebstoff und Füge teil stellt sich in Punkt A ein Gleichgewicht der Kräfte ein. Am Gleichgewicht der Kräfte beteiligt sind die Oberflächenspannung des Füge teils, welche bestrebt ist, den Flüssigkeitstropfen auszubreiten, und die Grenzflächenspannung zwischen dem flüssigen Klebstoff und der Füge teiloberfläche, die bestrebt ist, das Ausbreiten des Klebstoffs zu verhindern. Die sich einstellende Oberflächenspannung des flüssigen Klebstoffs verläuft tangential zur Oberfläche und der sich einstellende Benetzungswinkel ist ein Maß für die Benetzbarkeit der Oberfläche. Bild 2.22 gibt das Benetzungsverhalten in Abhängigkeit des sich einstellenden Benetzungswinkel an. Wird der Flüssigkeitstropfen komplett über die Oberfläche verteilt, handelt es sich um die vollkommene Benetzung der Oberfläche, auch Spreitung bezeichnet. Das Gegenteil wird bei einem Benetzungswinkel von 180° erreicht, hier kann die Oberfläche nicht benetzt werden. Bei Benetzungswinkeln kleiner 90° liegen gute Benetzungseigenschaften vor, das Optimum ist erreicht, wenn der Benetzungswinkel kleiner 30° ist. Ist der Benetzungswinkel größer oder gleich 90° , liegt eine unvollständige Benetzung vor.

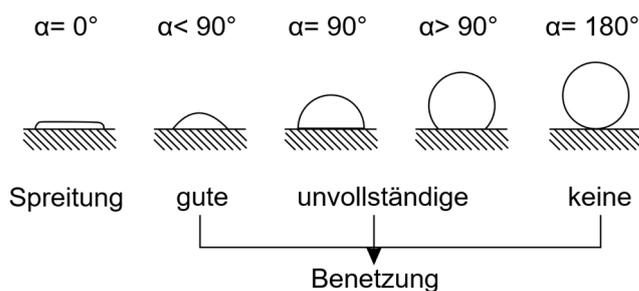


Bild 2.22: Benetzbarkeit von Oberflächen nach [43, S. 342]

Die Benetzung einer Oberfläche ist abhängig von vielen Faktoren wie der Temperatur, der Oberfläche, den in den Klebstoffen vorhandenen Füllmitteln oder möglichen vorhandenen Benetzungshilfsmitteln. Für die Ausbildung der in der Grenzschicht erforderlichen Haftungskräfte ist eine optimale Benetzung erforderlich, umgekehrt besteht jedoch kein funktionsmäßiger Zusammenhang zwischen der Benetzbarkeit und der Grenzschichtfestigkeit. Daher haben sich für die jeweiligen Werkstoffe Versuche etabliert, um die Festigkeit von geklebten Verbindungen zu untersuchen.

Unabhängig von den verklebten Fügeteilen und des eingesetzten Klebstoffs sind die Versagensarten von Klebeverbindungen identisch. Sie sind in DIN EN ISO 10365 [153] normativ festgelegt und teilweise in Bild 2.23 aufgeführt.

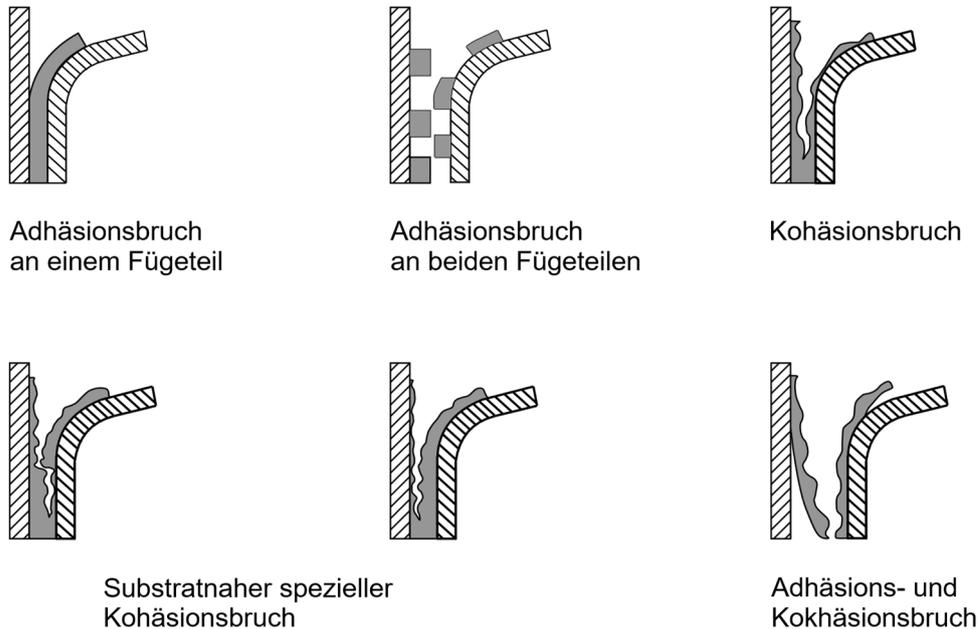


Bild 2.23: Bruchflächen von Klebeverbindungen nachempfunden aus [43, S. 377] basierend auf DIN EN ISO 10365 [153]

Demnach sind als Versagensarten einer geklebten Verbindung folgende Brucharten möglich:

- Adhäsionsbruch an einem Fügeteil
- Adhäsionsbruch an beiden Fügeteilen
- Kohäsionsbruch
- Substratnaher spezieller Kohäsionsbruch
- Adhäsions- und Kohäsionsbruch
- Fügeteilversagen

2.4.2 Klebstoffe

2.4.2.1 Allgemeines

Grundlage für die Ausbildung von Klebstoffen sind Monomere mit mindestens einer funktionalen Gruppe, sodass sich die Monomere untereinander vernetzen und dadurch Polymere ausbilden. Wichtige funktionelle Gruppen sind die Hydroxylgruppe, die Aminogruppe, die Aldehydgruppe, die Isocyanatgruppe, die Säuregruppe und die Epoxydgruppe (siehe Bild 2.24).

Hydroxylgruppe	$\text{Rest}-\text{O}-\text{H}$
Aminogruppe	$\text{Rest}-\text{NH}_2$
Aldehydgruppe	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{Rest}-\text{C}-\text{H} \end{array}$
Isocyanatgruppe	$\text{Rest}-\text{N}=\text{C}=\text{O}$
Säuregruppe	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{Rest}-\text{C}-\text{O}-\text{H} \end{array}$
Epoxydgruppe	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{Rest}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \quad \backslash \quad / \\ \quad \quad \text{O} \end{array}$

Bild 2.24: Funktionale Gruppen zur Ausbildung von Klebstoffpolymeren nach [43, S. 9]

Zur Vernetzung der Monomere ist meist ein Partner erforderlich, dieser kann entweder hinzugefügt werden oder in der Luft bzw. im Füge teil vorhanden sein. Drei Reaktionsmechanismen zur Vernetzung der Monomere hin zu den Polymeren sind möglich: die Polymerisation, die Polyaddition und die Polykondensation. Bei der Polymerisation wird eine C=C-Doppelbindung in eine energieärmere Einfachbindung zur Bildung von Polymeren umgewandelt. Bei der Polyaddition liegt der Vernetzungsreaktion der Monomere, die Wanderung eines Wasserstoffatoms von einem Monomer hinzu einem anderen, zugrunde. Nach [43, S. 73] zählen zu den wichtigsten Polyadditionsklebstoffen die Epoxydharze sowie die Polyurethane. Bei der Polykondensation reagieren zwei Monomere unter Abspaltung eines einfachen Moleküls, z. B. Wasser, Säure oder Alkohol zu einem Polymer. Voraussetzung für die Polykondensationsreaktion sind Moleküle mit mindestens zwei funktionalen Gruppen. Zu den Polykondensationsklebstoffen zählen Phenol-Resorcin-Formaldehyd- und Melamin-Urea-Formaldehyd-Klebstoffe. [43, 129]

2.4.2.2 Epoxydharz (Epoxy)

Epoxydharze sind Zwei-Komponenten-Systeme, die aus einem Grundharz und einem Härter bestehen. Die in den Grundharzen vorkommende funktionale Gruppe ist die Epoxydgruppe. Es gibt verschiedene Arten von Epoxydgrundharzen, eine davon sind Epoxyde auf Basis von Bisphenol A. Diese Grundharze werden aus der Kondensation von Bisphenol A mit Epichlorhydrin hergestellt. Bild 2.25 zeigt ein Epoxydgrundharz auf Basis von Bisphenol A und Epichlorhydrin nach der Kondensation. [43, S. 74]

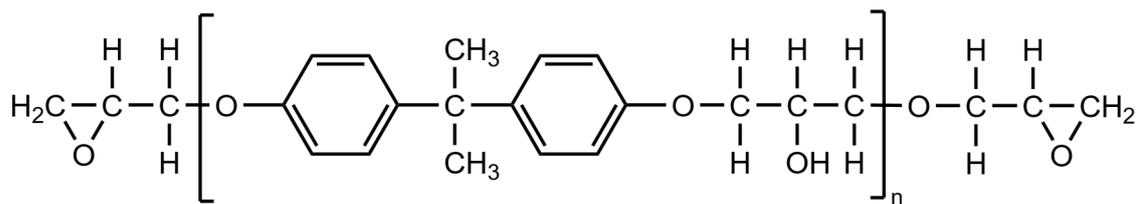


Bild 2.25: Struktur eines Epoxydgrundharzes nach [6, S. 504]

Die Vernetzung der Monomere zum Polymer erfolgt mit den an den Enden des Moleküls enthaltenen sehr reaktiven Epoxydgruppen, die nur im nicht ausgehärteten Zustand vorliegen. Für die Vernetzungsreaktion der Monomere zum Polymer (Bild 2.26) ist die Zugabe von Molekülen notwendig, die ein bewegliches Wasserstoffatom besitzen. Hierzu zählen Amine, Carbonsäuren und hydroxylhaltige Harze. Bei der Vernetzungsreaktion wird der Epoxydtring geöffnet und es bildet sich eine Hydroxylgruppe aus. Dabei wandert das Wasserstoffatom von dem zweiten, an der Reaktion beteiligten Molekül an die Epoxydgruppe. Die Anlagerung des zweiten Moleküls an das erste Molekül erfolgt über die freiwerdende Bindungsmöglichkeit des Kohlenstoffatoms. [43, S.77-78]

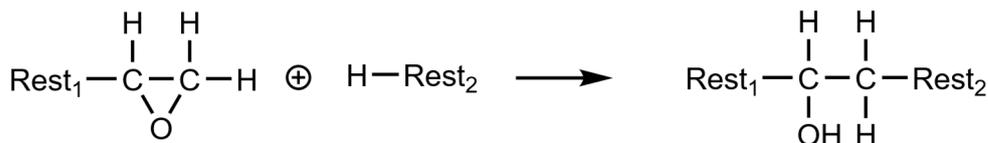


Bild 2.26: Schematische Vernetzungsreaktion von Epoxydharzen nach [43, S. 77]

Epoxydharzklebstoffe sind keine typischen Klebstoffe im Holzbau, finden jedoch ein breites Einsatzgebiet im Betonbau. Beispiele sind das Aufkleben von Verstärkungen, das nachträgliche Einkleben von Bewehrung oder der Spannbetonbrückenbau in Segmentklebebauweise [7, 92, 96]. Zwei-Komponenten-Epoxydharze besitzen nach [43, S. 84] hohe Kohäsionsfestigkeiten und ein sehr gutes Adhäsionsvermögen auf den meisten Fügeleitwerkstoffen. Sie zeichnen sich nach [129, S. 185] auch durch ihr hohes Fugenfüllvermögen, ihre gute Elastizität sowie ihre Beständigkeit aus. Klebeverbindungen mit kalthärtenden Epoxydharzklebstoffen können sehr spannungsarm und ohne wesentliches Schwinden hergestellt werden. Die Herstellung der Klebeverbindung kann ohne wesentlichen Pressdruck erfolgen.

2.4.2.3 Polyurethan (PU)

Polyurethanklebstoffe finden als Ein- oder Zwei-Komponenten-Systeme Anwendung. Unabhängig davon sind Polyisocyanate und Polyole Ausgangsstoffe für beide Systeme. Die polare Urethangruppe ist das typische Erkennungszeichen und ermöglicht die Adhäsion auf verschiedenen Werkstoffen. [129, S. 176]

Für Ein-Komponenten-PU-Systeme werden Polyole mit einem stöchiometrischen Überschuss von Di- oder Polyisocyanat umgesetzt und somit Prepolymere hergestellt. Hierbei sind die einzelnen Monomere mittels Urethanbindung zu Prepolymeren verbunden, welche noch über end- und seitenständige reaktionsfreudige Isocyanatgruppen verfügen. Diese reagieren mit Feuchtigkeit, wodurch der Klebstoff dann aushärtet. Das Reaktionsschema der feuchtigkeitsvernetzenden

Systeme zeigt Bild 2.27. Eine Isocyanatgruppe reagiert mit Wasser zu substituierter Carbaminsäure. Diese zerfällt und es bilden sich Amine und Kohlendioxid. Das gebildete Amin ist wiederum in der Lage eine Bindung mit dem Isocyanat einzugehen, wodurch sich die Prepolymere mittels Harnstoffbindung zu den finalen Polymeren vernetzen. Die zur Ausbildung der ausgehärteten Klebeschicht erforderliche Feuchtigkeit muss in einem der beiden Fügeiteile vorhanden sein. Problematisch kann die Entstehung von Kohlendioxid beim Zerfall der Carbaminsäure sein, da dadurch der Klebstoff aufschäumen und es zu Blasenbildung kommen kann. [43, S. 96-97]

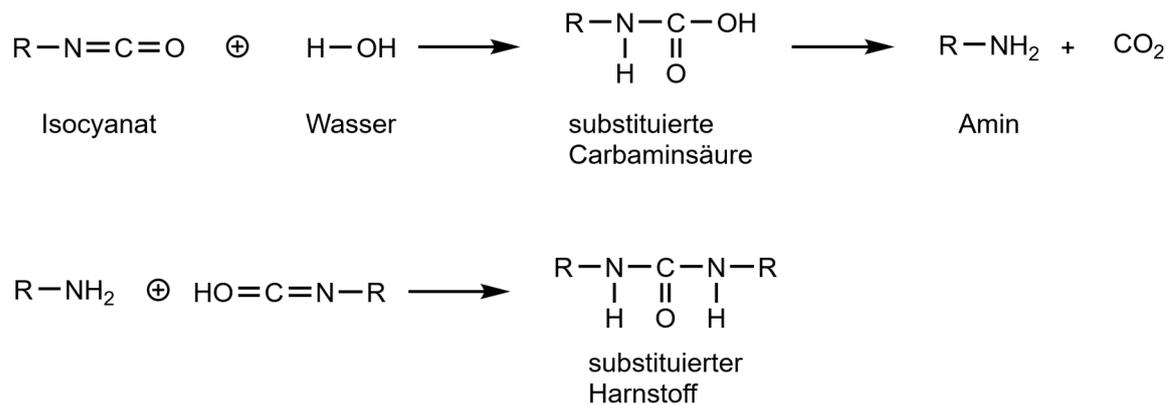


Bild 2.27: Schematische Vernetzungsreaktion von Ein-Komponenten-PU nach [43, S. 93]

Bei Zwei-Komponenten-PU-Klebstoffen werden Polyisocyanat und Polyol in stöchiometrischem Verhältnis gemischt. Bei Monomeren mit zwei funktionalen Gruppen resultieren primär lineare Polymere. Bild 2.28 zeigt schematisch dieses Reaktionsschema. Hochvernetzte Klebeschichten bilden sich bei tri- oder mehrfunktionellen Monomeren aus. Durch einen Überschuss an Isocyanat im Mischungsverhältnis kommt es zur Ausbildung chemischer Bindungen mit den Fügeiteiloberflächen, was zu einer großen Adhäsionsfestigkeit führt. [43, S. 97-98]

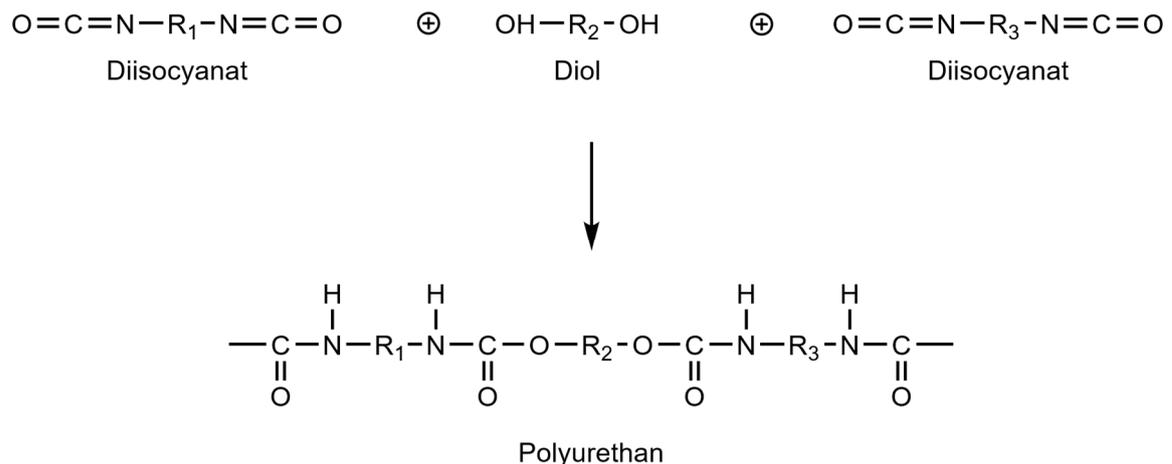


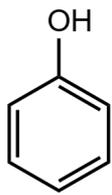
Bild 2.28: Schematische Vernetzungsreaktion von Zwei-Komponenten-PU nach [43, S. 93]

Die Einsatzgebiete von PU-Klebstoffen sind vielfältig. So sind nach [129, S. 183] Ein-Komponenten-PU-Klebstoffe für das Kleben von Metallen und Kunststoffen mit Holz, Schaumstoffen, Zement, Gipsplatten und Mineralfaserplatten anwendbar. Zudem werden einkomponentige, feuchtigkeitsvernetzende PU-Klebstoffe seit vielen Jahren erfolgreich im

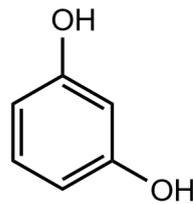
Holzleimbau verwendet. Mit Zwei-Komponenten-PU-Klebstoffen werden Sandwich-Verbundkonstruktionen für den Container-, Wohnwagen- und Fertighausbau hergestellt. Daneben kommen diese Systeme beim Einkleben von Gewindestangen in Holzbauteilen zum Einsatz. Eine weitere Anwendung im Baubereich sind Mauerwerksfertigteilewände, bei denen anstelle eines klassischen Dünnbettmörtels ein Zwei-Komponenten-PU-Klebstoff Anwendung findet, um die einzelnen Mauerwerkssteine zu verbinden [13].

2.4.2.4 Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF)

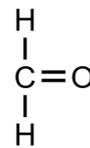
Die Ausgangsmoleküle von PRF-Klebstoffen sind Phenol, Resorcin sowie Formaldehyd (Bild 2.29). Die Kohlenstoff- und Wasserstoffatome am Benzolring sind nicht dargestellt.



a) Phenol



b) Resorcin



c) Formaldehyd

Bild 2.29: Ausgangsmoleküle von PRF-Klebstoffen [129]

Zur Herstellung von Phenol-Formaldehyd-Klebstoffen wird Phenol mit Formaldehyd entweder in saurem Milieu oder im alkalischen Medium kondensiert. Bei der Kondensation im alkalischen Medium entstehen Resole, die nach [43, S. 110] für die Verwendung als Klebstoff ausschließlich Verwendung finden. Zusätzlich zu den Phenolen können auch Phenolderivate, wie das Resorcin, in die Kondensationsreaktion eingebunden werden. Bild 2.30 zeigt schematisch die Reaktion zwischen Phenol und Formaldehyd. Zuerst dockt der Formaldehyd an das Phenol an, es entsteht Methylolphenol. Die Doppelbindung zwischen Sauerstoff und Kohlenstoff des Formaldehyds öffnet sich und das freie Wasserstoffatom des Phenols bindet sich an den Sauerstoff. [43]

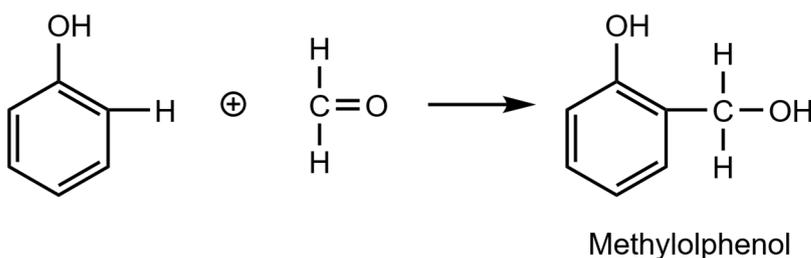


Bild 2.30: Reaktion zwischen Phenol und Formaldehyd [43, S. 109]

Die fortlaufende Verknüpfung der Phenolkerne erfolgt unter Abspaltung von Wasser. Entweder bilden sich Methylenbrücken, wenn ein weiteres Phenol-Molekül mit dem Methylolphenol reagiert (Bild 2.31 obere Zeile), oder es bilden sich Dimethyletherbrücken, wenn zwei Methylolphenol-Moleküle miteinander reagieren (Bild 2.31 untere Zeile). Um die Vernetzungsreaktionen zu starten, ist eine erhöhte Temperatur oder bei der Kalthärtung ein saurer Katalysator erforderlich. Je nachdem wie viele OH- und CH₂OH-Gruppen in welchen Positionen am Benzolring angeordnet sind, kommt es zu vielfältigen Verknüpfungsreaktionen, bei denen hochvernetzte Polymere entstehen. [43]

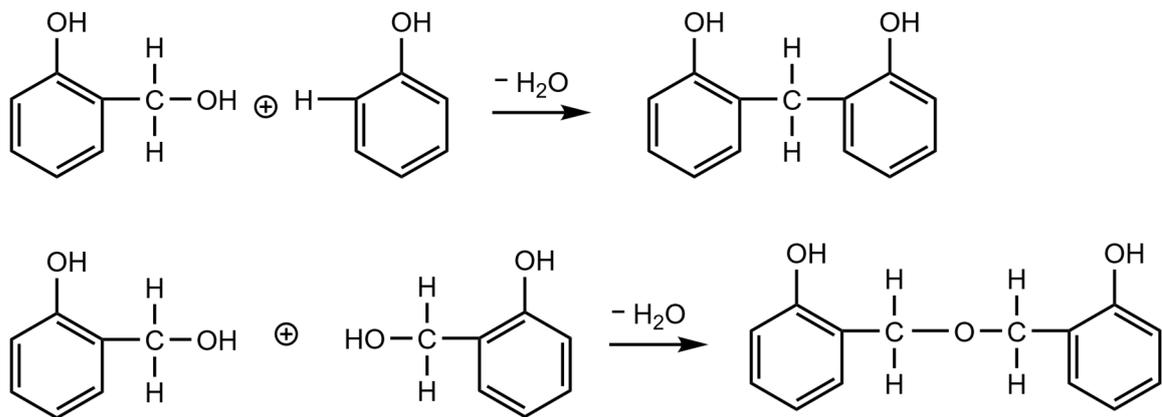


Bild 2.31: Reaktion zwischen Phenol und Formaldehyd [43, S. 109-110]

PRF-Klebstoffe sind an ihrer rotbraunen Farbe zu erkennen und zeichnen sich durch ihre sehr gute Wasser- und Witterungsbeständigkeit aus [43, S. 111]. PRF-Klebstoffe werden im tragenden Holzleimbau zur Herstellung von Brettschichtholz, Brettsperrholz oder zum nachträglichen Aufkleben von Verstärkungen eingesetzt.

2.4.2.5 Melamin-Urea-Formaldehyd (MUF)

MUF-Klebstoffe sind ähnlich aufgebaut wie Harnstoff-Formaldehydklebstoffe; zusätzlich zum Harnstoff enthalten sie noch Melamin. Die einzelnen Moleküle zur Herstellung führt Bild 2.32 auf. MUF-Klebstoffe besitzen eine bessere Feuchte- und Nassbeständigkeit als reine UF-Klebstoffe, sind jedoch durch das Melamin deutlich teurer. Daher wird versucht, den Melaminanteil auf ein Minimum zu reduzieren. [129, S. 151]

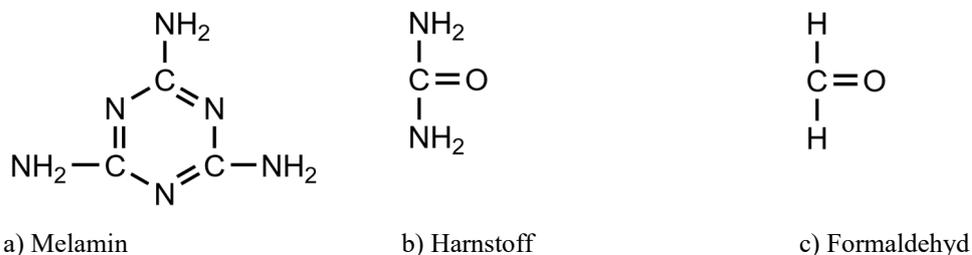


Bild 2.32: Ausgangsmoleküle von MUF-Klebstoffen nach [43, S. 112-113]

Ähnlich dem ersten Reaktionsschritt bei der Vernetzung des PRF-Klebstoffs reagiert der Harnstoff mit dem Formaldehyd zu Monomethylolharnstoff, wie Bild 2.33 zeigt. Die Doppelbindung zwischen Kohlenstoff und Sauerstoff beim Formaldehyd wird aufgebrochen; ein Wasserstoffatom des Harnstoffs bindet sich an den Sauerstoff des Formaldehyds und der Formaldehyd geht in Bindung mit dem Stickstoffatom des Harnstoffs.

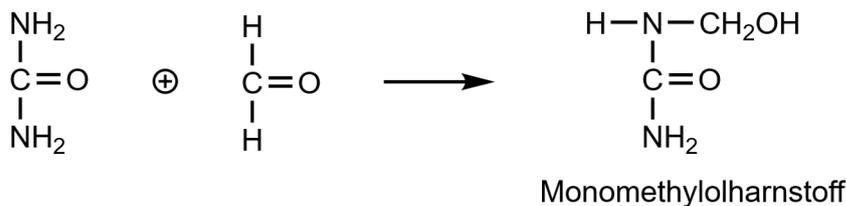
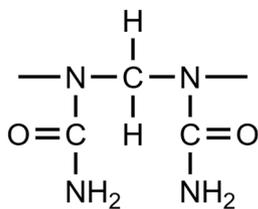
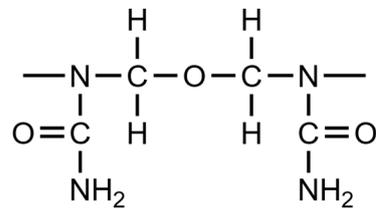


Bild 2.33: Reaktion zwischen Harnstoff und Formaldehyd nach [43, S. 112]

Bild 2.34 präsentiert die nach der Polykondensation entstehenden Verknüpfungen der Monomere an Monomethylolharnstoff durch Methylenbrücken und Dimethyletherbrücken nach der Abspaltung von Wasser. Die Polykondensation tritt bei einem niedrigen pH-Wert ein. Durch die komplexe Verknüpfung der Monomere mittels Methylenbrücken oder Dimethyletherbrücken bilden sich stark vernetzte Polymere aus. [43, S. 112-113]



a) Verknüpfung mit Methylenbrücke



b) Verknüpfung mit Dimethyletherbrücke

Bild 2.34: Verknüpfte Harnstoffmoleküle mittels Methylen- und Dimethyletherbrücke nach [43, S. 112-113]

MUF-Klebstoffe bilden farblose, lichtbeständige Klebefugen aus und sind sehr gute Holzklebstoffe. Daher werden sie in der Holzwerkstoffindustrie und für die Herstellung tragender Holzbauteile wie Brettschichtholz und Brettspertholz verwendet.

2.4.3 Klebeverbindungen im Holzbau

2.4.3.1 Einleitung

Geklebte Verbindungen sind seit der Antike bekannt, damals wurden Klebstoffe auf natürlicher Basis verwendet. Seit 1900 werden moderne Klebstoffe entwickelt und seit 1930 werden industriell hergestellte Klebstoffe genutzt, um Lagenholz zu verkleben. [129, S. 1]

Die moderne Klebstofftechnologie ist heute aus dem modernen Holzbau kaum mehr wegzudenken. Dadurch lassen sich einzelne Bauteile auch unabhängig von den maximalen Abmessungen eines einzelnen Baumstammes herstellen. Zu berücksichtigen sind beim Kleben die werkstoffspezifischen Eigenschaften und die Beanspruchungen, denen die Verklebung ausgesetzt ist. Insbesondere im Bauwesen ist dies wichtig, da die Klebeverbindungen auch nach Jahren der Beanspruchung tragfähig sein müssen. Die folgenden Abschnitte erörtern die werkstoffspezifischen Eigenschaften des Holzes und die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Prüfmethoden für Klebeverbindungen im Holzbau.

2.4.3.2 Kleben von Holz

Die wichtigen Eigenschaften von Holz für eine Verklebung sind nach [129, S. 35] die anatomische Struktur, der Gehalt an Holzinhaltstoffen, die Holzdichte und die Holzfeuchte. Je nach Ausprägung dieser Merkmale ist die Verklebbarkeit der Hölzer besser oder schlechter.

Bei der anatomischen Struktur sind folgende Aspekte zu beachten: das auf Dichteunterschieden basierende unterschiedliche Quell- und Schwindverhalten von Früh- und Spätholz, das unterschiedliche Verhalten von Splint- und Kernholz hinsichtlich der Benetzbarkeit und das Saugverhalten des Holzes. Des Weiteren können Äste sowie Zug- und Druckholz zu Singularitäten führen, welche die Klebbarkeit von Hölzern ebenfalls beeinflussen. [129, S. 38]

Wie in Abschnitt 2.1.5 beschrieben, beeinflusst die Dichte des Holzes die Festigkeiten, insbesondere die Scherfestigkeit. Mit steigender Dichte nimmt die Scherfestigkeit des Holzes zu und erreicht das Maximum bei etwa 800 kg/m^3 . So zeigten Untersuchungen, dass bei Scherversuchen 50 – 60 % Holzbruch erzielt werden, wenn die Adhäsionsfestigkeit des Klebstoffs der Eigenfestigkeit des Holzes entspricht. Übersteigt die Adhäsionsfestigkeit des Klebstoffs die Eigenfestigkeit des Holzes um 20 – 30 %, sind Holzbruchanteile von 80 – 100 % erzielbar. [129, S. 46-48 zitiert 93] Folglich kann die Qualität einer Klebeverbindung für Hölzer mit einer Dichte kleiner 800 kg/m^3 durch das Bestimmen des Holzbruchanteils nach einem Scherversuch erfolgen [129, S. 48].

Großen Einfluss hat das hygrische Verhalten von Holz – bei Langzeitbetrachtungen und unmittelbar beim Herstellen einer Klebeverbindung. Aufnahme und Abgabe von Wasser führen zum Quellen und Schwinden von Holz, vor allem in radialer und tangentialer Richtung. Diese Bewegungen sind von der Klebefuge über die gesamte Nutzungsdauer aufzunehmen, da es sonst zum Versagen kommt. Hier sind besonders Feuchteunterschiede von zwei miteinander zu verklebenden Lagen relevant. Unmittelbar beim Herstellen einer Klebeverbindung reduzieren zu niedrige oder zu hohe Feuchtigkeitsgehalte des Holzes die Klebefestigkeit von Beginn an. Zu trockenes Holz entzieht dem Klebstoff das Lösungsmittel zu schnell und beeinträchtigt dadurch die Benetzbarkeit des zweiten Fügeteils. Ist der Feuchtegehalt zu groß, kann das Lösungsmittel im Klebstoff nicht abgegeben werden, was in einer schaumigen, weniger festen Klebeverbindung resultiert. [129, S. 57-59]]

Da Holz ein anisotroper, faserig poröser Werkstoff ist, beeinflusst die Ausrichtung der Fasern zur Klebefuge und zur Richtung des Kraftangriffs die Klebefestigkeit. Die höchste Klebefestigkeit wird erzielt, wenn die Fasern parallel zur Klebefuge und zum Kraftangriff angeordnet sind. Aufbauend auf Untersuchungen zum Einfluss des Faserwinkels auf die Klebefestigkeit kommt [129, S. 48-49 zitiert 118] zu dem Schluss, dass die Adhäsionsfestigkeit des Klebstoffs eher auf physikalisch-chemischen Wechselwirkungen als auf mechanischer Adhäsion beruht. Dies steht zum Teil in Widerspruch zu [43, S. 729], der bei der Verklebung von Holz eher von mechanischer Adhäsion berichtet, jedoch auch darauf hinweist, dass physikalische Bindungen beobachtet wurden.

Die im Holz vorhandenen Inhaltsstoffe wie Harze und Fette können sich negativ auf eine Verklebung von Holz auswirken. Deshalb werden diese, ebenso wie Verunreinigungen und

Trennmittel, durch einen spanenden Abtrag, in der Regel Hobeln, entfernt. Beim Hobeln und beim Zuschnitt ist besonders auf die Passgenauigkeit zu achten. Sind die Oberflächen zu ungenau, führt dies entweder zu Stellen, die verdichtet sind, oder zu offenen Fugen. In beiden Fällen kann dadurch die Klebefestigkeit beeinträchtigt werden. Diese und andere Oberflächenbehandlungen haben das Ziel, die physikalisch-chemische Reaktionsfähigkeit der zu klebenden Oberfläche durch Vergrößern oder Aktivieren zu erhöhen. [129, S. 59-60]

Als Klebstoffe zur Herstellung tragender Holzbauprodukte kommen häufig MUF und PU zum Einsatz. Diese sind witterungsbeständig und bilden helle Klebefugen aus. Die zulässigen Klebfugendicken sind zwischen 0,1 mm und 0,3 mm. Vor allem bei nachträglichen Verstärkungen von Holzbauteilen werden auch PRF-Klebstoffe verwendet.

2.4.3.3 Scherversuche

Scherversuche sind im Holzbau normierte Versuche, um die Klebefestigkeit von geklebten Holzverbindungen nachzuweisen. Aufbau und Ablauf der Scherversuche in den Normen DIN EN 14080 [140] und DIN EN 16351 [143] jeweils Anhang D sind identisch. Einzuhaltende Grenzwerte, Prüfkörperabmessungen und Vorlagerungsbedingungen der Prüfkörper unterscheiden sich jedoch.

Bei den Scherversuchen werden zumeist rechteckige oder quadratische Prüfkörper mit Seitenlängen zwischen 40 mm und 50 mm nach DIN EN 14080 [140] in eine Prüfvorrichtung eingebaut und anschließend die Klebefugen unter monotoner Belastung bis zum Bruch belastet. Bild 2.35 zeigt den schematischen Prüfaufbau. Um eine gleichmäßige Belastung der Flächen sicherzustellen, ist die Prüfvorrichtung mit einer Kalotte versehen.

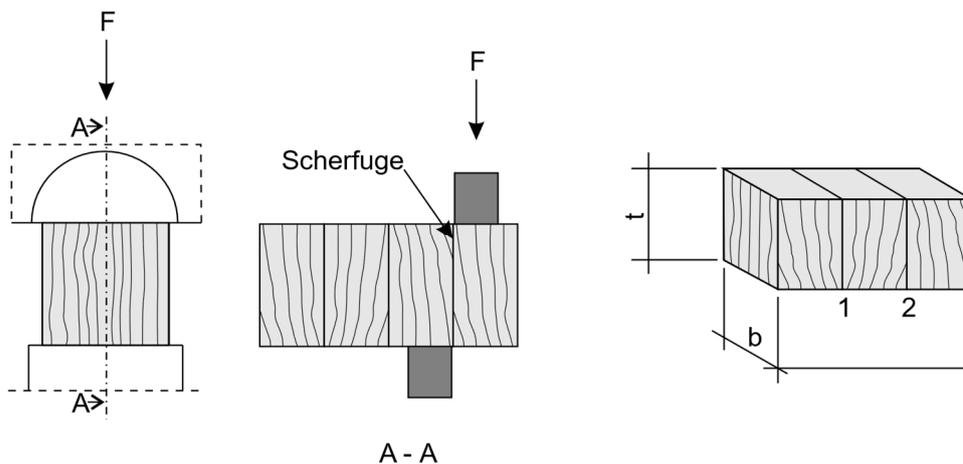


Bild 2.35: Schematischer Prüfaufbau von Scherversuchen nach DIN EN 14080 [140]

Vor der Prüfung sind die Prüfkörper im Normklima bei einer Temperatur von $20 \pm 2^\circ \text{C}$ und einer Luftfeuchte von $65 \pm 5\%$ bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte zu lagern. Die Maße der Scherflächen sind z. B. mit einem Messschieber auf 0,5 mm genau zu bestimmen. Beim Einbau der Prüfkörper ist darauf zu achten, dass der Abstand der Schervorrichtung und der Scherfläche an keiner Stelle größer als 1 mm ist. Während der Versuchsdurchführung muss die Genauigkeit der Messung der maximalen Belastung besser als $\pm 3\%$ sein. Nach der Versuchsdurchführung wird der

Faserbruchanteil visuell beurteilt und in Prozent auf die nächste durch 5 teilbare Zahl angegeben sowie die Scherfestigkeit nach Gleichung (2-18) bestimmt.

$$f_v = k_v \cdot \frac{F_v}{A} \quad (2-18)$$

- Mit
- F_v *Bruchlast*
 - A *Scherfläche*
 - k_v *Faktor, der die Scherfestigkeit der Prüfkörper modifiziert, bei denen die Dicke der Scherfläche in Faserrichtung kleiner als 50 mm ist.*
- $$k_v = 0,078 + 0,0044 \cdot t$$

Damit ein Versuch nach DIN EN 14080 [140] als bestanden gilt, sind die Anforderungen aus Tabelle 10 hinsichtlich der Scherfestigkeit und des prozentualen Faserbruchanteils zu erfüllen. Demnach muss die erzielte Mindestscherfestigkeit eines einzelnen Versuchs 6,0 N/mm² betragen, jedoch sind auch 4,0 N/mm² zulässig, wenn der Faserbruchanteil 100 % beträgt. Die expliziten Werte führt Tabelle 2.5 auf.

Tabelle 2.5 Mindestwerte des Faserbruchanteils, bezogen auf die Scherfestigkeit f_v aus DIN EN 14080 [140]

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

Für Brettsperrholz nach DIN EN 16351 [143] gilt ein Scherversuch als bestanden, wenn bei parallel verlaufendem Faserverlauf eine charakteristische Scherfestigkeit $f_{v,k}$ von mindestens 3,5 N/mm² ermittelt wird. Bei einer Scherfestigkeit f_v kleiner 2,0 N/mm² muss der Faserbruchanteil 100 % betragen. Zwischen rechtwinklig verklebten Lagen ist eine charakteristische Scherfestigkeit von 1,25 N/mm² ausreichend, dabei muss jede Klebefuge eine Scherfestigkeit f_v von mindestens 1,0 N/mm² aufweisen.

Unabhängig der Normen DIN EN 14080 [140] und DIN EN 16351 [143] ist als Faserbruch der „Bruch in oder zwischen den Holzfasern“ deklariert. Als Faserbruchanteil ist der „Anteil der Faserbruchfläche in Prozent, bezogen auf die Gesamtscher- oder -trennfläche“ definiert.

2.4.3.4 Delaminierungsversuche

Delaminierungsversuche dienen überwiegend dazu, die Dauerhaftigkeit von Klebeverbindungen in geklebten Holzbauprodukten zu untersuchen. Hierzu wird ein Feuchtigkeitsgefälle im Holz erzeugt, das zu Zugspannungen senkrecht zur Klebefuge führt. Bei einer unzureichenden Integrität der Klebefuge kommt es zur Trennung der einzelnen Schichten, der Delaminierung. Hierfür wird das Holz aufgefuechtet und anschließend in einem Ofen bei definierten Randbedingungen, meistens Temperatur, Luftgeschwindigkeit und relativer Luftfeuchte, getrocknet. Zum Auffeuchten des Holzes sind unterschiedliche Verfahren zulässig: Die Prüfkörper werden entweder in einem mit

Wasser gefüllten Druckgefäß bei Unter- und Überdruck, DIN EN 14080 [140] und DIN EN 16351 [143] jeweils Anhang D, oder in kochendem und anschließend kalten Wasser, DIN EN 301 [148] Anhang A, eine definierte Zeit gelagert. Direkt nach dem Trocknen werden die Bereiche an den Stirnflächen gekennzeichnet, die eine normgemäße Fugenöffnung aufweisen, und in Relation zur ursprünglichen Klebefugenlänge an den Stirnflächen gesetzt. Nach DIN EN 16351 [143] sind bei der Delaminierungsprüfung die Gesamtdelaminierung nach Formel (2-19) und die maximale Delaminierung nach Formel (2-20) zu berechnen.

$$Delam_{tot} = 100 \cdot \frac{l_{tot,delam}}{l_{tot,glueline}} \quad (2-19)$$

Mit $l_{tot,delam}$ Gesamtdelaminierungslänge

$l_{tot,glueline}$ Gesamtlänge aller Klebfugen eines Delaminierungsprüfkörpers

$$Delam_{max} = 100 \cdot \frac{l_{max,delam}}{l_{glueline}} \quad (2-20)$$

Mit $l_{max,delam}$ maximale Delaminierungslänge einer Klebefuge

$l_{glueline}$ Länge einer Klebfuge in einem Delaminierungsprüfkörper

Als zulässige Grenzwerte gibt DIN EN 16351 [143] für die maximale Delaminierungslänge 40 % der Gesamtlänge einer Klebefuge an; die Gesamtdelaminierungslänge aller Klebfugen darf 10 % nicht überschreiten.

2.4.4 Klebeverbindungen im Betonbau

2.4.4.1 Einleitung

Kleben im Betonbau findet bei Verstärkungsmaßnahmen Anwendung: Beispiele sind das Aufkleben von Stahllaschen auf den Beton, das Einkleben von Bewehrung und das Verkleben von Segmenten in Spannbetonsegmentbrückenbauweise. Untersucht wurde auch die Herstellung von strukturellen Verklebungen oder das Verkleben von statisch oder dynamisch beanspruchten Bauteilen, wie in [8, 76, 101] beschrieben. Nachfolgend werden zuerst die Besonderheiten beim Kleben von Beton erörtert und dann verschiedene Prüfungen von strukturellen Verklebungen von Beton vorgestellt.

2.4.4.2 Kleben von Beton und ultrahochfestem Beton

Normalfester Beton besitzt eine im Vergleich zu seiner Druckfestigkeit geringe Zug- und Schubfestigkeit. Zudem ist die Randzone eines Betonbauteils poröser und weniger fest als sein Kern, daher wird die Randzone häufig durch Sandstrahlen entfernt. Trotzdem tritt bei verklebten Oberflächen aus normalfestem Beton immer ein Kohäsionsversagen im Beton auf. [101, S. 682]

Ultrahochfester Beton weist im Vergleich zu normalfestem Beton eine deutlich höhere Zug- und Oberflächenhaftzugfestigkeit auf; auch ist die Randzone von wärmebehandeltem UHFB so fest und

homogen wie der Kern eines Bauteils. [101, S. 682-683] Trotzdem werden die Oberflächen von zu verklebenden Prüfkörpern aus UHFB zumeist behandelt. Nach [26, S. 191] ist Strahlen der Klebeflächen mit festem Strahlgut die optimale Vorbehandlungsart. Aus diesen Gründen eignet sich nach [94, S. 71] ultrahochfester Beton sehr gut zum Verkleben. Die Haftfestigkeit von Klebstoff auf Beton basiert [101, S. 683] zufolge auf vier Mechanismen:

- Der Mechanischen Adhäsion, siehe Abschnitt 2.4.1
- Der Autoadhäsion, einer mechanischen Adhäsion auf molekularer Ebene
- Physikalischen Bindungen aufgrund polarer Gruppen, siehe Abschnitt 2.4.1
- Chemischen Bindungen wegen der vielen im Beton vorkommenden reaktiven Endgruppen (silikatische OH-Gruppen), siehe Abschnitt 2.4.1.

Zur Herstellung von Betonverklebungen kamen überwiegend kalthärtende Zwei-Komponenten-Epoxydharzklebstoffe zum Einsatz. Derartige Klebstoffe untersuchten [7, 8, 76, 92, 101]. [76] entwickelte und untersuchte die Eignung des zementbasierten Klebstoffs Reactive Powder Concrete zur Verklebung von Bauteilen aus UHFB.

2.4.4.3 Versuchsaufbauten zur Prüfung von Betonverklebungen

In frühen Quellen finden sich verschiedene Versuchsaufbauten zur Prüfung von strukturellen Betonverklebungen: zweiseitige Druckscherversuche mit einer senkrecht zur Klebefuge angeordneten Normalkraft, einschnittige Druckscherversuche mit senkrechter Klebefuge, einschnittige Druckscherversuche mit geneigter Klebefuge, zentrische Zugversuche, Biegezugversuche, Spaltzugversuche und Torsionsversuche. Bild 2.36 zeigt exemplarisch drei Versuchsaufbauten davon.

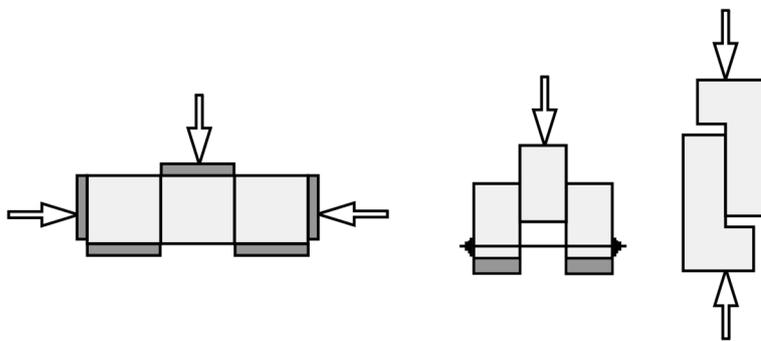


Bild 2.36: Versuchsaufbauten zur Prüfung von Betonverklebungen nach [92]

Darauf aufbauend entwickelte [92] weitere Versuchsaufbauten, um die Leistungsfähigkeit von Betonverklebungen zu prüfen, siehe Bild 2.37. Hierbei handelt es sich ausschließlich um einschnittige Klebeverbindungen die auf Zug, Schub und bei geneigten Klebeflächen auf Druck-Schub belastet wurden.

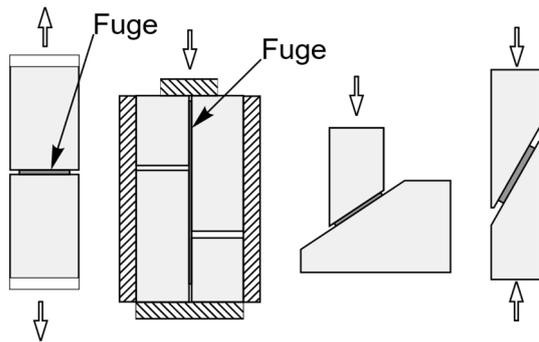


Bild 2.37: Versuchsaufbauten zur Prüfung von Betonverklebungen nach [92]

Aktuellere Untersuchungen zur Verklebung von UHFB orientieren sich häufig an diesen Versuchsaufbauten. So führte [101] Biegezug- und zentrische Zugversuche an verklebten Prismen als auch zentrische und ausmittige, zweischnittige Druckscherversuche an geklebten Versuchskörpern durch. [8] entwickelte einen Prüfkörper, der aus zwei stumpf miteinander verklebten Bohrkernen besteht und sich durch Torsion, Zug oder Druck beanspruchen lässt. Die Untersuchungen von [76] stützen sich auf Zug-Schub und Druck-Schubversuche mit geneigten Klebeflächen zwischen 0° und 60° , wie in Bild 2.37 links gezeigt. Zudem führte [76] Versuche an zweiachsig belasteten Schub-Druckkörpern durch.

Bei allen Versuchen kamen ausschließlich dicke Klebefugen zum Einsatz. So betrug bei [101, S. 684] die Klebefugendicke entweder 3 mm oder 6 mm, bei [8, S. 126] waren die Klebefugen der UHFB-Prüfkörper 1 mm oder 2 mm dick. [76, S. 15] verwendet 1 mm dicke Klebefugen. Er empfiehlt Klebschichtdicken zwischen 1 mm und 3 mm [76, S. 226].

2.5 Hyperspektrale Bildgebung

2.5.1 Grundlagen hyperspektraler Bildgebung

2.5.1.1 Elektromagnetisches Spektrum

Licht ist mit dem Auge sichtbare elektromagnetische Strahlung. Diese wird durch die Kenngrößen Wellenlänge, Frequenz und Wellenzahl beschrieben. Die Wellenlänge λ beschreibt die Länge einer Welle. Die Frequenz ν ist die Anzahl an Schwingungen pro Zeiteinheit und die Wellenzahl $\bar{\nu}$ berechnet sich aus dem Kehrwert der Wellenlänge nach Gleichung (2-21) und gibt die Anzahl an Perioden pro Abstand wieder.

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} \quad (2-21)$$

Mit λ Wellenlänge

Die von der Frequenz abhängige Strahlungsenergie E wird nach Gleichung (2-22) bestimmt. [44]

$$E = h \cdot \nu \quad (2-22)$$

Mit

h *Planksches Wirkungsquantum*

ν *Frequenz*

Neben dem sichtbaren Bereich, der Wellenlängen von ca. 360 nm bis ca. 780 nm umfasst, ist ein großer Teil der elektromagnetischen Strahlung für das menschliche Auge unsichtbar. Bild 2.38 zeigt das gesamte elektromagnetische Spektrum, der sichtbare Teil ist vergrößert dargestellt.

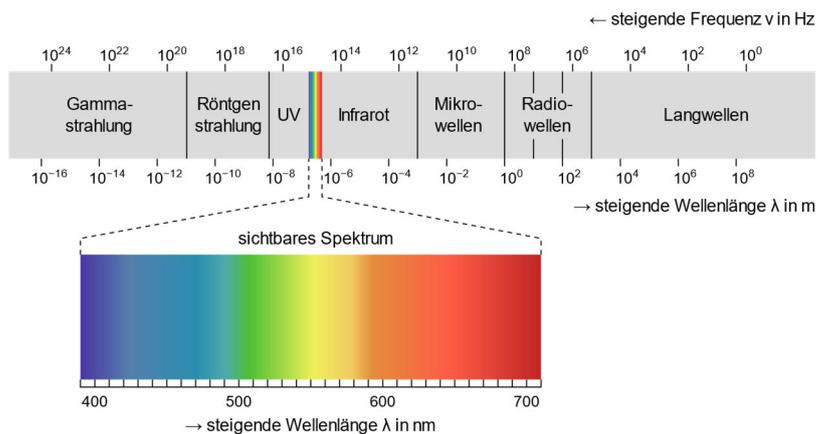


Bild 2.38: **Elektromagnetisches Spektrum (Quelle: EM_spectrum.svg: User:Zedh derivative work: Matt (talk) (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM-Spektrum.svg?uselang=de>), „EM-Spektrum“, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/legalcode>, keine Veränderungen vorgenommen)**

Im ultravioletten Bereich sind die Wellenlängen mit 190 nm bis 380 nm kürzer als das sichtbare Licht und im infraroten Bereich mit Wellenlängen von 750 nm bis 15.000 nm länger. Der infrarote Bereich unterteilt sich weiter in die Bereiche nahes Infrarot (VNIR), kurzwelliges Infrarot (SWIR), mittelwelliges Infrarot (MWIR) und langwelliges Infrarot. Für diese Unterteilung existieren keine definierten Wellenlängenbereiche. Zum nahen Infrarot werden meist Wellenlängen im Bereich bis 1.000 nm gezählt, der kurzwellige Infrarotbereich umfasst Wellenlängen von ca. 900 nm bis ca. 2.500 nm. [28]

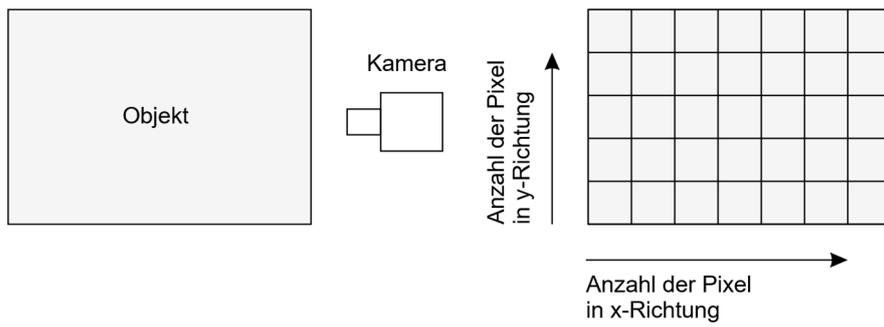
2.5.1.2 Interaktion Materie und elektromagnetisches Spektrum

Ein auf einem Objekt auftreffender Lichtstrahl kann in den verschiedenen Wellenlängenbereichen von diesem reflektiert, absorbiert oder transmittiert werden. Ein opakes Objekt, das mit einem kontinuierlichen Wellenspektrum, z. B. Sonnenlicht, beleuchtet wird, absorbiert einen Teil der Strahlung, während ein anderer reflektiert wird. Die absorbierte Strahlung regt die Moleküle des bestrahlten Objekts durch den Energieeintrag zum Schwingen an. Die Anteile der reflektierten und absorbierten Wellenlängen geben Aufschluss über chemische funktionale Gruppen des Objektes. Je nach Material und Zusammensetzung entstehen dabei charakteristische Absorptionsbanden. Diese sind als Spektrum darstellbar. Kamerasysteme, die ein Spektrum aufzeichnen, welches über den sichtbaren Anteil der elektromagnetischen Strahlung hinausgeht, machen durch

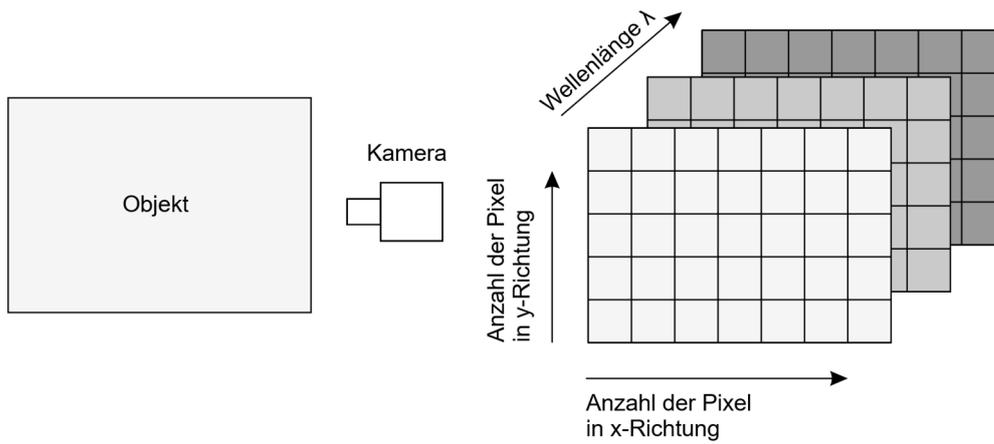
materialcharakteristische Spektren für das menschliche Auge nicht sichtbare Unterschiede sichtbar. [28]

2.5.1.3 Hyperspektralaufnahmen und dazugehörige Datenstruktur

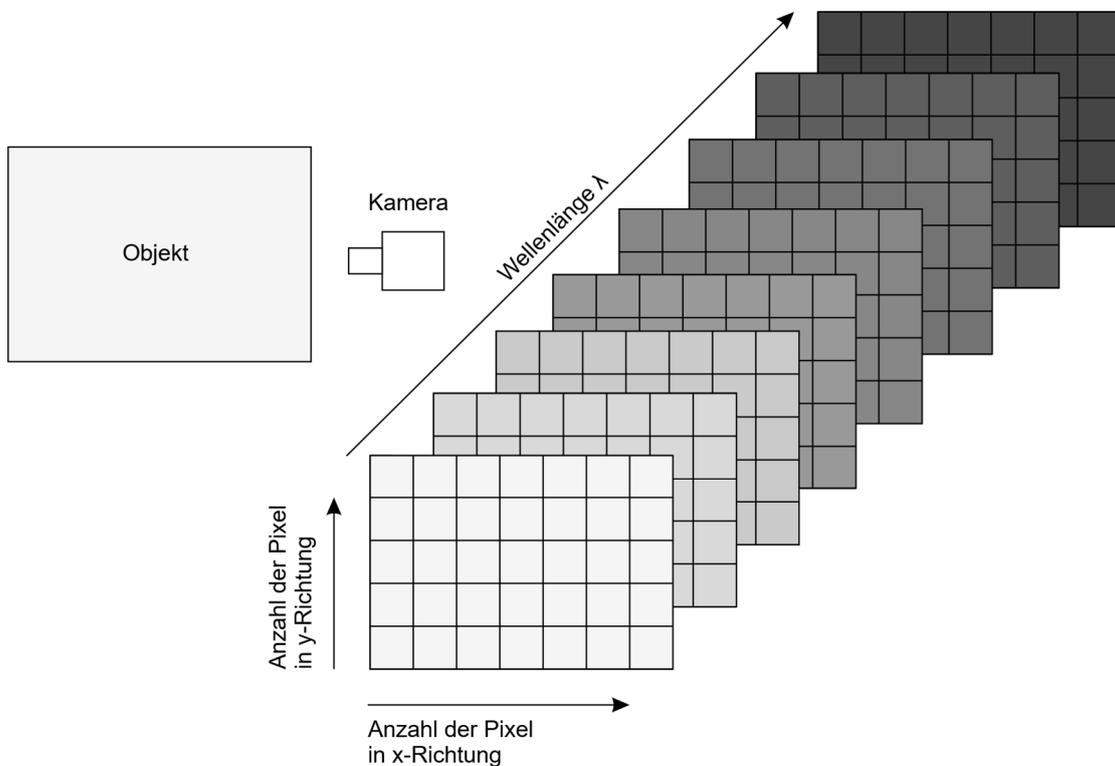
Hyperspektrale Bildgebung kombiniert bildgebende und spektroskopische Verfahren dahingehend, dass spektrale Information räumlich dargestellt wird [117, S. 3]. Unabhängig von der Art zeichnet der Sensor einer Digitalkamera die von einem Objekt reflektierte elektromagnetische Strahlung auf, welche teilweise auch für das menschliche Auge sichtbar ist. Eine Digitalkamera erzeugt Bilder, die in Form von digitalen Matrizen dargestellt, abgespeichert und von Computerprogrammen für das menschliche Auge wahrnehmbar dargestellt werden können. Bild 2.39 zeigt für unterschiedliche Bildtypen die resultierenden Matrizen. Wird ein Bild mit einer digitalen Schwarz-Weiß-Kamera aufgenommen (Teilbild a), erzeugt die Kamera eine zweidimensionale Matrix mit einer definierten Anzahl an Bildpunkten, die in Spalten und Zeilen angeordnet sind. Ein Bildpunkt nimmt den Wert eins an, wenn die Kamera diesen als weiß detektiert und den Wert null, wenn die Kamera schwarz detektiert. Graustufenbilder sind ebenfalls zweidimensionale Matrizen. Der Wert, den ein Bildpunkt annehmen kann, liegt meistens im Bereich zwischen 0 und 255. Je höher der Wert eines Bildpunktes, desto heller ist er. Die Aufnahme mit einer digitalen Farbkamera, dargestellt in Teilbild b, wird in einer dreidimensionalen Matrix wiedergegeben. Die Spalten und Zeilen der Matrix geben Aufschluss über die räumliche Position eines Bildpunktes. Entlang der dritten Dimension, der Wellenlänge, sind auf drei Seiten bzw. Matrizen, mit identischer Anzahl an Spalten und Zeilen, die reflektierten Farbtintensitäten der Grundfarben rot, grün und blau aufgeführt, die übereinandergelegt werden können. Computerprogramme setzen die drei Seiten der Matrix zusammen und erzeugen somit ein für das Auge interpretierbares Farbbild. Die Aufnahme eines Objektes mit einer Hyperspektralkamera geht darüber hinaus, erzeugt jedoch ebenfalls eine dreidimensionale Matrix, den Hypercube, siehe Teilbild c. Die Seitenanzahl entlang der dritten Dimension der resultierenden Matrix ist um ein Vielfaches größer und entspricht der spektralen Auflösung der Kamera. Vorwiegend zeichnen Hyperspektralkameras elektromagnetische Strahlung auf, die in einem für das menschliche Auge nicht sichtbaren Bereich liegt. Die Spalten und Zeilen kennzeichnen die räumliche Position jedes Bildpunktes. Die einzelnen Seiten der dreidimensionalen Matrix enthalten die Informationen über die Intensität der Reflektion bei einer bestimmten Wellenlänge.



a) Aufnahme mit einer Schwarz-Weiß-Kamera und schematische Darstellung der 2-D-Matrix



b) Aufnahme mit einer Farbkamera und schematische Darstellung der 3-D-Matrix



c) Aufnahme mit einer Hyperspektralkamera und schematische Darstellung der 3-D-Matrix

Bild 2.39: Schematische Darstellung unterschiedlicher Bildtypen in Anlehnung an [117, S. 21]

2.5.1.4 Hyperspektrale Kamerasysteme [117, S. 24-28]

Alle hyperspektralen Kamerasysteme enthalten die folgenden Komponenten: ein Objektiv, entsprechend der erforderlichen räumlichen und spektralen Auflösung; eine Einheit, um das einfallende elektromagnetische Spektrum in seine einzelnen Wellenlängen aufzuteilen und einen zweidimensionalen Detektor, um die räumliche und spektrale Information aufzuzeichnen. Die Kameras nehmen einen ein- oder zweidimensionalen Teil des hyperspektralen dreidimensionalen Datensets auf. Um ein gesamtes hyperspektrales Bild zu erhalten, ist es erforderlich, die fehlende Dimension oder die fehlenden Dimensionen in einem geeigneten Verfahren aufzunehmen und im Anschluss die Teilinformationen zusammenzufügen. Die drei aktuell üblichen Verfahren sind in Bild 2.40 und Tabelle 2.6 ausgeführt. Beim „Staring imaging“, Teilbild a, wird die gesamte räumliche Information auf einmal aufgenommen; die spektrale Information wird nacheinander gewonnen. Beim „Whiskerbroom imaging“ oder auch „Point scanning“, Teilbild b, wird für einen Bildpunkt das gesamte Spektrum aufgezeichnet und dann der nächste Bildpunkt betrachtet. Ähnlich verhält es sich beim „Pushbroom imaging“, dem „Line scanning“, Teilbild c; hier wird in einer Bildzeile für jeden einzelnen Bildpunkt das gesamte Spektrum aufgezeichnet, anschließend wird die nächste Bildzeile aufgenommen.

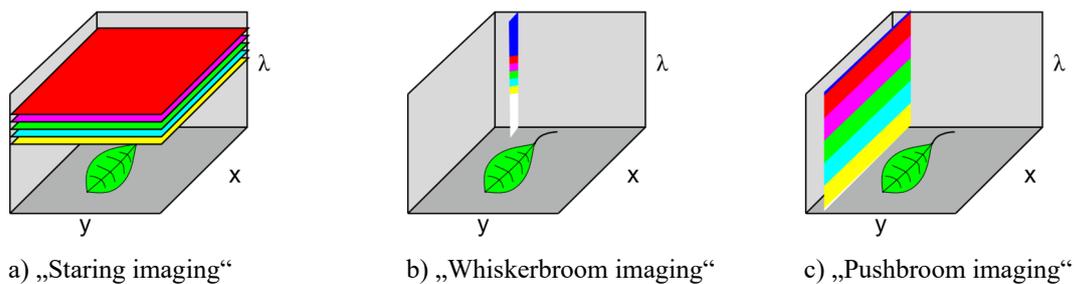


Bild 2.40: Hyperspektrale Scanning-Typen nach [28]

Tabelle 2.6: Zusammenfassung der Scanning-Typen bei hyperspektralen Aufnahmen

Methode	Gleichzeitige Aufnahme von	Scanning von
Staring imaging	x und y	λ
Whiskerbroom imaging	λ	x, y
Pushbroom imaging	x, λ	y

2.5.1.5 Weiterverarbeitung bzw. Interpretation der gewonnenen Daten

Nach dem Anfertigen der hyperspektralen Aufnahmen werden die gewonnenen Rohdaten einem „Preprocessing“ unterzogen. In einem Schwarz-Weiß-Abgleich wird für jede Wellenlänge λ aus der aufgezeichneten Lichtintensität die Reflektion nach Gleichung (2-23) berechnet. Hierzu werden Aufnahmen von weißen (100 % Reflektion) und schwarzen (0 % Reflektion) Objekten gemacht und anschließend mitberücksichtigt.

$$R(\lambda) = \frac{I(\lambda) - I_d(\lambda)}{I_0(\lambda) - I_d(\lambda)} \quad (2-23)$$

Mit	$I(\lambda)$	<i>Lichtintensität bei einer Wellenlänge λ des untersuchten Objekts</i>
	$I_d(\lambda)$	<i>Lichtintensität bei einer Wellenlänge λ des Objektes mit 0 % Reflektion</i>
	$I_0(\lambda)$	<i>Lichtintensität bei einer Wellenlänge λ des Objektes mit 100 % Reflektion</i>

Zum anderen werden optische Fehler behoben. Darauf aufbauend kann die spektrale Information interpretiert werden. [117]

Häufig werden Hyperspektralaufnahmen von Objekten mit bekannten Eigenschaften angefertigt. Diese Eigenschaften, beispielsweise Materialart oder eine explizite Materialeigenschaft wie der Wirkstoffgehalt einer Tablette, werden einem bestimmten Spektrum oder bestimmten spektralen Eigenschaften zugeordnet. Hierfür gibt es unter anderem chemometrische Methoden, anhand derer sich Vorhersagemodelle entwickeln lassen. Mit diesen Vorhersagemodellen lassen sich die Eigenschaften von einem unbekanntem Objekt, basierend auf der spektralen Information, vorhersagen bzw. bestimmen. Für diese Auswertung existieren bereits kommerziell erhältliche Computerprogramme.

2.5.2 Anwendung hyperspektraler Bildgebung im Bauwesen

Spektren können charakteristisch für einzelne Materialien oder bestimmte Materialeigenschaften sein, deshalb eignet sich hyperspektrale Bildgebung zur Klassifizierung von unterschiedlichen Materialien und zur Detektion chemischer Veränderungen innerhalb eines Materials. Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsgebiete sind mannigfaltig: Die Anwendungen reichen von der Lebensmittelindustrie [117] und der pharmazeutischen Industrie [60] bis hin zum Baubereich.

Zu den Anwendungsfällen im Baubereich zählen das Recycling von Bauschutt und hier die Unterscheidung zwischen Mörtel und Zuschlagstoffen oder die Bestimmung von Verunreinigungen im Bauschutt durch Holz, Glas, Ziegel, Schäume und Kunststoffe. [10, 85, 108, 109] Hierunter fallen auch die Arbeiten von [9] und [71], welche mithilfe hyperspektraler Bildgebung versuchten, Asbest in Bauschutt oder im verbauten Zustand zu detektieren.

Auch lassen sich Aussagen zu bestimmten Materialeigenschaften basierend auf spektraler Information treffen. So erforschten [49, 67, 68] basierend auf Hyperspektralaufnahmen die Möglichkeit, die Druckfestigkeit von Mörtel vorherzusagen. [122] untersuchte Änderungen im Spektrum des Betons, die durch das Eindringen von Chlorid auftreten, um dies früh zu erkennen und Maßnahmen dagegen ergreifen zu können.

Alle VIS-SWIR-Spektren von Zement und Beton zeigen eine starke Reflexion im Bereich bis etwa 600 – 700 nm und eine starke Absorption bei 1940 – 1970 nm. Letztere deutet auf die H₂O

bezogene Absorption der Gipskomponente hin. Einige Zement- und Betonmaterialien weisen Signaturen von Eisenoxiden oder H_2O verwandten Banden im Bereich von ca. 1410 nm auf. [63, S. 205] Einen Überblick über weitere Anwendungsmöglichkeiten im Betonbau gibt [110].

Im Holzbau werden hyperspektrale Bildgebungsverfahren angewendet, um den Feuchtegehalt oder bestimmte Materialeigenschaften zu bestimmen, vgl. [42, 69, 98, 111, 114]. Ein weiteres Anwendungsfeld besteht darin, die Wirksamkeit von Holzoberflächenbehandlungen zu bestimmen [70]. Auch lassen sich damit bei der Herstellung von Holzwerkstoffprodukten die Art des verwendeten Klebstoffes und die aufgetragene Klebstoffmenge detektieren [81]. Überdies werden den einzelnen Komponenten von Holz, Zellulose, Hemizellulose und Lignin, spezifische Absorptionsbanden zugewiesen, wie [111, S. 264] und [106] beschreiben.

2.6 Berechnung gedrückter Stäbe

2.6.1 Allgemeines

Bei der Berechnung von auf Druck beanspruchten Bauteilen ist zwischen gedrungenen und schlanken Bauteilen zu unterscheiden. Auf der Lasteinwirkungsseite ist zwischen zentrisch und exzentrisch belasteten bzw. zentrisch belasteten Bauteilen mit zusätzlicher einwirkender Horizontallast zu differenzieren. Ursächlich für diese Unterscheidungen sind die möglichen Versagensarten – Querschnittsversagen und Stabilitätsversagen – eines auf Druck beanspruchten Bauteils und die bei der Berechnung zu berücksichtigenden Einflüsse. Hierzu zählt beispielsweise der Einfluss der Bauteilverformung auf die Ermittlung der Schnittgrößen sowie der Einfluss der Schubsteifigkeit des Querschnitts auf die Bauteilverformung.

Der folgende Abschnitt beschreibt die Grundlagen für die Berechnung von auf Druck beanspruchten Bauteilen, die für diese Arbeit relevant sind. Diese entstammen überwiegend [86]; tiefere Informationen sind gesondert gekennzeichnet.

2.6.2 Gedrungene und schlanke Druckstäbe

Bei auf Druck beanspruchten Bauteilen nimmt die Beanspruchung wegen der auftretenden Verformung überproportional zur Belastung zu. Deshalb kann es erforderlich sein, die auftretende Verformung bei der Ermittlung der Schnittgrößen zu berücksichtigen – Berechnung nach Theorie II. Ordnung. Bild 2.41 zeigt exemplarisch die Bauteilverformung w mit zunehmender Last P für die Theorie I. Ordnung, ohne Berücksichtigung der auftretenden Bauteilverformung, und für die Theorie II. Ordnung. Eine Möglichkeit abzuschätzen, ob die Einflüsse nach Theorie II. Ordnung zu berücksichtigen sind, ist die Stabschlankheit. Anhand der Stabschlankheit wird beurteilt, ob ein gedrückter Stab als schlank oder als gedrunge zu behandeln ist. Die Stabschlankheit λ ist das Verhältnis aus Knicklänge zu Trägheitsradius und in Gleichung (2-24) gegeben.

$$\lambda = \frac{l_{eff}}{i} \quad (2-24)$$

Mit	λ	Schlankheit
	l_{eff}	Knicklänge des betrachteten Stabs
	i	Trägheitsradius, $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$, I Flächenträgheitsmoment und A Fläche des betrachteten Stabes

Liegt die Schlankheit des betrachteten Stabes unterhalb eines zumeist normativ geregelten Grenzwertes, gilt der Stab als gedrungen. In diesem Fall müssen die Auswirkungen der Verformung auf die Ermittlung der Schnittgrößen nicht betrachtet werden. Es wird nach Theorie I. Ordnung gerechnet. Ist die Schlankheit dagegen größer als vorgegeben, ist der Einfluss der Stabverformung auf die Ermittlung der Schnittgrößen zu berücksichtigen.

2.6.3 Spannungsproblem nach Theorie II. Ordnung und Verzweigungsproblem

Bei der Berechnung von schlanken, auf Druck beanspruchten Bauteilen beeinflusst die Last bzw. die Lastanordnung das Bauteilverhalten bzw. die Versagensart. Bei exzentrisch beanspruchten Stäben oder bei zentrisch beanspruchten Stäben mit zusätzlich wirkender Horizontalkraft treten Spannungsproblemen nach Theorie II. Ordnung auf. Die auftretenden Bauteilverformungen sind bei der Ermittlung der Schnittgrößen zu berücksichtigen, da die Beanspruchung überproportional zur Last anwächst, was auch Bild 2.41 zeigt. Bei ideal zentrisch belasteten und ideal geraden Stäben tritt zunächst keine Verformung des Bauteils auf. Erst wenn die kritische Last P_{ki} erreicht ist, nimmt die Verformung des Bauteils schlagartig zu. Es handelt sich hier um ein Verzweigungsproblem, das Bild 2.41 ebenfalls illustriert.

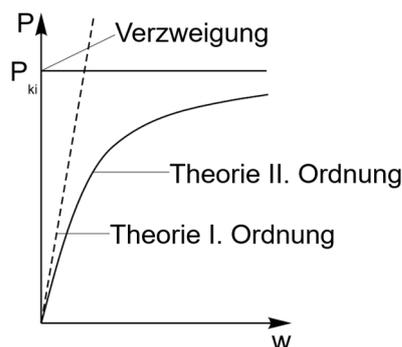


Bild 2.41: Unterscheidung zwischen Verzweigungsproblem und Spannungsproblem nach Theorie II. Ordnung nach [86, S. 2]

2.6.4 Druckstäbe nach Theorie II. Ordnung

2.6.4.1 Allgemeine Differentialgleichung nach Theorie II. Ordnung am schubstarrten Druckstab

Stabilitätstheoretische Untersuchungen erfassen den Einfluss von Druckkräften auf das Gleichgewicht. Dabei wird das Elastizitätsgesetz mit den Gleichgewichtsgleichungen am

verformten System verknüpft, was zu Differentialgleichungen führt. Bei Biegebeanspruchungen wird zumeist die Bernoulli-Hypothese zugrunde gelegt. Querschnittsverwölbungen infolge von Schubgleiten bleiben zumeist unberücksichtigt oder werden linear-unabhängig mit den Biegedehnungen überlagert.

Bild 2.42 zeigt einen Stab der Länge l , welcher durch eine Druckkraft und eine Vertikallast $q(z)$ beansprucht wird; zudem ist die Longitudinalkraft entlang der Stabachse variabel. Anhand des Beispiels wird die Differentialgleichung für Probleme nach Theorie II. Ordnung hergeleitet. Die Longitudinalkraft L und die Transversalkraft T sind auf die unverformte Stabachse bezogen, während sich die Normalkraft N und die Querkraft Q auf die verformte Stabachse beziehen. Die Bauteilverformung ist mit w und die Stabverdrehung mit φ gekennzeichnet.

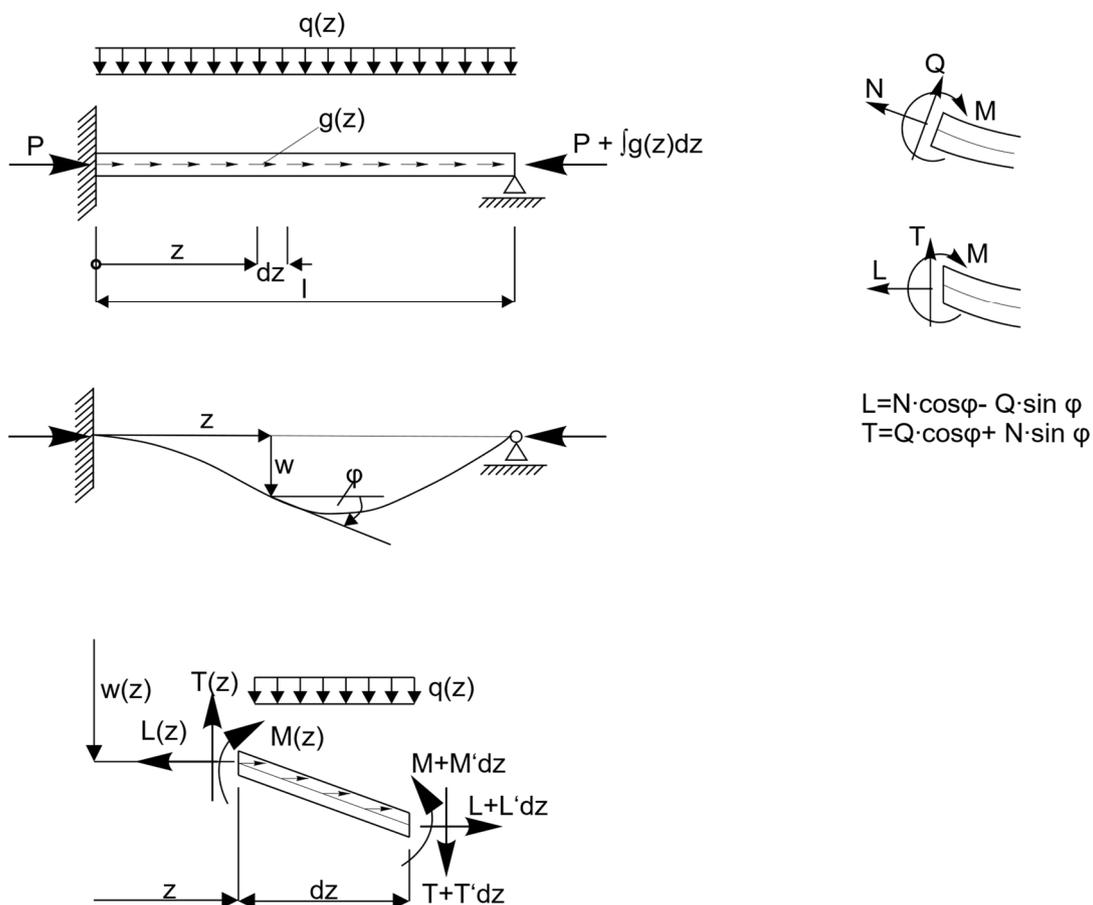


Bild 2.42: Gleichgewicht am verformten System nach [86, S. 7]

Zunächst werden die Gleichgewichtsbedingungen an einem Element mit der Länge dz am verformten System aufgestellt. Diese sind in den Gleichungen (2-25), (2-26), (2-27) aufgeführt. Dabei bedeutet $'$ die Ableitung entlang der Stabachse.

$$\sum L = 0: L - (L + L' dz) - g dz = 0 \quad (2-25)$$

$$\sum T = 0: T - (T + T' dz) - q dz = 0 \quad (2-26)$$

$$\sum M = 0: M - (M + M' dz) + T dz - L w' dz = 0 \quad (2-27)$$

Mit L *Longitudinalkraft, auf unverformte Stabachse bezogen*
 T *Transversalkraft, auf unverformte Stabachse bezogen*
 dz *Elementlänge*

Nach [86, S. 5] lässt sich für im Baubereich übliche Stababmessungen und -schlankheiten folgendes Elastizitätsgesetz für Biegung anwenden:

$$\kappa = w''(z) = -\frac{M(z)}{EI} \quad (2-28)$$

Mit EI *Biegesteifigkeit des Stabes*
 κ *Stabkrümmung*

Wird Gleichung (2-28) mit den Gleichungen (2-25) bis (2-27) verknüpft, ergibt sich nach einigem Umformen die Differentialgleichung für Biegeprobleme nach Theorie II. Ordnung für den in Bild 2.42 dargestellten Lastfall:

$$EI w'''' + P w'' + g w' = q \quad (2-29)$$

Mit P *Druckkraft in Stablängsrichtung*
 g *Linienkraft in Stablängsrichtung*
 q *Auf den Stab einwirkende äußere Linienlast, senkrecht zur Stabachse*

Wird die Stabkennzahl ϵ nach Gleichung (2-30) eingeführt,

$$\epsilon = l^2 \cdot \frac{P}{EI} \quad (2-30)$$

die im Stab wirkende Normalkraft als konstant angesetzt und beides in Gleichung (2-29) eingefügt, geht daraus Gleichung (2-31) hervor.

$$w'''' + \frac{\epsilon^2}{l^2} \cdot w'' = \frac{q}{EI} \quad (2-31)$$

Die Lösung der Differentialgleichung enthält Gleichung (2-32). Die Beiwerte C_1 bis C_4 sind Konstanten, die sich aus den Randbedingungen ergeben und die partikuläre Lösung ist von der

äußeren Belastung abhängig. Damit kann die Verformung an jeder Stelle des Stabes berechnet und darauf aufbauend die im Stab vorherrschenden Schnittgrößen bestimmt werden.

$$w(x) = C_1 \sin\left(\frac{\epsilon}{l} \cdot x\right) + C_2 \cos\left(\frac{\epsilon}{l} \cdot x\right) + C_3 \frac{x}{l} + C_4 + w_{part} \quad (2-32)$$

Mit $C_1 - C_4$ Konstanten

w_{part} Partikuläre Lösungsanteil, abhängig von der äußeren Belastung

2.6.4.2 Differentialgleichung nach Theorie II. Ordnung am schubweichen Druckstab

In Abschnitt 2.6.4.1 wurde die Differentialgleichung zur Berechnung von gedrückten Stäben nach Theorie II. Ordnung hergeleitet. Dabei wurden mögliche Schubgleitungen vernachlässigt und ein schubstarrer Druckstab betrachtet. Durch den lagenweisen Aufbau des Werkstoffs Brettsperrholz und der damit einhergehenden Rollschubbeanspruchung der Querlagen kommt es zu Schubgleitungen im Querschnitt. Deshalb ist auch der Einfluss der Schubsteifigkeit auf die Stabilität von Druckstäben zu betrachten.

Bild 2.43 zeigt die Zusammenhänge am schubweichen Stab, bei dem die Schubgleitungen den Biegedehnungen linear-unabhängig überlagert werden. Die Biegesteifigkeit und die vorherrschende Normalkraft werden als konstant gesetzt. Eine äußere Last $q(z)$, wie in Bild 2.42 dargestellt, wird nicht betrachtet.

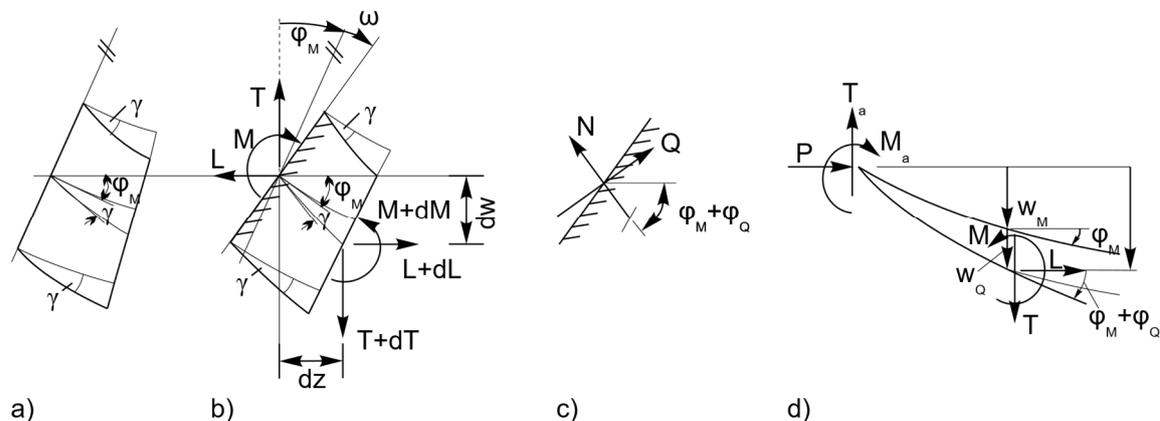


Bild 2.43: Gleichgewicht am verformten System nach [86, S. 52]

Werden die Schubgleitungen berücksichtigt, ergibt sich die Verformung w aus einem Anteil des Biegemoments w_M und aus einem Anteil der Querkraft w_Q , wie Bild 2.43, Teilbild d) zeigt. Daraus folgt:

$$w' = w'_M + w'_Q = \varphi_M + \varphi_Q = w'_M + (\gamma + \omega) \quad (2-33)$$

Mit	w_M, w_Q	Verformungsanteil aus dem Biegemoment bzw. der Querkraft
	φ_M, φ_Q	Drehung der Stabmittellinie aus dem Biegemoment bzw. der Querkraft
	γ	Gleitung infolge Querkraft
	ω	Starrkörperdrehung

Die auftretende Gleitung γ ergibt sich nach Gleichung (2-34) zu:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{Q}{G \cdot A_G} \quad (2-34)$$

Mit	τ	Schubspannung
	Q	Querkraft
	A_G	Schubfläche

Da die Normalkraft konstant ist und keine zusätzliche äußere Last wirkt, ist beim Aufstellen der Gleichgewichtsbedingungen am verformten Element nur das Momentengleichgewicht zu bilden wie aus den Gleichungen (2-35), (2-36) und (2-37) hervorgeht:

$$\sum L = 0: dL = 0, \quad L = \text{konstant} \quad (2-35)$$

$$\sum T = 0: dT = 0, \quad T = \text{konstant} \quad (2-36)$$

$$\sum M = 0: M - (M + dM) + Tdz - Ldw = 0 \quad (2-37)$$

Mit	dw	Elementverformung
-----	------	-------------------

Wird die Querkraft, wie in Bild 2.43 Teilbild c) dargestellt, auf die Stabachse bezogen, beträgt:

$$\begin{aligned} Q &= T \cdot \cos(\varphi_M + \gamma + \omega) - L \cdot \sin(\varphi_M + \gamma + \omega) = T + P(\varphi_M + \gamma + \omega) \\ &= T + Pw' \end{aligned} \quad (2-38)$$

Hier lautet das Elastizitätsgesetz:

$$w'' = w''_M + w''_Q \approx \varphi'_M + \varphi'_Q = -\frac{M}{EI} + \frac{Q'}{GA_G} = -\frac{M}{EI} + \frac{M''}{GA_G} \quad (2-39)$$

Das Biegemoment an der Stelle z wird nach Gleichung (2-40), siehe Bild 2.43, Teilbild d):

$$M = M_a + T_a \cdot z + P \cdot w \rightarrow M'' = P \cdot w'' \quad (2-40)$$

Mit

M_a *Biegemoment am Auflager*

T_a *Transversalkraft am Auflager*

z *Abstand vom Auflager in Stablängsrichtung*

Die Verknüpfung von Gleichung (2-40) mit Gleichung (2-39) ergibt nach einigem Umformen die Differentialgleichung für schubweiche Stäbe:

$$w'''' + \frac{P}{EI \left(1 - \frac{P}{GA_G}\right)} \cdot w'' = 0 \quad (2-41)$$

Mit dem Einführen der Stabkennzahl ϵ , nach Gleichung (2-42):

$$\epsilon^2 = l^2 \cdot \frac{P}{EI \left(1 - \frac{P}{GA_G}\right)} \quad (2-42)$$

folgt die identische Differentialgleichung wie für den schubstarreren Druckstab. Die rechte Seite der Gleichung (2-43) beträgt Null (homogene Differentialgleichung), da bei der Herleitung keine äußeren Lasten angesetzt wurden.

$$w'''' + \frac{\epsilon^2}{l^2} \cdot w'' = 0 \quad (2-43)$$

Somit stehen zur Lösung der Differentialgleichung alle Verfahren zur Verfügung, die auch bei den schubstarreren Stäben verwendet werden. Zu berücksichtigen ist jedoch die veränderte Stabkennzahl ϵ die den Einfluss der Schubsteifigkeit berücksichtigt. Nach [86, S. 52] liefert die Berechnung von schubweichen Druckstäben unter Verwendung einer effektiven reduzierten Biegesteifigkeit, welche die Schubnachgiebigkeit berücksichtigt, im baupraktischen Bereich eine ausreichende Genauigkeit.

Für das in der Arbeit betrachtete Brettsperrholz beschreibt Abschnitt 2.3.4 das γ -Verfahren als auch das Schubanalogieverfahren, mit denen eine effektive Biegesteifigkeit für Stäbe aus Brettsperrholz berechnet werden kann.

2.6.4.3 Vereinfachte Berücksichtigung der Einflüsse nach Theorie II. Ordnung

Neben der expliziten Lösung der Differentialgleichung nach der Theorie II. Ordnung ist es auch möglich, die Einflüsse, die sich aus Theorie II. Ordnung ergeben, durch Verwendung eines Vergrößerungsfaktors zu berücksichtigen, wie Gleichung (2-44) zeigt. Hierzu werden die Verformung oder die Schnittgröße, die sich aus der Berechnung nach Theorie I Ordnung ergeben, mit dem Vergrößerungsfaktor nach Gleichung (2-45) multipliziert.

$$w_{II} = w_I \cdot \alpha \quad (2-44)$$

Mit	w_{II}	Verformung nach Theorie II. Ordnung
	w_I	Verformung nach Theorie I. Ordnung
	α	Vergrößerungsfaktor

An dieser Stelle wird auf die Herleitung des Vergrößerungsfaktors α verzichtet und auf [86, S. 1-3] verwiesen.

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{P}{P_{ki}}} \quad (2-45)$$

Mit	P_{ki}	Knicklast
-----	----------	-----------

Bei einer Annäherung der einwirkenden Kraft P an die ideale Knickkraft P_{ki} nähert sich der Nenner asymptotisch der Null und der Vergrößerungsfaktor α asymptotisch unendlich an. Dies führt zur dementsprechenden Vergrößerung der Verformungen oder Schnittgrößen. Nach [86, S. 3] lässt sich mithilfe des Vergrößerungsfaktors α im elastischen Bereich eine Beanspruchung nach Theorie II. Ordnung außerordentlich gut abschätzen.

2.6.5 Verzweigungsproblem

Verzweigungsprobleme treten wie in Abschnitt 2.6.3 beschrieben bei ideal geraden und ideal zentrisch belasteten Druckstäben ohne zusätzliche Belastung auf. Sie sind somit ein Sonderfall des Problems nach Theorie II. Ordnung. Die dazugehörige Differentialgleichung ist identisch mit Gleichung (2-31), jedoch ohne den aus einer zusätzlichen Last resultierenden Anteil, bzw. mit Gleichung (2-43).

Die Lösung der Differentialgleichung ist identisch wie beim Problem nach Theorie II. Ordnung mit Gleichung (2-32), ohne den partikulären Anteil. Nach dem Bestimmen der Randbedingungen und dem Auflösen des Gleichungssystems ergibt sich als Lösungsansatz für den beidseitig gelenkig gelagerten Druckstab, dass $\sin(\epsilon) = 0$ sein muss. Dies ist einerseits erfüllt, wenn $\epsilon = 0$ ist, was der trivialen Lösung und einer unverformten Stabachse entspricht. Andererseits ist die Bedingung erfüllt, wenn $\epsilon = \pi, 2\pi, 3\pi, \text{etc.}$ Hier ist der kleinste Lösungswert maßgebend, womit sich die Knicklast P_{ki} , siehe auch Bild 2.41, berechnen lässt. Dazu wird die Lösung $\epsilon = \pi$ in die jeweiligen Gleichungen der Stabkennzahl eingesetzt, unabhängig davon, ob der schubstarre oder der schubweiche Druckstab betrachtet werden, und die Gleichung nach P_{ki} umgeformt. Somit ergibt sich die Knicklast für den beidseitig gelenkig gelagerten schubstarrten Knickstab mit konstanter Biegesteifigkeit zu:

$$\epsilon^2 = \pi^2 = \frac{P}{EI} \cdot l^2 \rightarrow P_{ki} = \frac{\pi^2}{l^2} \cdot EI \quad (2-46)$$

Das Vorgehen zur Bestimmung der Knicklast für den schubweichen Druckstab ist identisch mit dem des schubstarrten Druckstabs, jedoch wird die Stabkennzahl nach Gleichung (2-42) verwendet,

welche den Einfluss der Schubsteifigkeit berücksichtigt. Damit ergibt sich die in Gleichung (2-47) aufgeführte Knicklast für den schubweichen Druckstab.

$$\epsilon^2 = \pi^2 = l^2 \cdot \frac{P}{EI \left(1 - \frac{P}{GA_G}\right)} \rightarrow P_{ki} = \frac{P_E}{\left(1 + \frac{P_E}{GA_G}\right)} \quad \text{mit } P_E = \frac{\pi^2}{l^2} \cdot EI \quad (2-47)$$

Mit P_E Knicklast des schubstarreren Druckstabes

Aus Gleichung (2-47) geht hervor: Die Knicklast von schubweichen Druckstäben bzw. bei Druckstäben, bei denen die Schubgleitung berücksichtigt wird, ist geringer als beim schubstarreren Druckstab. Diese Lösung geht auf [23] zurück. [23] leitete diese Gleichung für homogene Querschnitte her, die in der Schwereachse die kleinste Querschnittsbreite aufweisen, beispielsweise I-Profile.

2.7 Holz-Beton-Verbund

2.7.1 Allgemeines

Der Begriff Holz-Beton-Verbund (HBV) steht für die Kombination aus Holz und Beton, welche nach [57, S. 43] auf Bauwerks- oder Bauteilebene erfolgen kann. Auf Bauwerksebene werden einzelne Teile des Bauwerks aus unterschiedlichen Baustoffen hergestellt. Die Summe daraus, z. B. Erdgeschoss und Treppenhäuser aus Stahlbeton und die restliche aufgehende Struktur in Holzbauweise, ergeben das Gesamtgebäude. Die Vorteile sind: eine vereinfachte andere Nutzung des Erdgeschosses, größere mögliche Spannweiten, die Holzkonstruktion beginnt außerhalb des Spritzwasser gefährdeten Bereichs, Flucht- und Rettungswege erfüllen ohne besondere Maßnahmen die Brandschutzanforderungen [57, S. 43]. Auf Bauteilebene werden Holz und Beton kombiniert, um die optimalen Eigenschaften des jeweiligen Baustoffs zu nutzen. Beim meist bekannten Holz-Beton-Verbundelement, der Holz-Beton-Verbunddecke, ist der Beton auf der gedrückten Querschnittsseite und das Holz auf der gezogenen Querschnittsseite angeordnet. Bild 2.44 zeigt auf der linken Seite ein Beispiel für HBV auf Bauwerksebene. Hier sind die in Stahlbeton ausgeführten Teile, das Erdgeschoß sowie das aufgehende Treppenhaus, grau schraffiert. Auf der rechten Seite sind unterschiedliche Ausführungsvarianten von HBV-Decken dargestellt, hier ist der Betonquerschnitt grau schraffiert.

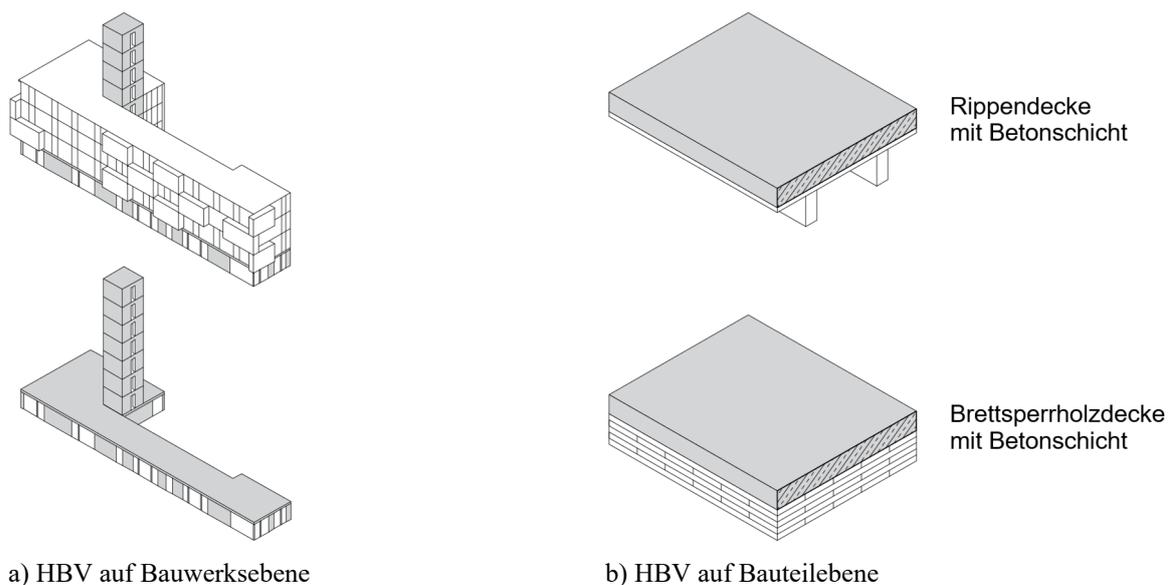


Bild 2.44: Holz-Beton-Verbund auf unterschiedlichen Ebenen nach [57, S. 42-43]

Bei HBV auf Bauteilebene sichert eine Verbindung der beiden Baustoffe die Übertragung von Schubkräften und die Einzelquerschnitte wirken beim Lastabtrag zusammen [127, S. 1085]. Die Kombination der beiden Baustoffe bei Deckenbauteilen im Hochbau hat im Vergleich zu homogenen Deckenbauteilen einige Vorteile. Hier sei angemerkt, dass es sich bei Stahlbeton selbst um einen Verbundbaustoff handelt. Tabelle 2.7 führt die Vorteile von HBV-Decken auf:

Tabelle 2.7: Vorteile von HBV-Decken [19, S. 17]

Vorteile einer HBV-Decke gegenüber einer reinen	
Holzdecke	Stahlbetondecke
<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhte Steifigkeit • Erhöhte Tragfähigkeit • Verbesserter Schallschutz • Verbesserte Schwingungseigenschaften • Einfachere Ausbildung von horizontalen Scheiben 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduziertes Eigengewicht • Weniger CO₂-Ausstoß durch den Einsatz nachwachsender Rohstoffe • Schneller Baufortschritt • Reduzierter Einfluss von Umgebungsbedingungen durch den vermehrten Einsatz von vorgefertigten Elementen • Reduzierte Betonmenge, was zu einem schnellen Bauprozess und geringerem Transportvolumina führt • Reduzierter Schalungsaufwand

Die Entwicklung der HBV-Bauweise führen [48, S. 245] hauptsächlich auf drei Gründe zurück: Erstens sollten nach dem Ersten und Zweiten Weltkrieg Bauweisen entwickelt werden, bei denen Holz das teure Eisen in der Zugzone des Eisenbetons ersetzte. Aus dieser Zeit (1922) stammt auch das erste Patent zum HBV im deutschsprachigen Raum von Paul Müller mit dem Titel: „Decke aus hochkantig stehenden Holzbohlen oder Holzbrettern und Betondeckschicht“ [77, S. 244]. Bild 2.45 präsentiert das patentierte System, das aus hochkantigen Bohlen und Betonschicht besteht. Die

beiden Baustoffe sind durch Bügel verbunden, welche mit Nägeln auf der Schmalseite der Bohlen befestigt sind.

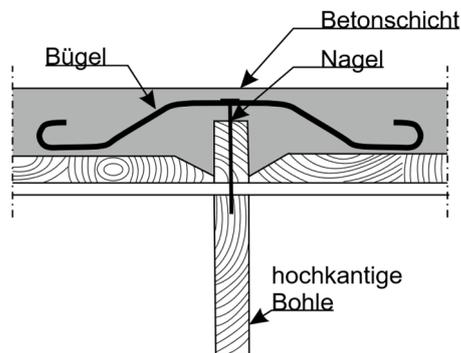


Bild 2.45: Patentiertes System von Müller, nach [77, S. 244]

Den zweiten Grund für die Entwicklung des HBV sehen [48, S. 245] in der zunehmenden Zahl an Holzdeckensanierungen von Bestandsgebäuden ab den 1980er Jahren in den westlichen Ländern. Die bestehenden Decken genügten den aktuellen Anforderungen nicht mehr und mussten saniert werden. Hier erwies sich die HBV-Bauweise als äußerst effektiv, besonders bei Decken mit denkmalgeschützten Unterseiten. In dieser Zeit wurden viele unterschiedliche Verbindungsmittel sowie das Tragverhalten von HBV-Decken erforscht. Als dritten und aktuellen Grund für die Entwicklung von HBV nennen [48, S. 245] ökologische Aspekte. Hierzu zählen der vermehrte Einsatz von Holz als nachwachsendem Rohstoff und der Fakt, dass die Verwendung von Holz kohlendioxidneutral ist.

Der Verbund zwischen den beiden Baustoffen Holz und Beton kann mit verschiedenen Verbindungsmitteln erfolgen. Unabhängig vom Verbindungsmittel muss die Verbindung nach [19, S. 33]

- stark genug sein, um die auftretenden Schubkräfte zu übertragen,
- steif genug sein, damit möglichst wenig Relativverschiebung zwischen Holz und Beton auftritt,
- duktil genug sein, damit sich die Schubkräfte auf alle Verbindungsmittel verteilen können und es zu keinem Versagen der Verbindungsmittel kommt und
- ggf. noch Anforderungen hinsichtlich der zulässigen Kosten, der Komplexität oder der Realisierbarkeit erfüllen.

Mit der Zeit entwickelten sich unterschiedliche Verbindungssysteme. Diese reichen bei den mechanischen Verbindungsmitteln von einfachen Schrauben, Nägeln und Dübeln bis hin zu speziellen Einbauteilen, die auf das Holz aufgeschraubt und einbetoniert werden. Zu den entwickelten formschlüssigen Verbindungen zählen ins Holz eingefräste und ausbetonierte Kerfen, mit unterschiedlicher Flankenneigung. Teilweise sind in den Kerfen zusätzlich mechanische Verbindungsmittel angeordnet, um die Verbindung duktiler zu machen und ein Abheben des Betons vom Holz zu verhindern. Zudem wurden weitere Verbindungssysteme entwickelt und untersucht, z. B. auf Reibung basierende Systeme, siehe z. B. [65] und Systeme mit Klebeverbund. Einen Überblick über die verschiedenen Verbindungssysteme geben [19, 48, 127]. Im Rahmen dieser Arbeit werden insbesondere die geklebten Verbindungen thematisiert, siehe Abschnitt 2.7.3

Die HBV-Bauweise eignet sich insbesondere für auf Biegung beanspruchte Bauteile und wurde für den Geschossdeckenbau entwickelt. Die daraus entstandenen Prinzipien wurden auch auf Brücken, Dächer und Wände übertragen, sodass es heute ein breites Anwendungsfeld gibt. [3, S. 17] Für diese Arbeit sind vor allem Wandkonstruktionen aus HBV von Interesse, die Abschnitt 2.7.2 detailliert beschreibt.

2.7.2 Holz-Beton-Verbundwände

Neben dem Einsatz von HBV als auf Biegung beanspruchtes Bauteil wurden auch Wandbauteile aus HBV untersucht. Hinsichtlich der lastabtragenden Wirkung des Betons lassen sich die entwickelten und untersuchten HBV-Wände in zwei Kategorien einteilen: Zur ersten Kategorie gehören die Wandarten, die vertikale Lasten über den Betonquerschnitt oder über den Verbundquerschnitt und die Lasten die senkrecht zur Bauteilebene wirken vom Verbundquerschnitt abtragen. In der zweiten Kategorie werden die vertikalen Lasten als auch die Lasten senkrecht zur Bauteilebene vom Holzquerschnitt aufgenommen, der Beton dient ausschließlich zur Aufnahme horizontaler Kräfte in Scheibenebene.

Zur ersten Kategorie zählen die Entwicklungen von Girhammar [35] und das von Bathon und Bletz [3, 4] beschriebene System. Girhammar [35] entwickelte ein HBV-Wandsystem zum Bau von Industrie- und Agrargebäuden in Elementbauweise. Die einzelnen Wandelemente bestanden aus einer 50 mm dicken, wasserdichten raumseitig angeordneten Betonplatte sowie mindestens zwei, bevorzugt an den Elementrändern angebrachten Holzständern. Die Betonplatte wurde raumseitig angeordnet, damit sie einfach zu reinigen ist und einen Widerstand gegen Anprall bietet, was insbesondere für Agrargebäude wie Ställe interessant war. Der Verbund zwischen Holz und Beton erfolgte mit Nagelplatten. Laut [1, S. 199] führte Girhammar hierzu die ersten umfassenden Untersuchungen zu Nagelplatten als Verbindungsmittel von HBV-Bauteilen durch. Da die Wandelemente in die Fundamente eingespannt wurden, ist im erdberührten Teil der Elemente ebenfalls eine Betonplatte auf der Wandaußenseite angeordnet. Bild 2.46 zeigt das von Girhammar entwickelte Wandsystem.

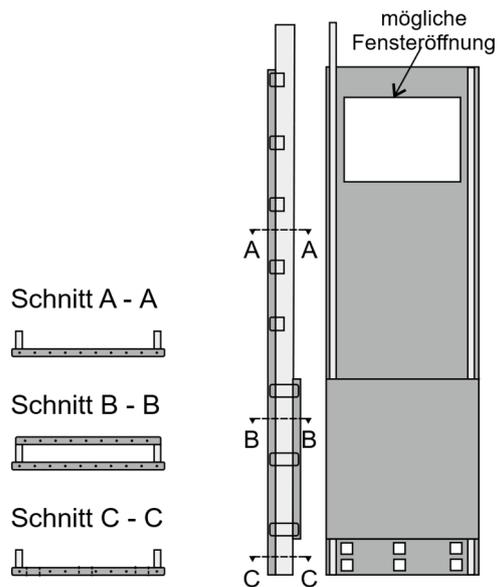


Bild 2.46: Wandsystem von Girhammar, nach [35]

Holzständer und Betonplatte wurden für den vertikalen und den horizontalen Lastabtrag in Plattenebene zu Rande gezogen. Zur statischen Berechnung der Wandelemente gibt [35] ein analytisches Formelwerk, welches die schubweiche Verbindung der beiden Baustoffe bei der Berechnung berücksichtigt. Ein Vergleich der analytischen Berechnung mit den Ergebnissen durchgeführter Versuche zeigt eine gute Übereinstimmung. Mit diesem System wurden auch Gebäude errichtet.

Ebenso zur ersten Kategorie zählt das von Bathon und Bletz [3, 4] entwickelte HBV-System, das sich für Wände, Decken und Dächer einsetzen lässt. Aufgebaut ist das System aus einer 70 mm bis 300 mm dicken Betonplatte aus Beton der Festigkeitsklasse C35/45. Die wandgroße Betonplatte ist raumseitig angeordnet und wird als luftdichte Ebene ausgebildet. Als Holz kommt Konstruktionsvollholz zum Einsatz. Mittels eingeklebter Schlitzbleche wird die Verbindung von Holz und Beton hergestellt. Die Außenfassade lässt sich fast beliebig gestalten; der Hohlraum zwischen Betonplatte und Außenfassade wird mit Dämmstoff gefüllt. Bild 2.47 zeigt den Wandaufbau. Bei diesem System nimmt der Beton die Vertikallasten auf und zum Abtrag von horizontalen Lasten in Plattenebene trägt der Verbundquerschnitt bei. Das System findet heute noch Anwendung.

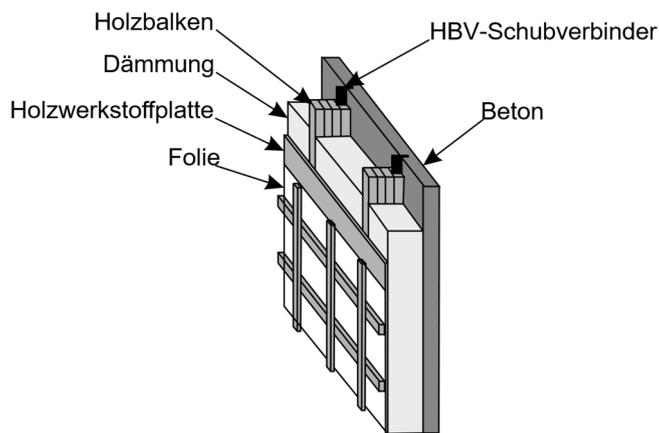


Bild 2.47: Wandsystem nach Bathon und Bletz [3]

Zur zweiten Kategorie der Wandsysteme gehört das von [12] präsentierte System, das seine Ursprünge bei [89] hat. [89] beschreibt ein HBV-System, dessen Grundlage der Holzrahmenbau ist, auf dem mehrere Betonplatten mechanisch befestigt werden. Der Querschnittsaufbau ist in beiden Veröffentlichungen weitestgehend identisch und in Bild 2.48 dargestellt. Es besteht aus dem eigentlichen Holzrahmen, dessen vertikale Ständer eine Ausfräsung erhalten, um eine OSB-Platte darauf anzubringen. Auf den vertikalen Ständern wird mit mechanischen Verbindungsmitteln zusätzlich die Betonplatte befestigt. Der Spalt zwischen der OSB-Platte und der Betonplatte dient zur Belüftung. Bei [12] entfällt die OSB-Platte.

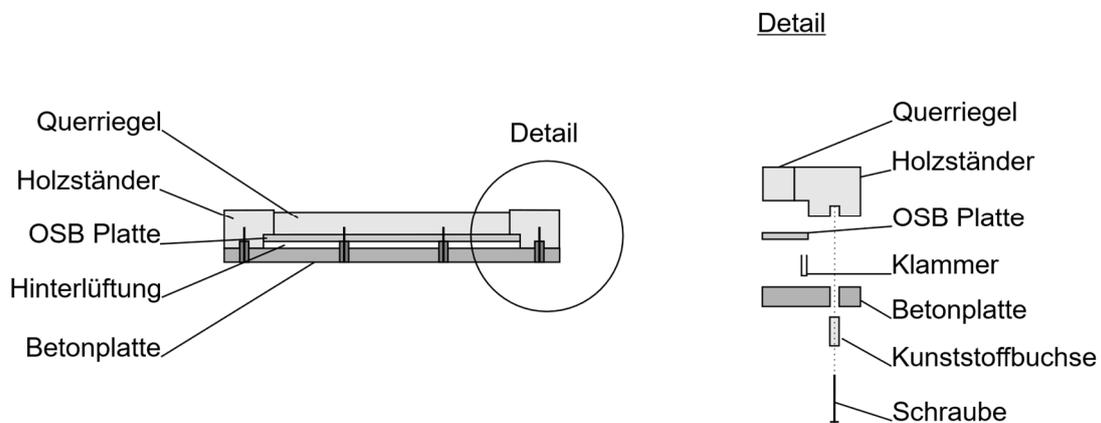


Bild 2.48: Querschnittsaufbau nach [11]

Bei [89] sind kleinere, 40 mm dicke Betonplatten angeordnet, die umlaufend mit dem Holzrahmen verschraubt sind. Zwischen den Betonplatten sind horizontale Stöße vorhanden, wie in Bild 2.49 links dargestellt. Hingegen besteht das von [12] beschriebene System aus einer einzigen, großen, 50 mm dicken Betonplatte, wie Bild 2.49 rechts illustriert.

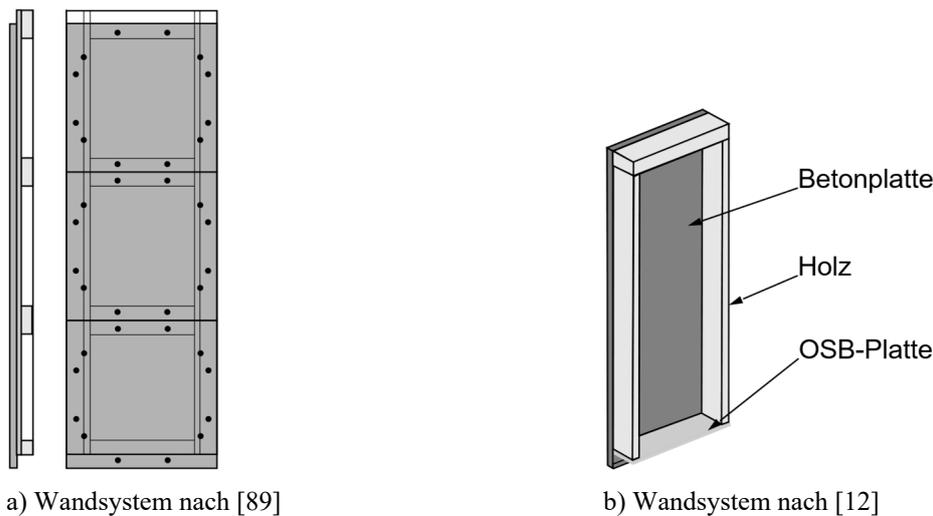


Bild 2.49: Wandsysteme nach [12, 89]

Bei diesem System nimmt der Holzrahmen die vertikale Kraft auf und die Betonscheibe dient zur Aufnahme von Horizontalkräften in Scheibenebene. [89] und [12] führten im Rahmen ihrer Arbeiten Versuche an Bauteilen durch. Sie untersuchten jeweils Wände mit unterschiedlicher Geometrie, z. B. mit einem unterschiedlichem Verhältnis Länge zu Höhe, mit einer Fensteröffnung oder mit einer Türöffnung. Die Prüfkörper wurden in zwei Richtungen belastet. Zum einen durch eine konstante Vertikalkraft, um die Last aus darüberliegenden Geschossen zu simulieren. Zum anderen wurde eine Horizontalkraft aufgebracht, um die Belastung in Scheibenebene zu simulieren. Die horizontale Lastaufbringung erfolgte statisch oder zyklisch. Aufbauend auf den Bauteilversuchen wurde ein numerisches Modell erarbeitet, um die Systeme zu berechnen. Auch mit diesem System wurden bereits Gebäude errichtet.

[91] beschreibt die im Rahmen eines Forschungsprojektes durchgeführten Versuche zur Entwicklung von Wand- und Deckenbauteilen aus Massivholzelementen mit einer im Verbund tragenden mineralischen Deckschicht. Als Massivholzelemente kommen 10 cm dicke Brettstapelelemente zum Einsatz, deren einzelne Lamellen mit Buchendübeln verbunden sind. Ein Calciumsulfatestrich, der zusätzlich mit Holzfasern bzw. Hobelspänen faserverstärkt ist, bildet die ca. 4,5 cm dicke mineralische Deckschicht. Die Verbindung zwischen den beiden Schichten erfolgt mittels Haftverbund; der Estrich wird auf die sägerauen Holzlamellen aufgebracht. Hinzu kommen verbundverbessernde Maßnahmen wie das höhenversetzte Anordnen einzelner Holzlamellen, seitliche Ausfräsungen in den einzelnen Lamellen oder auch Schrauben. [91] führte vorab kleinformatige Push-out-Versuche als Orientierungsversuche durch, um die Verbundeigenschaften zu untersuchen. Auf Basis dieser Erkenntnisse erfolgten Bauteilversuche an Wand- und Deckenelementen im Maßstab 1:1. Die Wandelemente wurden mit einer konstanten Vertikallast und einer statisch oder zyklisch aufgebrachter Horizontalkraft belastet. Aufbauend auf diesen Untersuchungen lässt sich die Steifigkeit in Scheibenebene durch das Aufbringen der mineralischen Deckschicht um bis zu 350 % erhöhen, bezogen auf die rohe Brettstapelwand.

Es gibt noch weitere HBV-Wandsysteme auf dem Markt, wie das in [61, 62] beschriebene und patentierte System. Hierbei handelt es sich um einen Holzrahmen, auf den eine 20 mm dicke, mit Carbonegewebe bewehrte Betonplatte angebracht ist. Der Beton wird bei diesem System nicht zum Lastabtrag herangezogen, sondern dient überwiegend dem Witterungsschutz und bauphysikalischen Aspekten.

2.7.3 Geklebter Holz-Beton-Verbund

2.7.3.1 Arten des geklebten Holz-Beton-Verbund

Wie in Abschnitt 2.7.1 ausgeführt, gibt es mehrere Möglichkeiten, Holz und Beton zu verbinden. Eine davon ist, die beiden Werkstoffe zu verkleben. Geklebte Verbindungen lassen sich, wie Bild 2.50 zeigt, in zwei Hauptkategorien untergliedern – die indirekten und die direkten Klebeverbindungen. Bei den indirekten Klebeverbindungen werden Stäbe, z. B. Stahlstäbe, Bewehrungsstäbe oder auch CFK-Stäbe, oder Stahlbleche in das Holzbauteil eingeklebt und anschließend der Beton eingebracht. Bei den direkten Verbindungen werden Holz und Beton direkt aufeinander geklebt. Hier gibt es zwei Verfahren, um die Verklebung herzustellen. Beim Nass-in-Nass-Verfahren wird der Klebstoff auf das Holzbauteil aufgetragen und betoniert, solange der Klebstoff nass ist. Untersuchungen hierzu haben beispielsweise [15, 54, 104] durchgeführt. Bei der trockenen Verbindung wird ein Betonfertigteile mit dem Holzbauteil verklebt. Nachfolgend wird nur die trockene Verbindung betrachtet, da diese in dieser Arbeit verwendet wird.

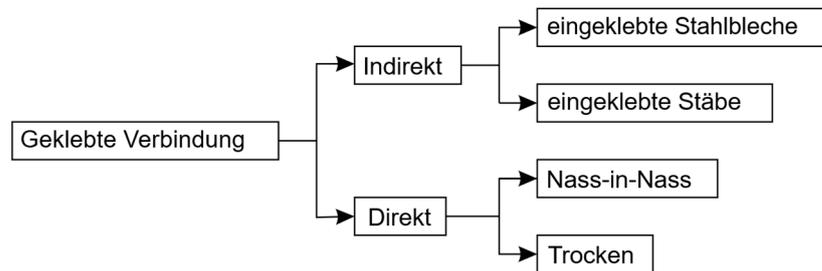


Bild 2.50: Untergliederung von geklebten Verbindungen

2.7.3.2 Vor- und Nachteile von geklebtem Holz-Beton-Verbund

Die Verbindung der beiden Baustoffe Holz und Beton ist ein maßgebender Faktor für die Effizienz von HBV-Bauteilen. Die steife Verbindung der beiden Werkstoffe bei einer Verklebung zeigt sich durch eine hohe zu übertragende Schubkraft in der Verbindung bei gleichzeitig geringer Relativverschiebung der beiden Füge-teile, siehe Bild 2.51. Dies führt auch zu einer optimalen Ausnutzung des Querschnitts, da die gesamte Steifigkeit aktiviert wird. Nach [19, 97, 127] kann bei geklebtem HBV aufgrund der geringen Relativverschiebung von einer starren Verbindung ausgegangen werden. Dies führt zu einer vergrößerten Steifigkeit des Bauteils und vereinfacht die Berechnung der Verbundbauteile. Des Weiteren werden durch die Verklebung die Schubspannungen kontinuierlich übertragen; Lastkonzentrationen, wie bei diskret angeordneten Verbindungsmitteln, werden vermieden. Nachteilig ist bei geklebten Verbindungen von HBV-Bauteilen das unterschiedliche Langzeitverhalten der beiden Werkstoffe und das schlagartige Versagen der geklebten Verbindung. Ebenso stellen geklebte Verbindungen erhöhte Anforderungen an die Qualitätskontrolle. [19, S. 40]

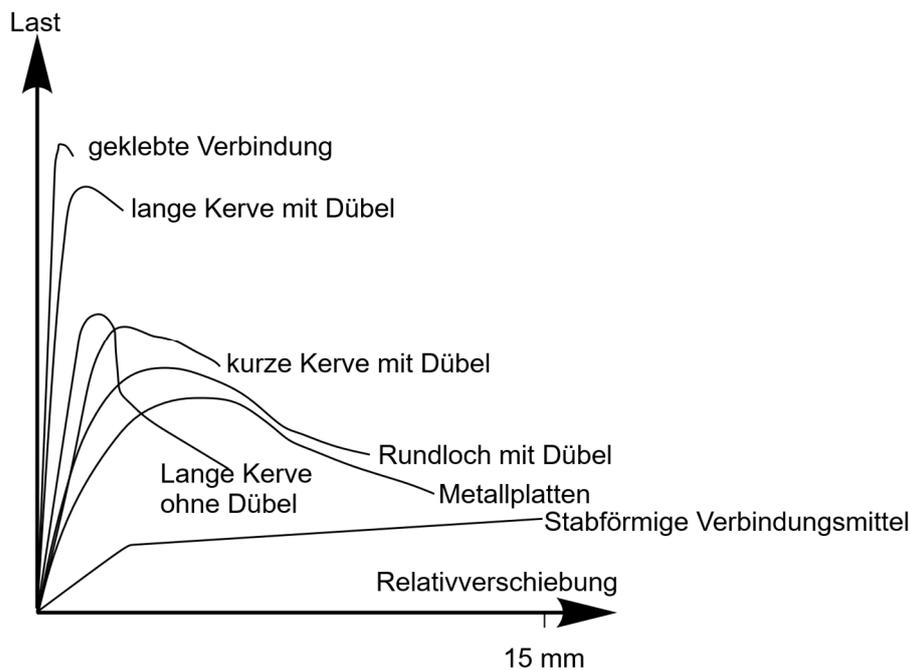


Bild 2.51: Vergleich der Relativverschiebung verschiedener Verbindungsmittelsysteme, nach [127, S. 1087]

2.7.3.3 Durchgeführte Arbeiten

Untersuchungen zu geklebtem HBV sind meist mehrstufig aufgebaut. Häufig wird zu Beginn der Untersuchungen anhand kleinmaßstäblicher Versuche die Eignung verschiedener Klebstoffe, Betonarten und Betonoberflächenbehandlungen und ggf. das Verbundverhalten untersucht. Darauf aufbauend finden meist Bauteilversuche statt. Der folgende Überblick über veröffentlichte Untersuchungen beschränkt sich auf direkte Verklebungen im trockenen Verfahren.

Schäfers [97] führte 126 Scherversuche in zwei Serien in Anlehnung an DIN EN 14080 [140] durch: In der ersten Serie mit 57 Versuchen wurden der Klebstoff, die Oberflächenbehandlung des ultra-hochfesten Betons (UHFB) sowie die Oberfläche des verklebten Holzes variiert. Prüfaufbau und Versuchsdurchführung entsprechen dem in Abschnitt 2.4.3.3 beschriebenen Verfahren. Die Kantenlänge der geprüften Würfel aus Holz und Beton betrug 42 mm und die jeweilige Schichtdicke 22 mm. Das verwendete Holz war möglichst fehlerfreie Fichte, die aus den Randlamellen von BSH der Festigkeitsklasse GL 24 h herausgetrennt wurde. Die Scheiben aus UHFB wurden aus größeren, 20 mm dicken Platten, die 200 mm x 200 mm groß waren, herausgetrennt. Die an Zylindern bestimmte Druckfestigkeit des UHFB betrug 152 N/mm². Als Klebstoffe kamen je ein PRF und ein MF sowie drei unterschiedliche Epoxydharze zum Einsatz. Der Klebstoffauftrag auf die Prüfkörper erfolgte für alle Klebstoffe mit einer Rolle. Für den PRF und den MF wurde nach einer offenen Zeit von 10 bis 15 Minuten ein Pressdruck von 0,6 N/mm² über 24 Stunden aufgebracht. Bei den mit MF verklebten Proben trat in erheblichen Umfang das Versagen in der Klebefuge auf; die Mittelwerte der erreichten Scherfestigkeiten liegen bei etwa 6,18 N/mm². Bei der Verwendung von PRF traten im Holz und im Beton Bruchflächen auf; die Scherfestigkeit betrug im Mittel 7,29 N/mm² und 10,03 N/mm². Die höheren Scherfestigkeiten

ließen sich bei der Verklebung mit PRF mit einer sandgestrahlten Oberfläche erzielen. Im Gegensatz dazu versagten die mit Epoxydharz geklebten Prüfkörper überwiegend im Holz. Hier hatte die Oberflächenbehandlung des ultrahochfesten Betons keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Ebenso beeinflusste die Oberflächengestalt des Holzes die Ergebnisse nicht.

Serie 2 umfasste 69 Scherversuche und baute auf den Erkenntnissen aus Serie 1 auf. Herstellung der Prüfkörper und Versuchsdurchführung waren identisch zu Serie 1. Die variierten Parameter in Serie 2 waren Holzart, Betonoberfläche, Festigkeit der Betonmischung, Klebfugendicke sowie das verwendete Epoxydharz. Die genauen Parameter listet Tabelle 2.8 auf.

Tabelle 2.8: Variierte Parameter in Serie 2 der Scherversuche von [97]

Parameter		Einfluss
Holzart	Fichte, Buche, Furnierschichtholz (Kerto)	Ja
Betonoberflächenbehandlung	Sandgestrahlt, geschliffen	Nein
Betonmischung	Ultra-hochfester Beton, hochfester Beton	Nein
Jahrringorientierung	Radiale, tangentielle Anordnung	Ja
Klebefugendicke	0,5 mm, 1,5 mm, 3,0 mm	Nein
Klebstoff	Epoxydharze unterschiedlicher Hersteller	Nein

Tabelle 2.8 gibt auch den Einfluss auf das Scherverhalten der jeweiligen Parameter an. Demnach haben nur die Holzart sowie die Jahrringorientierung des Holzes zur Klebefuge einen Einfluss auf das Scherverhalten. Auf Basis der Untersuchungen von [97] betrachtete [21] das Langzeitverhalten verklebter Scherprüfkörpern.

[72, 113] dokumentieren Scherversuche nach DIN EN 14080 [140] mit unterschiedlichen kalt- und heißhärtenden Klebstoffen zur Verklebung von Fichte und Buche mit Beton der Festigkeitsklasse C45/55. Insgesamt sind zwei Serien dokumentiert. Serie 1 diente dem Klebstoffscreening; der Beton wurde hierfür sandgestrahlt, um eine mittlere Rautiefe R_t größer 1,5 mm zu erreichen. Serie 2 untersuchte den Einfluss unterschiedlicher Schaloberflächen auf die Klebefestigkeit. In beiden Serien wurde das Holz vor der Verklebung händisch leicht geschliffen. Den Ergebnissen zufolge eignen sich für die Verklebung von sandgestrahlten Betonoberflächen kalthärtende Zwei-Komponenten-Epoxydharze sowie Polyurethane. Phenolresorcinharze und Ein-Komponenten-Polyurethane hatten keine ausreichende Klebefestigkeit. Zurückzuführen ist dies auf die wegen der Rauigkeit zum Teil großen Klebefugendicken von mehr als 1,5 mm und den damit einhergehenden fehlenden lokalen Pressdruck. Ergebnis von Serie 2 ist: Schalglatte Betonoberflächen, hergestellt aus Schalungen mit beschichteter Span- oder Sperrholzplatte, eignen sich ohne die Verwendung von Schalöl ebenso zur Verklebung von Holz und Beton. Bei einigen Prüfkörpern aus der verwendeten Stahlschalung trat eine Trennung in der Nähe der Klebefuge im Beton auf, in Kombination mit sehr geringen Scherfestigkeiten. Hier vermuten die Autoren, dass es aufgrund des verwendeten Schalöls zu Fehlstellen in der Verklebung kam.

[66] führte Scherversuche, jedoch nicht in Anlehnung an DIN EN 14080 [140] durch. Hier wurden Fichtendreischichtplatten mit einem Ein-Komponenten-Polyurethanklebstoff beidseitig auf Betongehwegplatten geklebt. Bild 2.52 zeigt den gewählten Versuchsaufbau. Bei diesen Versuchen trat das Versagen vorwiegend in den Betongehwegplatten auf.

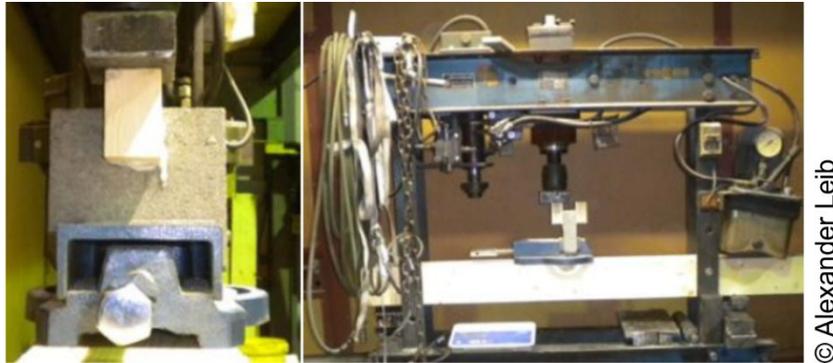
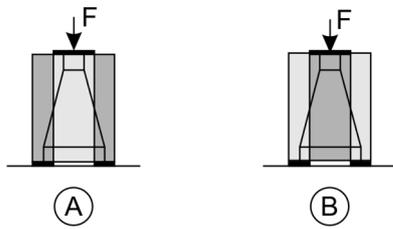


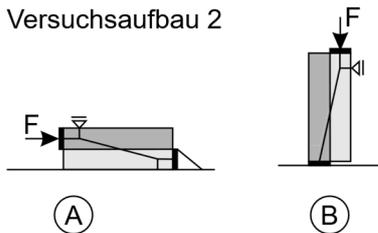
Bild 2.52: Versuchsaufbau der Scherversuche [66]

Neben den Scherversuchen werden häufig auch Verbundversuche durchgeführt, um die Eignung von Klebstoffen oder anderen Verbindungsmitteln zum Herstellen von HBV-Bauteilen zu untersuchen. Meistens wird die sich einstellende Relativverschiebung zwischen Holz und Beton mit aufgezeichnet, um zu klassifizieren, ob das untersuchte Verbindungsmittel zu einer starren oder nachgiebigen Verbindung führt. Verbundversuche für Prüfkörper aus geklebtem HBV sind normativ nicht geregelt und es sind verschiedene Aufbauten bekannt. Einen Überblick über gängige Versuchsaufbauten gibt [36, S. 63-71], siehe Bild 2.53 links. Das sind Push-out-Versuche, die aus drei Schichten und zwei Klebefugen bestehen (Bild 2.53 links oben) oder Versuche aus zwei Schichten mit einer Klebefuge. So führten [78, 97, 128] Verbundversuche als Push-out-Versuche mit unterschiedlichen Holzarten, Betonfestigkeitsklassen und Betonoberflächenbehandlungen sowie Klebefugenlängen durch. Alle drei Untersuchungen nutzten einen Epoxydharzklebstoff für die Verklebung und alle drei Untersuchungen führten zur Erkenntnis, dass von einer starren Verbindung der beiden Werkstoffe auszugehen ist. Um 14° geneigte Verbundversuche mit einer oder zwei Klebefugen in Anlehnung an DIN EN 408 [151] führten [21, 33, 55, 72, 113] durch. Den Versuchsaufbau von [72, 113] zeigt Bild 2.53 rechts. [113] erzielte bei den Verbundversuchen mit Fichte, verklebt mit einem kalthärtenden Zwei-Komponenten-Epoxydharz Verbundfestigkeiten zwischen ca. 6 N/mm² und knapp 8 N/mm². Bei den Versuchen trat häufig Substratversagen im Beton auf, weshalb [113] den Beton als schwächsten Fügepartner einstufte. [33, 55] untersuchten mithilfe der geneigten Druckschubversuche unter anderem die Eignung von Polymermörtel auf Basis von Epoxydharz für die Verklebung von Holz und Beton. Neben Polymermörtel analysierte [33] die Anwendbarkeit eines Epoxydharzes, besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Art die Klebstoffe aufzubringen gelegt.

Versuchsaufbau 1



Versuchsaufbau 2



© Fraunhofer WKI, Manuela Lingnau

a) Typen von Verbundversuchen nach [36]

b) Verbundversuche aus [72]

Bild 2.53: Unterschiedliche Arten von Verbundversuchen

Das Tragverhalten von geklebten HBV-Bauteilen im Maßstab 1:1 wird mittels Bauteilversuchen beurteilt. In der Literatur finden sich etliche veröffentlichte Versuche hierzu. Bei allen dokumentierten Versuchen handelt es sich um Vier-Punkt-Biegeversuche, da sich die Untersuchungen auf Plattenbauteile für die Verwendung in Decken oder Brücken beziehen. Ebenso war bei fast allen Versuchskörpern die Verklebung von Holz und Beton mit einem Epoxydharz hergestellt. Andere Parameter wie Holzsorte, Betonfestigkeitsklasse sowie Betonoberflächenbehandlung und Querschnittsabmessungen variierten. Tabelle 2.9 listet einige der veröffentlichten Versuche auf, bei denen die Verklebung mit Epoxydharz hergestellt wurde. Die Abmessungen des Holzes und des Betons sowie die Spannweite sind ca.-Angaben, da diese teilweise aus anderen Einheiten umgerechnet wurden. Für die Versuche wurden überwiegend Fichte und Douglasie verwendet. Dabei kamen Holzquerschnitte mit Breiten zwischen 38 mm und 240 mm sowie Höhen von 140 mm und 600 mm zum Einsatz. Bei den Untersuchungen wurde entweder normalfester Beton (NFB) oder UHFB verwendet. Die Betonplattenbreite variiert zwischen 80 mm bei BSH-Trägern mit einer aufgeklebten Lamelle aus UHFB und 2500 mm für den Einsatz bei Brücken. Bei den Untersuchungen kamen Betonplattendicken zwischen 20 mm bei [97] und 80 mm bei [51] zum Einsatz. Es gab drei unterschiedliche Betonoberflächenbehandlungen: eine schalglatte Oberfläche, die mit einer Stahlbürste abgebürstet wurde, eine geschliffene und eine sandgestrahlte Oberfläche. Die Spannweite bei den 4-Punkt-Biegeversuchen deckt einen Bereich zwischen 2,0 m und 10,0 m ab.

Bei [87, 88] versagten sieben der neun Bauteilversuche in der Fuge Klebstoff-Beton. Nach [87] ist die Scherfestigkeit des normalfesten Betons maßgebend für die Scherfestigkeit der Klebeverbindung. Bei den restlichen Versuchen trat fast kein Versagen in der Klebefuge auf, sondern überwiegend im Holz. Alle Veröffentlichungen berichten von einem starren Verbund zwischen Holz und Beton.

Tabelle 2.9: Bauteilversuche an geklebten HBV-Bauteilen

		Quelle	[87]	[88]	[51]	[29]	[5]	[97]
		Jahr	1969	1970	2010	2010	2011	2010
Holz	Sorte		1	Douglasie	Fichte	Douglasie	Fichte	Fichte
	Breite	[mm]	70/140	38/76	90	80/130	240	100
	Höhe	[mm]	390/480	140/280	225	230/300	600	200
Beton	Art		NFB	NFB	NFB	UHFB	UHFB	UHFB
	Oberfl.		1	1	-	2	3	2
	Breite	[mm]	300/610	150/300	300	80/130	2500	1250
	Dicke	[mm]	70	51	80	40	70	20
Versuche	Spannw.	[m]	4,0	3,6	4,0	2,0/5,1	10,0	3,8
	Anzahl	[Stück]	5	4	10	6	1	2

Legende:

Betonoberflächenbehandlung

- 1 - schalglatt und mit einer Stahlbürste abgebürstet
- 2 - sandgestrahlt
- 3 - geschliffen

Holzsorte:

- 1 - Paratecoma Peroba

[66] führte 4-Punkt-Biegeversuche nach DIN EN 408 [151] mit auf Brettsperrholz oder Kastenträgern aufgeklebten Gehwegplatten aus Beton durch. Bei den Versuchen trat das Versagen nicht in der Klebefuge, sondern im Holz auf. Da die Gehwegplatten keine eigene Biegesteifigkeit aufweisen, ist nur von einer bauphysikalischen Optimierung auszugehen.

[113] beschreibt auch 4-Punkt-Biegeversuche im Bauteilmaßstab. Die Verklebung der Prüfkörper erfolgt mit einem innovativen Heißklebeverfahren. Aufgrund der unterschiedlichen Art der Verklebung werden diese Versuche nicht weiter betrachtet.

Aktuelle Untersuchungen beschäftigen sich mit der Entwicklung von geklebten Holz-Beton-Verbundbauteilen für den Einsatz bei Straßenbrücken, siehe Beispielsweise [33, 56]. Beide untersuchen, aufbauend auf kleinformatischen Vorversuchen, das Tragverhalten von Biegeträgern, die für die Nutzung bei Straßenbrücken vorgesehen sind. Die verwendeten Holzquerschnitte sind massiv und bestehen aus Blockverleimtem Brettschichtholz aus Fichte mit einer Breite von bis zu 1,10 m. Als Beton kamen planmäßig ein C45/55 und ein C30/37 zum Einsatz. Die Verklebung der Bauteile erfolgte mit einem Epoxydharz und mit Polymermörtel. Die fertiggestellten Prüfkörper wiesen eine Bauteilhöhe von 32 cm und 45 cm auf. Bei [33] variierte die Menge sowie die Anordnung des Klebstoffauftrags, [56] untersuchte zusätzlich die Eignung von eingeklebten Dübelleisten, teilweise waren hier die Holzträger mittels Vollgewindeschrauben verstärkt. Die Spannweite der 4-Punkt Biegeversuche betrug 8,0 m bei [33] und knapp 5,0 m bei [56]. Bei beiden Untersuchungen trat das Versagen der Bauteilversuche entweder im Holz oder im Beton auf. Sowohl [33] als auch [56] charakterisieren den Verbund der beiden Werkstoffe als starr.

2.8 Zusammenfassung

Viele Grundlagen sind vorhanden. Etliche Untersuchungen an geklebten Bauteilen aus Holz-Beton-Verbund zeigen die prinzipielle Eignung zur Herstellung von tragenden Bauteilen. Auch erläutern sie die Vor- und Nachteile, die eine Verklebung der beiden Werkstoffe mit sich bringt. Es zeigt sich jedoch, dass die Verwendung von Klebstoffen, die in der Brettsperrholzindustrie Anwendung finden, bisher nicht bzw. in einem äußerst geringen Umfang für die Verklebung von Holz und Beton verwendet wurden. Auch basierten die Untersuchungen zumeist auf dem Einsatz von dicken Klebefugen zwischen Holz und Beton. Die meisten Versuche mit Bauteilen aus HBV wurden an Biegebauteilen im 4-Punkt-Biegeversuch durchgeführt. Versuche an Prüfkörpern aus HBV, die überwiegend auf Normalkraft beansprucht werden, sind wenig bekannt, siehe [22]. Hingegen existieren etliche Veröffentlichungen zu Wänden aus HBV mit formschlüssiger oder mechanischer Verbindung beider Werkstoffe.

Zumeist wurden im Rahmen von Forschungsvorhaben zu geklebtem Holz-Beton-Verbund zunächst kleinformatische Scher- oder Verbundversuche und anschließend Bauteilversuche durchgeführt. Die kleinformatischen Versuche dienten dazu, unterschiedliche Klebstoffe, Betonsorten, Betonoberflächenvorbereitungen oder unterschiedliche Holzarten zu untersuchen. Bei kleinformatischen Scherversuche nach oder in Anlehnung an DIN EN 14080 [140] oder DIN EN 16351 [143] jeweils Anhang D sind als Ergebnisse häufig Scherfestigkeit und Bruchanteile angegeben. Normgemäß sind die Bruchflächen augenscheinlich zu beurteilen und die Bruchanteile visuell zu schätzen. Dieses Vorgehen kann, in Abhängigkeit des jeweiligen Begutachters zu streuenden Ergebnissen führen. Daher erarbeiteten [156,157] Methoden, um die Bruchanteile automatisch und anhand eines standardisierten Verfahren zu bestimmen. In beiden Arbeiten kommen Verfahren zum Einsatz, bei denen der Klebstoff oder das Holz eingefärbt und nach den Versuchen anhand eines bildgebenden Verfahrens ausgewertet wird.

Abschnitt 3

Kleinmaßstäbliche Versuche

3.1 Allgemeines

3.1.1 Ziel der Versuche

Ziel der kleinmaßstäblichen Versuche war es, herauszufinden, ob eine kraftschlüssige Verbindung der beiden Werkstoffe Holz und UHFB mit Klebstoffen, die standardmäßig in der Brettsperrholzproduktion Anwendung finden, möglich ist. Weiter war zu untersuchen, mit welchen Parametern sich eine aussichtsreiche Verklebung realisieren lässt.

Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen des Forschungsprojektes „Ultra High Performing Timber Walls – Einsatz von schlanken Lamellen aus ultrahochfestem Beton in Brettsperrholzwänden zur Steigerung der Tragfähigkeit“ und sind hier nochmals aufgeführt [83]. Im Vergleich zum Forschungsvorhaben wurden in dieser Arbeit die Bruchanteile der Bruchflächen mithilfe eines hyperspektralen bildgebendem Verfahren bestimmt und darauf aufbauend in Anlehnung an DIN EN 14080 [140] und DIN EN 16351 [143] ausgewertet.

3.1.2 Überlegungen zur Materialauswahl

Da in der Brettsperrholzproduktion fast ausschließlich Fichte zum Einsatz kommt, wurde in dieser Arbeit ausschließlich Fichte verwendet. Zunächst waren zwei Sorten von ultrahochfesten Betonen zu untersuchen. Bei der einen Sorte handelte es sich um eine klassische Labormischung, alle Inhaltsstoffe wurden einzeln von Hand abgewogen und gemischt. Die andere Sorte wurde aus einem Compound und den weiter erforderlichen Zutaten hergestellt. Der Compound wurde ausgewählt, da sich die Herstellung des Betons deutlich vereinfacht, auch in einer späteren Anwendung. Zudem weist der gewählte Compound im Vergleich zu konventionellem UHFB, der Mikrosilika enthält, einen reduzierten Carbon-Footprint auf [24, S. 26].

Als Klebstoffe kamen unter anderem ein MUF- und ein Ein-Komponenten-PU-Klebstoff zum Einsatz. Diese Art Klebstoffe wird standardmäßig in der Herstellung von Brettsperrholz verwendet. Im Holzbau sind neben diesen beiden Klebstoffen auch noch PRF und Zwei-Komponenten-PU-Klebstoffe im Einsatz, daher werden auch diese zwei Arten Klebstoff untersucht. In der Literatur finden sich bei der Verklebung von normalfestem Beton überwiegend Zwei-Komponenten-Epoxydharze. Gute Erfahrungen existieren auch beim Verkleben von UHFB mit Zwei-Komponenten-Epoxydharzen. Deshalb umfassen die Untersuchungen auch ein Zwei-

Komponenten-Epoxydharz. Hierbei handelt es sich um ein Harz, das sich unter anderem zum Einkleben von Bewehrung in Festbeton eignet.

3.1.3 Vorgehensweise

Für das Ziel der kleinmaßstäblichen Versuche waren sehr viele Versuche durchzuführen. Da die geplante Anwendung, der beschriebene Produktionsprozess und der Großteil der verwendeten Klebstoffe im Holzleimbau üblich sind, erfolgten die Versuche in Anlehnung an die Holzbaunormen DIN EN 14080 [140] und DIN EN 16351 [143]. Hierbei handelt es sich zunächst um eine umfassende Reihe an Druckscherversuchen, wie in Abschnitt 2.4.3.3 beschrieben. Darauf aufbauende Delaminierungsversuche folgten den Ausführungen in Abschnitt 2.4.3.4. Dieser Prozess erfolgte iterativ. So flossen die Erkenntnisse aus den Serien in die nachfolgenden ein. Den Hauptumfang bildeten die Druckscherversuche; die Delaminierungsversuche waren als Tastversuche konzipiert und wurden daher mit wenigen Prüfkörpern durchgeführt.

3.2 Scherversuche

3.2.1 Material und Methoden

3.2.1.1 Material und Versuchskörper

Die Versuchskörper bestanden aus einer mittig angeordneten Scheibe aus UHFB mit Sollabmessungen von 50 mm x 50 mm x 30 mm, welche beidseitig mit Holz verklebt wurde. Die Sollabmessungen des Holzes betragen 50 mm x 50 mm und einer Dicke von ca. 40 mm. Die genauen Abmessungen für die einzelnen Prüfkörper sind Anhang A zu entnehmen.

Zur Herstellung der Prüfkörper kam fehlerfreies Fichtenholz, herausgetrennt aus Lamellen der Festigkeitsklasse C24, zum Einsatz. Unmittelbar vor dem Verkleben wurden die Holzoberflächen gehobelt. Die Materialfestigkeiten wurden nicht mit einer zerstörenden Prüfung ermittelt, stattdessen dient die Rohdichte als Index für die Festigkeit. Die Rohdichte berechnete sich nach Gleichung (3-1).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3-1)$$

Mit	ρ	<i>Rohdichte</i>
	m	<i>Masse des Prüfkörpers</i>
	V	<i>Volumen des Prüfkörpers</i>

Ebenso wurde die Jahrringlage der Hölzer in Bezug zur Klebefuge bestimmt. Hierzu war der Mittelpunkt des betrachteten Holzprüfkörpers zu bestimmen und die Normale zum hier vorhandenen Jahrring anzuzeichnen. Der Winkel α wurde zwischen der Normalen zum Jahrring im Mittelpunkt und der Klebefuge gemessen, wie Bild 3.1 zeigt.

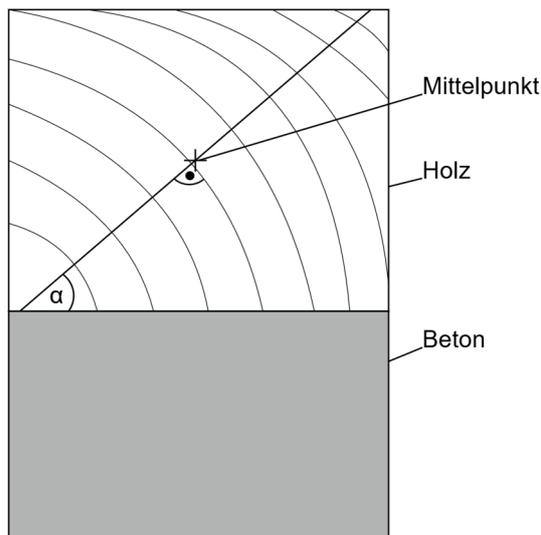


Bild 3.1: Bestimmung der Jahrringlage der verwendeten Prüfkörper

Die Holzfeuchte wurde im Darrverfahren nach DIN EN 13183-1 [138] an einem gesonderten Prüfkörper ermittelt, der aus der gleichen Lamelle wie die zu verklebenden Prüfkörper stammte. Hierzu wurde das Gewicht vor und nach dem Trocknen bestimmt und anschließend der Holzfeuchtegehalt nach Gleichung (3-2) berechnet.

$$\omega = \frac{m_n - m_T}{m_T} \quad (3-2)$$

Mit ω Holzfeuchte in [%]

m_n Masse des feuchten Prüfkörpers

m_T Masse des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand

Die Rohdichte schwankte zum Teil erheblich zwischen den einzelnen Serien mit Werten zwischen 346,16 kg/m³ und 458,42 kg/m³. Durch die Vorlagerung der zu verklebenden Hölzer im Normalklima lag die Holzfeuchte bei allen Serien zwischen 11,1 % und 11,8 %. Die Jahrringlage schwankte bei den einzelnen Serien zwischen 19,13 ° und 74,13 °. Tabelle 3.1 führt für jede Serie die Mittelwerte der Rohdichte, der Holzfeuchte und der Jahrringlage auf. Anhang A enthält die einzelnen Werte für jeden Prüfkörper.

Tabelle 3.1: Eigenschaften des verwendeten Holzes für die Scherversuche

Serie	Rohdichte [kg/m ³]	Holzfeuchte [%]	Jahrringlage [°]
1	346,16	11,5	36,44
2	351,21	11,5	19,13
3	352,95	11,5	52,00
4	412,83	11,5	65,50
5	422,18	11,6	52,38
6	431,80	11,6	68,50
7	399,74	11,6	40,63
8	413,04	11,6	45,63
9	406,04	11,8	39,38
10	458,42	11,8	60,00
11	456,90	11,8	60,38
12	456,74	11,8	61,38
13	426,48	11,1	66,13
14	418,53	11,1	74,13
15	433,92	11,1	52,25
16	400,13	11,1	43,13
17	405,13	11,1	42,38
18	384,08	11,1	48,50
19	387,12	11,1	45,50
20	380,28	11,1	45,25
21	421,45	11,1	61,25
22	418,61	11,1	58,75
23	423,23	11,1	63,88
27	413,09	11,2	60,13
28	413,01	11,2	59,50
29	413,06	11,2	60,38
33	416,52	11,2	56,25
34	415,77	11,2	57,88
35	416,02	11,2	57,5

Bei den Scherversuchen wurden drei Betonrezepturen untersucht. Bei den Mischungen F03 und F06 handelt es sich um Rezepturen mit dem Compound, F03 ohne Mikrostahtfasern, F06 mit Mikrostahtfasern. Tabelle 3.2 präsentiert die genauen Rezepturen der mit Compound hergestellten Mischungen für eine Frischbetonmenge von ca. 2,5 l; die Mengenangabe erfolgt in Gramm. Tabelle

3.3 enthält die Rezeptur für die Labormischung. Die in den Tabellen angegebenen Mischungen sind die Grundvarianten, ggf. wurden diese bei der Herstellung geringfügig angepasst.

Tabelle 3.2: Verwendete Betonrezepturen mit Compound

	F03	F06
Compound [g]	2.625	2.470
Sand 0/2 [g]		3.692
Sand 0/4 [g]	2.875	
Fließmittel [g]	45	36,4
Wasser [g]	420	450
Stahlfasern 09/0,15 [g]		312

Tabelle 3.3: Verwendete Betonrezeptur für die Labormischung

	F05
Zement Cem III A/ 52,5 N [g]	1.931,1
Quarzmehl [g]	467,8
Quarzsand 0,125 – 0,5 mm [g]	2.278,7
Mikrosilika [g]	407,5
Fließmittel [g]	65,5
Wasser [g]	418,8
Stahlfasern 09/0,15 [g]	494,6

Hergestellt wurden aus jeder Mischung 20 Scheiben mit den Abmessungen 50 mm x 50 mm x 30 mm in einer mit Schalfett vorbehandelten POM-Schalung, sowie 3 Prismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm zur Bestimmung der Festbetoneigenschaften. Die Betonscheiben und die Prismen lagerten für ein bis zwei Tage im Feuchtschrank und härteten anschließend an der Luft aus. Die Betonscheiben und die Prüfkörper der Mischung F03 wurden nach der Lagerung im Trockenschrank bei 90°C für zwei Tage wärmebehandelt. Die Festbetoneigenschaften, Biegezug- und Druckfestigkeit, wurden in Anlehnung an DIN EN 196-1 [145] an Prismen bestimmt. Die im Dreipunktbiegezugversuch bestimmte Biegezugfestigkeit berechnet sich nach Gleichung (3-3) und die Druckfestigkeit nach Gleichung (3-4).

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b^3} \quad (3-3)$$

- Mit R_f *Biegezugfestigkeit*
- b *Seitenlänge des Querschnitts des Prismas*
- F_f *Bruchlast Biegezugversuch*
- l *Spannweite zwischen den Tragrollen*

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3-4)$$

- Mit R_c *Druckfestigkeit*
- F_c *Bruchlast Druckversuch*

Die Mischung F03 erreichte Biegezugfestigkeiten im Bereich von ca. 14 N/mm² und Druckfestigkeiten zwischen 105,67 und 119,39 N/mm². Die Mischung F05 erzielte im Vergleich zur Mischung F03 höhere Biegezug- und Druckfestigkeiten. Die erreichten Werte lagen hier bei 40,08 bzw. 44,52 N/mm² Biegezugfestigkeit und 216,24 bzw. 218,50 N/mm² Druckfestigkeit. Die Biegezugfestigkeit der Mischung F06 schwankte zwischen 14,71 N/mm² und 19,43 N/mm², die Druckfestigkeit lag im Bereich von ca. 150 N/mm². Tabelle 3.4 enthält die Mittelwerte der Druck- und Biegezugfestigkeit für die einzelnen Mischungen sowie das Prüfalter im Detail. Die Einzelwerte der Prismen sind Anhang A zu entnehmen.

Tabelle 3.4: Festbetonkennwerte Scherversuche

Mischung	Alter [d]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]
F03-161117	14	110,71	14,38
F03-021217	5	105,67	14,29
F03-041217	9	114,18	14,28
F03-051217	8	119,39	13,93
F05-301117	8	218,50	44,52
F05-061217	7	216,24	40,08
F06-300118	3	143,27	14,71
F06-020218	13	151,18	19,43
F06-090218	11	156,12	18,02

Die Oberflächen der Betonscheiben wurden a) schalglatt belassen und mit Aceton entfettet, b) mit einer Probenschleifmaschine geschliffen oder c) manuell sandgestrahlt.

In den Untersuchungen kamen fünf Klebstoffe zur Anwendung: ein Ein-Komponenten-PU (1k-PU), ein Zwei-Komponenten-PU (2k-PU), ein MUF, ein PRF und ein Zwei-Komponenten-Epoxydharz (Epoxy). Die Klebstoffauftragsmenge betrug immer 400 g/m². Zur

Prüfkörperherstellung wurde der Klebstoff auf einen Holzprüfkörper aufgetragen, durch Aneinanderreiben der zwei Holzprüfkörper gleichmäßig auf die zwei Klebeflächen verteilt und anschließend mit dem Beton verklebt. Zum Verkleben betrug der Pressdruck $0,75 \pm 0,1 \text{ N/mm}^2$, welcher immer länger als die Mindestpressdauer laut Herstellerangaben konstant gehalten wurde. Im Anschluss erfolgte der Ausbau der Prüfkörper sowie das Aushärten der Klebefugen bei mindestens 7 Tagen im Normalklima.

Die unterschiedlichen Betonmischungen, Betonoberflächen und Klebstoffe wurden kombiniert, sodass sich die in Tabelle 3.5 gezeigte Versuchsmatrix ergab. Ausgangsserien waren die Serien 1 bis 12. Darauf aufbauend folgten die Serien 13 bis 15. Serie 16 diente dazu, die erzielten Werte der Serie 15 zu verifizieren. Anhand von Serie 17 wurde der Einfluss des Schalfettes in der POM-Schalung untersucht. Für jede Serie wurden vier Prüfkörper hergestellt; jeder Prüfkörper besaß zwei Scherflächen, wodurch jede Serie zu acht Versuchsergebnissen führte.

Tabelle 3.5: Versuchsmatrix Scherversuche

Serie	Betonmischung	Oberfläche	Klebstoff
1	F03-161117	Schalglatt	1k-PU
2	F03-161117	Sandgestrahlt	1k-PU
3	F03-161117	Geschliffen	1k-PU
4	F03-021217	Schalglatt	PRF
5	F03-021217	Geschliffen	PRF
6	F03-021217	Sandgestrahlt	PRF
7	F03-041217	Schalglatt	MUF
8	F03-041217	Geschliffen	MUF
9	F03-041217	Sandgestrahlt	MUF
10	F03-051217	Schalglatt	2k-PU
11	F03-051217	Geschliffen	2k-PU
12	F03-051217	Sandgestrahlt	2k-PU
13	F05-301117	Schalglatt	1k-PU
14	F05-301117	Geschliffen	1k-PU
15	F05-301117	Sandgestrahlt	1k-PU
16	F05-301117	Sandgestrahlt	1k-PU
17	F05-061217	Schalglatt, ohne Fett	1k-PU
18	F05-061217	Schalglatt	PRF
19	F05-061217	Geschliffen	PRF
20	F05-061217	Sandgestrahlt	PRF
21	F06-310118	Schalglatt	1k-PU
22	F06-310118	Geschliffen	1k-PU
23	F06-310118	Sandgestrahlt	1k-PU
27	F06-020218	Schalglatt	2k-PU
28	F06-020218	Geschliffen	2k-PU
29	F06-020218	Sandgestrahlt	2k-PU
33	F06-090218	Schalglatt	Epoxy
34	F06-090218	Geschliffen	Epoxy
35	F06-090218	Sandgestrahlt	Epoxy

3.2.1.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgte in Anlehnung an DIN EN 14080 [140] Anhang D in einem Prüfportal mit einem 50 kN-Zylinder. Die Versuchsdurchführung war weggesteuert, mit einer

Geschwindigkeit von 6 mm/min. Die Prüfmaschine zeichnete die Prüfkraft auf, es war keine weitere Messtechnik angebracht. Die Prüfkörper waren so angeordnet, dass das Abscheren im Holz parallel zur Faser erfolgte. Bild 3.2 zeigt den Versuchsaufbau mit eingebautem Prüfkörper.



Bild 3.2: Versuchsaufbau Scherversuche, aus [83, S. 11]

3.2.1.3 Versuchsauswertung

Die Beurteilung der Versuchsergebnisse erfolgte aufbauend auf der Scherfestigkeit und dem Bruchbild. Die Scherfestigkeit berechnet sich aus der im Versuch erzielten Bruchkraft und der geometrischen Scherfläche nach Gleichung (3-5):

$$f_v = \frac{F_v}{A} \quad (3-5)$$

Mit F_v Bruchlast Scherversuch [N]

A Scherfläche [mm²]

Die Charakterisierung der Bruchbilder erfolgte in einem anderen Verfahren, als es DIN EN 14080 [140] oder DIN EN 16351 [143] beschreiben. So wurden die Bruchbilder nicht augenscheinlich bewertet und der Faserbruchanteil wurde nicht auf die nächsten 5 % gerundet angegeben. Vielmehr wurden von den Bruchflächen Hyperspektralaufnahmen angefertigt und die jeweiligen Bruchanteile automatisch, anhand vorgegebener Kriterien, bestimmt.

In den Laboren der Stemmer Imaging AG wurden die Hyperspektralaufnahmen angefertigt. Verwendet wurde dafür eine Specim-FX17-Hyperspektralkamera, die im Wellenlängenbereich zwischen 900 nm und 1700 nm und als Zeilenkamera („Push Broom“) arbeitet. Die Prüfkörperbeleuchtung erfolgte mit zwei gebündelten Halogenscheinwerfern während der Aufnahme. Bild 3.9 zeigt den Aufbau zum Anfertigen der Aufnahmen. Um ein vollständiges Bild

der Bruchflächen zu erhalten, wurden die Prüfkörper auf einem Encoder unter der Kamera hindurchgezogen. Betonseite und Holzseite jeder Bruchfläche wurden gleichzeitig aufgenommen.

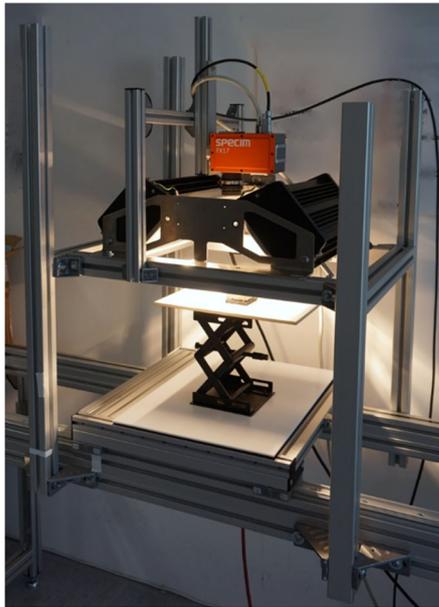


Bild 3.3: System zum Anfertigen der Hyperspektralaufnahmen

Für die Weiterverarbeitung wurden die hyperspektralen Aufnahmen in die Software Perception Studio eingelesen. Manuell wurden Bereiche gekennzeichnet, die eindeutig einzelnen Materialien zuzuordnen waren. Gekennzeichnet wurden immer die Bereiche Holz, Beton sowie Klebstoff auf Holz und Klebstoff auf Beton. Damit ließen sich den einzelnen Materialien, Holz und Beton, und auch Material-Kombinationen, wie Klebstoff auf Beton und Klebstoff auf Holz, spezifische Spektren zuzuordnen. Bild 3.4 zeigt beispielsweise die Spektren, die in Serie 1 erzeugt wurden. Aufgetragen ist die von der Kamera aufgezeichnete reflektierte Intensität bei einer spezifischen Wellenlänge für die jeweiligen Materialien bzw. Bereiche.

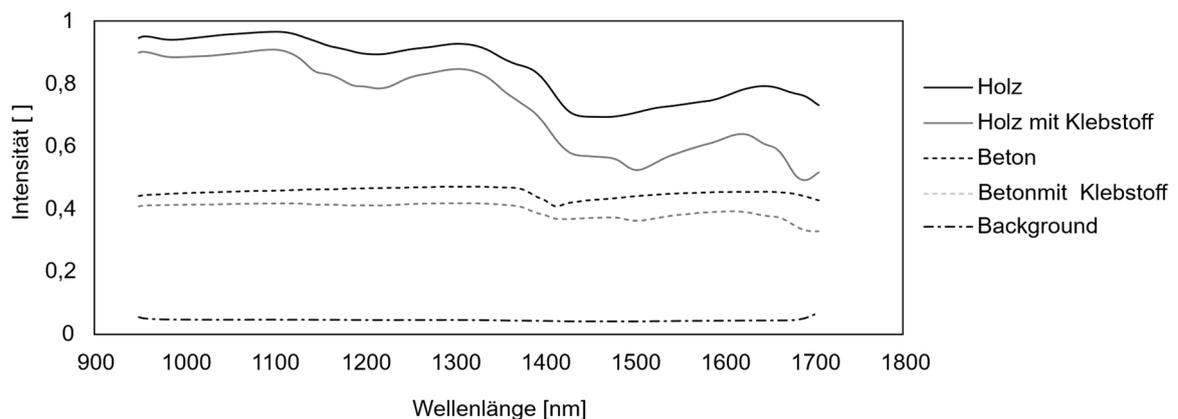
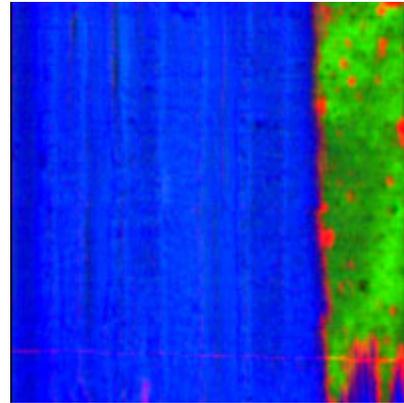


Bild 3.4: Reflektionsspektren der unterschiedlichen Werkstoffe bzw. betrachteten Bereiche von Serie 1

Mit den gewonnenen Spektren wurden Modelle erstellt, mithilfe derer sich die chemische Information in farbliche Information übersetzen lässt. Mit diesen Modellen ließen sich die einzelnen Bruchflächen auswerten. In dieser Arbeit ist das Spektrum für Holz in Blau übersetzt, das für Beton

in Grün und die Spektren für Klebstoff auf Holz bzw. Klebstoff auf Beton in Rot, der Hintergrund in Schwarz. Bild 3.5 zeigt dies exemplarisch für die Scherfläche B von Prüfkörper 1. Teilbild a) stellt ein Farbbild der Bruchfläche nach dem Versuch dar und Teilbild b) zeigt das dazugehörige, aus der chemischen Information übersetzte Farbbild.



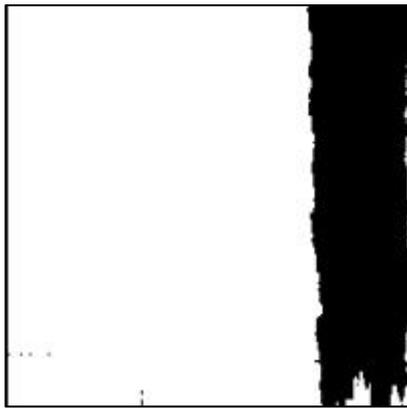
a) Farbbild der Scherfläche B von Prüfkörper 1

b) Übersetzte HSI-Aufnahme in RGB-Farbbild

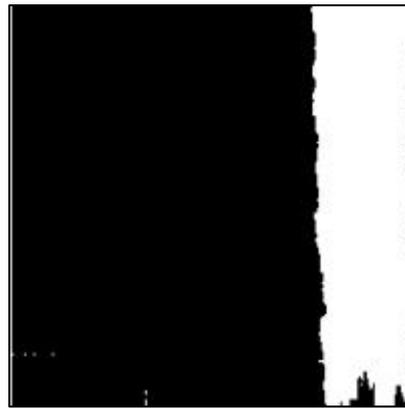
Bild 3.5: Prüfkörper 1, Scherfläche B – Farbbild und übersetzte HSI-Aufnahme

Die Software Perception Studio übersetzte die chemische Information, stellte sie als Farbbild im RGB-Farbraum dar und exportierte das Farbbild. Die exportierten Farbbilder im RGB-Farbraum setzten sich aus drei Matrizen mit gleicher Anzahl an Zeilen und Reihen zusammen. Die Zeilen und Reihen kennzeichnen die Position des Bildpunktes, die Einträge in jeder der drei Matrizen spiegeln die Intensität der in den hyperspektralen Aufnahmen gewonnenen chemischen Information wider. Jeder Bildpunkt enthält farblich codiert die chemische Information über das detektierte Material an dieser Position. Detektiert das System in der Bruchfläche Holz, wird der Bildpunkt an dieser Position blau eingefärbt. Der Eintrag in der „B“-Matrix ist hoch, in der „R“- und „G“-Matrix ist der eingetragene Wert niedrig. Identisch verhält es sich mit den anderen Materialien, die zuvor gekennzeichnet wurden.

Um die Farbbilder auszuwerten, wurden sie in Matlab eingelesen, und zunächst zurechtgeschnitten, gedreht und auf die gleiche Größe skaliert. Darauf aufbauend erfolgte die Ausrichtung der beiden Bilder zueinander basierend auf dem Algorithmus nach [41]. Im Anschluss daran erfolgte die Bildauswertung. Zur Bestimmung des Holzbruchanteils war die Betonseite der geprüften Scherfläche zu betrachten. Überwog der Blauanteil, wurde dieser Bildpunkt als Holzbruch detektiert. Für die Bestimmung des Betonbruchanteils war die Holzseite zu betrachten. Überwog der Grünanteil, wurde Betonbruch detektiert. Jeder Bildpunkt, der nicht als Holz- oder Betonbruch detektiert werden konnte, wurde als Grenzflächenversagen ausgewiesen. Exemplarisch zeigt Bild 3.6 den automatisch bestimmten Holzbruchanteil in Teilbild a) und das Grenzflächenversagen von Scherfläche B von Prüfkörper 1. Die Bildpunkte, die einer bestimmten Versagensart zugewiesen sind, erscheinen weiß, die anderen Bildpunkte sind schwarz.



Holzbruch



b) Grenzflächenversagen,

Bild 3.6: Prüfkörper 1, Scherfläche B – automatisch bestimmte Bruchanteile

Im Anschluss waren die prozentualen Bruchanteile zu berechnen, indem die Anzahl an Bildpunkten, die einer bestimmten Bruchart zugewiesen wurden auf die gesamte Anzahl an Bildpunkten bezogen wurde.

Neben den einfach zu bestimmenden Bruchanteilen Holzbruch, Betonbruch und Grenzflächenversagen lässt sich insbesondere das Grenzflächenversagen detaillierter betrachten. Hierzu ist es erforderlich, die Bilder der beiden Bruchflächen möglichst genau übereinander zu positionieren, dann die jeweiligen Bildpunkte auf der Betonseite und der Holzseite der geprüften Scherfläche zu betrachten und anhand vorgegebener Kriterien einer Versagensart zuzuweisen. Hier besteht noch Forschungsbedarf. Vor allem ist noch zu klären, welche Kriterien zur Auswertung gewählt und wie die dazugehörigen Grenzwerte gesetzt werden. Daher bezieht diese Arbeit ausschließlich den Holzbruchanteil, den Betonbruchanteil und das Grenzflächenversagen in die Auswertungen ein.

Die Versuche wurden anhand der Kriterien in DIN EN 14080 [140] und DIN EN 16351 [143], wie in Abschnitt 2.4.3.3 beschrieben, ausgewertet und in Diagrammform dargestellt. Anstelle des Faserbruchanteils war das prozentuale Fügeiteilver sagen Auswertungskriterium. Das Fügeiteilver sagen berechnete sich aus der Summe der Holzbruch- und Betonbruchanteile. Zudem wurde für jede Serie die charakteristische Scherfestigkeit $f_{v,k}$ nach DIN EN 14358 [142], Abschnitt 3.2.2 berechnet, für die Scherfestigkeit eine Normalverteilung angenommen und zur Bestimmung von $k_s(n)$ Gleichung (3-6), entspricht Gleichung 10 aus DIN EN 14358 [142], verwendet.

$$k_s(n) = \frac{6,5 \cdot n + 6}{3,7 \cdot n - 3} \quad (3-6)$$

Mit n Anzahl der Prüfergebnisse

3.2.2 Ergebnisse und Diskussion

3.2.2.1 Verklebung mit MUF

Bild 3.7 zeigt das prozentuale Fügeiteilveragen in Abhängigkeit der Scherfestigkeit der mit MUF verklebten Prüfkörper. Die durchgezogene Linie kennzeichnet das prozentuale Mindestfügeiteilveragen in Abhängigkeit der Scherfestigkeit nach Tabelle 10 aus DIN EN 14080 [140] für einen einzelnen Versuch, die strichpunktierte Linie das prozentuale Mindestfügeiteilveragen für den Mittelwert einer Serie. Die Punkte, Quadrate und Rauten in unterschiedlichen Grautönen stellen die im Versuch erzielten Ergebnisse für jeweils eine Scherfläche einer bestimmten Serie dar. Die Kreuze in den dazugehörigen Grautönen sind die Mittelwerte für die Serie. Zudem ist für jede Serie die charakteristische Scherfestigkeit $f_{v,k}$ angegeben, was als Auswertekriterium nach DIN EN 16351 [143] dient.

Unabhängig von der Betonoberfläche gab es in den Versuchen nur einen sehr geringen Prozentsatz Fügeiteilveragen, maximal ca. 18 %. Die Scherfestigkeit schwankt zwischen ca. 1,7 N/mm² und 7,0 N/mm². Das Versagen trat überwiegend im Klebstoff auf, beide Fügeiteile zeigten wenig Ausrisse. Des Öfteren waren Anhaftungen von Holzfasern auf dem Beton zu erkennen, welche in der hyperspektralen Auswertung nicht als Holzbruch, sondern als Grenzflächenversagen detektiert wurden. Bild 3.8 zeigt typische Bruchbilder von mit MUF verklebten Prüfkörpern nach der Versuchsdurchführung. Zu erkennen sind hier die feinen Holzhaftungen. Kein einziger Versuch dieser Serien erfüllt die Mindestanforderungen gemäß DIN EN 14080 [140]. Ebenso unterschreiten alle drei Serien die nach DIN EN 16351 [143] zu erzielende Mindestscherfestigkeit von 3,5 N/mm².

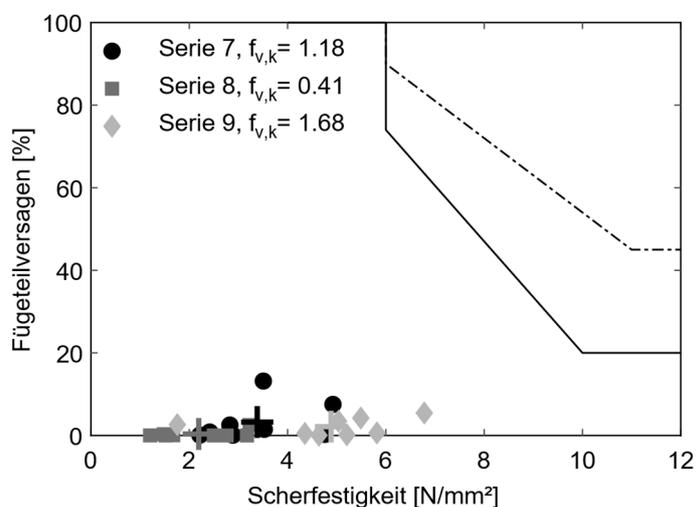


Bild 3.7: Scherfestigkeit und prozentuales Fügeiteilveragen der mit MUF verklebten Prüfkörper

Auch bei den Versuchen von Schäfers fand das Versagen der mit Melaminharz-Klebstoff verklebten Prüfkörper überwiegend in der Klebefuge statt [97, S. 96]. Wie in Abschnitt 2.4.2.5 beschrieben, benötigt MUF zum Aushärten ein saures Milieu. Es wird vermutet, dass die Polykondensationsreaktion zur Ausbildung der Klebstoffpolymere durch die hohe Alkalität des Betons gestört wird und es deswegen nicht zur Ausbildung der erforderlichen Adhäsions- und

Kohäsionskräfte kommt. Aufgrund der geringen Scherfestigkeiten werden keine weiteren Versuche mit MUF durchgeführt.



a) Betonseite der Scherfläche A von Prüfkörper 28 b) Betonseite der Scherfläche A von Prüfkörper 30

Bild 3.8: **Bruchbilder von Scherversuchen nach der Versuchsdurchführung, verklebt mit MUF**

3.2.2.2 Verklebung mit PRF

In Bild 3.9 sind die Ergebnisse der Prüfkörper gezeigt, welche mit PRF und Beton der Mischung F03 verklebt wurden. Die erzielten Scherfestigkeiten liegen im Bereich zwischen ca. 3,0 N/mm² und 8,5 N/mm², das dazugehörige Fügeteilversagen zwischen 35 % und 100 %. Scherfestigkeit und Fügeteilversagen unterliegen einer großen Streuung: Scherfestigkeit ca. 5,5 N/mm² und Fügeteilversagen 65 %. Zum Teil erfüllen einzelne Versuche die Mindestanforderungen nach DIN EN 14080 [140]; das Mittelwertkriterium erfüllt keine Serie. Die charakteristische Scherfestigkeit der Serien 5 und 6 liegt mit $f_{v,k, \text{Serie 5}} = 3,52 \text{ N/mm}^2$ und $f_{v,k, \text{Serie 6}} = 5,04 \text{ N/mm}^2$ oberhalb der in DIN EN 16351 [143] geforderten 3,5 N/mm²; Serie 4 erfüllt diese Mindestanforderung nicht.

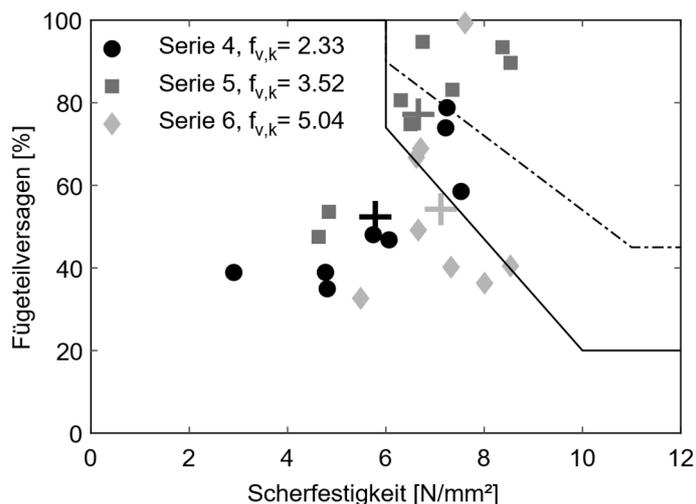


Bild 3.9: **Scherfestigkeit und prozentuales Fügeteilversagen der mit PRF verklebten Prüfkörper mit Beton F03**

Zudem wurde mit dem PRF auch Beton der Mischung F05 verklebt. Die in den Versuchen erzielten Ergebnisse zeigt Bild 3.10. Auch hier ist eine große Streuung der Scherfestigkeit im Bereich zwischen ca. 1,9 N/mm² und etwa 11,0 N/mm² zu erkennen. Das prozentuale Fügeiteilversagen variiert zwischen 2 % und 90 %. Teilweise erfüllen einzelne, mit geschliffener Betonoberfläche verklebte Prüfkörper die Mindestanforderung aus DIN EN 14080 [140] hinsichtlich des Einzelwertkriteriums. Das Mittelwertkriterium erfüllt keine Serie. Nur Serie 19 erfüllt die Vorgaben aus DIN EN 16351 [143], die charakteristische Scherfestigkeit liegt bei den anderen beiden Serien 18 und 20 unterhalb von 3,5 N/mm².

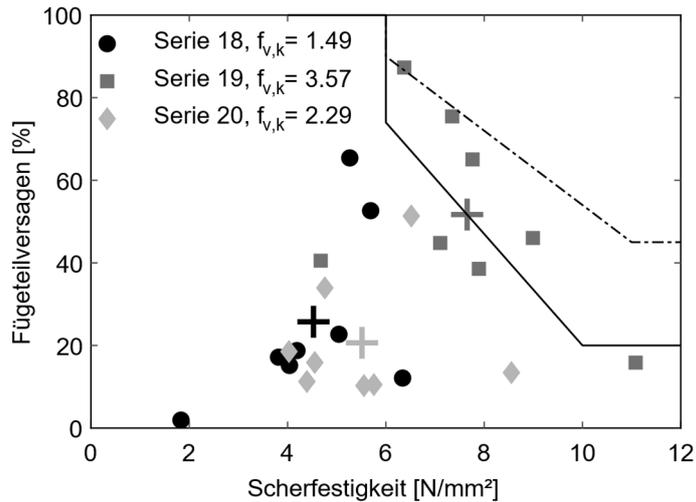


Bild 3.10: Scherfestigkeit und prozentuales Fügeiteilversagen der mit PRF verklebten Prüfkörper mit Beton F05

Bei mit PRF verklebten Prüfkörpern wurde häufig Klebstoffversagen detektiert, wie in Bild 3.11, Teilbild b) zu sehen ist. Einige Prüfkörper wiesen jedoch Holzbruchanteile auf, welche Bild 3.11 Teilbild a) zeigt. Wie MUF benötigt PRF ein saures Milieu zum Aushärten, was vermutlich durch die Alkalität des Betons gestört wird.



a) Betonseite der Scherfläche B von Prüfkörper 13

b) Betonseite der Scherfläche B von Prüfkörper 69

Bild 3.11: Bruchbilder von Scherversuchen nach der Versuchsdurchführung, verklebt mit PRF

3.2.2.3 Verklebung mit 2k-PU

Bild 3.12 zeigt die Ergebnisse der Prüfkörper aus Beton der Mischung F03, verklebt mit dem 2k-PU. Alle Scherfestigkeiten sind größer als 6,0 N/mm², die meisten Einzelversuche erfüllen das Einzelwertkriterium nach DIN EN 14080 [140], die Serien mit geschliffener und schalglatter Betonoberfläche erfüllen ebenso das Mittelwertkriterium. Die geringste charakteristische Scherfestigkeit mit 6,34 N/mm² erreichte die Serie mit der sandgestrahlten Betonoberfläche.

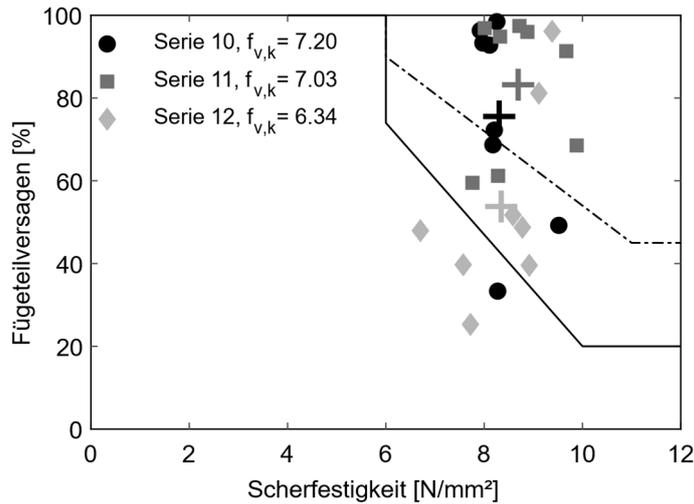


Bild 3.12: Scherfestigkeit und prozentuales Fügeteilversagen der mit 2k-PU verklebten Prüfkörper mit Beton F03

Die Prüfkörper der Serien 27,28 und 29 erfüllten alle, bis auf eine Scherfläche der geschliffenen Oberfläche, das Einzelwertkriterium nach DIN EN 14080 [140]. Das Mittelwertkriterium erfüllt nur Serie 27 mit schalglatter Betonoberfläche. Die Serien 28 und 29 erfüllen das Mittelwertkriterium nicht, wie in Bild 3.13 dargestellt. Auch bei diesen drei Serien ist die charakteristische Scherfestigkeit der sandgestrahlten Oberfläche mit 4,93 N/mm² am geringsten.

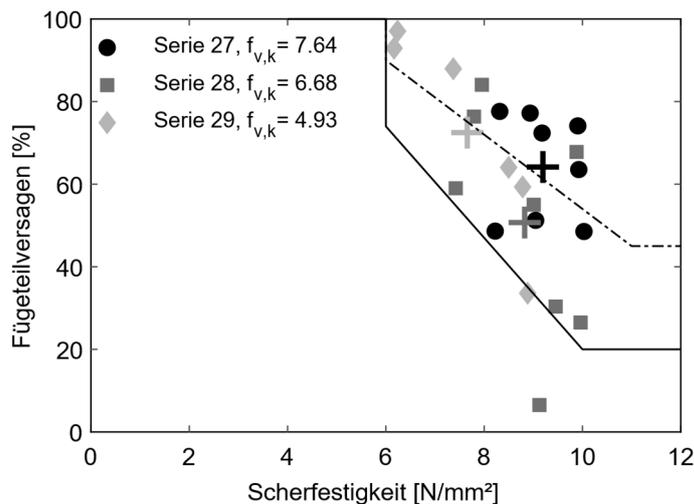


Bild 3.13: Scherfestigkeit und prozentuales Fügeteilversagen der mit 2k-PU verklebten Prüfkörper mit Beton F06

Die Ergebnisse dieser Versuche sind hinsichtlich der Auswertung gemäß DIN EN 16351 [143] positiv. Alle sechs Serien weisen eine größere charakteristische Scherfestigkeit auf als in der Norm gefordert. Unabhängig von der verwendeten Betonrezeptur erzielten die Serien mit der sandgestrahlten Betonoberfläche die geringsten charakteristischen Scherfestigkeiten.

3.2.2.4 Verklebung mit Epoxydharz

Bei den Versuchen mit Epoxydharz waren die Ergebnisse ebenfalls gut, siehe Bild 3.14. Bis auf einen Wert je Serie erzielten alle Scherflächen ein höheres prozentuales Fügeiteilveragen als in DIN EN 14080 [140] gefordert und die Scherfestigkeit aller Einzelversuche ist größer als $6,0 \text{ N/mm}^2$. Das in DIN EN 14080 [140] geforderte Mittelwertkriterium erfüllen die Serien 33 und 34, Serie 35 gerade nicht. Alle drei Serien weisen ein $f_{v,k}$ von größer $3,5 \text{ N/mm}^2$ auf.

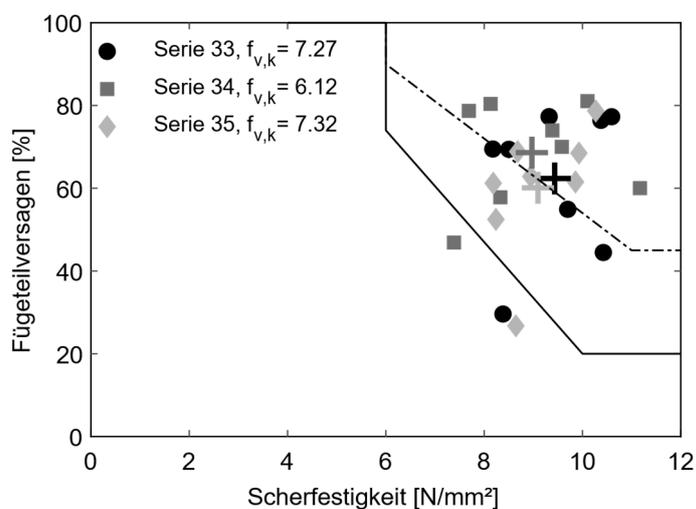


Bild 3.14: Scherfestigkeit und prozentuales Fügeiteilveragen der mit Epoxydharz verklebten Prüfkörper mit Beton F06

3.2.2.5 Verklebung mit 1k-PU

Das Hauptaugenmerk lag auf der Verklebung von Holz und UHFB mit einem 1k-PU-Klebstoff. Die Ergebnisse der ersten Untersuchungsreihe, der Verklebung mit dem Beton der Mischung F03, zeigt Bild 3.15. Die Scherfestigkeiten aller Einzelversuche liegen im Bereich um $6,0 \text{ N/mm}^2$, das prozentuale Fügeiteilveragen schwankt zwischen fast 0 % und fast 100 %. Auffallend ist: Das prozentuale Fügeiteilveragen der Versuche von Serie 2 mit sandgestrahlter Betonoberfläche fällt im Vergleich zu den anderen beiden Oberflächen deutlich geringer aus. Bis auf zwei Einzelversuche der Serie 3, zwei Einzelversuche der Serie 1 sowie alle Versuche der Serie 2 erfüllen die restlichen Versuche das Einzelwertkriterium nach DIN EN 14080 [140]. Das Mittelwertkriterium erreicht keine der drei Serien. Hingegen liegt die charakteristische Scherfestigkeit aller drei Serien oberhalb von $3,5 \text{ N/mm}^2$; damit bestehen alle drei Serien der Anforderungen die DIN EN 16351 [143]. Serie 2 mit der sandgestrahlten Betonoberfläche weist die geringste charakteristische Scherfestigkeit mit $f_{v,k} = 4,56 \text{ N/mm}^2$ auf.

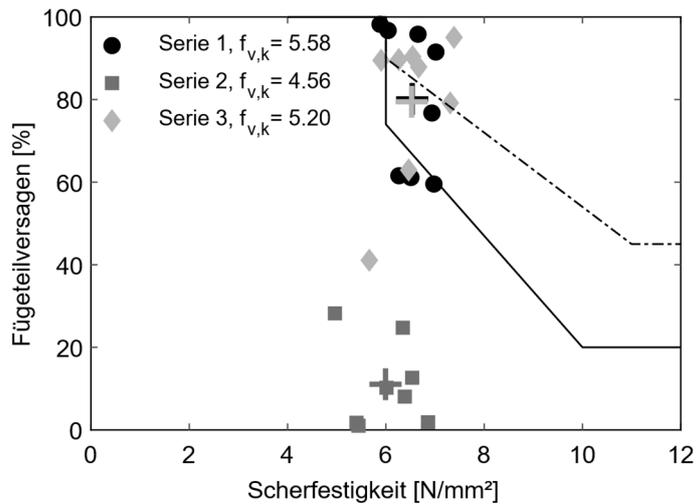


Bild 3.15: Scherfestigkeit und prozentuales Fügeteilversagen der mit 1k-PU verklebten Prüfkörper mit Beton F03

Ähnliche Ergebnisse, dargestellt in Bild 3.16, zeigten die Serien 13,14 und 15 – der Verklebung mit Beton der Mischung F05. Die Prüfkörper mit schalglatter und geschliffener Betonoberfläche erfüllen das Einzelwertkriterium aus DIN EN 14080 [140] meistens, bei der sandgestrahlten Betonoberfläche die wenigsten. Die Scherfestigkeit von 22 der 24 hier betrachteten Ergebnisse liegt im Bereich von und oberhalb von 6,0 N/mm². Das prozentuale Fügeteilversagen variiert zwischen knapp 0 % und 100 %. Aufgrund der überwiegend positiven Ergebnisse entspricht Serie 14, mit der geschliffenen Betonoberfläche auch den Anforderungen aus DIN EN 14080 [140] hinsichtlich des Mittelwertkriteriums. Die Serien 13 und 14 erfüllen das Kriterium aus DIN EN 16351 [143]. Die geringste charakteristische Scherfestigkeit mit $f_{v,k} = 2,74$ N/mm² erzielte Serie 15, mit der sandgestrahlten Betonoberfläche.

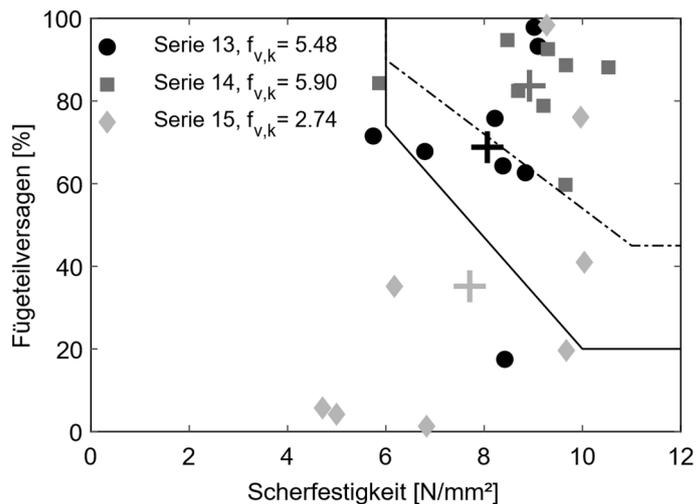


Bild 3.16: Scherfestigkeit und prozentuales Fügeteilversagen der mit 1k-PU verklebten Prüfkörper mit Beton F05

Da bei den Serien 13,14 und 15 die Serie mit der sandgestrahlten Betonoberfläche die schlechtesten Resultate erzielte, wurde diese Serie wiederholt. Bild 3.17 zeigt die Ergebnisse der

Wiederholungsserie 16 im Vergleich zu Serie 15. Auch bei der Wiederholungsserie sind die erzielten Scherfestigkeiten und das prozentuale Fügeiteilveragen gering, sodass sich die Ergebnisse der Serie 15 bestätigten.

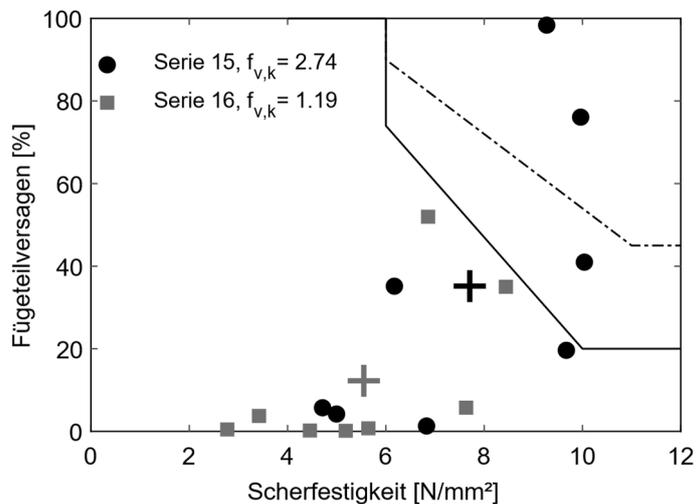


Bild 3.17: Wiederholung der Serie 15

Im Zuge der Herstellung der Betonscheiben fiel auf, dass durch das Fetten der POM-Schalung die Betonoberfläche rauer war als bei einer nicht gefetteten Schalung. Daher wurde eine vergleichende Serie mit schalglatter, aber nicht gefetteter Schalung durchgeführt. Die Ergebnisse im Vergleich zu Serie 13 mit gefetteter Schalung zeigt Bild 3.18.

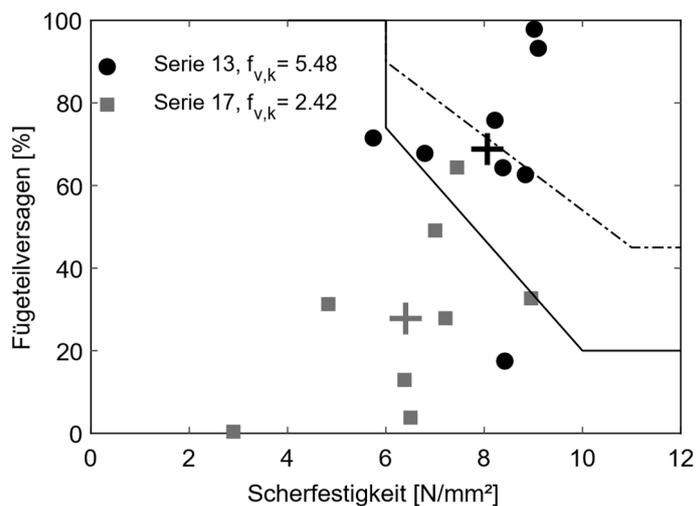


Bild 3.18: Wiederholung der Serie 13, mit nicht gefetteter Schalung

Wie zu erkennen ist, erzielten die Prüfkörper mit nicht gefetteter Schalung schlechtere Ergebnisse. Der Mittelwert der Scherfestigkeit liegt ca. 2,0 N/mm² und der des prozentualen Fügeiteilveragens ca. 30 % unterhalb der Werte, die die Prüfkörper der gefetteten Schalung erreichten. Bild 3.19 zeigt für jede der Serien ein Bruchbild. Teilbild a) präsentiert die Scherfläche von Prüfkörper 65, Seite B: Es sind nur minimale Anhaftungen von Holz am Beton zu erkennen, ansonsten wirkt der Beton unberührt. Teilbild b) stellt die Scherfläche A von Prüfkörper 49 dar. Deutlich zu erkennen ist der

Holzausbruch. Deshalb wird vermutet, dass die mechanische Adhäsion keine untergeordnete Rolle spielt.



a) Betonseite der Scherfläche B von Prüfkörper 65 b) Betonseite der Scherfläche A von Prüfkörper 49

Bild 3.19: Bruchbilder von Scherversuchen nach der Versuchsdurchführung, verklebt mit 1k-PU

Ähnlich den Ergebnissen der vorherigen Versuche mit 1K-PU-Klebstoff sind die Ergebnisse der Verklebung mit Betonmischung F06. Besonders die Prüfkörper von Serie 22 mit geschliffener Betonoberfläche zeigten bei den Einzelversuchen und resultierend daraus auch beim Mittelwert gute Ergebnisse mit Scherfestigkeiten im Bereich von ca. 7,0 N/mm² bis 11,0 N/mm². Alle Einzelversuche erfüllen das Einzelwertkriterium nach DIN EN 14080 [140], das Mittelwertkriterium erfüllte diese Serie nicht. Bei Serie 21 mit schalglatter Betonoberfläche und bei Serie 23 mit sandgestrahlter Oberfläche streuen die Ergebnisse erheblich. Bei beiden Serien erfüllen jeweils fünf der acht Versuche das Einzelwertkriterium nicht, was das geringe prozentuale Fügeiteilversagen verursacht hat. Auch hier besitzt die sandgestrahlte Oberfläche die geringste charakteristische Scherfestigkeit von 2,62 N/mm² und verfehlt die Anforderungen aus DIN EN 16351 [143]. Die Serien 21 und 22 erfüllen diese Anforderung.

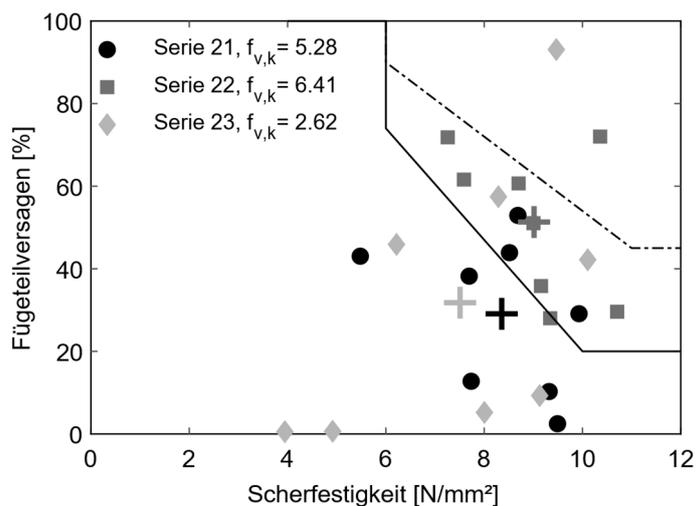


Bild 3.20: Scherfestigkeit und prozentuales Fügeiteilversagen der mit 1k-PU verklebten Prüfkörper mit Beton F06

Auffallend war bei allen sandgestrahlten und mit 1k-PU verklebten Prüfkörpern die Ähnlichkeit der Bruchbilder. Häufig war ein sehr dünner Holzflaum oder auch auf dem Beton anhaftender Klebstoff

zu erkennen, teilweise auch ausgehärtete Klebstoffbläschen. Zu vermuten ist daher, dass das manuelle Sandstrahlen die Rauigkeit so vergrößert hat, dass die zulässige Klebefugendicke überschritten wurde und es zum Aufschäumen des Polyurethan Klebstoff kam, was zu einer reduzierten Klebefestigkeit führte. Bild 3.21 führt typische Bruchbilder von Prüfkörpern mit sandgestrahlten Betonoberflächen auf; deutlich zu erkennen sind die beschriebenen Anhaftungen.



a) Betonseite der Scherfläche B von Prüfkörper 6

b) Betonseite der Scherfläche A von Prüfkörper 63

Bild 3.21: Bruchbilder von Scherversuchen nach der Versuchsdurchführung, verklebt mit 1k-PU und sandgestrahlter Betonoberfläche

3.2.3 Folgerungen

Aufbauend auf den insgesamt 230 betrachteten kleinformatischen Scherversuchen mit unterschiedlichen Klebstoffen, Betonrezepturen und Betonoberflächenbehandlungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Aufgrund der niedrigen Scherfestigkeiten, Mittelwerte sind in Tabelle 3.6 zusammengefasst, und des geringen Anteils an Fügeteilversagen, unabhängig von der verwendeten Betonoberfläche, ist der verwendete MUF mit den angewendeten Verklebungsparametern für die vorgesehene Anwendung nicht geeignet.
- Wie aus Bild 3.9 und Bild 3.10 hervorgeht, erfüllten nur zwei der sechs Serien der mit PRF verklebten Prüfkörper das Kriterium aus DIN EN 16351 [143]. Aufgrund dessen und da PRF kein Standardklebstoff in der Brettsperrholzherstellung ist, wird dieser Klebstoff nicht weiter betrachtet.
- Die Ergebnisse der mit Epoxydharz, Zwei-Komponenten-Polyurethan und Ein-Komponenten-Polyurethan verklebten Prüfkörper waren seitens der Scherfestigkeit und des Fügeteilversagens weitestgehend positiv. Ein Vergleich der charakteristischen Scherfestigkeiten bei Verwendung der unterschiedlichen Betonmischungen F03, F05 und F06 deutet darauf hin, dass die verwendete Betonmischung die Ergebnisse nicht erheblich beeinflusst. Auffällig ist der bei der Verklebung mit dem Ein-Komponenten-Polyurethanklebstoff höhere Variationskoeffizient der sandgestrahlten Betonoberfläche verglichen mit den beiden anderen Betonoberflächen, siehe Tabelle 3.6. Deshalb wird die sandgestrahlte Betonoberfläche nicht weiterverwendet.

Tabelle 3.6: Zusammenfassung der Scherfestigkeiten

	Schalglatte Oberfläche		Geschliffene Oberfläche		Sandgestrahlte Oberfläche	
	M	V	M	V	M	V
	N/mm ²		N/mm ²		N/mm ²	
MUF – F03	3,38	0,30	2,19	0,37	4,88	0,30
PRF – F03	5,79	0,27	6,66	0,22	7,12	0,13
PRF – F05	4,53	0,31	7,65	0,24	5,51	0,27
2k-PU – F03	8,30	0,06	8,69	0,09	8,35	0,11
2k-PU – F06	9,19	0,08	8,82	0,11	7,66	0,16
EP – F06	9,43	0,10	8,97	0,15	9,09	0,09
1k-PU – F03	6,54	0,07	6,52	0,09	5,99	0,11
1k-PU – F05	8,06	0,15	8,92	0,15	7,71	0,30
1k-PU – F06	8,36	0,17	9,01	0,13	7,51	0,30

Legende: M - Mittelwert V - Variationskoeffizient

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Scherversuche folgten in geringem Umfang Delaminierungsversuche als Tastversuche. Ziel war, einen Ausblick auf das Dauerhaftigkeitsverhalten der Verklebung zu erhalten und die Art des Klebstoffs und der Betonoberfläche weiter einzugrenzen. Da die charakteristischen Scherfestigkeiten bei der Verwendung des Epoxidharzklebstoffes, des Ein- und Zwei-Komponenten-Polyurethanklebstoffs unabhängig von der verwendeten Betonmischung weitestgehend positiv waren, wurde bei den Delaminierungsversuchen ausschließlich mit Beton der Mischung F06 gearbeitet.

3.3 Delaminierungsversuche

3.3.1 Material und Methoden

3.3.1.1 Material und Versuchskörper

Die Prüfkörper für die Delaminierungsversuche waren affin zu denen der Scherversuche aus Abschnitt 3.2 aufgebaut. Länge und Breite betragen 10 x 10 cm², die einzelnen Schichten waren ca. 30 mm dick.

Zur Herstellung der Prüfkörper wurde fehlerfreies Fichtenholz, herausgetrennt aus Lamellen der Festigkeitsklasse C24, verwendet. Das im Normalklima gelagerte Holz wurde unmittelbar vor dem Verkleben gehobelt. Die verwendeten Betonscheiben waren aus größeren Betonplatten herausgetrennt. Diese waren mit Betonmischung F06, wie in Abschnitt 3.2.1.1 beschrieben, in einer Stahlschalung hergestellt. Die Festbetoneigenschaften wurden in Anlehnung an DIN EN 196-1 [145] an Prismen 40 mm x 40 mm x 160 mm ermittelt. Die Biegezugfestigkeit liegt in einem Bereich zwischen 14,4 N/mm² und 19,3 N/mm², die Druckfestigkeit zwischen 121,2 N/mm² und 139,9 N/mm². Tabelle 3.7 führt die jeweiligen Werte, differenziert nach Klebstoff, auf.

Tabelle 3.7: Festbetoneigenschaften der Delaminierungsversuche bei der Verklebung mit unterschiedlichen Klebstoffen

	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
1k-PU	14,4	137,5
2k-PU	16,1	121,2
Epoxy	19,3	139,9

Zwei unterschiedliche Betonoberflächenbehandlungen wurden untersucht: die schalglatte und mit Aceton gereinigte sowie die geschliffene Oberfläche. Verklebt wurden die Betonscheiben beider Oberflächenbehandlungen mit jedem der drei Klebstoffe –1k-PU, 2k-PU und Epoxy. Die gleichen Klebstoffe wie bei den Scherversuchen kamen zur Anwendung, auch die Verklebungsparameter (Klebstoffauftrag und Pressdruck) waren identisch. Betrachtet wurden pro Betonoberflächenbehandlung und Klebstoff zwei Prüfkörper, insgesamt also acht Fugen pro Kombination.

3.3.1.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Nach dem Aushärten des Klebstoffs wurden die Prüfkörper an allen Seitenflächen manuell mit einer Diamantschleifscheibe geschliffen, um saubere Oberflächen zu erhalten.

Zur Versuchsdurchführung lagerten die Prüfkörper sechs Stunden in kochendem Wasser, anschließend eine Stunde in Wasser bei einer Temperatur von ca. 20° C und trockneten abschließend in einem Trockenofen bei ca. 60° C über einen Zeitraum von mehreren Stunden. Die Prüfkörper wurden vor der Lagerung in kochendem Wasser gewogen und das Zielgewicht mit einer anvisierten Holzfeuchte von 19 % sowie einer Ausgangsholzfeuchte von 12 % nach Formel (3-7) unter Vernachlässigung des aufgetragenen Klebstoffs berechnet.

$$m_{Ziel} = (m_{ges} - m_{Beton}) \cdot \frac{119}{112} + m_{Beton} \quad (3-7)$$

Mit	m_{Ziel}	Zu erreichendes Zielgewicht nach dem Trockenvorgang
	m_{ges}	Gesamtgewicht des Prüfkörpers vor dem Versuchsbeginn
	m_{Beton}	Gewicht der Betonscheibe vor dem Verkleben

War das berechnete Zielgewicht nach dem Trocknungsvorgang unterschritten, wurden die Prüfkörper aus dem Trockenofen genommen und eine vorhandene Fugenöffnungen unmittelbar angezeichnet und ausgemessen. Die gemessene Länge der Fugenöffnung wurde zur Auswertung auf die Länge der Hirnholzfugen bezogen und ist als Delaminierung in % angegeben.

3.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Bild 3.22 zeigt die Ergebnisse der einzelnen Delaminierungsversuche für die unterschiedlichen Betonoberflächenbehandlungen und Klebstoffe. Punkte, Quadrate und Sternchen kennzeichnen die Delaminierung in Prozent für jede einzelne Fuge nach Formel (2-20). Die Raute zeigt den

jeweiligen Mittelwert von allen acht Einzelwerten nach Formel (2-19). Besonders bei der schalglatten und mit Aceton gereinigten Oberfläche ist die Streuung zwischen den einzelnen Ergebnissen sehr groß und liegt zwischen 0 % und 100 % Delaminierung bei dem 1k-PU und dem Epoxydharz sowie zwischen 0 % und ca. 75 % Delaminierung bei dem 2k-PU. Bessere Ergebnisse erzielten die geschliffenen Betonoberflächen. Bei den mit 1k-PU verklebten Prüfkörpern betrug der maximale Einzelwert der Delaminierung ca. 25 %; der Mittelwert aller acht Fugen lag bei 5 %. Die mit Epoxydharz verklebten Prüfkörper mit geschliffener Betonoberfläche zeigten keinerlei Delaminierungserscheinungen. Diese beiden Serien würden damit die in DIN EN 16351 [143] aufgeführten Kriterien hinsichtlich der Einzelwerte und des Mittelwertes erfüllen. Gute, aber nicht die Kriterien nach DIN EN 16351 [143] erfüllende Ergebnisse waren mit dem 2k-PU zu erzielen.

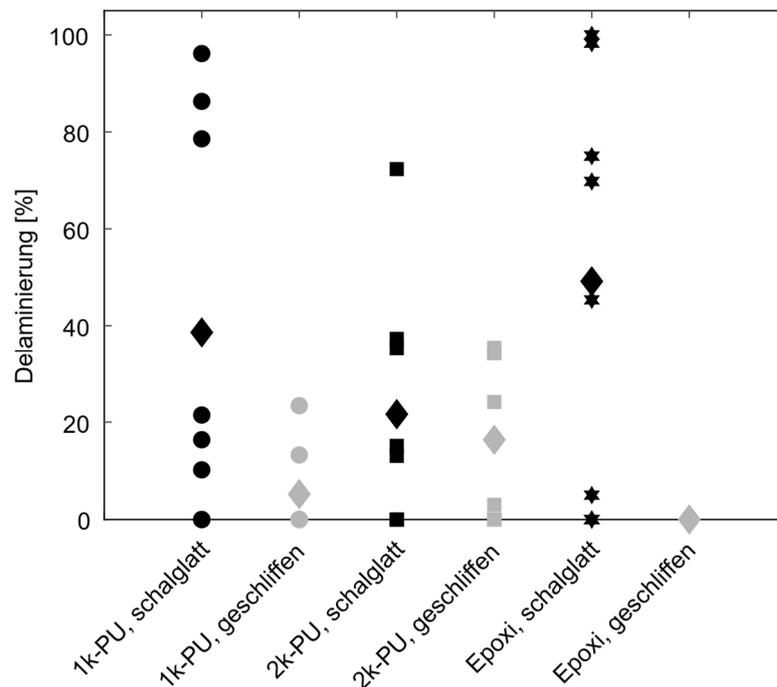


Bild 3.22: Delaminierung in % für die unterschiedlichen Klebstoffe und Betonoberflächenbehandlungen

Besonders bei den Prüfkörpern mit schalglatter Oberfläche könnte es aufgrund von Verunreinigungen bzw. Anhaftungen von Trennmitteln zu Fehlstellen in der Verklebung gekommen sein, was eine Erklärung für die Streuung der Ergebnisse wäre.

3.3.3 Folgerungen

Ausgehend auf den Tastversuchen zur Delaminierung scheint eine dauerhafte Verklebung von Holz und ultrahochfestem Beton möglich. Insgesamt sind die Versuchsergebnisse jedoch mit Vorsicht zu betrachten: Zum einen war die Anzahl der Prüfkörper gering und zum anderen wurden für die Tastversuche nur eine Betonsorte verwendet. Seitens der Klebstoffe erzielten alle drei Sorten gute Ergebnisse. Im Vergleich zur schalglatten Betonoberfläche schnitt die geschliffene Betonoberfläche deutlich besser ab. Auch [8, S. 135] zufolge, lässt sich aus den Ergebnissen von Kurzzeitversuchen nicht auf die Ergebnisse von Langzeitversuchen schließen.

3.4 Zwischenfazit

Basierend auf den durchgeführten kleinformatischen Versuchen ist eine tragfähige Verklebung der beiden Werkstoffe Holz und Beton möglich. Dies gilt unter Berücksichtigung der verwendeten Klebstoffe, Verklebungsparameter und anderer die Verklebung beeinflussenden Faktoren. Von den beiden Klebstoffsystemen, die in der industriellen Brettsperrholzherstellung Anwendung finden, eignet sich der Ein-Komponenten-PU besser, wie Scher- und Delaminierungsversuche zeigten. Mit dem MUF-Klebstoff erzielten die Scherversuche keine zufriedenstellenden Ergebnisse, weshalb dieses Klebstoffsystem bei den Delaminierungsversuchen nicht weiter betrachtet wurde. Daneben erzielten andere, nicht in der Brettsperrholzherstellung übliche Klebstoffsysteme ebenfalls zufriedenstellende Ergebnisse. Zur Ausbildung einer dauerhaften Klebefuge scheint sich darüber hinaus eine geschliffene Betonoberfläche besser zu eignen als eine schalglatte Oberfläche.

Die kleinformatischen Versuche bildeten die Grundlage für die Bauteilversuche hinsichtlich Materialauswahl und der zu verklebenden Betonoberfläche. Im Folgenden werden die Prüfkörper für die Bauteilversuche mit einem Ein-Komponenten-PU-Klebstoff verklebt. Verwendet wird ein Beton, der auf dem Compound der Mischungen F03 und F06 basiert. Die Betonoberfläche wurde geschliffen.

Abschnitt 4

Bauteilversuche

4.1 Allgemeines

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ultra High Performing Timber Walls“ [83] wurden Bauteilversuche an Wandsegmenten durchgeführt. Die Versuche hatten zwei Ziele: Erstens war zu prüfen, ob eine großformatige Herstellung im Maßstab 1:1 realisierbar ist. Zweitens war das Kurzzeittragverhalten zu untersuchen. Das Kurzzeittragverhalten wurde an zentrisch und exzentrisch belasteten Wandsegmenten, bestehend aus einem fünfflagig aufgebauten Querschnitt aus Holz und Beton, im Maßstab 1:1 charakterisiert. Nachfolgend sind diese Versuche detailliert beschrieben.

4.2 Material und Methoden

4.2.1 Material

Zur Herstellung der fünfflagig aufgebauten Prüfkörper kam gemäß Herstellerangaben Fichte der Festigkeitsklasse C24 zum Einsatz. Während des Produktionsprozesses der Wandsegmente wurden im Herstellwerk insgesamt 64 Holzlamellen aus der gleichen Charge entnommen und visuell nach DIN 4074-1 [132] nachsortiert. Von den insgesamt 64 Lamellen ließen sich 45 Lamellen der Sortierklasse S13 und 10 Lamellen der Sortierklasse S10 zuordnen. Für die restlichen 9 Lamellen gab es keine Sortierklasse. Aus den einzelnen Lamellen wurden kürzere Teilstücke herausgetrennt, anhand derer der globale E-Modul, Biegefestigkeit und Druckfestigkeit nach DIN EN 408 [151] bestimmt wurden. Die herausgetrennten Teilstücke wurden ebenfalls visuell sortiert und den jeweiligen Sortierklassen zugeordnet. Tabelle 4.1 zeigt die Anzahl der Lamellen in den jeweiligen Sortierklassen für die Gesamtlamelle, die aus der Produktion stammt, und für die herausgetrennten Teilstücke, anhand derer die Biege- und Druckversuche nach DIN EN 408 [151] stattfanden.

Tabelle 4.1: Anzahl der den jeweiligen Sortierklassen zugeordneten Lamellen

Sortierklassen	Gesamtlamelle	Biegeversuche	Druckversuche
Rückweisung	9	10	9
S7	-	7	12
S10	10	23	22
S13	45	15	19

Aufgrund der Entnahme der Lamellen direkt aus dem Produktionsprozess, besaßen die Prüfkörper zur Bestimmung der Materialeigenschaften drei Nuten mit einer Nutbreite von 2,5 mm und unterschiedlicher Tiefe. Die Tiefe jeder der drei Nuten wurde gemessen, gemittelt und bei der Bestimmung des E-Moduls bzw. der Festigkeiten berücksichtigt. Bei der Bestimmung des E-Moduls und der Biegefestigkeit wurde ebenfalls Rohdichte und Holzfeuchte nach DIN EN 13183-1 [138] bestimmt. Anhang B.1 führt die Ergebnisse der Versuche nach DIN EN 408 [151] für jede der untersuchten Holzlamellen auf.

Die nach DIN EN 408 [151] bestimmten Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften wurden gemäß DIN EN 384 [150] auf die Bezugsbedingungen überführt. Hierzu wurde die Biegefestigkeit auf eine Bezugshöhe von 150 mm und der globale E-Modul in den E-Modul in Faserlängsrichtung E_0 umgerechnet. Gemäß DIN EN 14358 [142] wird für die Bestimmung eine log-Normalverteilung für die Festigkeiten und eine Normalverteilung für den E-Modul und die Rohdichte angenommen. Tabelle 4.2 führt Mittelwerte und Standardabweichung der Holzeigenschaften auf. Demnach liegt der Mittelwert des E-Moduls in Faserrichtung bei 10.603,5 N/mm², was knapp unter dem Wert für Holz der Festigkeitsklasse C24 von 11.000 N/mm² liegt. Der Mittelwert der Druckfestigkeit liegt bei 32,9 N/mm² und die Biegefestigkeit bei 42,3 N/mm². Die geringen Standardabweichungen bei der Biege- und Druckfestigkeit sind auf die logarithmische Transformation der Eingangswerte mit folgender Bestimmung der statistischen Kenngrößen und anschließender Rücktransformation zurückzuführen. Wird eine Normalverteilung auch für die Festigkeitseigenschaften unterstellt, beträgt die Standardabweichung für die Druckfestigkeit 5,4 N/mm² und für die Biegefestigkeit 11,3 N/mm². Die Mittelwerte liegen mit 33,3 N/mm² für die Druckfestigkeit und 43,9 N/mm² für die Biegefestigkeit in einer ähnlichen Größenordnung wie bei Annahme einer log-Normalverteilung.

Tabelle 4.2: Holzeigenschaften der Bauteilversuche nach DIN EN 14358 [142]

		Mittelwert	Standardabweichung
E-Modul [N/mm ²]	E_0	10.603,5	2.319,3
Biegefestigkeit [N/mm ²]	f_m	42,3	1,3
Druckfestigkeit [N/mm ²]	f_c	32,9	1,2
Rohdichte [kg/m ³]	ρ	414,7	36,9

Die ermittelten Holzeigenschaften dienen dazu, das verwendete Holz für eine Nachrechnung der Bauteilversuche zu charakterisieren. Da es kein Ziel war, das verwendete Holz einer Festigkeitsklasse nach DIN EN 338 [149] zuzuordnen, wurden keine charakteristischen Holzeigenschaften nach DIN EN 384 [150] berechnet und ausgegeben. Aufgrund der geringen Anzahl der Prüfkörper hätte dies die Ergebnisse verfälschen können.

Kurz vor dem Versuch wurde elektrisch die Holzfeuchte an der überwiegenden Anzahl an Prüfkörper bestimmt. Hierzu wurde auf beiden Seiten des Prüfkörpers jeweils am Wandkopf, in der Wandmitte und am Wandfuß die Holzfeuchte gemessen und anschließend gemittelt. Diese bewegte

sich bei allen Prüfkörpern zwischen 8,2 % und 9,5 %. Die genauen Holzfeuchten sind Anhang B.3 zu entnehmen.

Zur Herstellung des Betons für die Wandkerne kam eine Mischung zum Einsatz, die auf dem Compound der Mischungen F03 und F06 basiert. Stahlfasern wurden bei den Bauteilversuchen nicht eingesetzt. Ein externes Werk stellte die Betonplatten für die Wandkerne her, hierzu wurden die Rezepturen angepasst. Für die Bestimmung der Materialeigenschaften des verwendeten Betons gab es: sechs Zylinder, Durchmesser 150 mm mit einer Höhe von 300 mm, sechs Betonwürfel mit einer Kantenlänge von 150 mm und sechs Betonprismen, Querschnitt 150 mm x 150 mm mit einer Länge von 700 mm. Damit wurde der E-Modul nach DIN EN 12390-13 [135], die Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 [136] und die Biegezugfestigkeit nach DIN EN 12390-5 [137] bestimmt. Die Lagerung der Prüfkörper zur Bestimmung der Materialeigenschaften erfolgte unter gleichen klimatischen Bedingungen wie die Lagerung der Betonplatten für die Wandkerne; es gab keine Wasserlagerung. Die Materialeigenschaften wurden kurz nach dem Abschluss der Bauteilversuche, 68 Tage nach Betonage, bestimmt. Tabelle 4.3 führt die Mittelwerte und die Standardabweichung der jeweiligen Festbetoneigenschaften auf. Der Mittelwert des E-Moduls liegt mit 46774,2 N/mm² an der unteren Grenze eines für UHFB üblichen E-Moduls. Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit liegen im Bereich von ca. 130,0 N/mm² und die Biegezugfestigkeit beträgt im Mittel 8,1 N/mm².

Tabelle 4.3: Festbetoneigenschaften der Bauteilversuche

		Mittelwert	Standardabweichung
E-Modul [N/mm ²]	E_{cm}	46.774,2	209,1
Druckfestigkeit Zylinder[N/mm ²]	$f_{cm,cyl}$	132,5	2,6
Druckfestigkeit Würfel[N/mm ²]	$f_{cm,cube}$	129,0	3,8
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	f_{ctm}	8,1	1,2

4.2.2 Prüfkörper und deren Herstellung

Die zu prüfenden Wandsegmente waren im eingebauten Zustand 2,84 m hoch und 0,50 m bzw. 0,40 m lang. Abhängig von der Dicke des Betonkerns, 30 mm oder 45 mm, betrug die Wanddicke 0,150 m oder 0,165 m. Die zu prüfenden Wandsegmente besaßen immer einen 5-lagigen Aufbau, wobei die Lamellendicke des verwendeten Holzes immer 30 mm betrug. Die außen angeordneten Holzlamellen verliefen dabei parallel zur Wandhöhe. Untersucht wurden Wandsegmente mit durchgängigem Wandkern aus Beton sowie Wandsegmente mit einem alternierend aus Beton und Holz aufgebauten Wandkern. Bild 4.1 illustriert die Querschnittsaufbauten der geprüften Wandsegmente. Die in Beton ausgeführten Bauteile sind dunkelgrau dargestellt.

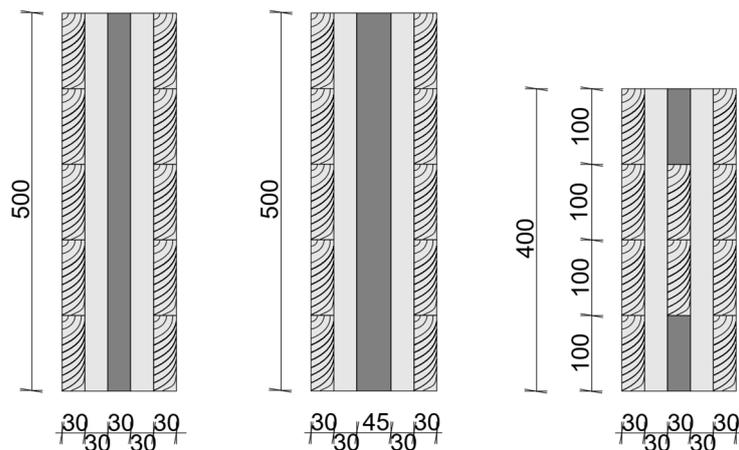


Bild 4.1: Wandaufbauten in Anlehnung an [83]

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte in einem mehrstufigen, zum Teil iterativen Prozess: Zunächst wurden die Betonplatten mit Übermaß hergestellt. Um ein Schüsseln der Betonplatten zu vermeiden waren die beiden zu verklebenden Seiten geschalt, die Herstellung erfolgte stehend. Der Beton wurde, über die kleinere Höhe von ca. 60 cm eingefüllt. Im ersten Schritt wurden zwei Betonplatten mit einer Dicke von 45 mm hergestellt. Schalmaterial war eine klassische Schaltafel aus beschichtetem Holzwerkstoff. Nach dem Aushärten und beidseitigen Schleifen der beiden Betonplatten mit einer in der Steinbearbeitung üblichen Flächenschleifmaschine wurden diese mit einer Laserscanner vermessen. Darauf aufbauend wurde entschieden, für die Herstellung der 30 mm dicken Betonplatten eine gehobelte POM-Platte als Schalmaterial zu verwenden. Diese wurden ebenfalls im Rahmen der Prüfkörperherstellung beidseitig auf einer Flächenschleifmaschine geschliffen. Unmittelbar vor dem Verkleben wurden die Betonplatten mit Wasser und Schwamm gereinigt und anschließend mit Druckluft getrocknet, und Dehnmessstreifen in extra dafür vorgesehenen Vertiefungen auf den Betonplatten angebracht.

Bild 4.2 zeigt die Schritte des Herstellungsprozesses in einem Brettsperrholzwerk. Um die Herstellung zu vereinfachen, wurden zwei Rohelemente produziert: jeweils ein Rohelement für eine Betonplattendicke, aus denen die einzelnen Wandsegmente herausgeschnitten wurden. Nach dem Auslegen der ersten zwei verklebten Lagen Holz erfolgte der maschinelle Klebstoffauftrag für die Betonlamellen; im Nachgang wurden die Betonplatten eingelegt und erneut maschinell Klebstoff aufgetragen, siehe Teilbild a). Die aufgetragene Klebstoffmenge betrug 170 g/m^2 des Ein-Komponenten- Polyurethanklebstoff. Danach wurden weitere Lagen Holz ausgelegt und verklebt, siehe Teilbild b). Waren die Rohelemente fertig ausgelegt, wurden sie im Vakuumbettverfahren gepresst. Nach dem Aushärten des Klebstoffs erfolgte der Zuschnitt der einzelnen Wandsegmente CNC gesteuert mit einem Roboterarm, Teilbild e). Hierbei hielt der Roboterarm einen Sicherheitsabstand von ca. 2 cm zu den Betonbauteilen ein, da am Roboter ein Sägeblatt zur Bearbeitung von Holz angebracht war. Um bündige Kanten von Holz und Beton entlang der Wandhöhe zu erhalten, wurde das 2 cm überstehende Holz manuell abgeschnitten. Teilbild f) zeigt die fertigen Rohelemente vor dem Transport. Der entstehende Spalt zwischen Holz und Beton an der Ober- und Unterseite der Prüfkörper wurde nachträglich mit einem hochfesten Vergussmörtel vergossen, um eine gleichmäßige Lasteinleitung in den Prüfkörper zu gewährleisten.



a) Eingelegte Betonplatten in Rohelement



b) Auslegen weiterer Holzlagen



c) Fertiges Rohelement vor dem Pressen



d) Rohelement beim innerbetrieblichen Transport



e) CNC-gesteuerter Zuschnitt



f) Fertige Rohelemente

Bild 4.2: Herstellungsprozess der Prüfkörper

4.2.3 Versuchsaufbau und -durchführung

Den Versuchsaufbau illustriert Bild 4.3: Links ist schematisch ein zentrischer und rechts ein realer exzentrischer Versuch dargestellt. Die Versuche erfolgten in einer 4-Säulen-Standardprüfmaschine mit einer maximalen Druckkraft von 6,0 MN. In die Prüfmaschine wurden zwei Rollenkipplager eingebaut, um eine beidseitig gelenkig gelagerte Pendelstütze zu prüfen. Die Rollenkipplager waren ebenso wie die Wandsegmente 0,5 m lang. Die Prüfkörper wurden von Hand eingebaut und eingemessen.

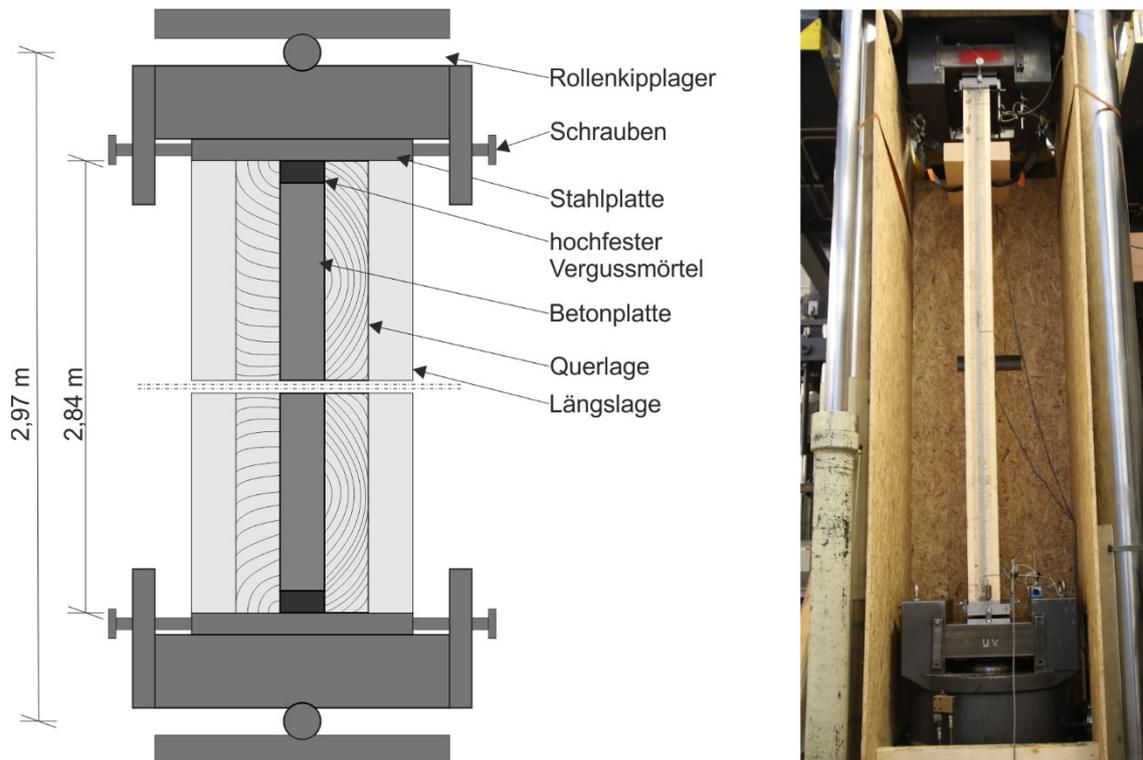


Bild 4.3: Schematischer Versuchsaufbau (links) eines zentrischen und realer Versuchsaufbau eines exzentrischen Versuchs (rechts) aus [83]

Die Rollenkipplager waren so konstruiert, dass sich mit der Lagerkonstruktion alle zu prüfenden Exzentrizitäten einstellen ließen. Hierzu wurde der gesamte Prüfkörper aus der Achse der Lasteinleitung am Wandfuß und am Wandkopf verschoben, wie Bild 4.4 darstellt.

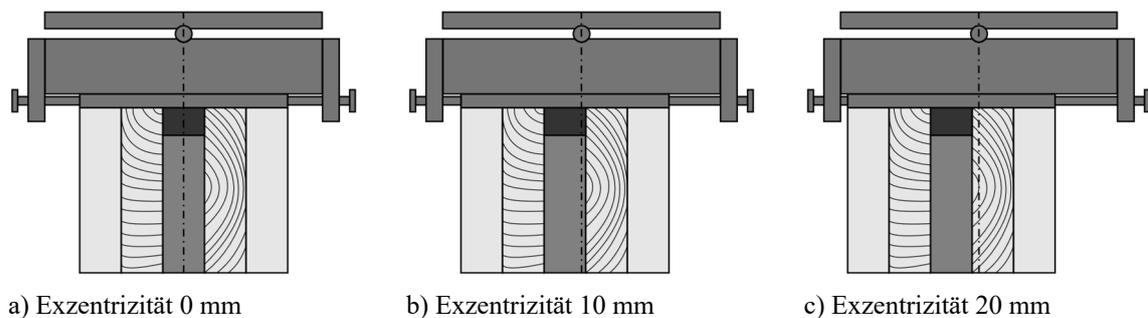


Bild 4.4: Einstellen der unterschiedlichen Exzentrizitäten am Rollenkipplager aus [83]

Die Lastaufbringung erfolgte statisch monoton, weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,0012 mm/Sekunde.

4.2.4 Versuchsumfang

Die Versuchsserie umfasste insgesamt 13 Versuche an Wandsegmenten, davon 11 Versuche mit durchgängigem Wandkern aus Beton und zwei Versuche mit dem alternierend, aus Holz und Beton aufgebauten Wandkern. Die Dicke des alternierend aufgebauten Kerns betrug immer 30 mm. Bei den Wandsegmenten mit dem durchgängigem Wandkern wurden zwei Kerndicken untersucht: Die

meisten Versuche basieren auf dem 30 mm dicken Kern, hier wurden für jede Exzentrizität drei Wandsegmente geprüft. Von den Wandsegmenten mit 45 mm dicken Betonkern wurde nur je ein Wandsegment zentrisch und mit einer Exzentrizität von 10 mm geprüft. Gleiches gilt auch für die Wandsegmente mit alternierend aufgebautem Kern. Tabelle 4.4 fasst die Versuchsanzahl für die jeweiligen Kernarten, Exzentrizitäten und Kerndicken zusammen.

Tabelle 4.4: Versuchsumfang der Bauteilversuche

Exzentrizität	Kerndicke	Durchgängiger Wandkern		Alternierender Wandkern
		30 mm	45 mm	30 mm
zentrisch		3	1	1
10 mm		3	1	1
20 mm		3		

4.2.5 Messtechnik

Die Versuche waren mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet, die ausführlich in [83] beschrieben ist. Bei der Auswertung der Versuche sind für diese Arbeit die aufgebrachte Kraft, die Verformung der Wände sowie die Dehnung in Wandmitte wichtig. Die während des Versuchs aufgebrachte Kraft zeichnete eine in die Standardprüfmaschine integrierte Kraftmessdose auf. Drei Punktlaser zeichneten die horizontale Verformung der Wandsegmente in den Viertelpunkten sowie in der Wandmitte während der gesamten Versuchsdauer auf. Die Lasermessköpfe waren außerhalb der Prüfmaschine an einer dafür vorgesehenen Vorrichtung angebracht. Zwischen den Versuchen wurde ihre Position nicht verändert. Die Holzdehnung in der Wandmitte bestimmten Dehnmessstreifen, die auf beiden Seiten der Wand auf den außenliegenden Holzlamellen angeordnet waren. Zusätzlich waren auf den Stirnseiten des Betons, sowohl bei dem durchgängigen Wandkern aus Beton als auch bei dem alternierend aufgebauten Wandkern, genau in Wandmitte Dehnmessstreifen angebracht, die die Betondehnung aufzeichneten.

4.2.6 Auswertung

4.2.6.1 Zentrische Bauteilversuche

Zur Auswertung der zentrisch belasteten Bauteilversuche wurde die in den Versuchen erzielte Knicklast, die als Maximallast charakterisiert ist, unmittelbar bevor es zum Ausknicken der Wandsegmente und zum schlagartigen Lastabfall kam, verwendet. Zusätzlich wurde die tatsächliche Knicklast, berechnet nach einem Verfahren von Southwell [112], nachfolgend auch Southwellverfahren bezeichnet, bestimmt und in die Auswertung mit einbezogen. Die versuchstechnisch bestimmte Knicklast von zentrisch belasteten Versuchen ist schwierig zu deuten, da die Elastizitätseigenschaften der verwendeten Baustoffe streuen und es keine ideal geraden stabförmigen Prüfkörper bzw. Bauteile gibt, die im Falle eines Versuchs zudem ideal zentrisch in die Prüfmaschine eingebaut sind. Um dieses Problem zu umgehen, entwickelte [112] ein Verfahren, um basierend auf der horizontalen Verformung, die während des Versuchs gemessen wird, die tatsächliche kritische Knicklast zu bestimmen. Hierbei ist die zusätzliche Verformung bedeutsam, die sich aus einer einwirkenden Druckkraft auf die Gesamtverformung nach Theorie II Ordnung

ergibt. Um die Verformung nach Theorie II. Ordnung zu erhalten, kann auf die Verformung, die sich nach Theorie I. Ordnung ergibt ein zusätzlicher Anteil addiert werden, wie Gleichung (4-1) zeigt.

$$w_{II} = w_I + \Delta w \quad (4-1)$$

Mit	w_{II}	<i>Verformung nach Theorie II. Ordnung</i>
	w_I	<i>Verformung nach Theorie I. Ordnung</i>
	Δw	<i>Zusätzliche Verformung die sich aus der einwirkenden Druckkraft ergibt</i>

Nach Gleichung (2-44) lässt sich die Verformung nach Theorie II. Ordnung auch berechnen aus der Multiplikation der Verformung nach Theorie I. Ordnung mit einem Vergrößerungsfaktor, der auf der kritischen Knicklast basiert. Durch Gleichsetzen der Gleichungen (2-44) und (4-1) und nach einigem Umformen ergibt sich der additive Anteil aus Gleichung (4-1) gemäß Gleichung (4-2). Dieser gibt den Einfluss einer Drucknormalkraft auf die Gesamtverformung nach Theorie II. Ordnung an, wenn bereits eine Verformung nach Theorie I. Ordnung vorhanden ist.

$$\Delta w = w_I \cdot \frac{1}{\frac{P_{ki}}{P} - 1} \quad (4-2)$$

Dieser Zusammenhang lässt sich für die Auswertung von zentrisch belasteten Versuchen verwenden. Bei einem zentrisch belasteten Versuch existiert planmäßig keine Verformung nach Theorie I. Ordnung, sondern eine geringe Exzentrizität, beispielsweise aufgrund einer Vorkrümmung oder des nicht exakt zentrischen Einbaus. Damit lässt sich, wie auch [74, S. 53-55] erörtert, der Zusammenhang zwischen einer Drucknormalkraft und der Bauteilverformung aufbauend auf Gleichung (4-2) gemäß Gleichung (4-3) beschreiben.

$$w_{**} = a_0 \cdot \frac{1}{\frac{P_{ki}}{P} - 1} \quad (4-3)$$

Mit	w_{**}	<i>Verformung eines zentrisch belasteten Druckstabes aufgrund minimaler Exzentrizitäten, die während des Versuchs gemessen wird</i>
	a_0	<i>Anfangsexzentrizität</i>

Nach einigem Umformen folgt Gleichung (4-4), die [74, S. 54] aufführt und deren Herleitung ebenfalls [112] beschreibt. Hierbei handelt es sich um eine Geradengleichung, wenn auf der Abszisse das Verhältnis von gemessener Verformung zur gemessenen Kraft und auf der Ordinate die gemessene Verformung aufgetragen wird. Die Geradengleichung ist einfach zu bestimmen, da Verformung und Kraft während der gesamten Versuchsdurchführung aufgezeichnet wurden und damit bekannt sind.

$$w_{**} = P_{ki} \cdot \frac{w_{**}}{P} - a_0 \quad (4-4)$$

Die Steigung der Geraden entspricht der tatsächlichen kritischen Knicklast P_{ki} , welche ohne Exzentrizitäten erzielt worden wäre, und a_0 kennzeichnet die anfängliche Exzentrizität, aus Vorkrümmung oder nicht exaktem Einbau, des Prüfkörpers. In dieser Arbeit wird die so bestimmte kritische Knicklast als $P_{ki, Southwell}$ bezeichnet.

4.2.6.2 Exzentrische Bauteilversuche

Die Auswertung der exzentrisch belasteten Bauteilversuche erfolgt anhand der gemessenen Verformungen sowie der Dehnungen in Wandmitte. Zusätzlich werden die unterschiedlichen Versagensmodi beschrieben.

4.3 Ergebnisse und Diskussion

4.3.1 Zentrische Versuche

Bild 4.5 zeigt das Kraft-Verformungsdiagramm und das Kraft-Zeitdiagramm aller planmäßig zentrisch belasteten Bauteilversuche. Alle Bauteilversuche weisen ein ähnliches Verhalten beim Kraft-Verformungs- und beim Kraft-Zeitverhalten auf. Mit zunehmender Kraft nimmt die in der Wandmitte aufgezeichnete horizontale Verformung nur langsam zu, bis es vor Erreichen der Maximalkraft zur Ausbildung eines Plateaus kommt. Nach Überschreiten der Maximalkraft nimmt bei allen Wänden bei einer horizontalen Verformung in Wandmitte bei ca. 10 mm die horizontale Verformung zu, wohingegen die Kraft abfällt. Der Kraftabfall in Kombination mit der Zunahme der horizontalen Verformung erfolgte schlagartig, wie aus dem Kraft-Zeitdiagramm (Bild 4.5, rechts) hervorgeht. Die in den Versuchen erreichten Maximalkräfte lagen in einem Bereich von 1074,48 kN für Versuch V_A_30_00_1 mit alternierend aufgebautem Wandkern bei einer Kerndicke von 30 mm und 1805,52 kN in Versuch V_D_45_00_1 mit durchgängigem Wandkern und einer Kerndicke von 45 mm. Die Maximalkräfte sind in beiden Diagrammen in Bild 4.5 jeweils mit einem Kreis gekennzeichnet, Tabelle 4.5 führt die Maximalkräfte aller zentrisch belasteten Bauteilversuche auf.

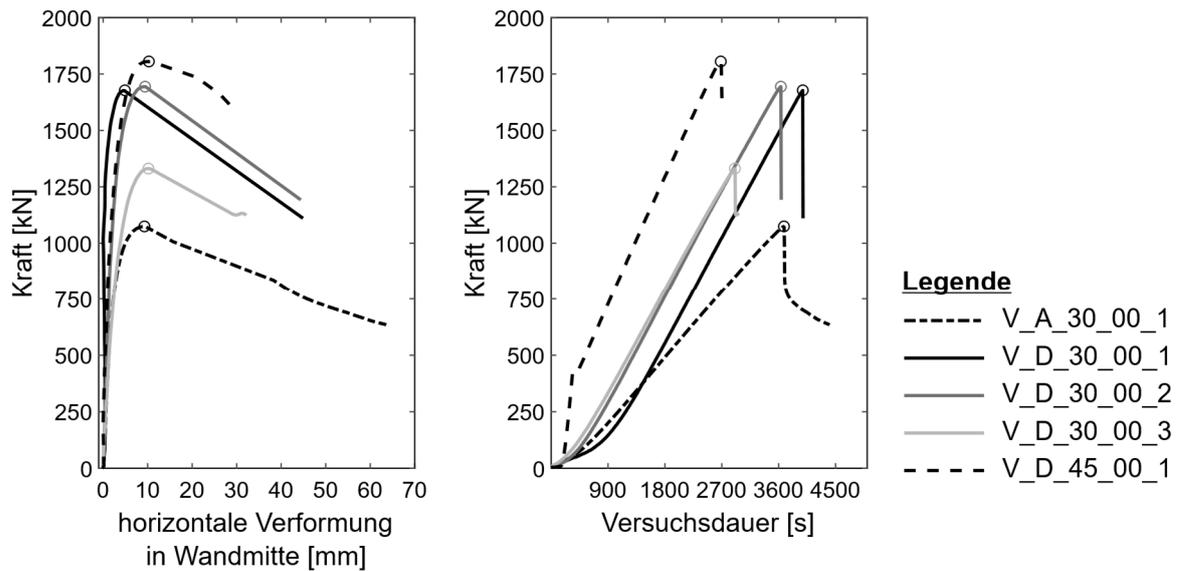


Bild 4.5: Kraft/horizontale Verformung- und Kraft-Zeit-Diagramm für die zentrisch belasteten Bauteilversuche

Um das Bauteilverhalten zu verdeutlichen, zeigt Bild 4.6 die horizontale Bauteilverformung in den Viertelpunkten, exemplarisch dargestellt für die Bauteilversuche V_D_30_00_1 und V_D_30_00_2. Die Kreise kennzeichnen die Messstellen am Prüfkörper. Die Verformung ist für unterschiedliche Laststufen in Prozentangaben bezogen auf die Maximalkraft sowie nach dem Ausknicken dargestellt. Die Linien, welche die einzelnen Punkte miteinander verbinden, dienen der Veranschaulichung und sind zwischen Wandkopf und Wandfuß sowie der gemessenen Verformung interpoliert. Zu beobachten ist auch hier die geringe Verformung von ca. 10 mm bei Erreichen der Maximalkraft und die nachfolgende starke Zunahme der Verformung.

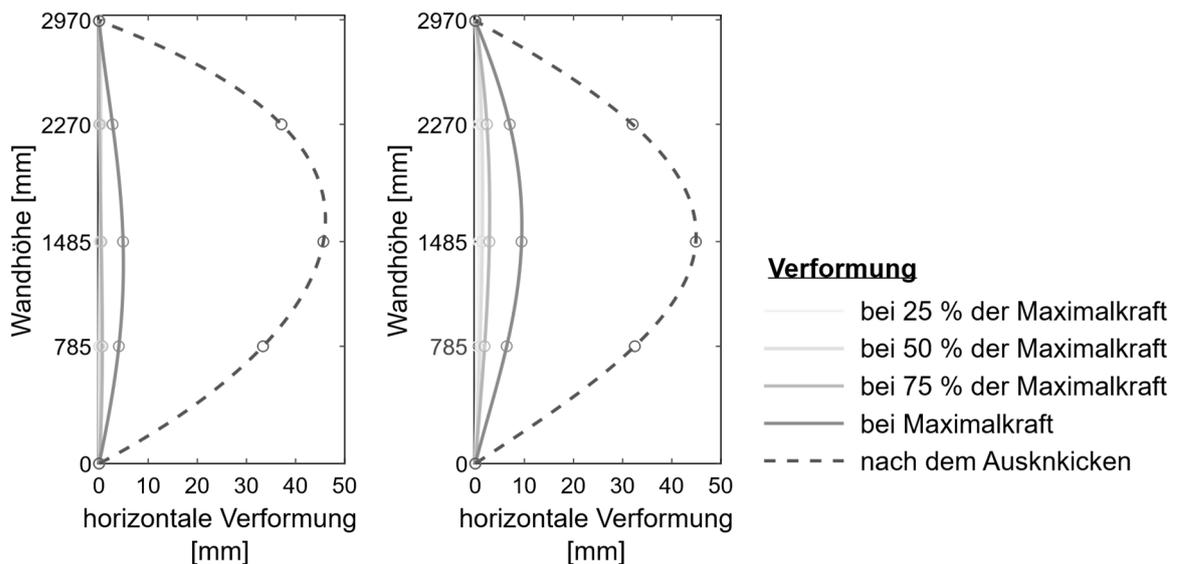


Bild 4.6: Verformung über die Wandhöhe bei unterschiedlichen Laststufen für Versuch V_D_30_00_1 (links) und V_D_30_00_2 (rechts)

Bei der Auswertung nach dem Southwellverfahren ist zur Erstellung der Geradengleichung der Bereich oberhalb einer Kraft von 70 % bezogen auf die Maximalkraft betrachtet worden. Auch [74,

S. 55] berichtet, dass sich im Bereich kurz vor Erreichen der Maximalkraft eine Gerade in der Darstellung im Diagramm ergab. In Bild 4.7 ist links im Diagramm die horizontale Verformung bezogen auf die Kraft auf der Abszisse gegen die horizontale Verformung auf der Ordinate aufgetragen. Anhand dieser Geraden lassen sich basierend auf der Steigung Knicklast und Anfangsexzentrizität nach [112] bestimmen. Rechts im Bild ist in anderem Maßstab die horizontale Verformung gegen die Kraft aufgetragen. Kreise, Quadrate, Sternchen etc. stellen die explizit betrachteten Messpunkte bis zum Erreichen der Maximalkraft dar, die zur Erstellung der Geradengleichung nach dem Southwellverfahren verwendet wurden.

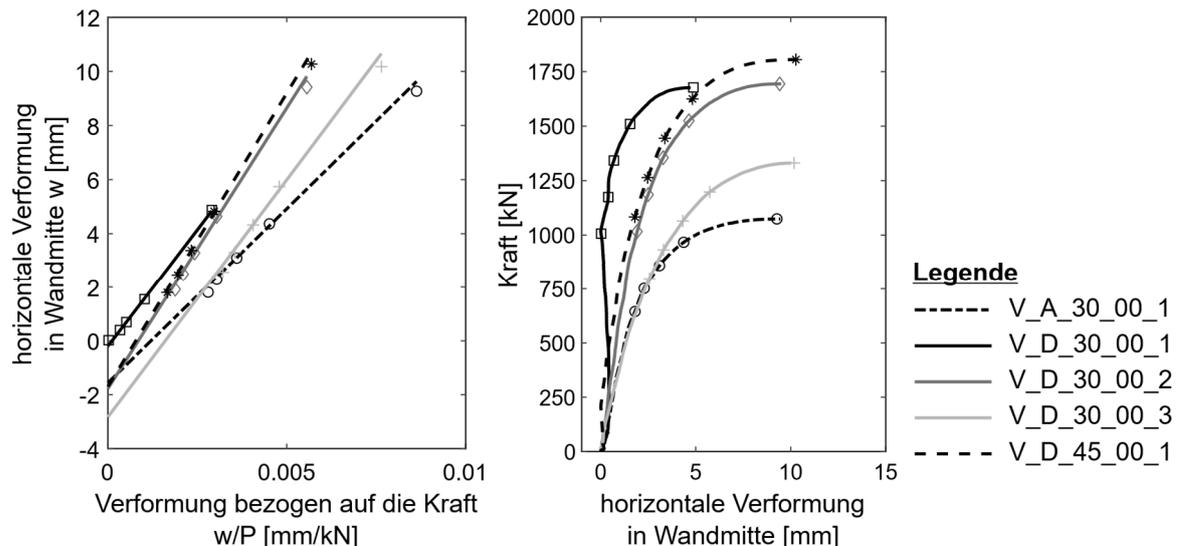


Bild 4.7: Horizontale Verformung in Wandmitte aufgetragen gegen die Verformung bezogen auf die Kraft (links) zur Bestimmung der kritischen Knicklast nach [112]

Tabelle 4.5 führt die nach dem Southwellverfahren bestimmten Knicklasten $P_{ki, Southwell}$ und Anfangsexzentrizitäten $a_{0, Southwell}$ auf. Die geringste Knicklast nach dem Southwellverfahren erzielt Bauteilversuch V_A_30_00_1 mit 1297,3 kN, zu beachten ist an dieser Stelle die geringere Versuchskörperlänge der Versuchskörper mit alternierend aufgebautem Wandkern. Die höchste Knicklast erreichte Versuch V_D_45_00_1 mit 2179,66 kN. Die geringste Anfangsexzentrizität lag bei 0,2 mm, die größte bei 2,83 mm. Im Vergleich mit den in den Versuchen erreichten Knicklasten $P_{k, Versuch}$ ist $P_{k, Southwell}$ immer größer, die größte Abweichung bezogen auf die Versuchslast beträgt 32,6 %, die geringste Überschreitung betrug 3,5 %. [74, S. 54] berichtet ebenfalls von Abweichungen bis zu 22 % zwischen der versuchstechnisch und der nach dem Southwellverfahren bestimmten Knicklast. Die Versuche V_D_30_00_1 und V_D_30_00_2 erzielten im Versuch sehr ähnliche Knicklasten mit 1677,70 kN und 1693,92 kN; einzig Versuch V_D_30_00_3 aus dieser Serie weicht mit einer Knicklast von 1331,04 kN deutlich von den Ergebnissen der beiden anderen Versuche ab. Beim Vergleich von $P_{ki, Southwell}$ zeigt sich: Die Knicklasten von V_D_30_00_1 und V_D_30_00_3 sind sehr ähnlich, wohingegen die Knicklast von V_D_30_00_2 deutlich abweicht. Es ist davon auszugehen, dass sich die geringe im Versuch erzielte Knicklast von Versuch V_D_30_00_3 einstellte, weil die Anfangsexzentrizität $a_{0, Southwell}$ im Vergleich zu den beiden anderen Versuchen dieser Serie größer war. Die größere Knicklast $P_{ki, Southwell}$ von Versuch

V_D_30_00_2 ist vermutlich auf streuende Elastizitätseigenschaften des Holzes zurückzuführen, da die Anfangsexzentrizität zwischen denen der beiden anderen Versuche dieser Serie liegt.

Tabelle 4.5: Zusammenfassung der zentrisch belasteten Bauteilversuche

Versuch	$P_{ki,Versuch}$ [kN]	$P_{ki,Swallowell}$ [kN]	$a_{0,Swallowell}$ [mm]
V_A_30_00_1	1.074,48	1.297,23	1,56
V_D_30_00_1	1.677,70	1.736,63	0,20
V_D_30_00_2	1.693,92	2.084,99	1,78
V_D_30_00_3	1.331,04	1.764,51	2,83
V_D_45_00_1	1.805,52	2.179,66	1,70

Alle fünf zentrisch belasteten Versuche zeigten ein schlagartiges Stabilitätsversagen. Nachdem Ausbau der Versuchskörper aus der Prüfmaschine ließ sich mit bloßem Auge keine Materialschädigung erkennen – weder an den außenliegenden Holzlamellen noch am Betonkern. Die sich einstellende Verformung nach dem Ausknicken der Versuchskörper näherte sich mit abnehmender Kraft wieder null. Eine geringe Verformung verblieb jedoch.

4.3.2 Exzentrische Versuche

4.3.2.1 10 mm Exzentrizität

Bild 4.8 zeigt die horizontale Verformung in Wandmitte aufgetragen gegen die Kraft für alle Bauteilversuche mit einer exzentrischen Belastung von 10 mm. Der Kreis kennzeichnet die Stelle der maximalen Kraft. Tabelle 4.6 fasst die Ergebnisse der Versuche zusammen.

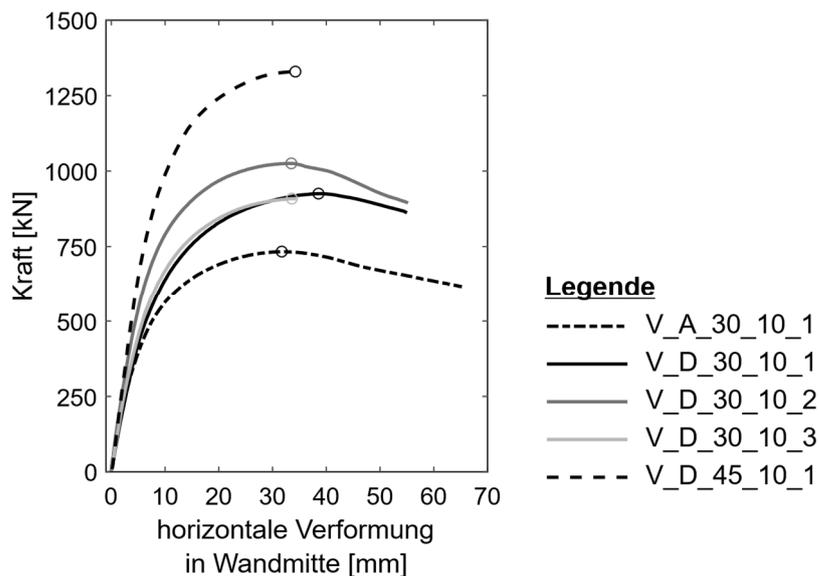


Bild 4.8: Kraft-Verformungs-Diagramm der Versuche mit 10 mm Exzentrizität

Das generelle Verhalten der Prüfkörper ist gleich – unabhängig von Kernaufbau und Kerndicke. Zunächst verläuft der Anstieg von Kraft und Verformung linear mit einem folgenden Abflachen der

Kurven. In den Versuchen V_A_30_10_1, V_D_30_10_1 und V_D_30_10_2 nimmt nach dem Erreichen der Maximalkraft die Kraft langsam ab, wohingegen die Verformung weiter zunimmt. Bei diesen Versuchen wurden maximale Verformungen unmittelbar vor dem manuellen Abbruch der Versuche, w_{Ende} , von bis zu 67,63 mm bestimmt. Unabhängig davon liegt die horizontale Verformung bei Erreichen der Maximalkraft in einem Bereich zwischen 31,71 mm und 38,55 mm für alle Versuche. Der Versuch V_D_30_10_3 versagte schlagartig, deshalb ist hier die Verformung bei Erreichen der Maximallast identisch mit dem Versuchsende. Der Versuch V_D_45_10_1 war einer der ersten Bauteilversuche und wurde manuell bei Erreichen der erzielten Maximalkraft abgebrochen, daher sind die Verformung $w_{P,max}$ und w_{Ende} gleich. Abhängig von Kerndicke und Kernaufbau unterscheiden sich die Maximalkräfte deutlich. Die geringste Kraft lag bei 733,44 kN in Versuch V_A_30_10_1, die größte betrug 1329,65 kN im Versuch mit 45 mm dicken, durchgängigem Wandkern. Die Maximalkraft der Versuche mit durchgängigem 30 mm dicken Betonkern variiert zwischen 908,88 kN und 1025,65 kN und liegt damit in einem Bereich zwischen den beiden anderen Wandaufbauten.

Tabelle 4.6: Zusammenfassung der 10 mm exzentrisch belasteten Bauteilversuche

Versuch	P_{max} [kN]	$w_{P,max}$ [mm]	w_{Ende} [mm]
V_A_30_10_1	733,44	31,71	67,63
V_D_30_10_1	925,54	38,55	55,08
V_D_30_10_2	1.025,62	33,49	55,22
V_D_30_10_3	908,88	33,60	33,60
V_D_45_10_1	1.329,65	34,24	34,24

Bild 4.9 illustriert das Bauteilverhalten eines Versuchskörpers exemplarisch an V_D_30_10_2 bei unterschiedlichen Kraftniveaus. Die Kreise kennzeichnen die jeweils gemessene horizontale Verformung in den Viertelpunkten. Auch hier ist deutlich zu erkennen, dass die Verformung bis zu einem Niveau von 75 % der Maximalkraft gering ist. Danach nimmt die Verformung überproportional zu. Ähnlich verhielten sich die restlichen Versuchskörper; die Abbildungen hierzu finden sich in Anhang B.3.

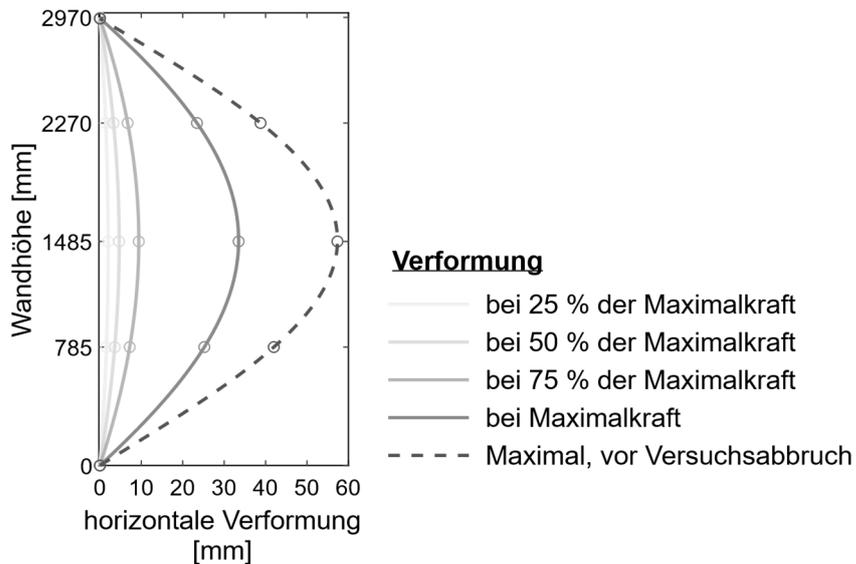


Bild 4.9: Verformte Wand bei unterschiedlichen Laststufen für 10 mm Exzentrizität (V_D_30_10_2)

Die Dehnungen in den außenliegenden Holzlamellen sowie in Wandmitte auf dem Betonkern für alle Versuchskörper zeigt Bild 4.10. Unabhängig vom Versuch und der Kraft bis zum Erreichen der Maximalkraft entwickelt sich die Dehnung in Wandmitte im Betonkern linear mit der Kraft. Die maximalen Dehnungen des Betonkerns in Wandmitte liegen bei ca. -1 ‰.

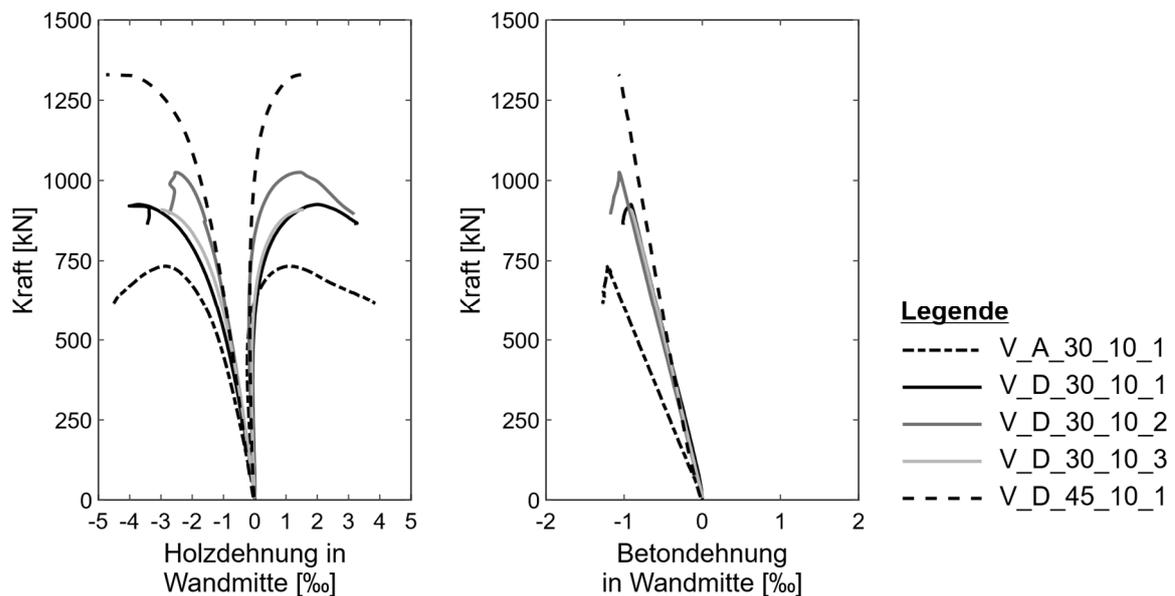


Bild 4.10: Dehnungen in Wandmitte der Versuche mit 10 mm Exzentrizität

Die Holzdehnung ist zunächst beidseitig des Querschnitts negativ. Auf der gedrückten Querschnittsseite steigt die Dehnung schneller an als auf der gezogenen Querschnittsseite. Nach einem anfänglich annähernd linearen Verlauf flachen die Kurven bei höheren Lasten ab und Erreichen ihr Maximum. Im Zuge des Abflachens der Kurven wird deutlich, ob die Dehnmessstreifen auf der gezogenen oder gedrückten Querschnittsseite angeordnet sind. Die maximale Holzdehnung nach dem Überschreiten der Maximalkraft liegt auf der gedrückten

Querschnittsseite im Bereich zwischen -4 ‰ und -5 ‰, wohingegen die Dehnungen auf der gezogenen Seite etwas geringer sind und im Bereich um 4 ‰ liegen. Ein vorzeitiges Enden der gemessenen und dargestellten Dehnungen kann ein Anzeichen dafür sein, dass es zu einem Materialversagen im Bereich des Dehnmessstreifens kam und der Dehnmessstreifen versagte.

Bei den Versuchen mit 10 mm Exzentrizität traten zwei unterschiedliche Versagensarten auf (Bild 4.11): Einerseits versagte Versuch V_D_30_10_3 schlagartig, in Bild 4.11, Teilbild a) dargestellt, durch ein Öffnen der Klebefuge zwischen Betonkern und den angrenzenden Holzlamellen am Wandkopf auf der gezogenen Seite des Querschnitts. Zu vermuten ist, dass es aufgrund der Verformung sowie der Ausbildung der Rollenkipplager zu einer Querkraftbelastung der Klebefuge kam, woraufhin der Prüfkörper versagte. Andererseits war ein duktiles Bauteilversagen zu sehen. Nach dem Erreichen der Maximalkraft nahm die Kraft ab, während die Verformung weiter zunahm. Bei diesen Versuchen war nach dem Ausbau aus der Prüfmaschine an den Versuchskörpern Materialversagen an den äußersten, auf der gedrückten Wandseite angeordneten Holzlamellen zu erkennen. Hierzu zeigt Bild 4.11, Teilbild b) exemplarisch für Versuch V_D_30_10_2 die Druckfalten, die sich in den außenliegenden Holzlamellen einstellten. Auf der gezogenen Querschnittsseite war augenscheinlich keine Materialschädigung auszumachen.



a) V_D_30_10_3 – schlagartiges Bauteilversagen



b) V_D_30_10_2 – duktiler Bauteilversagen

Bild 4.11: Schlagartiges und duktiler Versagen bei Bauteilversuchen mit 10 mm Exzentrizität aus [83]

4.3.2.2 20 mm Exzentrizität

Das generelle Bauteilverhalten der Versuche mit 20 mm Exzentrizität ist sehr ähnlich zu dem der Versuche mit 10 mm Exzentrizität. Hierzu zeigt Bild 4.12 das Kraft-Verformungsdiagramm für die Versuche mit 20 mm Exzentrizität. Zwei der Versuche versagten schlagartig mit Erreichen der Maximalkraft, während ein Versuch ein duktileres Bauteilverhalten aufzeigte und nach Überschreiten der Maximalkraft die Verformung weiter zunahm. Die erzielten Maximalkräfte betragen 710,64 kN und 702,72 kN bei den Versuchen V_D_30_20_1 und V_D_30_20_2. Die Maximalkraft des Versuchs V_D_30_20_3 lag mit 832,80 kN höher. Im Vergleich zu den Versuchen mit 10 mm Exzentrizität sind die Maximalkräfte geringer. Die Verformung in Wandmitte betrug ca. 34 mm bzw. 42 mm bei Erreichen der Maximalkraft und liegt damit in einem ähnlichen Bereich wie bei den Versuchen mit 10 mm Exzentrizität. Bei einer Verformung von 55 mm wurde Versuch V_D_30_20_3 manuell abgebrochen.

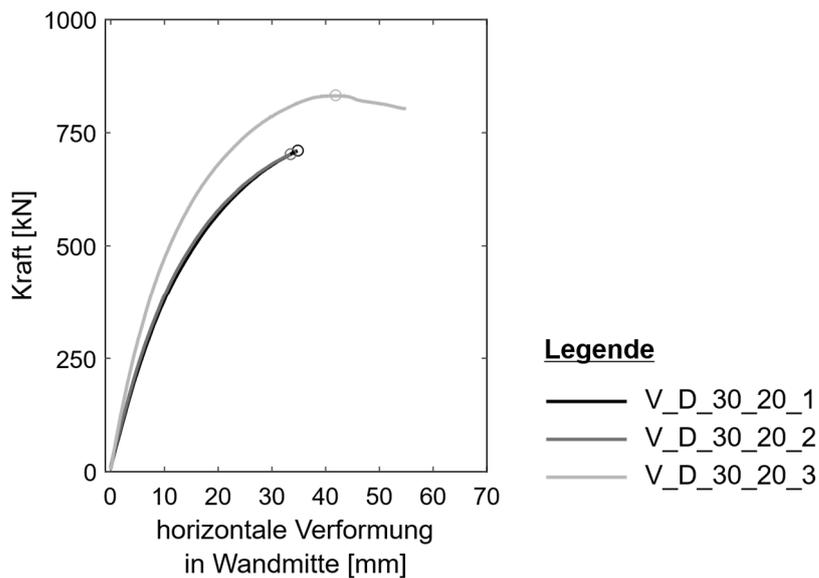


Bild 4.12: Kraft-Verformungs-Diagramm der Versuche mit 20 mm Exzentrizität

Bild 4.13 zeigt die Verformung des Wandsegments exemplarisch für Versuch V_D_30_20_3 bei unterschiedlichen Kraftniveaus bezogen auf die Maximalkraft. Die Verformungen im unteren Kraftbereich, bis zu 75 % der Maximalkraft, sind mit ca. 10 mm gering und liegen in der gleichen Größenordnung wie bei den Versuchen mit einer Exzentrizität von 10 mm. Danach nimmt die Verformung überproportional zu. Die weiteren Wandverformungen sind in Anhang B.3 aufgeführt.

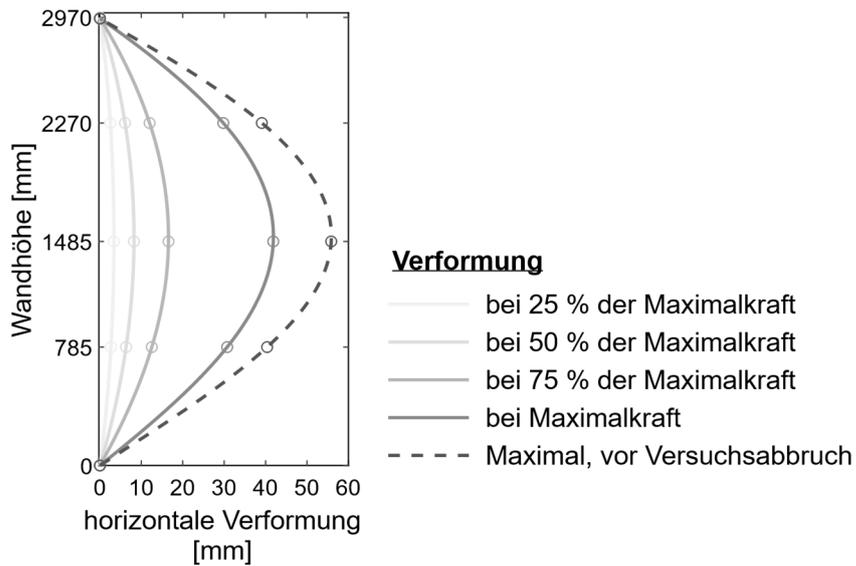


Bild 4.13: Verformte Wand bei unterschiedlichen Laststufen für 20 mm Exzentrizität (V_D_30_20_3)

Die Betondehnungen in Wandmitte in der Mitte des Querschnitts sind bis zum Erreichen der maximalen Kraft linear. Die maximale Dehnung beträgt bei allen Versuchen ca. -1 ‰ und der Betonkern wird ausschließlich auf Druck beansprucht. Die Holzdehnungen sind bei geringen Kräften ausschließlich negativ und mit zunehmender Verformung prägen sich Druck- bzw. Zugdehnung aus. Die maximalen Holzdehnungen auf der gedrückten Querschnittsseite liegen im Bereich von -4 ‰; die geringeren Dehnungen in Versuch V_D_30_20_3 sind darauf zurückzuführen, dass es unmittelbar neben dem Dehnmessstreifen zur Ausbildung von Druckfalten kann und der Dehnmessstreifen vermutlich versagte. Auf der gezogenen Querschnittsseite ist die maximale Zugdehnung bei Versuch V_D_30_20_3 bei knapp 5 ‰, die der schlagartig versagten Versuche bei knapp über 1 ‰.

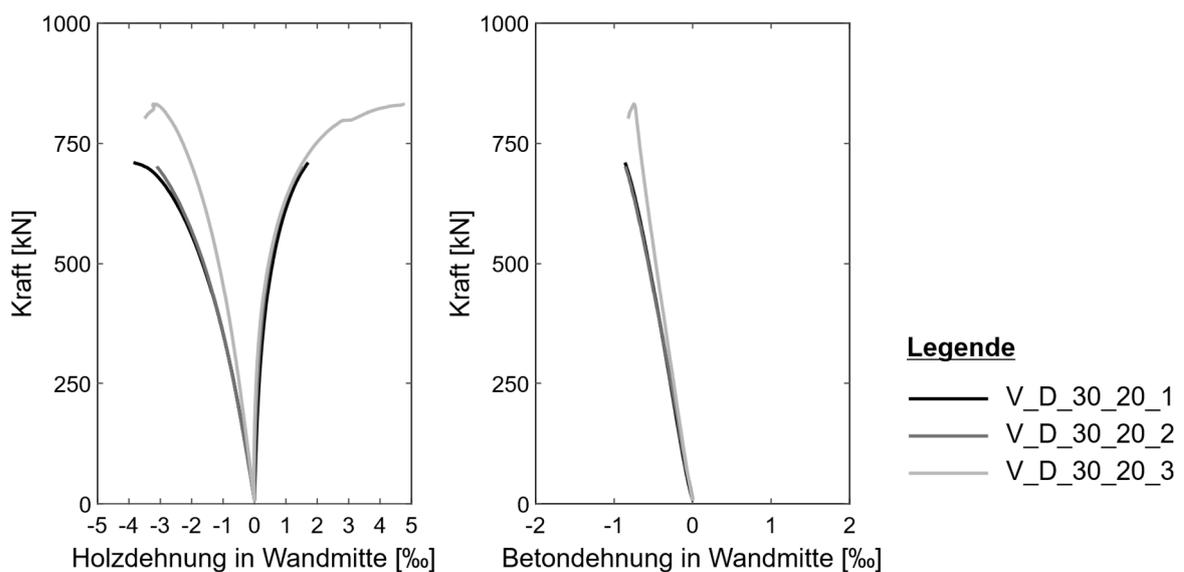


Bild 4.14: Dehnungen in Wandmitte der Versuche mit 20 mm Exzentrizität

Bei Bauteilversuch V_D_30_20_3, der duktil versagte, waren nach dem Ausbau aus der Prüfmaschine die Druckfalten auf den außenliegenden Holzlamellen der gedrückten Seite des Querschnitts mit bloßem Auge gut zu erkennen, während auf der gezogenen Seite keine Materialschädigung zu sehen war. Bild 4.15 zeigt die zwei Prüfkörper, die schlagartig versagten. Bei Versuch V_D_30_20_1 öffnete sich die Klebefuge am Wandkopf und bei Versuch V_D_30_20_2 am Wandfuß. Bei Versuch V_D_30_20_1 sind Holzanhaftungen am Betonkern zu erkennen, die bei Versuch V_D_30_20_2 nicht vorkommen. Auch hier ist zu vermuten, dass es wie bei Versuch V_D_30_10_3 aufgrund der Verformung sowie der Ausbildung der Rollenkipplager zu einer Querkzugbelastung der Klebefuge kam, welcher diese nicht standhielt und versagte.



a) V_D_30_20_1



b) V_D_30_20_2

Bild 4.15: Schlagartiges Versagen bei Bauteilversuchen mit 20 mm Exzentrizität aus [83]

4.4 Zwischenfazit

Die Bauteilversuche im Maßstab 1:1 zeigen: Der angedachte Produktionsprozess für Wandbauteile mit zusammengesetztem Querschnitt, die Integration von Betonbauteilen in die industrielle Herstellung von Brettsper Holz, ist realisierbar. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Passgenauigkeit der Betonbauteile zu legen, insbesondere wenn Beton und Holz im Wandkern zur Anwendung kommen. Während der Versuche zeigten die Wandsegmente mit zusammengesetztem Querschnitt das erwartete Verhalten. Die zentrisch belasteten Wandsegmente wiesen ein Stabilitätsversagen auf und die exzentrisch belasteten zeigten ein Materialversagen in den äußersten Holzlamellen auf der gedrückten Querschnittsseite.

Abschnitt 5

Analytische Modellierung

5.1 Geometrie, Materialkennwerte und Berechnungsannahmen

Die analytische Modellierung der Wandsegmente erfolgte unabhängig von der aufgetragenen Exzentrizität mit einer Wandhöhe von 2,97 m, als Abstand zwischen den beiden Drehpunkten der Rollenkipplager. Als Wandlänge angesetzt wurden entweder 0,5 m für die Wandsegmente mit durchgängigem Betonkern oder 0,4 m für die Wandsegmente mit alternierend aufgebautem Betonkern. Die Schichtdicken der einzelnen Schichten wurden mit den Sollmaßen abgebildet: 30 mm Schichtdicke bei den Holzschichten und 30 mm bzw. 45 mm Schichtdicke für die Kernlage.

Aufgrund der geringen Streuung der Materialeigenschaften des verwendeten Betons wurde für jede Versuchsnachrechnung der Mittelwert des E-Moduls mit 46774 N/mm² und darauf aufbauend, je nachdem ob erforderlich, ein Schubmodul von 19489 N/mm² angesetzt.

Im Gegensatz zu den gering streuenden Materialeigenschaften des Betons streuen die des verwendeten Holzes deutlich. Daher erfolgt die analytische Modellierung der Versuche mit einem oberen und einem unteren Grenzwert der Materialeigenschaften. Als unterer Grenzwert diente der Mittelwert des E-Moduls, siehe Tabelle 4.2. Der E-Modul des oberen Grenzwertes berechnete sich aus der Summe des Mittelwertes und der Standardabweichung. Wegen der geringen Holzfeuchtigkeit der Versuchskörper von im Mittel 8,6 % wurde der Einfluss der Holzfeuchtigkeit, (siehe Abschnitt 2.1.5) berücksichtigt und der E-Modul erhöht. Ausgehend von einer Holzfeuchtigkeit von 12 % wurde für jedes Prozent Feuchtigkeitsunterschreitung der E-Modul um 1,5 % erhöht. Neben dem E-Modul sind für die analytische Modellierung auch der Rollschubmodul und der Schubmodul erforderlich. Gemäß [39, S. 321] ist es möglich, den Rollschubmodul basierend auf der Rohdichte des Holzes nach Gleichung (5-1) zu bestimmen.

$$G_R = 171 \cdot \rho - 22,7 \quad (5-1)$$

Mit ρ Rohdichte

G_R Rollschubmodul

Für das bei den Versuchen verwendete Holz ergibt sich mit einem Mittelwert der Rohdichte gemäß Tabelle 4.2 ein mittlerer Rollschubmodul von 48,2 N/mm². Aufgrund der Streuung des Rollschubmoduls und der damit einhergehenden Unsicherheit der Bestimmungsgleichung (5-1), siehe [39, S. 321], wurde für die analytische Modellierung der untere Grenzwert des Rollschubmoduls zu 40 N/mm² und der obere Grenzwert zu 80 N/mm² angesetzt. Diese Grenzwerte

nennt auch [39, S. 321]. Als Schubmodul wurde ein unterer Grenzwert von 400 N/mm² und ein oberer Grenzwert von 790 N/mm² verwendet. Dies entspricht auch, wie [125, S. 91] aufführt, dem Fall, dass der Schubmodul in etwa das 10-fache des Rollschubmoduls entspricht. Tabelle 5.1 fasst die verwendeten Materialeigenschaften für den unteren und den oberen Grenzwert zusammen.

Tabelle 5.1: Zusammenfassung der für die analytische Modellierung verwendeten Holzeigenschaften

	E-Modul	Rollschubmodul	Schubmodul
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Unterer Grenzwert	11.160	40	400
Oberer Grenzwert	13.601	80	790

Beiden Werkstoffen wurde ein linear-elastisches Materialgesetz unterstellt. Ebenso erfolgte keine Reduktion des E-Moduls vom Holz nach dem Überschreiten der Proportionalitätsgrenze. Für die Wandsegmente mit alternierend aufgebautem Kern wurde der E-Modul des Kerns entsprechend des Anteils des jeweiligen Baustoffs am Kernquerschnitt gemittelt. Alle Berechnungen vernachlässigen den Einfluss der Stahlteile und die Reibung in den Rollenkipplagern.

5.2 Zentrisch belastete Stäbe

5.2.1 Knicklasten für Stäbe mit zusammengesetztem Querschnitt

Zunächst wurde die Knicklast eines zentrisch gedrückten Stabes mit zusammengesetztem Querschnitt mit dem von [74, S. 49-50] entwickelten Formelwerk bestimmt und diese mit den in den Versuchen ermittelten Knicklasten verglichen. Wie [74] beschreibt, wurde hierzu in die Grundgleichung (2-3) das Biegemoment nach Gleichung (5-3) eingesetzt.

$$M = P \cdot w \tag{5-2}$$

Nach einigen Umformungen ergibt sich die homogene Differentialgleichung (5-3).

$$w'''' + w'' \cdot \left(\frac{P}{E_1 I_V \beta^2} - \frac{\omega^2}{\beta^2} \right) - w \cdot \frac{P}{E_1 I_V} \cdot \frac{\omega^2}{\beta^2} = 0 \tag{5-3}$$

Mit w, w'', w'''' *Verformung und deren Ableitungen*

P *Einwirkende Druckkraft*

ω, β *Faktoren*

E_1 *E-Modul Baustoff I*

I_V *Trägheitsmoment des Gesamtquerschnitts bei starrem Verbund*

Bei Annahme einer sinusförmigen Verformungsfigur, wie in Gleichung (5-4) angegeben,

$$w = a \cdot \sin \frac{n\pi}{l_{eff}} x \quad (5-4)$$

Mit α Faktor

l_{eff} Knicklänge

ergibt sich nach dem Ableiten der Verformungsfigur und Einsetzen in Gleichung (5-3) die kritische Knicklast gemäß Gleichung (5-5), da $a \neq 0$ sein muss. [74]

$$P_k = \frac{\pi^2}{l^2} \cdot E_1 I_V \cdot \frac{\beta^2 + \left(\frac{\omega \cdot l_{eff}}{\pi}\right)^2}{1 + \left(\frac{\omega \cdot l_{eff}}{\pi}\right)^2} \quad (5-5)$$

Die Faktoren ω und β ergeben sich für den im Rahmen der Arbeit verwendeten Querschnitt mit schubweichen Zwischenschichten nach den Gleichungen (5-6) und (5-7).

$$\omega^2 = \frac{C \cdot b}{E_1 A_1} \quad (5-6)$$

$$\beta^2 = \frac{\sum I_1}{I_V} \quad (5-7)$$

Mit C Schubfedersteifigkeit

b Breite des betrachteten Querschnitts

E_1 E-Modul Baustoff 1

A_1 Fläche des außenliegenden Gurtes

I_1 Eigenträgheitsmoment von Schicht 1

I_V Trägheitsmoment des Gesamtquerschnitts bei starrem Verbund

Das Trägheitsmoment des Gesamtquerschnitts bei starrem Verbund berechnet sich nach Gleichung (5-8) aus der Summe der Eigenträgheitsmomente und der Steineranteile der außen liegenden Querschnittsteile.

$$I_V = n_1 \cdot I_1 + n_2 \cdot \eta \cdot I_2 + n_1 \cdot A_1 \cdot e_1^2 \quad (5-8)$$

Mit	n_1, n_2	Anzahl der Schichten aus Material 1 oder Material 2
	η	Verhältnis der E-Moduli, bezogen auf den E-Modul von Werkstoff 1
	I_1, I_2	Eigenträgheitsmoment der unterschiedlichen Schichten aus Material 1 oder Material 2
	A_1	Fläche des außenliegenden Gurtes
	e_1	Schwerpunktabstand

Die Schubfedersteifigkeit C ergibt sich nach Gleichung (5-9) aus der Division des Rollschubmoduls der Querlage durch die Schichtdicke der Querlage.

$$C = \frac{G_{R,j}}{d} \quad (5-9)$$

Mit	C	Schubfedersteifigkeit
	$G_{R,j}$	Rollschubmodul der Querlagen
	d_j	Schichtdicke der Querlagen

Tabelle 5.2 führt die nach Gleichung (5-5) nach [74] berechneten kritischen Knicklasten für die unterschiedlichen Querschnittsaufbauten auf und vergleicht diese mit den in den Versuchen erzielten Knicklasten $P_{ki,versuch}$. Für den Querschnittsaufbau mit durchgängigem 30 mm dicken Betonkern ist der Mittelwert der drei Versuche angegeben. Bei dem Wandsegment mit alternierend aufgebautem Kern und dem Wandsegment mit dem 45 mm dicken durchgängigen Betonkern liegt die im Versuch erzielte Knicklast innerhalb der Knicklasten, die sich aus der Verwendung des unteren und oberen Grenzwertes ergeben. Bei den Wandsegmenten mit 30 mm dicken durchgängigem Betonkern liegt die mittlere Knicklast der drei Versuche mit $\Delta=77,2$ kN knapp oberhalb des oberen Grenzwertes. Die nach dem Southwellverfahren bestimmten theoretischen Knicklasten sind nicht in Tabelle 5.2 aufgeführt, liegen aber bei allen Versuchen oberhalb der berechneten Knicklasten.

Tabelle 5.2: Berechnete kritische Knicklasten basierend auf den Gleichungen von [74] und im Versuch erzielte Knicklasten

		Knicklast [kN]		
		Durchgängig		alternierend
Wandkern				
Kerndicke		30 mm	45 mm	30 mm
Unterer Grenzwert		1.129,9	1.526,1	889,9
Oberer Grenzwert		1.490,3	1.988,4	1.178,0
Versuchswerte $P_{ki,Versuch}$		1.567,5	1.805,5	1.074,5

5.2.2 Knicklasten für den schubstarren Stab mit effektiver Biegesteifigkeit

Wie in Abschnitt 2.6.5 aufgeführt, lässt sich die Knicklast von Stäben mit zusammengesetztem Querschnitt berechnen, wenn eine effektive Biegesteifigkeit angewendet wird, welche die Schubnachgiebigkeit berücksichtigt. Tabelle 5.3 führt die so berechneten Knicklasten auf. Zur Ermittlung der effektiven Biegesteifigkeit wurde einmal das γ -Verfahren, siehe Abschnitt 2.3.4.3 herangezogen, und einmal die auf dem Schubanalogieverfahren bestimmte Ersatzschubsteifigkeit, siehe Abschnitt 2.3.4.4. Daraus geht einerseits hervor, dass die nach dem γ -Verfahren und nach der Schubanalogie berechneten Knicklasten fast gleich sind, die der Schubanalogie sind marginal, bis zu 13,8 kN geringer. Andererseits sind die Knicklasten affin zu den in Abschnitt 5.2.1 aufgeführten.

Tabelle 5.3: Berechnete kritische Knicklasten, Schubanalogie- und γ -Verfahren

		Knicklast [kN]		
		Durchgängig		alternierend
Wandkern				
Kerndicke		30 mm	45 mm	30 mm
Schubanalogie	Unterer Grenzwert	1.133,7	1.551,4	888,9
	Oberer Grenzwert	1.485,7	1.995,2	1.171,5
γ -Verfahren	Unterer Grenzwert	1.139,8	1.559,2	893,9
	Oberer Grenzwert	1.496,4	2.009,0	1.180,4

5.3 Exzentrisch belastete Stäbe

5.3.1 Betrachtung als Stab mit zusammengesetztem Querschnitt

Ähnlich zum Vorgehen bei den zentrisch belasteten Stäben wurde zunächst die Differentialgleichung für den exzentrisch belasteten Stab ohne zusätzlich einwirkende Horizontallast hergeleitet, wie Bild 5.1 zeigt. Dies entsprach dem Vorgehen von [74, S. 49-50].

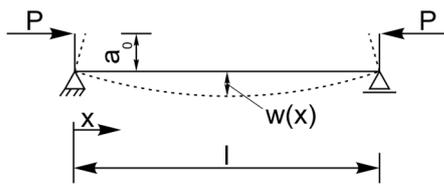


Bild 5.1: Statisches System mit Belastung für die analytische Modellbildung

Für das statische System mit den dazugehörigen Lasten \$P\$ aus Bild 5.1 ergibt sich das Biegemoment nach Theorie II. Ordnung nach Gleichung (5-10).

$$M(x) = P \cdot (a_0 + w(x)) \quad (5-10)$$

Mit

P	<i>Druckkraft</i>
a_0	<i>Lastexzentrizität</i>
$w(x)$	<i>Verformung an der Stelle \$x\$</i>

Wie in [74] beschrieben und affin zum Vorgehen bei den zentrisch belasteten Stäben wird die Momentengleichung (5-10) in die Grundgleichung (2-3) eingesetzt. Nach einigem Umformen ergibt sich die Differentialgleichung (5-11) zur Bestimmung der Verformung.

$$w^{VI} + w'' \cdot \left(\frac{P}{E_1 I_V \beta^2} - \frac{\omega^2}{\beta^2} \right) - w \cdot \frac{P}{E_1 I_V} \cdot \frac{\omega^2}{\beta^2} = \frac{P \cdot a_0}{E_1 I_V} \cdot \frac{\omega^2}{\beta^2} \quad (5-11)$$

Die Faktoren \$\omega\$ und \$\beta\$ sind identisch zu Gleichungen (5-6) und (5-7). Die Differentialgleichung (5-11) wurde symbolisch mit Matlab gelöst. Der verwendete Quellcode ist in Anhang C.1 aufgeführt.

Um die berechnete und die gemessene Verformung zu vergleichen, wird das Wandsegment entlang seiner Höhe von 2,97 m in 30 Teilstücke gleicher Länge geteilt. Für jeden Punkt entlang der Wandhöhe war für jede aufgebrauchte Kraft die Verformung zu berechnen. Hierzu wurde die Kraft schrittweise erhöht und als maximale Kraft diejenige aufgebracht, die im jeweiligen Versuch als Maximalkraft erzielt wurde.

Bild 5.2 zeigt die in den Versuchen gemessene horizontale Verformung in Wandmitte als schwarz durchgezogene Linien für die Versuche mit durchgängigem 30 mm dicken Betonkern und einer Exzentrizität von 10 mm. Gestrichelt dargestellt ist die berechnete Verformung. Die mit Kreisen versehene Linie ergibt sich bei Verwendung der unteren Grenzwerte, die mit Quadraten bei Verwendung der oberen Grenzwerte der angesetzten Holzeigenschaften. Insbesondere bis zu einer Last von ca. 500 kN zeigt sich eine gute Übereinstimmung der berechneten Verformung mit der im Versuch gemessenen Verformung. Im Kraftbereich darüber liegen zwei von drei Versuchen im Bereich zwischen den Grenzwerten, ein Versuch liegt nahe am oberen Grenzwert. Generell geben die berechneten Verformungsverläufe die gemessenen gut wieder; sie weichen jedoch in Abhängigkeit der verwendeten Materialparameter des Holzes teilweise stark von den gemessenen

ab. Dies war auch bei den restlichen Versuchen zu beobachten, die dazugehörigen Diagramme finden sich in Anhang C.2.

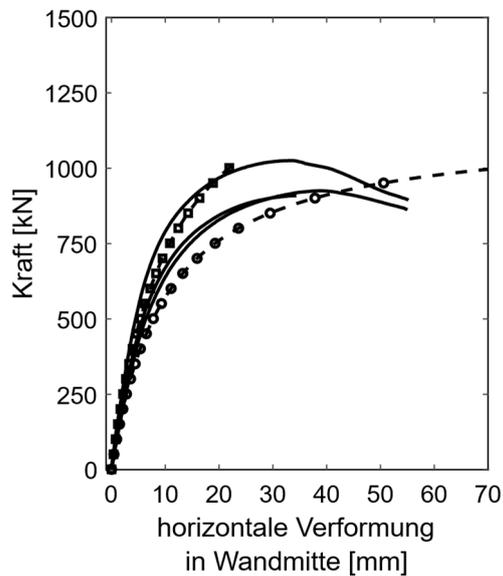


Bild 5.2: Vergleich der berechneten Verformung mit der in den Versuchen mit 10 mm Exzentrizität und durchgängigem 30 mm dicken Betonkern aufgezeichneten Verformung

Zusätzlich zur Verformung wurde die Dehnung in Wandmitte an den außenliegenden Holzlammeln sowie im Querschnittsmittelpunkt berechnet. Einen Dehnungsanteil hat einerseits die einwirkende Drucknormalkraft und andererseits das Biegemoment, welches wiederum einen Momentenanteil aus der Eigenbiegung der einzelnen Schichten und einen Normalkraftanteil aufgrund der Steineranteile besitzt. Die Summe der beiden Momentenanteile, siehe Gleichung (5-12), entspricht dem einwirkenden Moment, wie auch [74] berichtet.

$$M = M_M + M_N \quad (5-12)$$

Mit M_M Momentenanteil aus Eigenbiegung

M_N Momentenanteil aus Normalkraft

Der Momentenanteil aus dem Eigenbiegeanteil berechnete sich nach Gleichung (5-13). Zur Bestimmung der zweiten Ableitung der Bauteilverformung wurde die aus der Lösung der Differentialgleichung (5-11) bestimmte Verformung durch ein Polynom 4. Grades approximiert und darauf aufbauend das Polynom zweimal abgeleitet.

$$M_M = -E_{Holz} \cdot (I_{Holz} + \eta \cdot I_{Beton}) \cdot w'' \quad (5-13)$$

Mit E_{Holz} E-Modul des verwendeten Holzes

I_{Holz} Summe der Eigenträgheitsmomente des Holzquerschnitts

I_{Beton} Summe der Eigenträgheitsmomente des Betonquerschnitts

Der Momentenanteil, der aus den in den außen liegenden Schichten wirkenden Normalkräften resultiert, wurde aus der Subtraktion des Eigenbiegeanteils vom Gesamtbiegemoment bestimmt, wie auch Gleichung (5-14) zeigt.

$$M_N = 2 \cdot N_M \cdot e_1; \rightarrow N_M = \frac{M - M_M}{2 \cdot e_1} \quad (5-14)$$

Mit N_M *Normalkraft in den äußeren Holzlamellen aus dem Biegemoment*

Um die Dehnung aus der von der Prüfmaschine aufgetragenen Normalkraft zu bestimmen, wurde die Prüfmaschinenkraft in Abhängigkeit der Dehnsteifigkeitsverhältnisse auf die einzelnen Schichten nach Gleichung (5-15) verteilt.

$$N_{P,Holz} = P \cdot \frac{EA_{Holz}}{EA_{Gesamt}}; N_{P,Beton} = P \cdot \frac{EA_{Beton}}{EA_{Gesamt}} \quad (5-15)$$

Mit EA_{Holz} *Dehnsteifigkeit des Holzquerschnitts*

EA_{Beton} *Dehnsteifigkeit des Betonquerschnitts*

EA_{Gesamt} *Dehnsteifigkeit des gesamten Querschnitts*

Auf Grundlage, der in den einzelnen Schichten wirkenden Momente und Normalkräfte wurden, die Dehnungen in den äußerten Holzlamellen nach Gleichung (5-16) und zentrisch im Beton nach Gleichung (5-17) bestimmt. Einen Beitrag zur Dehnung in den äußerten Holzlamellen leisten das Eigenbiegemoment, die Normalkraft aus dem Moment sowie die Normalkraft resultierend aus der von der Prüfmaschine aufgetragenen Kraft.

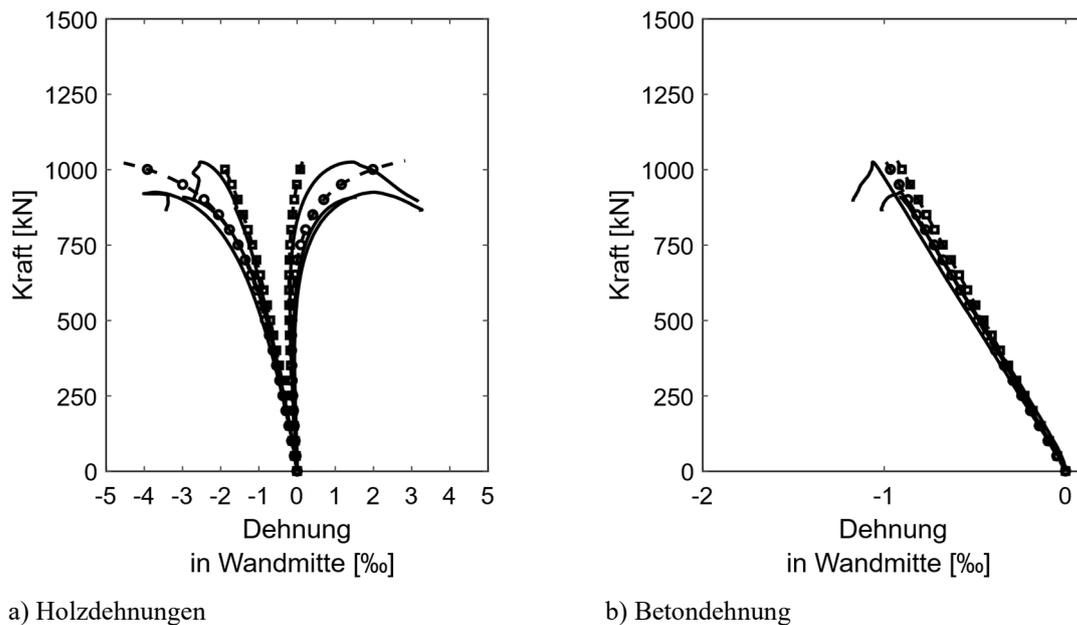
$$\epsilon_{Holz} = \frac{N_{P,Holz}}{A_{Holz} \cdot E_{Holz}} \pm \frac{N_{M,Holz}}{A_{Holz} \cdot E_{Holz}} \pm \frac{M_{M,Holz}}{W_{Holz} \cdot E_{Holz}} \quad (5-16)$$

Mit W_{Holz} *Widerstandsmoment der Holzlamellen*

Die Betondehnung wird ausschließlich zentrisch im Wandkern betrachtet; hier treten planmäßig nur Dehnungen aus der Normalkraft, aufgebracht von der Prüfmaschine, auf.

$$\epsilon_{Beton} = \frac{N_{P,Beton}}{A_{Beton} \cdot E_{Beton}} \quad (5-17)$$

Bild 5.3 zeigt die für den unteren und oberen Grenzwert der Materialeigenschaften berechneten Holzdehnungen auf der gedrückten und gezogenen Querschnittsseite in Teilbild a) und die Betondehnung zentrisch im Wandkern in Teilbild b). Aufgeführt sind zudem die während des Versuchs gemessenen Dehnungen, exemplarisch für die Bauteilversuche mit 30 mm dickem durchgängigem Betonkern mit einer Exzentrizität von 10 mm. Die Diagramme der restlichen Bauteilversuche enthält Anhang C.2. Bei den Holzdehnungen sind die berechneten Druck- und Zugdehnungen mit den gemessenen bis zu einer Kraft von ca. 750 kN fast identisch. Bei größeren Kräften weichen die berechneten – abhängig vom verwendeten Materialgrenzwert – zum Teil erheblich von den gemessenen Dehnungen ab. Die Verläufe der Betondehnung weisen eine sehr gute Übereinstimmung auf.



a) Holzdehnungen

b) Betondehnung

Bild 5.3: Vergleich der berechneten Verformung und der in den Versuchen mit 10mm Exzentrizität und durchgängigem Betonkern

5.3.2 Betrachtung als schubstarrer Stab mit effektiver Biegesteifigkeit

5.3.2.1 Berechnung der Verformung mit dem γ -Verfahren und der Schubanalogie

Eine weitere Möglichkeit, gedrückte Stäben mit schubweichem Querschnitt zu berechnen, besteht nach [78, S. 52] darin, eine effektive Biegesteifigkeit unter Berücksichtigung der Schubverformung zu bestimmen und damit die Grundgleichungen für Probleme nach Theorie II. Ordnung zu lösen, siehe Abschnitt 2.6.4.1. Für den hier betrachteten Fall, einem beidseitig gelenkig gelagerten Druckstab mit konstanter Lastausmitte (Bild 5.1), lässt sich die Verformung nach Theorie II. Ordnung gemäß Gleichung (5-18) berechnen.

$$w(x) = \frac{a_0 - a_0 \cdot \cos(\epsilon)}{\sin(\epsilon)} \cdot \sin\left(\frac{\epsilon}{l} \cdot x\right) + a_0 \cdot \cos\left(\frac{\epsilon}{l} \cdot x\right) - a_0 \quad (5-18)$$

Mit ϵ Stabkennzahl;

Bild 5.4 vergleicht exemplarisch dazu für die Versuche mit 10 mm Lastexzentrizität und 30 mm dickem durchgängigem Wandkern die Verformung in Wandmitte, berechnet nach Gleichung (5-18) mit der im Versuch aufgezeichneten Verformung. Die berechneten Ergebnisse sind als gestrichelte, die gemessenen als durchgezogene Linie dargestellt. In Teilbild a) erfolgte die Berechnung der effektiven Biegesteifigkeit nach dem γ -Verfahren, siehe Gleichung (2-7); für Teilbild b) wurde die effektive Biegesteifigkeit basierend auf der nach dem Schubanalogieverfahren bestimmten Ersatzschubsteifigkeit gemäß Gleichung (2-12) bestimmt. Verwendet wurden die in Abschnitt 5.1 beschriebenen Materialparameter, das Vorgehen zur Bestimmung der Verformung ist in Abschnitt 5.3.1 beschrieben. Unabhängig vom Verfahren zur Bestimmung der effektiven Biegesteifigkeit, gibt insbesondere der Verlauf mit den oberen Grenzwerten der Materialparameter, dargestellt als gestrichelte Linie mit Quadraten, die gemessene Verformung bis zu einer Kraft von ca. 750 kN gut

wieder. Die mit den unteren Grenzwerten der Materialeigenschaften berechnete Verformung überschätzt die gemessene Verformung. Besonders auffallend ist dies im Kraftbereich größer 500 kN.

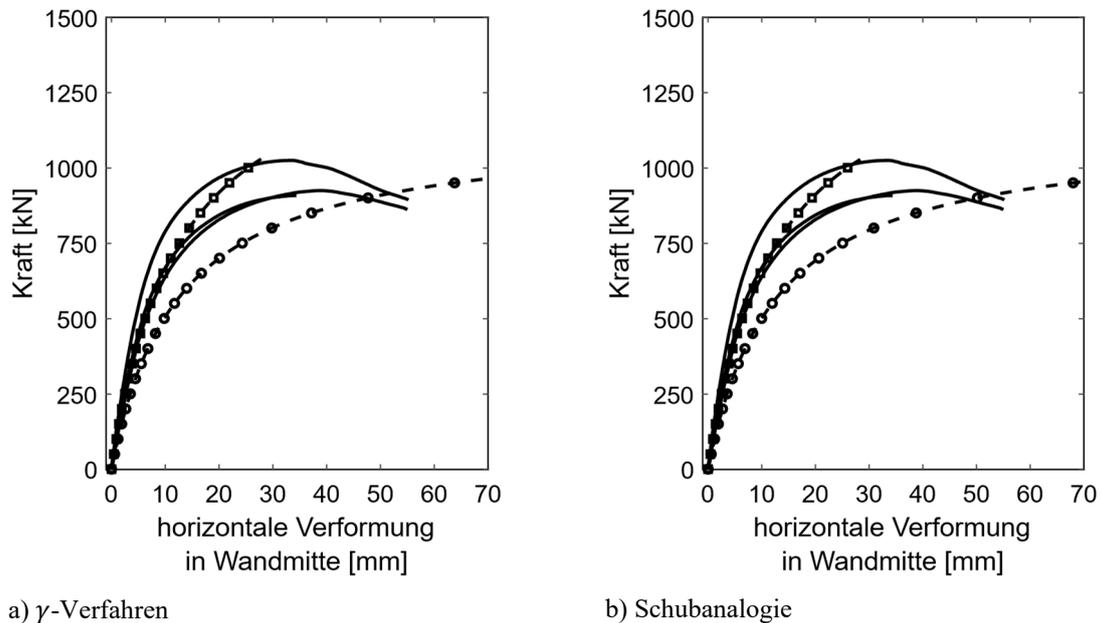


Bild 5.4: Vergleich der mit dem γ -Verfahren und der Schubanalogie berechneten Verformung und der in den Versuchen mit 10 mm Exzentrizität und durchgängigem Betonkern bestimmten Verformung

5.3.2.2 Dehnungsberechnung mit dem γ -Verfahren

Um auf der Verformung aufbauend die Schnittgrößen und Dehnungen im Querschnitt mit dem γ -Verfahren zu bestimmen, wird das auftretende Moment aufgeteilt in einen Anteil, der aus der Eigenbiegung der einzelnen Lamellen resultiert, sowie einem Normkraftanteil, der aus den Steineranteilen hervorgeht. Nach [125, S. 15] ergeben sich die jeweiligen Anteile nach den Gleichungen (5-19) und (5-20).

$$N_{M,i} = \frac{M}{EI_{eff}} \cdot \gamma_i \cdot e_i \cdot E_i \cdot A_i \quad (5-19)$$

$$M_{M,i} = \frac{M}{EI_{eff}} \cdot E_i \cdot I_i \quad (5-20)$$

- Mit
- $N_{M,i,d}$ Normkraftanteil aus dem Biegemoment in der Schicht i
 - $M_{M,i,d}$ Momentenanteil aus Eigenbiegung in der Schicht i
 - EI_{eff} Effektive Biegesteifigkeit berechnet nach dem γ -Verfahren
 - e_i Schwerpunktabstand der Schicht i zum Gesamtschwerpunkt

Auf Basis der aus dem Biegemoment resultierenden Momente und Normkräfte sowie unter Berücksichtigung der von außen einwirkenden Drucknormalkraft lässt sich an jeder Stelle im Querschnitt die Dehnung bestimmen. Nach Gleichung (5-15) erfolgt die Aufteilung der Drucknormalkraft anhand der Steifigkeitsverhältnisse der Dehnsteifigkeit. Die Dehnung an den außenliegenden Holzlamellen ist analog zu Gleichung (5-16) zu bestimmen, die Betondehnung im Schwerpunkt des Wandkerns nach Gleichung (5-17). Die nach dem γ -Verfahren berechneten sowie die im Versuch aufgezeichneten Dehnungen der Versuche mit 10 mm Lastexzentrizität sowie dem durchgängigem 30 mm dicken Betonkern zeigt Bild 5.5. Sowohl die berechneten Holz- als auch Betondehnungen spiegeln die Verläufe der gemessenen Dehnungen gut wider. Die gemessenen Holzdehnungen liegen weitestgehend innerhalb der mit den beiden Grenzwerten der Materialeigenschaften berechneten; die Betondehnungen liegen knapp unterhalb der berechneten. Ähnliches ist auch bei den weiteren Versuchen zu beobachten, die zugehörigen Diagramme führt Anhang C.3 auf.

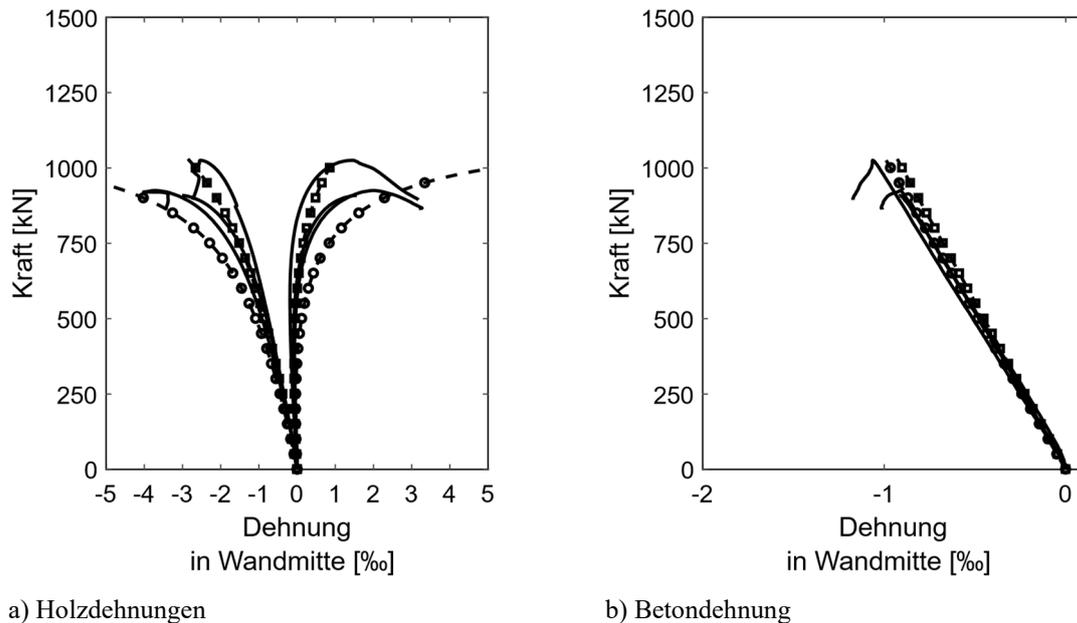


Bild 5.5: Berechnete Holz- und Betondehnungen nach dem γ -Verfahren im Vergleich zu den im Versuch bestimmten Dehnungen bei 10 mm Lastexzentrizität und 30 mm dickem durchgängigem Betonkern.

5.3.2.3 Dehnungsberechnung mit der Schubanalogie

Analog zur Dehnungsberechnung mit dem γ -Verfahren erfolgt eine Dehnungsberechnung nach dem Verfahren der Schubanalogie. Zunächst wurde auch hierfür die Verformung unter Berücksichtigung der schubweichen Zwischenschichten bestimmt, um darauf aufbauend die Schnittgrößen und Dehnungen zu berechnen. Die Dehnungsberechnung kann – abhängig vom Verhältnis der Knicklänge zur Elementdicke – nach der schubstarreren oder der schubweichen Theorie erfolgen. Als Grenzwert des Verhältnisses l/d gibt [125, S. 135] einen Wert von 20 an. Bei Verhältniswerten darüber lässt sich die schubstarre Theorie anwenden. Im vorliegenden Fall beträgt der Verhältniswert von Knicklänge zu Elementdicke 19,8 für die 15 cm dicken Wände und 18 bei den 16,5 cm dicken Wänden. Bild 5.6 vergleicht für den Versuch mit 10 mm Lastexzentrizität und

45 mm dicken Betonkern die in Wandmitte berechneten Dehnungen, die nach der schubstarr und schubweichen Theorie berechnet wurden. Daraus geht hervor, dass bei den hier untersuchten Bauteilen die Unterschiede zwischen beiden Verfahren äußerst gering sind.

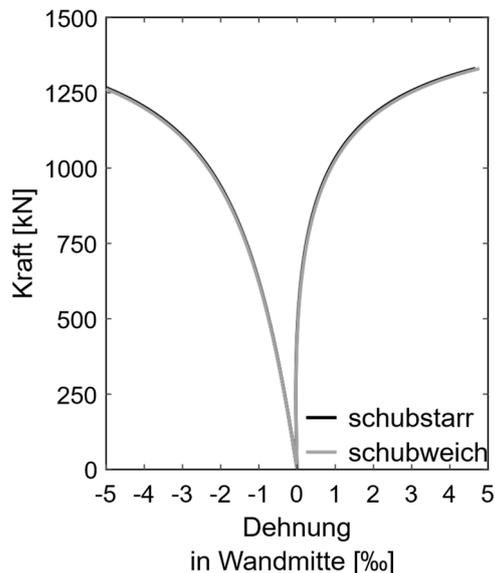


Bild 5.6: Vergleich der nach der schubstarr und schubweichen Theorie bestimmten Dehnungen in den außenliegenden Holzlamellen für den Versuch mit 10 mm Lastexzentrizität und 45 mm dicken Betonkern

Da beide Verhältniswerte l/d sehr knapp unterhalb von 20 liegen und wie zuvor beschrieben die Unterschiede äußerst gering sind, wird die schubstarre Theorie zur Ermittlung der Dehnungen verwendet. Die Dehnung in den äußersten Holzlamellen ergibt sich nach Gleichung (5-21). Berücksichtigt wird dabei die aus dem Moment resultierende Dehnung und die Dehnung aus der vertikal aufgebracht Kraft, welche anteilig der Steifigkeitsverhältnisse auf dem Holz- und Betonquerschnitt analog Gleichung (5-15) bestimmt wurde. Die Dehnung im Beton wurde nach Gleichung (5-17) berechnet.

$$\epsilon_{Holz} = \frac{N_{p,Holz}}{EA_{Holz}} \pm \frac{M}{B} \cdot \frac{d_1}{2} \pm \frac{M}{B} \cdot z_{s1} \quad (5-21)$$

Mit B Gesamtbiegesteifigkeit des Querschnitts

Für die oberen und unteren, zur analytischen Modellierung angewendeten, Materialparameter wurden die Holz- und Betondehnungen wie beschrieben berechnet und mit den gemessenen Dehnungen verglichen. Dies zeigt Bild 5.7 exemplarisch für die Versuche mit 10 mm Exzentrizität und 30 mm dickem durchgängigem Betonkern. Die restlichen Diagramme präsentiert Anhang C.4. Auch bei diesem Verfahren geben die berechneten Verläufe die gemessenen Verläufe gut wieder – sowohl bei den Holz- als auch bei den Betondehnungen.

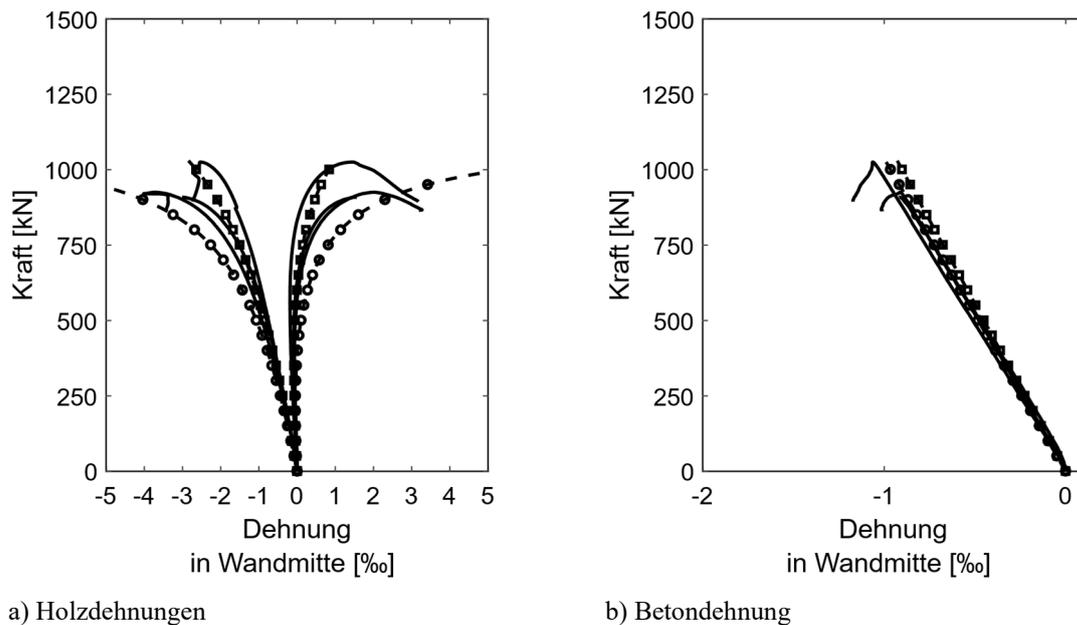


Bild 5.7: Berechnete Holz- und Betondehnungen nach der Schubanalogie im Vergleich zu den im Versuch bestimmten Dehnungen für die Versuche mit 10 mm Lastexzentrizität und 30 mm dickem durchgängigem Betonkern.

5.3.3 Vereinfachte Berechnung mittels Vergrößerungsfaktor

Neben der Lösung der Differentialgleichung für den jeweiligen Anwendungsfall ist es, wie beispielsweise [86, S. 3] und [125, S. 138-139] aufführen, ebenfalls möglich, den Einfluss von Theorie II. Ordnung mittels einer vereinfachten Bestimmung zu berücksichtigen. Hierzu wird die Verformung bzw. die jeweilige betrachtete Schnittgröße mit dem Vergrößerungsfaktor multipliziert, siehe Gleichung (2-45) in Abschnitt 2.6.4.3.

Nachfolgend berechnet wurde die Verformung nach Theorie I. Ordnung für einen beidseitig gelenkig gelagerten Einfeldträger mit beidseitig wirkendem Kopfmoment gemäß Gleichung (5-22) nach [103, S 4.2] für das hier untersuchte statische System mit der dazugehörigen Belastung.

$$w_I(x) = \frac{(\bar{\xi} - \bar{\xi}^3) \cdot M + (\xi - \xi^3) \cdot M}{6 \cdot EI} \cdot l_{Wand}^2 \quad (5-22)$$

Mit l_{Wand} Wandhöhe

ξ und $\bar{\xi}$ Laufvariablen

Darauf aufbauend ergab sich die Verformung nach Theorie II. Ordnung aus der Multiplikation der Verformung nach Theorie I. Ordnung mit dem Vergrößerungsfaktor. Zur Bestimmung der Verformung nach Theorie I. Ordnung und zur Berechnung der kritischen Knicklast für die Ermittlung des Vergrößerungsfaktors wurde eine effektive Biegesteifigkeit nach Gleichung (2-12) verwendet, deren Grundlage die nach dem Schubanalogieverfahren bestimmte Ersatzschubsteifigkeit ist. Als Materialeigenschaften wurden die in Abschnitt 5.1 beschriebenen Grenzwerte und Berechnungsannahmen verwendet.

Bild 5.8 zeigt als gestrichelte Linie die nach dem beschriebenen vereinfachten Verfahren bestimmte Verformung nach Theorie II. Ordnung für Bauteile, die den Versuchen mit 10 mm Exzentrizität sowie einem durchgängigem 30 mm dicken Betonkern entsprechen. Dabei gleichen die geometrischen Randbedingungen den Versuchen. Die Verformung wurde mit dem oberen und unteren Grenzwert der Materialeigenschaften bestimmt. Zudem dargestellt sind die dazugehörigen, während der Bauteilversuche gemessenen Verformungen. Es zeigt sich – insbesondere im Lastbereich bis ca. 750 kN – eine sehr gute Übereinstimmung der mit den oberen Grenzwerten der Materialeigenschaften berechneten Verformung und der gemessenen Verformung. Für die mit den unteren Grenzwerten berechnete Verformung liegt eine gute Übereinstimmung bis zu einem Lastbereich von ca. 400 kN vor. Unabhängig der verwendeten Materialeigenschaften geben die berechneten Verläufe die gemessenen Verläufe qualitativ gut wieder. Die für die restlichen Versuche vereinfacht bestimmten Verformungen im Vergleich zu den im Versuch gemessenen Verformung sind in Anhang C.5 aufgeführt. Auf eine weiterführende Bestimmung der Dehnung mit dem vereinfachten Verfahren wird aufgrund der guten Übereinstimmung der Verformung verzichtet.

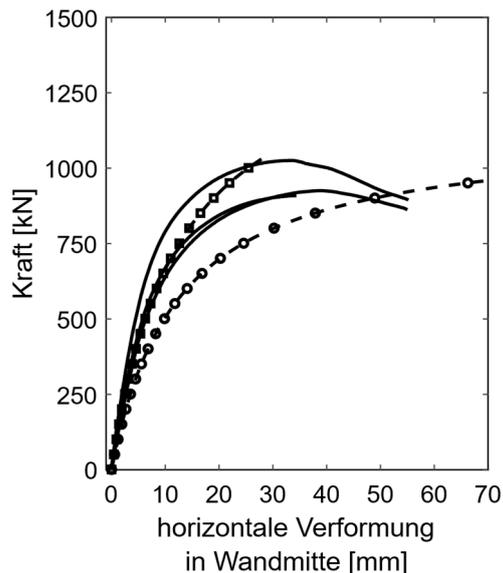


Bild 5.8: Vergleich der nach dem vereinfachten Verfahren berechneten Verformung und der in den Versuchen mit 10 mm Exzentrizität und durchgängigem 30 mm dicken Betonkern bestimmten Verformung

5.3.4 Betrachtung der zentrischen als exzentrische Versuche

Die Auswertung der zentrischen Bauteilversuche nach dem in Abschnitt 4.2.6.1 beschriebenen Southwellverfahren ergibt die tatsächliche Knicklast für den idealen Fall sowie eine anfängliche Lastexzentrizität, die aus dem Einbau und/oder einer Vorkrümmung des Prüfkörpers resultieren kann. Damit ist es möglich, die zentrisch belasteten Bauteilversuche als exzentrisch belastete Bauteilversuche zu betrachten und analytisch zu modellieren. Hierzu wurde anhand der Knicklast bestimmt nach dem Southwellverfahren die vorhandene Biegesteifigkeit $EI_{vorhanden}$ nach Gleichung (5-23) des Gesamtquerschnitts berechnet.

$$EI_{\text{vorhanden}} = \frac{P_{ki, \text{Southwell}}}{\pi^2} \cdot l_{\text{eff}}^2 \quad (5-23)$$

Mit $EI_{\text{vorhanden}}$ vorhandene Biegesteifigkeit

$P_{ki, \text{Southwell}}$ Knicklast bestimmt nach dem Southwellverfahren

Mithilfe der vorhandenen Biegesteifigkeit $EI_{\text{vorhanden}}$ sowie der bestimmten Exzentrizität für jeden zentrisch belasteten Versuch, siehe Tabelle 4.5, wurde die Verformung nach Theorie II. Ordnung gemäß Gleichung (5-18) bestimmt. Die so berechneten Verformungen wurden mit den in den Versuchen gemessenen Verformungen verglichen, dies zeigt Bild 5.9. Aufgetragen ist die horizontale Verformung in Wandmitte gegen die aufgebrachte Kraft bis zum Erreichen der Maximalkraft. Die durchgezogenen Linien stellen in verschiedenen Grautönen die bei den jeweiligen Versuchen gemessenen Werte dar; die gestrichelten Linien im jeweiligen Grauton die analytisch bestimmten Werte. Die berechneten Verformungsverläufe geben die gemessenen gut wieder. Auch liegt die berechnete Verformung bei Erreichen der Maximalkraft sehr nahe an der im Versuch gemessenen.

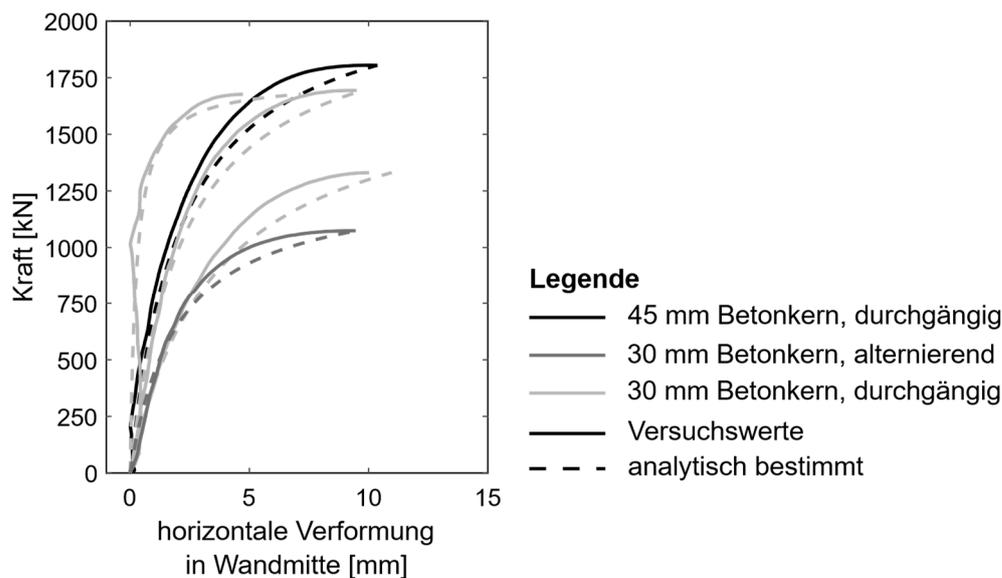


Bild 5.9: Analytisch bestimmte horizontale Verformung in Wandmitte der zentrisch belasteten Versuche modelliert als exzentrische Versuche mit geringer anfänglicher Exzentrizität im Vergleich zu den in den Versuch bestimmten Verformungen

5.4 Analytische Parameterstudie

Wie die vorangegangenen Abschnitte zur analytischen Modellierung zeigen, lassen sich mit üblichen Verfahren zur Berechnung von Brettsperrholz auch Wandbauteile mit zusammengesetztem Querschnitt aus Holz und Beton berechnen. Eine analytische Parameterstudie auf Bemessungsniveau soll das Potential aufzeigen, das durch das Einkleben von schlanken Lamellen aus ultrahochfestem Beton in den Wandkern entsteht. Die Parameterstudie umfasst, aufgrund der vorangegangenen Bauteilversuche, ausschließlich fünfplagige Querschnittsaufbauten. Die untersuchten Querschnittsaufbauten entsprechen üblichen, siehe beispielsweise [59, 115]. Die

betrachteten Querschnittsaufbauten gibt Tabelle 5.4 wieder; die Kernlage, die beim zusammengesetztem Wandquerschnitt aus ultrahochfestem Beton ausgebildet wird, ist hervorgehoben; die Querlagen sind kursiv dargestellt. Bei der Berechnung der Wandbauteile mit zusammengesetztem Querschnitt wurde davon ausgegangen, dass der Wandkern komplett aus ultrahochfestem Beton besteht und die Schmalseiten des Holzes in den Querlagen nicht verklebt sind. Die betrachteten Wandhöhen betragen 2,50 m, 2,85 m, 3,20 m und 3,50 m. Als statisches System wird eine Pendelstütze mit der jeweiligen Wandhöhe sowie einer anfänglichen spannungslosen Vorkrümmung als Ersatzimperfektion betrachtet, wie Bild 5.11 zeigt. Folgende Exzentrizitäten wurden berücksichtigt: $0,001 \cdot h$, $0,0025 \cdot h$ und $0,005 \cdot h$; h entspricht dabei der Wandhöhe. Unberücksichtigt blieben etwaige weitere Momente, Lasten oder Exzentrizitäten.

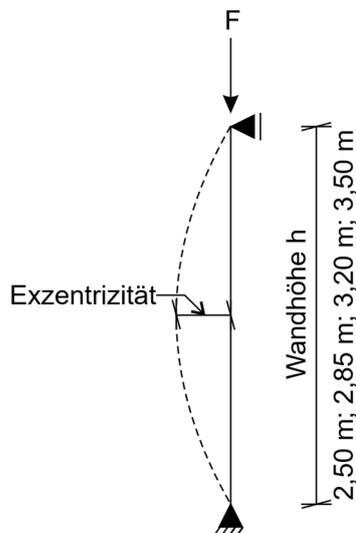


Bild 5.10: Gewähltes statisches System für die Parameterstudie

Tabelle 5.4: Untersuchte Querschnittsaufbauten

Querschnitt	Gesamtdicke [mm]	Lagenaufbau – Dicke der einzelnen Lagen [mm]				
		20	20	20	20	20
1	100	20	20	20	20	20
2	110	20	20	30	20	20
3	120	30	20	20	20	20
4	130	30	20	30	20	30
5	140	30	20	40	20	30
6	150	30	30	30	30	30
7	160	40	20	40	20	20

Als Vergleichsgrundlage diente die maximal aufnehmbare Kraft, die eine Wand mit zusammengesetztem Querschnitt im Vergleich zu einer homogenen Brettspertholz wand aufnehmen kann. Die Bestimmung der maximalen Kraft erfolgte iterativ. Berechnet wurde zunächst für die jeweilige Wandhöhe mit dem dazugehörigen Querschnitt die kritische Knicklast basierend auf einer

effektiven Biegesteifigkeit. In diese fließt die mit Hilfe der Schubanalogie bestimmte Ersatzschubsteifigkeit mit ein, sowie die um die Teilsicherheitsbeiwerte reduzierten mittleren Elastizitätseigenschaften. Mit der kritischen Knicklast und der jeweiligen Kraft ergab sich der Vergrößerungsfaktor nach Gleichung (2-45), um aufbauend auf dem Moment nach Theorie I. Ordnung das Moment nach Theorie II. Ordnung zu berechnen. Aus dem Biegemoment sowie der Normalkraft resultieren die in den jeweiligen Lagen im Querschnitt vorherrschenden Spannungen. Die Normalkraft wurde, analog zur analytischen Modellierung der Bauteilversuche, entsprechend der Dehnsteifigkeitsverhältnisse auf den Holz- bzw. Betonanteil aufgeteilt. Die Spannungsermittlung erfolgt abhängig vom Verhältnis Knicklänge zu Wanddicke nach der schubstarrn Theorie oder der schubnachgiebigen Theorie. Insgesamt wurden vier Spannungsnachweise auf Bemessungsniveau geführt, die auch als Abbruchkriterium des iterativen Verfahrens dienten. Für die außenliegenden Holzlamellen den Nachweis für Querschnitte unter Spannungskombination aus Druck- und Biegespannung gemäß DIN EN 1995-1-1 [147], Absatz 6.2.4 wobei die Ausnutzung aufgrund der Druckspannung quadratisch eingeht, sowie unter der Spannungskombination aus Zug- und Biegespannung gemäß DIN EN 1995-1-1 [147], Absatz 6.2.3. Beim Betonquerschnitt durfte die maximale Druckspannung nicht größer sein als die nach DIN EN 1992-1 [146] zulässige, zudem waren beim Betonquerschnitt keine Zugspannungen zulässig. Tabelle 5.5 und Tabelle 5.6 geben die verwendeten charakteristischen Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften sowie die Teilsicherheitsbeiwerte für das Holz und den ultrahochfesten Beton wieder.

Tabelle 5.5: Verwendete Berechnungsparameter Holz

Druckfestigkeit in Faserrichtung ¹	$f_{c,0,k}$	[N/mm ²]	21,0
Zugfestigkeit in Faserrichtung ¹	$f_{t,0,k}$	[N/mm ²]	14,5
Biegefestigkeit ¹	$f_{m,k}$	[N/mm ²]	24,0
Rollschubfestigkeit ¹	$f_{v,R,k}$	[N/mm ²]	0,8
E-Modul ¹	$E_{0,mean}$	[N/mm ²]	11.000
Schubmodul ¹	$G_{0,mean}$	[N/mm ²]	690
Rollschubmodul ³	G_R	[N/mm ²]	69
Teilsicherheitsbeiwert ²	γ_M	[-]	1,3
Modifikationsbeiwert ²	k_{mod}	[-]	0,8

Legende:

¹ aus DIN EN 338 [149]

² aus DIN EN 1995-1-1 [147]

³ aus [125, S. 94], $G_R = 0,1 \cdot G_{0,mean}$

Tabelle 5.6: Verwendete Berechnungsparameter Beton aus [124]

Druckfestigkeit	$f_{c,k}$	[N/mm ²]	130,0
E-Modul	E_{mean}	[N/mm ²]	46.000
Schubmodul	G_{mean}	[N/mm ²]	18.750
Teilsicherheitsbeiwert	γ_M	[-]	1,5
Dauerstandfaktor	α_{cc}	[-]	0,85

Aufgrund der geringen Querkräfte wurden keine Schubnachweise geführt. Den gesamten Prozess zur Berechnung der maximal aufnehmbaren Kraft, sowie wie die explizite Berechnung eines Beispiels stellt Anhang C.6 detailliert dar.

Durch die Betrachtung verschiedener Querschnittsaufbauten mit unterschiedlichen Querschnittsdicken in Kombination mit verschiedenen Wandhöhen ergeben sich für die betrachteten Wände unterschiedliche Schlankheiten λ . Die Schlankheit λ wurde nach Gleichung (5-24) bestimmt; der Trägheitsradius ergibt sich aus der Quadratwurzel des Quotienten der Biegesteifigkeit und der Dehnsteifigkeit.

$$\lambda = \frac{l_{eff}}{i} \quad (5-24)$$

Mit i Trägheitsradius, $i = \sqrt{\frac{B}{D}}$

Bild 5.11 zeigt die Laststeigerung in Prozent, bezogen auf die Tragfähigkeit einer reinen Brettsperrholzwand, aufgetragen gegen die Schlankheit, unberücksichtigt der unterschiedlichen Querschnittsaufbauten. Die unterschiedlichen Grautöne kennzeichnen die Ergebnisse, die mit den unterschiedlichen Anfangsexzentrizitäten für die oben aufgeführten Randbedingungen und Annahmen berechnet wurden. Wie zu erwarten, nimmt die prozentuale Laststeigerung mit zunehmender Schlankheit ab. Der Einfluss der unterschiedlichen Exzentrizitäten zeigt sich in diesem Fall bis zu einer Schlankheit von ca. 70. Die größte Laststeigerung wird bei einer Schlankheit von ca. 50 bei der Exzentrizität von $0,001 \cdot h$ erreicht und beträgt knapp 60 %. Die Laststeigerungen der beiden anderen untersuchten Exzentrizitäten fallen mit ca. 37 % bei der Exzentrizität von $0,005 \cdot h$ bzw. 46 % bei der Exzentrizität von $0,0025 \cdot h$ geringer aus. Ab einer Schlankheit von ca. 70 spielt die anfängliche Exzentrizität eine untergeordnete Rolle, was sich daran zeigt, dass die größten Laststeigerungen bei einer expliziten Schlankheit nicht mehr nur mit der geringsten Exzentrizität zu erzielen waren.

Im Zuge der Berechnungen zeigten sich zwei Versagensarten. Die überwiegend auftretende Versagensart war das Druckversagen der außenliegenden Holzlamellen. Weiterhin versagte Querschnitt 2 bei den Wandhöhen von 3,20 m und 3,50 m bei einer Exzentrizität von $0,005 \cdot h$ aufgrund von Zugspannungen im Beton. Dies ist der Grund für die geringe Laststeigerung von nur ca. 3 % bei einer Schlankheit von 100. Bei der hier untersuchten größten Schlankheit von 105 betrug die Laststeigerung im Schnitt ca. 9 %.

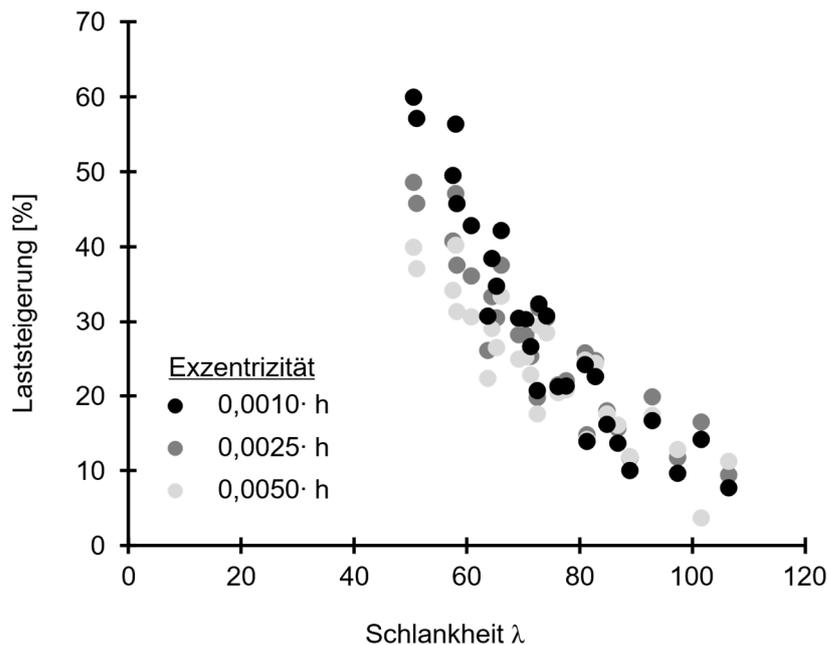


Bild 5.11: Laststeigerung [%] eines hybriden Wandbauteils bezogen auf die Tragfähigkeit einer Brettsperrholzwand für unterschiedliche Schlankheiten

5.5 Zwischenfazit

Methoden und Verfahren, die bereits zur Berechnung von Bauteilen aus Brettsperrholz verwendet werden, lassen sich auch für die Berechnung von Bauteilen, die einen aus Holz und ultrahochfestem Beton zusammengesetzten Querschnitt besitzen und überwiegend auf Normalkraft beansprucht werden, anwenden. Zumindest gilt dies für die hier untersuchten Querschnitte. Bei der Berechnung von Bauteilen mit zusammengesetztem Querschnitt sind die unterschiedlichen Steifigkeiten sowie die Baustoffspezifika zu berücksichtigen. So wird vorgeschlagen, die Bauteile dahingehend zu bemessen, dass der Betonkern im Grenzzustand der Tragfähigkeit keine Zugbeanspruchung erfährt. Für die Holzlamellen sollten die normativ verankerten Spannungsnachweise geführt werden. Um den Einfluss von Theorie II. Ordnung zu berücksichtigen, können vereinfacht die Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung mit dem Vergrößerungsfaktor, der auf der kritischen Knicklast beruht, bestimmt werden. Die Anwendung des im Holzbau üblichen Ersatzstabverfahren scheint für die Bemessung der Bauteile mit zusammengesetztem Querschnitt nicht zielführend zu sein, da sich einerseits die Ermittlung von $E_{0,05}$ zur Bestimmung der kritischen Knickspannung wegen der zwei verwendeten Materialien schwierig gestaltet und andererseits ist eine Vielzahl weiterer Versuche erforderlich, um die entsprechenden Beiwerte zu bestimmen.

Die Parameterstudie zeigte: Abhängig von der Schlankheit der betrachteten Wand kann es im Vergleich zu einer reinen Brettsperrholzwand – nur durch den Materialwechsel in der Kernlage – zu einer beträchtlichen Laststeigerung von ca. 60 % kommen. Dies gilt für die hier getroffenen Annahmen. Ebenso nimmt die Laststeigerung mit zunehmender Schlankheit der Wand ab; die anfängliche Exzentrizität spielt bei Schlankheiten größer 70 eine untergeordnete Rolle.

Abschnitt 6

Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Zum Erreichen der Klimaschutzziele existieren im Bauwesen unterschiedliche Ansätze. Ein Ansatz sind hoch- und ultrahochfeste Betone und damit schlankere und hocheffiziente Tragwerke; ein anderer Ansatz ist, vermehrt nachwachsende Rohstoffe einzusetzen. Die Idee dieser Arbeit ist, beide Ansätze zu kombinieren und einen Beitrag zur Entwicklung von „hybriden“ Wandelementen zu leisten, die aus einem zusammengesetzten Querschnitt aus Holz und ultrahochfestem Beton bestehen und bei dem sich die werkstoffspezifischen Stärken der beiden Materialien möglichst optimal ergänzen. Die Wandelemente mit zusammengesetztem Querschnitt werden wie Brettspertholz hergestellt, jedoch werden im Produktionsprozess an definierten Stellen Holzbretter durch „Betonbretter“ ausgetauscht. Der bewährte Produktionsprozess von Brettspertholz soll dabei so wenig wie möglich verändert werden.

Im Detail war zu zeigen, dass eine kraftschlüssige Verklebung von Holz und ultrahochfestem Beton mit Klebstoffen, wie sie in der Brettspertholzproduktion üblich sind, genauso möglich ist wie die Herstellung von Wandbauteilen im industriellen Maßstab. Weiter war aufzuzeigen, dass sich Methoden und Verfahren zur Berechnung von Wänden aus Brettspertholz auch für die Berechnung von Wänden mit zusammengesetztem Querschnitt eignen bzw. ob/wie die entsprechenden Verfahren anzupassen und zu erweitern sind.

Der aktuelle Stand der Forschung im Bereich Holz-Beton-Verbund zeigt, dass Holz-Beton-Verbundbauteile bis jetzt überwiegend, jedoch nicht ausschließlich, als Biegebauteile eingesetzt werden, vor allem für Deckentragelemente mit Aufbetonschicht. Neben solchen Anwendungen mit in-situ ausgeführter Ortbetonschicht oder aufgebrachtem Betonfertigteil, bei denen der Verbund zumeist durch Formschluss oder mit mechanischen Verbindungsmitteln erzeugt wird, gibt es bereits Untersuchungen und gebaute Beispiele. Auch existieren etliche Arbeiten zu geklebtem Holz-Beton-Verbund. Als Klebstoff wurde dabei meist ein fugenfüllendes Epoxydharz verwendet und eine dicke Klebefuge ausgebildet.

In der vorliegenden Arbeit wurde anhand umfangreicher kleinformatiger Druckscherversuche nach DIN EN 16351 [143] Anhang D die Eignung von unterschiedlichen Betonsorten, Betonoberflächenbehandlungen sowie Klebstoffen zur Herstellung einer kraftschlüssigen Verbindung der beiden Werkstoffe untersucht. Verwendete Betone waren ein nach Herstellerangaben ultrahochfester Beton, der auf einem vorgemischtem Compound basiert, sowie

eine Labormischung, bei der alle Zutaten einzeln gemischt wurden. Die verklebten Betonoberflächen waren entweder schalglatt und mit Aceton gereinigt, geschliffen oder sandgestrahlt. Insgesamt wurde die Eignung von fünf unterschiedlichen Klebstoffsystemen untersucht: ein feuchtigkeitshärtender Ein-Komponenten-Polyurethanklebstoff (1k-PU), ein Zwei-Komponenten-Polyurethanklebstoff (2k-PU), ein Melamin-Urea-Formaldehydharz (MUF), ein Phenol-Resorcin-Formaldehydharz (PRF) sowie ein Zwei-Komponenten-Epoxydharz (Epoxy). Die Prüfkörper waren immer aus fast fehlerfreiem Fichtenholz hergestellt und die Scherflächen hatten die Abmessungen von 50 mm x 50 mm. In die Beurteilung der Versuchsergebnisse flossen die maximale Scherspannung sowie die Bruchflächenanteile ein. Die Bruchflächenanteile wurden mithilfe eines hyperspektralen Bildgebungsverfahrens, das im Bauwesen erstmals für eine solche Fragestellung zum Einsatz kam, weitestgehend automatisiert ausgewertet. Von den Klebstoffen, die bei der Herstellung von Brettsperrholz üblich sind, erzielte der MUF nur unzureichende Ergebnisse. Dies zeigte sich in den Versuchen durch eine geringe Scherfestigkeit; außerdem war nahezu kein Substratausbruch auf den Bruchflächen zu sehen. Ebenso schnitt der verwendete PRF unterdurchschnittlich ab. Gute Ergebnisse konnten der 2k-PU und der Epoxy erzielen. Gleichermaßen vielversprechende Ergebnisse erreichte unabhängig vom verwendeten Beton der 1k-PU in Kombination mit einer geschliffenen Betonoberfläche. Mit der schalglatten Betonoberfläche waren auch gute Ergebnisse möglich, jedoch war die Streuung der Ergebnisse größer als bei der geschliffenen Betonoberfläche. Unzureichende Ergebnisse erzielte der 1k-PU mit der sandgestrahlten Oberfläche; vermutlich führte der manuelle Sandstrahlprozess zu einer zu großen Rauigkeit, was zum Überschreiten der zulässigen Klebefugendicke führte. Bei den als Tastversuche durchgeführten Delaminierungsversuchen zeigte sich die Kombination aus geschliffener Betonoberfläche mit einem 1k-PU ebenfalls vielversprechend.

Aufbauend auf den kleinformigen Versuchen wurden Bauteilversuche an Wandsegmenten im Maßstab 1:1 durchgeführt. Drei, jeweils aus fünf Lagen aufgebaute, Querschnitte, bei denen sich nur der Aufbau der Kernlage unterschied, waren Bestandteil der Untersuchungen. Zwei Querschnittsaufbauten besaßen einen Wandkern, der komplett aus ultrahochfestem Beton bestand, mit Dicken von 30 mm und 45 mm; ein Wandkern hatte einen aus Holz und ultrahochfestem Beton alternierend aufgebauten Kern. Die jeweils fünfteiligen aufgebauten Wandsegmente waren entweder 15,0 cm oder 16,5 cm dick. Die Wandhöhe betrug 2,84 m, die Länge der Wandsegmente 0,5 m bzw. 0,4 m bei den Segmenten mit dem alternierend aufgebauten Kern. Zur Herstellung wurden zunächst die Platten aus ultrahochfestem Beton gefertigt, nach dem Aushärten geschliffen und zu einem Brettsperrholzhersteller transportiert. Die Prüfkörperherstellung erfolgte, mit einem Ein-Komponenten-Polyurethanklebstoff, ohne grundsätzliche Änderung der Prozesskette unmittelbar in der industriellen Produktion. Hierfür wurden zwei Rohplatten verklebt und gepresst; nachträglich wurden aus den Roh-elementen die einzelnen Prüfkörper maschinell herausgetrennt. Die Versuche wurden in einer Standardprüfmaschine weggesteuert gefahren. Die Krafteinleitung in die Wandsegmente erfolgte zentrisch sowie mit einer konstanten Exzentrizität von 10 mm bzw. 20 mm. Mit den Rollenkipplagern an Wandkopf und Wandfuß betrug die Knicklänge etwa 2,97 m (Achsabstand der Kippachsen, idealisierte Betrachtung als Eulerfall 2). Die zentrischen Versuche zeigten alle ein Stabilitätsversagen auf, nach dem Ausbau der Versuchskörper war augenscheinlich keine Materialschädigung festzustellen. Die Knicklasten lagen in einem Bereich zwischen

1.074,48 kN für ein Wandsegment mit alternierend aufgebauten Wandkern und 1.805,52 kN für das Wandsegment mit 45 mm dickem Wandkern. Die nach dem Southwellverfahren bestimmten Knicklasten liegen zwischen 3 % bis 33 % oberhalb der im Versuch bestimmten Knicklasten. Dabei variierte die mit dem Southwellverfahren bestimmte anfängliche Imperfektion in einem Bereich zwischen 0,20 mm und 2,83 mm. Der größte Unterschied zwischen der im Versuch erzielten und der mit dem Southwellverfahren bestimmten Knicklast trat bei Versuch V_D_30_00_3 auf, hierbei betrug die anfängliche Imperfektion 2,83 mm. Bei den exzentrischen Versuchen trat überwiegend ein duktiler Versagen nach Erreichen der Maximalkraft auf; drei Versuche versagten schlagartig im Bereich der Klebfuge zwischen Holz und ultrahochfestem Beton. Bei den Prüfkörpern, die duktil versagten, waren nach dem Ausbau aus der Prüfmaschine Druckfalten in der äußersten Holzlamelle deutlich zu erkennen. Die Maximallasten variierten in Abhängigkeit des Wandaufbaus sowie der planmäßigen Exzentrizität zwischen 702,72 kN bei einer Exzentrizität von 20 mm in einem Segment mit 30 mm dicken durchgängigem Kern und 1329,65 kN bei 10 mm Exzentrizität in dem Segment mit 45 mm dicken durchgängigem Kern. Unabhängig davon lag die horizontale Verformung in der Wandmitte bei Erreichen der Maximalkraft im Bereich zwischen 30 mm und 40 mm. Die Dehnungen zeigten die erwarteten Druck- bzw. Zugdehnung an den außenliegenden Holzlamellen. Der Betonkern erfuhr eine reine Druckbeanspruchung.

Die Bauteilversuche wurden anschließend analytisch modelliert und die berechneten Ergebnisse den gemessenen gegenübergestellt. Die analytische Modellbildung erfolgte an einer Pendelstütze mit 2,97 m Knicklänge und einer Wandlänge von 0,5 m bzw. 0,4 m. In die Modellbildung flossen alle drei untersuchten Querschnitte aus den Bauteilversuchen ein. Für den Beton wurden die Mittelwerte der in den Begleitversuchen bestimmten Materialeigenschaften verwendet. Die Holzeigenschaften wurden aufgrund der großen Schwankungen der Materialeigenschaften durch einen oberen und unteren Grenzwert abgebildet. Als unterer Grenzwert wurde der Mittelwert der in den Begleitversuchen bestimmten Materialeigenschaften angesetzt und als oberer Grenzwert die Summe aus Mittelwert und Standardabweichung. Eine Unterscheidung fand hinsichtlich der Belastung statt; separat betrachtet wurden zentrische sowie exzentrische Versuche. Unabhängig vom Belastungsregime wurden analytische Modelle aufgestellt: Diese umfassen ein auf [74] beruhendes Differentialgleichungssystem welches die Verformung und Verschiebung der schubweichen Zwischenschichten miteinander koppelt und den Einfluss nach Theorie II. Ordnung berücksichtigt, sowie die Differentialgleichung für den schubstarreren Druckstab nach Theorie II. Ordnung welches unter Verwendung einer effektiven Biegesteifigkeit gelöst wird. Die effektive Biegesteifigkeit wurde einerseits mit dem γ -Verfahren und andererseits mit der auf der Schubanalogie basierenden Ersatzschubsteifigkeit ermittelt. Ein weiteres analytisches Modell stützte sich auf den Vergrößerungsfaktor, welcher auf der kritischen Knicklast basierte. Zu vergleichende Berechnungsergebnisse waren die Verformung, die Dehnung auf den außenliegenden Holzlamellen und die zentrische Betondehnung bei den exzentrisch belasteten Versuchen; bei den zentrisch belasteten Versuchen war die Knicklast zu vergleichen. Die mit unterschiedlichen analytischen Methoden berechneten Ergebnisse spiegeln die in den Versuchen gemessenen Größen gut wider. Die analytische Parameterstudie auf Bemessungsniveau bestätigt das Potential, das durch das Einkleben von schlanken Lamellen aus ultrahochfestem Beton in Brettsperrholzwände entstehen kann. Hierzu wurden sieben unterschiedliche, in der Praxis gängige

Querschnittsaufbauten jeweils für vier unterschiedliche Wandhöhen berechnet. Die Schlankheit lag im Bereich zwischen ca. 50 und ca. 105. Als Ersatzimperfektion wurde eine spannungslose anfängliche Krümmung mit unterschiedlichen Exzentrizitäten angenommen, weitere momentenverursachende Lasten blieben unberücksichtigt. Gezeigt wurde, dass die Laststeigerung, die durch das Einkleben des Betons in die Kernlage entsteht, bezogen auf die reine Brettsperrholzwand mit zunehmender Schlankheit abnimmt. Was darin begründet ist, dass mit zunehmender Schlankheit der Einfluss des Biegemomentes und der daraus resultierenden Spannungen gegenüber der Normalkraft zunimmt. Unabhängig von der anfänglichen Exzentrizität beträgt die Laststeigerung, unter den getroffenen Annahmen, bei einer Schlankheit von ca. 100 etwa 10 %. Die größte Laststeigerung erzielte die kleinste Schlankheit mit der kleinsten Imperfektion, diese lag unter den getroffenen Annahmen bei etwa 60 %.

6.2 Fazit

Die Motivation für diese Arbeit bestand darin einen ersten Beitrag zur Umsetzung der grundlegenden Idee: dem Einkleben von schlanken Lamellen aus ultrahochfestem Beton in Brettsperrholzelemente, unter zugrunde legen des etablierten Herstellungsprozesses von Brettsperrholz, zur Steigerung der Tragfähigkeit von überwiegend auf Normalkraft beanspruchte Elemente zu leisten. Ziel der Arbeit war daher aufzuzeigen, dass eine kraftschlüssige Verbindung von ultrahochfestem Beton und Holz mit Klebstoffen, die in der Brettsperrholzherstellung üblich sind, möglich ist. Darauf aufbauend galt es darzustellen, dass der propagierte Herstellungsprozess realisierbar, die Bauteile tragfähig, sowie das Bauteilverhalten mit üblichen Methoden der Berechnung von Brettsperrholz vorhersagbar ist.

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt: Erstens, es ist möglich, eine kraftschlüssige Verbindung der beiden Werkstoffe mittels Verklebung, mit in der Brettsperrholzindustrie üblichen Klebstoffen, zu realisieren. Dies zeigen die in Kapitel 3 beschriebenen kleinmaßstäblichen Druckscherversuche mit unterschiedlichen Klebstoffen, Betonsorten, und Betonoberflächenbehandlungen. Besonders geeignet scheint eine geschliffene Betonoberfläche in Kombination mit einem Ein-Komponenten Polyurethanklebstoff zu sein. Die als Tastversuche durchgeführten Delaminierungsversuche deuten darauf hin, dass auch eine dauerhafte Klebeverbindung mit der zuvor genannten Kombination aus Klebstoff und Beton möglich ist. Zweitens zeigt der durchlaufene und in Kapitel 4 beschriebene Prozess zur Herstellung von Prüfkörpern im Maßstab 1:1 im industriellen Umfeld, dass die Herstellung von Wandbauteilen mit eingeklebten schlanken Lamellen aus ultrahochfestem Beton umsetzbar ist. Besonderes Augenmerk, insbesondere wenn in der Kernlagen Holz und Betonlamellen eingeklebt werden, ist, aufgrund der geringen zulässigen Klebstoffdicken, auf die Passgenauigkeit der Betonelemente zu legen. Die zur Analyse des Bauteilverhaltens durchgeführten Versuche belegen die Tragfähigkeit der Wandsegmente mit zusammengesetztem Querschnitt. Drittens zeigt die in Kapitel 5 beschriebene analytische Modellierung der Bauteilversuche, dass unterschiedliche existierende Verfahren zur Berechnung von homogenem, rein aus Holz bestehendem, Brettsperrholz, unter Berücksichtigung veränderter Steifigkeitsverhältnisse auch zur Beschreibung des Bauteilverhaltens von Wänden mit zusammengesetztem Querschnitt verwendet werden können. Dies geht aus der guten Übereinstimmung der rechnerisch bestimmten Verformungen und Dehnungen mit den in den Bauteilversuchen gemessenen hervor.

Eine pauschale Aussage, um wie viel sich die Tragfähigkeit von Brettsperrholzwänden durch das Einkleben von schlanken Lamellen aus ultrahochfestem Beton steigern lässt ist nicht möglich. Dies ist unter anderem darin begründet, dass unterschiedliche Wandaufbauten, Schlankheiten, Lasten und ggf. weitere Faktoren, z. B. die zulässigen Zugspannungen im Beton aufgrund eines möglichen Zugversagens des Betonkerns, in die Betrachtung miteinfließen. Die in Kapitel 5 durchgeführte analytische Parameterstudie auf Bemessungsniveau zeigt jedoch, dass die rechnerisch zulässigen Tragfähigkeitssteigerungen zum Teil erheblich sein können.

6.3 Ausblick

Bei geklebten Verbindungen ist vor allem die Dauerhaftigkeit wichtig. Aspekte zur Dauerhaftigkeit der Klebeverbindung und zum Langzeittragverhalten der Wandbauteile mit zusammengesetztem Querschnitt sind bis jetzt noch nicht untersucht und dementsprechend ein interessantes künftiges Forschungsfeld.

Die Verklebung der beiden Werkstoffe ist von besonderem Interesse: Ist diese dauerhaft, kraftschlüssig, einfach sowie kostengünstig herzustellen, eröffnet dies dem Holz-Beton-Verbundbau durch eine in die industrielle Produktion von geklebten Holzbauteilen integrierte Herstellung nahezu ungeahnte Möglichkeiten. Neben dem Einkleben des Betons in die Kernlage von Wandbauteilen ist es denkbar, den Beton in weiter außenliegenden Schichten einzukleben und weiterhin für den vertikalen oder horizontalen Lastabtrag heranzuziehen. Die am Querschnitt weiter außen angeordneten Betonlamellen steigern nicht nur die Dehnsteifigkeit erheblich, sondern auch die Biegesteifigkeit. Grundsätzlich ist hier jedoch in Frage zu stellen, wie mit möglichen Zugspannungen im Beton umzugehen ist. Weiterhin könnten die außenliegenden Betonlamellen, bei der Verwendung von Beton, der für den Lastfall Brand optimiert wurde, einen Schutz für den innenliegenden Holzquerschnitt im Brandfall darstellen. Vorstellbar sind auch Stützen aus Brett-schichtholz mit einzelnen Schichten aus ultrahochfestem Beton oder klassische Biegebauteile, deren oberste Lage in der Druckzone aus Beton ausgebildet ist.

Weiter sind bauphysikalische Aspekte wie das hygrothermische Verhalten zu untersuchen und baukonstruktive Fragen wie Anschlussdetails sowie Fragen zum Brandschutz zu lösen, um die Idee zeitnah in der Praxis realisieren zu können.

Zum Ende der vorliegenden Arbeit, wurde ein geeignetes Konzept zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit und des Langzeittragverhaltens, des hygrothermischen Verhaltens und der Wirksamkeit im außergewöhnlichen Lastfall Brand ausgearbeitet und ein dahingehendes Forschungsvorhaben erfolgreich akquiriert. Erste Erkenntnisse der im Jahr 2022 angelaufenen experimentellen Untersuchungen lassen auch in diesem Punkt positive Ergebnisse erwarten.

Abschnitt 7

Bezeichnungen

Lateinische Großbuchstaben

A	Fläche
A_i	Fläche der Schicht i
A_1	Fläche des außenliegenden Gurtes
A_G	Schubfläche
B	Biegesteifigkeit, Schubanalogienomenklatur
B_A	Summe der Eigenbiegesteifigkeit, Schubanalogienomenklatur
B_B	Summe der Steineranteile, Schubanalogienomenklatur
$B_{B,eff}$	Effektiven Steineranteile
C	Schubfedersteifigkeit
$C_1 - C_4$	Konstanten
D	Dehnsteifigkeit, Schubanalogienomenklatur
E_1	E-Modul Baustoff 1
E_i	E-Modul der Schicht i
EI	Biegesteifigkeit des Stabes
EI_{eff}	Effektive Biegesteifigkeit des Stabes
E_{Holz}	E-Modul des verwendeten Holzes
EA_{Holz}	Dehnsteifigkeit des Holzquerschnitts
EA_{Beton}	Dehnsteifigkeit des Betonquerschnitts
EA_{Gesamt}	Dehnsteifigkeit des gesamten Querschnitts
$EI_{vorhanden}$	vorhandene Biegesteifigkeit
F_c	Bruchlast Druckversuch
F_v	Bruchlast Scherversuch
F_f	Bruchlast Biegezugversuch
G	Schubmodul
G_{Roll}	Rollschubmodul der Querlagen
$G_{R,j}$	Rollschubmodul der betrachteten Zwischenschicht

I_V	Trägheitsmoment des Gesamtquerschnitts bei starrem Verbund
I_i	Flächenträgheitsmoment der Teilschicht i
I_1, I_2	Eigenträgheitsmoment von Schicht 1 bzw. von Schicht 2
I_{Holz}	Summe der Eigenträgheitsmomente des Holzquerschnitts
I_{Beton}	Summe der Eigenträgheitsmomente des Betonquerschnitts
$I(\lambda)$	Lichtintensität bei einer Wellenlänge λ des untersuchten Objekts
$I_d(\lambda)$	Lichtintensität bei einer Wellenlänge λ des Objektes mit 0 % Reflexion
$I_0(\lambda)$	Lichtintensität bei einer Wellenlänge λ des Objektes mit 100 % Reflexion
L	Longitudinalkraft, auf unverformte Stabachse bezogen
M	Biegemoment
M_A	Biegemoment in Ebene A
M_B	Biegemoment in Ebene B
M_a	Biegemoment am Auflager
M_M	Momentenanteil aus Eigenbiegung
M_N	Momentenanteil aus Normalkraft
N	Normalkraft
N_M	Normalkraft in den äußeren Holzlamellen aus Biegemoment
$N_{M,i,d}$	Normalkraftanteil aus dem Biegemoment in der Schicht i
$M_{M,i,d}$	Momentenanteil aus Eigenbiegung in der Schicht i
$N_{P,Holz}$	Normalkraft im Holz
$N_{P,Beton}$	Normalkraft im Beton
P	Druckkraft in Stablängsrichtung
P_{ki}	Knicklast
$P_{ki,Southwell}$	Knicklast bestimmt nach dem Southwellverfahren
P_E	Knicklast des schubstarren Druckstabes
Q	Querkraft
R_f	Biegezugfestigkeit
R_c	Druckfestigkeit
S	Ersatzschubsteifigkeit, Schubanalogienomenklatur
T	Transversalkraft, auf unverformte Stabachse bezogen
T_a	Transversalkraft am Auflager
V	Volumen des Prüfkörpers
W_{Holz}	Widerstandsmoment der Holzlamellen

Lateinische Kleinbuchstaben

a	Innerer Hebelarm der Außenschichten in der betrachteten Richtung, Faktor
a_0	Anfangsexzentrizität
b	Breite, Seitenlänge des Querschnitts des Prismas beim Biegezugversuch
d_i	Schichtdicke der betrachteten Schicht
d_j	Schichtdicke der betrachteten Zwischenschicht
dz	Elementlänge
dw	Elementverformung
e_1	Abstand der Schwerelinien
e_i	Abstand
g	Linienkraft in Stablängsrichtung
h	Planksches Wirkungsquantum
i	Trägheitsradius
k_i	Verschiebungsmodul eines Verbindungsmittels
k_v	Faktor, der die Scherfestigkeit der Prüfkörper modifiziert, bei denen die Dicke der Scherfläche in Faserrichtung kleiner als 50 mm ist.
l	Spannweite
l_{eff}	Knicklänge des betrachteten Stabes
l_{Wand}	Wandhöhe
$l_{tot,delam}$	Gesamtdelaminierungslänge
$l_{tot,glueline}$	Gesamtlänge aller Klebfugen eines Delaminierungsprüfkörpers
$l_{max,delam}$	Maximale Delaminierungslänge
$l_{glueline}$	Länge einer Klebfuge in einem Delaminierungsprüfkörper
m	Masse des Prüfkörpers
m_n	Masse des feuchten Prüfkörpers
m_T	Masse des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand
m_{Ziel}	Zu erreichendes Zielgewicht nach dem Trockenvorgang
m_{ges}	Gesamtgewicht des Prüfkörpers vor dem Versuchsbeginn
m_{Beton}	Gewicht der Betonscheibe vor dem Verkleben
n_1, n_2	Anzahl der Schichten aus Material 1 oder Material 2
q	Auf den Stab einwirkende äußere Last, senkrecht zur Stabachse
w	Verformung
w_{part}	Partikuläre Lösungsanteil, abhängig von der äußeren Belastung
w_M	Verformungsanteil aus dem Biegemoment

w_Q	Verformungsanteil aus der Querkraft
w_{II}	Verformung nach Theorie II. Ordnung
w_I	Verformung nach Theorie I. Ordnung
Δw	Zusätzliche Verformung die sich aus der einwirkenden Druckkraft ergibt
w_{**}	Verformung eines zentrisch belasteten Druckstabes aufgrund minimaler Exzentrizitäten, die während des Versuchs gemessen wird
z	Abstand vom Auflager in Stablängsrichtung

Griechische Buchstaben

α	Faktor
β	Faktor
γ	Gleitung infolge Querkraft
γ_i	Gamma Beiwert Schicht i
δ	Verschiebung zwischen Schichten
ϵ	Stabkennzahl
ϵ_{Holz}	Dehnung im Holzquerschnitt
ϵ_{Beton}	Dehnung im Betonquerschnitt
η	Verhältnis der E-Moduli
κ	Stabkrümmung
λ	Schlankheit, Wellenlänge
ν	Frequenz
ρ	Rohdichte
$\sigma_{m,M}$	Biegespannung die aus einem Biegemoment resultiert
$\sigma_{c,M}$	Normalspannung die aus einem Biegemoment resultiert
$\sigma_{c,N}$	Normalspannung die aus einer Normalkraft resultiert
τ	Schubspannung
φ_M	Drehung der Stabmittellinie aus dem Biegemoment
φ_Q	Drehung der Stabmittellinie aus der Querkraft
ω	Faktor, Starrkörperdrehung, Holzfeuchte

Abkürzungen

CSH-Phasen	Calciumsilikathydratphasen
Epoxy	Epoxydharz
HBV	Holz-Beton-Verbund
MUF	Melamin-Urea-Formaldehyd

PRF	Phenol-Resorcin-Formaldehyd
PU	Polyurethan
UHFB	Ultrahochfester Beton
1k-PU	Ein-Komponenten Polyurethan
2k-PU	Zwei-Komponenten Polyurethan

Abschnitt 8

Literaturverzeichnis

8.1 Veröffentlichungen

- [1] S. Aicher, W. Klöck, G. Dill-Langer und B. Radovic, „Nails and nailplates as shear connectors for timber-concrete composite constructions“, *Otto-Graf-Journal*, Jg. 14, S. 189–209, 2003.
- [2] P. Aondio, P. Glaser und H. Kreuzinger, „FE-Berechnung von geklebtem Brettsper Holz: Teil 1: Theorie“, *Bauingenieur*, Jg. 95, Nr. 1, S. 22–25, 2020.
- [3] L. Bathon und O. Bletz, „Holz-Beton-Verbundwände“, *HOLZBAU-die neue quadriga*, Nr. 3, S. 17–21, 2008.
- [4] L. Bathon und O. Bletz, „Holz-Beton-Verbund bei Wänden und Dächern - eine aktuelle Übersicht zum Stand der Technik“, *HOLZBAU-die neue quadriga*, Nr. 6, S. 51–55, 2009.
- [5] O. Ben Mekki und F. Toutlemonde, „Testing innovative aspects of a 10m-span Composite UHPFRC-carbon fibers-timber bridge: (D34+D35_ Composite UHPFRC-carbon fibers timber bridge-LCPC tested.pdf - 6297.19 KB)“. [Online]. Verfügbar unter: http://nr2c.fehrl.org/?m=23&id_directory=789 (Zugriff am: 23. Oktober 2020).
- [6] R. Benedix, *Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten*, 7. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [7] K. Bergmeister, „Kleben im Betonbau - Theoretische Grundlagen und Bemessungsvorschläge“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 96, Nr. 10, S. 625–633, 2001.
- [8] C. Bieker, *Methodenentwicklung zur Bestimmung des hygromechanischen Langzeitverhaltens von strukturellen Klebverbindungen mit metallischen und mineralischen Untergründen*. Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik Kassel, Aachen: Shaker Verlag, 2006.
- [9] G. Bonifazi, G. Capobianco und S. Serranti, „Hyperspectral Imaging and Hierarchical PLS-DA Applied to Asbestos Recognition in Construction and Demolition Waste“, *Applied Sciences*, Jg. 9, Nr. 21, S. 1–15, 2019, doi: 10.3390/app9214587.
- [10] G. Bonifazi, N. Picone und S. Serranti, „Innovative hyperspectral imaging (HSI) based techniques applied to end-of-life concrete drill core characterization for optimal dismantling and materials recovery“ in *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, San Francisco, California, United States, 2015, doi: 10.1117/12.2081174.
- [11] G. Boscato, A. Dal Cin und R. Destro, „Structural Behaviour and Comparison of CGF Panels“, *Advanced Materials Research*, Jg. 900, Nr. 900, S. 463–467, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.900.463.
- [12] G. Boscato, T. Dalla Mora, F. Peron, S. Russo und P. Romagnoni, „A new concrete-glulam prefabricated composite wall system: Thermal behavior, life cycle assessment and structural response“, *Journal of Building Engineering*, Jg. 19, S. 384–401, 2018, doi: 10.1016/j.job.2018.05.027.

- [13] W. Brameshuber und M. Graubohm, „Prefabricated masonry panel system with two-component polyurethane adhesive: Vorgefertigte Mauertafeln mit Zweikomponenten-Polyurethanklebstoff“, *Mauerwerk*, Jg. 19, Nr. 1, S. 3–26, 2015, doi: 10.1002/dama.201500644.
- [14] R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer und A. Thiel, „Cross laminated timber (CLT): overview and development“, *European Journal of Wood and Wood Products*, Jg. 74, Nr. 3, S. 331–351, 2016, doi: 10.1007/s00107-015-0999-5.
- [15] M. Brunner, M. Romer und M. Schnüriger, „Timber-concrete-composite with an adhesive connector (wet on wet process)“, *Materials and Structures*, Jg. 40, S. 119–126, 2007, doi: 10.1617/s11527-006-9154-4.
- [16] H. Bruno, „Der ausmittig gedrückte und Querbelaastete, ein- und mehrteilige Holzdruckstab“, Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1971.
- [17] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), www.bmub.bund.de, *Übereinkommen von Paris*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf
- [18] Bunje et. al, *Ultrahochfester Beton: Sachstandsbericht*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Hg., Heft 561, Berlin: Beuth Verlag, 2008.
- [19] A. Dias, J. Schaenzlin und P. Dietsch, Hg., *Design of timber-concrete composite structures. A state-of-the-art report by COST Action FP1402 / WG 4*, Aachen: Shaker Verlag, 2018.
- [20] P. Dutko, *Drevené konštrukcie*, Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1966.
- [21] L. Eisenhut, „Geklebter Verbund aus Holz und hochfestem Beton - Untersuchungen zum Langzeitverhalten“, Dissertation, Universität Kassel, Kassel: Kassel University Press, 2015.
- [22] T. S. El-Salakawy und A. A. Gamal, „Behavior of strengthened Timber Concrete Composite under axial loads“, *Case Studies in Construction Materials*, Jg. 14, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00497.
- [23] F. Engesser, „Die Knickfestigkeit gerader Stäbe“, *Zentralblatt der Bauverwaltung*, Jg. 11, S. 483–486, 1891.
- [24] Evonik Industries AG, „Hochleistungsbeton für Alle: Nanotechnologisch Optimierter, langlebiger, energieeffizienter und insbesondere Anwendungsfreundlicher Hochleistungsbeton: OLAF“, Hanau: Technische Informationsbibliothek, 2012, <https://doi.org/10.2314/GBV:735749396>.
- [25] E. Fehling, M. Schmidt und S. Stürwald, Hg., *Ultra high performance concrete (UHPC): Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05-07, 2008*. Kassel: Kassel University Press, 2008.
- [26] E. Fehling, M. Schmidt, J. Walraven, T. Leutbecher und S. Fröhlich, „Ultrahochfester Beton: UHPC“ in *Beton-Kalender 2013: Lebensdauer und Instandsetzung - Brandschutz*, K. Bergmeister, F. Fingerloos und J.-D. Wörner, Hg., Berlin, Ernst & Sohn Verlag, 2013, S. 119–239.
- [27] D. Fengel und D. Grosser, „Chemische Zusammensetzung von Nadel- und Laubhölzern: Eine Literaturübersicht“, *Holz als Roh- und Werkstoff*, Jg. 33, Nr. 1, S. 32–34, 1975.
- [28] L. Fermum, „Hyperspektrale Bildverarbeitung in der Industrie“, Stemmer Imaging AG, Schulungsunterlagen, 2020.
- [29] E. Ferrier, P. Labossière und K. W. Neale, „Mechanical Behavior of an Innovative Hybrid Beam Made of Glulam and Ultrahigh-Performance Concrete Reinforced with FRP or Steel“, *Journal of Composites for Construction*, Jg. 14, Nr. 2, S. 217–223, 2010, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000063.

- [30] O. Fischer, S. Gehrlein, T. Lechner, M. Mensinger, J. Ndogmo und G. Seidl, *Entwicklung ressourcenschonender, modularer Betonkonstruktionen aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC), Abschlussbericht*, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2017.
- [31] O. Fischer, N. Schramm und J. Jungwirth, *Nachhaltiges Bauen mit vorgespannten Tragelementen aus ultrahochfestem Beton (UHPC); Anwendung für Parkhäuser*, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2018.
- [32] O. Fischer, N. Schramm und T. Lechner, „Deutschlandweit erstmalige Anwendung von UHPFRC im Eisenbahnbrückenbau“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 114, Nr. 2, S. 74–84, 2019, doi: 10.1002/best.201800090.
- [33] J. Frohnmüller, J. Fischer und W. Seim, „Full-scale testing of adhesively bonded timber-concrete composite beams“, *Materials and Structures*, Jg. 54, Nr. 5, 2021, doi: 10.1617/s11527-021-01766-y.
- [34] T. Gerlicher, D. Heinz und L. Urbonas, „Effect of finely ground blast furnace slag on the properties of fresh and hardened UHPC“ in *Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 10, Ultra high performance concrete (UHPC): Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, 5-7 März, 2008*, E. Fehling, M. Schmidt und S. Stürwald, Hg., Kassel: Kassel University Press, 2008, S. 367–374.
- [35] U. A. Girhammar, „Composite timber and concrete components for walls“, *IVBH Kongressbericht*, Nr. 12, S. 369–376, 1984, doi: 10.5169/SEALS-12143.
- [36] R. Glaser, „Zum Kurz- und Langzeitverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen“. Dissertation, Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung, Technische Universität Cottbus, Cottbus, 2005.
- [37] P. Glos, „Zur Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Brettschichtholz bei Druckbeanspruchung aus Werkstoff- und Einwirkungsgrößen“, Laboratorium für den konstruktiven Ingenieurbau (LKI) Technische Universität München, München, Berichte zur Zuverlässigkeit der Bauwerke 35, Dez. 1978.
- [38] P. Glos, B. Heimeshoff und W. Kellethofer, „Einfluss der Belastungsdauer auf die Zug- und Druckfestigkeit von Fichten-Brettlamellen“, *Holz als Roh- und Werkstoff*, Jg. 45, Nr. 6, S. 243–249, 1987.
- [39] R. Görlacher, „Ein Verfahren zur Ermittlung des Rollschubmoduls von Holz“, *Holz als Roh- und Werkstoff*, Jg. 60, Nr. 5, S. 317–322, 2002, doi: 10.1007/s00107-002-0317-x.
- [40] P. Gressel, „Kriechverhalten von Holz und Holzwerkstoffen: Folgerungen für den Formänderungsnachweis in DIN 1052“, *bauen mit holz*, Nr. 4, S. 216–223, 1984.
- [41] M. Guizar-Sicairos, S. T. Thurman und J. R. Fienup, „Efficient subpixel image registration algorithms“, *Optics letters*, Jg. 33, Nr. 2, S. 156–158, 2008, doi: 10.1364/ol.33.000156.
- [42] H. Kobori, T. Inagaki, T. Fujimoto, T. Okura und S. Tsuchikawa, „Fast online NIR technique to predict MOE and moisture content of sawn lumber“, *Holzforschung*, Jg. 69, Nr. 3, S. 329–335, 2015, doi: 10.1515/hf-2014-0021.
- [43] G. Habenicht, *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [44] T. Hecht, *Physikalische Grundlagen der IR-Spektroskopie: Von mechanischen Schwingungen zur Vorhersage und Interpretation von IR-Spektren*, Wiesbaden: Springer Spektrum Wiesbaden, 2019.

- [45] D. Heinz, L. Urbonas und T. Gerlicher, „Effekt of heat treatment method on the properties of UHPC“ in *Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Bd. 19, Ultra-high performance concrete and nanotechnology in construction: Proceedings of HiPerMat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, 7 - 9 März, 2012*, M. Schmidt und E. Fehling, Hg., Kassel: Kassel Univ. Press, 2012, S. 283–290.
- [46] M. Henke und O. Fischer, „Formoptimierte filigrane Stäbe aus UHPC und korrosionsfreier Bewehrung für variable räumliche Stabtragwerke“, *Leicht Bauen mit Beton - Forschung im Schwerpunktprogramm 1542*, S. 132–142, 2014.
- [47] P. Hoffmeyer, „Holz als Baustoff“ in *STEP 1, Holzbauwerke. Bemessung und Baustoffe nach Eurocode 5*, H. J. Blaß, R. Görlacher und G. Steck, Hg., Düsseldorf: Fachverlag Holz, 1995, A4/1 bis A4/8.
- [48] K. Holschemacher, R. Selle, J. Schmidt und H. Kieslich, „Holz-Beton-Verbund“ in *Beton-Kalender 2013: Lebensdauer und Instandsetzung-Brandschutz*, K. Bergmeister, F. Fingerloos und J.-D. Wörner, Hg., Berlin, Ernst & Sohn Verlag, 2013, S. 242–287.
- [49] J. Lee, B. Dewitt, S. Lee, K.-J. Bhang und J.-B. Sim, „Analysis of Concrete Reflectance Characteristics Using Spectrometer and Vnir Hyperspectral Camera“, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Jg. 39, 2012, doi: 10.5194/ISPRSARCHIVES-XXXIX-B7-127-2012.
- [50] G. Jauk, *100.000 m³-Werke als Standard?: Ein umfassender Marktüberblick*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.holzbauaustria.at/markt/2019/11/100-000_m3-werke-als-standard-.html (Zugriff am: 3. Mai 2021).
- [51] J. H. J. d. O. Negrão *et al.*, „Glued Composite Timber-Concrete Beams.: II: Analysis and Tests of Beam Specimens“, *Journal of Structural. Engineering*, Jg. 136, Nr. 10, S. 1246–1254, 2010.
- [52] E. Kälin, *Referenzen UHFB*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ingenieurkaelin.ch/referenzen/#> (Zugriff am: 20. Juli 2022).
- [53] F. Kaltenbach, *MUCEM in Marseille - Haut und Knochen aus ultrahochfestem Beton*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.11129/9783955532871-010/pdf>.
- [54] J. Kanócz und V. Bajzecerová, „TIMBER-CONCRETE COMPOSITE ELEMENTS WITH VARIOUS COMPOSITE CONNECTIONS: Part 3: Adhesive Connection“, *Wood Research*, Jg. 60, Nr. 6, S. 939–952, 2015.
- [55] M. Kästner und K. Rautenstrauch, „Polymermörtel-Klebverbindungen für Holz-Beton-Verbundbrücken Teil 1: Schubtragverhalten neuartiger Verbundfugenkonfiguration“, *Bautechnik*, Jg. 98, S1, S. 23–30, 2021, doi: 10.1002/bate.202000096.
- [56] M. Kästner und K. Rautenstrauch, „Polymermörtel-Klebverbindungen für Holz-Beton-Verbundbrücken Teil 2: Biegetragverhalten, Bemessung und Ausführung“, *Bautechnik*, Jg. 98, S1, S. 31–39, 2021, doi: 10.1002/bate.202000097.
- [57] H. Kaufmann, S. Krötsch und S. Winter, *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau*, München: Detail Business Information, 2017.
- [58] P. O. Kettunen, *WOOD: Structure and Properties*, Zürich: Trans Tech Publishers, 2006.
- [59] KLH Massivholz GmbH, „Kreuzlagenholz“, Juli 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.klh.at/wp-content/uploads/2019/07/kreuzlagenholz-07-2021.pdf>. (Zugriff am: 8. April 2022)

- [60] O. Kolomiets, U. Hoffmann, P. Geladi und H. W. Siesler, „Quantitative determination of pharmaceutical drug formulations by near-infrared spectroscopic imaging“, *Applied spectroscopy*, Jg. 62, Nr. 11, S. 1200–1208, 2008, doi: 10.1366/000370208786401590.
- [61] B. Kölsch, *Carbonbeton Holzverbundmodul -CbHV- ein revolutionäres Verbundsystem aus einer Holzkonstruktion und Carbonbeton*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iurs-ev.de/downloads/Carbonbeton.pdf> (Zugriff am: 28. Oktober 2020).
- [62] B. Kölsch, „Holz-Beton-Verbundkörper und Herstellverfahren“, Patentschrift, DE 10 2016 118 301 B4, Veröffentlichungstag der Patenterteilung 12.09.2019.
- [63] S. Kotthaus, T. E.L. Smith, M. J. Wooster und C.S.B. Grimmond, „Derivation of an urban materials spectral library through emittance and reflectance spectroscopy“, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Jg. 94, Nr. 4, S. 194–212, 2014, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.05.005.
- [64] T. Lechner und O. Fischer, „Stabilitätsverhalten von schlanken Wandscheiben aus Normal- und Ultrahochleistungsbeton“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 110, Nr. 5, S. 328–339, 2015, doi: 10.1002/best.201500011.
- [65] S. Lehmann, „Untersuchungen zur Bewertung von Verbundbauteilen aus Brettstapelelementen im Flächenverbund mit mineralischen Deckschichten“, Dissertation, Universität Weimar, Weimar, 2004.
- [66] A. Leib, „Aufgeklebte Betonplatten auf Holz-Deckenelementen: Untersuchung einer neuartigen Holz-Beton-Verbundbauweise“, Bachelorarbeit, Berner Fachhochschule, Hochschule für Architektur, Bau und Holz, Biel, 2013.
- [67] L. Fan, M. Fan, A. Alhaj, G. Chen und H. Ma, „Hyperspectral imaging features for mortar classification and compressive strength assessment“, *Construction and Building Materials*, Jg. 251, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118935.
- [68] L. Fan, A. Alhaj, H. Ma, und G. Chen, „Assessing Moisture Content on the Surface of Mortar Samples from Hyperspectral Imaging“ in *9th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructures*, St. Louis, Missouri USA, 2019, S. 1150–1155.
- [69] T. Ma, T. Inagaki, M. Ban und S. Tsuchikawa, „Rapid identification of wood species by near-infrared spatially resolved spectroscopy (NIR-SRS) based on hyperspectral imaging (HSI)“, *Holzforschung*, Jg. 73, Nr. 4, S. 323–330, 2019, doi: 10.1515/hf-2018-0128.
- [70] M. Mäkelä, M. Altgen, T. Belt und L. Rautkari, „Hyperspectral imaging and chemometrics reveal wood acetylation on different spatial scales“, *Journal of Materials Science*, Jg. 56, Nr. 8, S. 5053–5066, 2021, doi: 10.1007/s10853-020-05597-0.
- [71] C. M. Marino, C. Panigada und L. Busetto, „Airborne hyperspectral remote sensing applications in urban areas: asbestos concrete sheeting identification and mapping“ in *IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, Rom, Italien, 8-9 Nov. 2001, S. 212–216, doi: 10.1109/DFUA.2001.985882.
- [72] M. Mérono *et al.*, „Innovative Heißklebung von tragenden Holz-Beton-Verbundelementen“, *adhäsion Kleben & Dichten*, Nr. 12, S. 30–34, 2019.
- [73] P. Mestek, N. Werther und S. Winter, „Planen und Bauen mit Brettsper Holz“ in *Bauen mit Brettsper Holz*, Studiengemeinschaft Holzleimbau, Hg., 3 Aufl. Wuppertal, 2010, S. 4–15.
- [74] K. Möhler, „Über das Tragverhalten von Biegeträgern und Druckstäben mit zusammengesetzten Querschnitten und nachgiebigen Verbindungsmitteln“, Habilitation, Technische Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe, Karlsruhe, Juli, 1956.
- [75] W. Mönck und W. Rug, *Holzbau: Bemessung und Konstruktion*, 16. Aufl. Berlin: Beuth Verlag, 2015.

- [76] C. Mühlbauer, „Fügen von Bauteilen aus ultrahochfestem Beton (UHPC) durch Verkleben“, Dissertation, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, München, 2012.
- [77] P. Müller, „Decke aus hochkantig stehenden Holzbohlen oder Holzbrettern und Betondeckschicht“, *Beton und Eisen*, XXI, Nr. 17, S. 244, 1922.
- [78] J. H. J. d. O. Negrão, C. A. L. d. Oliveira, F. M. M. d. Oliveira und P. B. Cachim, „Glued Composite Timber-Concrete Beams. I: Interlayer Connection Specimen Tests“, *Journal of Structural Engineering*, Jg. 136, Nr. 10, S. 1236–1245, 2010, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000228.
- [79] G. Neroth und D. Vollenschaar, *Wendehorst Baustoffkunde: Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz*, 27. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011.
- [80] H. Neuhaus, *Ingenieurholzbau*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [81] P. Niemz, F. Dutschmann und B. Stölken, „Möglichkeiten zum Nachweis des Klebstoffanteils in beleimten Spänen“, *European Journal of Wood and Wood Products*, Jg. 52, Nr. 1, S. 6–8, 1994, doi: 10.1007/BF02615009.
- [82] P. Niemz und W. U. Sonderegger, *Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*, München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2017.
- [83] T. Oberndorfer, F. Hunger und O. Fischer, „Ultra High Performing Timber Walls - Einsatz von schlanken Lamellen aus ultrahochfestem Beton in Brettsperrholzelementen zur Steigerung der Tragfähigkeit“, Abschlussbericht, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2021.
- [84] J. Pacheco, L. Doniak, M. Carvalho und P. Helene, „The Paradox of High Performance Concrete used for Reducing Environmental Impact And Sustainability Increase“ in *Second International Conference on Concrete Sustainability*, Madrid, 2016, S. 442–453.
- [85] R. Palmieri, G. Bonifazi und S. Serranti, „Automatic detection and classification of EOL-concrete and resulting recovered products by hyperspectral imaging“ in *SPIE Sensing Technology + Applications*, Baltimore, Maryland, USA, 2014, doi: 10.1117/12.2049399.
- [86] C. Petersen, *Statik und Stabilität der Baukonstruktionen: Elasto- und plasto-statische Berechnungsverfahren druckbeanspruchter Tragwerke; Nachweisformen gegen Knicken, Kippen, Beulen*, 2. Aufl. Braunschweig: Vieweg, 1982.
- [87] G. Pincus, „Bonded Wood-Concrete T-Beams“, *Journal of the Structural Division*, Jg. 95, Nr. 10, S. 2265–2279, 1969.
- [88] G. Pincus, „Behavior of Wood-Concrete Composite Beams“, *Journal of the Structural Division*, Jg. 96, Nr. 10, S. 2009–2019, 1970.
- [89] L. Pozza, R. Scotta, A. Polastri, A. Ceccotti, "Seismic behaviour of wood-concrete frame shear-wall system and comparison with code provisions", [Online] Verfügbar unter: https://www.polifar.it/wp-content/uploads/2019/06/CIB_2012_paper_Pozza-Scotta-Polastri-Ceccotti.pdf.
- [90] M. Raupach und J. Orlowsky, *Erhaltung von Betonbauwerken: Baustoffe und ihre Eigenschaften*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008.
- [91] K. Rautenstrauch *et al.*, „Innovative nachhaltige Bauwerke durch effiziente Kombination von nachwachsenden Rohstoffen und einfach in Kreisläufe integrierbaren mineralischen Baustoffen in einer Hybrid-Bauweise“. Forschungsbericht 2008, Bauhaus Universität Weimar, 2008.
- [92] G. Rehm und L. Franke, *Kleben im konstruktiven Betonbau*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Hg., Heft 331, Berlin: Beuth Verlag, 1982.

- [93] S. Chow und K.S. Chunsi, „Adhesion Strength and Wood Failure Relationship in Wood-Glue Bonds“, *Japan Wood Research Society*, Jg. 25, Nr. 2, S. 125–131, 1979.
- [94] B. Sagmeister, *Maschinenteile aus zementgebundenem Beton*, Berlin: Beuth Verlag, 2017.
- [95] B. Sagmeister, „UHPC-Fassadenelemente für symbolträchtigen Gebäudekomplex in Katar“, *BetonWerk International*, Nr. 3, 2020.
- [96] R. Sasse, *Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen unter Verwendung von Kunststoffen - Sachstandsbericht*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Hg., *Heft 443*, Berlin: Beuth Verlag, 1994.
- [97] M. Schäfers, „Entwicklung von hybriden Bauteilen aus Holz und hochfesten bzw. ultrahochfesten Betonen: Experimentelle und theoretische Untersuchungen“, Dissertation, Universität Kassel, Kassel: Kassel Univ. Press, 2010.
- [98] L. Schimleck, J. Dahlen, S.-C. Yoon, K. Lawrence und P. Jones, „Prediction of Douglas-Fir Lumber Properties: Comparison between a Benchtop Near-Infrared Spectrometer and Hyperspectral Imaging System“, *Applied Sciences*, Jg. 8, Nr. 12, S. 2602, 2018, doi: 10.3390/app8122602.
- [99] M. Schmidt und E. Fehling, Hg., *Ultra-high performance concrete and nanotechnology in construction: Proceedings of HiPerMat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, 7-9 März, 2012*. Kassel: Kassel Univ. Press, 2012.
- [100] M. Schmidt, E. Fehling und S. Fröhlich, Hg., *Nachhaltiges Bauen mit ultra-hochfestem Beton: Ergebnisse des Schwerpunktprogrammes 1182 Sustainable building with ultra-high performance concrete*. Kassel: Kassel Univ. Press, 2014.
- [101] M. Schmidt, R. Krelaus, T. Teichmann, T. Leutbecher und E. Fehling, „Fügen von Bauteilen aus UHPC durch Kleben. Voruntersuchungen und Anwendung bei der Gärtnerplatzbrücke in Kassel“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 102, Nr. 10, S. 681–690, 2007, doi: 10.1002/best.200700576.
- [102] M. Schmidt, T. Leutbecher, S. Piotrowski und U. Wiens, „The German Guideline for Ultra-High Performance Concrete“ in *Proceedings / RILEM, PRO 106, Proceedings of the AFGC-ACI-fib-RILEM International Conference on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, 2-4 October 2017, Montpellier, France: UHPFRC 2017 Designing and building with UHPFRC: New large-scale implementations, recent technical advances, experience and standards*, F. Toutlemonde und J. Resplendino, Hg., Bagneux: RILEM publications, 2017, S. 545–554.
- [103] K.-J. Schneider, *Bautabellen für Ingenieure: Mit Berechnungshinweisen und Beispielen*, 21. Aufl. Köln: Bundesanzeiger Verl., 2014.
- [104] M. Schnüriger, „Holz-Beton-Elemente mit Klebeverbund“, Schlussbericht, Berner Fachhochschule, Hochschule für Architektur, Bau und Holz, Biel, 2005.
- [105] A. Scholz, „Ein Beitrag zur Bemessung von Flächentragwerken aus Holz“. Dissertation, Institut für Baustoffe und Konstruktion, Fachgebiet Holzbau, Technische Universität München, München, 2003.
- [106] M. Schwanninger, J. C. Rodrigues und K. Fackler, „A Review of Band Assignments in near Infrared Spectra of Wood and Wood Components“, *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, Jg. 19, Nr. 5, S. 287–308, 2011, doi: 10.1255/jnirs.955.

- [107] K. Scrivener, V. John und E. Gartner, „Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry“, Paris, 2017, [Online] Verfügbar unter:
https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25281/eco_efficient_cements.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [108] S. Serranti und G. Bonifazi, „Hyperspectral imaging applied to end-of-life concrete recycling“ in *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, San Francisco, California, USA, 2014, doi: 10.1117/12.2039242.
- [109] S. Serranti, R. Palmieri und G. Bonifazi, „Hyperspectral imaging applied to demolition waste recycling: innovative approach for product quality control“, *Journal of Electronic Imaging*, Jg. 24, Nr. 4, S. 1–10, 2015, doi: 10.1117/1.JEI.24.4.043003.
- [110] A. Shaban, „Determination of Concrete Properties Using Hyperspectral Imaging Technology: A Review“, *Science Journal of Civil Engineering & Architecture*, Jg. 2013, 2013, doi: 10.7237/sjcea/102.
- [111] I. A. Sofianto, T. Inagaki, T. Ma und S. Tsuchikawa, „Effect of knots and holes on the modulus of elasticity prediction and mapping of sugi (*Cryptomeria japonica*) veneer using near-infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI)“, *Holzforschung*, Jg. 73, Nr. 3, S. 259–268, 2019, doi: 10.1515/hf-2018-0060.
- [112] R. V. Southwell, „On the analysis of experimental observations in problems of elastic stability“, *Proceedings of the Royal Society London*, Jg. 135, Nr. 828, S. 601–616, 1932, doi: 10.1098/rspa.1932.0055.
- [113] E. Stammen, M. Mérono und J. Frohnmüller, „Wirtschaftliche Herstellung hochwertiger Holz-Beton-Verbundelemente unter Anwendung einer innovativen Schnellklebetechnik und Einsatz von Laubholz: Schlussbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 19417N“.
- [114] P. Stefansson, T. Thiis, L. R. Gobakken und I. Burud, „Hyperspectral NIR time series imaging used as a new method for estimating the moisture content dynamics of thermally modified Scots pine“, *Wood Material Science & Engineering*, Jg. 16, Nr. 1, S. 49–57, 2021, doi: 10.1080/17480272.2020.1772366.
- [115] Stora Enso, „CLT-by-Stora-Enso-technical-brochure-DE“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/documents/product-brochures/wood-products/clt-by-stora-enso-technical-brochure-de.pdf>. Zugriff am: 8. April 2022.
- [116] J. Strunge und T. Deuse, „Special cements for ultra high performance concrete“ in *Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 10, Ultra high performance concrete (UHPC): Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, 5-7 März, 2008*, E. Fehling, M. Schmidt und S. Stürwald, Hg., Kassel: Kassel University Press, 2008, S. 61–68.
- [117] D.-W. Sun, Hg., *Hyperspectral imaging for food quality analysis and control*, London: Academic, 2010.
- [118] T. Furono, H. Saiki, T. Goto und H. Harada, „Eindringung von Leim in Tracheidlumina von Splintholz und die Morphologie des Bruches von Zugscherproben (engl.)“, *Japan Wood Research Society*, Jg. 29, Nr. 1, S. 43–53, 1983.
- [119] H. F. W. Taylor, *Cement chemistry*, 2. Aufl. London: Telford Publ, 2003.
- [120] Verein Deutscher Zementwerke e.V., „Zement-Taschenbuch“, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf, Zement-Taschenbuch, 2008.
- [121] M. Wallner-Novak, J. Koppelhuber und Pock Kurt, „Brettsperrholz Bemessung: Grundlagen für Statik und Konstruktion nach Eurocode“, pro Holz Austria, Hg., Wien, 2013.

- [122] A. Watanabe, H. Furukawa, S. Miyamoto und H. Minagawa, „Non-destructive chemical analysis of water and chlorine content in cement paste using near infrared spectroscopy“, *Construction and Building Materials*, Jg. 196, S. 95–104, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.114.
- [123] K.-H. Weinisch, M. Krines und H. Löfflad, „Baustoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Brosch%C3%BCre_Baustoffe_Web.pdf, Zugriff am: 9. April 2022.
- [124] U. Wiens, „DAfStb-Richtlinie Ultrahochfester Beton, Teil 1 Bemessung und Konstruktion“ Entwurfsfassung vom 18. November 2019, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Hg., 2019.
- [125] S. Winter, H. Kreuzinger und P. Mestek, *Flächen aus Brettstapeln, Brettspertholz und Verbundkonstruktionen*, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008.
- [126] S. Wolfgang, „Die Berechnung nachgiebig verbundener zusammengesetzter Biegeträger im Ingenieurholzbau“. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1968.
- [127] D. Yeoh, M. Fragiaco, M. de Franceschi und K. Heng Boon, „State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review“, *Journal of Structural Engineering*, Jg. 137, Nr. 10, S. 1085–1095, 2011, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000353.
- [128] G. Youssef *et al.*, „Analysis of the behaviour of a bonded joint between laminated wood and ultra high performance fibre reinforced concrete using push-out test“, *Construction and Building Materials*, Jg. 53, S. 381–391, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.074.
- [129] G. Zeppenfeld und D. Grunwald, *Klebstoffe in der Holz- und Möbelindustrie*, 2. Aufl. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verl. Weinbrenner, 2005.

8.2 Normen und Richtlinien

- [130] *AFNOR2016 - NF P18-710 - National addition to Eurocode 2 - Design of concrete structures specific rules for ultra-high performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC)*, AFNOR, 2016.
- [131] *AFNOR2016a - NF P 18-470 (F) - Concrete - UHPFRC - Specifications, performance, production and conformity*, AFNOR, 2016.
- [132] *DIN 4074-1:2012-06, Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz.*
- [133] *DIN 68364:2003-05, Kennwerte von Holzarten - Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten.*
- [134] *DIN CEN/TS 19103:2022-02 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Berechnung von Holz-Beton-Verbundbauteilen - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.*
- [135] *DIN EN 12390-13:2021-09, Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul).*
- [136] *DIN EN 12390-3:2019-10, Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern.*
- [137] *DIN EN 12390-5:2019-10, Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern.*
- [138] *DIN EN 13183-1:2002-07, Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren.*
- [139] *DIN EN 13263-1:2009-07, Silikastaub für Beton - Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien.*

- [140] *DIN EN 14080:2013-09, Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen;*
- [141] *DIN EN 14081-1:2019-10, Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt - Teil 1: Allgemeine Anforderungen.*
- [142] *DIN EN 14358:2016-11, Holzbauwerke - Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte.*
- [143] *DIN EN 16351:2015-12, Holzbauwerke - Brettsperrholz - Anforderungen.*
- [144] *DIN EN 1912:2013-10, Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen - Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten.*
- [145] *DIN EN 196-1:2016-11, Prüfverfahren für Zement -Teil 1: Bestimmung der Festigkeit.*
- [146] *DIN EN 1992-1-1:2011-01, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Regeln - Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke.*
- [147] *DIN EN 1995-1-1:2010-12, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1 -1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.*
- [148] *DIN EN 301:2018-01, Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen.*
- [149] *DIN EN 338:2016-07, Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen.*
- [150] *DIN EN 384:2019-02, Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte.*
- [151] *DIN EN 408:2012-10, Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften.*
- [152] *DIN EN 923:2016-03, Klebstoffe - Benennung und Definitionen.*
- [153] *DIN EN ISO 10365:2022-05, Klebstoffe - Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder.*
- [154] *Japan Society of Civil Engineers, Recommendations For Design And Construction Of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft), 2006.*
- [155] *SNR 592052:2016, Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) - Baustoffe, Bemessung und Ausführung.*
- [156] *T. Künninger, „Automatische Bestimmung des prozentualen Faserbruchanteils bei der industriellen Klebfestigkeitsprüfung“, FFWH Projektnummer 2006.05, Abschlussbericht, EMPA, Dübendorf, 2007*
- [157] *S. Koller, „Ein Beitrag zur Bestimmung des Holzfaserverbruchanteils bei Holzscherversuchen“, Masterarbeit, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München, München, 2020*

Anhang A

Scherversuche

A.1 Abmessungen und Parameter des verwendeten Holzes

Die auf der nächsten Seite beginnende Tabelle führt die Parameter der Holzscheiben auf, die zum Verkleben der Prüfkörper für die Scherversuche verwendet wurden. Für jede Holzscheibe ist das Gewicht unmittelbar vor der Verklebung bei der angegebenen Holzfeuchte, die Länge, die Breite sowie die Dicke angegeben. Die angegebene Holzfeuchte wurde im Darrverfahren nach DIN EN 13183-1 [138] an einer, aus der gleichen Rohlamelle, herausgetrennten Holzscheibe bestimmt. Zur Bestimmung der Jahrringlage in Bezug auf die Klebefuge wurde der Mittelpunkt des betrachteten Holzprüfkörpers angezeichnet und senkrecht zu dem an diesem Punkt vorhandenen Jahrring eine Linie gezeichnet. Der Winkel α wird gemessen zwischen der Normalen zum Jahrring im Mittelpunkt und der Klebefuge, wie Bild A-1 zeigt.

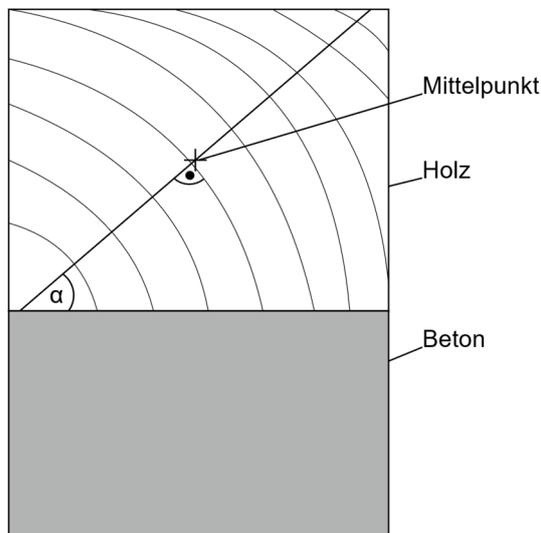


Bild A-1: Bestimmung der Jahrringlage in Bezug auf die Klebefuge der verwendeten Prüfkörper

Serie	Prüfkörper	Seite	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Feuchte [%]	Jahrringlage [°]
1	001	A	31,16	50,73	50,48	38,95	11,5	38
1	001	B	35,05	50,79	50,28	39,02	11,5	39
1	002	A	34,87	50,73	50,25	38,94	11,5	46
1	002	B	34,85	50,64	50,28	39,02	11,5	32
1	003	A	34,99	50,7	50,3	39,00	11,5	26
1	003	B	35,01	50,69	50,45	39,03	11,5	41
1	004	A	34,81	50,7	50,43	38,99	11,5	39
1	004	B	34,95	50,64	50,39	38,98	11,5	30
2	005	A	33,95	50,45	50,39	38,03	11,5	20
2	005	B	34,48	50,50	50,28	38,06	11,5	12
2	006	A	33,58	50,47	50,43	38,12	11,5	21
2	006	B	34,31	50,58	50,29	37,99	11,5	21
2	007	A	33,47	50,45	50,49	38,05	11,5	23
2	007	B	34,44	50,48	50,65	38,03	11,5	21
2	008	A	33,86	50,49	50,46	38,12	11,5	17
2	008	B	34,17	50,45	50,54	38,03	11,5	18
3	009	A	34,49	50,70	50,10	38,13	11,5	57
3	009	B	33,68	50,50	50,09	38,19	11,5	45
3	010	A	34,15	50,53	50,36	38,21	11,5	60
3	010	B	35,35	50,46	50,03	38,16	11,5	60
3	011	A	33,73	50,48	50,00	38,68	11,5	50
3	011	B	33,57	50,48	50,03	38,47	11,5	46
3	012	A	33,76	50,66	50,32	38,12	11,5	50
3	012	B	34,95	50,46	50,03	38,22	11,5	48
4	013	A	39,31	50,53	50,11	38,14	11,5	55
4	013	B	37,33	50,48	50,10	38,13	11,5	64
4	014	A	39,79	50,44	50,21	38,09	11,5	68
4	014	B	40,62	50,40	49,98	38,01	11,5	62
4	015	A	39,33	50,36	49,98	38,07	11,5	72
4	015	B	40,66	50,59	50,12	38,13	11,5	58
4	016	A	40,30	50,44	50,03	38,14	11,5	76
4	016	B	40,68	50,58	50,02	38,10	11,5	69
5	017	A	43,76	50,45	50,18	38,21	11,6	63
5	017	B	38,96	50,45	49,99	38,09	11,6	40
5	018	A	39,66	50,49	50,02	38,14	11,6	54
5	018	B	44,43	50,48	50,03	38,09	11,6	65
5	019	A	40,09	50,49	50,03	38,17	11,6	52
5	019	B	39,94	50,50	50,03	38,09	11,6	45

A.1 Abmessungen und Parameter des verwendeten Holzes

5	020	A	38,75	50,55	50,01	38,00	11,6	45
5	020	B	39,83	50,48	50,09	38,26	11,6	55
6	021	A	42,40	50,44	50,03	38,15	11,6	59
6	021	B	43,70	50,51	50,11	38,10	11,6	65
6	022	A	43,29	50,54	50,04	38,11	11,6	63
6	022	B	44,78	50,60	50,05	37,97	11,6	70
6	023	A	39,80	50,54	50,09	38,12	11,6	79
6	023	B	39,04	50,39	50,01	38,23	11,6	61
6	024	A	39,92	50,27	49,98	38,11	11,6	73
6	024	B	39,55	50,44	50,02	38,10	11,6	78
7	025	A	42,33	50,58	50,15	38,06	11,6	76
7	025	B	36,52	50,50	49,95	37,98	11,6	37
7	026	A	38,73	50,47	50,05	38,10	11,6	41
7	026	B	37,86	50,48	50,10	38,08	11,6	34
7	027	A	38,01	50,51	50,05	38,06	11,6	32
7	027	B	37,65	50,52	50,06	38,11	11,6	29
7	028	A	37,69	50,49	50,05	38,09	11,6	30
7	028	B	39,05	50,48	50,11	38,07	11,6	46
8	029	A	39,99	50,34	50,04	38,15	11,6	32
8	029	B	39,41	50,45	50,02	38,03	11,6	47
8	030	A	38,44	50,49	50,04	38,07	11,6	32
8	030	B	42,60	49,96	50,12	38,04	11,6	73
	031	A	42,09	50,52	50,04	38,03	11,6	75
8	031	B	39,35	50,46	49,99	37,99	11,6	39
8	032	A	37,41	50,49	50,05	38,25	11,6	33
8	032	B	38,24	50,53	50,22	38,13	11,6	34
9	033	A	39,88	50,59	50,08	38,09	11,8	40
9	033	B	38,70	50,50	50,08	38,08	11,8	39
9	034	A	37,83	50,57	50,05	38,12	11,8	29
9	034	B	39,75	50,53	50,04	38,02	11,8	35
9	035	A	37,19	50,50	50,10	38,10	11,8	25
9	035	B	38,55	50,50	50,08	38,13	11,8	38
9	036	A	37,95	50,45	50,01	38,06	11,8	35
9	036	B	43,00	50,47	50,08	38,07	11,8	74
10	037	A	49,39	50,64	50,05	39,03	11,8	45
10	037	B	43,89	50,48	50,10	39,02	11,8	58
10	038	A	44,99	50,49	50,00	38,97	11,8	60
10	038	B	43,42	50,68	50,23	39,01	11,8	58
10	039	A	43,54	50,54	50,07	39,05	11,8	64
10	039	B	43,47	50,52	50,06	39,04	11,8	74

10	040	A	44,03	50,45	50,08	39,01	11,8	66
10	040	B	49,36	50,48	50,05	38,98	11,8	55
11	041	A	50,10	50,46	50,07	39,02	11,8	48
11	041	B	43,81	50,74	50,05	39,11	11,8	62
11	042	A	43,70	50,53	50,05	39,00	11,8	62
11	042	B	43,15	50,48	50,13	39,01	11,8	60
11	043	A	43,03	50,47	50,08	39,02	11,8	70
11	043	B	44,82	50,58	50,06	39,09	11,8	65
11	044	A	43,76	50,71	50,05	39,07	11,8	62
11	044	B	49,01	50,67	50,01	39,05	11,8	54
12	045	A	49,76	50,51	49,99	38,98	11,8	60
12	045	B	44,37	50,46	49,97	38,93	11,8	61
12	046	A	43,64	50,52	50,08	39,02	11,8	59
12	046	B	42,95	50,48	50,12	39,14	11,8	61
12	047	A	43,67	50,42	50,56	39,01	11,8	66
12	047	B	43,9	50,46	50,12	39,04	11,8	70
12	048	A	44,17	50,48	50,05	39,05	11,8	61
12	048	B	48,32	50,55	50,06	39,04	11,8	53
13	049	A	40,98	50,68	50,00	38,01	11,1	62
13	049	B	40,65	50,47	50,00	38,23	11,1	63
13	050	A	41,68	50,54	50,07	38,15	11,1	70
13	050	B	41,10	50,30	50,03	38,12	11,1	65
13	051	A	40,96	50,34	50,06	38,18	11,1	64
13	051	B	40,93	50,34	49,99	37,99	11,1	71
13	052	A	40,74	50,40	50,20	38,17	11,1	65
13	052	B	41,24	50,35	50,10	38,10	11,1	69
14	053	A	39,85	50,36	49,98	37,96	11,1	75
14	053	B	39,12	49,32	50,04	38,17	11,1	70
14	054	A	39,78	50,53	50,03	38,09	11,1	74
14	054	B	40,64	50,41	50,06	38,31	11,1	80
14	055	A	40,13	50,38	49,99	38,00	11,1	74
14	055	B	40,85	50,41	50,01	38,29	11,1	74
14	056	A	40,26	50,41	50,03	38,09	11,1	76
14	056	B	40,65	50,81	49,99	38,03	11,1	70
15	057	A	41,54	50,41	50,04	38,15	11,1	50
15	057	B	42,29	50,45	50,04	38,02	11,1	54
15	058	A	41,61	50,43	50,18	38,13	11,1	54
15	058	B	41,33	50,21	50,00	38,09	11,1	53
15	059	A	42,09	50,36	50,04	38,13	11,1	55
15	059	B	41,79	50,40	50,05	38,12	11,1	50

15	060	A	41,44	50,42	50,19	38,05	11,1	54
15	060	B	41,55	50,37	50,03	38,11	11,1	48
16	061	A	37,27	50,62	51,68	37,07	11,1	38
16	061	B	42,22	50,58	50,10	37,07	11,1	56
16	062	A	36,43	50,50	51,65	37,19	11,1	38
16	062	B	40,22	50,45	50,11	37,04	11,1	50
16	063	A	37,07	50,45	51,81	37,05	11,1	32
16	063	B	40,61	50,46	50,25	37,15	11,1	52
16	064	A	37,07	50,47	51,70	37,06	11,1	41
16	064	B	34,24	50,47	50,15	37,07	11,1	38
17	065	A	37,41	50,51	51,69	37,25	11,1	32
17	065	B	41,93	50,67	50,04	37,08	11,1	56
17	066	A	34,81	50,56	50,08	37,09	11,1	33
17	066	B	41,05	50,51	50,07	37,04	11,1	55
17	067	A	34,62	50,56	50,07	37,06	11,1	29
17	067	B	41,00	50,59	50,07	37,07	11,1	50
17	068	A	34,28	50,47	50,05	37,10	11,1	31
17	068	B	40,28	50,46	50,05	37,08	11,1	53
18	069	A	36,86	50,37	49,98	38,97	11,1	22
18	069	B	37,17	50,48	50,00	39,03	11,1	29
18	070	A	39,93	50,43	49,99	39,10	11,1	65
18	070	B	40,24	50,37	50,00	39,03	11,1	53
18	071	A	36,15	50,34	50,14	39,01	11,1	50
18	071	B	35,12	50,52	49,97	39,08	11,1	54
18	072	A	41,08	50,84	49,93	39,09	11,1	65
18	072	B	36,23	50,45	50,03	39,00	11,1	50
19	073	A	38,60	50,37	50,04	39,12	11,1	22
19	073	B	38,16	50,41	50,04	39,03	11,1	25
19	074	A	40,13	50,38	50,02	39,07	11,1	65
19	074	B	40,07	50,39	49,99	39,21	11,1	69
19	075	A	35,78	50,11	49,90	38,98	11,1	50
19	075	B	36,22	50,34	50,11	39,07	11,1	48
19	076	A	40,02	50,52	50,07	39,07	11,1	62
19	076	B	36,32	50,88	50,08	39,04	11,1	23
20	077	A	36,53	50,48	50,10	39,04	11,1	23
20	077	B	37,68	50,41	49,98	39,03	11,1	22
20	078	A	40,01	51,03	50,03	39,21	11,1	64
20	078	B	39,49	50,62	49,96	39,10	11,1	64
20	079	A	36,26	50,43	50,07	39,15	11,1	53
20	079	B	38,89	50,39	50,00	39,03	11,1	62

20	080	A	36,41	50,67	50,03	39,09	11,1	24
20	080	B	35,68	50,73	50,04	39,01	11,1	50
21	081	A	41,22	50,56	50,01	38,03	11,1	54
21	081	B	38,62	50,61	50,04	38,25	11,1	67
21	082	A	39,97	50,45	50,07	38,05	11,1	56
21	082	B	38,83	50,74	50,08	38,26	11,1	70
21	083	A	42,27	50,68	49,99	37,98	11,1	60
21	083	B	42,26	50,62	50,08	38,36	11,1	64
21	084	A	39,23	50,59	50,06	38,01	11,1	60
21	084	B	43,24	50,77	50,09	37,99	11,1	59
22	085	A	42,21	50,89	50,06	38,01	11,1	58
22	085	B	38,98	50,67	50,12	38,24	11,1	55
22	086	A	39,52	50,52	50,06	38,01	11,1	59
22	086	B	42,95	51,02	50,06	38,12	11,1	60
22	087	A	39,74	50,52	50,08	38,09	11,1	57
22	087	B	38,33	50,66	50,29	38,09	11,1	66
22	088	A	39,23	50,60	50,14	38,00	11,1	59
22	088	B	43,08	50,75	50,14	38,04	11,1	56
23	089	A	43,17	51,09	50,05	38,05	11,1	62
23	089	B	40,05	50,49	50,13	38,01	11,1	56
23	090	A	39,85	50,89	50,06	37,99	11,1	56
23	090	B	42,23	50,52	50,17	37,92	11,1	68
23	091	A	39,57	50,45	50,06	38,08	11,1	73
23	091	B	40,08	50,57	50,06	37,98	11,1	64
23	092	A	41,80	50,52	50,05	38,05	11,1	65
23	092	B	39,79	50,66	50,06	38,09	11,1	67
27	105	A	40,35	50,74	50,07	37,11	11,2	69
27	105	B	39,23	50,88	50,00	37,22	11,2	72
27	106	A	39,36	50,57	50,04	37,22	11,2	62
27	106	B	39,64	50,59	50,06	37,21	11,2	61
27	107	A	35,58	50,59	49,99	37,00	11,2	39
27	107	B	38,73	50,61	50,04	37,13	11,2	52
27	108	A	38,77	50,87	50,09	37,17	11,2	66
27	108	B	40,03	50,97	50,06	37,14	11,2	60
28	109	A	39,83	50,93	50,16	37,25	11,2	68
28	109	B	39,34	50,97	50,21	37,19	11,2	63
28	110	A	40,16	50,86	50,18	37,16	11,2	54
28	110	B	39,75	50,71	50,07	37,11	11,2	61
28	111	A	35,15	50,64	49,98	37,07	11,2	41
28	111	B	39,70	50,75	50,12	37,35	11,2	56

28	112	A	39,45	50,74	50,08	37,13	11,2	73
28	112	B	39,70	50,82	50,09	37,47	11,2	60
29	113	A	39,13	50,96	50,23	37,15	11,2	70
29	113	B	40,65	50,84	50,04	37,16	11,2	67
29	114	A	35,37	50,66	50,00	37,09	11,2	42
29	114	B	39,61	50,44	50,06	37,16	11,2	61
29	115	A	38,99	50,47	50,41	37,29	11,2	52
29	115	B	39,35	50,53	50,10	37,16	11,2	63
29	116	A	39,23	50,66	50,09	37,30	11,2	68
29	116	B	39,79	50,70	50,10	37,24	11,2	60
33	129	A	44,42	50,80	50,11	39,15	11,2	58
33	129	B	43,94	50,78	50,02	39,16	11,2	58
33	130	A	43,82	50,64	50,16	39,22	11,2	50
33	130	B	44,16	50,91	50,09	39,20	11,2	49
33	131	A	36,73	50,67	50,11	39,05	11,2	57
33	131	B	37,69	50,72	50,12	39,15	11,2	59
33	132	A	37,03	50,85	50,15	39,15	11,2	59
33	132	B	44,00	50,67	50,12	39,11	11,2	60
34	133	A	44,09	51,02	50,12	39,11	11,2	59
34	133	B	44,24	50,88	50,13	39,13	11,2	56
34	134	A	43,84	50,68	50,20	39,25	11,2	57
34	134	B	44,19	51,06	50,36	39,12	11,2	55
34	135	A	37,66	50,84	50,09	39,05	11,2	59
34	135	B	36,72	50,64	50,16	39,17	11,2	56
34	136	A	37,03	50,73	50,18	39,23	11,2	60
34	136	B	44,33	50,88	50,08	39,08	11,2	61
35	137	A	43,43	50,78	50,15	39,09	11,2	55
35	137	B	44,30	50,97	50,16	39,11	11,2	59
35	138	A	43,82	50,68	50,10	39,08	11,2	58
35	138	B	44,07	50,72	50,11	39,18	11,2	55
35	139	A	36,92	50,64	50,03	39,09	11,2	60
35	139	B	37,29	50,60	50,12	39,12	11,2	57
35	140	A	37,18	50,71	50,24	39,14	11,2	58
35	140	B	44,04	50,79	50,11	39,05	11,2	58

A.2 Abmessungen und Parameter des verwendeten Betons

In der folgenden Tabelle sind die Parameter der bei den Scherversuchen verwendeten Betonscheiben aufgeführt. Zum einen ist die Mischung angegeben, aus welcher die Scheiben hergestellt wurden, zum anderen die Länge, Breite und Dicke sowie das Gewicht der einzelnen Betonscheiben.

Serie	Prüfkörper	Mischung	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]
1	001	F03-16.11.17	167,80	49,82	49,77	29,82
1	002	F03-16.11.17	164,58	49,80	49,80	29,80
1	003	F03-16.11.17	169,34	49,77	49,70	29,80
1	004	F03-16.11.17	169,62	49,80	49,50	29,81
2	005	F03-16.11.17	166,29	49,90	49,59	29,84
2	006	F03-16.11.17	167,30	49,88	49,70	29,69
2	007	F03-16.11.17	165,93	50,13	49,56	29,71
2	008	F03-16.11.17	168,36	49,80	49,44	29,75
3	009	F03-16.11.17	155,94	49,82	53,00	27,62
3	010	F03-16.11.17	166,11	49,80	53,77	28,75
3	011	F03-16.11.17	158,79	49,82	53,39	27,90
3	012	F03-16.11.17	158,35	49,80	53,63	28,10
4	013	F03-02.12.17	166,22	49,15	53,75	29,26
4	014	F03-02.12.17	165,57	49,10	53,80	29,30
4	015	F03-02.12.17	164,56	49,05	53,85	29,15
4	016	F03-02.12.17	165,76	49,14	53,75	29,24
5	017	F03-02.12.17	148,45	49,18	53,78	26,18
5	018	F03-02.12.17	149,20	49,20	54,01	25,98
5	019	F03-02.12.17	152,18	49,23	53,91	26,78
5	020	F03-02.12.17	154,17	49,21	53,41	26,88
6	021	F03-02.12.17	162,80	49,21	53,78	29,10
6	022	F03-02.12.17	158,78	49,14	53,40	29,01
6	023	F03-02.12.17	162,73	49,20	53,94	29,08
6	024	F03-02.12.17	162,01	49,25	53,80	29,10
7	025	F03-04.12.17	169,18	49,00	51,92	29,40
7	026	F03-04.12.17	166,93	49,16	51,73	29,13
7	027	F03-04.12.17	168,01	49,12	51,52	29,23
7	028	F03-04.12.17	169,63	49,18	51,79	29,34
8	029	F03-04.12.17	160,16	49,22	51,86	27,42
8	030	F03-04.12.17	156,15	49,23	51,60	26,91
8	031	F03-04.12.17	155,22	49,36	51,73	26,52
8	032	F03-04.12.17	151,88	49,18	51,80	26,87

9	033	F03-04.12.17	165,16	49,25	51,80	28,51
9	034	F03-04.12.17	166,12	49,18	51,92	28,66
9	035	F03-04.12.17	168,33	49,16	51,44	29,14
9	036	F03-04.12.17	163,49	49,18	51,89	28,60
10	037	F03-05.12.17	168,54	49,07	52,73	29,26
10	038	F03-05.12.17	169,21	49,17	52,65	29,48
10	039	F03-05.12.17	168,82	49,23	52,46	29,18
10	040	F03-05.12.17	167,77	49,16	52,62	29,24
11	041	F03-05.12.17	166,24	49,26	52,80	28,74
11	042	F03-05.12.17	165,33	49,33	52,53	28,66
11	043	F03-05.12.17	165,95	49,18	52,14	28,78
11	044	F03-05.12.17	167,33	49,22	52,62	29,17
12	045	F03-05.12.17	164,08	49,12	52,28	28,71
12	046	F03-05.12.17	165,38	49,16	52,29	28,77
12	047	F03-05.12.17	164,42	49,22	52,51	28,51
12	048	F03-05.12.17	165,08	49,24	52,24	28,73
13	049	F05-30.11.17	178,96	49,17	52,00	29,20
13	050	F05-30.11.17	174,74	49,10	51,70	29,30
13	051	F05-30.11.17	181,63	49,16	51,75	29,15
13	052	F05-30.11.17	178,62	49,01	52,14	29,15
14	053	F05-30.11.17	172,45	49,10	51,34	28,35
14	054	F05-30.11.17	172,23	49,01	51,52	28,30
14	055	F05-30.11.17	170,97	49,05	51,09	28,04
14	056	F05-30.11.17	170,16	49,10	51,10	28,30
15	057	F05-30.11.17	175,37	49,01	51,20	29,18
15	058	F05-30.11.17	177,53	49,18	51,97	29,00
15	059	F05-30.11.17	174,29	48,92	51,74	28,99
15	060	F05-30.11.17	171,84	49,24	51,68	28,84
16	061	F05-30.11.17	176,44	49,28	51,50	29,10
16	062	F05-30.11.17	170,11	49,26	51,37	28,60
16	063	F05-30.11.17	169,47	49,26	51,45	28,84
16	064	F05-30.11.17	171,93	49,39	52,15	28,96
17	065	F05-06.12.17	172,10	49,29	50,21	29,35
17	066	F05-06.12.17	172,04	49,36	50,42	29,25
17	067	F05-06.12.17	172,18	49,41	50,57	29,25
17	068	F05-06.12.17	173,13	49,22	50,43	29,21
18	069	F05-06.12.17	173,18	49,38	50,22	29,18
18	070	F05-06.12.17	171,63	49,15	50,64	29,20
18	071	F05-06.12.17	175,42	49,21	50,69	29,38
18	072	F05-06.12.17	171,73	49,17	50,52	29,27

19	073	F05-06.12.17	168,27	49,21	50,72	28,67
19	074	F05-06.12.17	170,06	49,16	50,67	28,70
19	075	F05-06.12.17	167,52	49,26	50,89	28,22
19	076	F05-06.12.17	172,40	49,27	50,60	28,80
20	077	F05-06.12.17	169,09	49,20	50,73	28,84
20	078	F05-06.12.17	167,41	49,18	50,35	28,83
20	079	F05-06.12.17	170,00	49,34	50,60	29,02
20	080	F05-06.12.17	168,50	49,10	50,39	29,29
21	081	F06-30.01.18	167,00	49,27	49,82	29,18
21	082	F06-30.01.18	166,08	49,28	50,05	29,31
21	083	F06-30.01.18	162,58	49,14	48,93	29,34
21	084	F06-30.01.18	169,55	49,35	50,60	29,20
22	085	F06-30.01.18	159,54	49,31	48,95	28,59
22	086	F06-30.01.18	161,36	49,32	50,00	28,25
22	087	F06-30.01.18	162,75	49,23	50,29	28,65
22	088	F06-30.01.18	163,27	49,29	49,19	28,85
23	089	F06-30.01.18	164,25	49,22	50,33	29,22
23	090	F06-30.01.18	163,72	49,26	49,81	29,31
23	091	F06-30.01.18	165,75	49,22	50,93	29,11
23	092	F06-30.01.18	164,99	49,23	50,41	29,14
27	105	F06-02.02.18	167,71	49,37	50,69	29,26
27	106	F06-02.02.18	169,93	49,25	50,74	29,17
27	107	F06-02.02.18	171,67	49,47	51,72	29,16
27	108	F06-02.02.18	170,08	49,30	50,98	29,37
28	109	F06-02.02.18	166,48	49,54	50,43	28,81
28	110	F06-02.02.18	165,08	49,19	50,60	28,80
28	111	F06-02.02.18	162,92	49,29	50,63	28,11
28	112	F06-02.02.18	165,82	49,32	50,86	28,58
29	113	F06-02.02.18	169,00	49,30	50,96	29,19
29	114	F06-02.02.18	168,83	49,19	50,93	29,18
29	115	F06-02.02.18	168,75	49,38	51,28	29,19
29	116	F06-02.02.18	170,19	49,24	51,24	29,25
33	129	F06-09.02.18	170,81	49,28	50,38	29,28
33	130	F06-09.02.18	166,83	49,04	49,88	29,15
33	131	F06-09.02.18	171,51	49,17	50,80	29,18
33	132	F06-09.02.18	170,94	49,15	50,37	29,18
34	133	F06-09.02.18	160,87	49,28	49,78	27,93
34	134	F06-09.02.18	155,87	49,24	49,46	27,24
34	135	F06-09.02.18	153,32	49,29	49,45	26,75
34	136	F06-09.02.18	149,18	49,43	50,03	27,43

A.2 Abmessungen und Parameter des verwendeten Betons

35	137	F06-09.02.18	165,62	49,12	49,75	29,17
35	138	F06-09.02.18	167,30	49,30	50,04	29,13
35	139	F06-09.02.18	167,97	49,28	50,19	29,29
35	140	F06-09.02.18	164,50	49,25	49,70	29,17

A.3 Festbetonkennwerte

Nachfolgende Tabelle führt die Festbetonkennwerte des verwendeten Betons bei den Scherversuchen auf. Für jede Mischung, der Mischungsname besteht aus der verwendeten Mischung selbst und dem Herstellungsdatum, ist das Prüfdatum, sowie die in Anlehnung an DIN EN 196-1 [145] bestimmten Bruchlasten und Festigkeiten der Biegezug- und Druckprüfung angegeben. Die Prüfkörper waren Prismen mit Abmessungen von 40 mm x 40 mm x 160 mm.

Mischung	Prüfdatum	Biegezug		Druck	
		Bruchlast [N]	Festigkeit [N/mm ²]	Bruchlast [kN]	Festigkeit [N/mm ²]
F03-16.11.17	30.11.2017	6014	13,39	179,8	112,13
				187,0	116,88
F03-16.11.17	30.11.2017	6560	14,50	178,5	111,56
				171,1	106,94
F03-16.11.17	30.11.2017	6714	15,24	172,0	107,5
				174,8	109,25
F03-02.12.17	07.12.2017	5850	13,08	177,4	110,88
				173,5	108,44
F03-02.12.17	07.12.2017	7010	15,20	174,0	108,75
				169,8	106,13
F03-02.12.17	07.12.2017	6560	14,60	149,6	93,50
				170,1	106,31
F03-04.12.2017	13.12.2017	5910	13,75	186,8	117,63
				181,5	114,29
F03-04.12.2017	13.12.2017	6290	14,63	185,7	116,35
				193,2	121,05
F03-04.12.2017	13.12.2017	6190	14,47	171,8	108,19
				170,8	107,56
F03-05.12.2017	13.12.2017	6220	13,98	194,1	121,31
				187,0	116,88
F03-05.12.2017	13.12.2017	6080	13,73	190,3	118,94
				195,1	121,94
F03-05.12.2017	13.12.2017	6360	14,09	195,1	121,91
				184,5	115,31
F05-30.11.2017	07.12.2017	19190	43,36	355,6	222,25
				352,2	220,13
F05-30.11.2017	07.12.2017	20120	45,68	345,5	215,94
				345,1	215,69

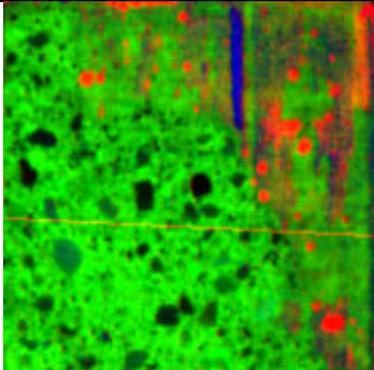
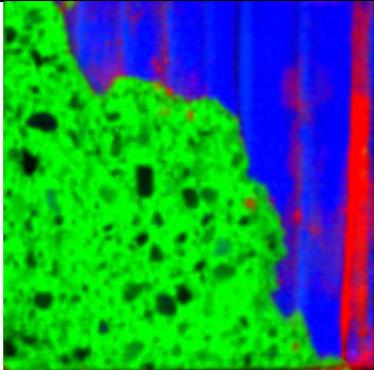
F05-06.12.2017	13.12.2017	16620	38,57	347,4	217,13
				339,7	212,31
F05-06.12.2017	13.12.2017	19230	44,74	353,8	221,13
				354,1	221,31
F05-06.12.2017	13.12.2017	15800	36,94	345,3	215,81
				335,6	209,75
F06-30.01.2018	02.02.2018	5160	12,18	221,7	138,91
				231,2	144,86
F06-30.01.2018	02.02.2018	6410	15,45	225,2	143,99
				225,9	144,44
F06-30.01.2018	02.02.2018	6990	16,51	230,6	144,49
				228,1	142,92
F06-02.02.2018	15.02.2018	8520	19,19	244,8	153,00
				224,3	140,18
F06-02.02.2018	15.02.2018	8330	19,09	249,8	156,13
				243,3	152,06
F06-02.02.2018	15.02.2018	8770	20,00	250,1	156,31
				239,0	149,38
F06-09.02.2018	20.02.2018	7050	16,32	247,5	154,69
				256,4	160,25
F06-09.02.2018	20.02.2018	8110	18,82	248,1	155,06
				250,7	156,69
F06-09.02.2018	20.02.2018	8130	18,91	249,4	157,05
				242,9	152,96

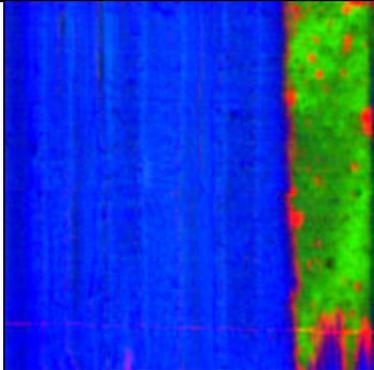
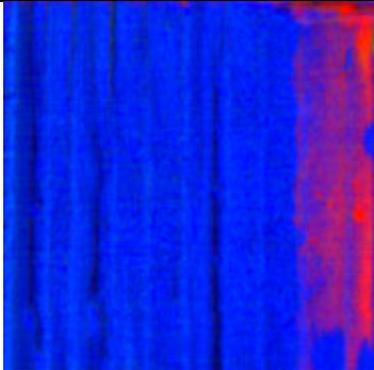
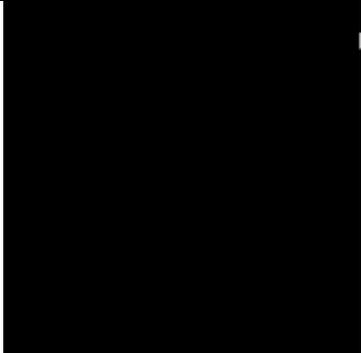
A.4 Versuchsergebnisse der Scherversuche

Auf den nachfolgenden Seiten sind die einzelnen Ergebnisse der Scherversuche dargestellt. Für eine bessere Übersichtlichkeit ist für jede Scherfläche aufgeführt, welcher Klebstoff und welche Betonoberflächenbehandlung zur Herstellung verwendet wurden. In der folgenden Tabelle sind die einzelnen Klebstoffkurzbezeichnungen aufgeführt. Zudem ist das Datum der Verklebung sowie das Datum der Prüfung für mit angegeben.

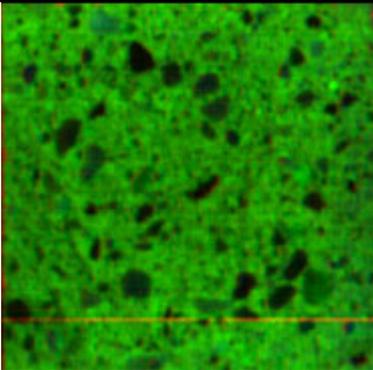
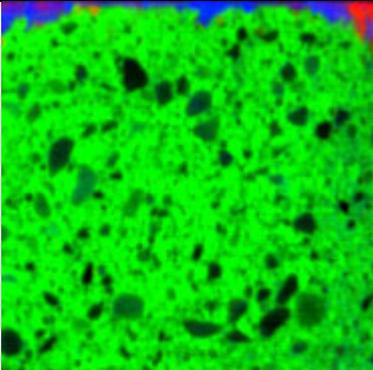
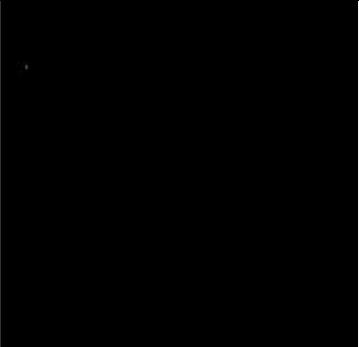
1k-PU	Ein-Komponenten Polyurethan
2k-PU	Zwei-Komponenten Polyurethan
MUF	Melamin-Urea-Formaldehydharz
PRF	Phenol-Resorcin-Formaldehydharz
Epoxy	Zwei-Komponenten Epoxydharz

Als Ergebnisse sind einerseits die Bruchkraft, die Scherfläche und die daraus resultierende Scherfestigkeit angegeben. Andererseits sind die automatisch bestimmten Bruchanteile aufgeführt. Da die Bruchanteile automatisch, basierend auf „übersetzten“ Hyperspektralbildern, bestimmt wurden sind für jede Scherfläche für die Holz- und Betonseite jeweils ein Farbbild und das „übersetzte“ Hyperspektralbild (HSI) mit aufgeführt. In den übersetzten Hyperspektralbildern steht die Farben blau für Holz, grün für Beton und rot für Holz mit Klebstoff bzw. Beton mit Klebstoff. In der untersten Zeile sind die Bruchanteile in schwarz-weiß Bildern dargestellt. Ein weißer Bildpunkt kennzeichnet die Zugehörigkeit zur jeweiligen Bruchart. Basierend auf diesen Bildern wurden die Bruchanteile berechnet, die ebenfalls mit aufgeführt sind.

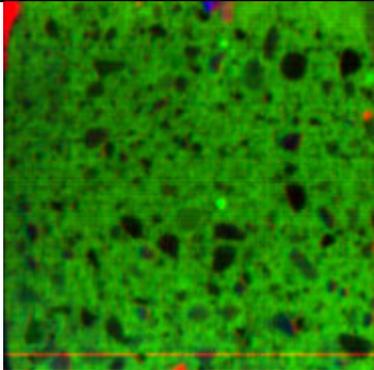
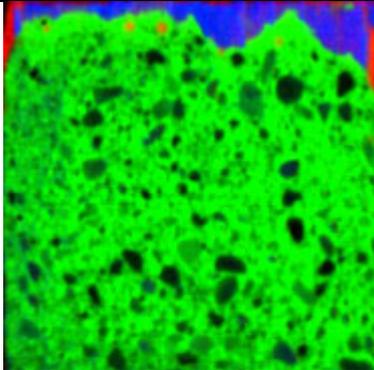
Serie:	001	Prüfkörper:	001	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.479,54	mm ²	Holzbruch:	0,96	%
Bruchkraft:	17.300	N	Betonbruch:	58,58	%
Scherfestigkeit:	6,98	N/mm ²	Grenzfläche:	40,49	%
			Mehrfach betrachtet:	0,03	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Serie:	001	Prüfkörper:	001	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	28.11.2017		
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung	05.12.2017		
Scherfläche:	2.479,54	mm ²	Holzbruch:	76,72	%
Bruchkraft:	17.200	N	Betonbruch:	0,02	%
Scherfestigkeit:	6,94	N/mm ²	Grenzfläche:	23,26	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

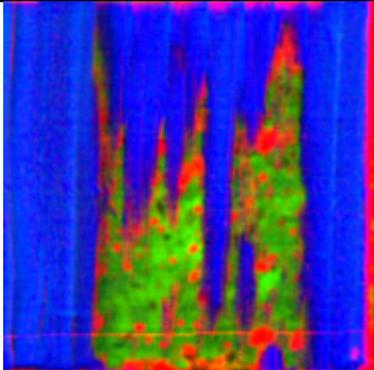
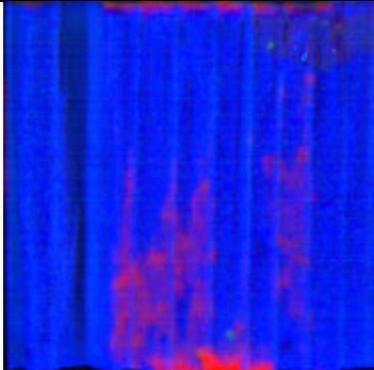
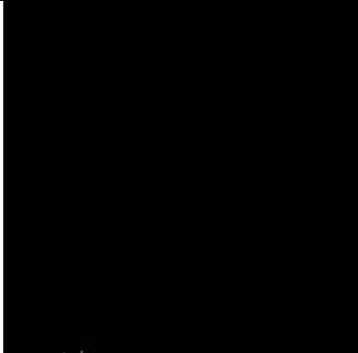
Serie:	001	Prüfkörper:	002	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.480,04	mm ²	Holzbruch:	0,00	%
Bruchkraft:	16.500	N	Betonbruch:	95,81	%
Scherfestigkeit:	6,65	N/mm ²	Grenzfläche:	4,19	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%

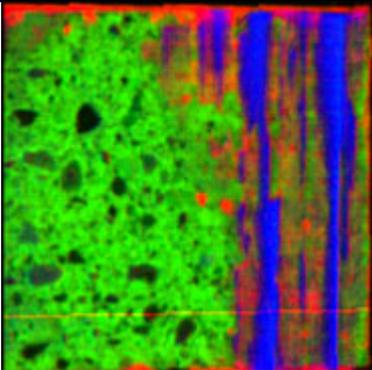
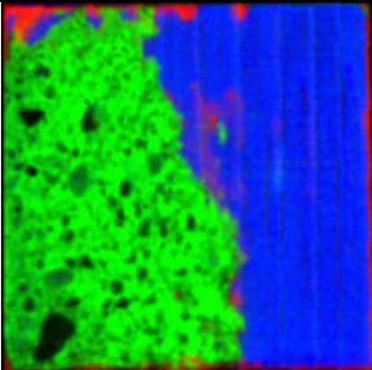
		
Farbbild Betonseite	HSI Betonseite	
		
Farbbild Holzseite	HSI Holzseite	
		
Betonbruch	Holzbruch	Grenzflächenversagen

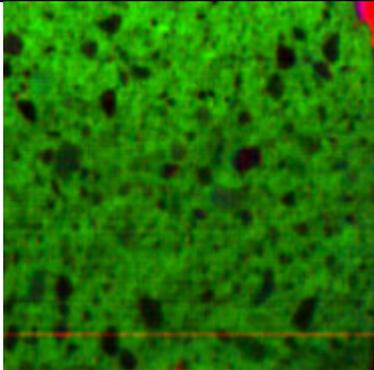
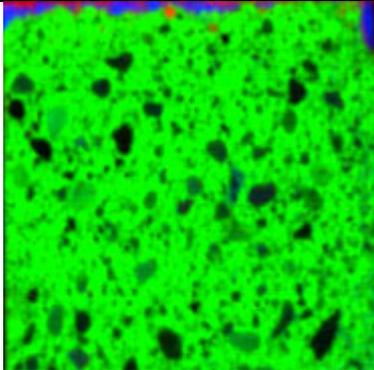
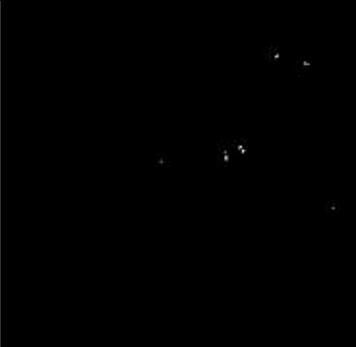
Serie:	001	Prüfkörper:	002	B	
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	28.11.2017		
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung	05.12.2017		
Scherfläche:	2.480,04	mm ²	Holzbruch:	0,08	%
Bruchkraft:	17.400	N	Betonbruch:	91,42	%
Scherfestigkeit:	7,02	N/mm ²	Grenzfläche:	8,53	%
			Mehrfach betrachtet:	0,03	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%

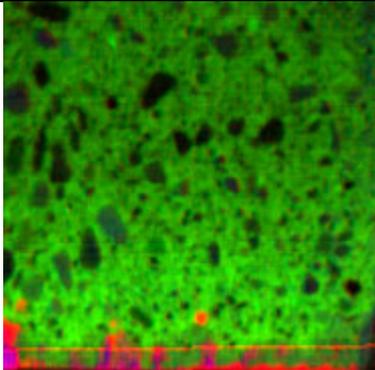
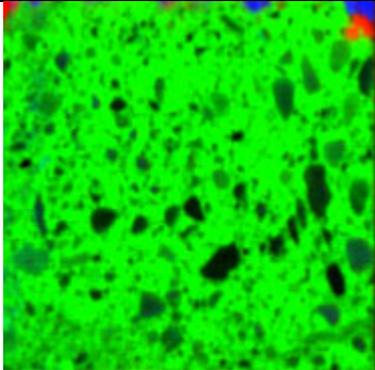
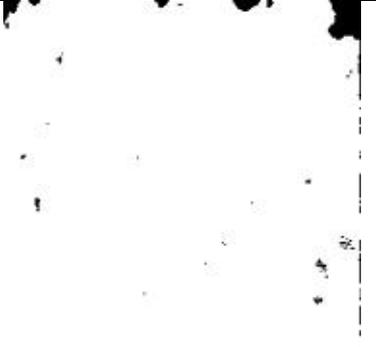
		
Farbbild Betonseite	HSI Betonseite	
		
Farbbild Holzseite	HSI Holzseite	
		
Betonbruch	Holzbruch	Grenzflächenversagen

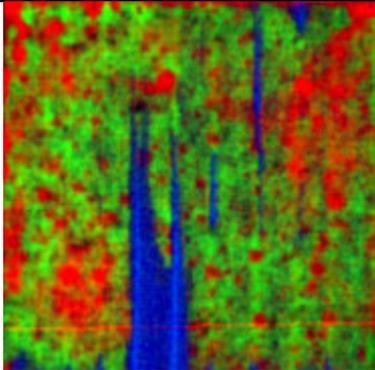
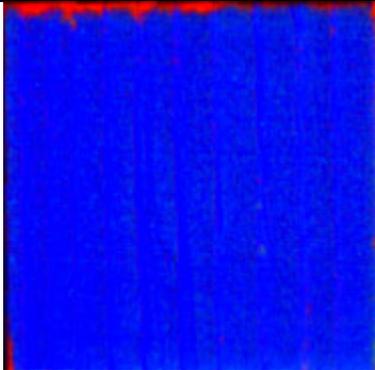
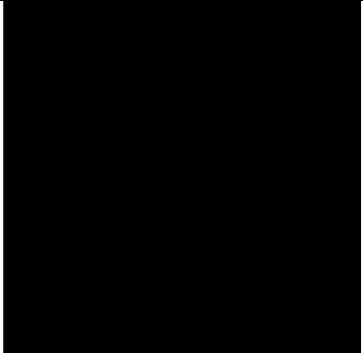
Serie:	001	Prüfkörper:	003	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.473,57	mm ²	Holzbruch:	61,54	%
Bruchkraft:	15.500	N	Betonbruch:	0,00	%
Scherfestigkeit:	6,27	N/mm ²	Grenzfläche:	38,46	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%

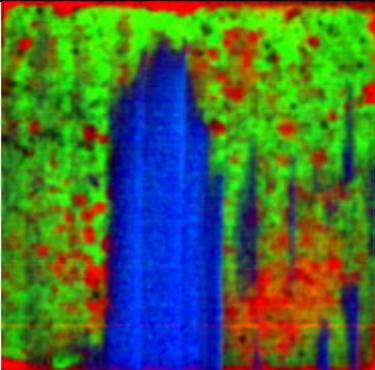
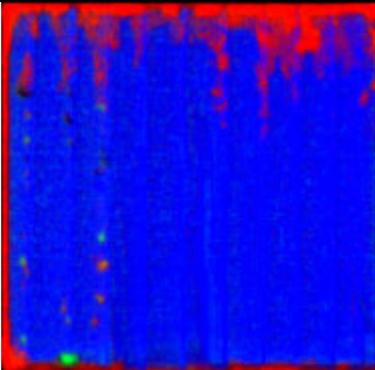
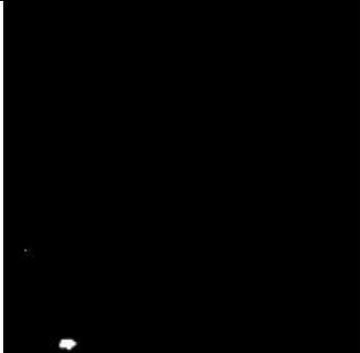
		
Farbbild Betonseite	HSI Betonseite	
		
Farbbild Holzseite	HSI Holzseite	
		
Betonbruch	Holzbruch	Grenzflächenversagen

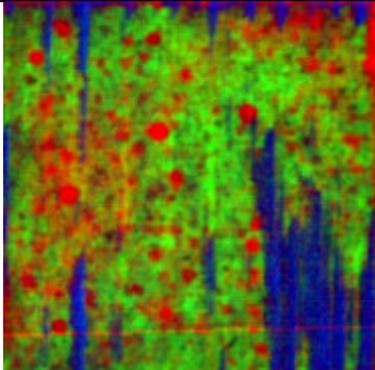
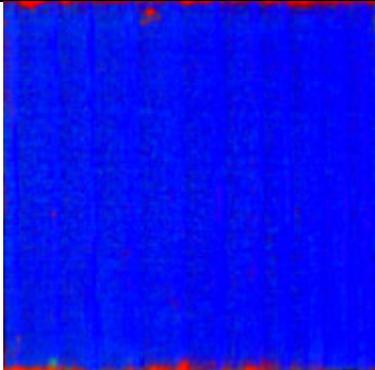
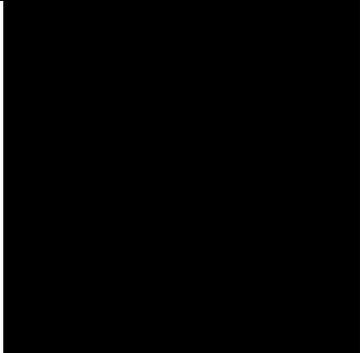
Serie:	001	Prüfkörper:	003	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.473,57	mm ²	Holzbruch:	12,06	%
Bruchkraft:	16.100	N	Betonbruch:	49,07	%
Scherfestigkeit:	6,51	N/mm ²	Grenzfläche:	38,89	%
			Mehrfach betrachtet:	0,02	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

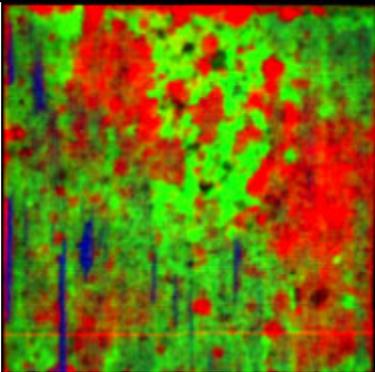
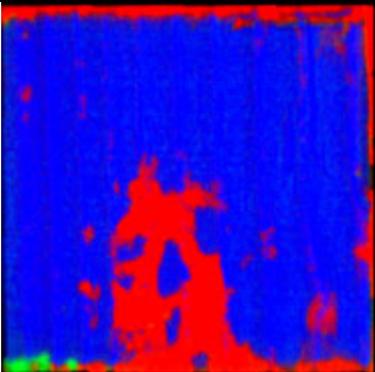
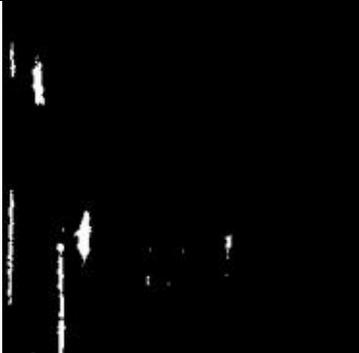
Serie:	001	Prüfkörper:	004	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.465,10	mm ²	Holzbruch:	0,04	%
Bruchkraft:	14.900	N	Betonbruch:	96,68	%
Scherfestigkeit:	6,04	N/mm ²	Grenzfläche:	3,32	%
			Mehrfach betrachtet:	0,04	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

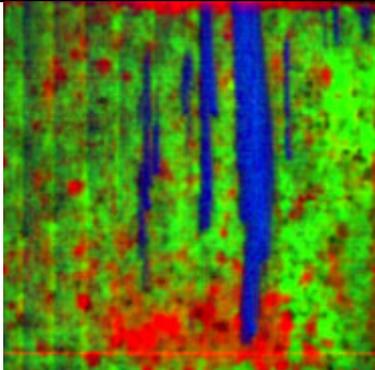
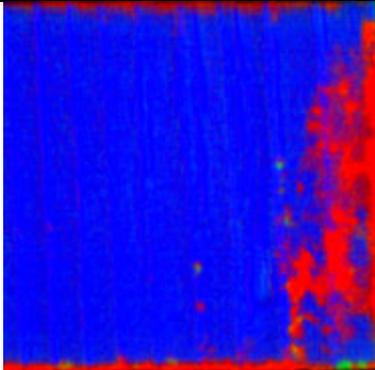
Serie:	001	Prüfkörper:	004	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	28.11.2017		
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung	05.12.2017		
Scherfläche:	2.465,10	mm ²	Holzbruch:	0,02	%
Bruchkraft:	14.500	N	Betonbruch:	98,19	%
Scherfestigkeit:	5,88	N/mm ²	Grenzfläche:	1,81	%
			Mehrfach betrachtet:	0,02	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

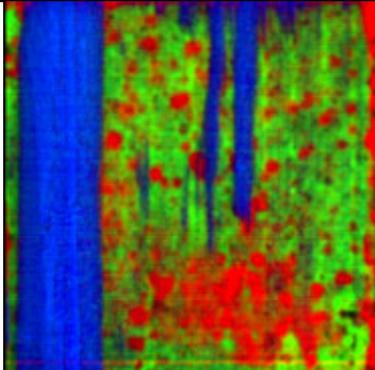
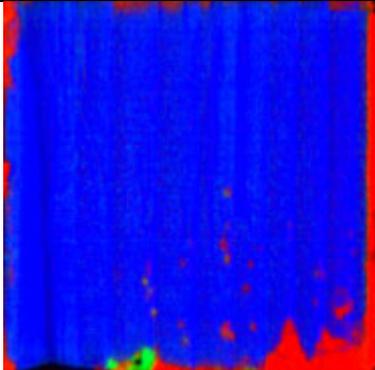
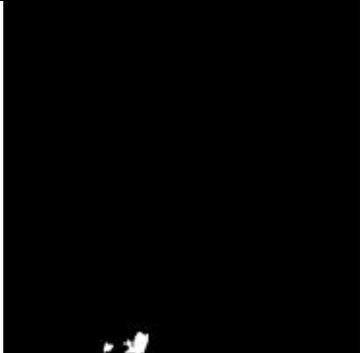
Serie:	002	Prüfkörper:	005	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.474,54	mm ²	Holzbruch:	8,06	%
Bruchkraft:	15.800	N	Betonbruch:	0,00	%
Scherfestigkeit:	6,39	N/mm ²	Grenzfläche:	91,94	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

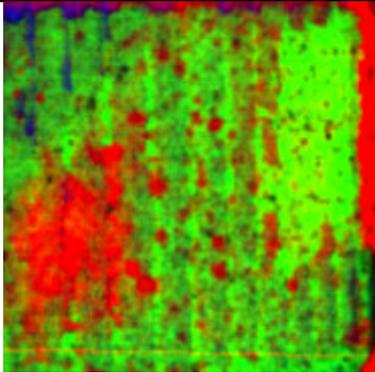
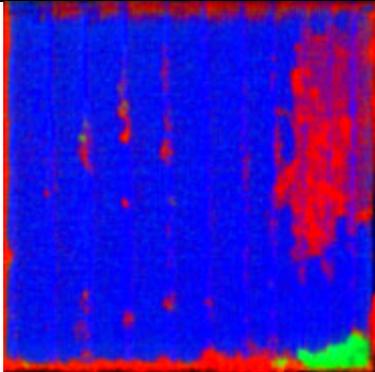
Serie:	002	Prüfkörper:	005	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	28.11.2017		
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung	05.12.2017		
Scherfläche:	2.474,54	mm ²	Holzbruch:	24,64	%
Bruchkraft:	15.700	N	Betonbruch:	0,11	%
Scherfestigkeit:	6,34	N/mm ²	Grenzfläche:	75,26	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
<p>Farbbild Betonseite</p>		<p>HSI Betonseite</p>			
					
<p>Farbbild Holzseite</p>		<p>HSI Holzseite</p>			
					
<p>Betonbruch</p>		<p>Holzbruch</p>		<p>Grenzflächenversagen</p>	

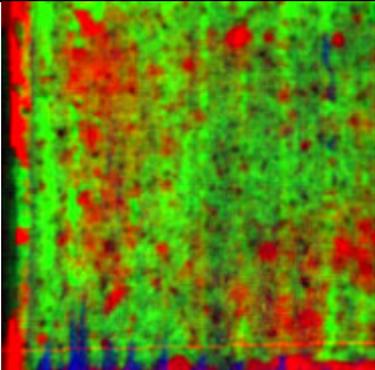
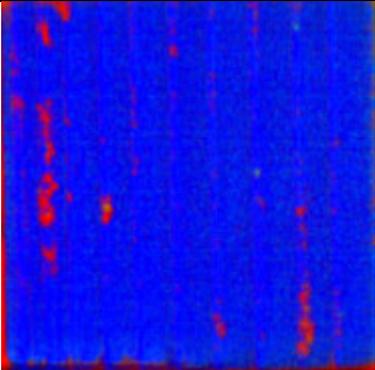
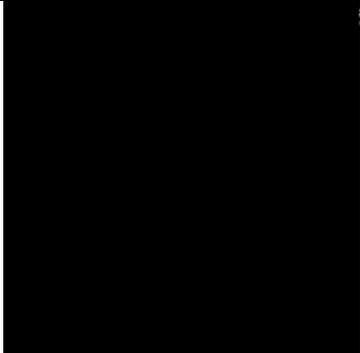
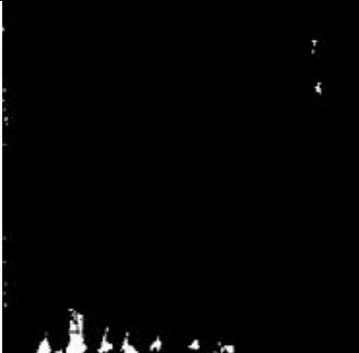
Serie:	002	Prüfkörper:	006	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.479,04	mm ²	Holzbruch:	12,63	%
Bruchkraft:	16.200	N	Betonbruch:	0,00	%
Scherfestigkeit:	6,53	N/mm ²	Grenzfläche:	87,37	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

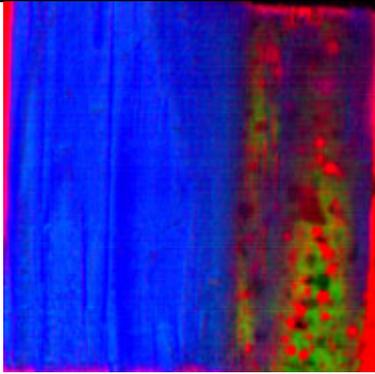
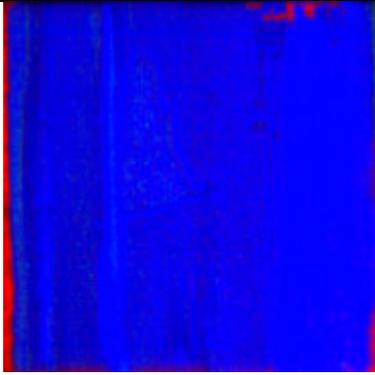
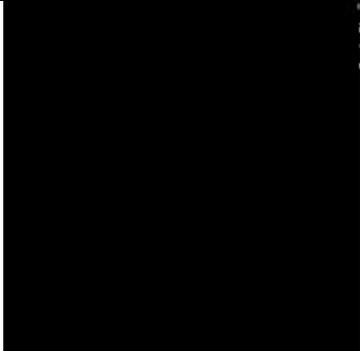
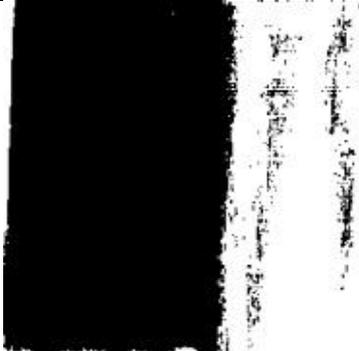
Serie:	002	Prüfkörper:	006	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	28.11.2017		
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung	05.12.2017		
Scherfläche:	2.479,04	mm ²	Holzbruch:	1,46	%
Bruchkraft:	17.000	N	Betonbruch:	0,39	%
Scherfestigkeit:	6,86	N/mm ²	Grenzfläche:	98,15	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

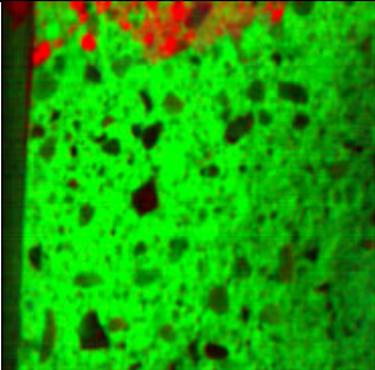
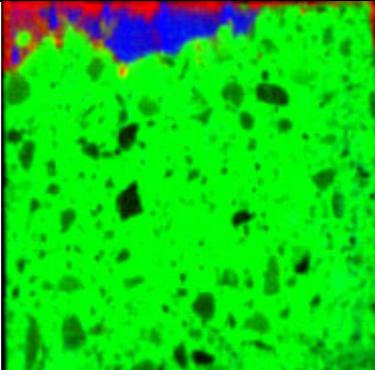
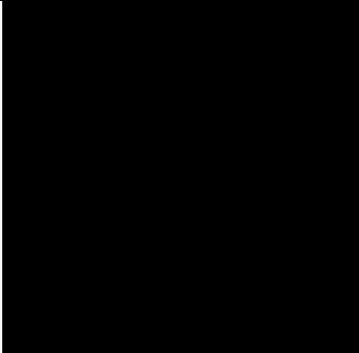
Serie:	002	Prüfkörper:	007	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	28.11.2017		
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung	05.12.2017		
Scherfläche:	2.478,00	mm ²	Holzbruch:	10,10	%
Bruchkraft:	14.900	N	Betonbruch:	0,12	%
Scherfestigkeit:	6,01	N/mm ²	Grenzfläche:	89,79	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

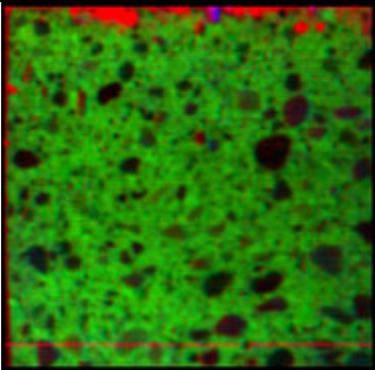
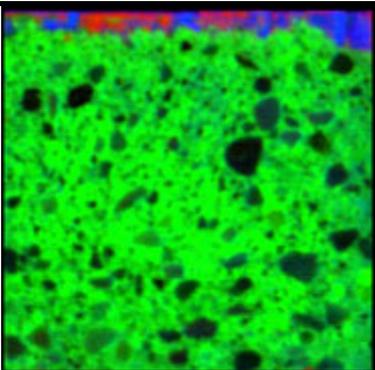
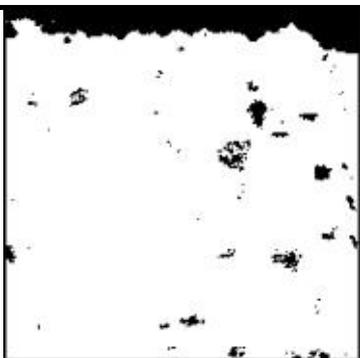
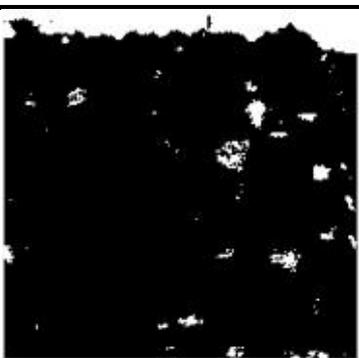
Serie:	002	Prüfkörper:	007	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.478,00	mm ²	Holzbruch:	27,91	%
Bruchkraft:	12.300	N	Betonbruch:	0,31	%
Scherfestigkeit:	4,96	N/mm ²	Grenzfläche:	71,78	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

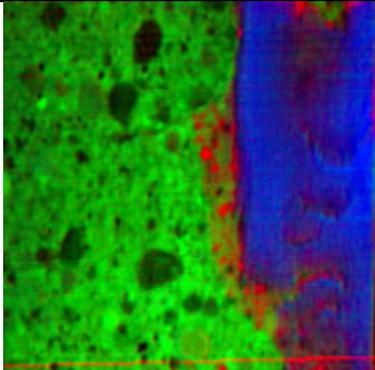
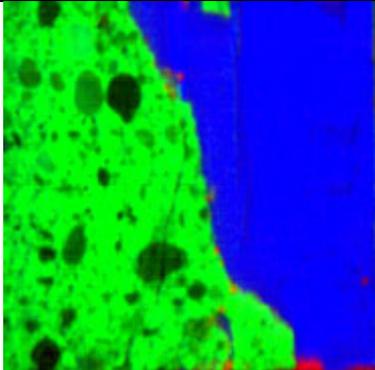
Serie:	002	Prüfkörper:	008	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.462,11	mm ²	Holzbruch:	0,65	%
Bruchkraft:	13.300	N	Betonbruch:	1,09	%
Scherfestigkeit:	5,40	N/mm ²	Grenzfläche:	98,26	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

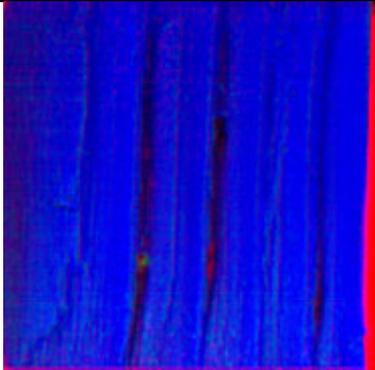
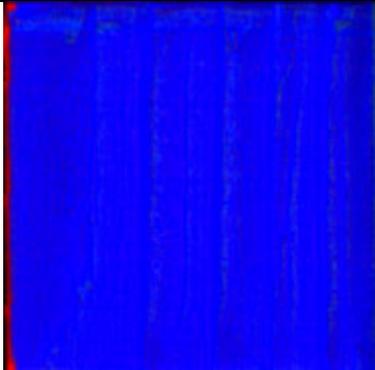
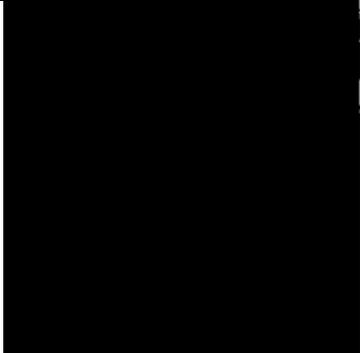
Serie:	002	Prüfkörper:	008	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.462,11	mm ²	Holzbruch:	1,00	%
Bruchkraft:	13.400	N	Betonbruch:	0,01	%
Scherfestigkeit:	5,44	N/mm ²	Grenzfläche:	98,99	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

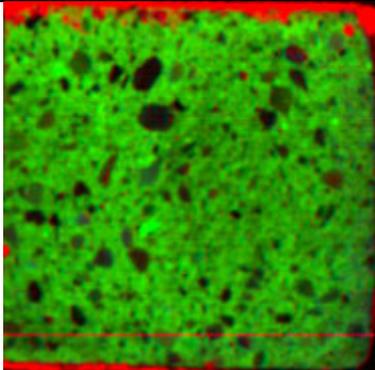
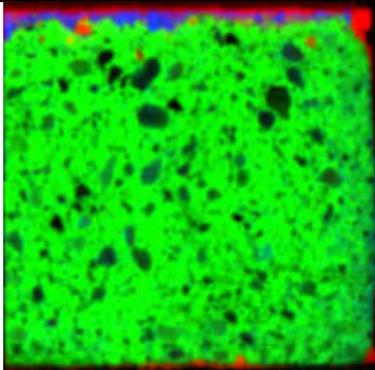
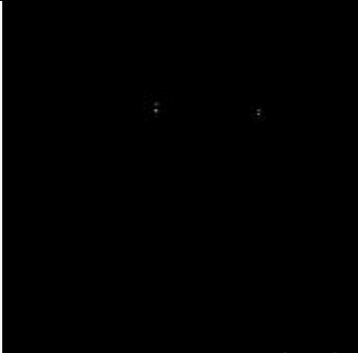
Serie:	003	Prüfkörper:	009	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.491,00	mm ²	Holzbruch:	62,92	%
Bruchkraft:	16.100	N	Betonbruch:	0,02	%
Scherfestigkeit:	6,46	N/mm ²	Grenzfläche:	37,06	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

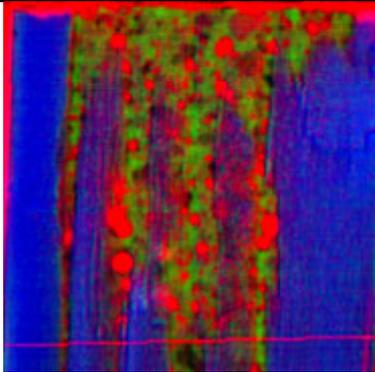
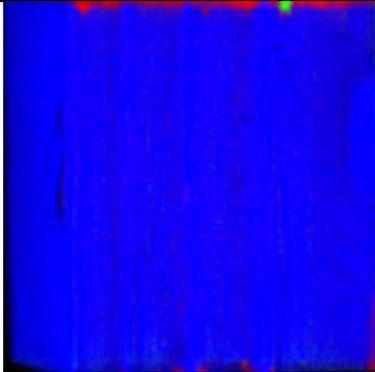
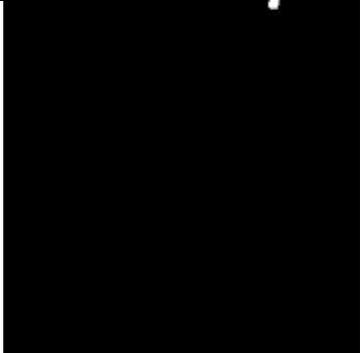
Serie:	003	Prüfkörper:	009	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.491,00	mm ²	Holzbruch:	0,00	%
Bruchkraft:	16.300	N	Betonbruch:	90,40	%
Scherfestigkeit:	6,54	N/mm ²	Grenzfläche:	9,60	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

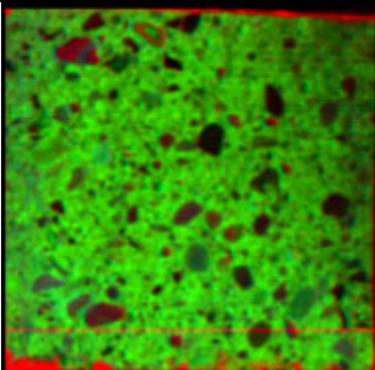
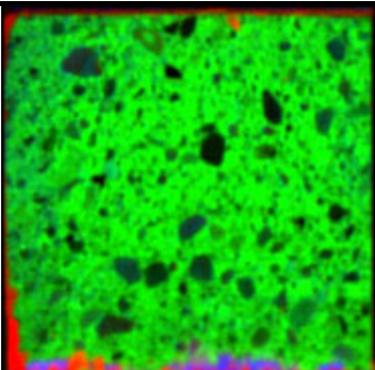
Serie:	003	Prüfkörper:	010	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.490,00	mm ²	Holzbruch:	0,06	%
Bruchkraft:	16.600	N	Betonbruch:	87,82	%
Scherfestigkeit:	6,67	N/mm ²	Grenzfläche:	12,15	%
			Mehrfach betrachtet:	0,03	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

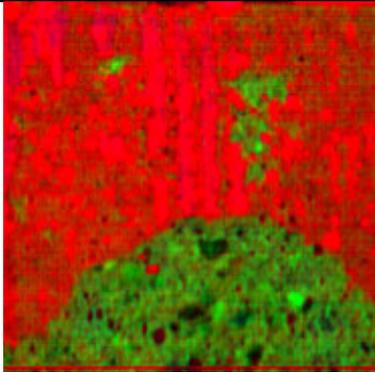
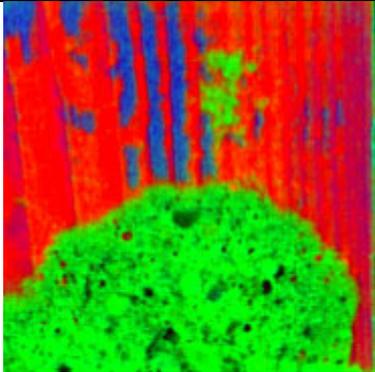
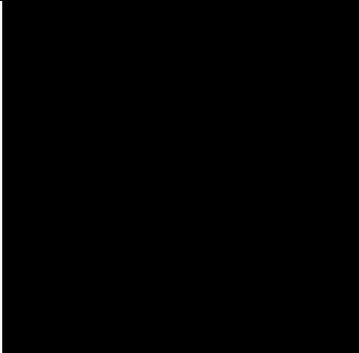
Serie:	003	Prüfkörper:	010	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.490	mm ²	Holzbruch:	24,44	%
Bruchkraft:	18.200	N	Betonbruch:	54,74	%
Scherfestigkeit:	7,31	N/mm ²	Grenzfläche:	20,83	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

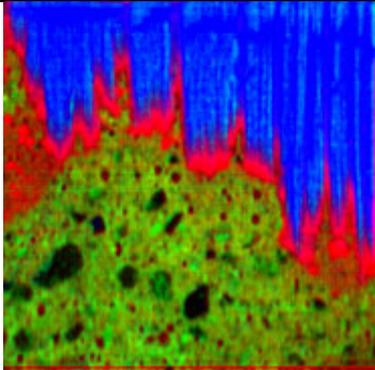
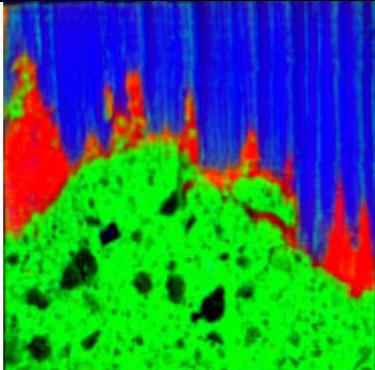
Serie:	003	Prüfkörper:	011	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.491,00	mm ²	Holzbruch:	95,00	%
Bruchkraft:	18.400	N	Betonbruch:	0,05	%
Scherfestigkeit:	7,39	N/mm ²	Grenzfläche:	4,95	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

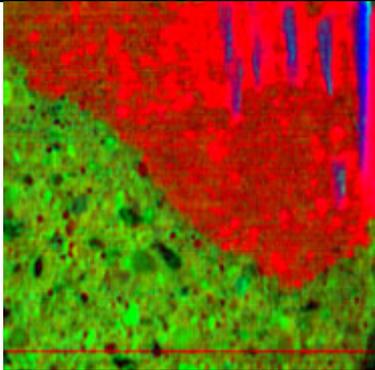
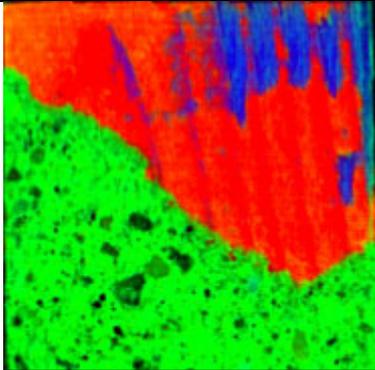
Serie:	003	Prüfkörper:	011	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.491,00	mm ²	Holzbruch:	0,01	%
Bruchkraft:	15.600	N	Betonbruch:	89,68	%
Scherfestigkeit:	6,26	N/mm ²	Grenzfläche:	10,32	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

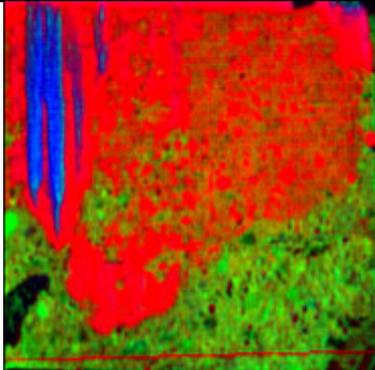
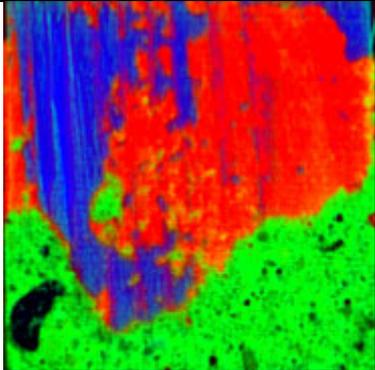
Serie:	003	Prüfkörper:	012	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.490,00	mm ²	Holzbruch:	41,02	%
Bruchkraft:	14.100	N	Betonbruch:	0,07	%
Scherfestigkeit:	5,66	N/mm ²	Grenzfläche:	58,91	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

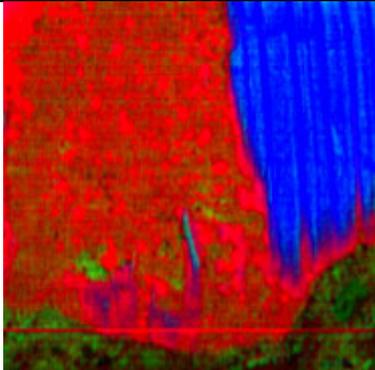
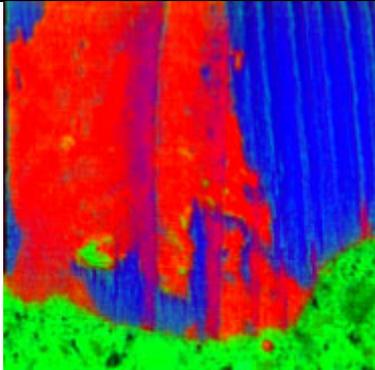
Serie:	003	Prüfkörper:	012	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		28.11.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		05.12.2017	
Scherfläche:	2.490,00	mm ²	Holzbruch:	0,01	%
Bruchkraft:	14.700	N	Betonbruch:	89,49	%
Scherfestigkeit:	5,90	N/mm ²	Grenzfläche:	10,51	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

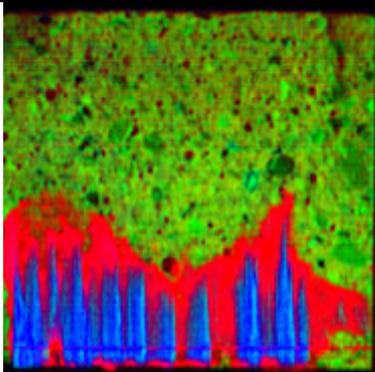
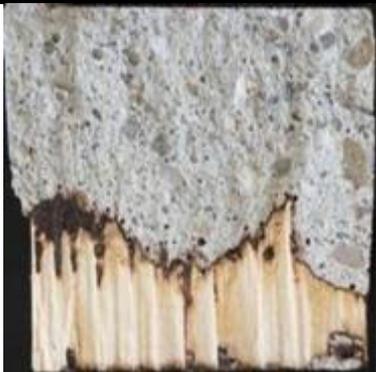
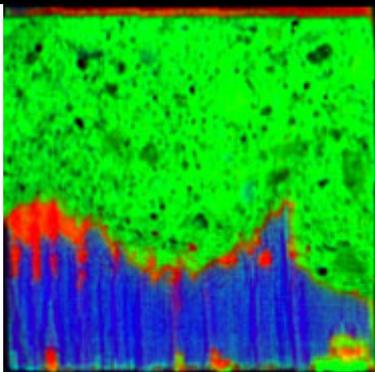
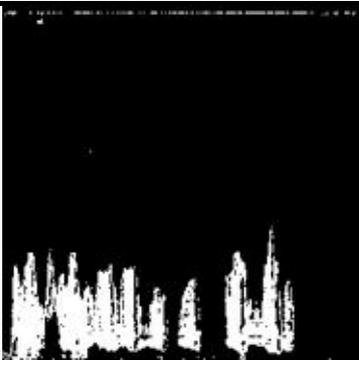
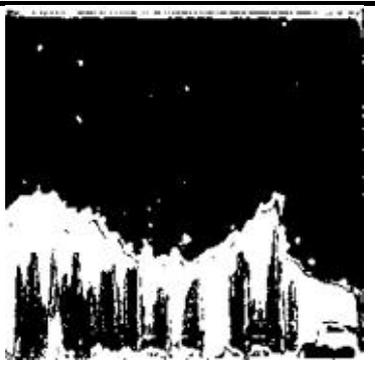
Serie:	004	Prüfkörper:	013	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.457,50	mm ²	Holzbruch:	0,00	%
Bruchkraft:	7.140	N	Betonbruch:	38,90	%
Scherfestigkeit:	2,91	N/mm ²	Grenzfläche:	61,10	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

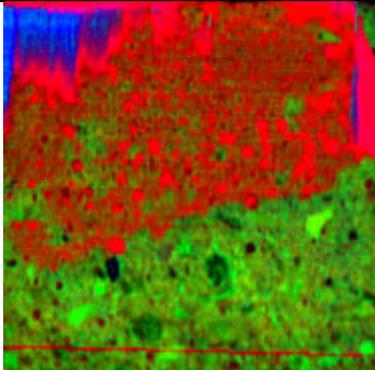
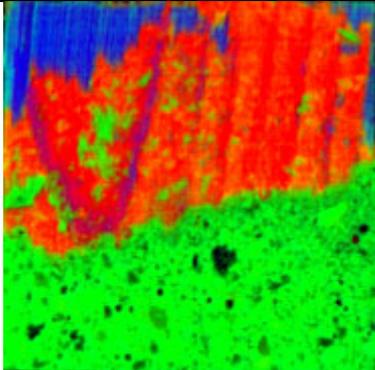
Serie:	004	Prüfkörper:	013	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.457,50	mm ²	Holzbruch:	33,84	%
Bruchkraft:	17.800	N	Betonbruch:	44,96	%
Scherfestigkeit:	7,24	N/mm ²	Grenzfläche:	21,41	%
			Mehrfach betrachtet:	0,21	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

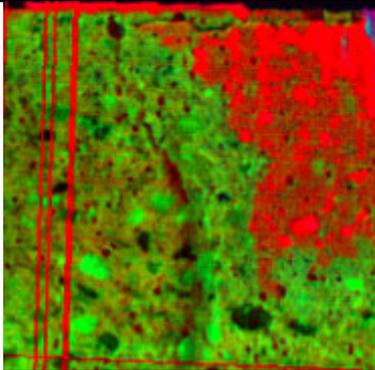
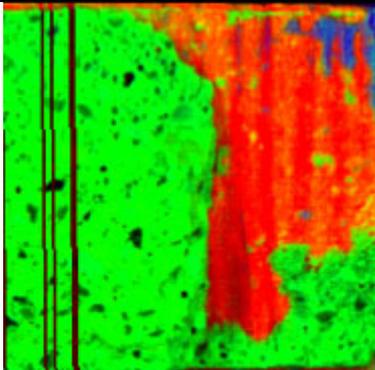
Serie:	004	Prüfkörper:	014	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.455,00	mm ²	Holzbruch:	1,20	%
Bruchkraft:	14.100	N	Betonbruch:	46,85	%
Scherfestigkeit:	5,74	N/mm ²	Grenzfläche:	51,95	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Serie:	004	Prüfkörper:	014	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.455,00	mm ²	Holzbruch:	4,21	%
Bruchkraft:	11.800	N	Betonbruch:	30,74	%
Scherfestigkeit:	4,81	N/mm ²	Grenzfläche:	65,21	%
			Mehrfach betrachtet:	0,16	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

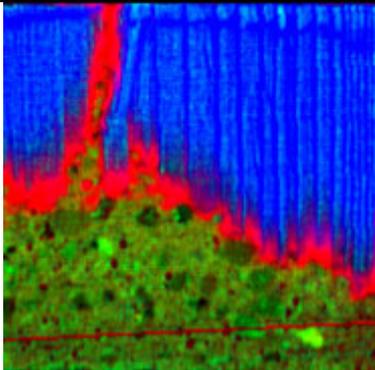
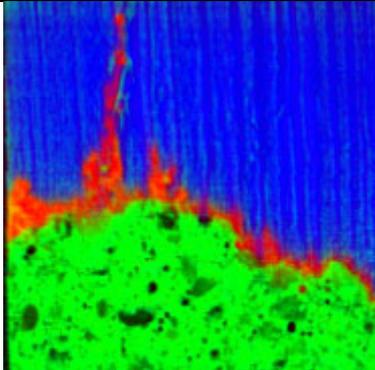
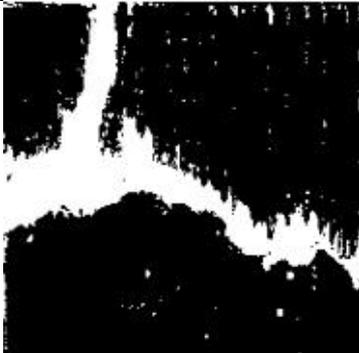
Serie:	004	Prüfkörper:	015	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.452,50	mm ²	Holzbruch:	22,19	%
Bruchkraft:	11.700	N	Betonbruch:	16,74	%
Scherfestigkeit:	4,77	N/mm ²	Grenzfläche:	61,07	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

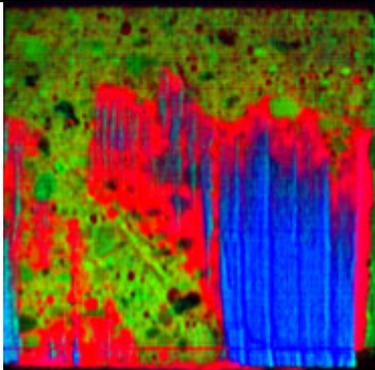
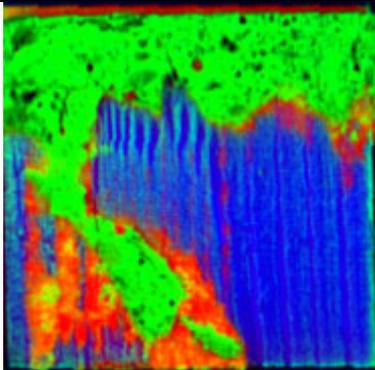
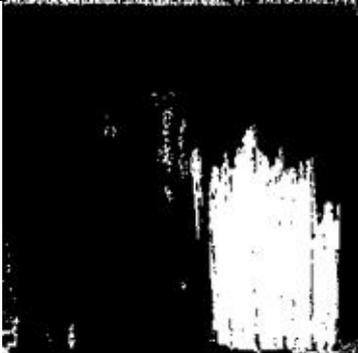
Serie:	004	Prüfkörper:	015	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.452,50	mm ²	Holzbruch:	11,37	%
Bruchkraft:	17.700	N	Betonbruch:	62,55	%
Scherfestigkeit:	7,22	N/mm ²	Grenzfläche:	26,11	%
			Mehrfach betrachtet:	0,03	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

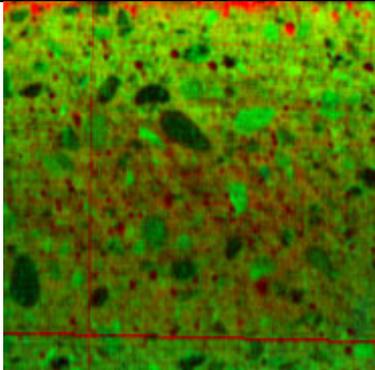
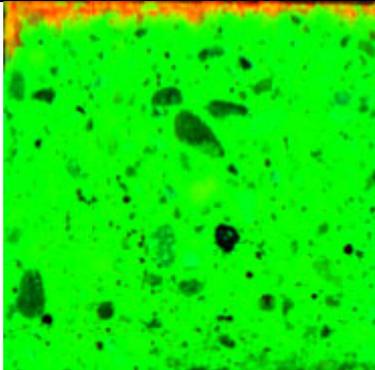
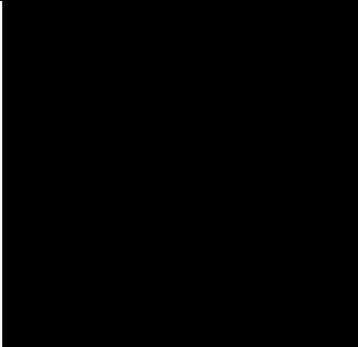
Serie:	004	Prüfkörper:	016	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.457,00	mm ²	Holzbruch:	3,17	%
Bruchkraft:	14.900	N	Betonbruch:	43,63	%
Scherfestigkeit:	6,06	N/mm ²	Grenzfläche:	53,34	%
			Mehrfach betrachtet:	0,14	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

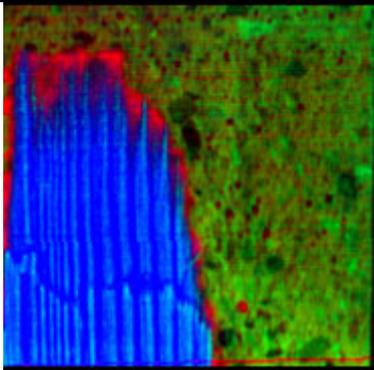
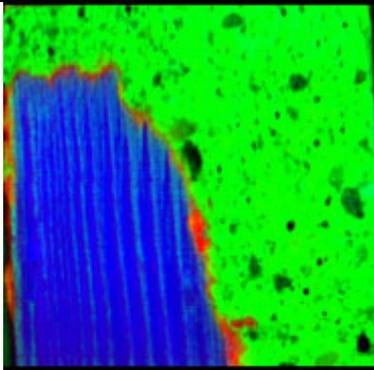
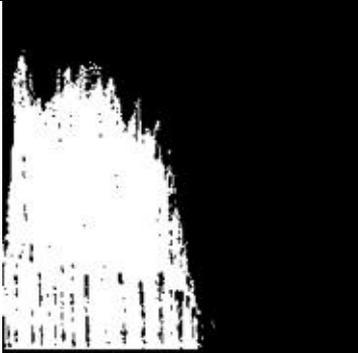
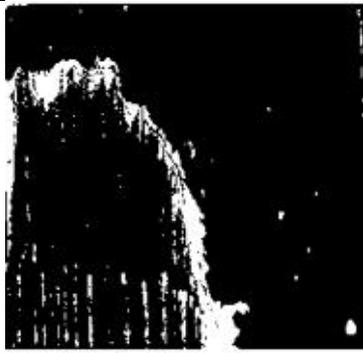
Serie:	004	Prüfkörper:	016	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.457,00	mm ²	Holzbruch:	0,34	%
Bruchkraft:	18.500	N	Betonbruch:	58,18	%
Scherfestigkeit:	7,53	N/mm ²	Grenzfläche:	41,48	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

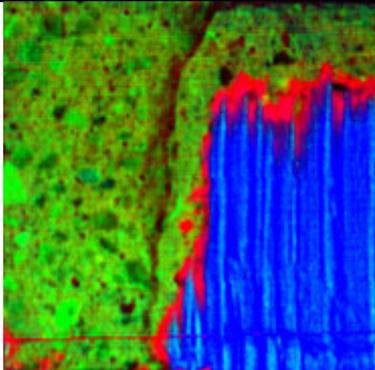
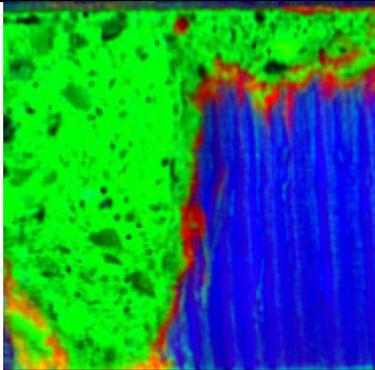
Serie:	005	Prüfkörper:	017	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.459,00	mm ²	Holzbruch:	45,52	%
Bruchkraft:	15.500	N	Betonbruch:	35,09	%
Scherfestigkeit:	6,30	N/mm ²	Grenzfläche:	19,39	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%

		
Farbbild Betonseite	HSI Betonseite	
		
Farbbild Holzseite	HSI Holzseite	
		
Betonbruch	Holzbruch	Grenzflächenversagen

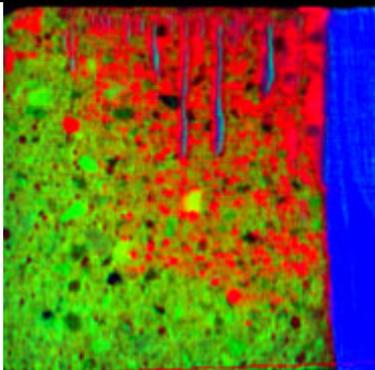
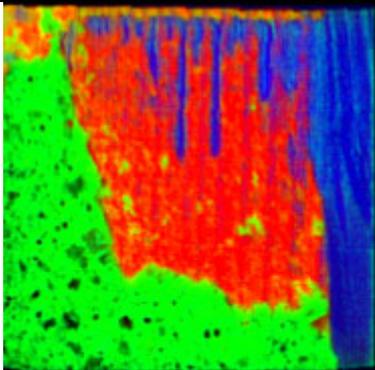
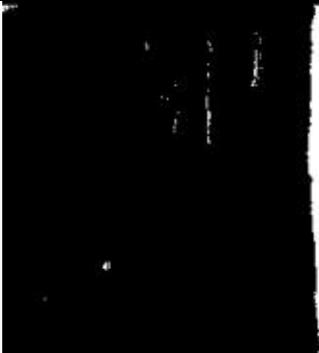
Serie:	005	Prüfkörper:	017	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.459,00	mm ²	Holzbruch:	18,91	%
Bruchkraft:	11.900	N	Betonbruch:	34,67	%
Scherfestigkeit:	4,84	N/mm ²	Grenzfläche:	46,59	%
			Mehrfach betrachtet:	0,17	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

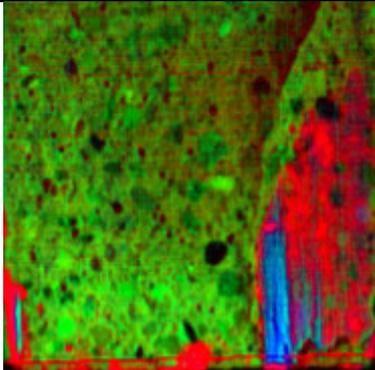
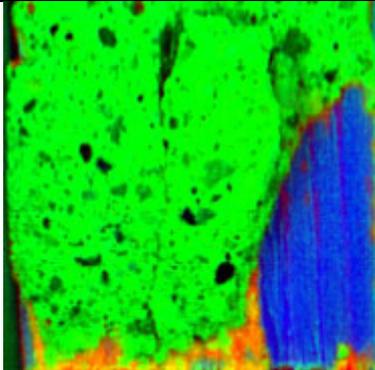
Serie:	005	Prüfkörper:	018	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.460,00	mm ²	Holzbruch:	0,00	%
Bruchkraft:	16.600	N	Betonbruch:	94,75	%
Scherfestigkeit:	6,75	N/mm ²	Grenzfläche:	5,25	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

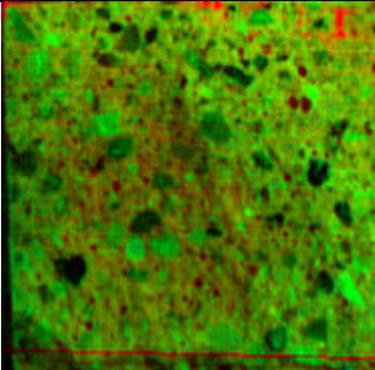
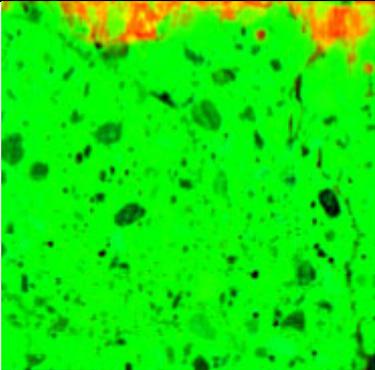
Serie:	005	Prüfkörper:	018	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.460,00	mm ²	Holzbruch:	32,38	%
Bruchkraft:	21.000	N	Betonbruch:	57,28	%
Scherfestigkeit:	8,54	N/mm ²	Grenzfläche:	10,74	%
			Mehrfach betrachtet:	0,40	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Serie:	005	Prüfkörper:	019	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.461,50	mm ²	Holzbruch:	30,88	%
Bruchkraft:	18.100	N	Betonbruch:	52,27	%
Scherfestigkeit:	7,35	N/mm ²	Grenzfläche:	16,88	%
			Mehrfach betrachtet:	0,02	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

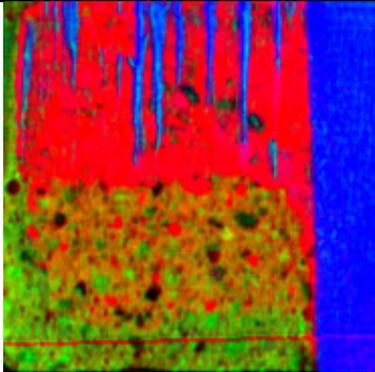
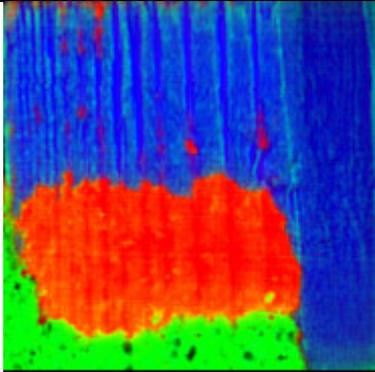
Serie:	005	Prüfkörper:	019	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.461,50	mm ²	Holzbruch:	13,21	%
Bruchkraft:	11.400	N	Betonbruch:	34,31	%
Scherfestigkeit:	4,63	N/mm ²	Grenzfläche:	52,54	%
			Mehrfach betrachtet:	0,06	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%

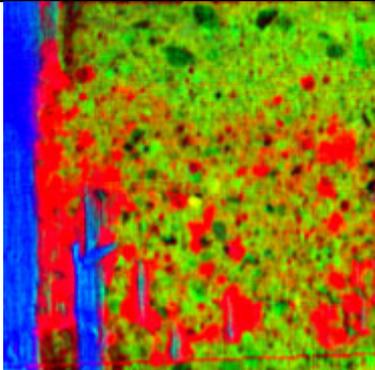
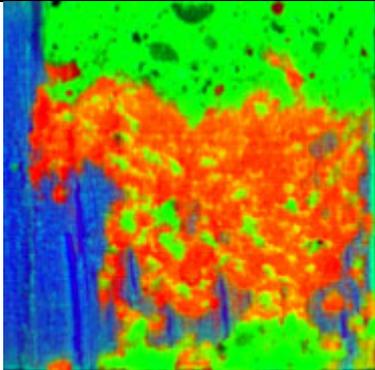
		
Farbbild Betonseite	HSI Betonseite	
		
Farbbild Holzseite	HSI Holzseite	
		
Betonbruch	Holzbruch	Grenzflächenversagen

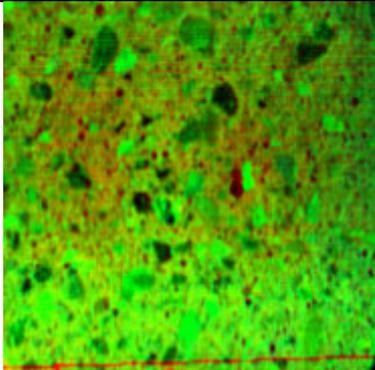
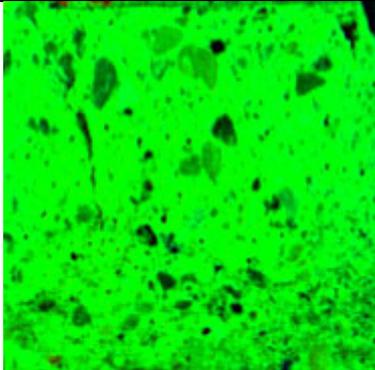
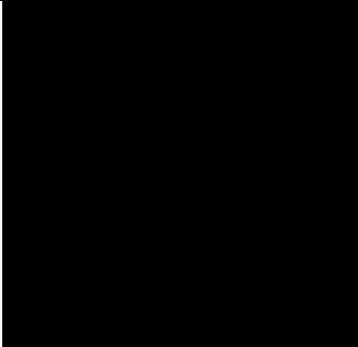
Serie:	005	Prüfkörper:	020	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.460,50	mm ²	Holzbruch:	1,16	%
Bruchkraft:	16.000	N	Betonbruch:	73,65	%
Scherfestigkeit:	6,50	N/mm ²	Grenzfläche:	25,22	%
			Mehrfach betrachtet:	0,03	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

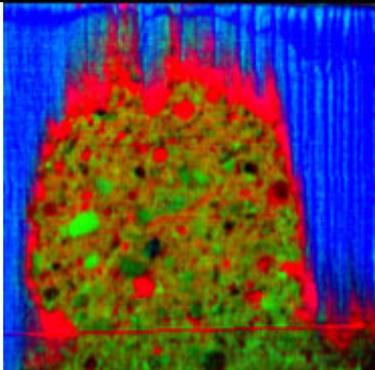
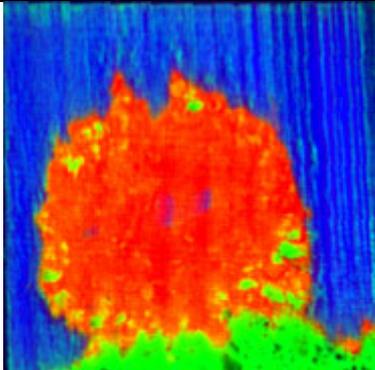
Serie:	005	Prüfkörper:	020	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.460,50	mm ²	Holzbruch:	0,04	%
Bruchkraft:	20.600	N	Betonbruch:	93,40	%
Scherfestigkeit:	8,37	N/mm ²	Grenzfläche:	6,60	%
			Mehrfach betrachtet:	0,04	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

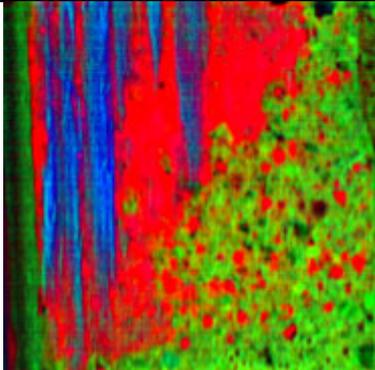
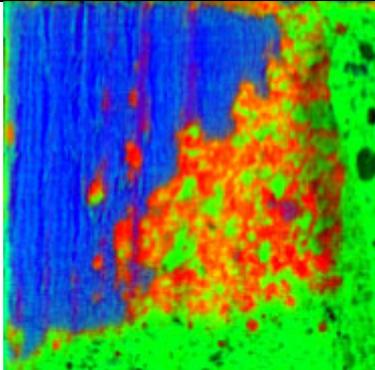
Serie:	006	Prüfkörper:	021	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.460,50	mm ²	Holzbruch:	21,31	%
Bruchkraft:	13.500	N	Betonbruch:	11,33	%
Scherfestigkeit:	5,49	N/mm ²	Grenzfläche:	67,37	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%

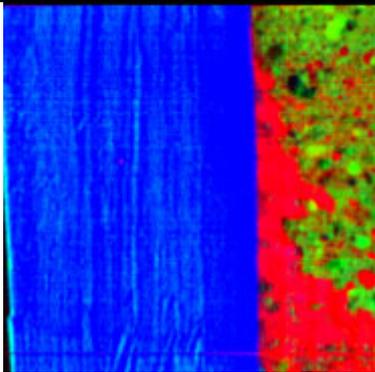
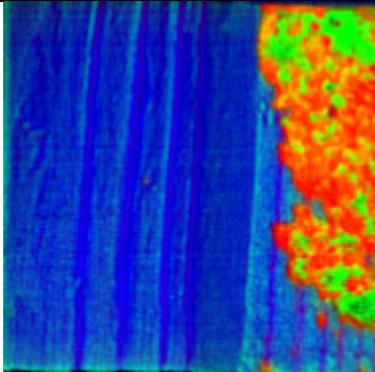
		
Farbbild Betonseite	HSI Betonseite	
		
Farbbild Holzseite	HSI Holzseite	
		
Betonbruch	Holzbruch	Grenzflächenversagen

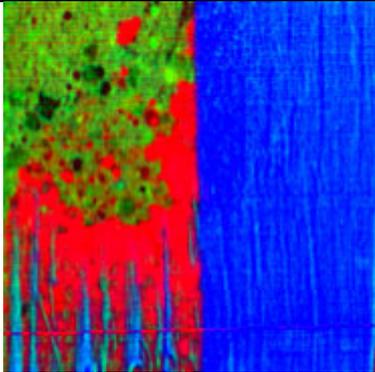
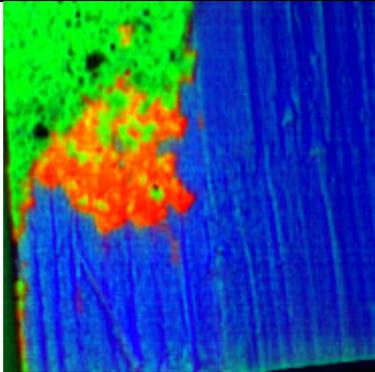
Serie:	006	Prüfkörper:	021	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.460,50	mm ²	Holzbruch:	10,79	%
Bruchkraft:	21.000	N	Betonbruch:	29,69	%
Scherfestigkeit:	8,53	N/mm ²	Grenzfläche:	59,59	%
			Mehrfach betrachtet:	0,07	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

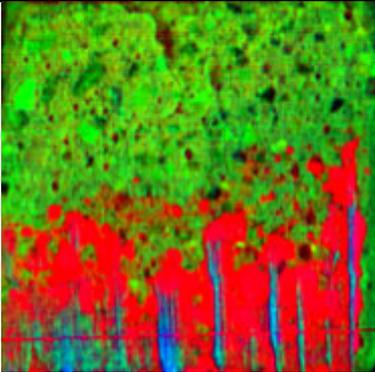
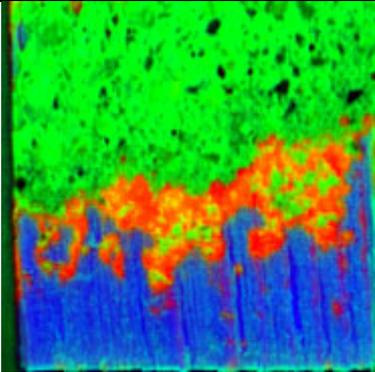
Serie:	006	Prüfkörper:	022	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.457,00	mm ²	Holzbruch:	0,00	%
Bruchkraft:	18.700	N	Betonbruch:	99,31	%
Scherfestigkeit:	7,61	N/mm ²	Grenzfläche:	0,69	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

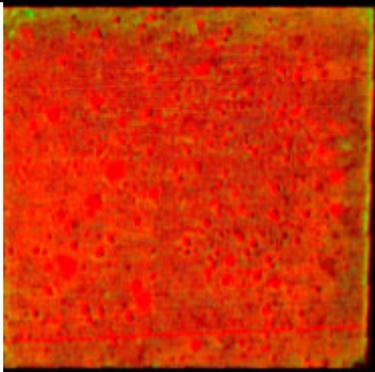
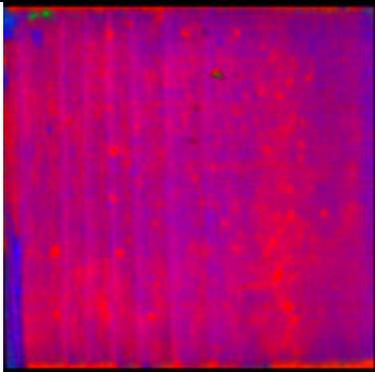
Serie:	006	Prüfkörper:	022	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.457,00	mm ²	Holzbruch:	32,22	%
Bruchkraft:	18.000	N	Betonbruch:	7,96	%
Scherfestigkeit:	7,33	N/mm ²	Grenzfläche:	59,82	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

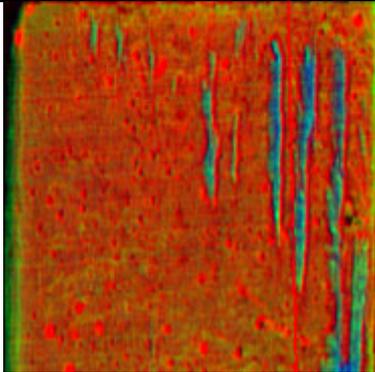
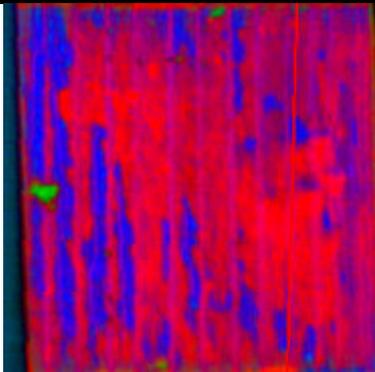
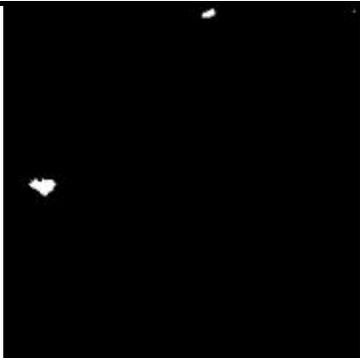
Serie:	006	Prüfkörper:	023	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.460,00	mm ²	Holzbruch:	8,71	%
Bruchkraft:	19.700	N	Betonbruch:	27,60	%
Scherfestigkeit:	8,01	N/mm ²	Grenzfläche:	63,87	%
			Mehrfach betrachtet:	0,17	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

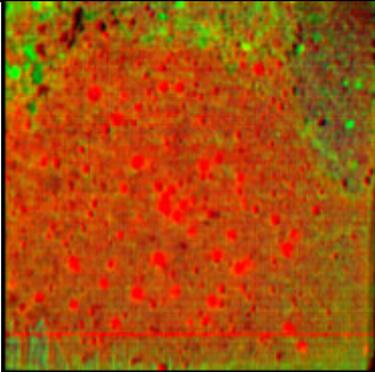
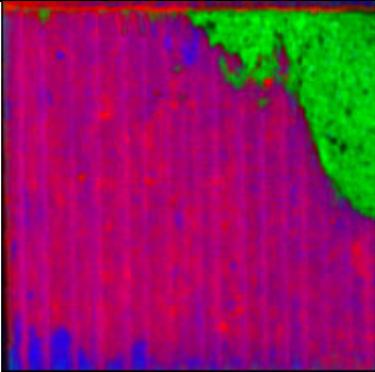
Serie:	006	Prüfkörper:	023	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.460,00	mm ²	Holzbruch:	65,36	%
Bruchkraft:	16.500	N	Betonbruch:	3,55	%
Scherfestigkeit:	6,71	N/mm ²	Grenzfläche:	31,09	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
 <p>Farbbild Betonseite</p>		 <p>HSI Betonseite</p>			
 <p>Farbbild Holzseite</p>		 <p>HSI Holzseite</p>			
 <p>Betonbruch</p>		 <p>Holzbruch</p>		 <p>Grenzflächenversagen</p>	

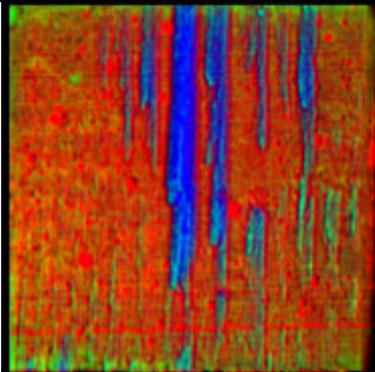
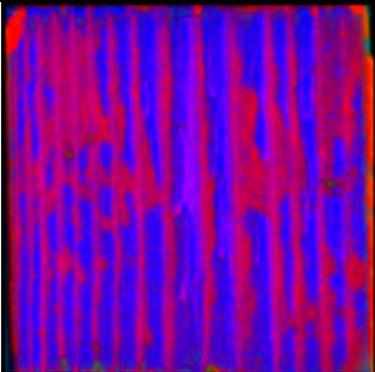
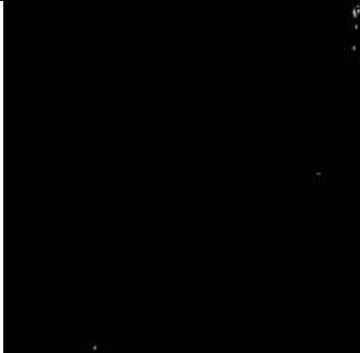
Serie:	006	Prüfkörper:	024	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.462,50	mm ²	Holzbruch:	0,94	%
Bruchkraft:	16.300	N	Betonbruch:	48,23	%
Scherfestigkeit:	6,62	N/mm ²	Grenzfläche:	50,85	%
			Mehrfach betrachtet:	0,02	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

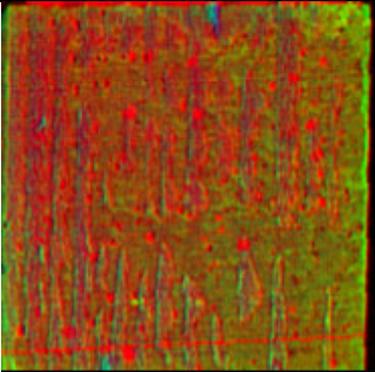
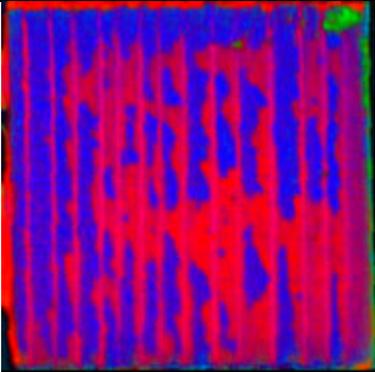
Serie:	006	Prüfkörper:	024	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		08.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.462,50	mm ²	Holzbruch:	0,94	%
Bruchkraft:	16.400	N	Betonbruch:	48,23	%
Scherfestigkeit:	6,66	N/mm ²	Grenzfläche:	50,85	%
			Mehrfach betrachtet:	0,02	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

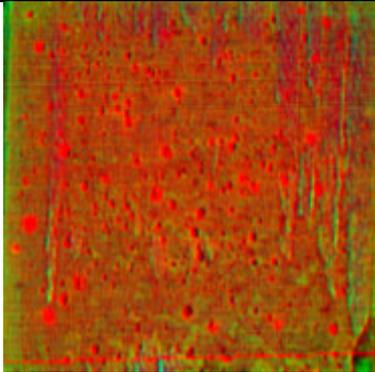
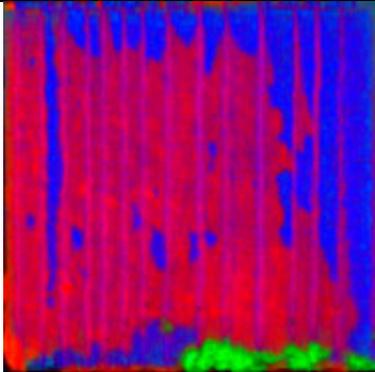
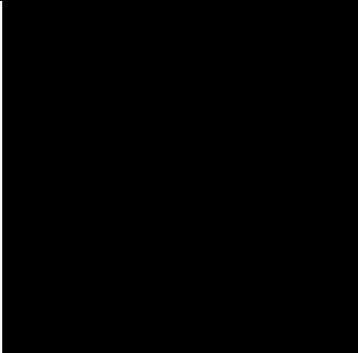
Serie:	007	Prüfkörper:	025	Scherfläche:	A
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.450,00	mm ²	Holzbruch:	0,04	%
Bruchkraft:	5.430	N	Betonbruch:	0,05	%
Scherfestigkeit:	2,22	N/mm ²	Grenzfläche:	99,91	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

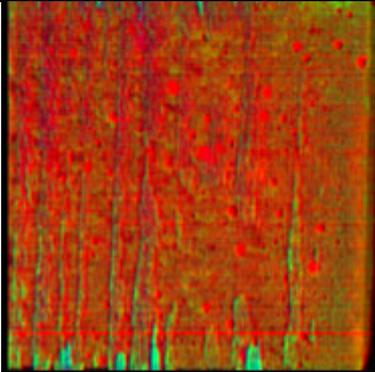
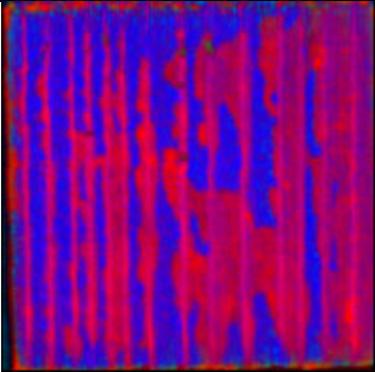
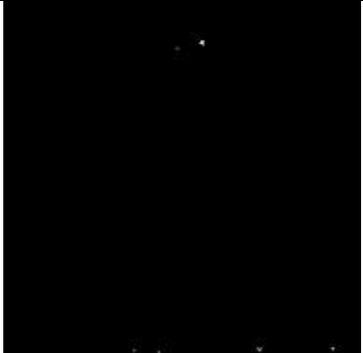
Serie:	007	Prüfkörper:	025	Scherfläche:	B
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.450,00	mm ²	Holzbruch:	0,57	%
Bruchkraft:	5.920	N	Betonbruch:	0,28	%
Scherfestigkeit:	2,42	N/mm ²	Grenzfläche:	99,16	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

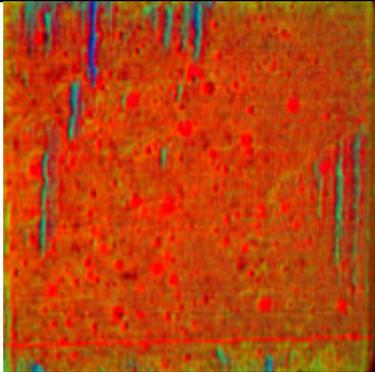
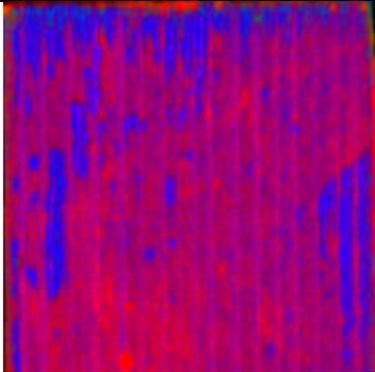
Serie:	007	Prüfkörper:	026	Scherfläche:	A
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.458,00	mm ²	Holzbruch:	0,01	%
Bruchkraft:	8.620	N	Betonbruch:	13,17	%
Scherfestigkeit:	3,51	N/mm ²	Grenzfläche:	86,83	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

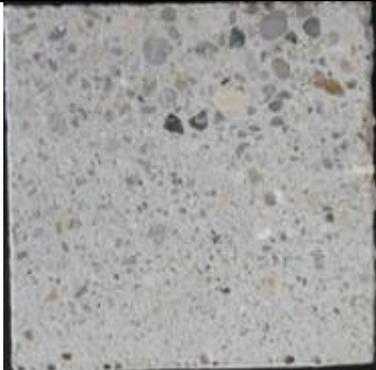
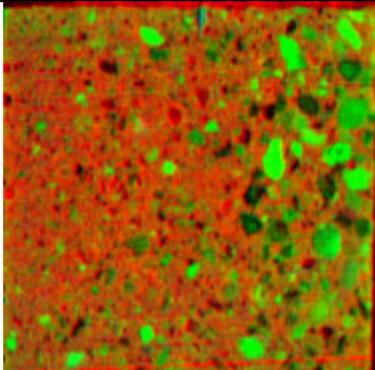
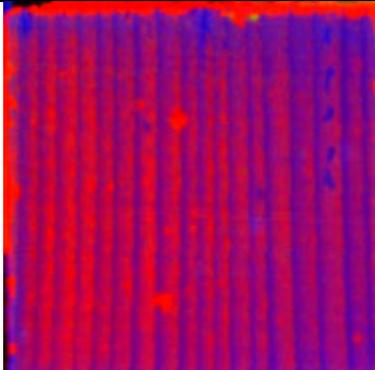
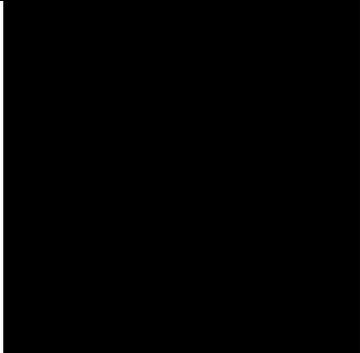
Serie:	007	Prüfkörper:	026	Scherfläche:	B
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.458,00	mm ²	Holzbruch:	7,50	%
Bruchkraft:	12.100	N	Betonbruch:	0,03	%
Scherfestigkeit:	4,92	N/mm ²	Grenzfläche:	92,47	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

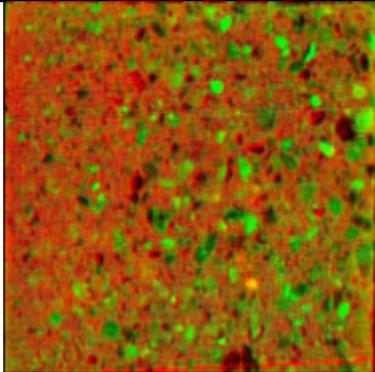
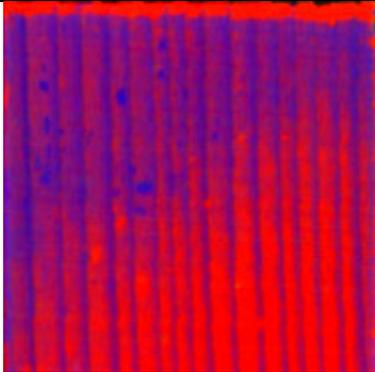
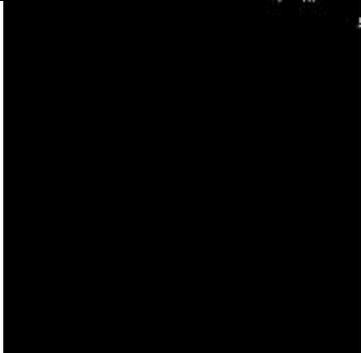
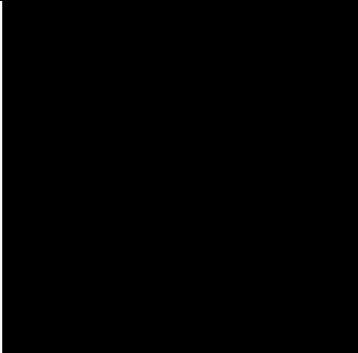
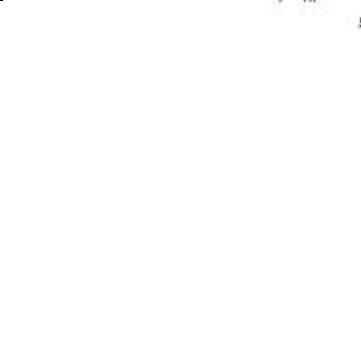
Serie:	007	Prüfkörper:	027	Scherfläche:	A
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.456,00	mm ²	Holzbruch:	0,16	%
Bruchkraft:	8.660	N	Betonbruch:	1,33	%
Scherfestigkeit:	3,53	N/mm ²	Grenzfläche:	98,55	%
			Mehrfach betrachtet:	0,04	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

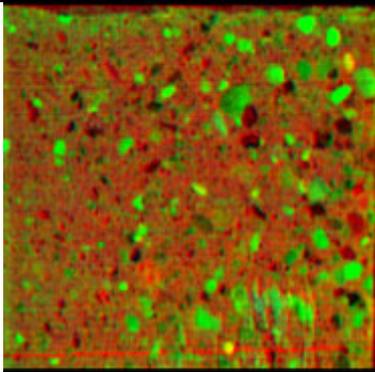
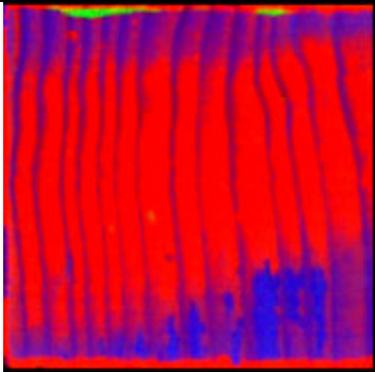
Serie:	007	Prüfkörper:	027	Scherfläche:	B
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.456,00	mm ²	Holzbruch:	0,00	%
Bruchkraft:	6.940	N	Betonbruch:	2,53	%
Scherfestigkeit:	2,83	N/mm ²	Grenzfläche:	97,47	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

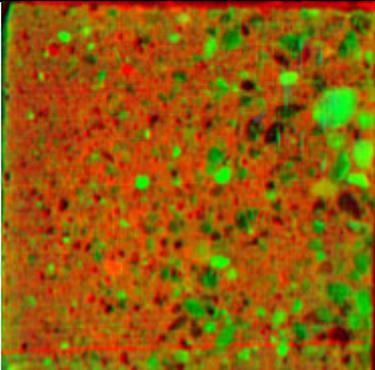
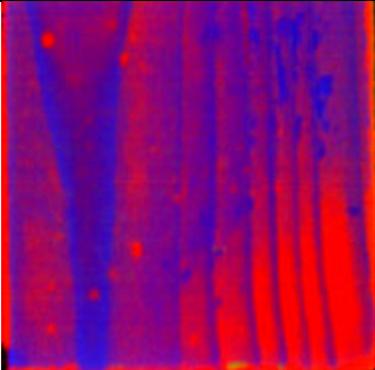
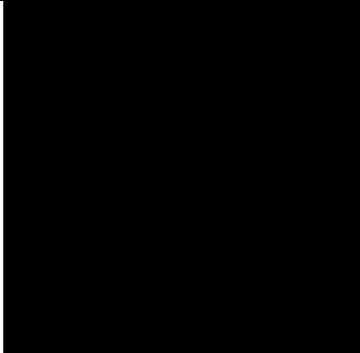
Serie:	007	Prüfkörper:	028	Scherfläche:	A
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.459,00	mm ²	Holzbruch:	0,04	%
Bruchkraft:	7.100	N	Betonbruch:	0,03	%
Scherfestigkeit:	2,89	N/mm ²	Grenzfläche:	99,93	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

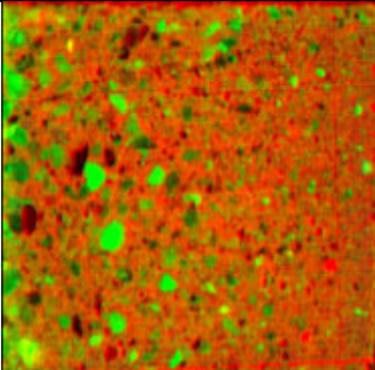
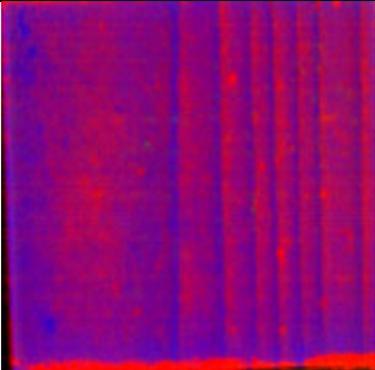
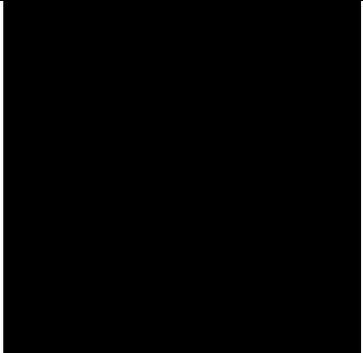
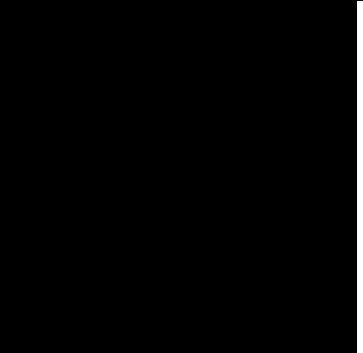
Serie:	007	Prüfkörper:	028	Scherfläche:	B
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.459,00	mm ²	Holzbruch:	0,24	%
Bruchkraft:	11.700	N	Betonbruch:	0,02	%
Scherfestigkeit:	4,76	N/mm ²	Grenzfläche:	99,74	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

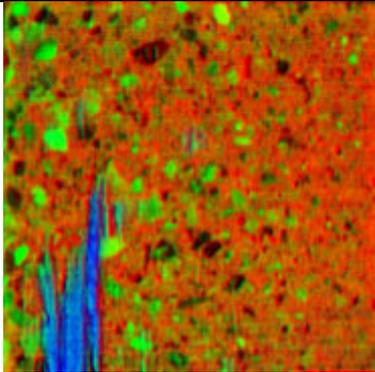
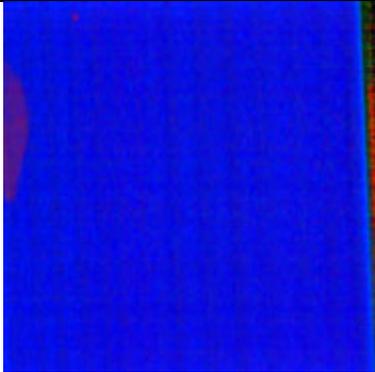
Serie:	008	Prüfkörper:	029	Scherfläche:	A
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung	13.12.2017		
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung	29.01.2018		
Scherfläche:	2.461,00	mm ²	Holzbruch:	0,00	%
Bruchkraft:	3.740	N	Betonbruch:	0,02	%
Scherfestigkeit:	1,52	N/mm ²	Grenzfläche:	99,98	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

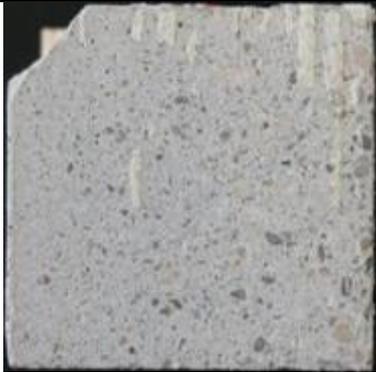
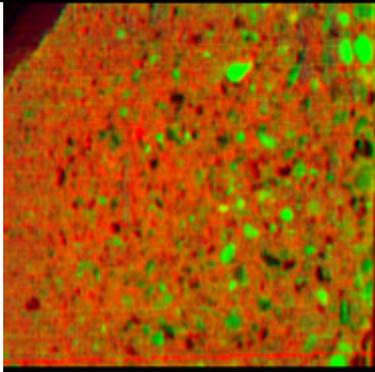
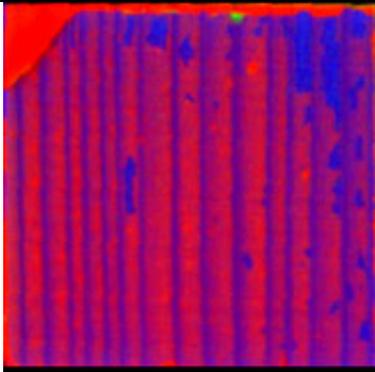
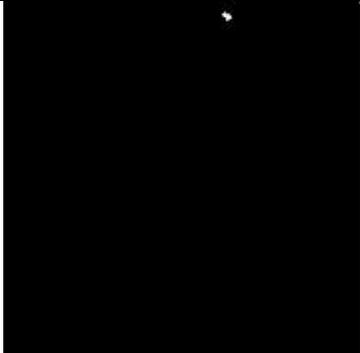
Serie:	008	Prüfkörper:	029	Scherfläche:	B
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.461	mm ²	Holzbruch:	0,00	%
Bruchkraft:	2.960	N	Betonbruch:	0,02	%
Scherfestigkeit:	1,20	N/mm ²	Grenzfläche:	99,98	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

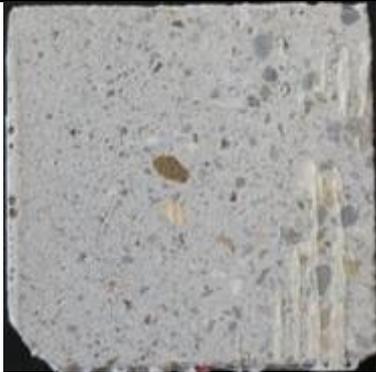
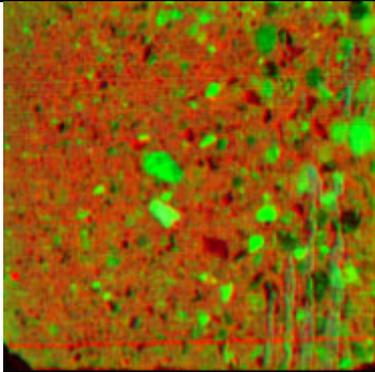
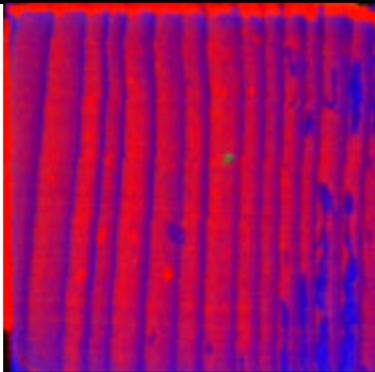
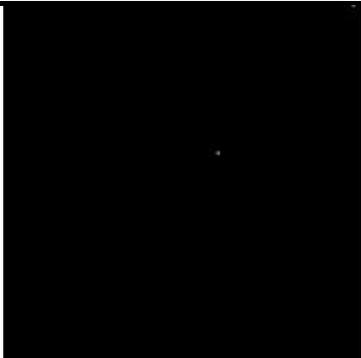
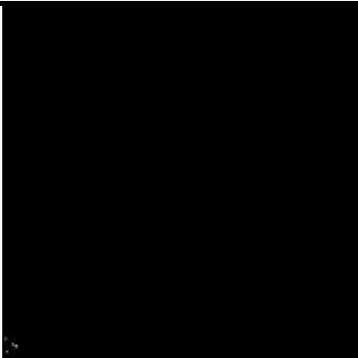
Serie:	008	Prüfkörper:	030	Scherfläche:	A
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.461,50	mm ²	Holzbruch:	0,01	%
Bruchkraft:	3.650	N	Betonbruch:	0,30	%
Scherfestigkeit:	1,48	N/mm ²	Grenzfläche:	99,69	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

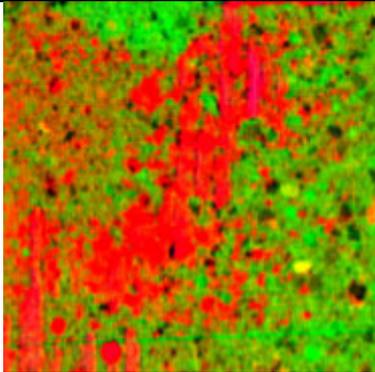
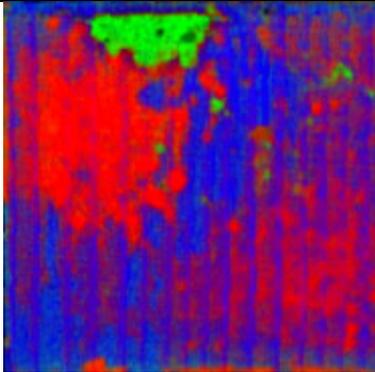
Serie:	008	Prüfkörper:	030	Scherfläche:	B
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.461,50	mm ²	Holzbruch:	0,00	%
Bruchkraft:	7.810	N	Betonbruch:	0,00	%
Scherfestigkeit:	3,17	N/mm ²	Grenzfläche:	100,00	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
<p>Farbbild Betonseite</p>		<p>HSI Betonseite</p>			
					
<p>Farbbild Holzseite</p>		<p>HSI Holzseite</p>			
					
<p>Betonbruch</p>		<p>Holzbruch</p>		<p>Grenzflächenversagen</p>	

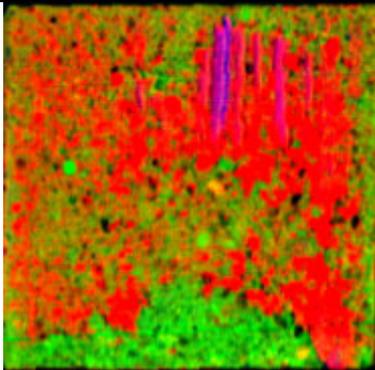
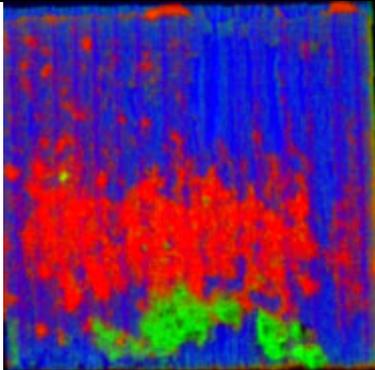
Serie:	008	Prüfkörper:	031	Scherfläche:	A
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.468,00	mm ²	Holzbruch:	0,00	%
Bruchkraft:	6.810	N	Betonbruch:	0,00	%
Scherfestigkeit:	2,76	N/mm ²	Grenzfläche:	100,00	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

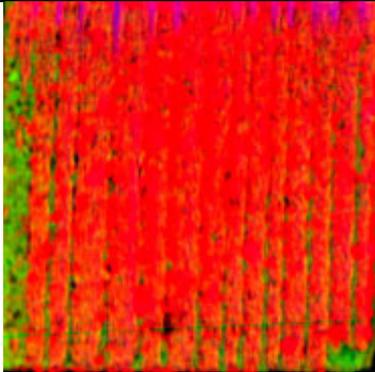
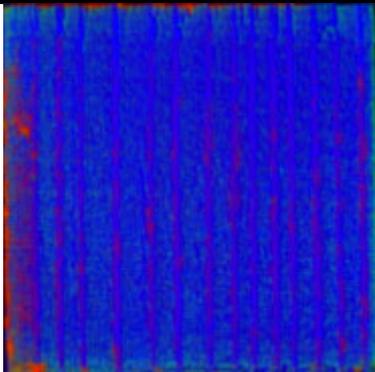
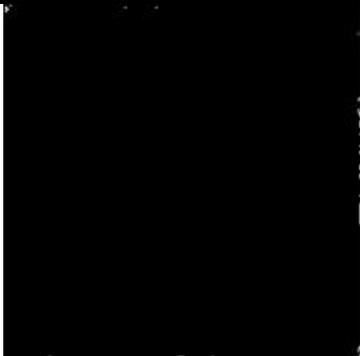
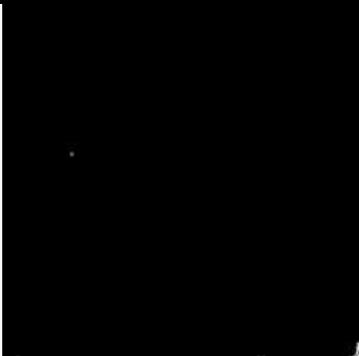
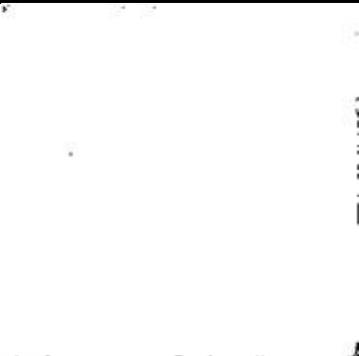
Serie:	008	Prüfkörper:	031	Scherfläche:	B
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung	13.12.2017		
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung	29.01.2018		
Scherfläche:	2.468,00	mm ²	Holzbruch:	2,27	%
Bruchkraft:	7.970	N	Betonbruch:	0,26	%
Scherfestigkeit:	3,23	N/mm ²	Grenzfläche:	97,47	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

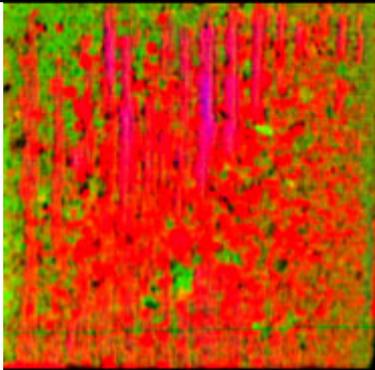
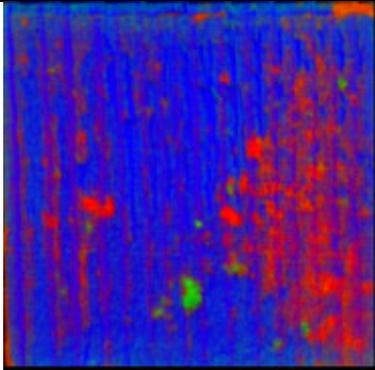
Serie:	008	Prüfkörper:	032	Scherfläche:	A
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	24.59,00	mm ²	Holzbruch:	0,02	%
Bruchkraft:	4.110	N	Betonbruch:	0,04	%
Scherfestigkeit:	1,67	N/mm ²	Grenzfläche:	99,94	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

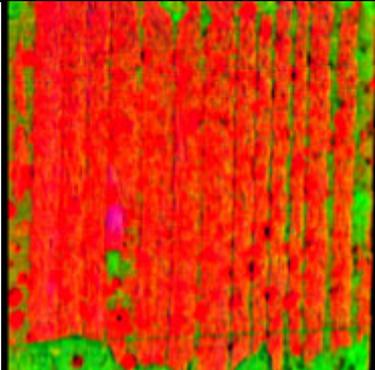
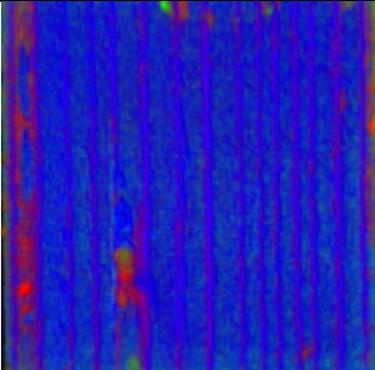
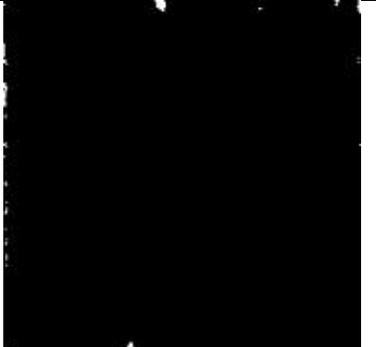
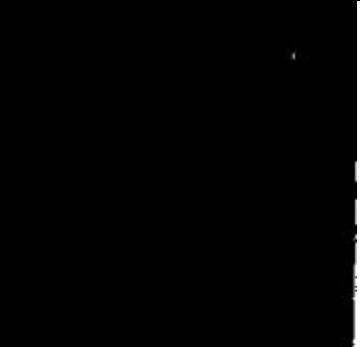
Serie:	008	Prüfkörper:	032	Scherfläche:	B
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.459,00	mm ²	Holzbruch:	0,01	%
Bruchkraft:	6.150	N	Betonbruch:	0,01	%
Scherfestigkeit:	2,50	N/mm ²	Grenzfläche:	99,98	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

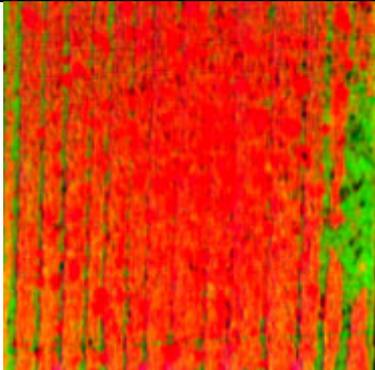
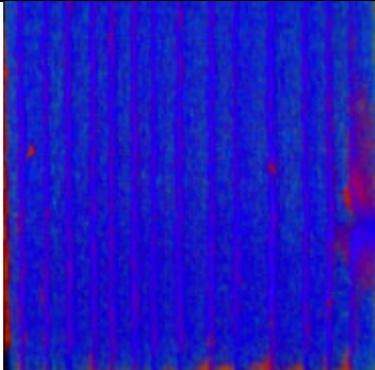
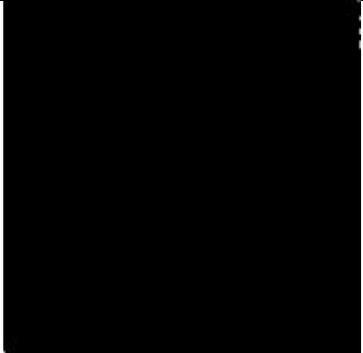
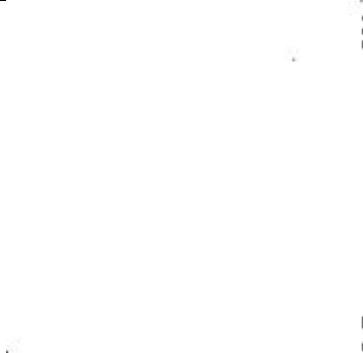
Serie:	009	Prüfkörper:	033	Scherfläche:	A
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.462,50	mm ²	Holzbruch:	0,01	%
Bruchkraft:	12.400	N	Betonbruch:	3,47	%
Scherfestigkeit:	5,04	N/mm ²	Grenzfläche:	96,53	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

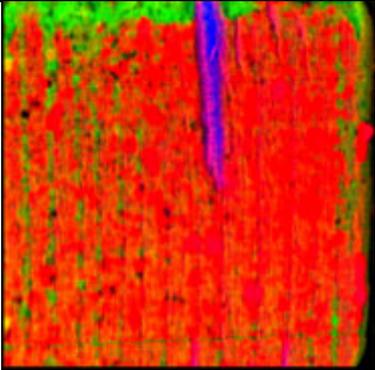
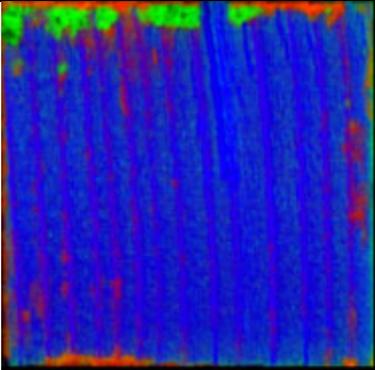
Serie:	009	Prüfkörper:	033	Scherfläche:	B
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.462,50	mm ²	Holzbruch:	0,38	%
Bruchkraft:	16.700	N	Betonbruch:	5,06	%
Scherfestigkeit:	6,78	N/mm ²	Grenzfläche:	94,56	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

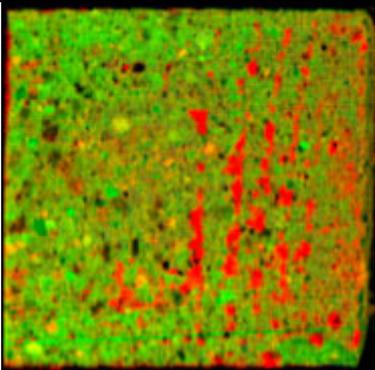
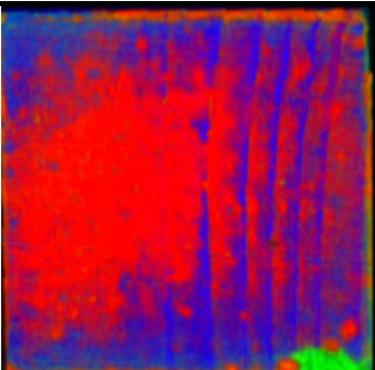
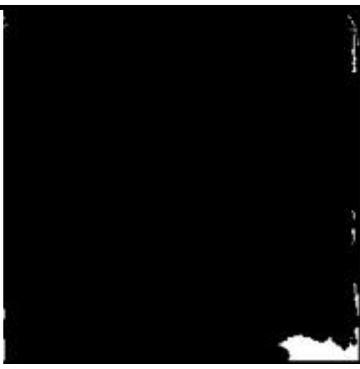
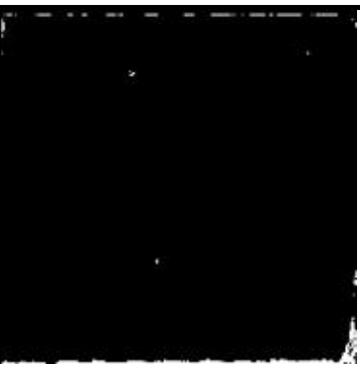
Serie:	009	Prüfkörper:	034	Scherfläche:	A
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.459,00	mm ²	Holzbruch:	0,06	%
Bruchkraft:	12.800	N	Betonbruch:	0,12	%
Scherfestigkeit:	5,21	N/mm ²	Grenzfläche:	99,84	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

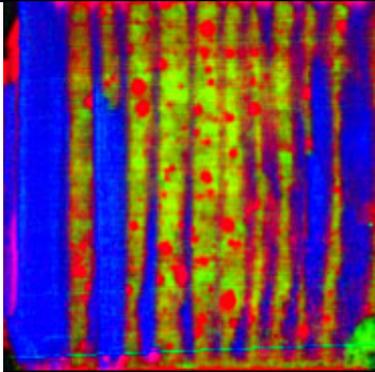
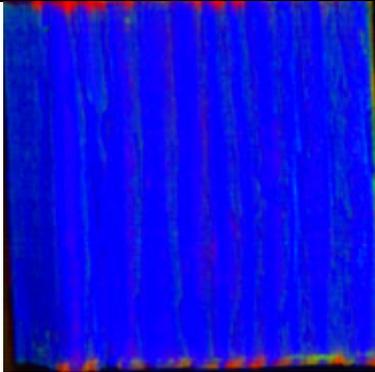
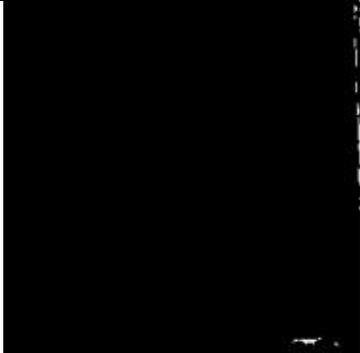
Serie:	009	Prüfkörper:	034	Scherfläche:	B
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.459,00	mm ²	Holzbruch:	0,05	%
Bruchkraft:	10.700	N	Betonbruch:	0,44	%
Scherfestigkeit:	4,35	N/mm ²	Grenzfläche:	99,51	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

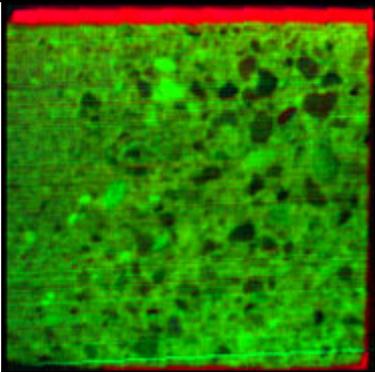
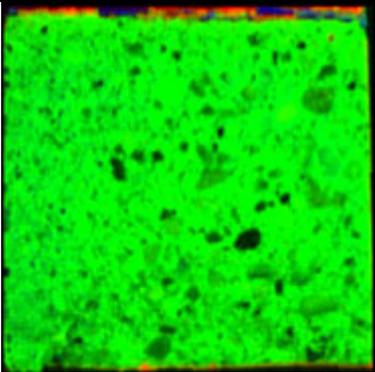
Serie:	009	Prüfkörper:	035	Scherfläche:	A
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.458,00	mm ²	Holzbruch:	0,29	%
Bruchkraft:	14.300	N	Betonbruch:	0,32	%
Scherfestigkeit:	5,82	N/mm ²	Grenzfläche:	99,39	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

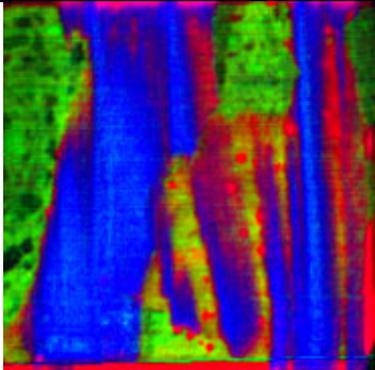
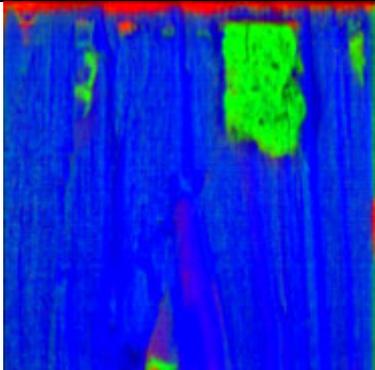
Serie:	009	Prüfkörper:	035	Scherfläche:	B
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.458,00	mm ²	Holzbruch:	0,02	%
Bruchkraft:	11.400	N	Betonbruch:	0,03	%
Scherfestigkeit:	4,64	N/mm ²	Grenzfläche:	99,95	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

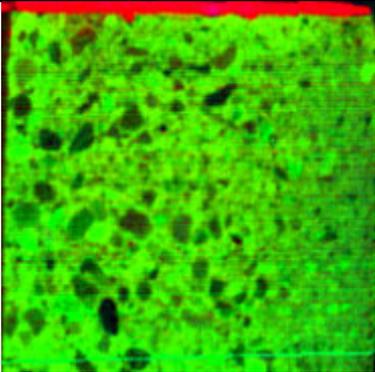
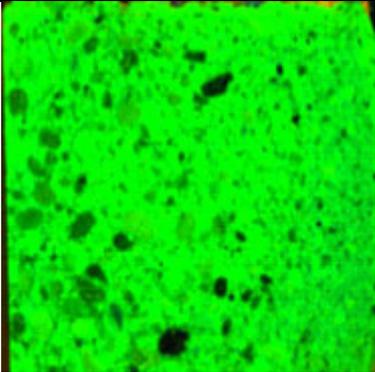
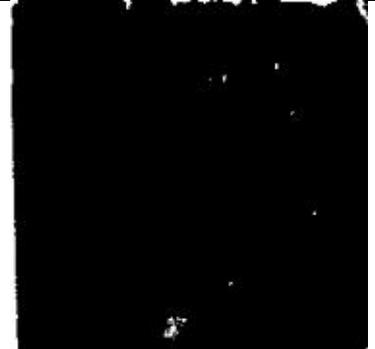
Serie:	009	Prüfkörper:	036	Scherfläche:	A
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.459,00	mm ²	Holzbruch:	0,96	%
Bruchkraft:	13.500	N	Betonbruch:	3,28	%
Scherfestigkeit:	5,49	N/mm ²	Grenzfläche:	95,79	%
			Mehrfach betrachtet:	0,02	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

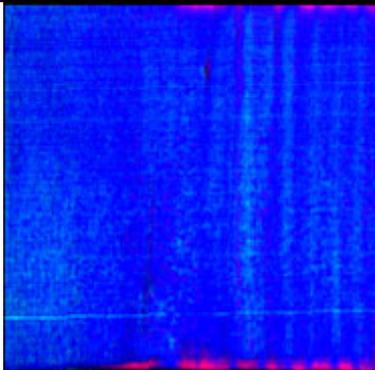
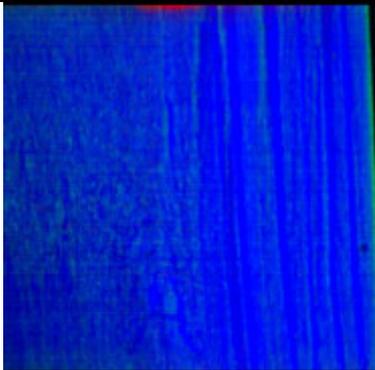
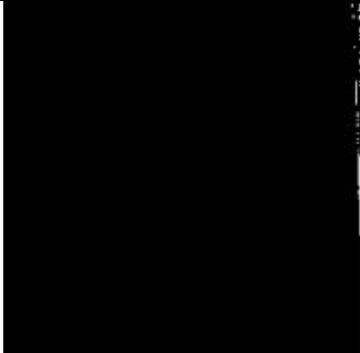
Serie:	009	Prüfkörper:	036	Scherfläche:	B
Klebstoff:	MUF	Datum der Verklebung		13.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.459,00	mm ²	Holzbruch:	1,29	%
Bruchkraft:	4.320	N	Betonbruch:	1,34	%
Scherfestigkeit:	1,76	N/mm ²	Grenzfläche:	97,54	%
			Mehrfach betrachtet:	0,16	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

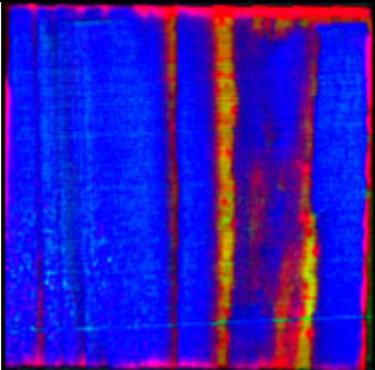
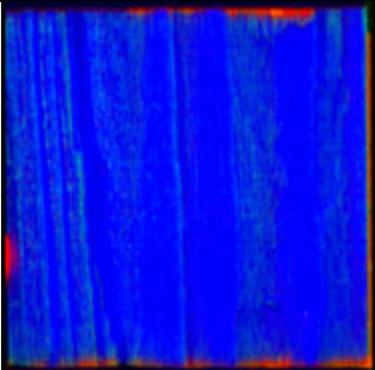
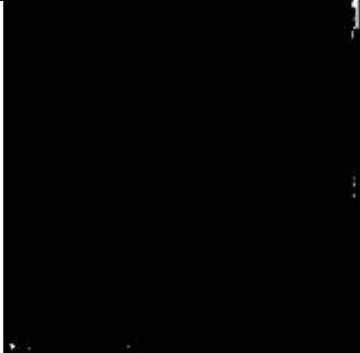
Serie:	010	Prüfkörper:	037	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.453,50	mm ²	Holzbruch:	33,08	%
Bruchkraft:	20.300	N	Betonbruch:	0,26	%
Scherfestigkeit:	8,27	N/mm ²	Grenzfläche:	66,68	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

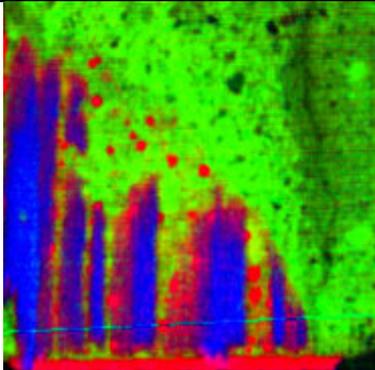
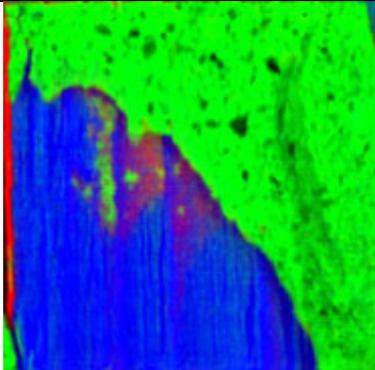
Serie:	010	Prüfkörper:	037	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.453,50	mm ²	Holzbruch:	0,04	%
Bruchkraft:	19.900	N	Betonbruch:	92,75	%
Scherfestigkeit:	8,11	N/mm ²	Grenzfläche:	7,24	%
			Mehrfach betrachtet:	0,03	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

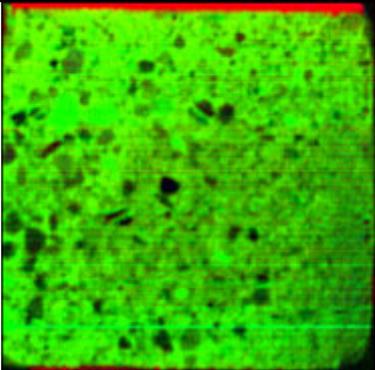
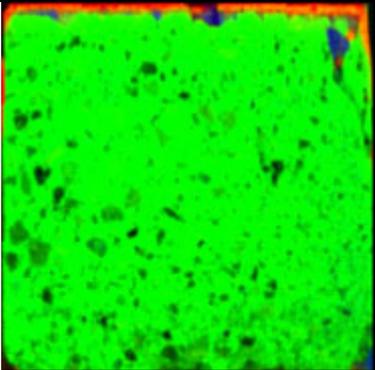
Serie:	010	Prüfkörper:	038	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.458,50	mm ²	Holzbruch:	41,33	%
Bruchkraft:	23.400	N	Betonbruch:	7,90	%
Scherfestigkeit:	9,52	N/mm ²	Grenzfläche:	51,12	%
			Mehrfach betrachtet:	0,34	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

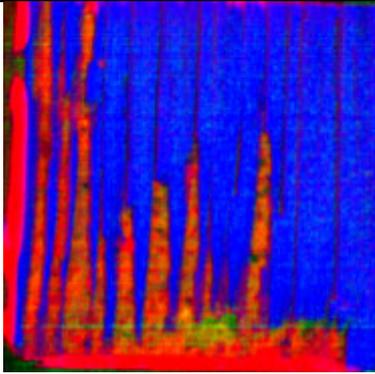
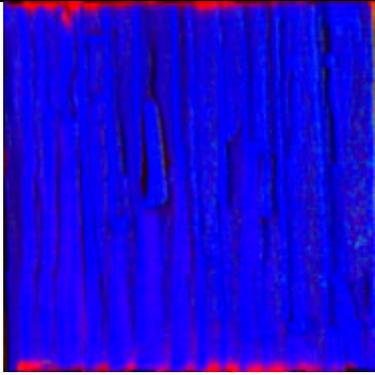
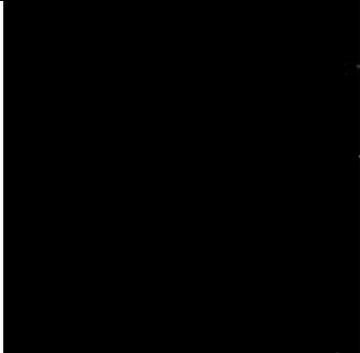
Serie:	010	Prüfkörper:	038	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.458,50	mm ²	Holzbruch:	0,05	%
Bruchkraft:	20.300	N	Betonbruch:	98,41	%
Scherfestigkeit:	8,26	N/mm ²	Grenzfläche:	1,58	%
			Mehrfach betrachtet:	0,03	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

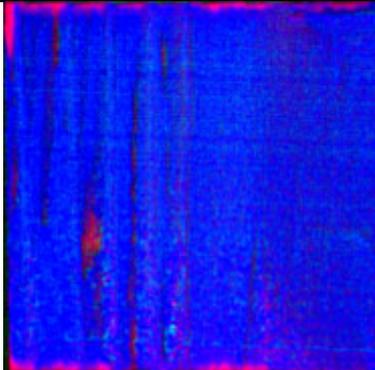
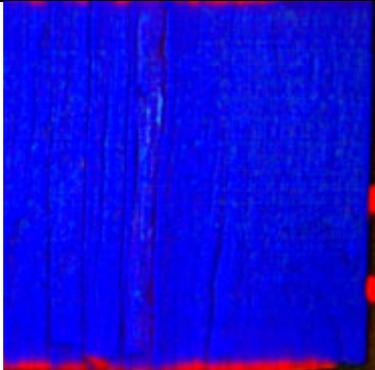
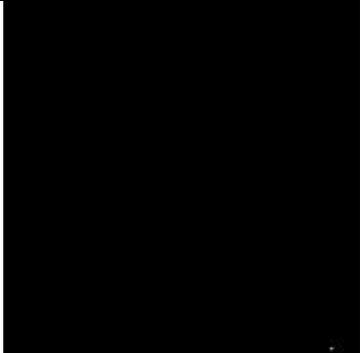
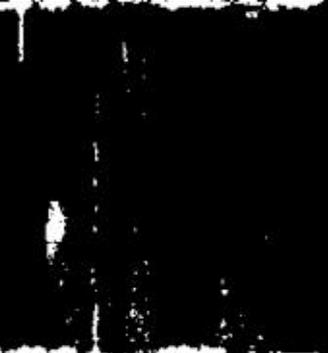
Serie:	010	Prüfkörper:	039	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.461,50	mm ²	Holzbruch:	96,08	%
Bruchkraft:	19.500	N	Betonbruch:	0,23	%
Scherfestigkeit:	7,92	N/mm ²	Grenzfläche:	3,91	%
			Mehrfach betrachtet:	0,22	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

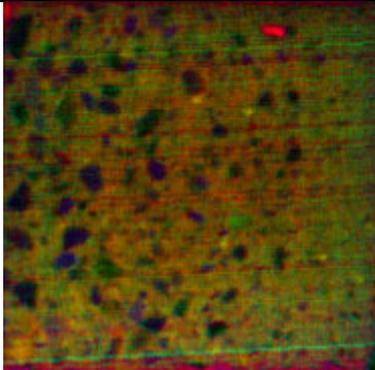
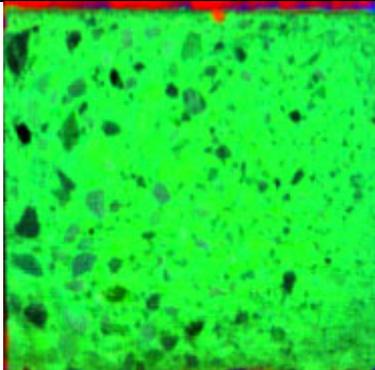
Serie:	010	Prüfkörper:	039	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.461,50	mm ²	Holzbruch:	72,13	%
Bruchkraft:	20.200	N	Betonbruch:	0,12	%
Scherfestigkeit:	8,21	N/mm ²	Grenzfläche:	27,76	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch	Holzbruch	Grenzflächenversagen			

Serie:	010	Prüfkörper:	040	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.458,00	mm ²	Holzbruch:	14,90	%
Bruchkraft:	20.100	N	Betonbruch:	53,79	%
Scherfestigkeit:	8,18	N/mm ²	Grenzfläche:	31,47	%
			Mehrfach betrachtet:	0,17	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

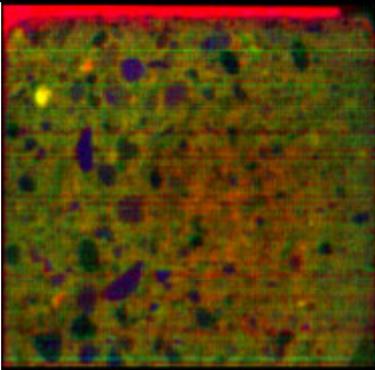
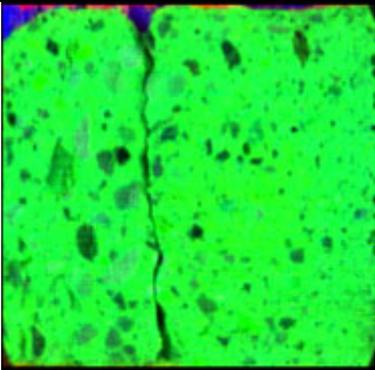
Serie:	010	Prüfkörper:	040	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.458,00	mm ²	Holzbruch:	0,09	%
Bruchkraft:	19.600	N	Betonbruch:	93,19	%
Scherfestigkeit:	7,97	N/mm ²	Grenzfläche:	6,80	%
			Mehrfach betrachtet:	0,09	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

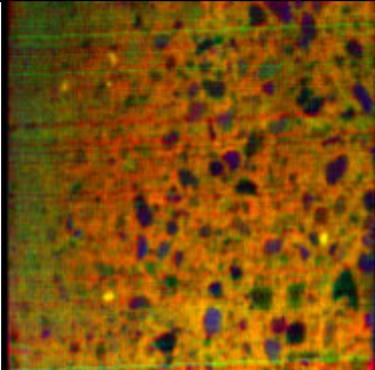
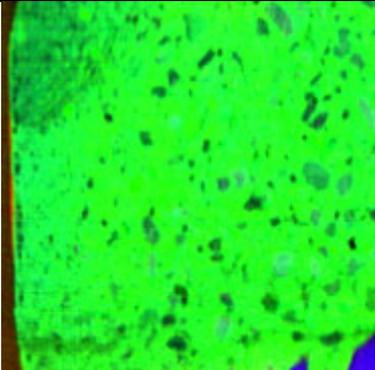
Serie:	011	Prüfkörper:	041	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.463,00	mm ²	Holzbruch:	61,20	%
Bruchkraft:	20.400	N	Betonbruch:	0,01	%
Scherfestigkeit:	8,28	N/mm ²	Grenzfläche:	38,80	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

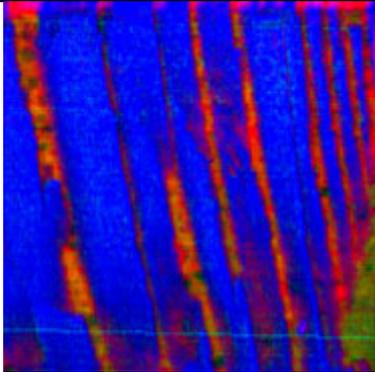
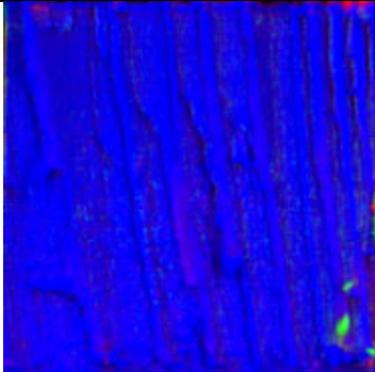
Serie:	011	Prüfkörper:	041	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung	01.02.2018		
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung	15.02.2018		
Scherfläche:	2.463,00	mm ²	Holzbruch:	94,84	%
Bruchkraft:	20.500	N	Betonbruch:	0,00	%
Scherfestigkeit:	8,32	N/mm ²	Grenzfläche:	5,16	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

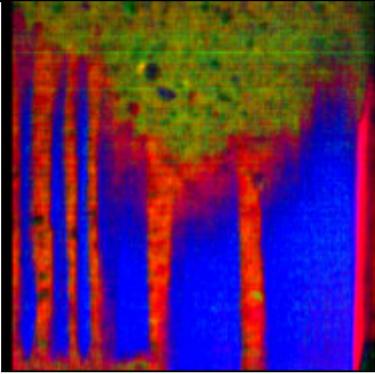
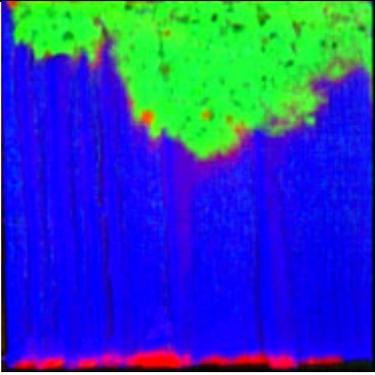
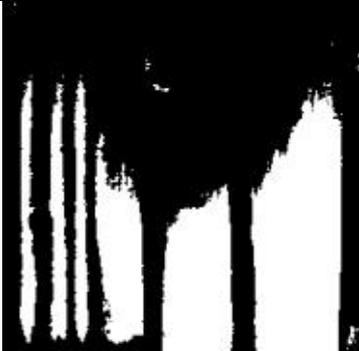
Serie:	011	Prüfkörper:	042	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.466,50	mm ²	Holzbruch:	0,85	%
Bruchkraft:	21.500	N	Betonbruch:	96,57	%
Scherfestigkeit:	8,72	N/mm ²	Grenzfläche:	3,42	%
			Mehrfach betrachtet:	0,83	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Serie:	011	Prüfkörper:	042	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung	01.02.2018		
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung	15.02.2018		
Scherfläche:	2.466,50	mm ²	Holzbruch:	0,92	%
Bruchkraft:	21.900	N	Betonbruch:	95,06	%
Scherfestigkeit:	8,88	N/mm ²	Grenzfläche:	4,93	%
			Mehrfach betrachtet:	0,91	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%

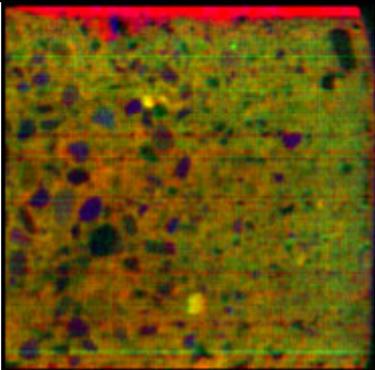
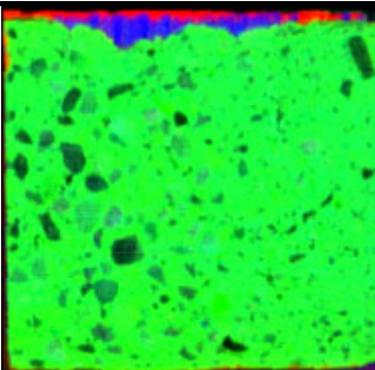
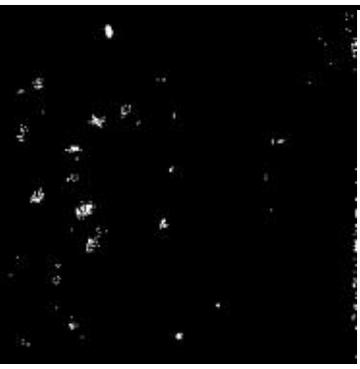
		
Farbbild Betonseite	HSI Betonseite	
		
Farbbild Holzseite	HSI Holzseite	
		
Betonbruch	Holzbruch	Grenzflächenversagen

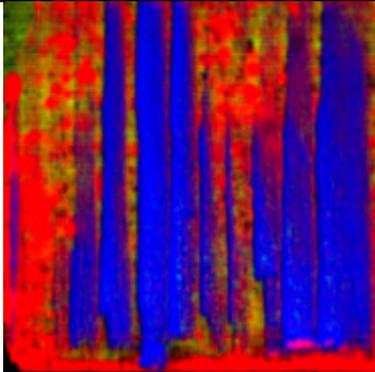
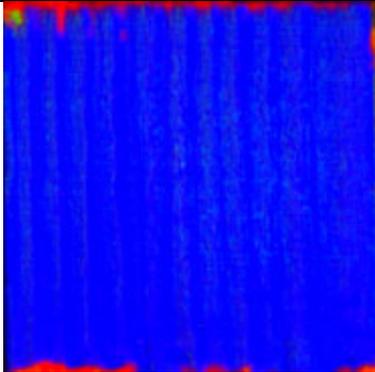
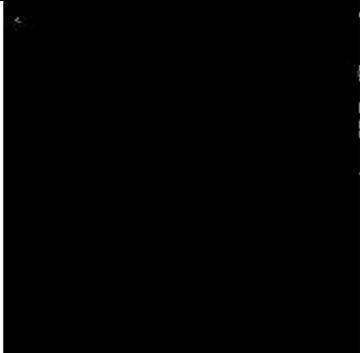
Serie:	011	Prüfkörper:	043	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.459,00	mm ²	Holzbruch:	0,65	%
Bruchkraft:	19.700	N	Betonbruch:	96,25	%
Scherfestigkeit:	8,01	N/mm ²	Grenzfläche:	3,74	%
			Mehrfach betrachtet:	0,64	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Serie:	011	Prüfkörper:	043	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.459,00	mm ²	Holzbruch:	68,31	%
Bruchkraft:	24.300	N	Betonbruch:	0,22	%
Scherfestigkeit:	9,88	N/mm ²	Grenzfläche:	31,47	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

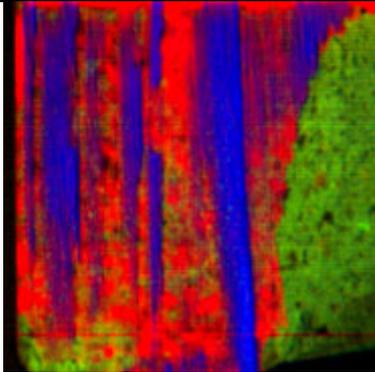
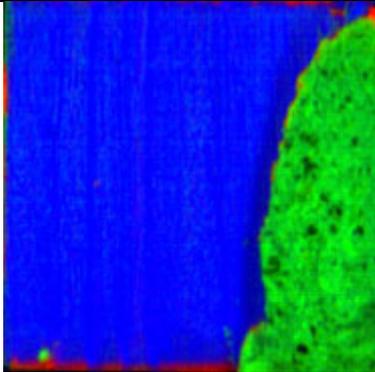
Serie:	011	Prüfkörper:	044	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.461,00	mm ²	Holzbruch:	34,86	%
Bruchkraft:	19.100	N	Betonbruch:	24,66	%
Scherfestigkeit:	7,76	N/mm ²	Grenzfläche:	40,57	%
			Mehrfach betrachtet:	0,08	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Serie:	011	Prüfkörper:	044	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.461,00	mm ²	Holzbruch:	0,73	%
Bruchkraft:	23.800	N	Betonbruch:	90,61	%
Scherfestigkeit:	9,67	N/mm ²	Grenzfläche:	9,33	%
			Mehrfach betrachtet:	0,66	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%

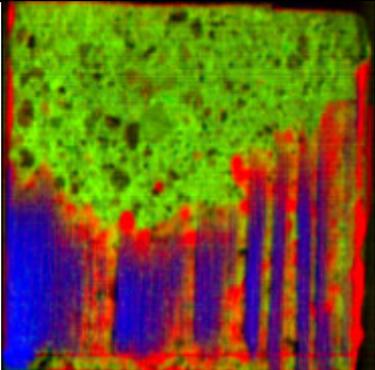
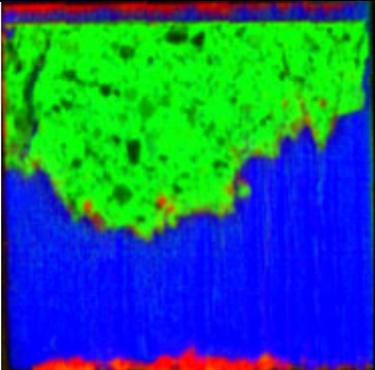
		
Farbbild Betonseite	HSI Betonseite	
		
Farbbild Holzseite	HSI Holzseite	
		
Betonbruch	Holzbruch	Grenzflächenversagen

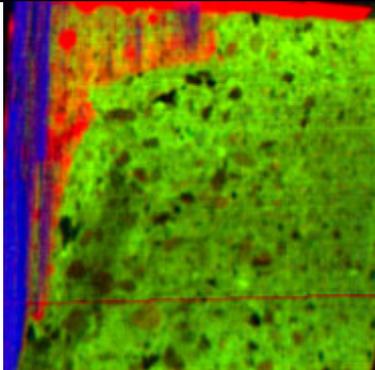
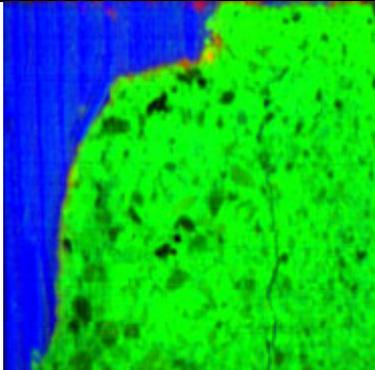
Serie:	012	Prüfkörper:	045	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.456,00	mm ²	Holzbruch:	39,52	%
Bruchkraft:	21.900	N	Betonbruch:	0,06	%
Scherfestigkeit:	8,92	N/mm ²	Grenzfläche:	60,43	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

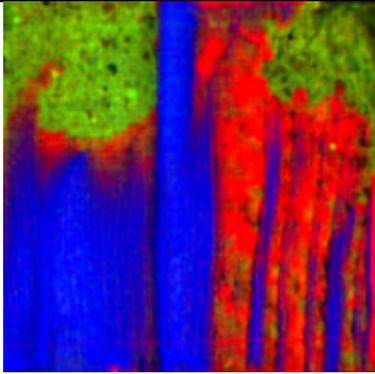
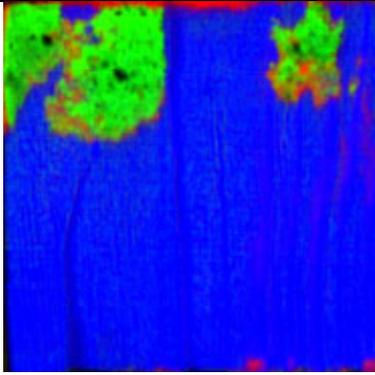
Serie:	012	Prüfkörper:	045	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.456,00	mm ²	Holzbruch:	14,47	%
Bruchkraft:	18.600	N	Betonbruch:	25,25	%
Scherfestigkeit:	7,57	N/mm ²	Grenzfläche:	61,52	%
			Mehrfach betrachtet:	1,23	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%

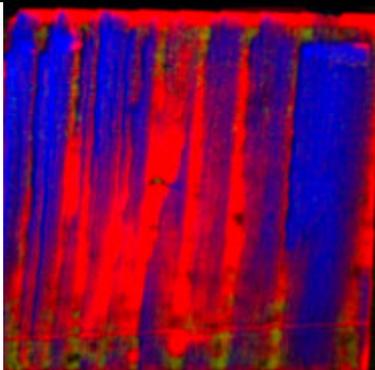
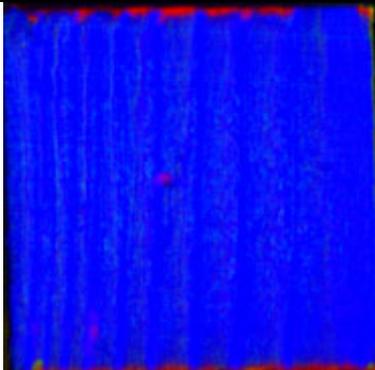
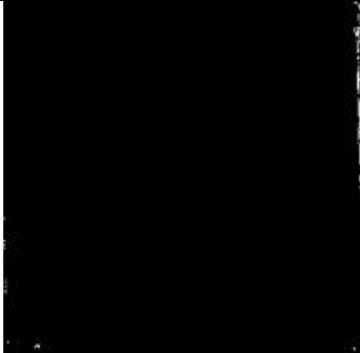
		
Farbbild Betonseite	HSI Betonseite	
		
Farbbild Holzseite	HSI Holzseite	
		
Betonbruch	Holzbruch	Grenzflächenversagen

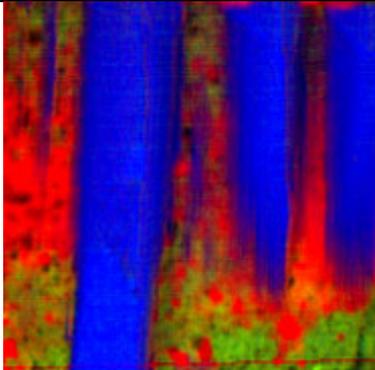
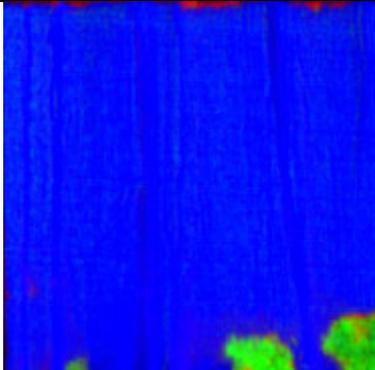
Serie:	012	Prüfkörper:	046	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.458,00	mm ²	Holzbruch:	10,39	%
Bruchkraft:	21.100	N	Betonbruch:	41,34	%
Scherfestigkeit:	8,58	N/mm ²	Grenzfläche:	48,28	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%

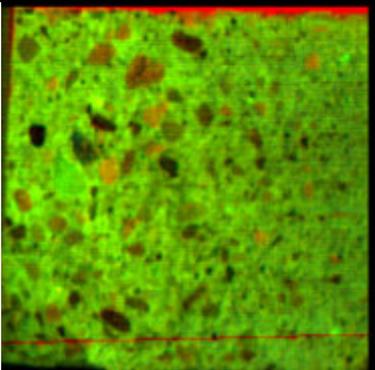
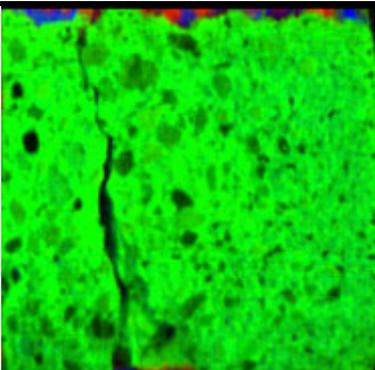
		
Farbbild Betonseite	HSI Betonseite	
		
Farbbild Holzseite	HSI Holzseite	
		
Betonbruch	Holzbruch	Grenzflächenversagen

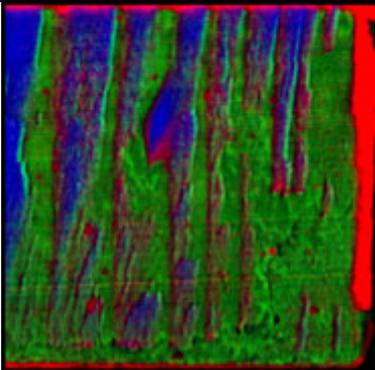
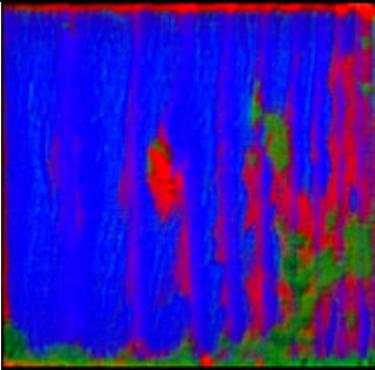
Serie:	012	Prüfkörper:	046	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.458,00	mm ²	Holzbruch:	6,55	%
Bruchkraft:	22.400	N	Betonbruch:	74,62	%
Scherfestigkeit:	9,11	N/mm ²	Grenzfläche:	18,83	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

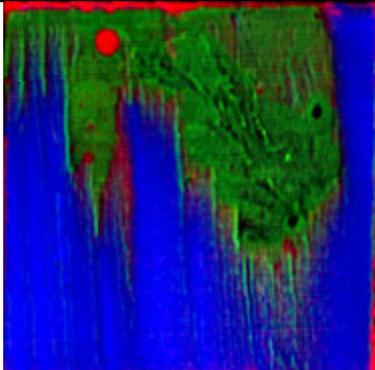
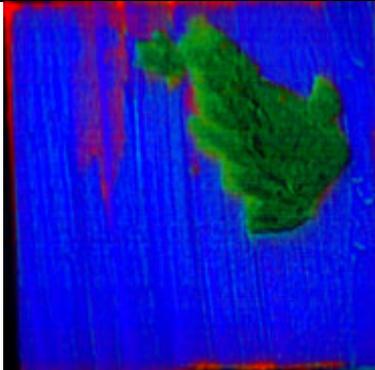
Serie:	012	Prüfkörper:	047	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.461,00	mm ²	Holzbruch:	36,35	%
Bruchkraft:	21.600	N	Betonbruch:	12,39	%
Scherfestigkeit:	8,78	N/mm ²	Grenzfläche:	51,64	%
			Mehrfach betrachtet:	0,39	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

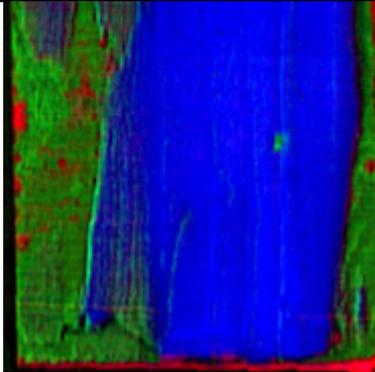
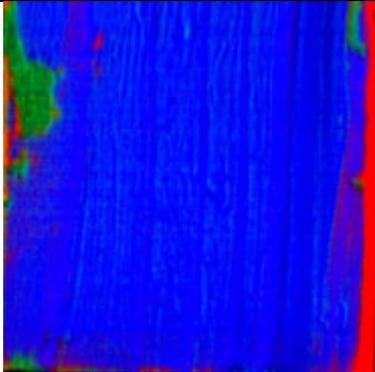
Serie:	012	Prüfkörper:	047	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.461,00	mm ²	Holzbruch:	25,03	%
Bruchkraft:	19.000	N	Betonbruch:	0,26	%
Scherfestigkeit:	7,72	N/mm ²	Grenzfläche:	74,71	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

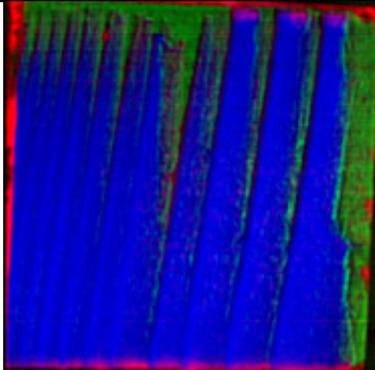
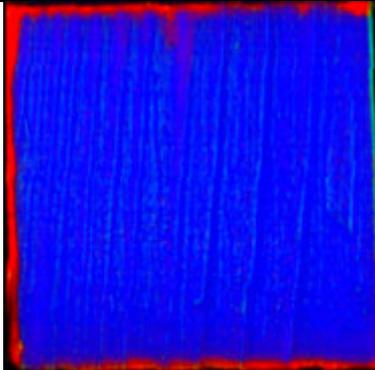
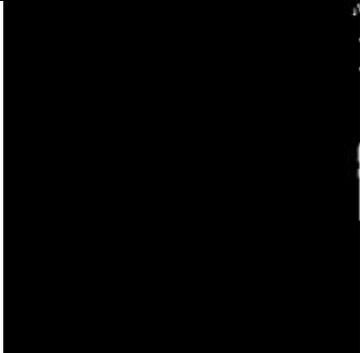
Serie:	012	Prüfkörper:	048	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.462,00	mm ²	Holzbruch:	45,08	%
Bruchkraft:	16.500	N	Betonbruch:	2,86	%
Scherfestigkeit:	6,70	N/mm ²	Grenzfläche:	52,14	%
			Mehrfach betrachtet:	0,08	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

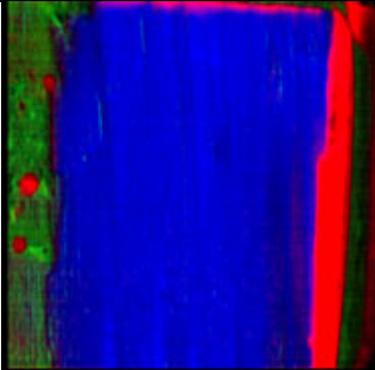
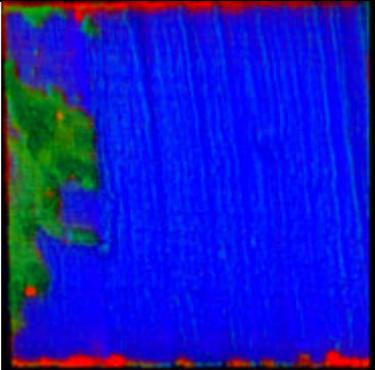
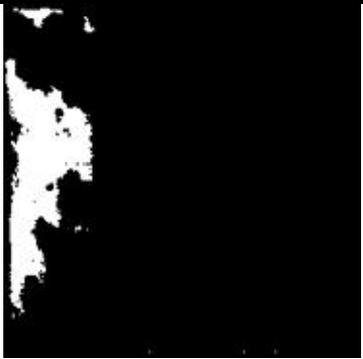
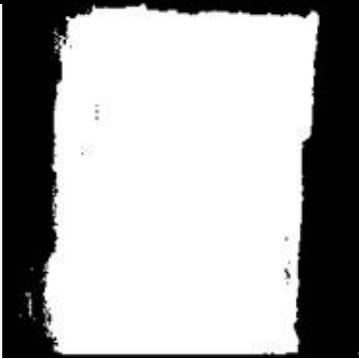
Serie:	012	Prüfkörper:	048	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		01.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.462,00	mm ²	Holzbruch:	0,17	%
Bruchkraft:	23.100	N	Betonbruch:	95,95	%
Scherfestigkeit:	9,38	N/mm ²	Grenzfläche:	4,05	%
			Mehrfach betrachtet:	0,17	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

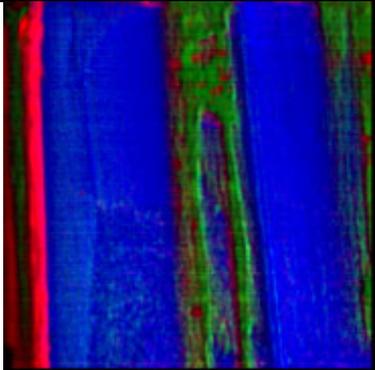
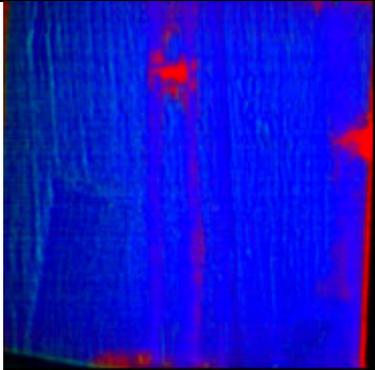
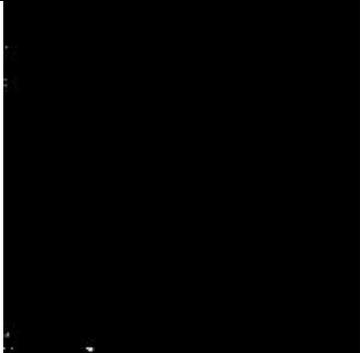
Serie:	013	Prüfkörper:	049	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.458,50	mm ²	Holzbruch:	12,13	%
Bruchkraft:	20.700	N	Betonbruch:	5,36	%
Scherfestigkeit:	8,42	N/mm ²	Grenzfläche:	82,53	%
			Mehrfach betrachtet:	0,02	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

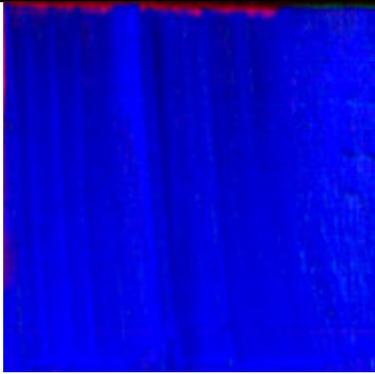
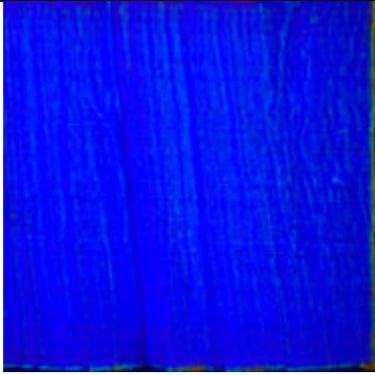
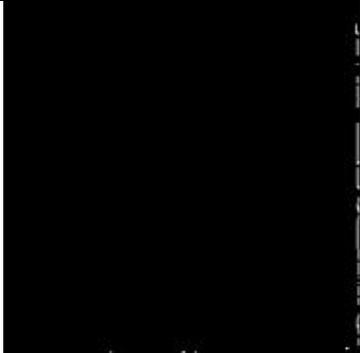
Serie:	013	Prüfkörper:	049	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.458,50	mm ²	Holzbruch:	53,04	%
Bruchkraft:	16.700	N	Betonbruch:	14,74	%
Scherfestigkeit:	6,79	N/mm ²	Grenzfläche:	32,35	%
			Mehrfach betrachtet:	0,13	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

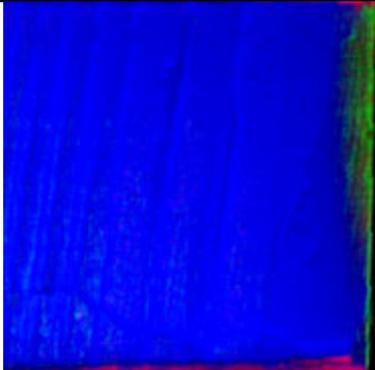
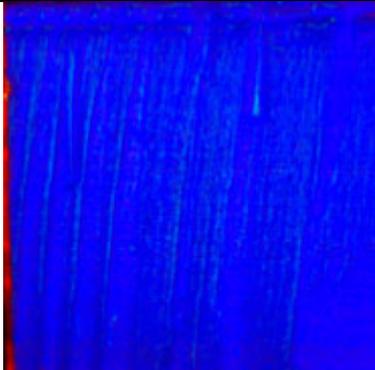
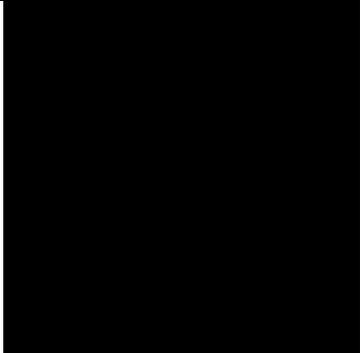
Serie:	013	Prüfkörper:	050	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.455,00	mm ²	Holzbruch:	60,10	%
Bruchkraft:	21.700	N	Betonbruch:	2,53	%
Scherfestigkeit:	8,84	N/mm ²	Grenzfläche:	37,48	%
			Mehrfach betrachtet:	0,11	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

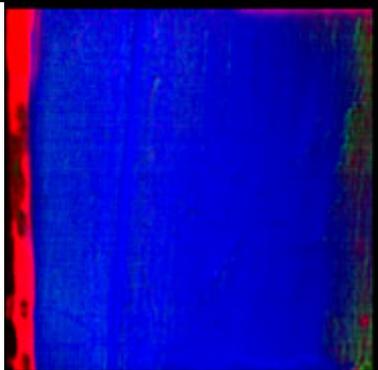
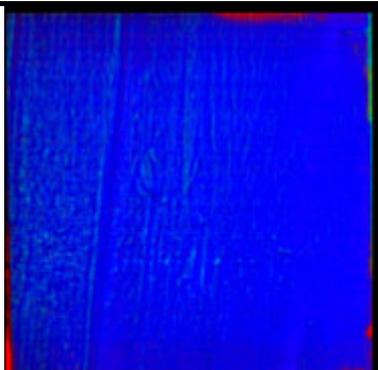
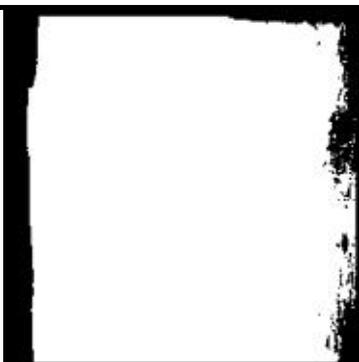
Serie:	013	Prüfkörper:	050	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	24.55,00	mm ²	Holzbruch:	71,38	%
Bruchkraft:	14.100	N	Betonbruch:	0,13	%
Scherfestigkeit:	5,74	N/mm ²	Grenzfläche:	28,48	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

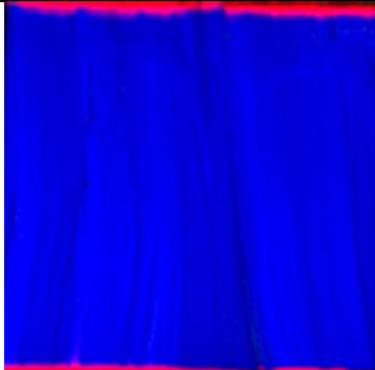
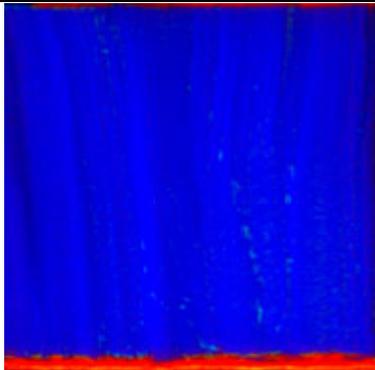
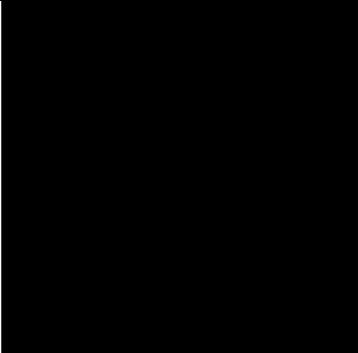
Serie:	013	Prüfkörper:	051	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.458,00	mm ²	Holzbruch:	67,50	%
Bruchkraft:	20.200	N	Betonbruch:	8,30	%
Scherfestigkeit:	8,22	N/mm ²	Grenzfläche:	26,18	%
			Mehrfach betrachtet:	1,98	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

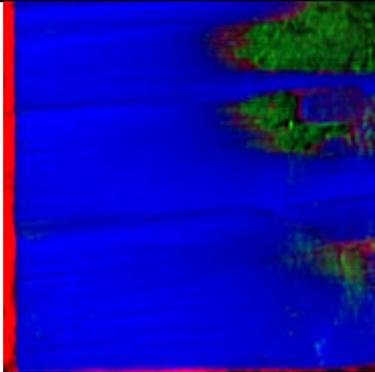
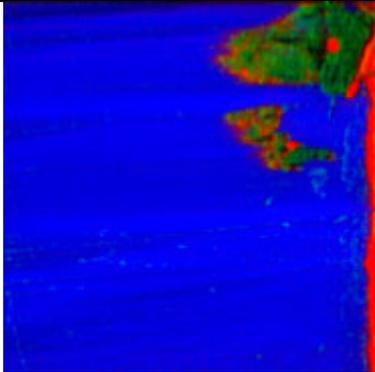
Serie:	013	Prüfkörper:	051	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	06.12.2017		
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung	13.12.2017		
Scherfläche:	2.458,00	mm ²	Holzbruch:	64,27	%
Bruchkraft:	20.600	N	Betonbruch:	0,03	%
Scherfestigkeit:	8,38	N/mm ²	Grenzfläche:	35,71	%
			Mehrfach betrachtet:	0,02	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

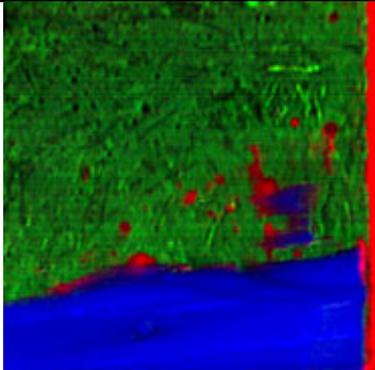
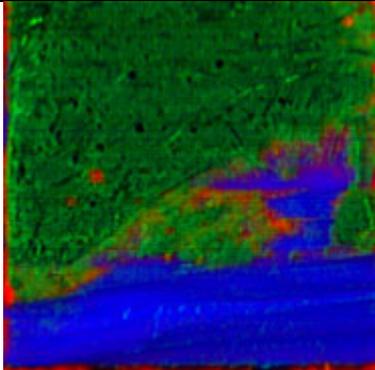
Serie:	013	Prüfkörper:	052	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.450,50	mm ²	Holzbruch:	97,55	%
Bruchkraft:	22.100	N	Betonbruch:	0,30	%
Scherfestigkeit:	9,02	N/mm ²	Grenzfläche:	2,45	%
			Mehrfach betrachtet:	0,30	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

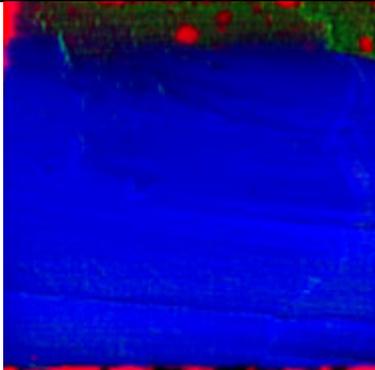
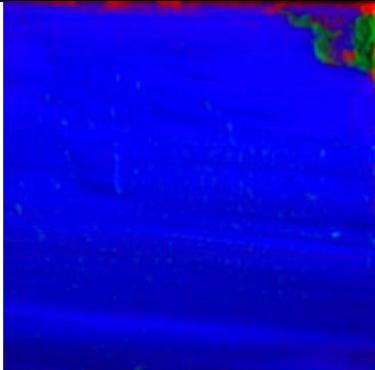
Serie:	013	Prüfkörper:	052	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	06.12.2017		
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung	13.12.2017		
Scherfläche:	2.450,50	mm ²	Holzbruch:	93,23	%
Bruchkraft:	22.300	N	Betonbruch:	0,00	%
Scherfestigkeit:	9,10	N/mm ²	Grenzfläche:	6,77	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
 <p>Farbbild Betonseite</p>		 <p>HSI Betonseite</p>			
 <p>Farbbild Holzseite</p>		 <p>HSI Holzseite</p>			
 <p>Betonbruch</p>		 <p>Holzbruch</p>		 <p>Grenzflächenversagen</p>	

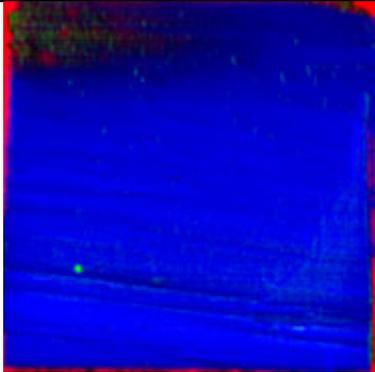
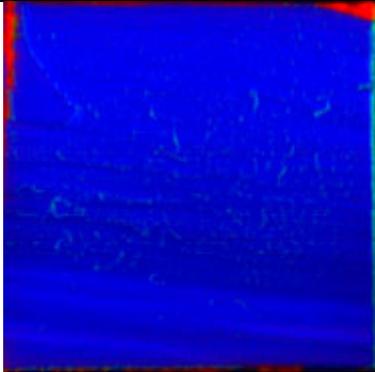
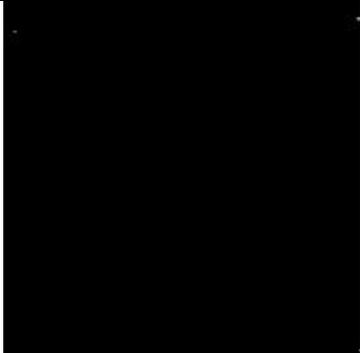
Serie:	014	Prüfkörper:	053	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.455,00	mm ²	Holzbruch:	84,21	%
Bruchkraft:	14.400	N	Betonbruch:	0,10	%
Scherfestigkeit:	5,87	N/mm ²	Grenzfläche:	15,69	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

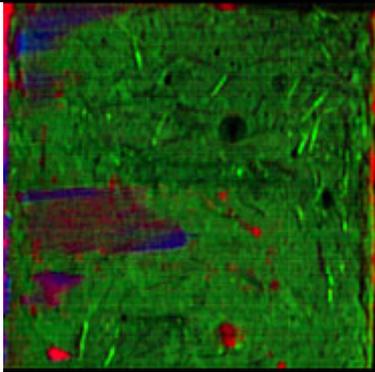
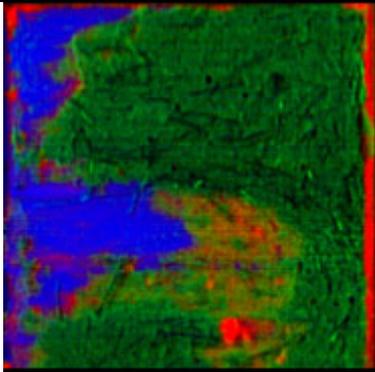
Serie:	014	Prüfkörper:	053	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	06.12.2017		
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung	13.12.2017		
Scherfläche:	2.455,00	mm ²	Holzbruch:	94,73	%
Bruchkraft:	20.800	N	Betonbruch:	0,00	%
Scherfestigkeit:	8,47	N/mm ²	Grenzfläche:	5,27	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

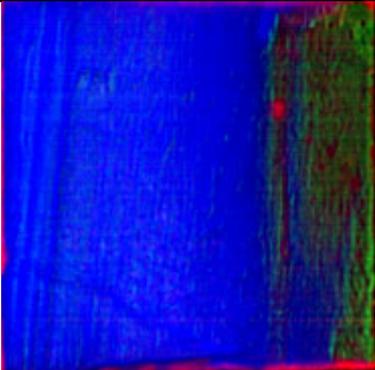
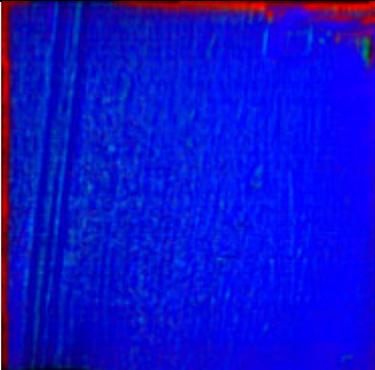
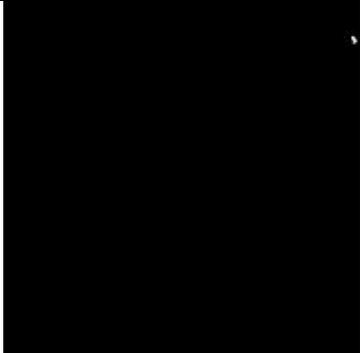
Serie:014		Prüfkörper: 054		Schерfläche: A	
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.450,50	mm ²	Holzbruch:	83,94	%
Bruchkraft:	25.800	N	Betonbruch:	4,20	%
Scherfestigkeit:	10,53	N/mm ²	Grenzfläche:	12,66	%
			Mehrfach betrachtet:	0,81	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

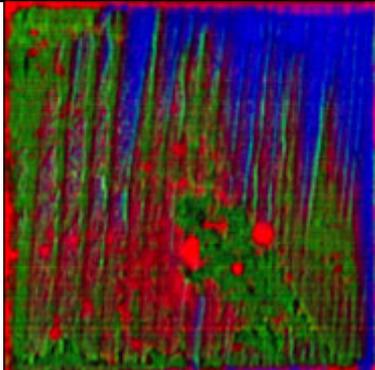
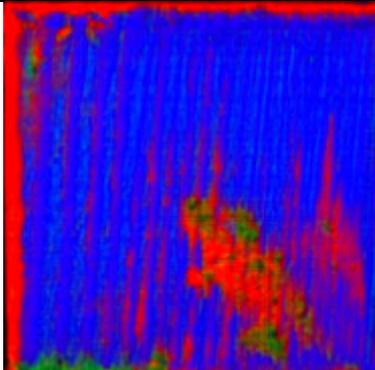
Serie:	014	Prüfkörper:	054	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.450,50	mm ²	Holzbruch:	26,47	%
Bruchkraft:	21.300	N	Betonbruch:	55,98	%
Scherfestigkeit:	8,69	N/mm ²	Grenzfläche:	17,62	%
			Mehrfach betrachtet:	0,07	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

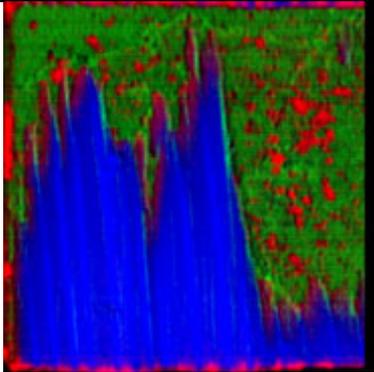
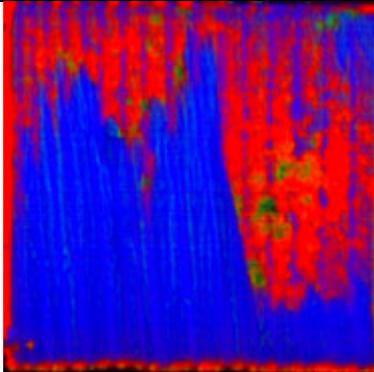
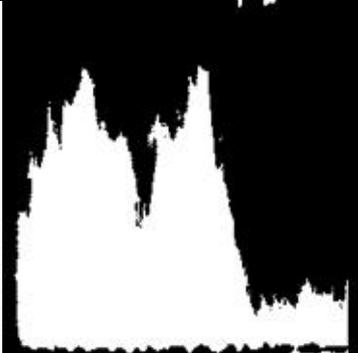
Serie:	014	Prüfkörper:	055	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.452,50	mm ²	Holzbruch:	87,88	%
Bruchkraft:	23.700	N	Betonbruch:	0,78	%
Scherfestigkeit:	9,66	N/mm ²	Grenzfläche:	11,54	%
			Mehrfach betrachtet:	0,20	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Serie:	014	Prüfkörper:	055	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	06.12.2017		
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung	13.12.2017		
Scherfläche:	2.452,50	mm ²	Holzbruch:	92,54	%
Bruchkraft:	22.800	N	Betonbruch:	0,01	%
Scherfestigkeit:	9,30	N/mm ²	Grenzfläche:	7,46	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
 <p>Farbbild Betonseite</p>		 <p>HSI Betonseite</p>			
 <p>Farbbild Holzseite</p>		 <p>HSI Holzseite</p>			
 <p>Betonbruch</p>		 <p>Holzbruch</p>		 <p>Grenzflächenversagen</p>	

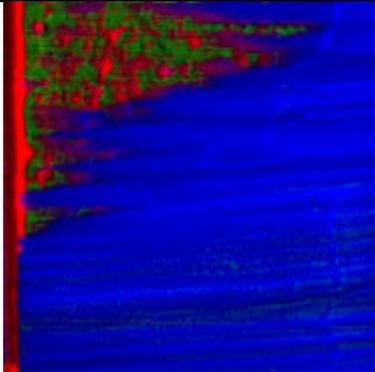
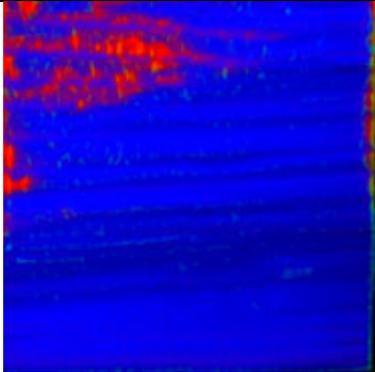
Serie:	014	Prüfkörper:	056	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.455,00	mm ²	Holzbruch:	1,81	%
Bruchkraft:	23.700	N	Betonbruch:	57,90	%
Scherfestigkeit:	9,65	N/mm ²	Grenzfläche:	40,37	%
			Mehrfach betrachtet:	0,09	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

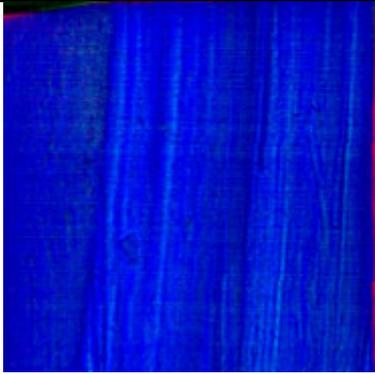
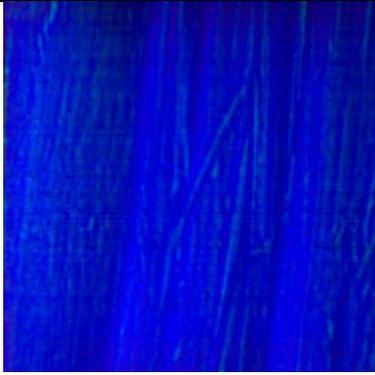
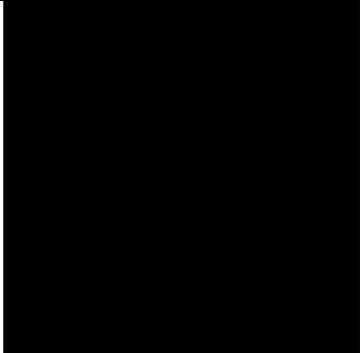
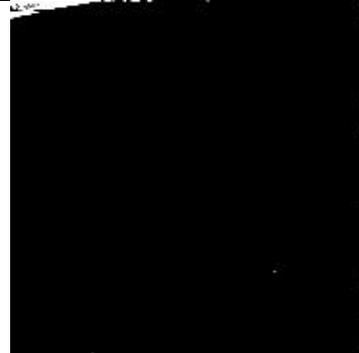
Serie:	014	Prüfkörper:	056	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.455,00	mm ²	Holzbruch:	78,83	%
Bruchkraft:	22.600	N	Betonbruch:	0,02	%
Scherfestigkeit:	9,21	N/mm ²	Grenzfläche:	21,15	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

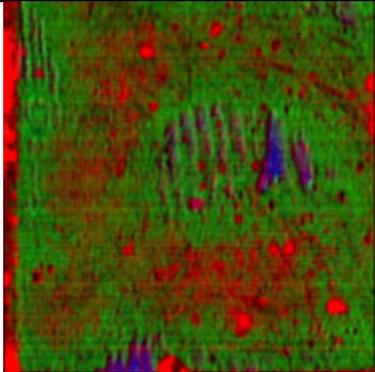
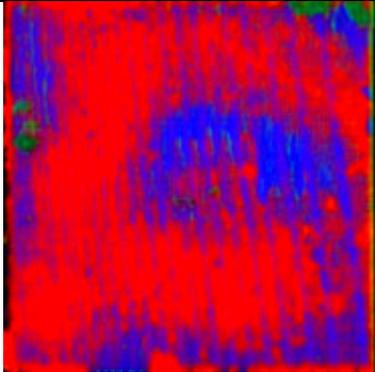
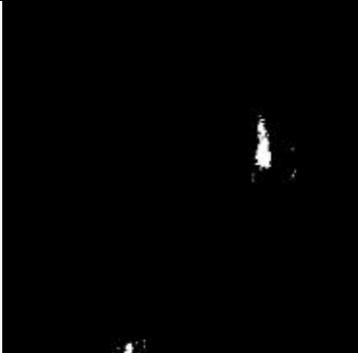
Serie:	015	Prüfkörper:	057	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.450,50	mm ²	Holzbruch:	18,93	%
Bruchkraft:	23.700	N	Betonbruch:	0,70	%
Scherfestigkeit:	9,67	N/mm ²	Grenzfläche:	80,37	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

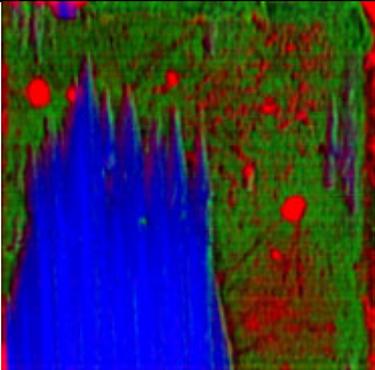
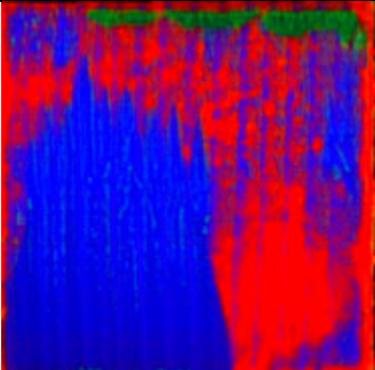
Serie:	015	Prüfkörper:	057	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.450,50	mm ²	Holzbruch:	40,81	%
Bruchkraft:	24.600	N	Betonbruch:	0,15	%
Scherfestigkeit:	10,04	N/mm ²	Grenzfläche:	59,03	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
 <p>Farbbild Betonseite</p>		 <p>HSI Betonseite</p>			
 <p>Farbbild Holzseite</p>		 <p>HSI Holzseite</p>			
 <p>Betonbruch</p>		 <p>Holzbruch</p>		 <p>Grenzflächenversagen</p>	

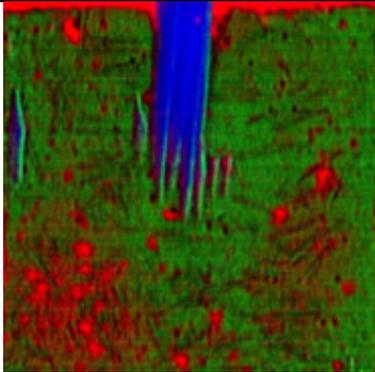
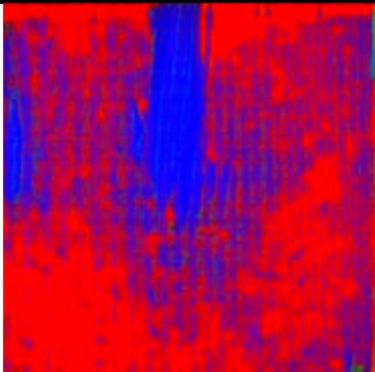
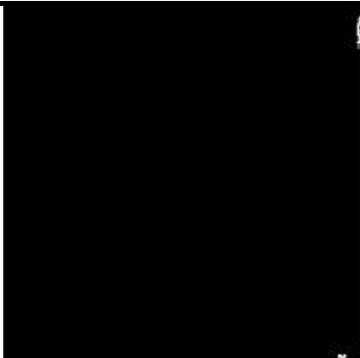
Serie:	015	Prüfkörper:	058	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	06.12.2017		
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung	13.12.2017		
Scherfläche:	2.459,00	mm ²	Holzbruch:	76,01	%
Bruchkraft:	24.500	N	Betonbruch:	0,07	%
Scherfestigkeit:	9,96	N/mm ²	Grenzfläche:	23,99	%
			Mehrfach betrachtet:	0,07	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%

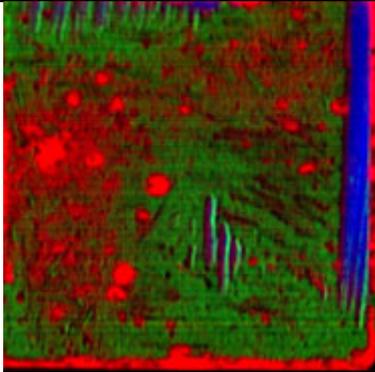
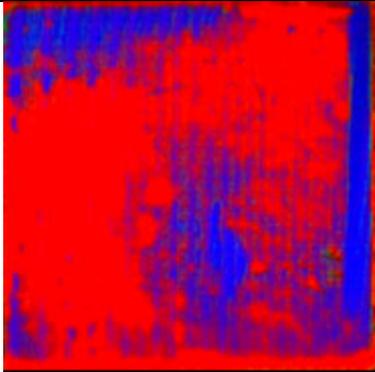
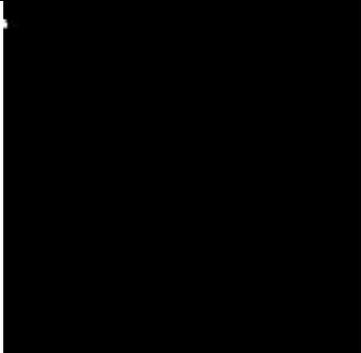
		
Farbbild Betonseite	HSI Betonseite	
		
Farbbild Holzseite	HSI Holzseite	
		
Betonbruch	Holzbruch	Grenzflächenversagen

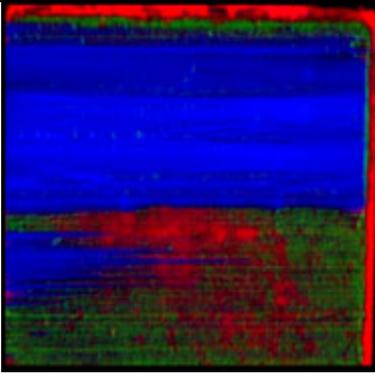
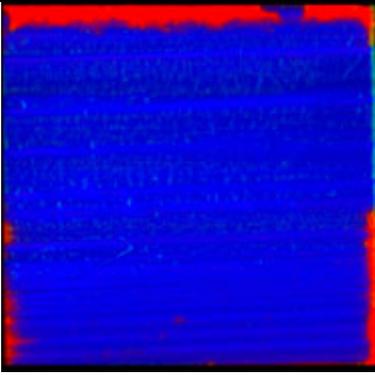
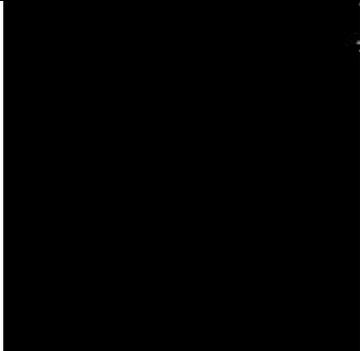
Serie:	015	Prüfkörper:	058	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.459,00	mm ²	Holzbruch:	98,37	%
Bruchkraft:	22.800	N	Betonbruch:	0,00	%
Scherfestigkeit:	9,27	N/mm ²	Grenzfläche:	1,63	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
<p>Farbbild Betonseite</p>		<p>HSI Betonseite</p>			
					
<p>Farbbild Holzseite</p>		<p>HSI Holzseite</p>			
					
<p>Betonbruch</p>		<p>Holzbruch</p>		<p>Grenzflächenversagen</p>	

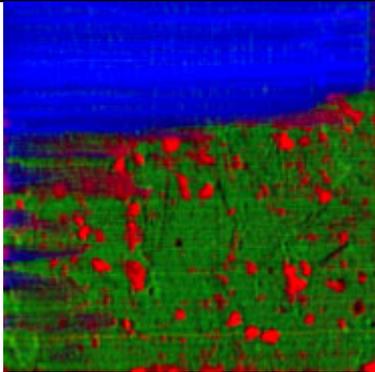
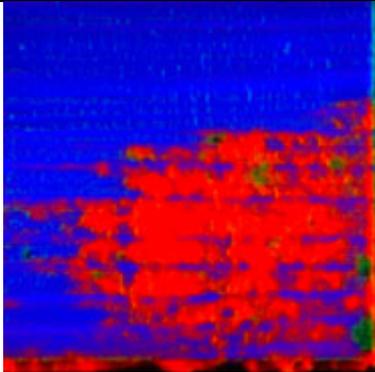
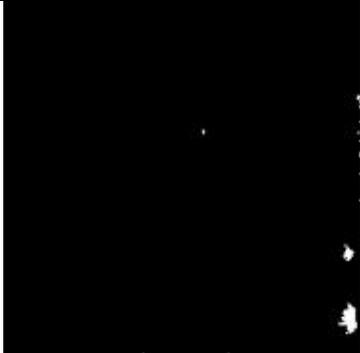
Serie:	015	Prüfkörper:	059	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.446,00	mm ²	Holzbruch:	0,45	%
Bruchkraft:	16.700	N	Betonbruch:	0,85	%
Scherfestigkeit:	6,83	N/mm ²	Grenzfläche:	98,70	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

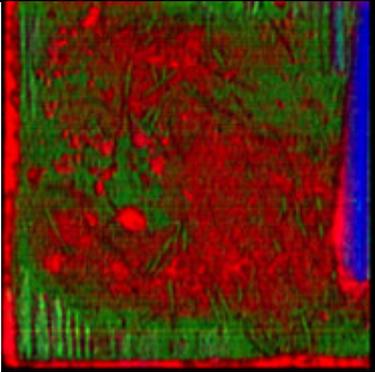
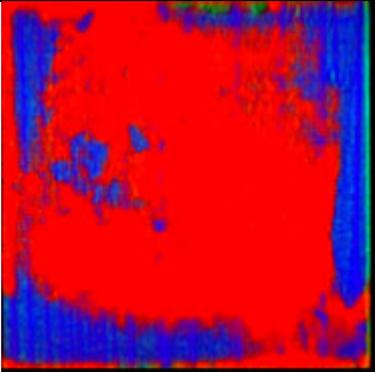
Serie:	015	Prüfkörper:	059	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	06.12.2017		
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung	13.12.2017		
Scherfläche:	2.446,00	mm ²	Holzbruch:	32,25	%
Bruchkraft:	15.100	N	Betonbruch:	2,89	%
Scherfestigkeit:	6,71	N/mm ²	Grenzfläche:	64,85	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
 <p>Farbbild Betonseite</p>		 <p>HSI Betonseite</p>			
 <p>Farbbild Holzseite</p>		 <p>HSI Holzseite</p>			
 <p>Betonbruch</p>		 <p>Holzbruch</p>		 <p>Grenzflächenversagen</p>	

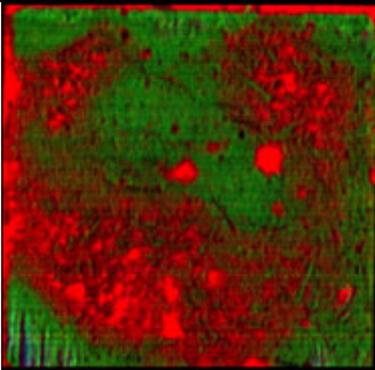
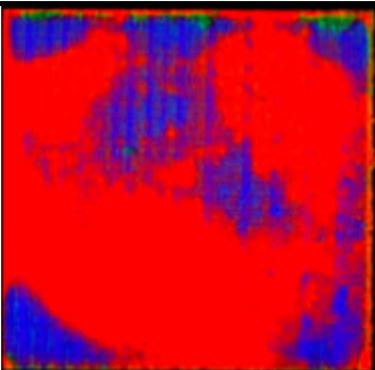
Serie:	015	Prüfkörper:	060	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		13.12.2017	
Scherfläche:	2.462,00	mm ²	Holzbruch:	5,62	%
Bruchkraft:	11.600	N	Betonbruch:	0,09	%
Scherfestigkeit:	4,71	N/mm ²	Grenzfläche:	94,28	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

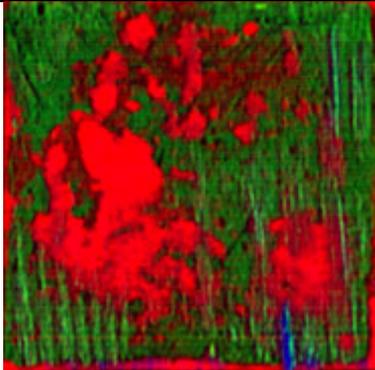
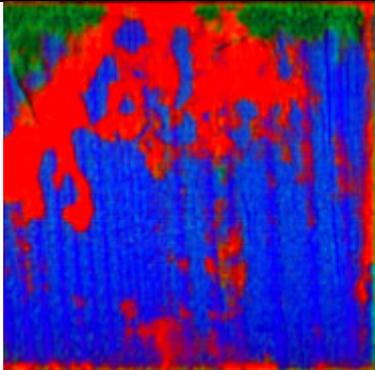
Serie:	015	Prüfkörper:	060	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	06.12.2017		
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung	13.12.2017		
Scherfläche:	2.462,00	mm ²	Holzbruch:	4,17	%
Bruchkraft:	12.300	N	Betonbruch:	0,02	%
Scherfestigkeit:	5,00	N/mm ²	Grenzfläche:	95,81	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

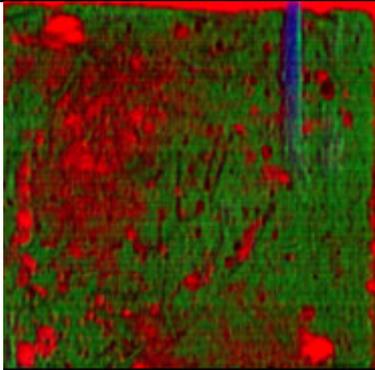
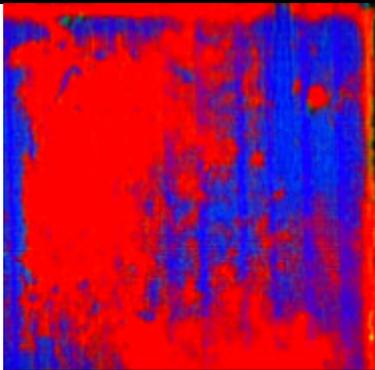
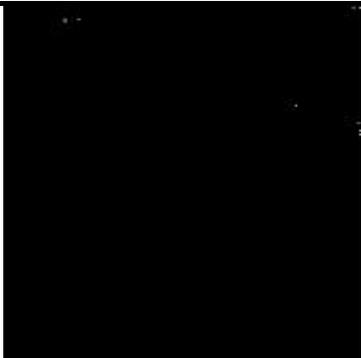
Serie:	016	Prüfkörper:	061	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		14.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.464,00	mm ²	Holzbruch:	51,96	%
Bruchkraft:	16.900	N	Betonbruch:	0,01	%
Scherfestigkeit:	6,86	N/mm ²	Grenzfläche:	48,03	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

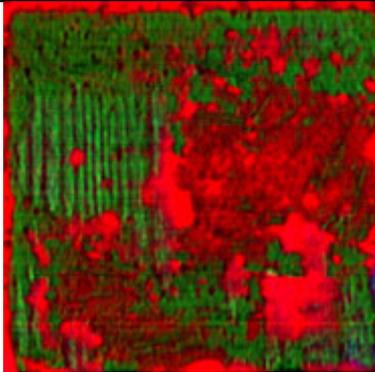
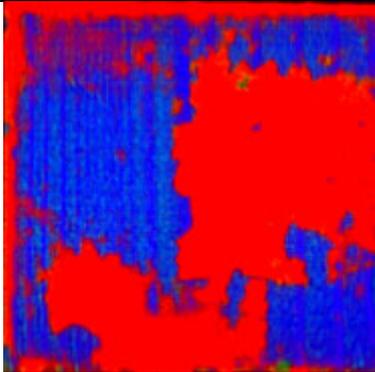
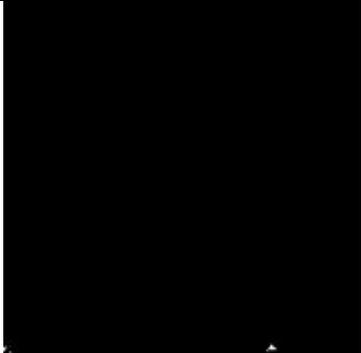
Serie:	016	Prüfkörper:	061	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		14.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.464,00	mm ²	Holzbruch:	34,65	%
Bruchkraft:	20.800	N	Betonbruch:	0,36	%
Scherfestigkeit:	8,44	N/mm ²	Grenzfläche:	64,99	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

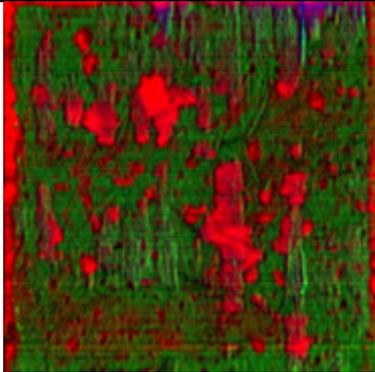
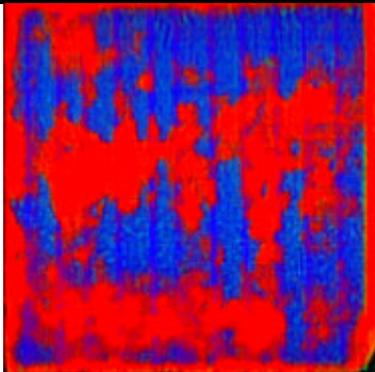
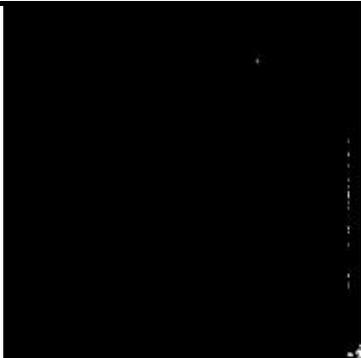
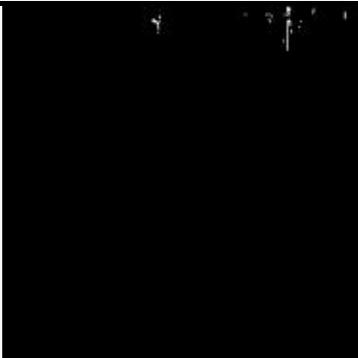
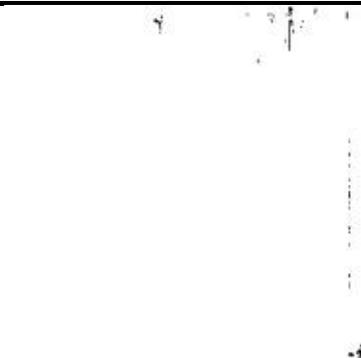
Serie:	016	Prüfkörper:	062	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		14.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.463,00	mm ²	Holzbruch:	3,47	%
Bruchkraft:	8.420	N	Betonbruch:	0,27	%
Scherfestigkeit:	3,42	N/mm ²	Grenzfläche:	96,29	%
			Mehrfach betrachtet:	0,02	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

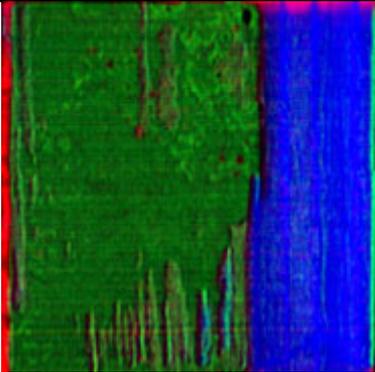
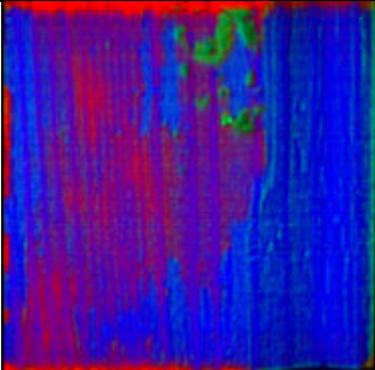
Serie:	016	Prüfkörper:	062	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	14.12.2017		
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung	29.01.2018		
Scherfläche:	2.463,00	mm ²	Holzbruch:	0,04	%
Bruchkraft:	6.830	N	Betonbruch:	0,40	%
Scherfestigkeit:	2,77	N/mm ²	Grenzfläche:	99,55	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

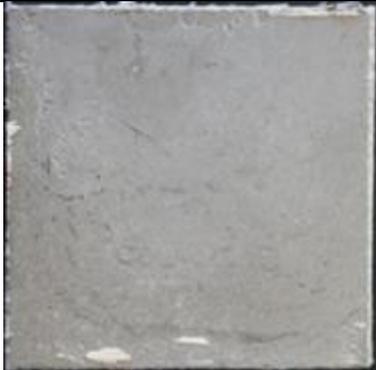
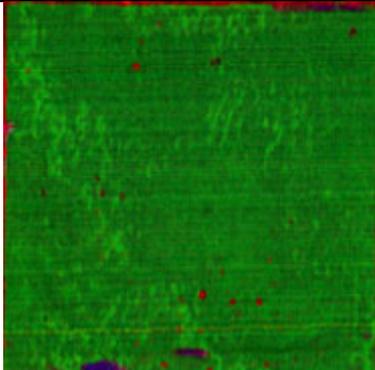
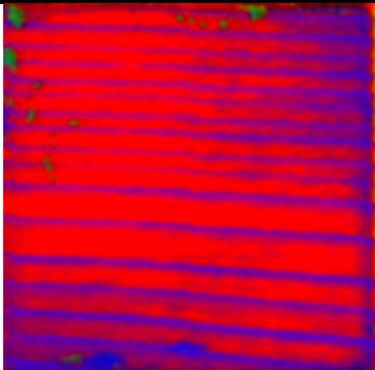
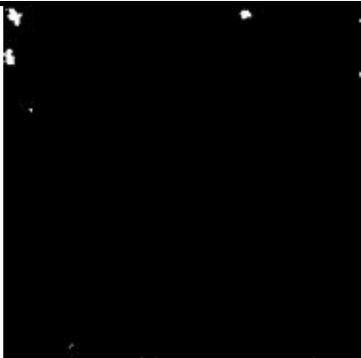
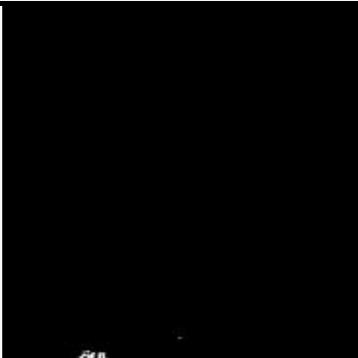
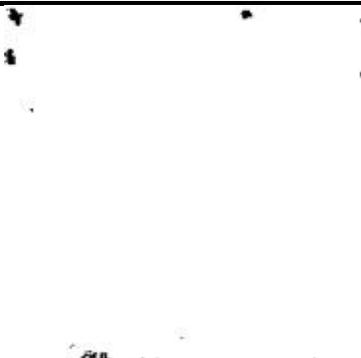
Serie:	016	Prüfkörper:	063	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		14.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.463,00	mm ²	Holzbruch:	0,36	%
Bruchkraft:	18.800	N	Betonbruch:	5,37	%
Scherfestigkeit:	7,63	N/mm ²	Grenzfläche:	94,27	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

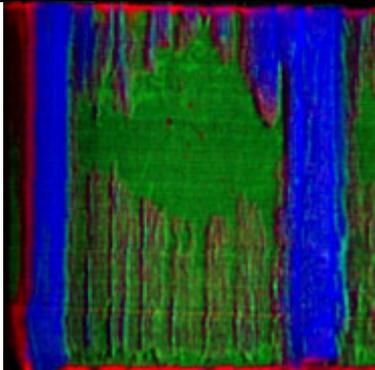
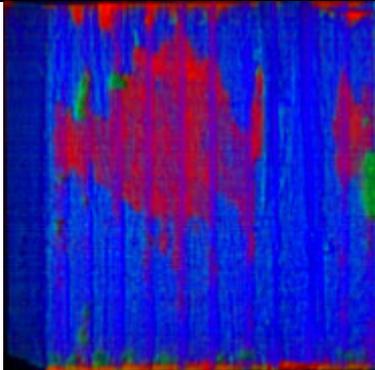
Serie:	016	Prüfkörper:	063	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	14.12.2017		
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung	29.01.2018		
Scherfläche:	2.463,00	mm ²	Holzbruch:	0,71	%
Bruchkraft:	13.900	N	Betonbruch:	0,02	%
Scherfestigkeit:	5,64	N/mm ²	Grenzfläche:	99,27	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
 <p>Farbbild Betonseite</p>		 <p>HSI Betonseite</p>			
 <p>Farbbild Holzseite</p>		 <p>HSI Holzseite</p>			
 <p>Betonbruch</p>		 <p>Holzbruch</p>		 <p>Grenzflächenversagen</p>	

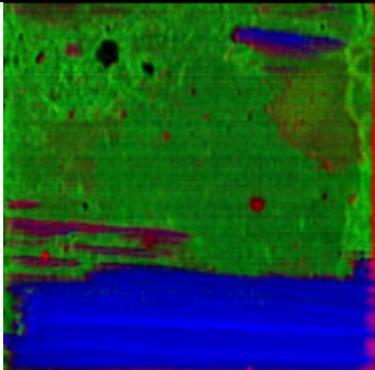
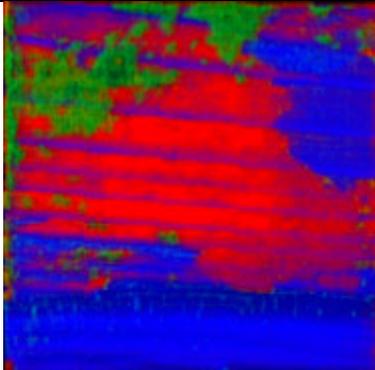
Serie:	016	Prüfkörper:	064	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		14.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.469,50	mm ²	Holzbruch:	0,09	%
Bruchkraft:	12.800	N	Betonbruch:	0,03	%
Scherfestigkeit:	5,18	N/mm ²	Grenzfläche:	99,88	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

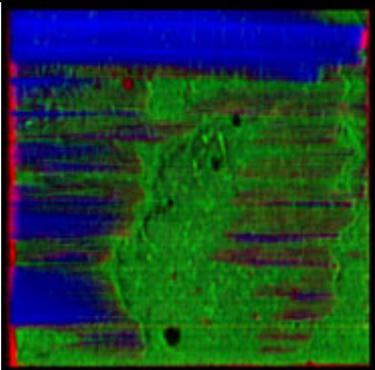
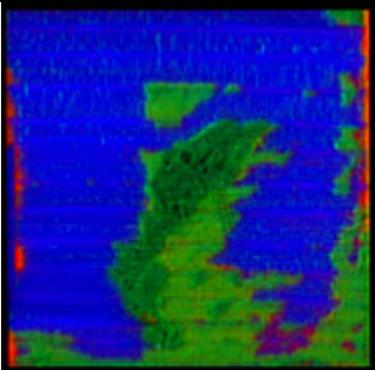
Serie:	016	Prüfkörper:	064	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		14.12.2017	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.469,50	mm ²	Holzbruch:	0,12	%
Bruchkraft:	11.000	N	Betonbruch:	0,08	%
Scherfestigkeit:	4,45	N/mm ²	Grenzfläche:	99,80	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

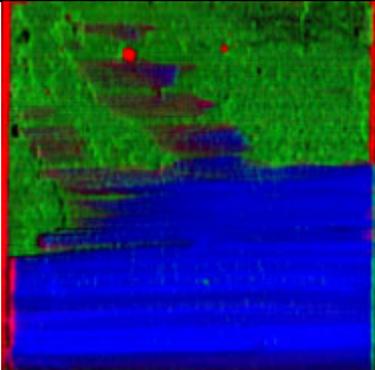
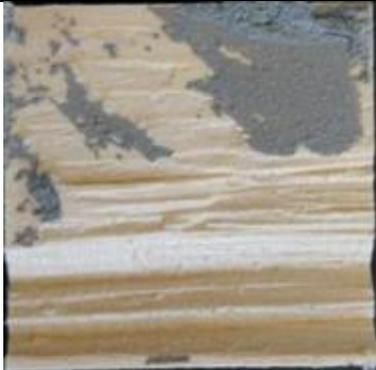
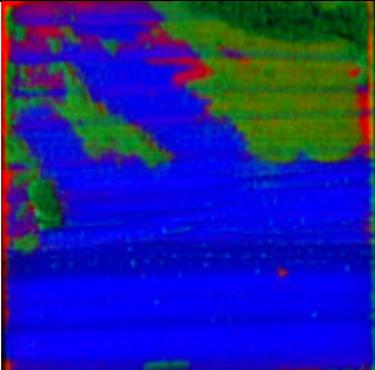
Serie:	017	Prüfkörper:	065	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		14.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.464,50	mm ²	Holzbruch:	29,83	%
Bruchkraft:	11.900	N	Betonbruch:	1,45	%
Scherfestigkeit:	4,83	N/mm ²	Grenzfläche:	68,73	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

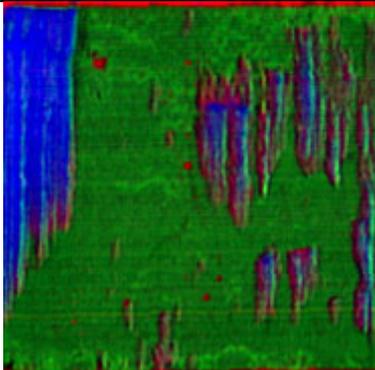
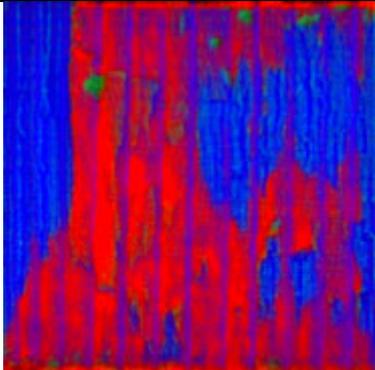
Serie:	017	Prüfkörper:	065	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		14.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.464,50	mm ²	Holzbruch:	0,10	%
Bruchkraft:	7.140	N	Betonbruch:	0,29	%
Scherfestigkeit:	2,90	N/mm ²	Grenzfläche:	99,61	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

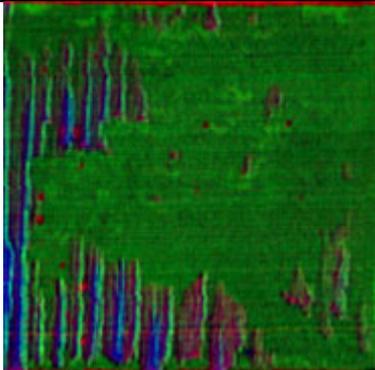
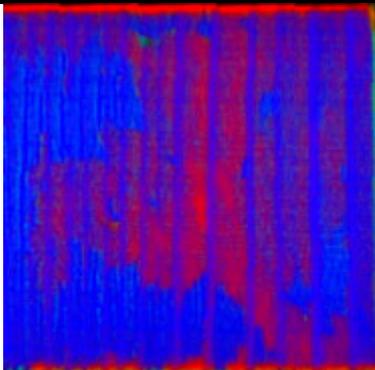
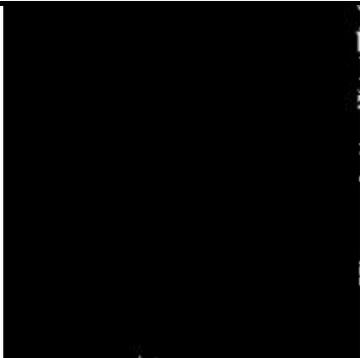
Serie:	017	Prüfkörper:	066	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		14.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.468,00	mm ²	Holzbruch:	26,95	%
Bruchkraft:	17.800	N	Betonbruch:	0,90	%
Scherfestigkeit:	7,21	N/mm ²	Grenzfläche:	72,17	%
			Mehrfach betrachtet:	0,02	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

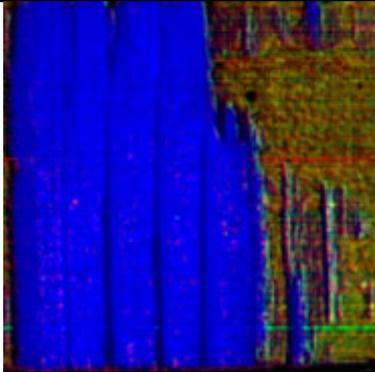
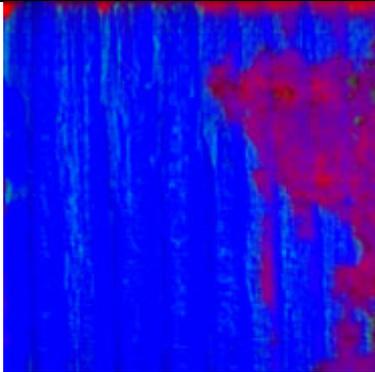
Serie:	017	Prüfkörper:	066	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		14.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.468,00	mm ²	Holzbruch:	25,37	%
Bruchkraft:	22.100	N	Betonbruch:	7,31	%
Scherfestigkeit:	8,95	N/mm ²	Grenzfläche:	67,46	%
			Mehrfach betrachtet:	0,14	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

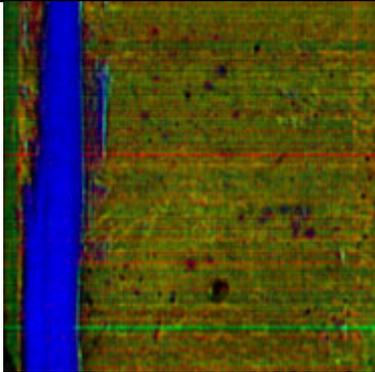
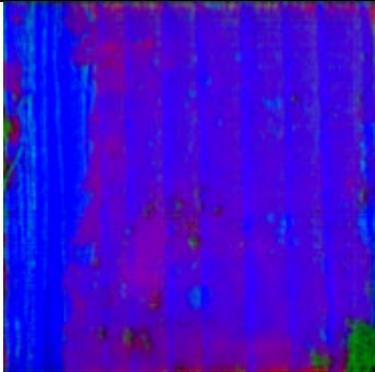
Serie:	017	Prüfkörper:	067	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		14.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.470,50	mm ²	Holzbruch:	24,79	%
Bruchkraft:	17.300	N	Betonbruch:	24,33	%
Scherfestigkeit:	7,00	N/mm ²	Grenzfläche:	50,89	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

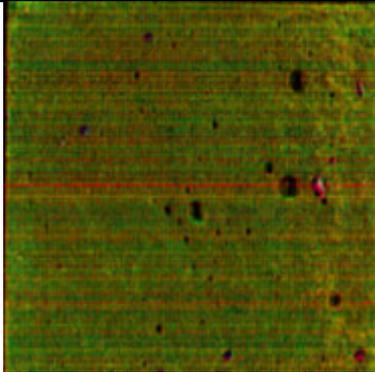
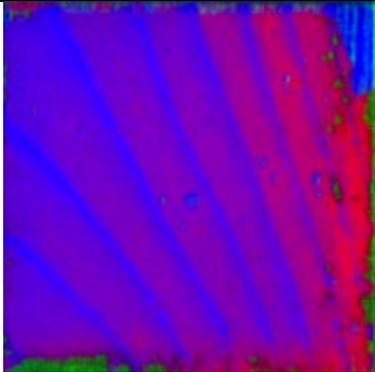
Serie:	017	Prüfkörper:	067	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		14.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.470,50	mm ²	Holzbruch:	48,75	%
Bruchkraft:	18.400	N	Betonbruch:	15,62	%
Scherfestigkeit:	7,45	N/mm ²	Grenzfläche:	35,64	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
 <p>Farbbild Betonseite</p>		 <p>HSI Betonseite</p>			
 <p>Farbbild Holzseite</p>		 <p>HSI Holzseite</p>			
 <p>Betonbruch</p>		 <p>Holzbruch</p>		 <p>Grenzflächenversagen</p>	

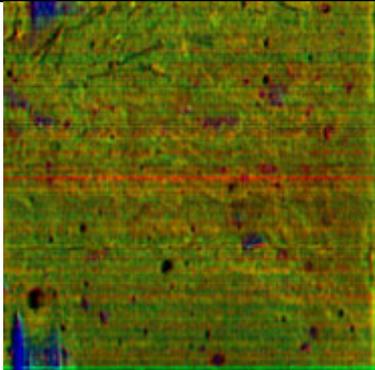
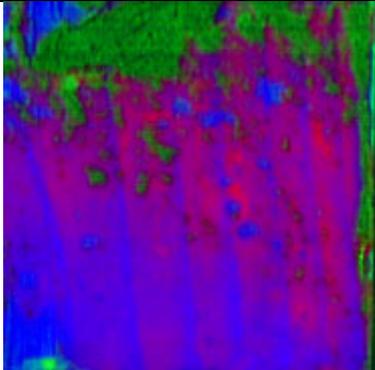
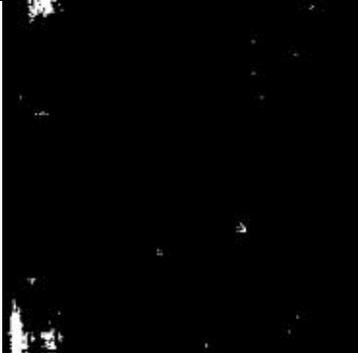
Serie:	017	Prüfkörper:	068	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		14.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.461,00	mm ²	Holzbruch:	12,56	%
Bruchkraft:	15.700	N	Betonbruch:	0,37	%
Scherfestigkeit:	6,38	N/mm ²	Grenzfläche:	87,08	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

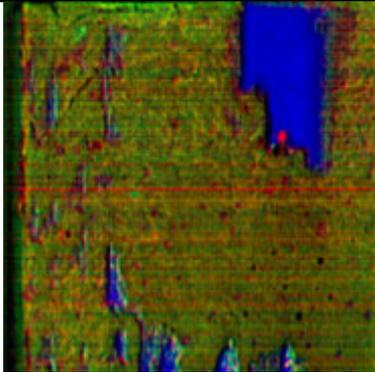
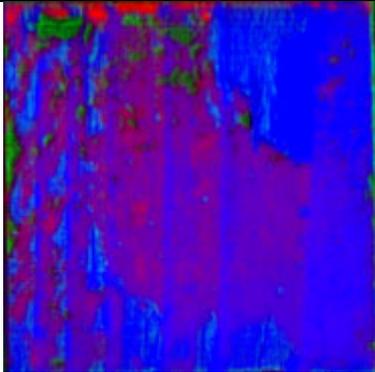
Serie:	017	Prüfkörper:	068	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		14.12.2017	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		29.01.2018	
Scherfläche:	2.461,00	mm ²	Holzbruch:	3,66	%
Bruchkraft:	16.000	N	Betonbruch:	0,13	%
Scherfestigkeit:	6,50	N/mm ²	Grenzfläche:	96,21	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

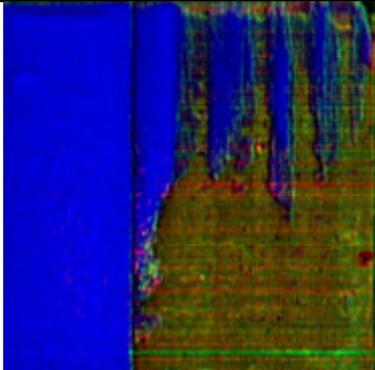
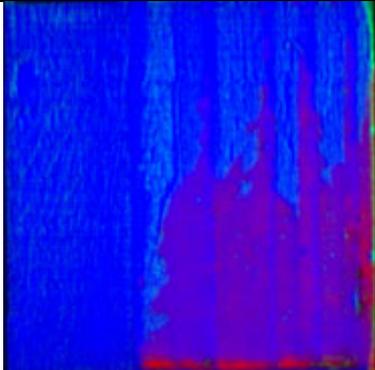
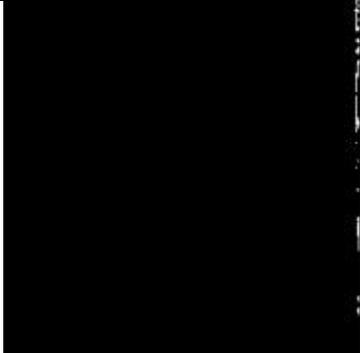
Serie:	018	Prüfkörper:	069	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.469,00	mm ²	Holzbruch:	65,40	%
Bruchkraft:	13.000	N	Betonbruch:	0,02	%
Scherfestigkeit:	5,27	N/mm ²	Grenzfläche:	34,59	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

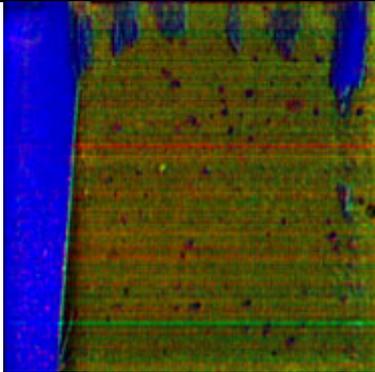
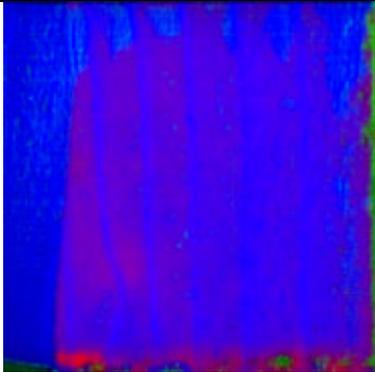
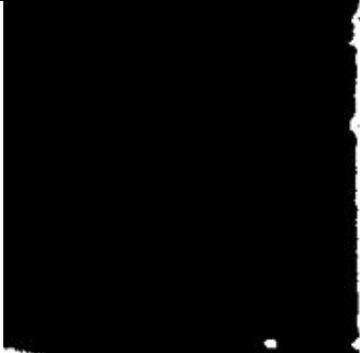
Serie:	018	Prüfkörper:	069	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.469,00	mm ²	Holzbruch:	14,02	%
Bruchkraft:	9.970	N	Betonbruch:	1,14	%
Scherfestigkeit:	4,04	N/mm ²	Grenzfläche:	84,84	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

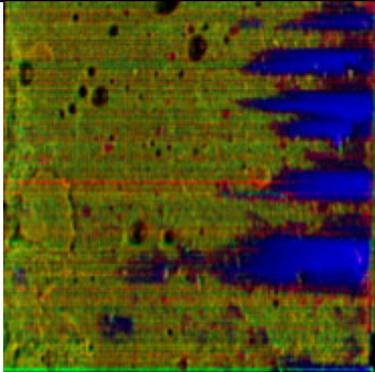
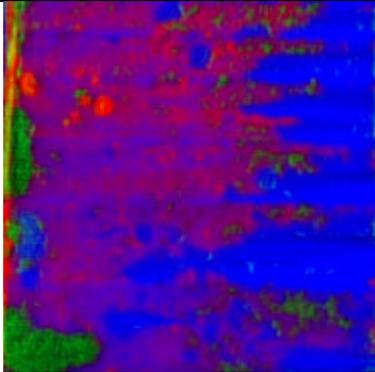
Serie:	018	Prüfkörper:	070	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.457,50	mm ²	Holzbruch:	0,13	%
Bruchkraft:	4.500	N	Betonbruch:	1,79	%
Scherfestigkeit:	1,83	N/mm ²	Grenzfläche:	98,08	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

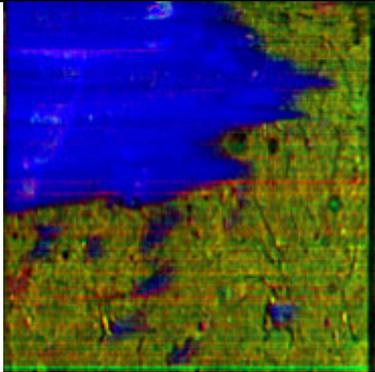
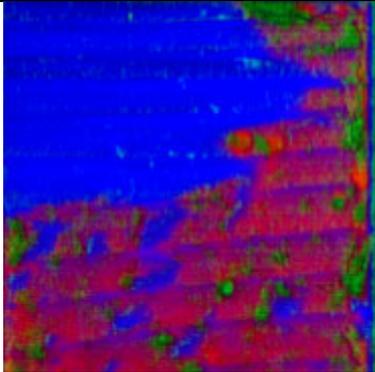
Serie:	018	Prüfkörper:	070	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.457,50	mm ²	Holzbruch:	0,95	%
Bruchkraft:	9.380	N	Betonbruch:	16,21	%
Scherfestigkeit:	3,82	N/mm ²	Grenzfläche:	82,87	%
			Mehrfach betrachtet:	0,03	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

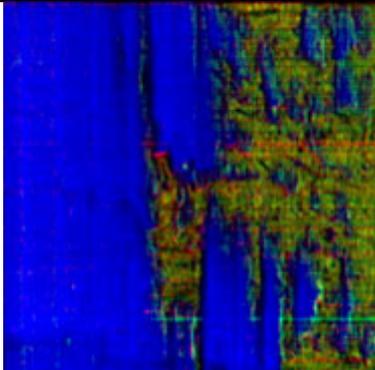
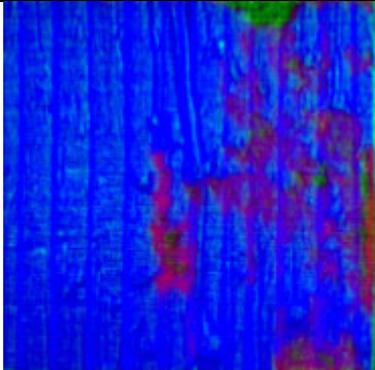
Serie:	018	Prüfkörper:	071	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.460,50	mm ²	Holzbruch:	9,69	%
Bruchkraft:	15.600	N	Betonbruch:	2,41	%
Scherfestigkeit:	6,34	N/mm ²	Grenzfläche:	87,90	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

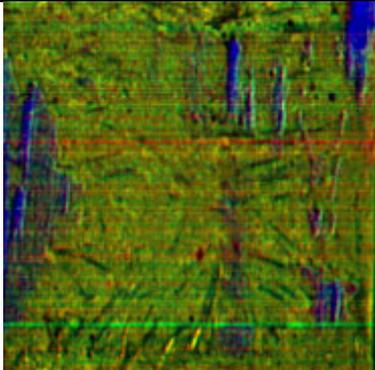
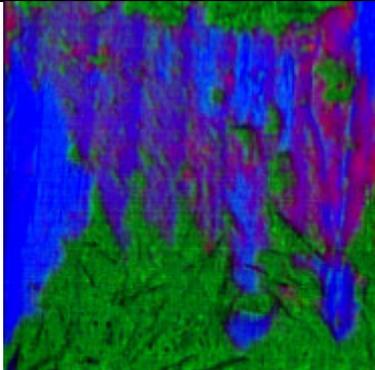
Serie:	018	Prüfkörper:	071	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.460,50	mm ²	Holzbruch:	52,37	%
Bruchkraft:	14.000	N	Betonbruch:	0,27	%
Scherfestigkeit:	5,69	N/mm ²	Grenzfläche:	47,37	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch	Holzbruch	Grenzflächenversagen			

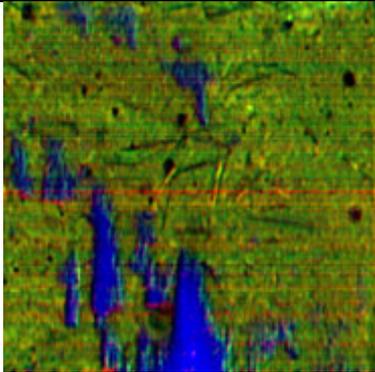
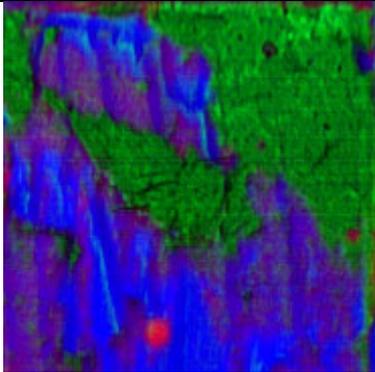
Serie:	018	Prüfkörper:	072	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.458,50	mm ²	Holzbruch:	21,11	%
Bruchkraft:	12.400	N	Betonbruch:	1,59	%
Scherfestigkeit:	5,04	N/mm ²	Grenzfläche:	77,41	%
			Mehrfach betrachtet:	0,11	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

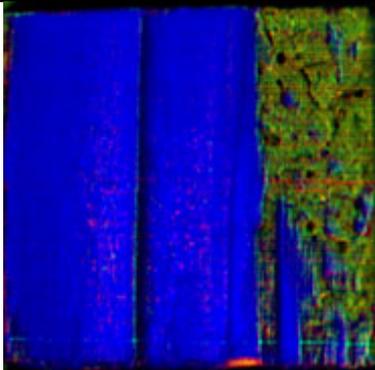
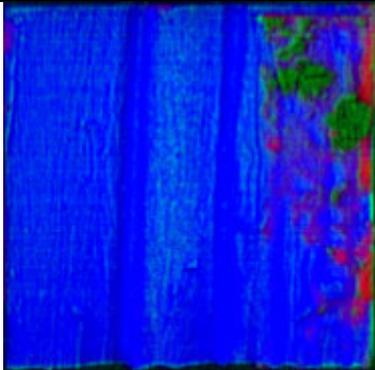
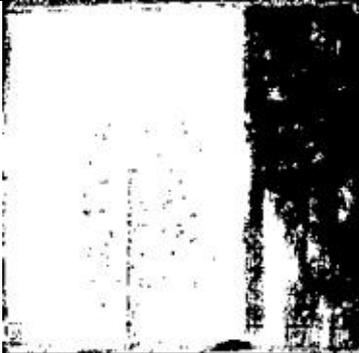
Serie:	018	Prüfkörper:	072	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.458,50	mm ²	Holzbruch:	14,26	%
Bruchkraft:	10.300	N	Betonbruch:	4,51	%
Scherfestigkeit:	4,19	N/mm ²	Grenzfläche:	81,26	%
			Mehrfach betrachtet:	0,02	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

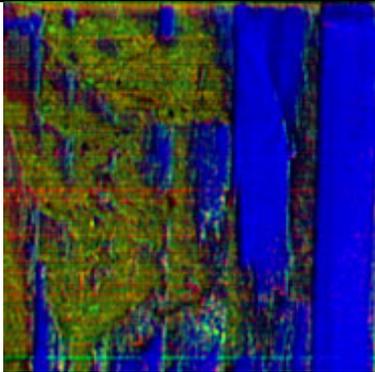
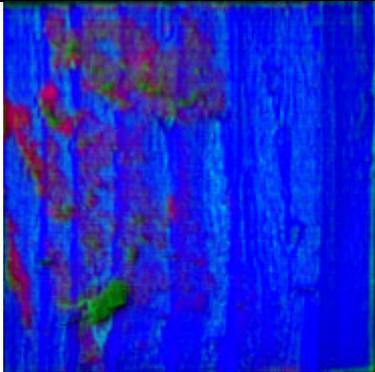
Serie:	019	Prüfkörper:	073	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.460,50	mm ²	Holzbruch:	36,99	%
Bruchkraft:	11.500	N	Betonbruch:	3,54	%
Scherfestigkeit:	4,67	N/mm ²	Grenzfläche:	59,48	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

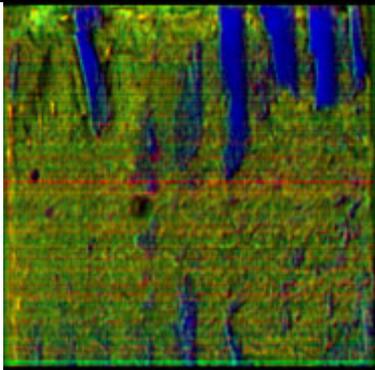
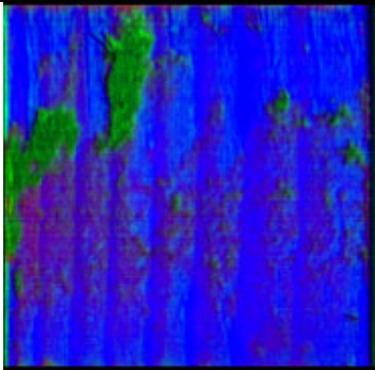
Serie:	019	Prüfkörper:	073	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.460,50	mm ²	Holzbruch:	63,55	%
Bruchkraft:	19.100	N	Betonbruch:	1,50	%
Scherfestigkeit:	7,76	N/mm ²	Grenzfläche:	34,95	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

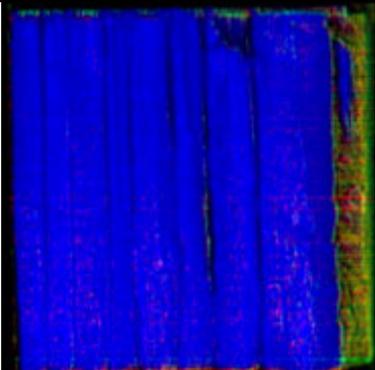
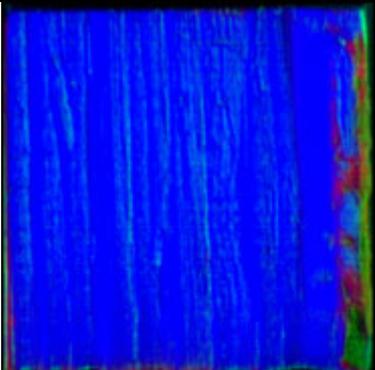
Serie:	019	Prüfkörper:	074	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.458,00	mm ²	Holzbruch:	3,52	%
Bruchkraft:	19.400	N	Betonbruch:	35,04	%
Scherfestigkeit:	7,89	N/mm ²	Grenzfläche:	61,53	%
			Mehrfach betrachtet:	0,08	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

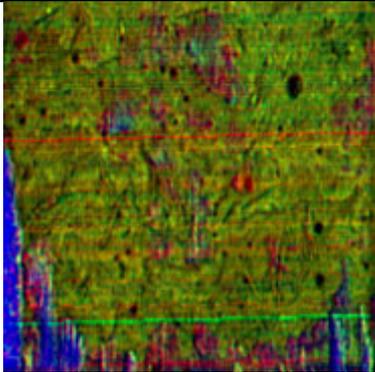
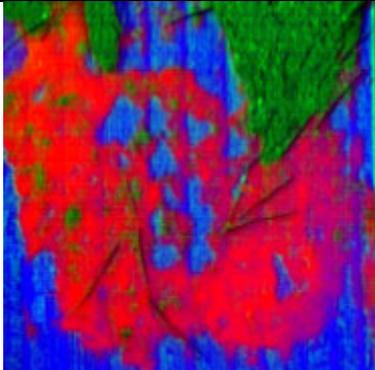
Serie:	019	Prüfkörper:	074	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.458,00	mm ²	Holzbruch:	8,49	%
Bruchkraft:	22.100	N	Betonbruch:	37,53	%
Scherfestigkeit:	8,99	N/mm ²	Grenzfläche:	54,05	%
			Mehrfach betrachtet:	0,08	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

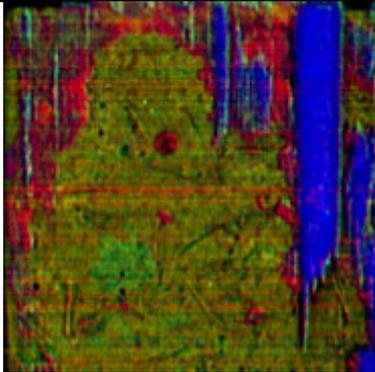
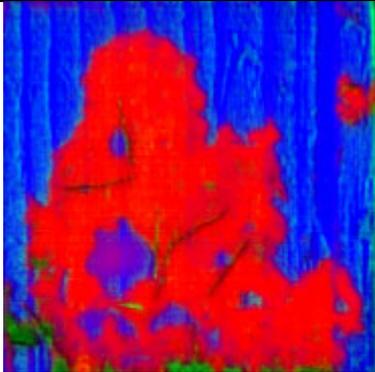
Serie:	019	Prüfkörper:	075	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.463,00	mm ²	Holzbruch:	71,97	%
Bruchkraft:	18.100	N	Betonbruch:	3,49	%
Scherfestigkeit:	7,35	N/mm ²	Grenzfläche:	24,60	%
			Mehrfach betrachtet:	0,06	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

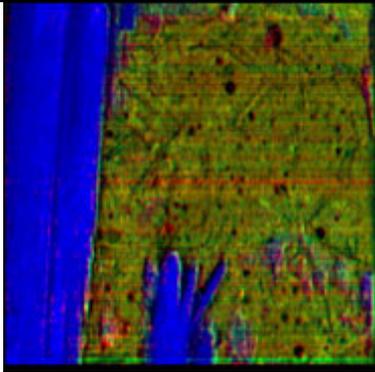
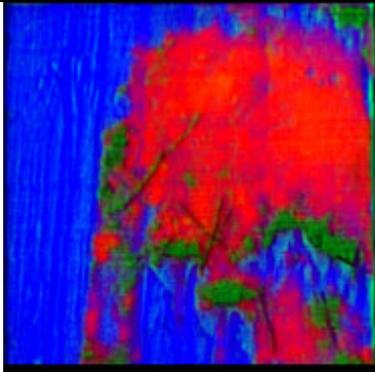
Serie:	019	Prüfkörper:	075	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.463,00	mm ²	Holzbruch:	43,55	%
Bruchkraft:	17.500	N	Betonbruch:	1,26	%
Scherfestigkeit:	7,11	N/mm ²	Grenzfläche:	55,20	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

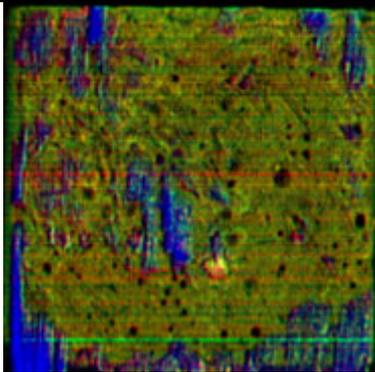
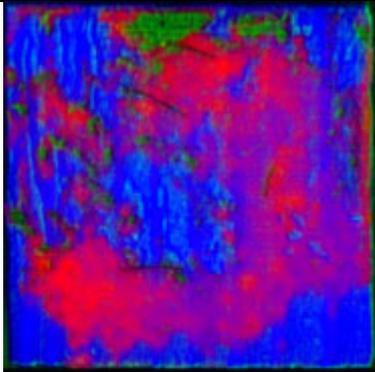
Serie:	019	Prüfkörper:	076	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.463,50	mm ²	Holzbruch:	9,08	%
Bruchkraft:	27.300	N	Betonbruch:	6,77	%
Scherfestigkeit:	11,08	N/mm ²	Grenzfläche:	84,17	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

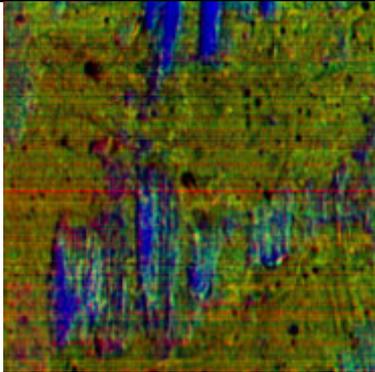
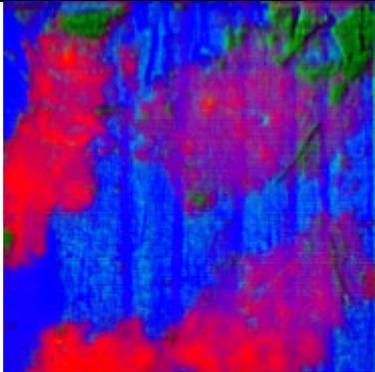
Serie:	019	Prüfkörper:	076	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.463,50	mm ²	Holzbruch:	84,94	%
Bruchkraft:	15.700	N	Betonbruch:	2,36	%
Scherfestigkeit:	6,37	N/mm ²	Grenzfläche:	12,70	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

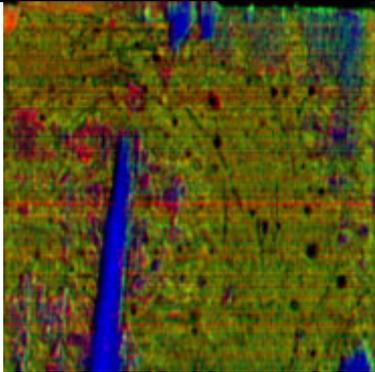
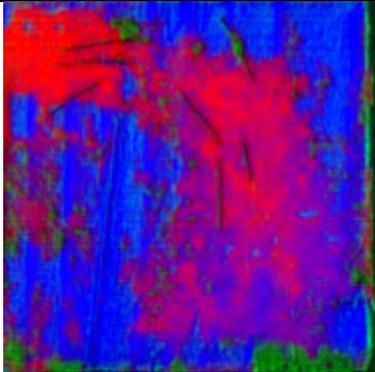
Serie:	020	Prüfkörper:	077	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.460,00	mm ²	Holzbruch:	4,64	%
Bruchkraft:	9.910	N	Betonbruch:	13,88	%
Scherfestigkeit:	4,03	N/mm ²	Grenzfläche:	81,50	%
			Mehrfach betrachtet:	0,02	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

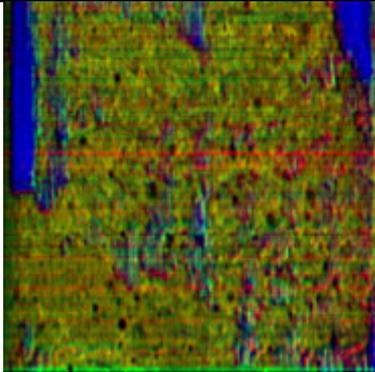
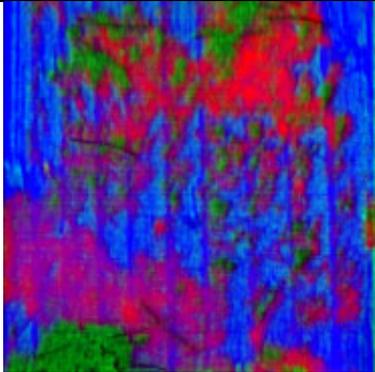
Serie:	020	Prüfkörper:	077	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.460,00	mm ²	Holzbruch:	14,75	%
Bruchkraft:	11.200	N	Betonbruch:	1,12	%
Scherfestigkeit:	4,55	N/mm ²	Grenzfläche:	84,16	%
			Mehrfach betrachtet:	0,03	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

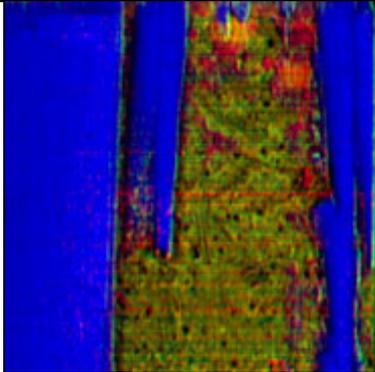
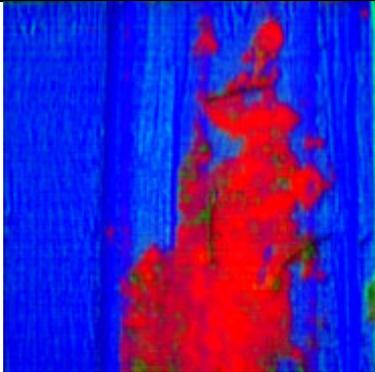
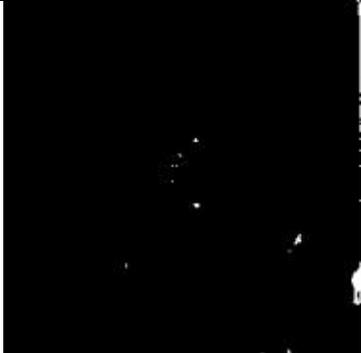
Serie:	020	Prüfkörper:	078	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.459,00	mm ²	Holzbruch:	28,90	%
Bruchkraft:	11.700	N	Betonbruch:	5,03	%
Scherfestigkeit:	4,76	N/mm ²	Grenzfläche:	66,19	%
			Mehrfach betrachtet:	0,12	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Serie:	020	Prüfkörper:	078	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.459,00	mm ²	Holzbruch:	7,45	%
Bruchkraft:	10.800	N	Betonbruch:	3,81	%
Scherfestigkeit:	4,39	N/mm ²	Grenzfläche:	88,77	%
			Mehrfach betrachtet:	0,04	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

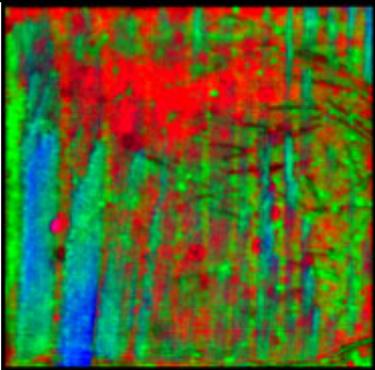
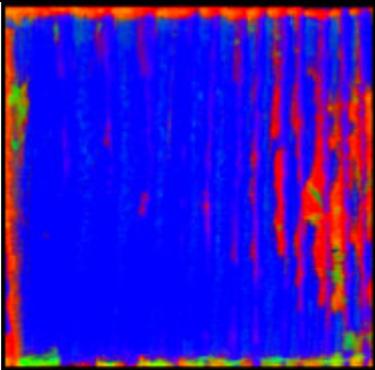
Serie:	020	Prüfkörper:	079	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.467,00	mm ²	Holzbruch:	6,35	%
Bruchkraft:	14.200	N	Betonbruch:	4,16	%
Scherfestigkeit:	5,76	N/mm ²	Grenzfläche:	89,52	%
			Mehrfach betrachtet:	0,03	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

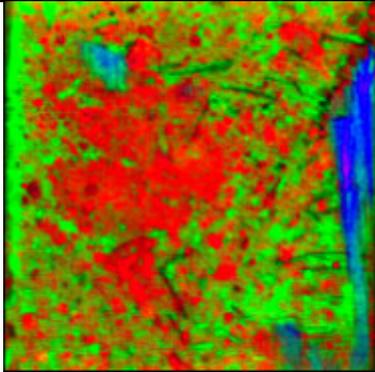
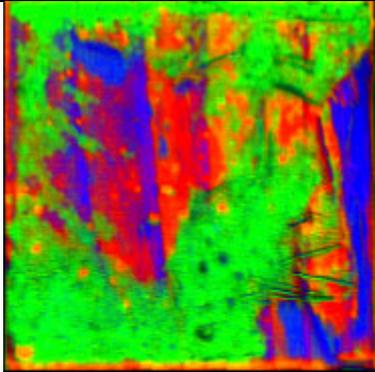
Serie:	020	Prüfkörper:	079	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.467,00	mm ²	Holzbruch:	6,27	%
Bruchkraft:	13.700	N	Betonbruch:	4,00	%
Scherfestigkeit:	5,55	N/mm ²	Grenzfläche:	89,93	%
			Mehrfach betrachtet:	0,20	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

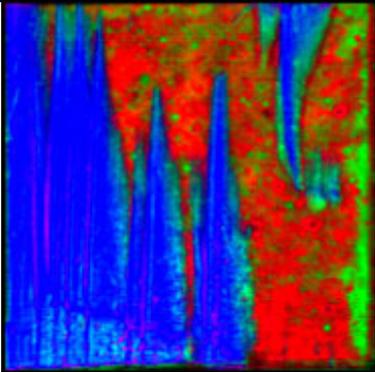
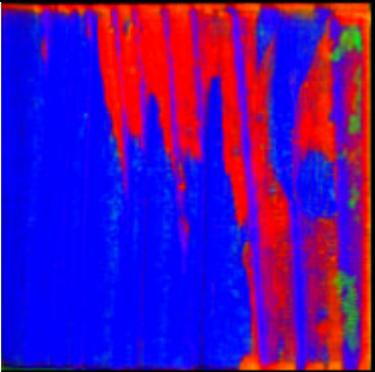
Serie:	020	Prüfkörper:	080	Scherfläche:	A
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.455,00	mm ²	Holzbruch:	6,31	%
Bruchkraft:	21.000	N	Betonbruch:	7,11	%
Scherfestigkeit:	8,55	N/mm ²	Grenzfläche:	86,64	%
			Mehrfach betrachtet:	0,06	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

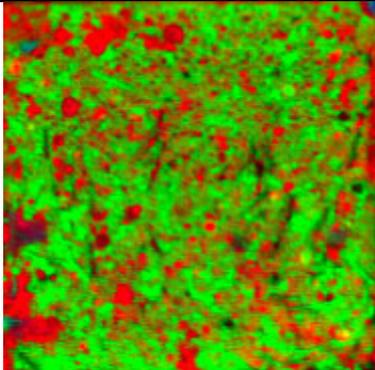
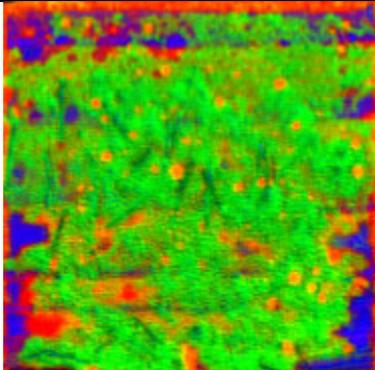
Serie:	020	Prüfkörper:	080	Scherfläche:	B
Klebstoff:	PRF	Datum der Verklebung		31.01.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.455,00	mm ²	Holzbruch:	50,92	%
Bruchkraft:	16.000	N	Betonbruch:	0,43	%
Scherfestigkeit:	6,52	N/mm ²	Grenzfläche:	48,65	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

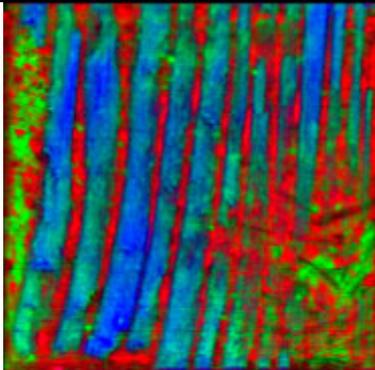
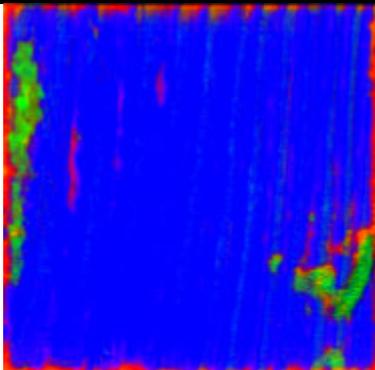
Serie:	021	Prüfkörper:	081	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.454,63	mm ²	Holzbruch:	1,73	%
Bruchkraft:	23.300	N	Betonbruch:	0,75	%
Scherfestigkeit:	9,49	N/mm ²	Grenzfläche:	97,52	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%

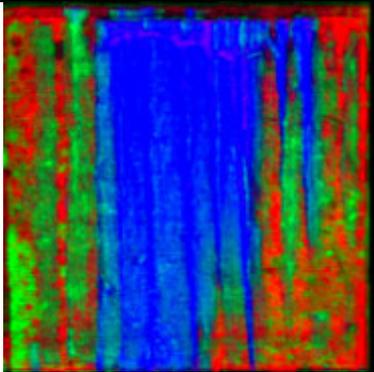
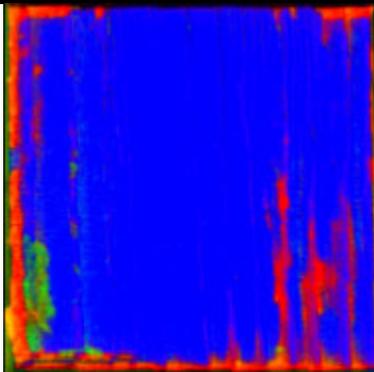
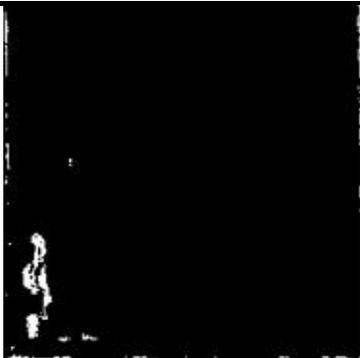
		
Farbbild Betonseite	HSI Betonseite	
		
Farbbild Holzseite	HSI Holzseite	
		
Betonbruch	Holzbruch	Grenzflächenversagen

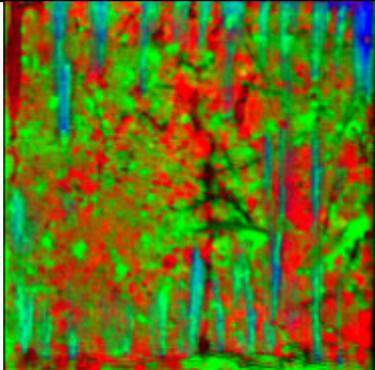
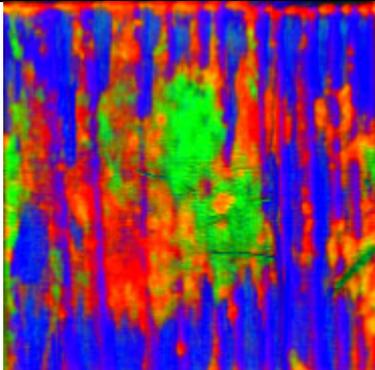
Serie:	021	Prüfkörper:	081	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.454,63	mm ²	Holzbruch:	3,00	%
Bruchkraft:	20.900	N	Betonbruch:	40,89	%
Scherfestigkeit:	8,51	N/mm ²	Grenzfläche:	56,11	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
 <p>Farbbild Betonseite</p>		 <p>HSI Betonseite</p>			
 <p>Farbbild Holzseite</p>		 <p>HSI Holzseite</p>			
 <p>Betonbruch</p>		 <p>Holzbruch</p>		 <p>Grenzflächenversagen</p>	

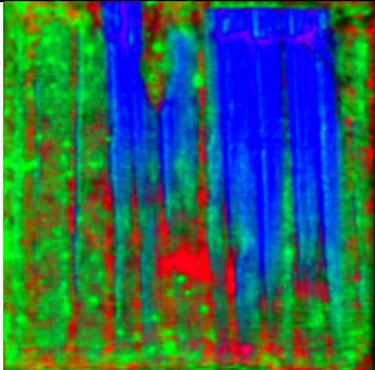
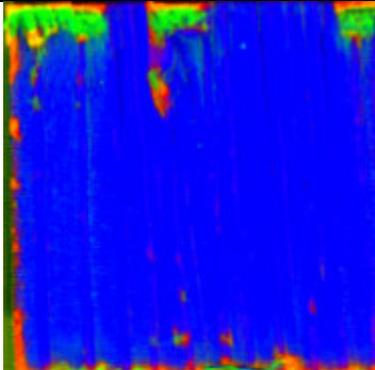
Serie:	021	Prüfkörper:	082	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.464,00	mm ²	Holzbruch:	42,40	%
Bruchkraft:	13.500	N	Betonbruch:	0,64	%
Scherfestigkeit:	5,48	N/mm ²	Grenzfläche:	56,97	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
 <p>Farbbild Betonseite</p>		 <p>HSI Betonseite</p>			
 <p>Farbbild Holzseite</p>		 <p>HSI Holzseite</p>			
 <p>Betonbruch</p>		 <p>Holzbruch</p>		 <p>Grenzflächenversagen</p>	

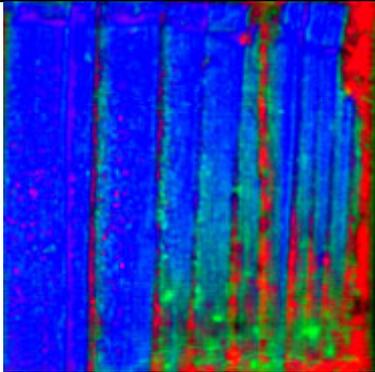
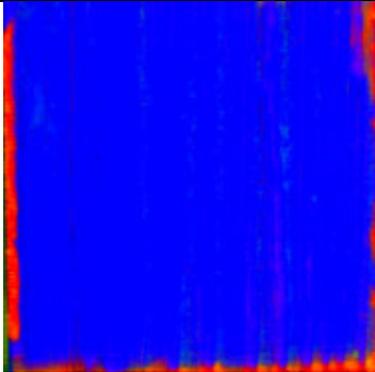
Serie:	021	Prüfkörper:	082	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.464,00	mm ²	Holzbruch:	0,03	%
Bruchkraft:	21.400	N	Betonbruch:	52,89	%
Scherfestigkeit:	8,96	N/mm ²	Grenzfläche:	47,08	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
 <p>Farbbild Betonseite</p>		 <p>HSI Betonseite</p>			
 <p>Farbbild Holzseite</p>		 <p>HSI Holzseite</p>			
 <p>Betonbruch</p>		 <p>Holzbruch</p>		 <p>Grenzflächenversagen</p>	

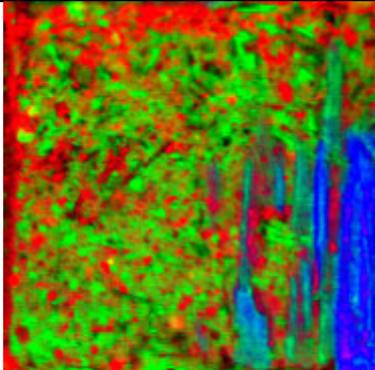
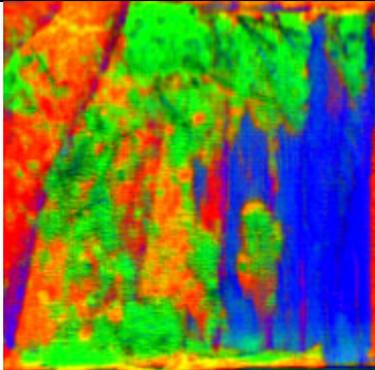
Serie:	021	Prüfkörper:	083	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.404,42	mm ²	Holzbruch:	9,76	%
Bruchkraft:	18.600	N	Betonbruch:	2,99	%
Scherfestigkeit:	7,74	N/mm ²	Grenzfläche:	87,25	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

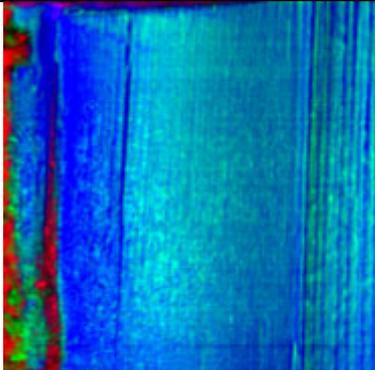
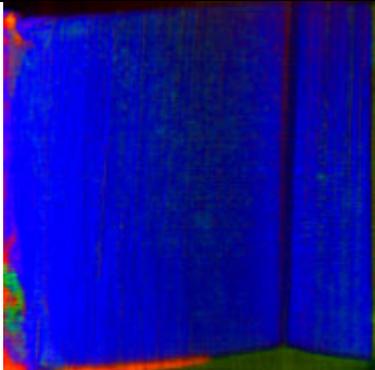
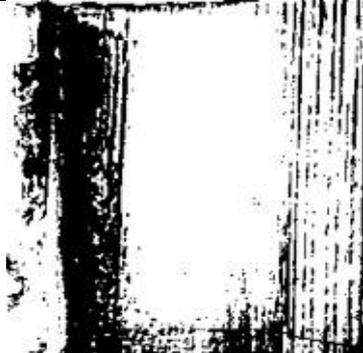
Serie:	021	Prüfkörper:	083	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	06.02.2018		
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung	15.02.2018		
Scherfläche:	2.404,42	mm ²	Holzbruch:	36,78	%
Bruchkraft:	18.500	N	Betonbruch:	1,43	%
Scherfestigkeit:	7,69	N/mm ²	Grenzfläche:	61,82	%
			Mehrfach betrachtet:	0,03	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
<p>Farbbild Betonseite</p>		<p>HSI Betonseite</p>			
					
<p>Farbbild Holzseite</p>		<p>HSI Holzseite</p>			
					
<p>Betonbruch</p>		<p>Holzbruch</p>		<p>Grenzflächenversagen</p>	

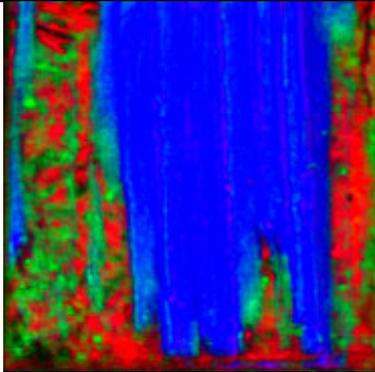
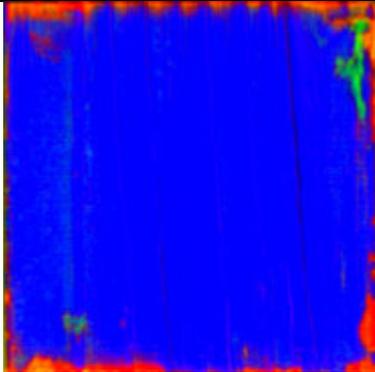
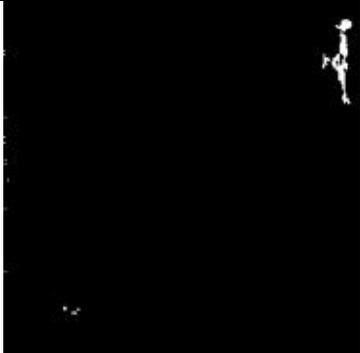
Serie:	021	Prüfkörper:	084	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.467,50	mm ²	Holzbruch:	0,87	%
Bruchkraft:	23.000	N	Betonbruch:	9,40	%
Scherfestigkeit:	9,32	N/mm ²	Grenzfläche:	89,73	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

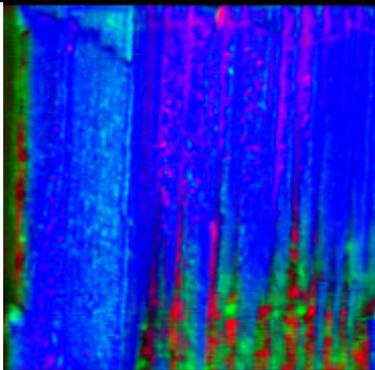
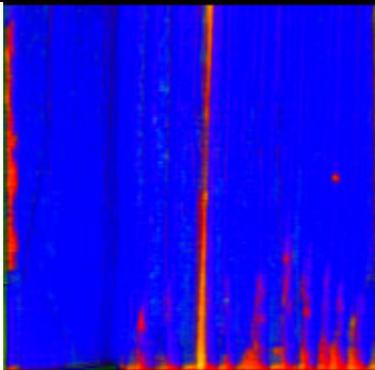
Serie:	021	Prüfkörper:	084	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.467,50	mm ²	Holzbruch:	25,16	%
Bruchkraft:	24.500	N	Betonbruch:	3,96	%
Scherfestigkeit:	9,93	N/mm ²	Grenzfläche:	70,90	%
			Mehrfach betrachtet:	0,02	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

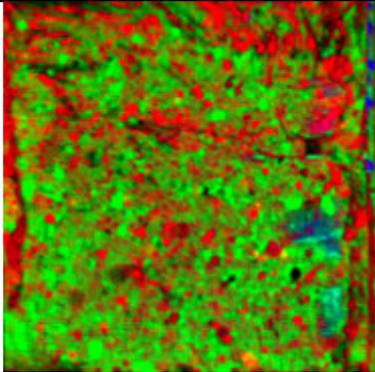
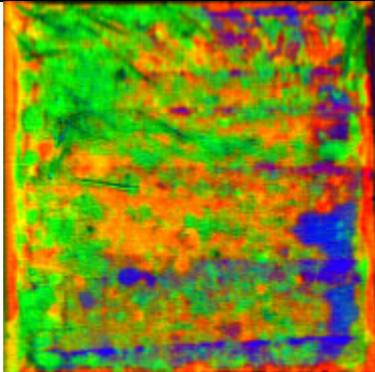
Serie:	022	Prüfkörper:	085	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.413,72	mm ²	Holzbruch:	60,58	%
Bruchkraft:	21.000	N	Betonbruch:	0,08	%
Scherfestigkeit:	8,70	N/mm ²	Grenzfläche:	39,40	%
			Mehrfach betrachtet:	0,07	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

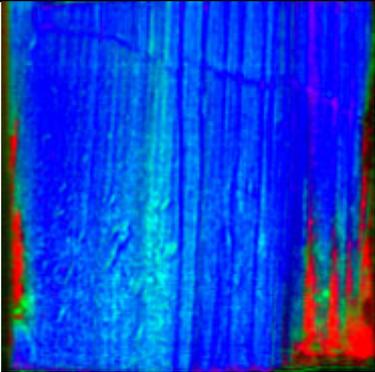
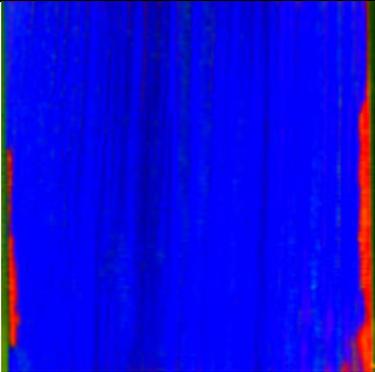
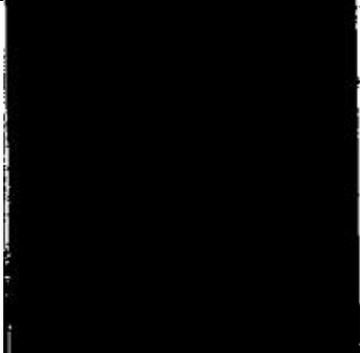
Serie:	022	Prüfkörper:	085	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.413,72	mm ²	Holzbruch:	7,72	%
Bruchkraft:	22.100	N	Betonbruch:	28,10	%
Scherfestigkeit:	9,16	N/mm ²	Grenzfläche:	64,20	%
			Mehrfach betrachtet:	0,02	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

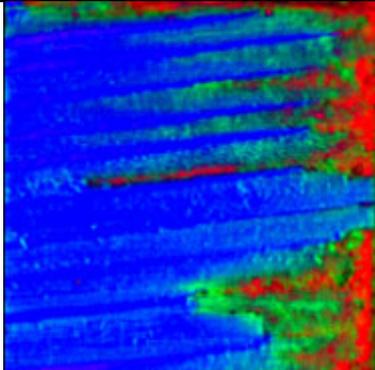
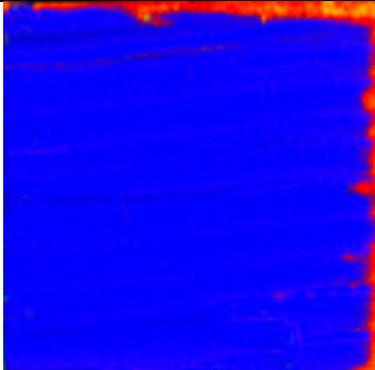
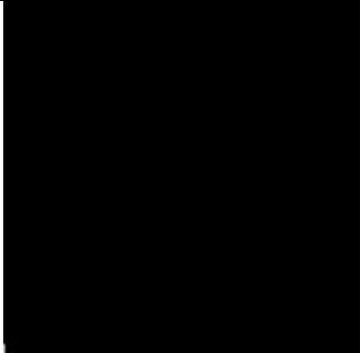
Serie:	022	Prüfkörper:	086	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.466,00	mm ²	Holzbruch:	28,54	%
Bruchkraft:	26.400	N	Betonbruch:	1,06	%
Scherfestigkeit:	10,71	N/mm ²	Grenzfläche:	70,88	%
			Mehrfach betrachtet:	0,47	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

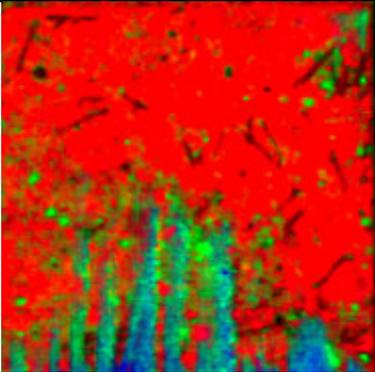
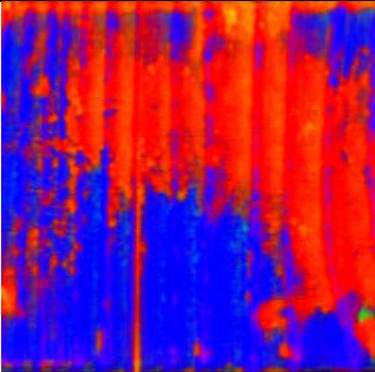
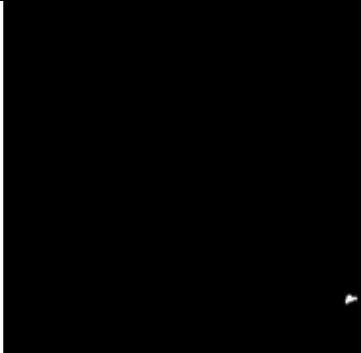
Serie:	022	Prüfkörper:	086	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.466,00	mm ²	Holzbruch:	50,52	%
Bruchkraft:	22.200	N	Betonbruch:	0,52	%
Scherfestigkeit:	9,00	N/mm ²	Grenzfläche:	48,96	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

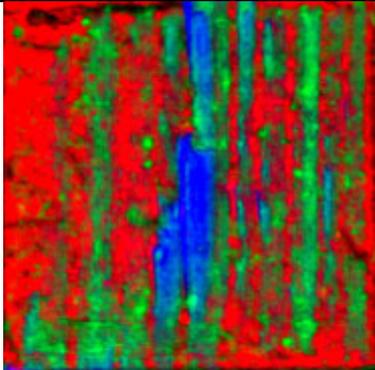
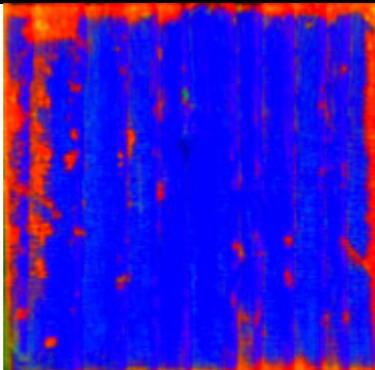
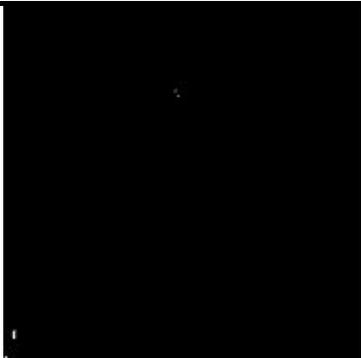
Serie:	022	Prüfkörper:	087	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.461,50	mm ²	Holzbruch:	71,61	%
Bruchkraft:	25.500	N	Betonbruch:	0,40	%
Scherfestigkeit:	10,36	N/mm ²	Grenzfläche:	28,03	%
			Mehrfach betrachtet:	0,04	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

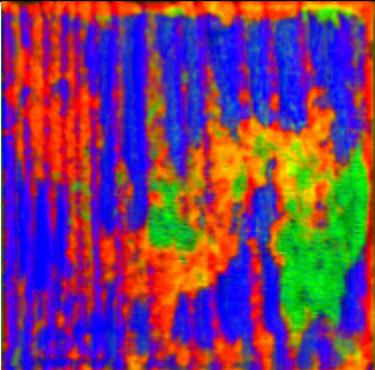
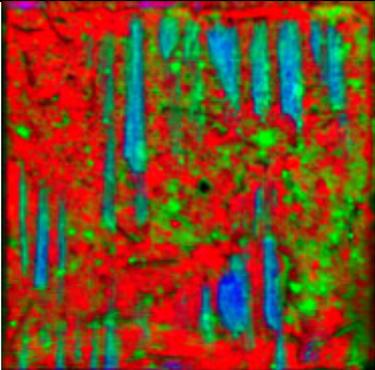
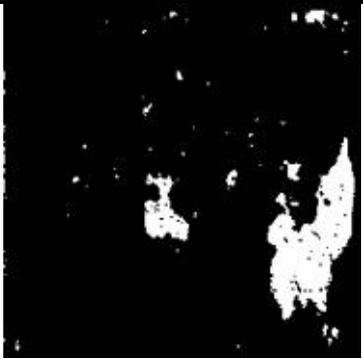
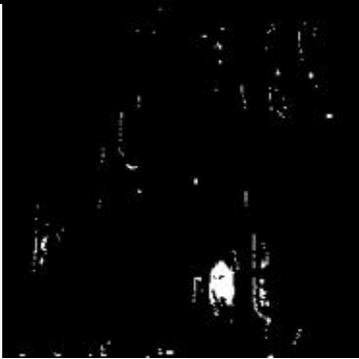
Serie:	022	Prüfkörper:	087	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	06.02.2018		
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung	15.02.2018		
Scherfläche:	2.461,50	mm ²	Holzbruch:	0,28	%
Bruchkraft:	23.000	N	Betonbruch:	27,73	%
Scherfestigkeit:	9,34	N/mm ²	Grenzfläche:	71,99	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

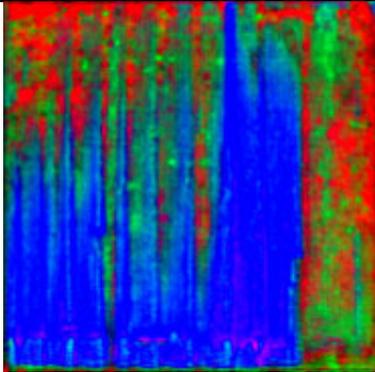
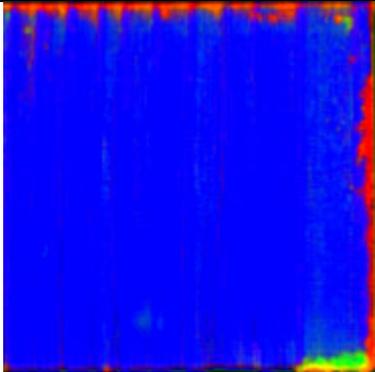
Serie:	022	Prüfkörper:	088	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.424,58	mm ²	Holzbruch:	70,55	%
Bruchkraft:	17.600	N	Betonbruch:	1,28	%
Scherfestigkeit:	7,26	N/mm ²	Grenzfläche:	28,22	%
			Mehrfach betrachtet:	0,05	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

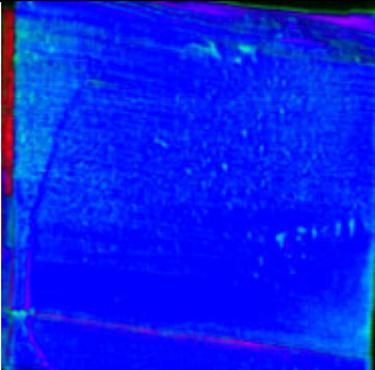
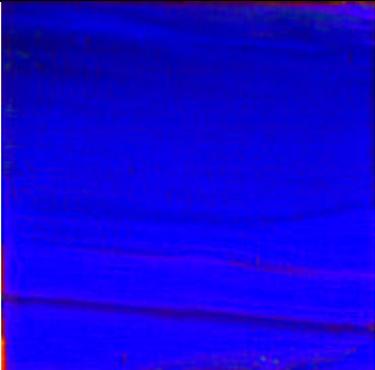
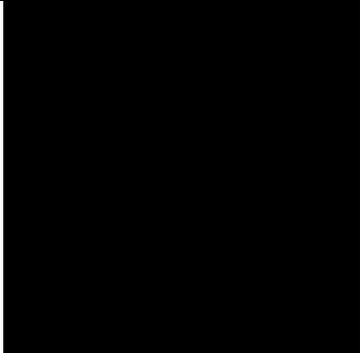
Serie:	022	Prüfkörper: 088		Scherfläche: B	
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.424,58	mm ²	Holzbruch:	61,58	%
Bruchkraft:	18.400	N	Betonbruch:	0,01	%
Scherfestigkeit:	7,59	N/mm ²	Grenzfläche:	38,41	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch	Holzbruch	Grenzflächenversagen			

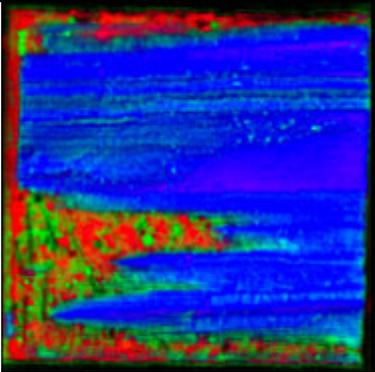
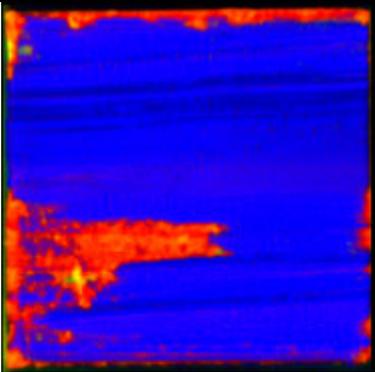
Serie:	023	Prüfkörper:	089	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.461,00	mm ²	Holzbruch:	0,59	%
Bruchkraft:	12.100	N	Betonbruch:	0,05	%
Scherfestigkeit:	4,92	N/mm ²	Grenzfläche:	99,36	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

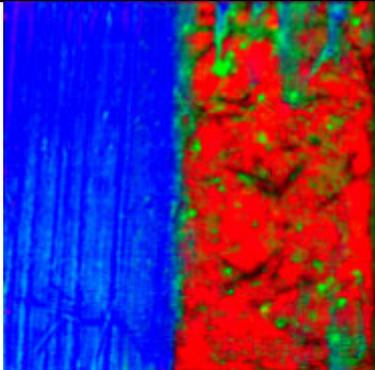
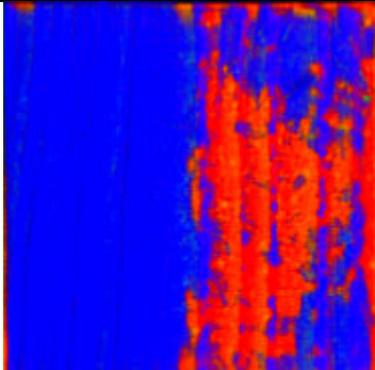
Serie:	023	Prüfkörper:	089	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.461,00	mm ²	Holzbruch:	5,18	%
Bruchkraft:	19.700	N	Betonbruch:	0,03	%
Scherfestigkeit:	8,00	N/mm ²	Grenzfläche:	94,80	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

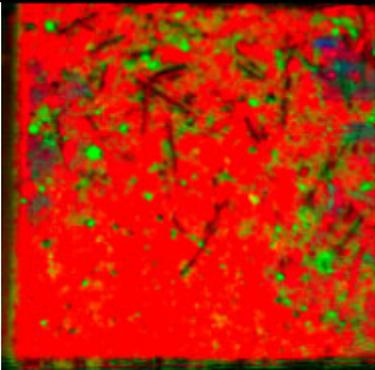
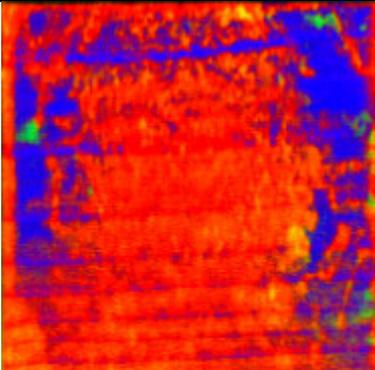
Serie:	023	Prüfkörper:	090	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.453,64	mm ²	Holzbruch:	1,33	%
Bruchkraft:	22.400	N	Betonbruch:	7,96	%
Scherfestigkeit:	9,13	N/mm ²	Grenzfläche:	90,71	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

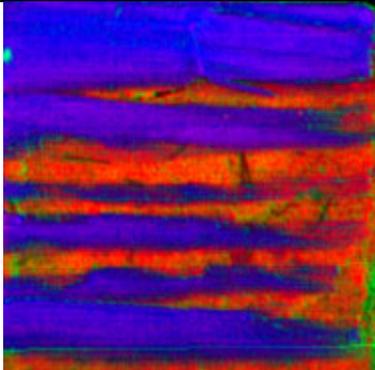
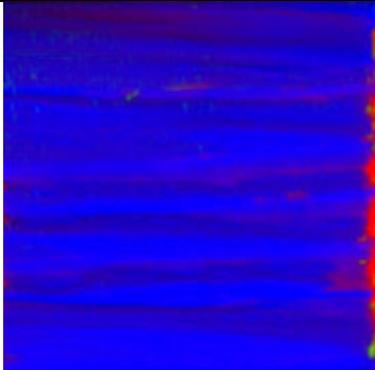
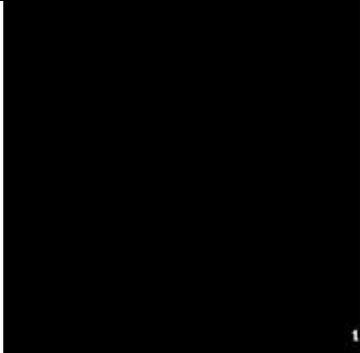
Serie:	023	Prüfkörper:	090	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.453,64	mm ²	Holzbruch:	41,47	%
Bruchkraft:	24.800	N	Betonbruch:	0,71	%
Scherfestigkeit:	10,11	N/mm ²	Grenzfläche:	57,83	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

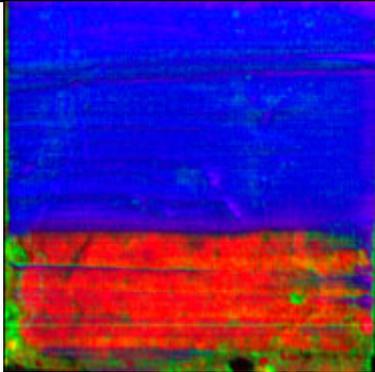
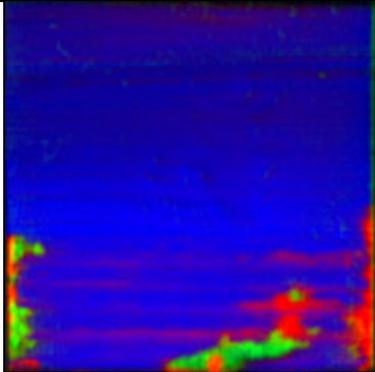
Serie:	023	Prüfkörper:	091	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.461,00	mm ²	Holzbruch:	93,08	%
Bruchkraft:	23.300	N	Betonbruch:	0,00	%
Scherfestigkeit:	9,47	N/mm ²	Grenzfläche:	6,92	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

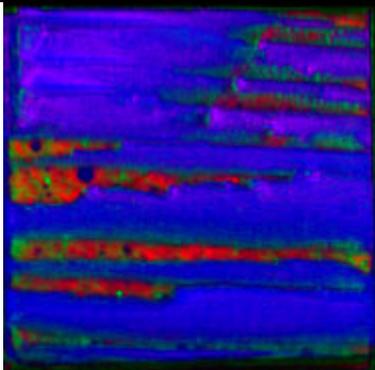
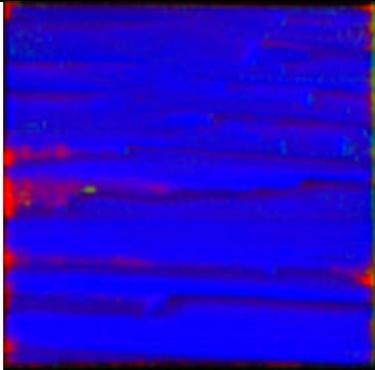
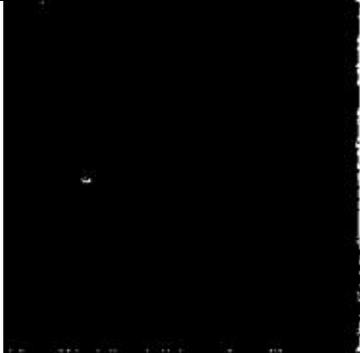
Serie:	023	Prüfkörper:	091	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	06.02.2018		
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung	15.02.2018		
Scherfläche:	2.461,00	mm ²	Holzbruch:	56,90	%
Bruchkraft:	20.400	N	Betonbruch:	0,55	%
Scherfestigkeit:	8,29	N/mm ²	Grenzfläche:	42,55	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
 <p>Farbbild Betonseite</p>		 <p>HSI Betonseite</p>			
 <p>Farbbild Holzseite</p>		 <p>HSI Holzseite</p>			
 <p>Betonbruch</p>		 <p>Holzbruch</p>		 <p>Grenzflächenversagen</p>	

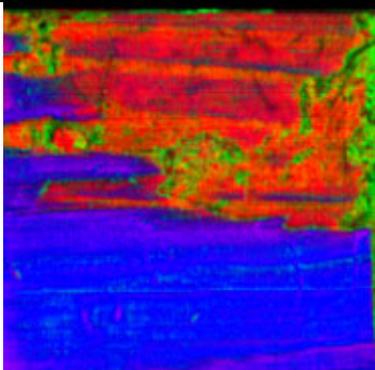
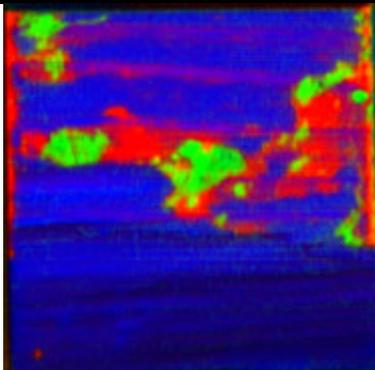
Serie:	023	Prüfkörper:	092	Scherfläche:	A
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung		06.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		15.02.2018	
Scherfläche:	2.461,50	mm ²	Holzbruch:	45,89	%
Bruchkraft:	15.300	N	Betonbruch:	0,01	%
Scherfestigkeit:	6,22	N/mm ²	Grenzfläche:	54,10	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

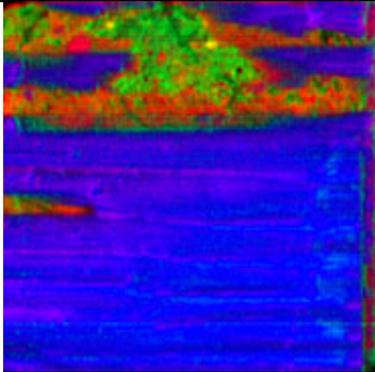
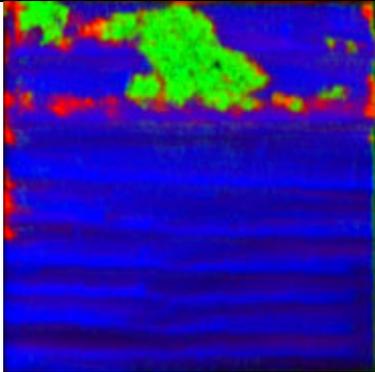
Serie:	023	Prüfkörper:	092	Scherfläche:	B
Klebstoff:	1k-PU	Datum der Verklebung	06.02.2018		
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung	15.02.2018		
Scherfläche:	2.461,50	mm ²	Holzbruch:	0,11	%
Bruchkraft:	9.710	N	Betonbruch:	0,42	%
Scherfestigkeit:	3,94	N/mm ²	Grenzfläche:	99,47	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
 <p>Farbbild Betonseite</p>		 <p>HSI Betonseite</p>			
 <p>Farbbild Holzseite</p>		 <p>HSI Holzseite</p>			
 <p>Betonbruch</p>		 <p>Holzbruch</p>		 <p>Grenzflächenversagen</p>	

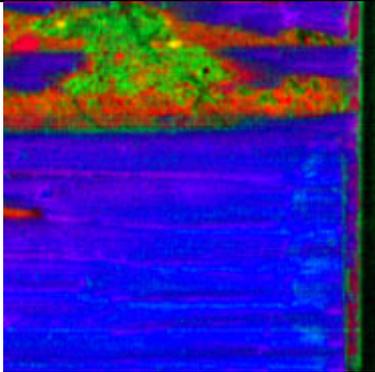
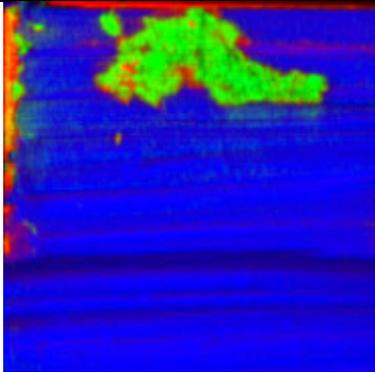
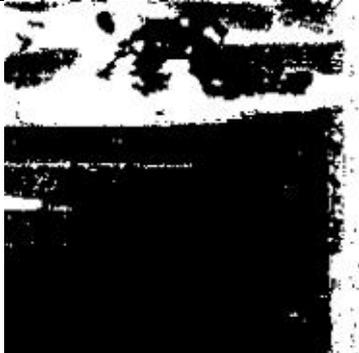
Serie:	027	Prüfkörper:	105	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.468,00	mm ²	Holzbruch:	48,60	%
Bruchkraft:	20.300	N	Betonbruch:	0,03	%
Scherfestigkeit:	8,22	N/mm ²	Grenzfläche:	51,37	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

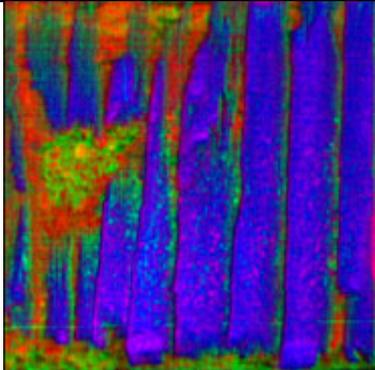
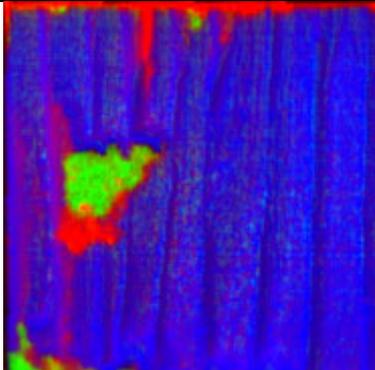
Serie:	027	Prüfkörper:	105	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.468,50	mm ²	Holzbruch:	61,14	%
Bruchkraft:	24.500	N	Betonbruch:	2,39	%
Scherfestigkeit:	9,93	N/mm ²	Grenzfläche:	36,99	%
			Mehrfach betrachtet:	0,53	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

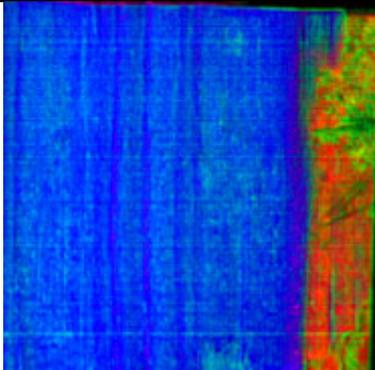
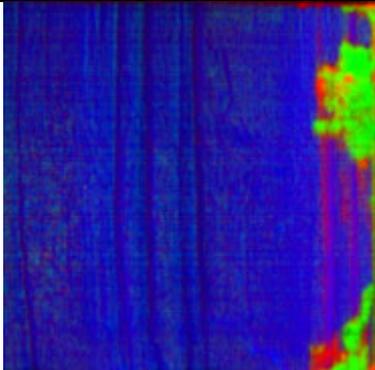
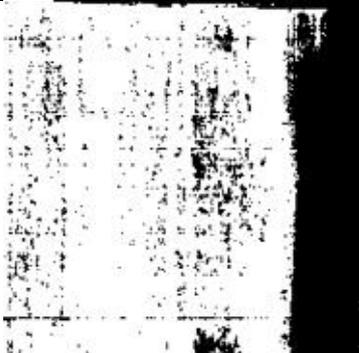
Serie:	027	Prüfkörper:	106	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.462,50	mm ²	Holzbruch:	71,74	%
Bruchkraft:	22.600	N	Betonbruch:	0,63	%
Scherfestigkeit:	9,18	N/mm ²	Grenzfläche:	27,72	%
			Mehrfach betrachtet:	0,10	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

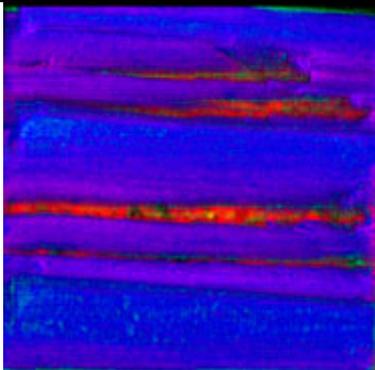
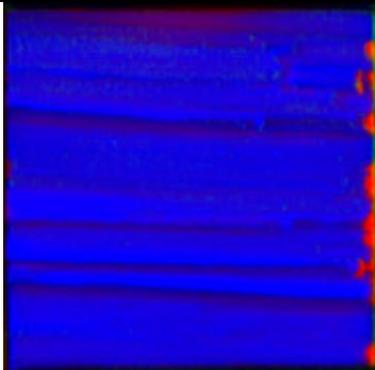
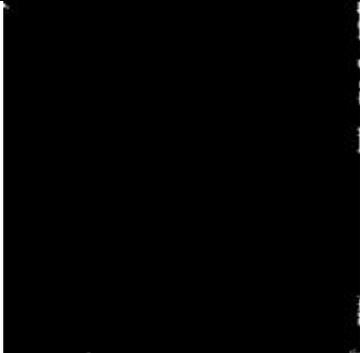
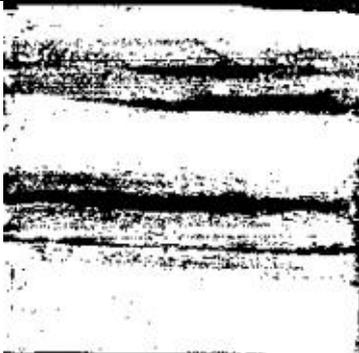
Serie:	027	Prüfkörper:	106	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.462,50	mm ²	Holzbruch:	44,52	%
Bruchkraft:	24.700	N	Betonbruch:	4,01	%
Scherfestigkeit:	10,03	N/mm ²	Grenzfläche:	51,68	%
			Mehrfach betrachtet:	0,22	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

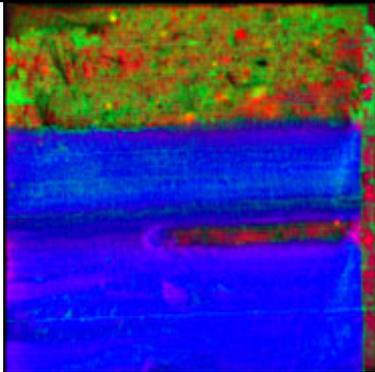
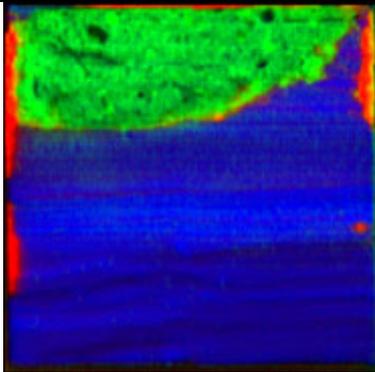
Serie:	027	Prüfkörper:	107	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.473,50	mm ²	Holzbruch:	69,26	%
Bruchkraft:	22.100	N	Betonbruch:	7,94	%
Scherfestigkeit:	8,93	N/mm ²	Grenzfläche:	22,91	%
			Mehrfach betrachtet:	0,11	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

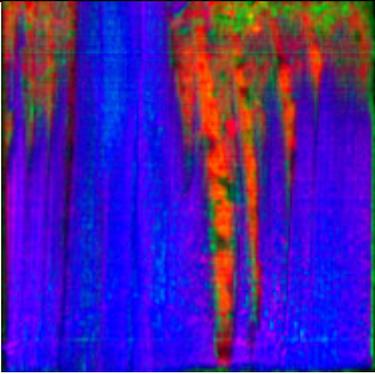
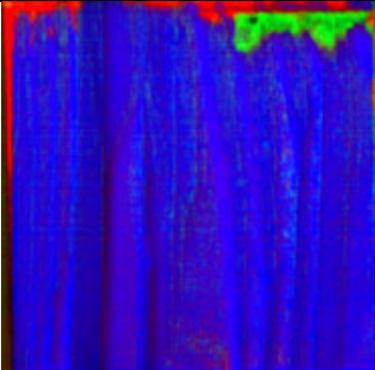
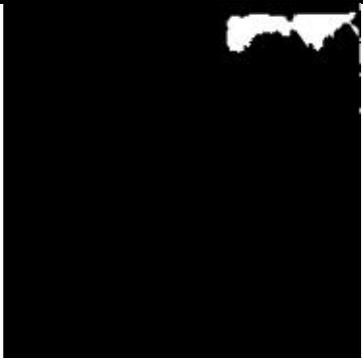
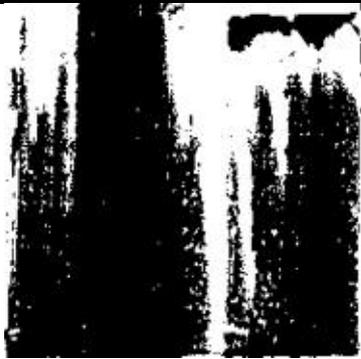
Serie:	027	Prüfkörper:	107	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.473,50	mm ²	Holzbruch:	66,90	%
Bruchkraft:	24.500	N	Betonbruch:	7,22	%
Scherfestigkeit:	9,90	N/mm ²	Grenzfläche:	26,41	%
			Mehrfach betrachtet:	0,53	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

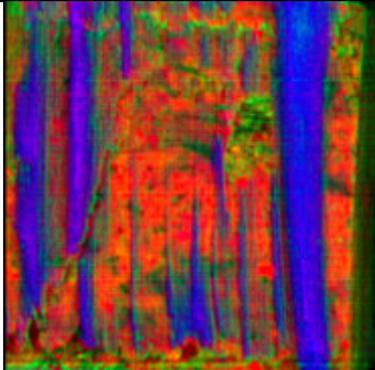
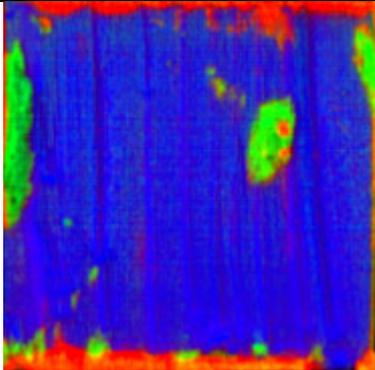
Serie:	027	Prüfkörper:	108	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.465,00	mm ²	Holzbruch:	49,16	%
Bruchkraft:	22.300	N	Betonbruch:	2,08	%
Scherfestigkeit:	9,05	N/mm ²	Grenzfläche:	48,77	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

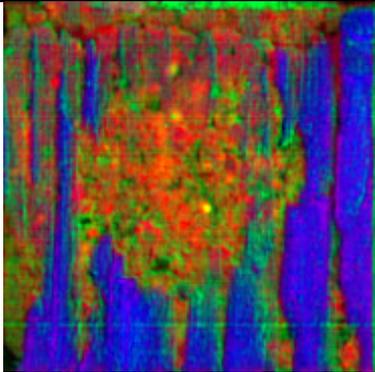
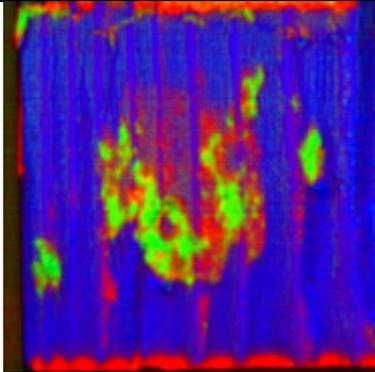
Serie:	027	Prüfkörper:	108	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.465,00	mm ²	Holzbruch:	74,20	%
Bruchkraft:	20.500	N	Betonbruch:	3,41	%
Scherfestigkeit:	8,32	N/mm ²	Grenzfläche:	22,39	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

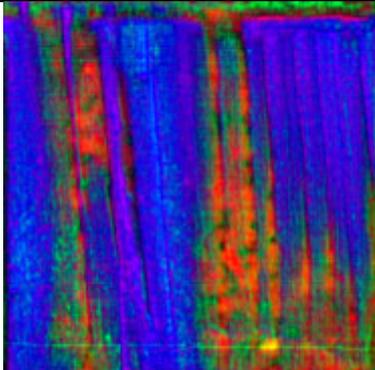
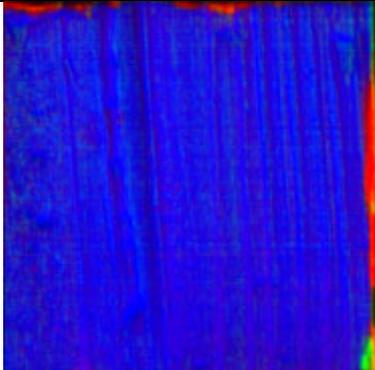
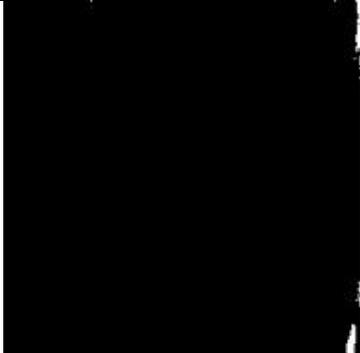
Serie:	028	Prüfkörper:	109	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.477,00	mm ²	Holzbruch:	76,16	%
Bruchkraft:	19.300	N	Betonbruch:	0,21	%
Scherfestigkeit:	7,79	N/mm ²	Grenzfläche:	23,75	%
			Mehrfach betrachtet:	0,11	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

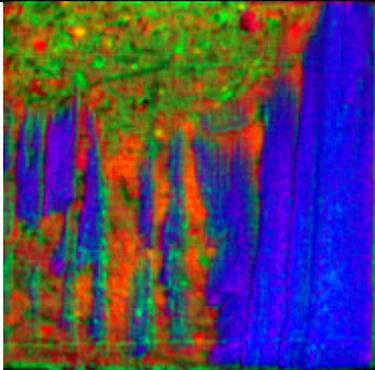
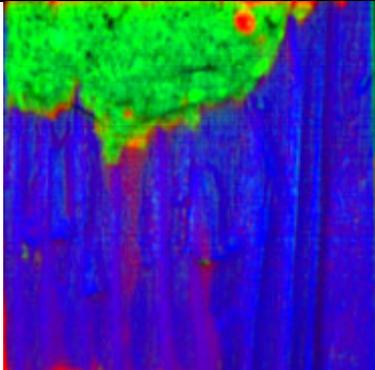
Serie:	028	Prüfkörper:	109	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.477,00	mm ²	Holzbruch:	59,82	%
Bruchkraft:	19.700	N	Betonbruch:	24,24	%
Scherfestigkeit:	7,95	N/mm ²	Grenzfläche:	16,05	%
			Mehrfach betrachtet:	0,10	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
 <p>Farbbild Betonseite</p>		 <p>HSI Betonseite</p>			
 <p>Farbbild Holzseite</p>		 <p>HSI Holzseite</p>			
 <p>Betonbruch</p>		 <p>Holzbruch</p>		 <p>Grenzflächenversagen</p>	

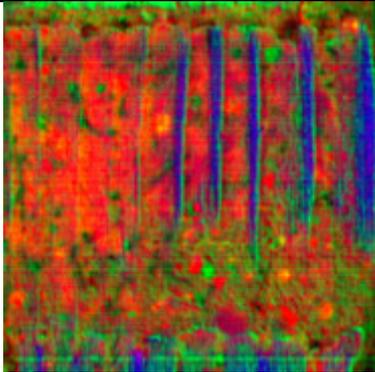
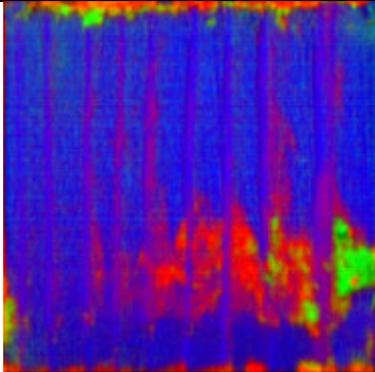
Serie:	028	Prüfkörper:	110	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.459,50	mm ²	Holzbruch:	65,48	%
Bruchkraft:	24.300	N	Betonbruch:	2,32	%
Scherfestigkeit:	9,88	N/mm ²	Grenzfläche:	32,21	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

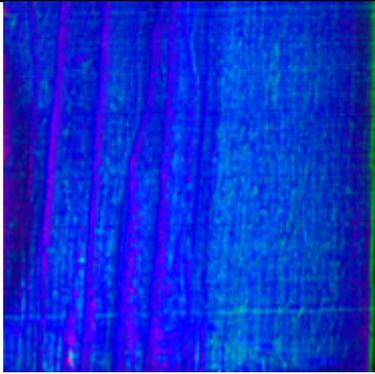
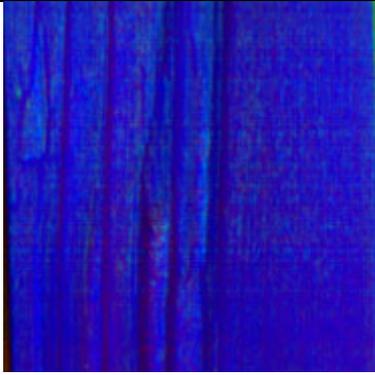
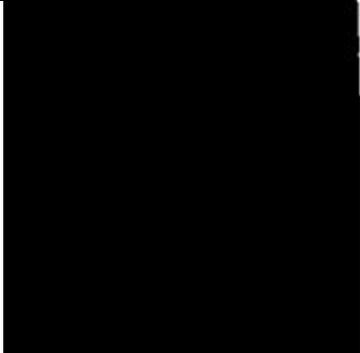
Serie:	028	Prüfkörper:	110	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.459,50	mm ²	Holzbruch:	21,18	%
Bruchkraft:	24.500	N	Betonbruch:	5,32	%
Scherfestigkeit:	9,96	N/mm ²	Grenzfläche:	74,83	%
			Mehrfach betrachtet:	1,32	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

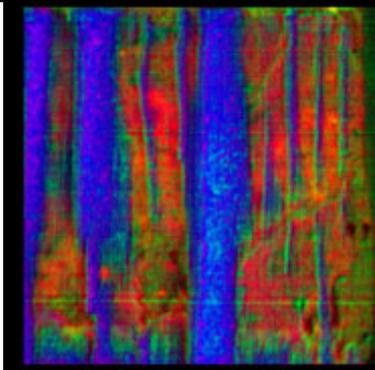
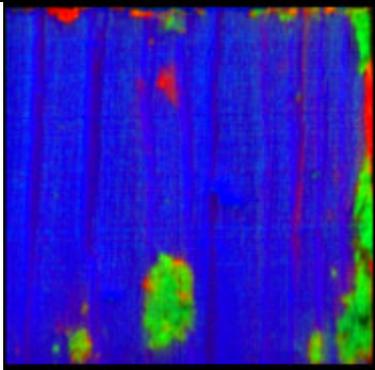
Serie:	028	Prüfkörper:	111	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.464,50	mm ²	Holzbruch:	27,38	%
Bruchkraft:	23.300	N	Betonbruch:	2,99	%
Scherfestigkeit:	9,45	N/mm ²	Grenzfläche:	70,14	%
			Mehrfach betrachtet:	0,50	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

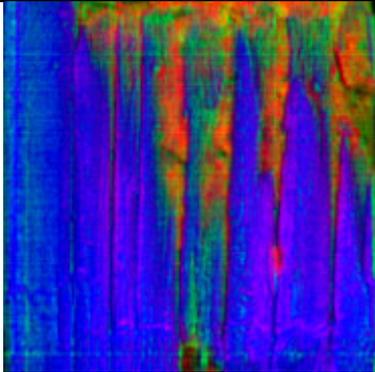
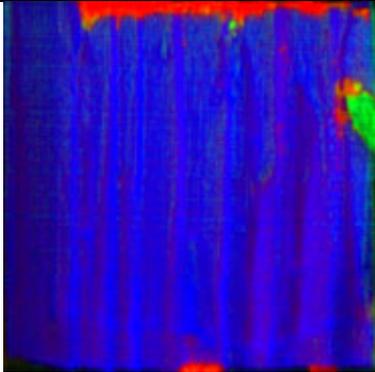
Serie:	028	Prüfkörper:	111	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.464,50	mm ²	Holzbruch:	54,64	%
Bruchkraft:	22.200	N	Betonbruch:	0,38	%
Scherfestigkeit:	9,01	N/mm ²	Grenzfläche:	45,09	%
			Mehrfach betrachtet:	0,11	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

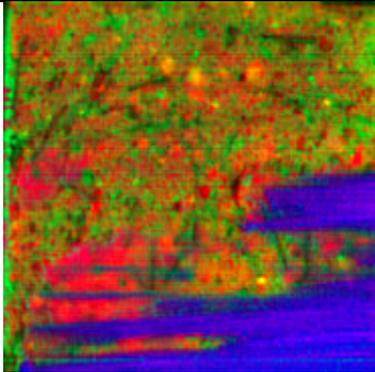
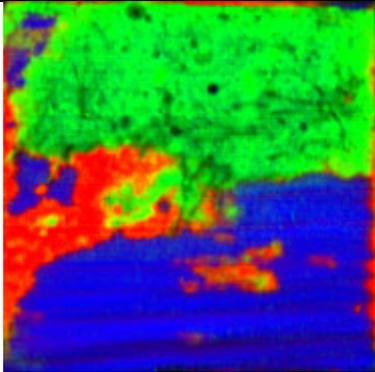
Serie:	028	Prüfkörper:	112	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.466,00	mm ²	Holzbruch:	38,06	%
Bruchkraft:	18.300	N	Betonbruch:	20,95	%
Scherfestigkeit:	7,42	N/mm ²	Grenzfläche:	41,05	%
			Mehrfach betrachtet:	0,06	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

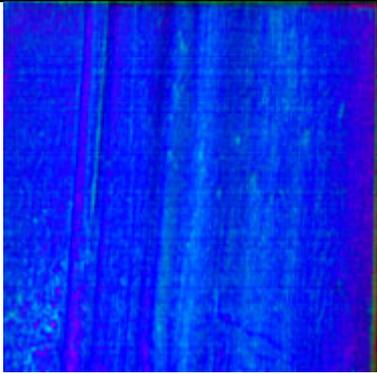
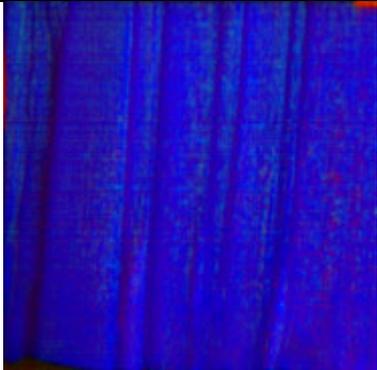
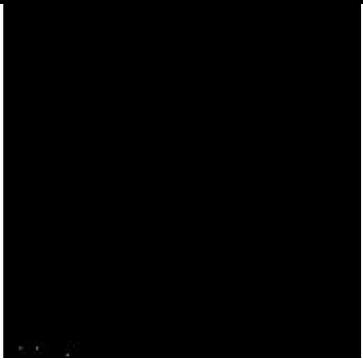
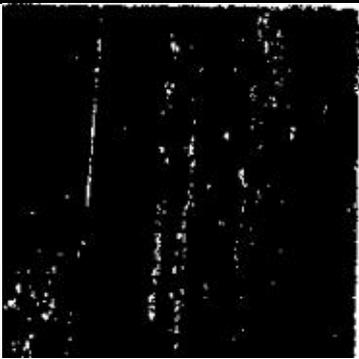
Serie:	028	Prüfkörper:	112	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.466,00	mm ²	Holzbruch:	4,97	%
Bruchkraft:	22.500	N	Betonbruch:	1,55	%
Scherfestigkeit:	9,12	N/mm ²	Grenzfläche:	93,48	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

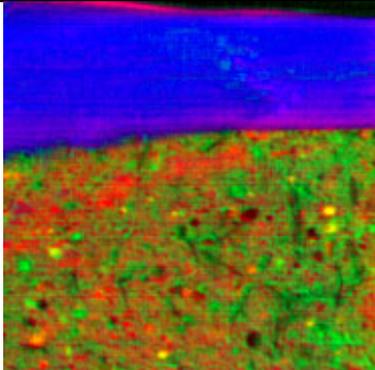
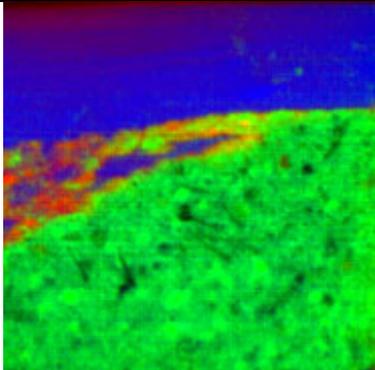
Serie:	029	Prüfkörper:	113	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.465,00	mm ²	Holzbruch:	92,77	%
Bruchkraft:	15.200	N	Betonbruch:	0,15	%
Scherfestigkeit:	6,17	N/mm ²	Grenzfläche:	7,08	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Serie:	029	Prüfkörper:	113	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.465,00	mm ²	Holzbruch:	27,89	%
Bruchkraft:	21.900	N	Betonbruch:	5,70	%
Scherfestigkeit:	8,88	N/mm ²	Grenzfläche:	66,49	%
			Mehrfach betrachtet:	0,09	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Serie:	029	Prüfkörper:	114	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.459,50	mm ²	Holzbruch:	62,49	%
Bruchkraft:	20.900	N	Betonbruch:	1,56	%
Scherfestigkeit:	8,50	N/mm ²	Grenzfläche:	36,07	%
			Mehrfach betrachtet:	0,12	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

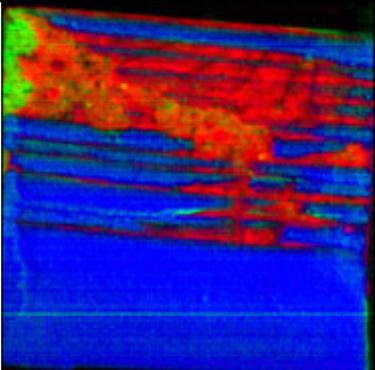
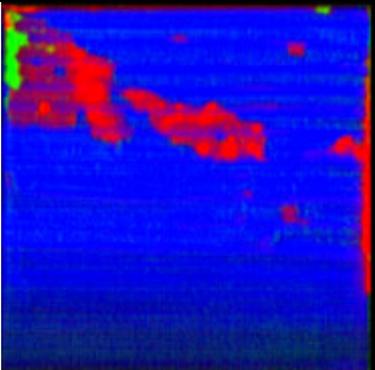
Serie:	029	Prüfkörper:	114	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.459,50	mm ²	Holzbruch:	17,88	%
Bruchkraft:	21.600	N	Betonbruch:	41,45	%
Scherfestigkeit:	8,78	N/mm ²	Grenzfläche:	40,67	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

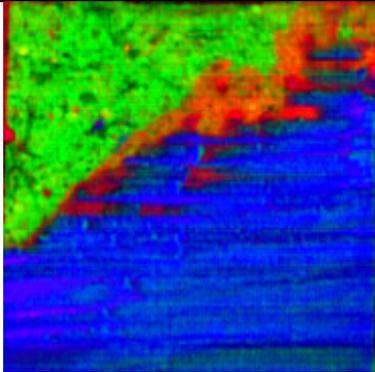
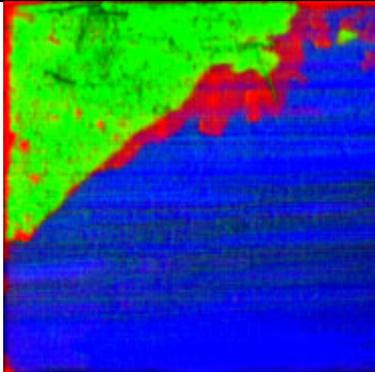
Serie:	029	Prüfkörper:	115	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung	12.02.2018		
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung	19.02.2018		
Scherfläche:	2.469,00	mm ²	Holzbruch:	97,05	%
Bruchkraft:	15.400	N	Betonbruch:	0,01	%
Scherfestigkeit:	6,24	N/mm ²	Grenzfläche:	2,95	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

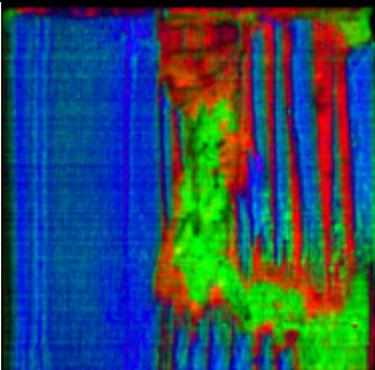
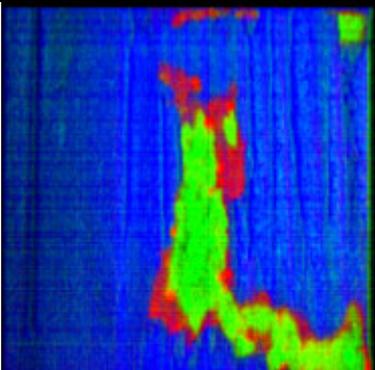
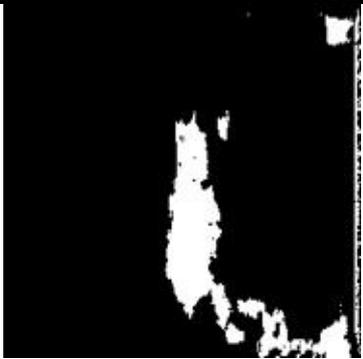
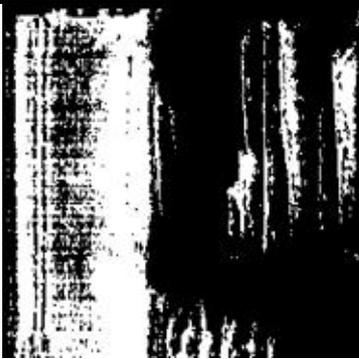
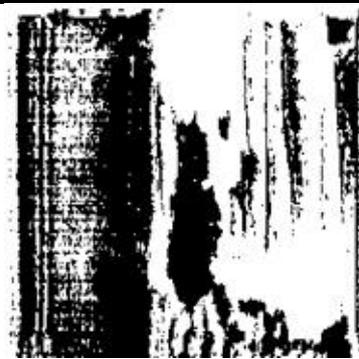
Serie:	029	Prüfkörper:	115	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.469,00	mm ²	Holzbruch:	31,25	%
Bruchkraft:	18.200	N	Betonbruch:	56,70	%
Scherfestigkeit:	7,37	N/mm ²	Grenzfläche:	12,36	%
			Mehrfach betrachtet:	0,31	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

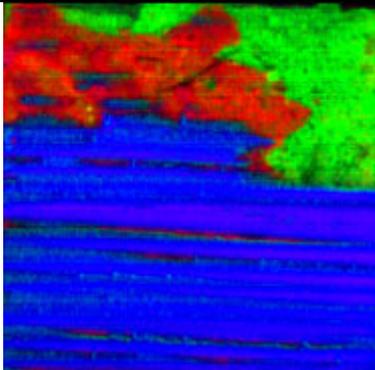
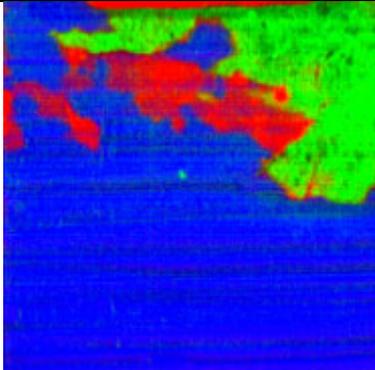
Serie:	029	Prüfkörper:	116	Scherfläche:	A
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.462,00	mm ²	Holzbruch:	%	
Bruchkraft:	22.300	N	Betonbruch:	%	
Scherfestigkeit:	9,06	N/mm ²	Grenzfläche:	%	
			Mehrfach betrachtet:	%	
			Nicht betrachtet:	%	
Prüfkörper lies sich nicht trennen.					
Farbbild Betonseite			HSI Betonseite		
Farbbild Holzseite			HSI Holzseite		
Betonbruch	Holzbruch		Grenzflächenversagen		

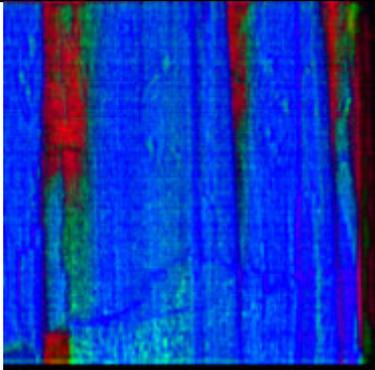
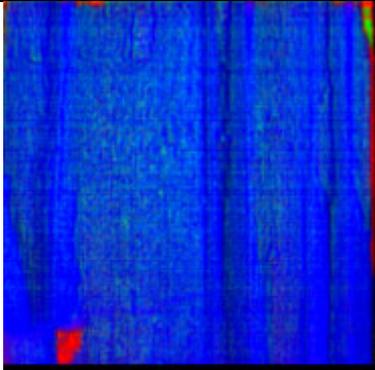
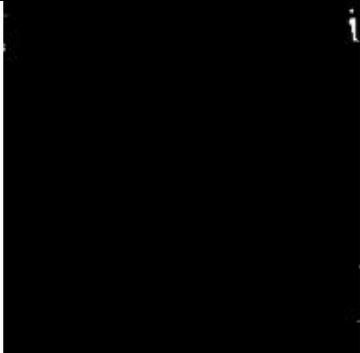
Serie:	029	Prüfkörper:	116	Scherfläche:	B
Klebstoff:	2k-PU	Datum der Verklebung		12.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.462,00	mm ²	Holzbruch:	%	
Bruchkraft:	21.300	N	Betonbruch:	%	
Scherfestigkeit:	8,65	N/mm ²	Grenzfläche:	%	
			Mehrfach betrachtet:	%	
			Nicht betrachtet:	%	
Prüfkörper lies sich nicht trennen.					
Farbbild Betonseite			HSI Betonseite		
Farbbild Holzseite			HSI Holzseite		
Betonbruch	Holzbruch		Grenzflächenversagen		

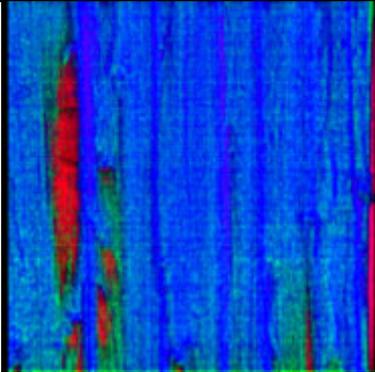
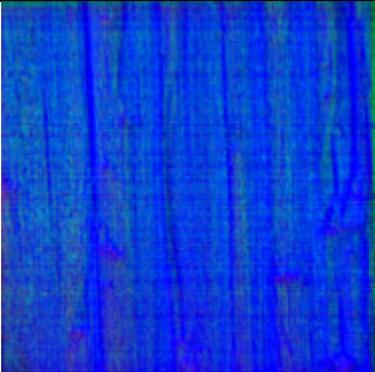
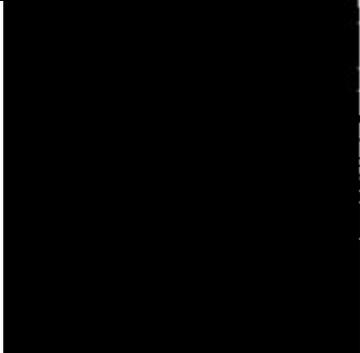
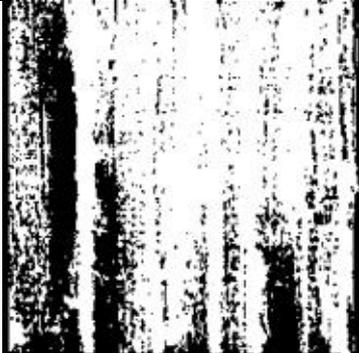
Serie:	033	Prüfkörper:	129	Scherfläche:	A
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.464,00	mm ²	Holzbruch:	54,17	%
Bruchkraft:	23.900	N	Betonbruch:	0,74	%
Scherfestigkeit:	9,70	N/mm ²	Grenzfläche:	45,09	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

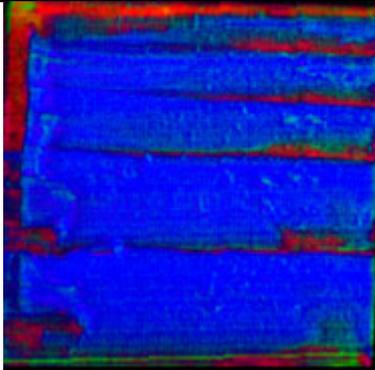
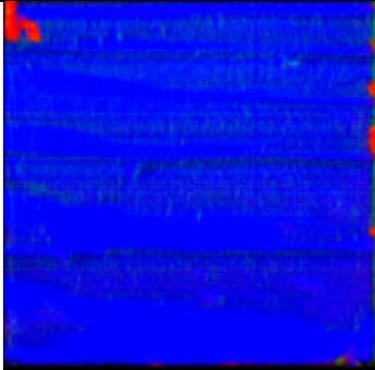
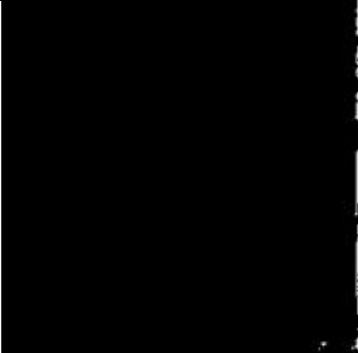
Serie:	033	Prüfkörper:	129	Scherfläche:	B
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.464,00	mm ²	Holzbruch:	53,99	%
Bruchkraft:	26.100	N	Betonbruch:	23,30	%
Scherfestigkeit:	10,59	N/mm ²	Grenzfläche:	22,72	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

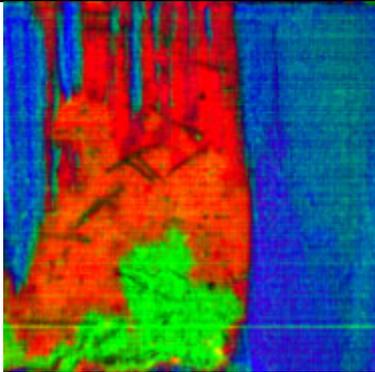
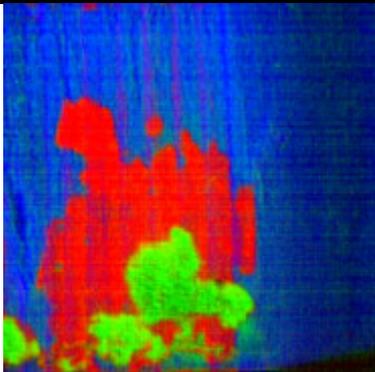
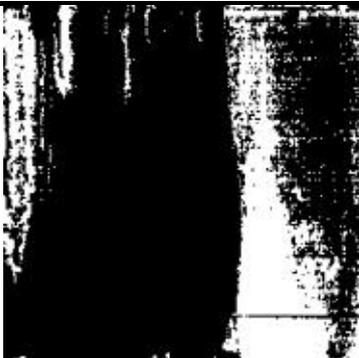
Serie:	033	Prüfkörper:	130	Scherfläche:	A
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.446,12	mm ²	Holzbruch:	34,66	%
Bruchkraft:	25.500	N	Betonbruch:	9,81	%
Scherfestigkeit:	10,42	N/mm ²	Grenzfläche:	55,81	%
			Mehrfach betrachtet:	0,28	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

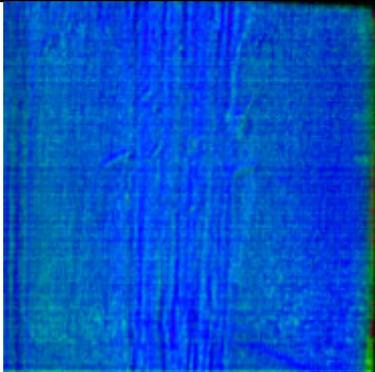
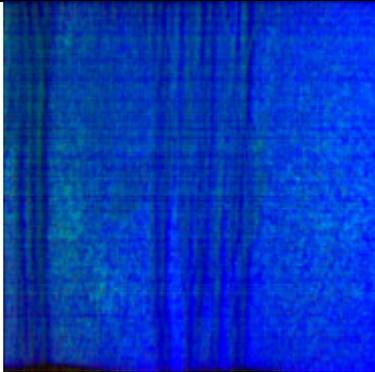
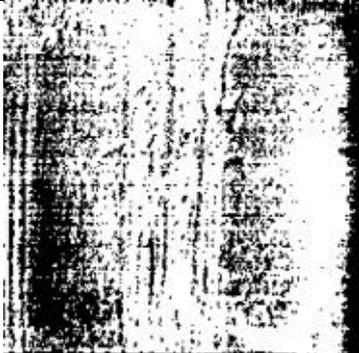
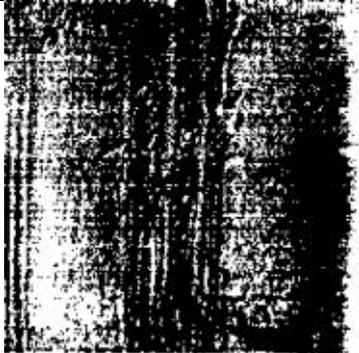
Serie:	033	Prüfkörper:	130	Scherfläche:	B
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.446,12	mm ²	Holzbruch:	60,02	%
Bruchkraft:	22.800	N	Betonbruch:	17,28	%
Scherfestigkeit:	9,32	N/mm ²	Grenzfläche:	23,11	%
			Mehrfach betrachtet:	0,41	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

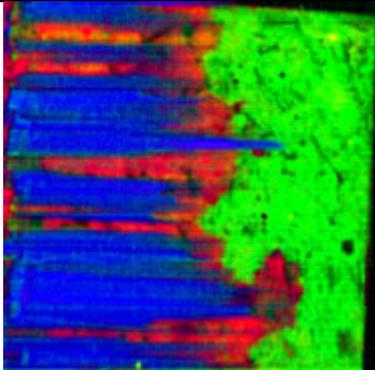
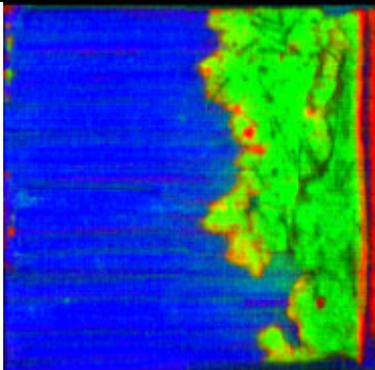
Serie:	033	Prüfkörper:	131	Scherfläche:	A
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.458,50	mm ²	Holzbruch:	69,31	%
Bruchkraft:	20.900	N	Betonbruch:	0,10	%
Scherfestigkeit:	8,50	N/mm ²	Grenzfläche:	30,60	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

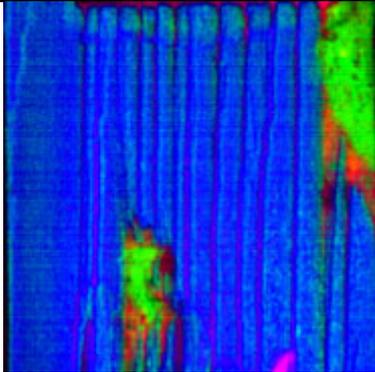
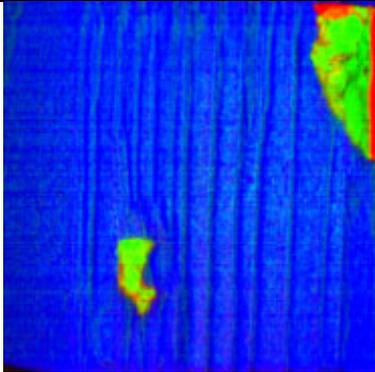
Serie:	033	Prüfkörper:	131	Scherfläche:	B
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.458,50	mm ²	Holzbruch:	69,29	%
Bruchkraft:	20.100	N	Betonbruch:	0,19	%
Scherfestigkeit:	8,18	N/mm ²	Grenzfläche:	30,52	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

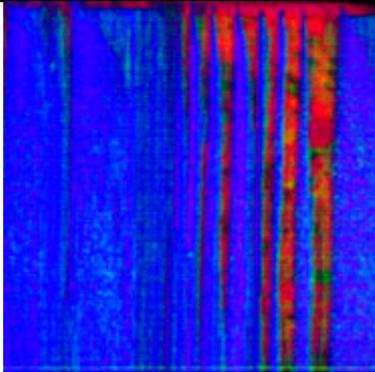
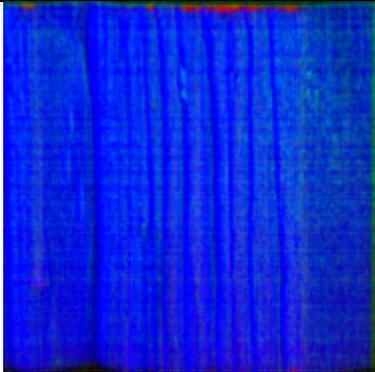
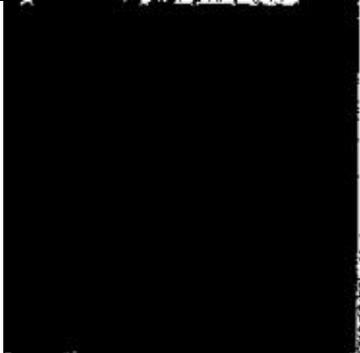
Serie:	033	Prüfkörper:	132	Scherfläche:	A
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.457,50	mm ²	Holzbruch:	75,94	%
Bruchkraft:	25.500	N	Betonbruch:	0,46	%
Scherfestigkeit:	10,38	N/mm ²	Grenzfläche:	23,65	%
			Mehrfach betrachtet:	0,06	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

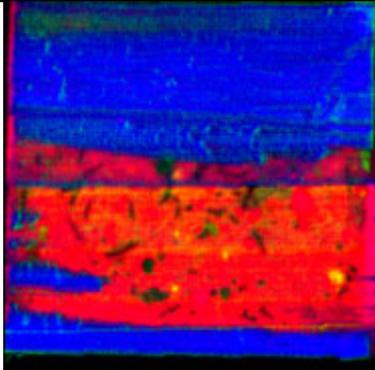
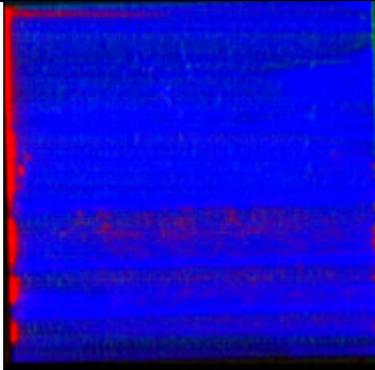
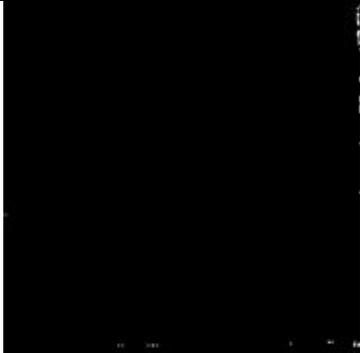
Serie:	033	Prüfkörper:	132	Scherfläche:	B
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	schalglatt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.457,50	mm ²	Holzbruch:	23,01	%
Bruchkraft:	20.600	N	Betonbruch:	6,59	%
Scherfestigkeit:	8,38	N/mm ²	Grenzfläche:	70,59	%
			Mehrfach betrachtet:	0,19	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

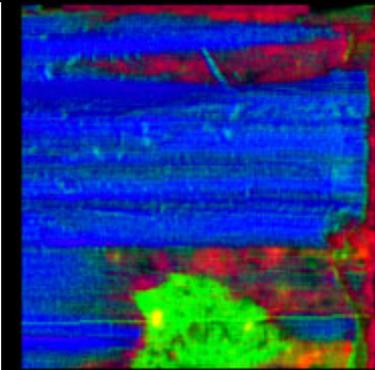
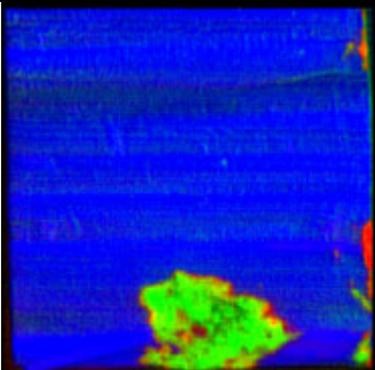
Serie:	034	Prüfkörper:	133	Scherfläche:	A
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.453,16	mm ²	Holzbruch:	69,99	%
Bruchkraft:	23.500	N	Betonbruch:	0,01	%
Scherfestigkeit:	9,58	N/mm ²	Grenzfläche:	30,00	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

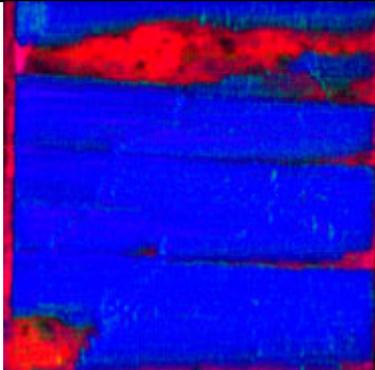
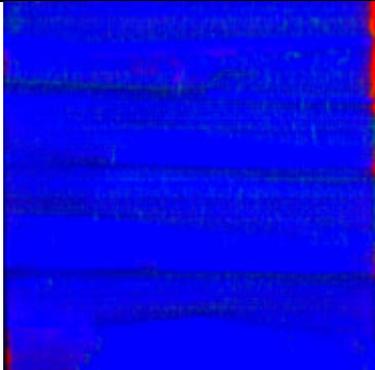
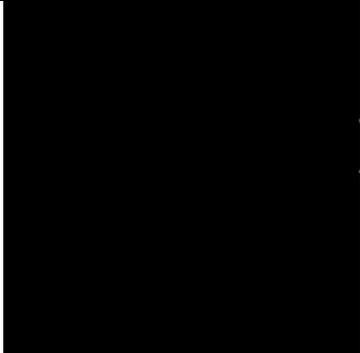
Serie:	034	Prüfkörper:	133	Scherfläche:	B
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.453,16	mm ²	Holzbruch:	35,80	%
Bruchkraft:	27.400	N	Betonbruch:	24,24	%
Scherfestigkeit:	11,71	N/mm ²	Grenzfläche:	40,03	%
			Mehrfach betrachtet:	0,07	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

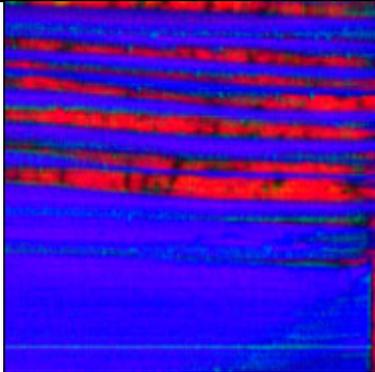
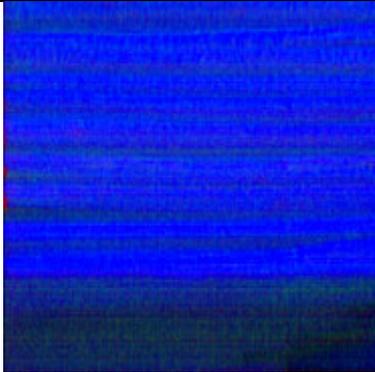
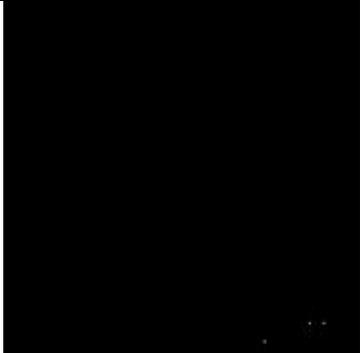
Serie:	034	Prüfkörper:	134	Scherfläche:	A
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.435,41	mm ²	Holzbruch:	77,46	%
Bruchkraft:	24.600	N	Betonbruch:	3,59	%
Scherfestigkeit:	10,10	N/mm ²	Grenzfläche:	18,98	%
			Mehrfach betrachtet:	0,04	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

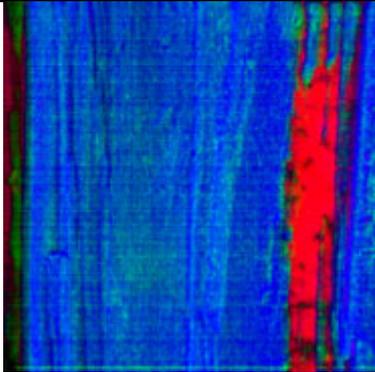
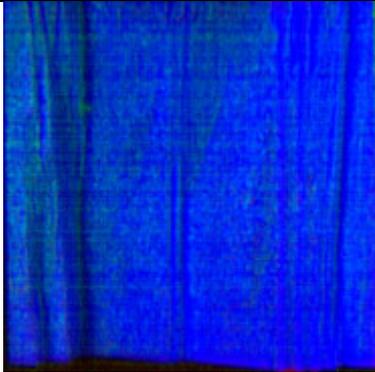
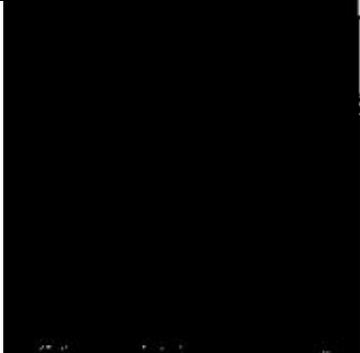
Serie:	034	Prüfkörper:	134	Scherfläche:	B
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.435,41	mm ²	Holzbruch:	79,23	%
Bruchkraft:	19.800	N	Betonbruch:	1,15	%
Scherfestigkeit:	8,13	N/mm ²	Grenzfläche:	20,37	%
			Mehrfach betrachtet:	0,75	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

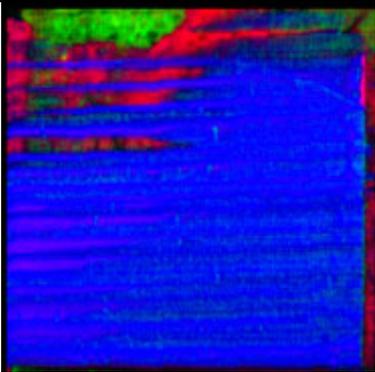
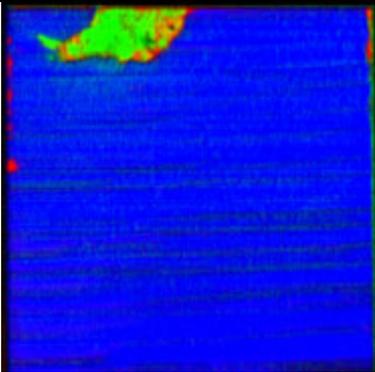
Serie:	034	Prüfkörper:	135	Scherfläche:	A
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.437,39	mm ²	Holzbruch:	46,77	%
Bruchkraft:	18.000	N	Betonbruch:	0,12	%
Scherfestigkeit:	7,38	N/mm ²	Grenzfläche:	53,13	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

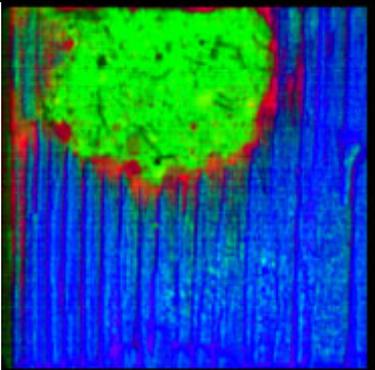
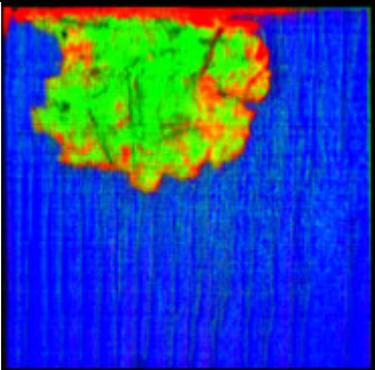
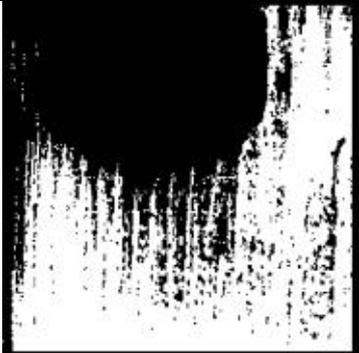
Serie:	034	Prüfkörper:	135	Scherfläche:	B
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.437,39	mm ²	Holzbruch:	52,65	%
Bruchkraft:	20.300	N	Betonbruch:	5,17	%
Scherfestigkeit:	8,33	N/mm ²	Grenzfläche:	42,18	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

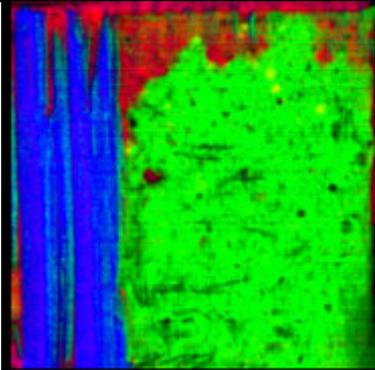
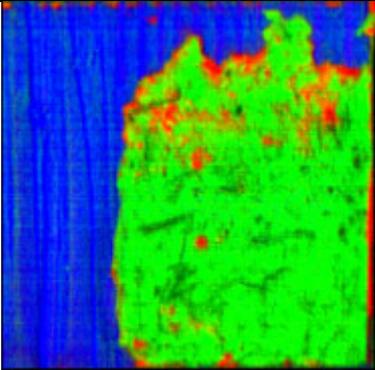
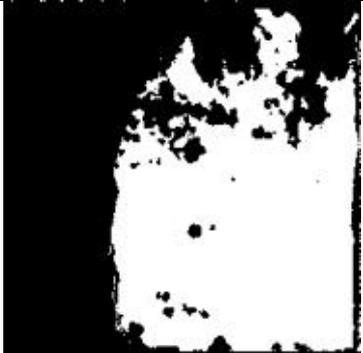
Serie:	034	Prüfkörper:	136	Scherfläche:	A
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.471,50	mm ²	Holzbruch:	78,70	%
Bruchkraft:	19.000	N	Betonbruch:	0,00	%
Scherfestigkeit:	7,69	N/mm ²	Grenzfläche:	21,30	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

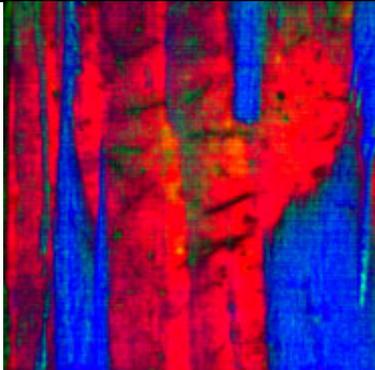
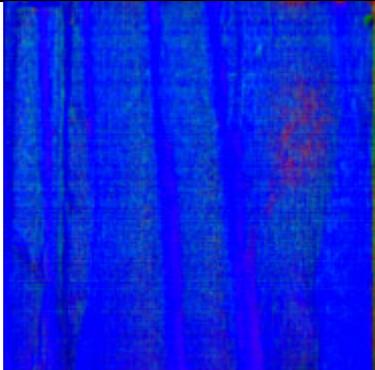
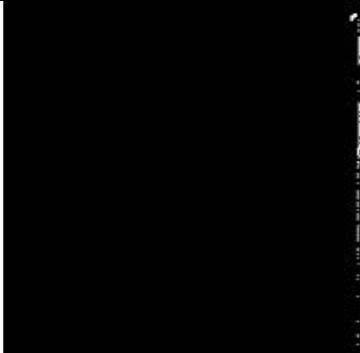
Serie:	034	Prüfkörper:	136	Scherfläche:	B
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	geschliffen	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.471,50	mm ²	Holzbruch:	73,96	%
Bruchkraft:	23.200	N	Betonbruch:	0,01	%
Scherfestigkeit:	9,39	N/mm ²	Grenzfläche:	26,04	%
			Mehrfach betrachtet:	0,01	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

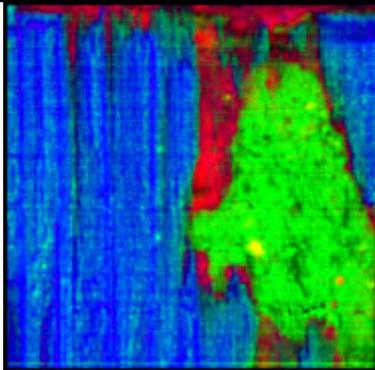
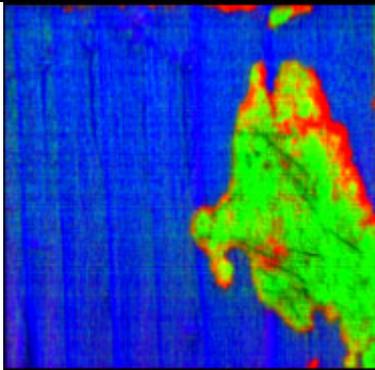
Serie:	035	Prüfkörper:	137	Scherfläche:	A
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.443,72	mm ²	Holzbruch:	61,07	%
Bruchkraft:	20.000	N	Betonbruch:	0,14	%
Scherfestigkeit:	8,18	N/mm ²	Grenzfläche:	38,93	%
			Mehrfach betrachtet:	0,14	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

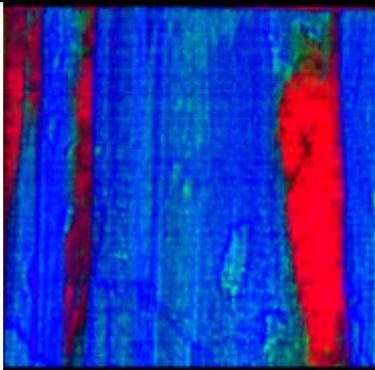
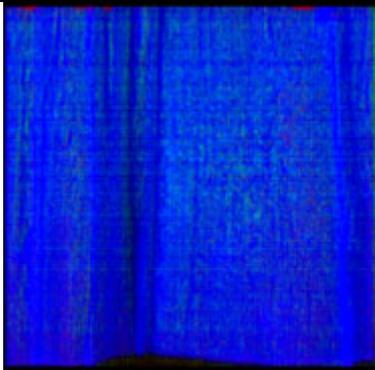
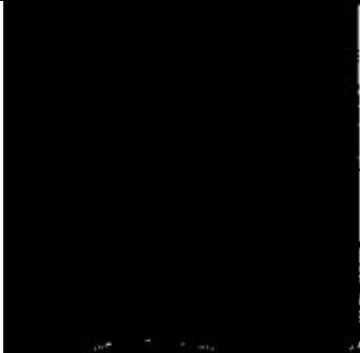
Serie:	035	Prüfkörper:	137	Scherfläche:	B
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.443,72	mm ²	Holzbruch:	75,83	%
Bruchkraft:	25.100	N	Betonbruch:	2,84	%
Scherfestigkeit:	10,27	N/mm ²	Grenzfläche:	21,36	%
			Mehrfach betrachtet:	0,03	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

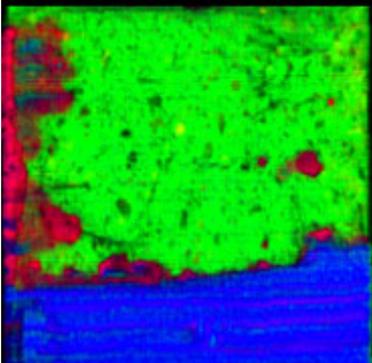
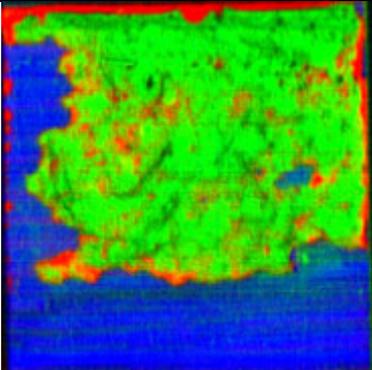
Serie:	035	Prüfkörper:	138	Scherfläche:	A
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.465,00	mm ²	Holzbruch:	48,97	%
Bruchkraft:	24.300	N	Betonbruch:	12,55	%
Scherfestigkeit:	9,86	N/mm ²	Grenzfläche:	38,48	%
			Mehrfach betrachtet:	0,00	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Serie:	035	Prüfkörper:	138	Scherfläche:	B
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.465,00	mm ²	Holzbruch:	21,97	%
Bruchkraft:	21.400	N	Betonbruch:	46,90	%
Scherfestigkeit:	8,68	N/mm ²	Grenzfläche:	31,26	%
			Mehrfach betrachtet:	0,13	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
Farbbild Betonseite		HSI Betonseite			
					
Farbbild Holzseite		HSI Holzseite			
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Serie:	035	Prüfkörper:	139	Scherfläche:	A
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.464,00	mm ²	Holzbruch:	26,45	%
Bruchkraft:	21.300	N	Betonbruch:	0,29	%
Scherfestigkeit:	8,64	N/mm ²	Grenzfläche:	73,42	%
			Mehrfach betrachtet:	0,17	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Serie:	035	Prüfkörper:	139	Scherfläche:	B
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.464,00	mm ²	Holzbruch:	38,13	%
Bruchkraft:	20.300	N	Betonbruch:	14,34	%
Scherfestigkeit:	8,24	N/mm ²	Grenzfläche:	47,59	%
			Mehrfach betrachtet:	0,06	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Serie:	035	Prüfkörper:	140	Scherfläche:	A
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.447,73	mm ²	Holzbruch:	62,42	%
Bruchkraft:	21.900	N	Betonbruch:	0,43	%
Scherfestigkeit:	8,95	N/mm ²	Grenzfläche:	37,26	%
			Mehrfach betrachtet:	0,10	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Serie:	035	Prüfkörper:	140	Scherfläche:	B
Klebstoff:	Epoxy	Datum der Verklebung		15.02.2018	
Betonoberfläche:	sandgestrahlt	Datum der Prüfung		19.02.2018	
Scherfläche:	2.447,73	mm ²	Holzbruch:	24,53	%
Bruchkraft:	24.300	N	Betonbruch:	43,97	%
Scherfestigkeit:	9,93	N/mm ²	Grenzfläche:	31,61	%
			Mehrfach betrachtet:	0,11	%
			Nicht betrachtet:	0,00	%
					
					
					
Betonbruch		Holzbruch		Grenzflächenversagen	

Anhang B

Bauteilversuche

B.1 Holzkenwerte

Nachfolgende Tabelle führt die Holzkenwerte auf, die in Begleitversuchen zu den Bauteilversuchen ermittelt wurden. Die Lamellen hierfür wurden während der Herstellung der Prüfkörper aus der laufenden Produktion entnommen. Für jede Lamelle an der Begleitversuche durchgeführt wurden, wurde visuell nach DIN EN 4074-1 [132] die Sortierklasse bestimmt. Aus jeder Lamelle wurden drei Teilstücke herausgetrennt anhand derer die Holzfeuchte nach DIN EN 13183-1 [138] und die Rohdichte, der Biege-Elastizitätsmodul sowie die Biegefestigkeit und die Druckfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 408 bestimmt wurden. Sollten in der Tabelle für einzelne Werte keine Zahlen angegeben sein, so ist meist das Korrelationskriterium aus DIN EN 408 [151] nicht erfüllt, diese Lamelle bzw. das Teilstück wurde nicht in die Auswertung der jeweiligen Holzeigenschaft miteinbezogen. Die bei der Herstellung des Brettsperrholzes eingebrachten Entlastungsnuten wurden bei der Berechnung des E-Moduls sowie die Biege- und Druckfestigkeit berücksichtigt. In der Tabelle sind im Einzelnen angegeben:

S	Sortierklasse der Lamelle oder des Teilstücks nach DIN EN 4074-1 [132]							
ρ	Rohdichte bei der angegebenen Feuchte in [kg/m ³]							
ω	Holzfeuchte in [%] nach DIN EN 13183-1 [138]							
E-Modul	Globaler Biege-Elastizitätsmodul in [N/mm ²], DIN EN 408 [151], Gleichung 2, es wurde ein mittlerer Schubmodul von 650 N/mm ² angenommen							
f_m	Biegefestigkeit in Faserrichtung, DIN EN 408 [151], Gleichung 17 in [N/mm ²]							
f_c	Druckfestigkeit in Faserrichtung, DIN EN 408 [151], Gleichung 12 in [N/mm ²]							

Lamelle	Biegezug						Druck	
	S	S	ρ [kg/m ³]	ω [%]	E-Modul [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	S	f_c [N/mm ²]
1001	r	r	424,67	11,00	8447,98	41,28	r	35,19
1002	r	r	363,74	10,17	4668,47	17,25	r	26,16
1003	S13	S13	428,85	10,94	11468,66	68,75	S10	38,17

1004	S13	S10	359,23	10,28	7754,77	42,91	S13	25,99
1005	S13	S10	362,44	10,87	-	42,63	S13	23,68
1006	S10	r	401,05	10,49	10976,35	48,40	S10	37,33
1007	S13	S7	389,42	11,01	6360,06	36,31	S7	23,98
1008	S10	S10	420,66	11,40	5168,89	39,00	S10	26,82
1009	r	S10	383,34	11,05	7573,44	26,21	r	27,61
1010	S10	S10	438,14	10,51	9910,74	49,33	S7	30,08
1011	S13	S10	464,73	11,16	12852,89	74,79	S10	44,93
1012	S13	r	455,75	10,71	7588,50	35,21	S13	35,38
1013	S13	S13	459,45	10,92	9673,18	55,60	S13	35,17
1014	S13	S13	414,68	10,48	10623,50	64,56	S10	36,27
1015	r	S7	404,26	10,79	9088,50	34,24	r	33,44
1016	S13	S13	351,39	10,35	11290,30	78,76	S7	27,12
1017	S13	S7	410,56	10,59	10508,34	54,26	S10	33,36
1018	S13	S10	443,99	10,99	12005,33	69,50	S10	37,05
1019	S13	S13	456,57	10,13	11269,34	84,74	S13	36,82
1020	S13	S10	390,15	11,20	10697,45	70,46	S10	33,46
1021	S13	S10	340,74	10,57	9960,55	51,37	S7	29,43
1022	S10	S10	451,36	11,19	12790,98	83,06	S10	41,59
1023	r	r	400,99	10,99	10319,09	59,18	r	28,33
1024	S13	S10	375,66	10,35	-	39,54	S13	26,85
1025	S13	S13	381,07	10,57	8484,12	63,64	S7	30,45
1026	r	S10	392,26	10,15	9174,50	61,11	r	27,04
1027	r	r	399,89	11,03	9102,75	54,19	r	24,54
1028	S13	S7	427,86	10,94	11533,47	72,13	S10	36,58
1029	S13	S13	403,76	10,66	11509,94	65,27	S13	37,55
1030	S13	r	418,22	10,53	10633,64	41,96	S13	37,67
1031	S13	S10	500,89	11,39	10820,39	64,98	S13	34,46
1032	r	S10	446,66	10,00	10384,76	52,95	r	34,54
1033	S13	S7	400,33	10,83	9051,17	56,01	S7	34,22
1034	S13	S10	387,31	10,62	-	32,40	S7	19,16
1035	S13	S7	411,22	10,97	11102,72	64,66	S13	33,92
1036	S13	r	389,90	11,29	-	38,44	S13	30,50
1037	S13	S10	421,37	10,69	11530,26	74,51	S13	39,76

1038	S13	S13	446,42	11,10	10685,61	73,59	S13	38,85
1039	S10	S10	482,15	11,07	-	-	S10	39,24
1040	S13	S10	402,21	11,42	12603,38	71,85	S7	37,35
1041	S10	r	387,09	10,74	9741,43	61,37	S10	28,42
1042	S13	S13	456,41	11,19	12360,58	80,77	S7	36,90
1043	S13	S10	338,47	10,76	9208,20	45,16	-	-
1044	S13	r	484,57	11,58	12292,94	67,02	S13	38,63
1045	S10	S13	422,54	11,26	9981,42	68,44	S7	34,33
1046	S13	S13	461,47	10,97	12741,46	76,60	S10	39,81
1047	S13	r	454,49	10,92	11538,57	63,01	S10	32,66
1048	S10	S10	339,02	10,91	-	-	S10	28,00
1049	S10	S10	421,18	11,36	11933,82	49,92	S7	36,72
1050	S13	S10	420,20	10,60	8987,39	52,12	S10	32,86
1051	S13	S7	425,31	11,38	11546,39	50,88	S13	37,09
1052	r	S10	372,04	10,89	8970,54	50,27	r	20,91
1053	S13	-	460,88	11,19	-	-	S13	43,36
1054	S13	S10	427,00	11,35	11421,09	67,78	S10	40,28
1055	S13	S13	385,42	10,89	10632,63	67,97	S13	36,01
1056	S13	S10	377,80	11,29	9311,59	55,60	S7	30,15
1057	S10	S7	423,87	11,21	-	66,98	S10	35,88
1058	S13	S10	403,42	10,86	11111,10	60,183	-	-
1059	S13	S13	430,86	11,26	10314,52	53,81	S13	32,92
1060	S13	S13	428,45	11,44	11848,92	73,56	S10	33,68
1061	S13	S10	394,74	10,54	9015,24	57,48	S10	33,66
1062	S13	S7	420,15	11,44	-	51,27	S10	31,48
1063	S13	S13	479,75	11,62	11520,52	53,07	S13	36,93
1064	S13	S10	424,79	11,08	10325,57	56,35	S10	35,48

B.2 Festbetonkennwerte

Nachfolgend sind die in den Begleitversuchen bestimmten Festbetonkennwerte wiedergegeben. Die Festbetonkennwerte wurde in Anlehnung an DIN EN 12390 [135–137] bestimmt, da zum einen nicht nach 28 Tagen geprüft wurde und zum anderen da die Lagerung der Prüfkörper für die Begleitversuche unter den gleichen Umgebungsbedingungen stattfand als die in den Bauteilversuchen verwendeten Prüfkörper. Insgesamt wurden jeweils sechs Würfel mit Abmessungen 150 mm x 150 mm x 150 mm, sechs Zylinder mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm sowie sechs Biegezugbalken mit den Abmessungen 150 mm x 150 mm x 700 mm geprüft. Die Prüfung erfolgte kurze Zeit nach dem Ende der Bauteilversuche. Nachfolgend sind kurz die in der Tabelle verwendeten Bezeichnungen erörtert:

- $f_{c,cube}$ Würfeldruckfestigkeit in Anlehnung DIN EN 12390-3 [136] in N/mm²
 $f_{c,cyl}$ Zylinderdruckfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 12390-3 [136] in N/mm²
 E_c Elastizitätsmodul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 [135] in N/mm²
 f_{ct} Biegezugfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 12390-5[137]in N/mm²

Herstelldatum	Prüfdatum	$f_{c,cube}$ [N/mm ²]	$f_{c,cyl}$ [N/mm ²]	E_c [N/mm ²]	f_{ct} [N/mm ²]
16.05.2019	23.07.2019	123,9	129,1	46705	9,21
16.05.2019	23.07.2019	127,1	130,3	47006	8,77
16.05.2019	23.07.2019	126,3	135,5	46444	9,54
20.05.2019	23.07.2019	130,6	134,9	46808	7,59
20.05.2019	23.07.2019	132,7	131,6	46698	6,85
20.05.2019	23.07.2019	133,5	133,7	46984	6,82

B.3 Versuchsergebnisse der Bauteilversuche

Nachfolgende Tabelle fasst die Versuchsergebnisse kurz zusammen und gibt für jeden Versuch die Maximalkraft P_{max} , die Verformung in Wandmitte bei Maximalkraft $w_{P,max}$ sowie die Holzfeuchte ρ gemessen kurz vor Versuchsdurchführung wieder. Die Holzfeuchte wurde mit einem elektrischen Holzfeuchtemessgerät beidseitig jedes Prüfkörpers an Wandkopf, Wandmitte und Wandfuß gemessen und wird gemittelt für einen Prüfkörper angegeben.

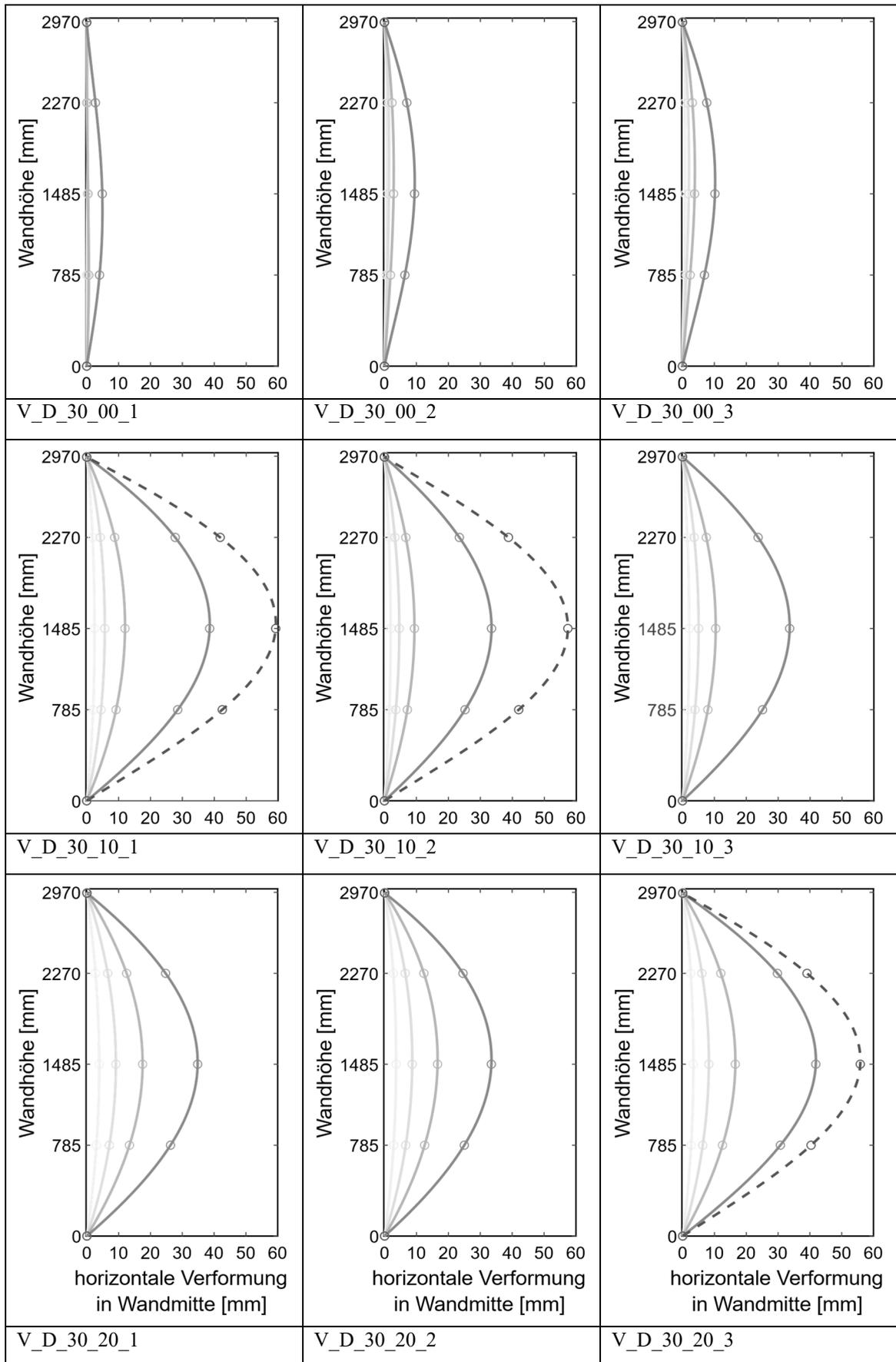
Versuch	P_{max} kN	$w_{P,max}$ mm	ρ %
V_A_30_00_1	1074,48	9,27	-
V_D_30_00_1	1677,70	4,88	8,7
V_D_30_00_2	1693,92	9,42	8,9
V_D_30_00_3	1331,04	10,16	8,2
V_D_45_00_1	1805,52	10,27	-
V_A_30_10_1	733,44	31,71	-
V_D_30_10_1	925,54	38,55	8,2
V_D_30_10_2	1025,62	33,49	8,6
V_D_30_10_3	908,88	33,60	8,5
V_D_45_10_1	1329,65	34,24	-
V_D_30_20_1	710,64	34,82	8,5
V_D_30_20_2	702,7	33,48	8,6
V_D_30_20_3	832,8	41,86	9,5

Folgende Tabelle gibt für jeden Bauteilversuch die Bauteilverformung zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Versuchsdurchführung, bezogen auf die Maximalkraft P_{max} wieder. Die Kreise stellen die mit den Laserdistanzsensoren gemessenen Werte dar. Die Zwischenwerte, um die Linien darzustellen, wurden in Matlab mit einem Polynom 4. Ordnung interpoliert. Bild A-2 gibt die Legende an. Bei den zentrisch belasteten Bauteilversuchen und den Versuchen die schlagartig versagten ist die Verformung nach dem Ausknicken bzw. bei Versuchsende nicht angegeben.

Legende

- bei 25 % der Maximalkraft
- bei 50 % der Maximalkraft
- bei 75 % der Maximalkraft
- bei Maximalkraft
- - - - nach dem Ausknicken

Bild A-2: Legende für die Bauteilverformung zu unterschiedlichen Zeitpunkten



<p>V_A_30_00_1</p>	<p>V_A_30_10_1</p>	
<p>V_D_45_00_1</p>	<p>V_D_45_10_1</p>	

Anhang C

Analytische Modellierung

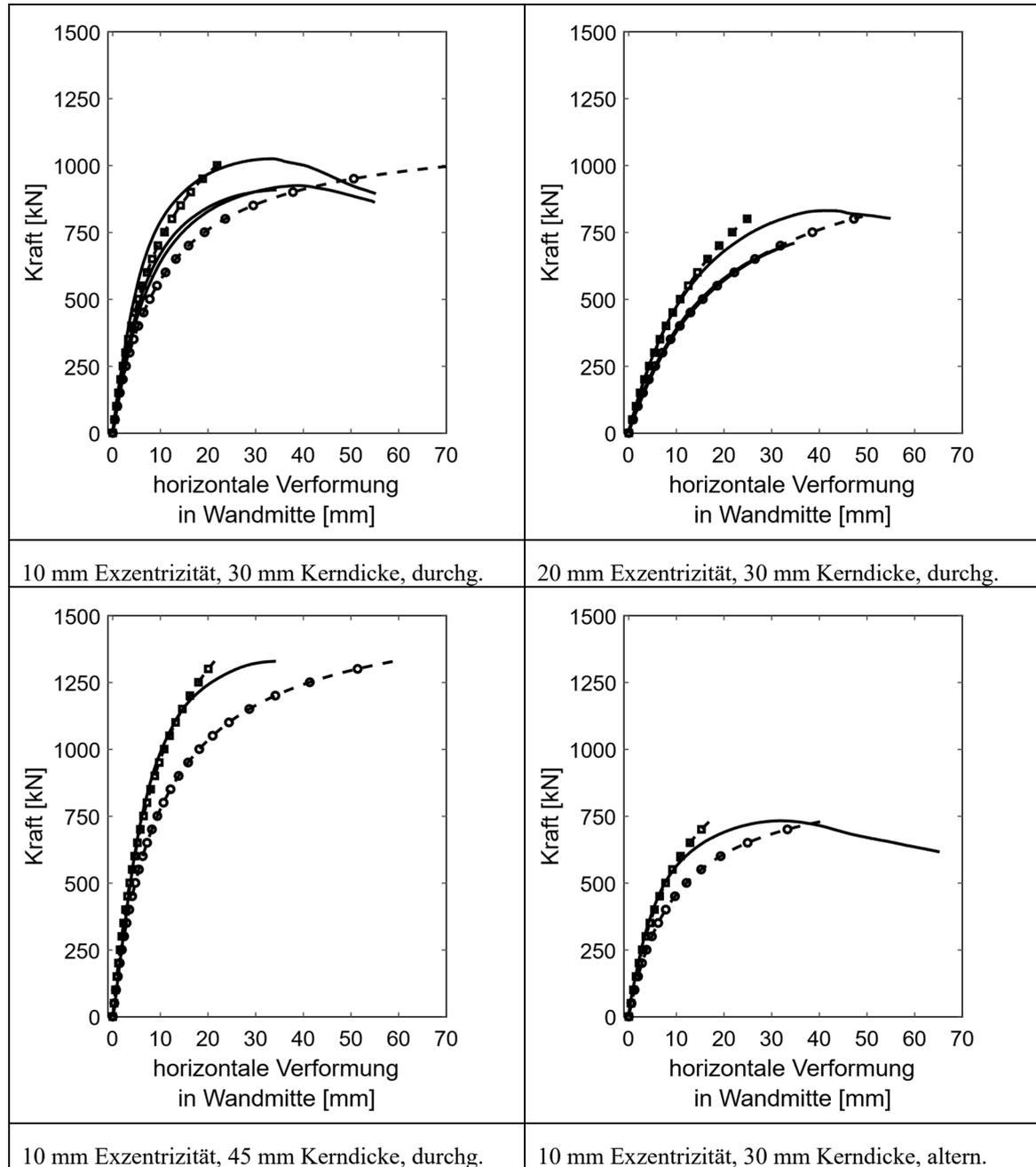
C.1 Quellcode zur Lösung der Differentialgleichung (5-11)

In Abschnitt 5.3.1 wird die Differentialgleichung für beidseitig exzentrisch belastete Stäbe mit einer Druckkraft unter Berücksichtigung von Theorie II. Ordnung hergeleitet. Die Differentialgleichung wird mit der Symbolic ToolBox des Programms Matlab gelöst. Nachfolgend ist der Quellcode zur Lösung der Differentialgleichung aufgeführt.

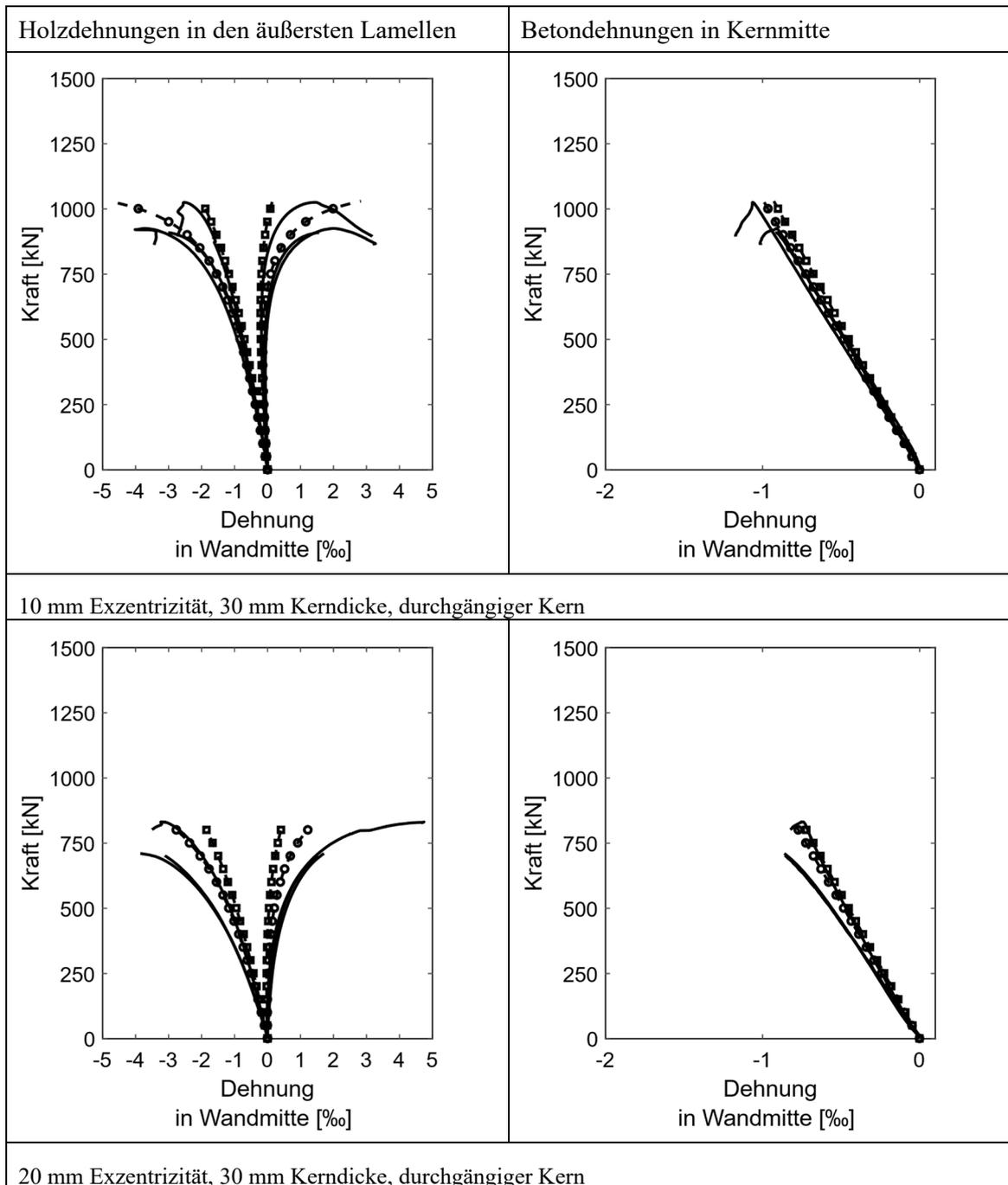
```
syms y(x) P E I beta omega a l gamma delta(x) c d e f Q(x) %  
Variablendeklaration  
ode=diff(y,x,4)+((P/(E*I*beta^2))-(omega^2)/(beta^2))*diff(y,x,2)-  
((P*omega^2)/(E*I*beta^2))*y==((P*a*omega^2)/(E*I*beta^2)); %  
Differentialgleichung  
Dy2=diff(y,x,2); % Variable für die zweite Ableitung der Verformung  
cond1=y(0)==0; % Randbedingung 1: y(0)=0;  
cond2=y(l)==0; % Randbedingung 2: y(l)=0;  
cond3=Dy2(0)==-(P*a)/(E*I); % Randbedingung 3: M(0)=P*a  
cond4=Dy2(l)==-(P*a)/(E*I); % Randbedingung 4: M(l)=P*a  
  
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4]; %Zusammenfassen der Randbedingungen  
ySol(x) = dsolve(ode,conds); % Lösen der DGL  
ySol1 = simplify(ySol); %Vereinfachen der Lösung
```

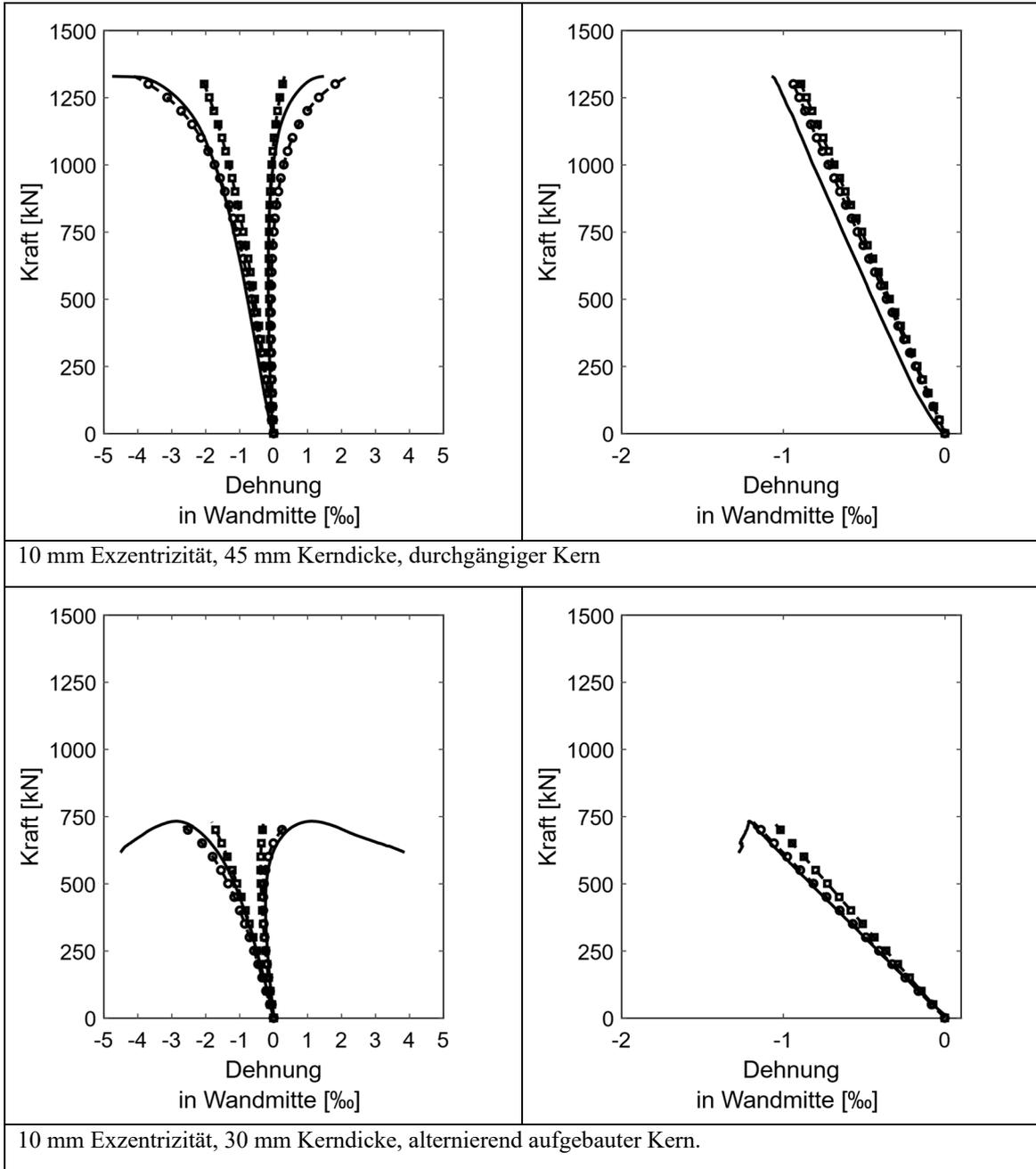
C.2 Berechnung als Stab mit zusammengesetztem Querschnitt

Verformung:



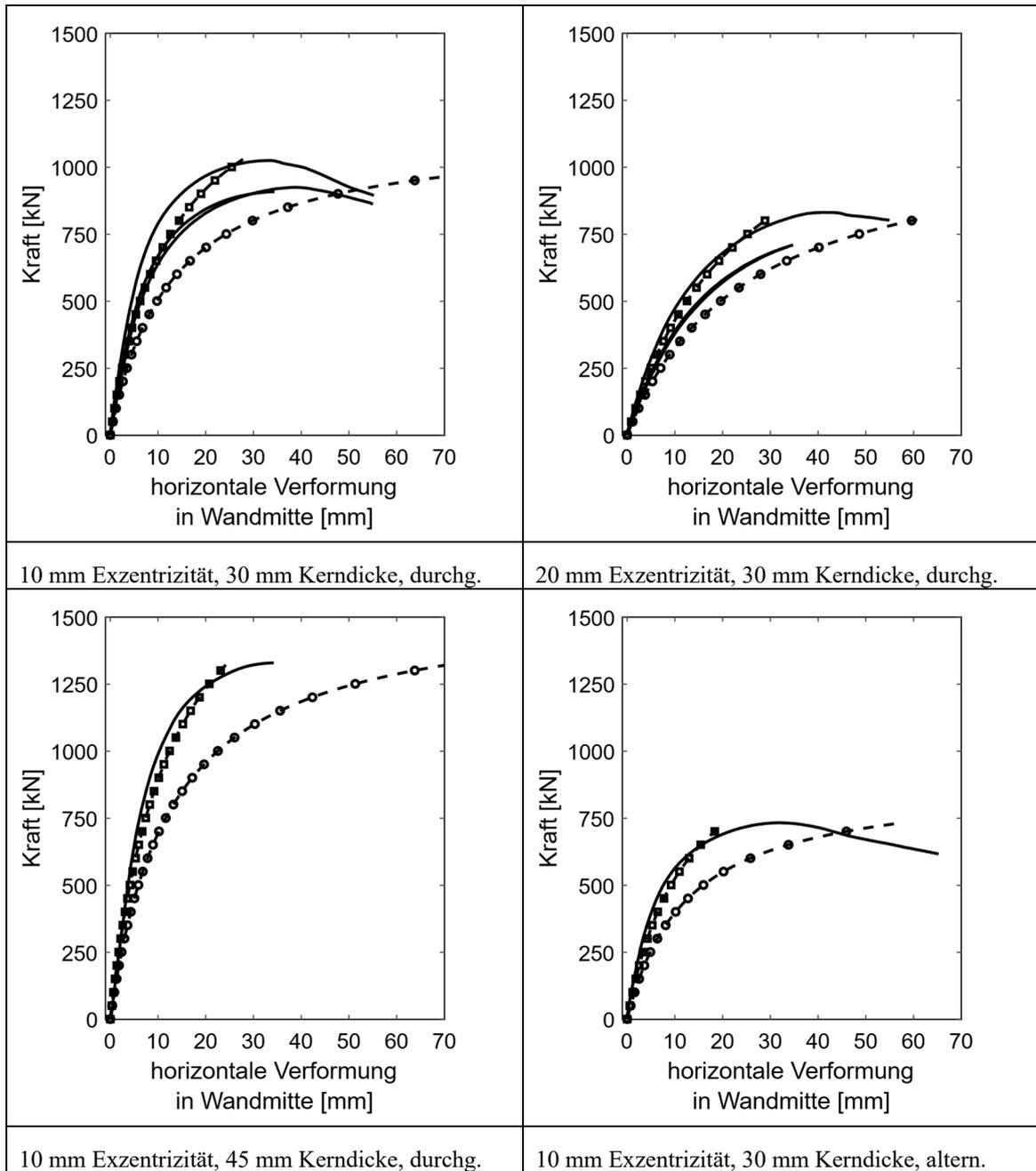
Dehnung im Holz und Beton:



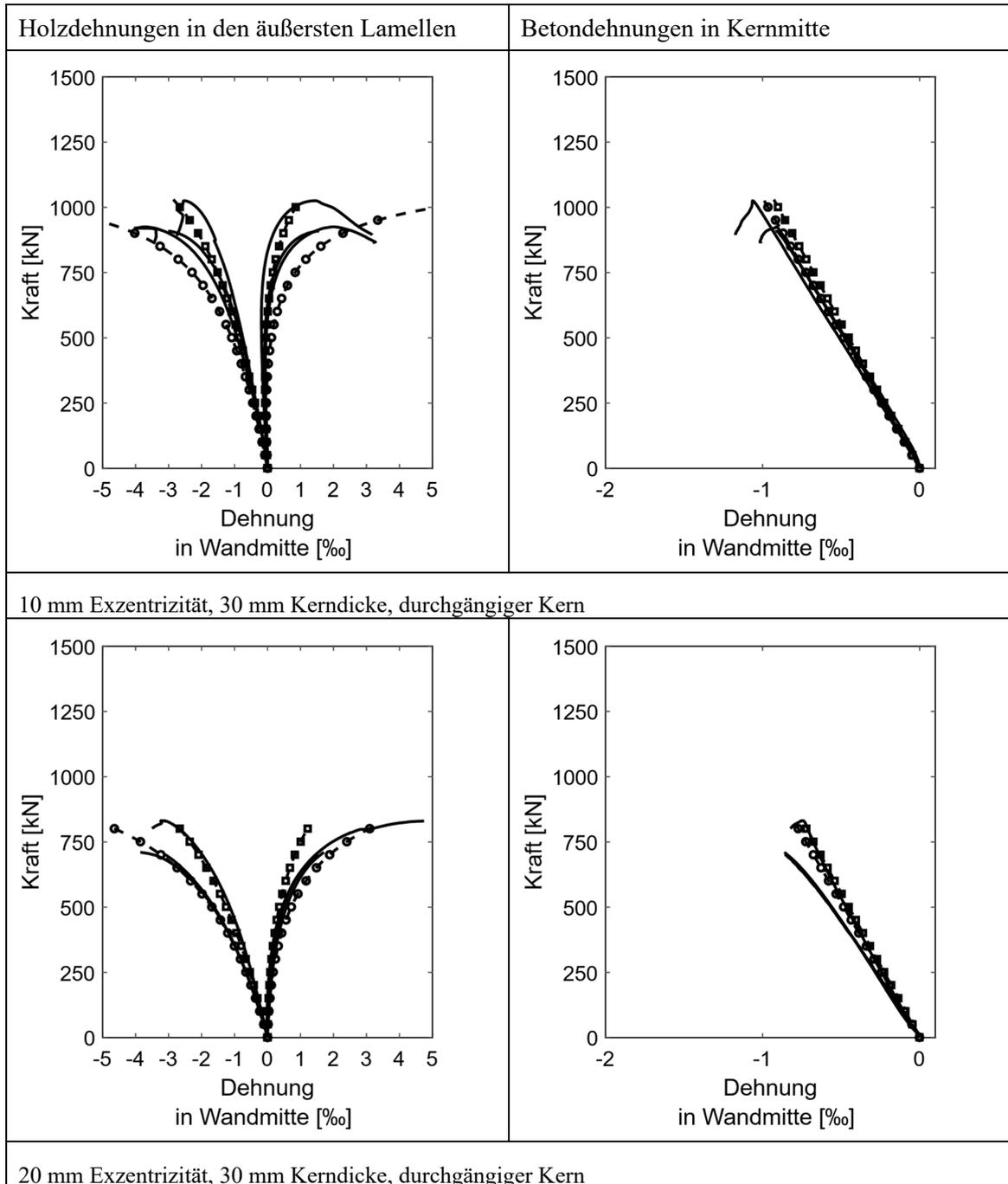


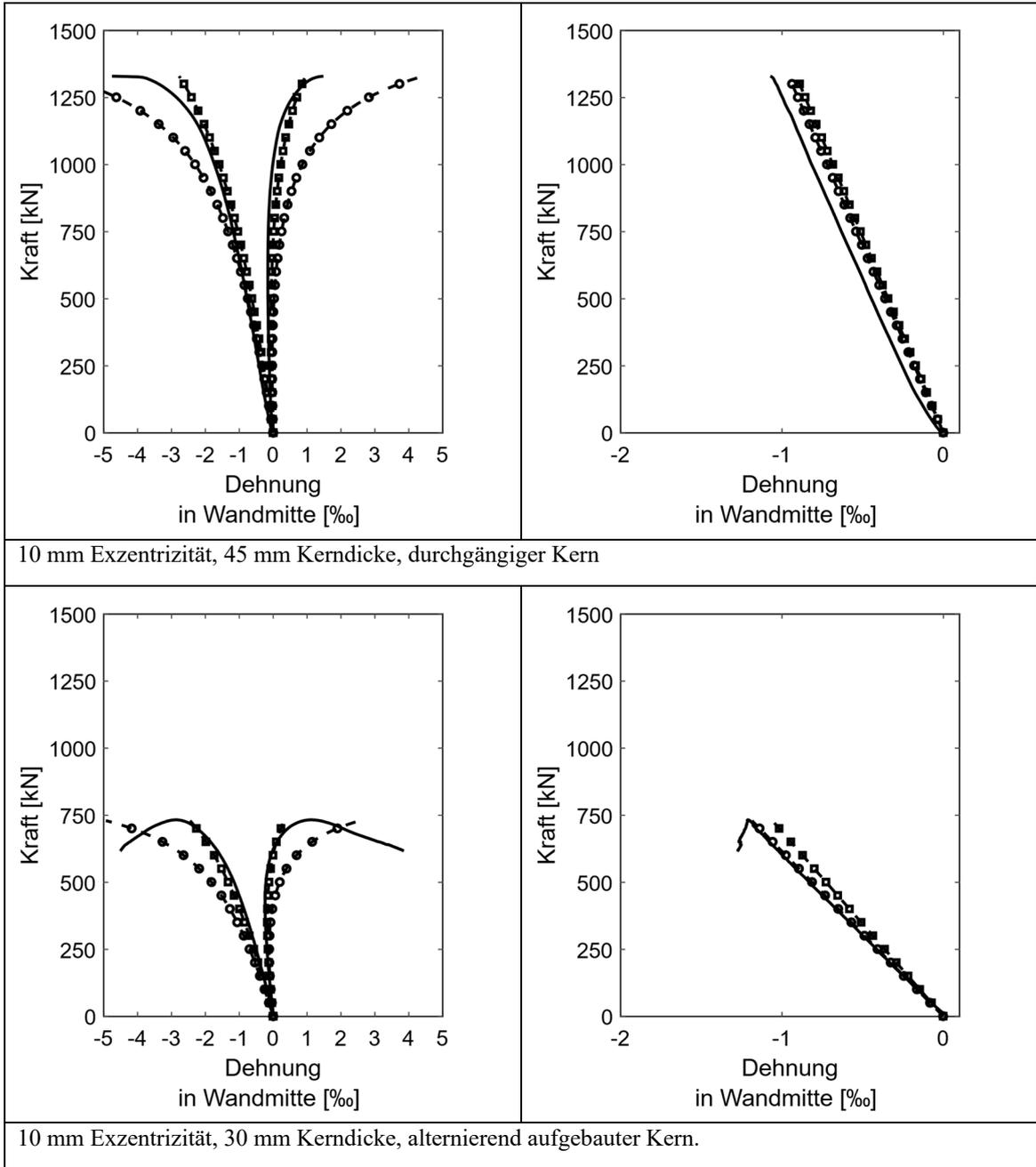
C.3 Berechnung mit dem γ -Verfahren

Verformung:



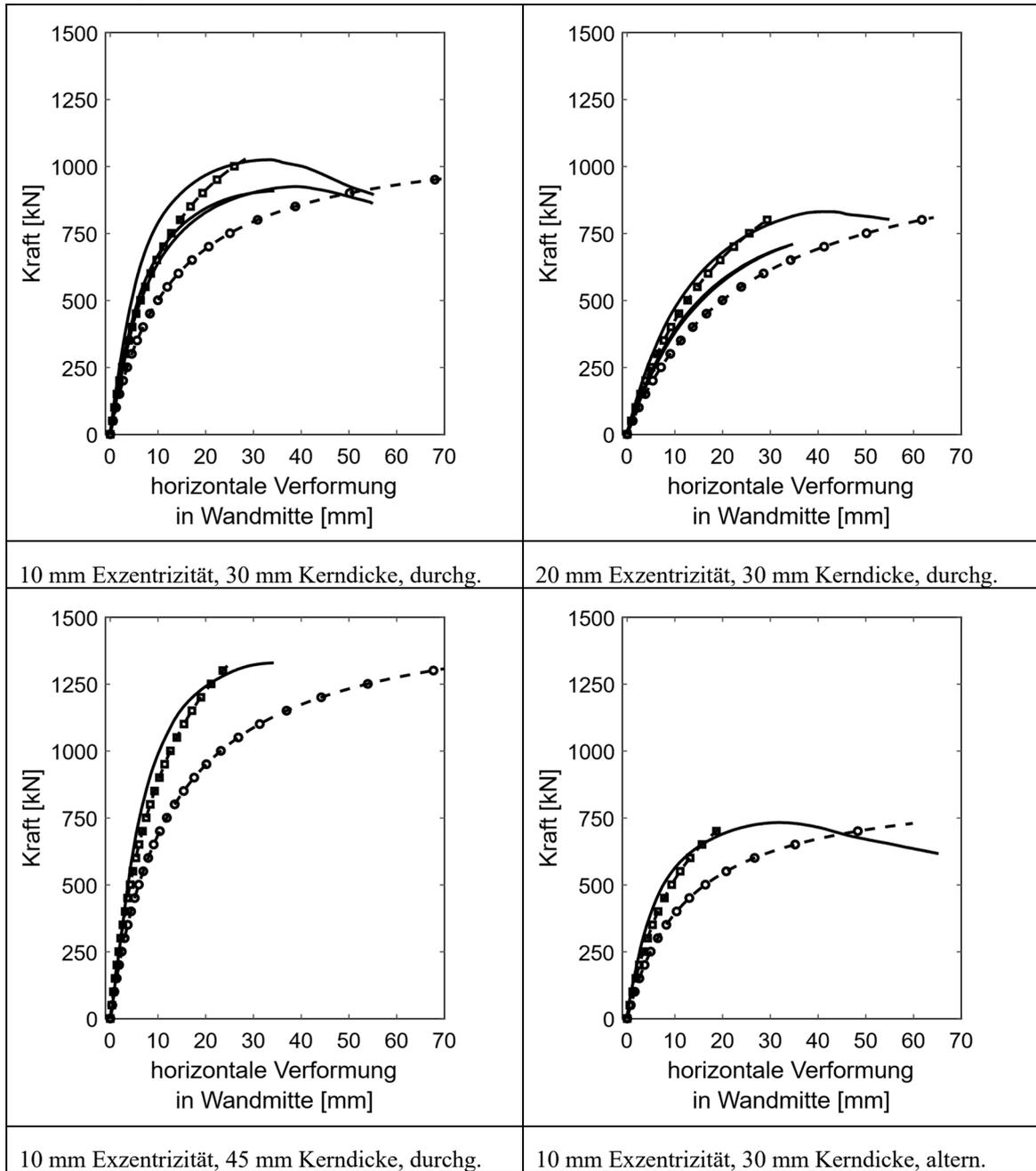
Dehnung im Holz und Beton:



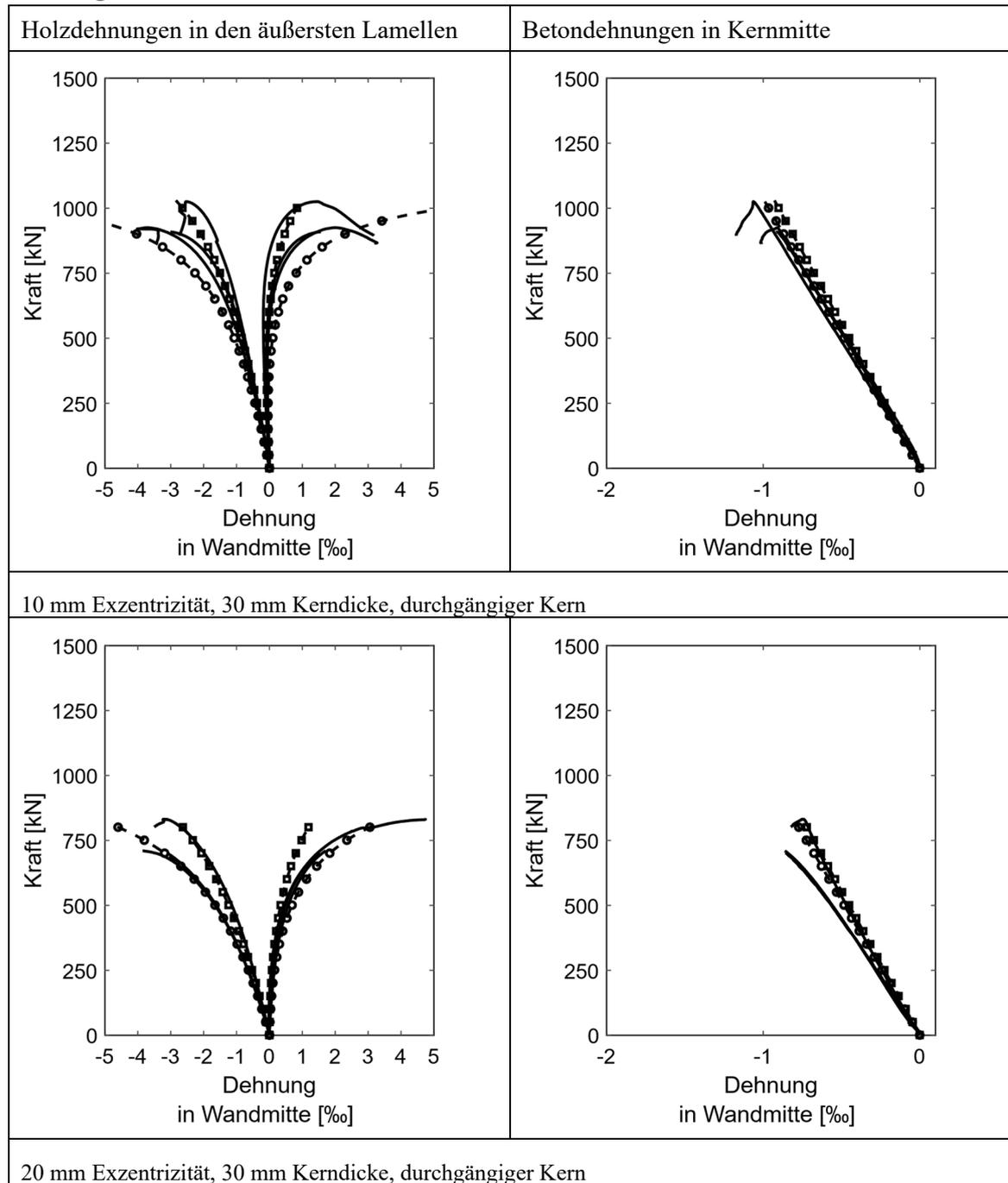


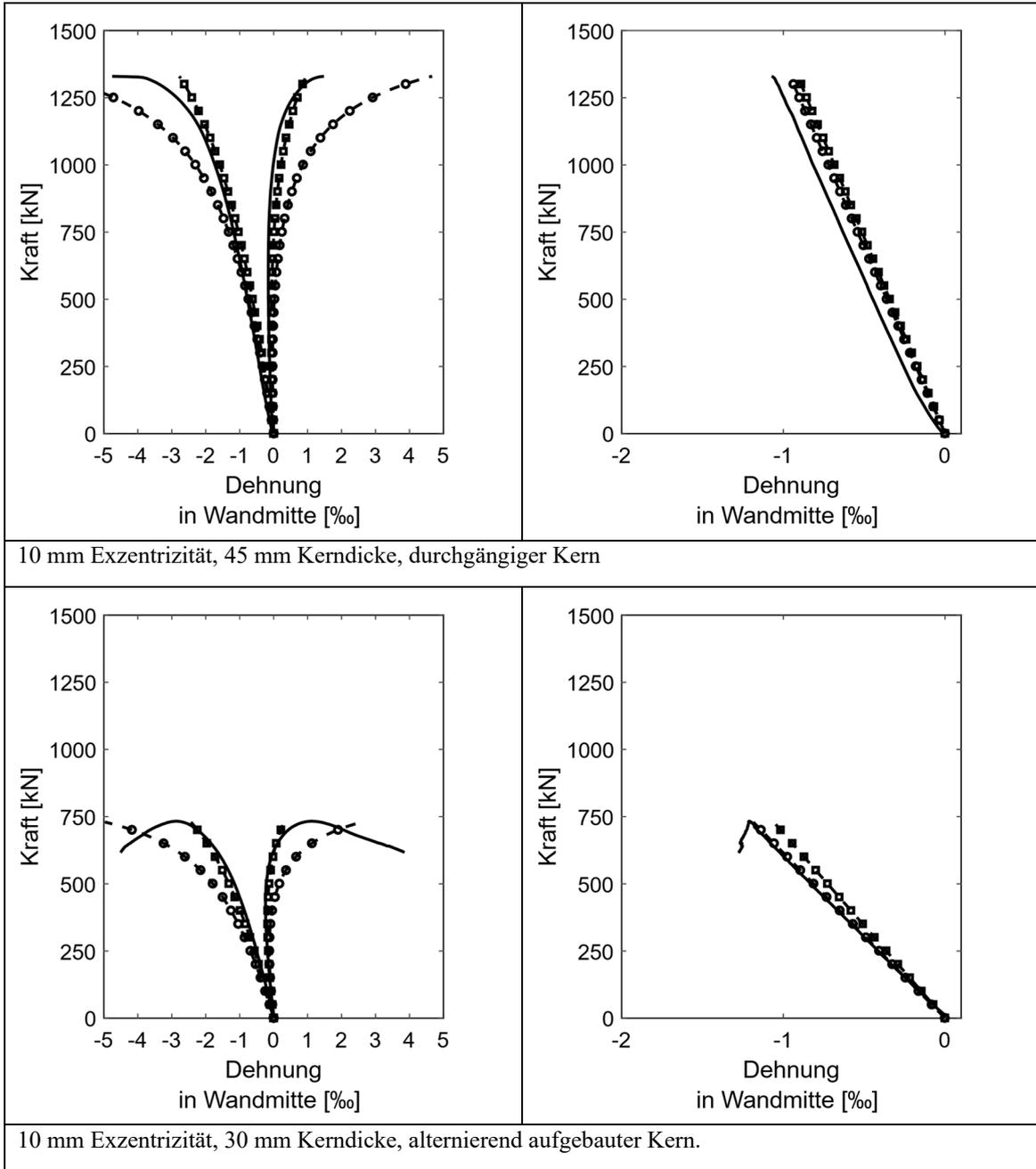
C.4 Berechnung mit der Schubanalogie

Verformung:



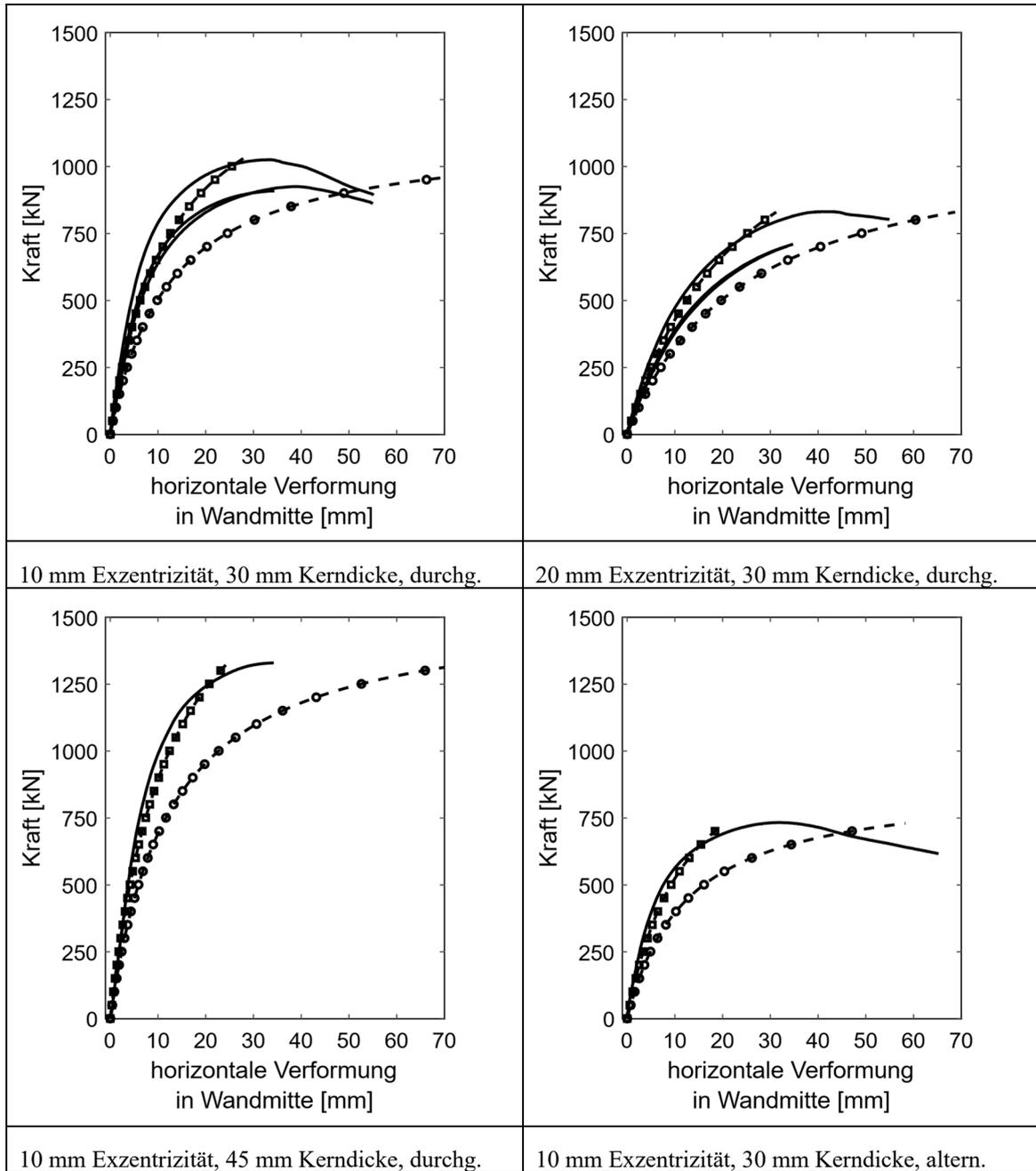
Dehnung im Holz und Beton:





C.5 Berechnung mit dem Vergrößerungsfaktor

Verformung:



C.6 Berechnungsbeispiel

Im Rahmen der Parameterstudie in Abschnitt 5.4 wurde eine beidseitig gelenkig gelagerte Pendelstütze mit Ersatzimperfektion betrachtet. Verglichen wurde dabei die Maximallast die ein Wandsegment mit einer Länge von 0,5 m, einmal mit einem reinen Holzquerschnitt und einmal mit einem hybriden Querschnitt aus Holz und ultrahochfestem Beton, aufnehmen kann. Das Wandsegment wird dabei als Stütze betrachtet. Nachfolgend ist das Vorgehen zur Bestimmung der aufnehmbaren Maximalkraft, einerseits explizit, in der rechten Spalte der Tabellen, und andererseits schematisch, in der linken Spalte der Tabellen, für einen hybriden Querschnitt aufgeführt. Exemplarisch wurde ein Querschnitt mit 140 mm Wanddicke mit einer durchgängigen Kernlage aus Beton sowie eine Wandhöhe von 2,85 m, bei einer Ersatzimperfektion von $0,0025 \cdot h$ gewählt. Das Vorgehen zur Bestimmung der Maximalkraft für ebenfalls betrachtete Querschnitte, Wandhöhen und Ersatzimperfektionen ist identisch.

Schritt 1: Eingabe Geometrie, Querschnitt und Materialparameter

Zunächst werden die Geometrie, der Querschnitt und die Materialparameter festgelegt. Nachfolgende Tabellen führen die im Rahmen dieses Beispiels verwendeten Kenngrößen auf.

Geometrische Kenngrößen:

Querschnittsaufbau Lagendicken [mm]	30-20-40-20-30
Lagenorientierung	L-Q-L-Q-L
Querschnittsaufbau Material	Holz-Holz-Beton-Holz-Holz
Wandhöhe h [m]	2,85
Wandlänge l [m]	0,5
Ersatzimperfektion $e = 0,0025 \cdot h$ [m]	0,0071

Tabelle 8.1: Verwendete Berechnungsparameter Holz

Druckfestigkeit in Faserrichtung ¹	$f_{c,0,k}$	[N/mm ²]	21,0
Zugfestigkeit in Faserrichtung ¹	$f_{t,0,k}$	[N/mm ²]	14,5
Biegefestigkeit ¹	$f_{m,k}$	[N/mm ²]	24,0
Rollschubfestigkeit ¹	$f_{v,R,k}$	[N/mm ²]	0,8
E-Modul ¹	$E_{0,mean}$	[N/mm ²]	11.000
Schubmodul ¹	$G_{0,mean}$	[N/mm ²]	690
Rollschubmodul ³	G_R	[N/mm ²]	69
Teilsicherheitsbeiwert ²	γ_M	[-]	1,3
Modifikationsbeiwert ²	k_{mod}	[-]	0,8

Legende:

¹ aus DIN EN 338 [149]

² aus DIN EN 1995-1-1 [147]

³ aus [125, S. 94], $G_R = 0,1 \cdot G_{0,mean}$

Tabelle 8.2: Verwendete Berechnungsparameter Beton aus [124]

Druckfestigkeit	$f_{c,k}$	[N/mm ²]	130,0
E-Modul	E_{mean}	[N/mm ²]	46.000
Schubmodul	G_{mean}	[N/mm ²]	18.750
Teilsicherheitsbeiwert	γ_M	[-]	1,5
Dauerstandfaktor	α_{cc}	[-]	0,85

Schritt 2: Knicklastbestimmung

Aufbauend auf den Geometrie- und Materialkenngrößen wird die kritische Knicklast bestimmt. Dies erfolgt mit den um die Teilsicherheitsbeiwerte reduzierten Steifigkeitseigenschaften der jeweiligen Materialien sowie einer effektiven Biegesteifigkeit, welche die Schubverformung, insbesondere der schubweichen Querlagen aus Holz, berücksichtigt. Die Ersatzschubsteifigkeit wird in Anlehnung an das Schubanalogieverfahren bestimmt. Darauf aufbauend die effektive Biegesteifigkeit.

Berechnung der jeweiligen Materialsteifigkeitseigenschaften:

$E_{Holz} = \frac{E_{mean}}{\gamma_{M,Holz}}$	$E_{Holz} = \frac{11000}{1,3} = 8461,54 \text{ MN/m}^2$
$G_{Holz} = \frac{G_{mean}}{\gamma_{M,Holz}}$	$G_{Holz} = \frac{690}{1,3} = 530,77 \text{ MN/m}^2$
$G_{R,Holz} = \frac{G_{mean}}{\gamma_{M,Holz}}$	$G_{R,Holz} = \frac{69}{1,3} = 53,08 \text{ MN/m}^2$
$E_{Beton} = \frac{E_{mean}}{\gamma_{M,Beton}}$	$E_{Beton} = \frac{45000}{1,5} = 30000,00 \text{ MN/m}^2$
$G_{Beton} = \frac{E_{Beton}}{2 \cdot (1 + \mu)}$	$G_{Beton} = \frac{30000}{2 \cdot (1 + 0,2)} = 12500,00 \text{ MN/m}^2$

Nachfolgende Tabelle fasst die für jede Schicht berücksichtigten Eigenschaften zur Bestimmung der Querschnittsteifigkeiten übersichtlich zusammen, dabei werden nur die Längslagen berücksichtigt. Auch wird von einem nicht schmalseitenverklebten Brettsperrholz ausgegangen, weshalb der E-Modul der Querlagen zu Null gesetzt wird.

Schicht	Dicke [m]	E-Modul [MN/m ²]	Schubmodul [MN/m ²]
1	0,03	8461,54	530,77
2	0,02	0	53,08
3	0,04	30000,00	12500,00
4	0,02	0	53,08
5	0,03	8461,54	530,77

Berechnung der Querschnittssteifigkeiten:

$$B_A = \sum_1^n E_i \cdot \frac{d_i^3 \cdot l}{12}$$

$$B_A = 2 \cdot 8461,54 \cdot \frac{0,03^3 \cdot 0,5}{12} + 30000 \cdot \frac{0,04^3 \cdot 0,5}{12} = 0,099 \text{ MNm}^2$$

$$B_B = \sum_1^n E_i \cdot A_i \cdot z_{S,i}^2$$

$$B_B = 2 \cdot 8461,54 \cdot (0,03 \cdot 0,5) \cdot 0,055 = 0,7679 \text{ MNm}^2$$

$$B_X = B_A + B_B$$

$$B_X = 0,099 + 0,7679 = 0,8669 \text{ MNm}^2$$

$$\frac{1}{S_x} = l \cdot \frac{1}{a_x^2} \left\{ \frac{d_1}{2 \cdot G_{xz,1}} + \sum_2^{n-1} \frac{d_i}{G_{xz,i}} + \frac{d_n}{2 \cdot G_{xz,n}} \right\}$$

$$\frac{1}{S_x} = 0,5 \cdot \frac{1}{0,11^2} \left\{ \frac{0,03}{2 \cdot 530,77} + \frac{0,02}{53,08} + \frac{0,04}{12500,00} + \frac{0,02}{53,08} + \frac{0,03}{2 \cdot 530,77} \right\}$$

$$S_x = 7,438 \text{ MN}$$

$$D_X = b \cdot \sum_1^i E_i \cdot d_i$$

$$D_X = 0,5 \cdot (2 \cdot 0,03 \cdot 8461,54 + 0,04 \cdot 30000) = 853,85 \text{ MN}$$

Berechnen der effektiven Steifigkeit sowie der kritischen Knicklast P_{ki} :

$$efB_B = B_B \cdot \frac{1}{1 + \frac{B_B \cdot \pi^2}{S_x \cdot l_{eff}^2}}$$

$$efB_B = 0,7679 \cdot \frac{1}{1 + \frac{0,7679 \cdot \pi^2}{7,438 \cdot 2,85^2}} = 0,6823 \text{ MN/m}^2$$

$$efB = B_A + efB_B$$

$$efB = 0,099 + 0,6823 = 0,7813 \text{ MN/m}^2$$

$$P_{ki} = \frac{\pi^2}{l_{eff}^2} \cdot efB$$

$$P_{ki} = \frac{\pi^2}{2,85^2} \cdot 0,7813 = 0,9494 \text{ MN}$$

Schritt 3: Schnittgrößenberechnung

Zur Schnittgrößenberechnung wird das Wandsegment als Stütze betrachtet und eine Einzellast aufgebracht. Die vertikale Kraft wird gewählt (Druckkraft positiv) und damit die Schnittgrößen berechnet. Zuerst das Biegemoment nach Theorie I. Ordnung und darauf aufbauend mit dem Vergrößerungsfaktor das Biegemoment nach Theorie II. Ordnung.

Gewählte Kraft im Beispiel: $F = 599 \text{ kN}$

$$M_1 = F \cdot e$$

$$M_1 = 599 \cdot 0,0071 = 4,25 \text{ kNm}$$

$$M_2 = M_1 \cdot \frac{1}{1 - \frac{F}{P_{ki}}}$$

$$M_2 = 4,25 \cdot \frac{1}{1 - \frac{599,00}{949,40}} = 11,52 \text{ kNm}$$

Schritt 4: Spannungsberechnung

Berechnen der Spannungen in den äußersten Holzlamellen sowie im Betonkern. Bei den Berechnungen wird die Druckspannung positiv, die Zugspannung negativ angesetzt.

Überprüfen des Verhältnisses von l_{eff}/d :

$$\frac{l_{eff}}{d} = \frac{2,85}{0,14} = 20,36 > 20$$

Damit erfolgt die Spannungsberechnung nach der schubstarreren Theorie. Andernfalls erfolgt die Spannungsberechnung nach der schubnachgiebigen Theorie wie in Abschnitt 2.3.4 beschrieben.

Berechnen der Biege- und Normalspannungen in Holz und Beton:

$\sigma_{m,Holz,d} = \frac{M_2}{B_x} \cdot E_{Holz} \cdot \frac{d_1}{2}$	$\sigma_{m,Holz,d} = \frac{0,01152}{0,8669} \cdot 8461,54 \cdot \frac{0,03}{2}$ $= 1,69 \text{ MN/m}^2$
$\sigma_{N,Holz,max,d} = \frac{F}{D_x} \cdot E_{Holz} + \frac{M_2}{B_x} \cdot E_{Holz} \cdot z_{s,1}$	$\sigma_{N,Holz,max,d} = \frac{0,599}{853,85} \cdot 8461,54 + \frac{0,01152}{0,8669}$ $\cdot 8461,54 \cdot 0,055$ $= 5,94 + 6,18$ $= 12,12 \text{ MN/m}^2$
$\sigma_{N,Holz,min,d} = \frac{F}{D_x} \cdot E_{Holz} - \frac{M_2}{B_x} \cdot E_{Holz} \cdot z_{s,1}$	$\sigma_{N,Holz,min,d} = \frac{0,599}{853,85} \cdot 8461,54 - \frac{0,01152}{0,8669}$ $\cdot 8461,54 \cdot 0,055$ $= 5,95 - 6,18$ $= -0,23 \text{ MN/m}^2$
$\sigma_{m,Beton} = \frac{M_2}{B_x} \cdot E_{Beton} \cdot \frac{d_3}{2}$	$\sigma_{m,Holz} = \frac{0,01152}{0,8669} \cdot 30000 \cdot \frac{0,04}{2}$ $= 7,97 \text{ MN/m}^2$
$\sigma_{N,Beton} = \frac{F}{D_x} \cdot E_{Beton}$	$\sigma_{N,Holz} = \frac{0,599}{853,54} \cdot 30000 = 21,05 \text{ MN/m}^2$

Bestimmen der minimalen und maximalen Betonspannung:

$\sigma_{Beton,max} = \sigma_{N,Beton} + \sigma_{M,Beton}$	$\sigma_{Beton,min} = 21,05 + 7,97 = 29,02 \text{ MN/m}^2$
$\sigma_{Beton,min} = \sigma_{N,Beton} - \sigma_{M,Beton}$	$\sigma_{Beton,min} = 21,05 - 7,97 = 13,08 \text{ MN/m}^2$

Schritt 5: Berechnen der zulässigen Spannungen

$f_{Holz,c,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,k}}{\gamma_{M,Holz}}$	$f_{Holz,c,d} = 0,8 \cdot \frac{21,0}{1,3} = 12,92 \text{ MN/m}^2$
$f_{Holz,t,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{t,k}}{\gamma_{M,Holz}}$	$f_{Holz,t,d} = 0,8 \cdot \frac{14,0}{1,3} = 8,62 \text{ MN/m}^2$
$f_{Holz,m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_{M,Holz}}$	$f_{Holz,m,d} = 0,8 \cdot \frac{24,0}{1,3} = 14,77 \text{ MN/m}^2$
$f_{Beton,c,d} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{c,k}}{\gamma_{M,Beton}}$	$f_{Beton,c,d} = 0,85 \cdot \frac{130,0}{1,5} = 73,67 \text{ MN/m}^2$

Schritt 6: Nachweisführung

Die Schnittgrößen und die zulässigen Spannungen bilden die Grundlage für die Nachweisführung. Für die Nachweisführung der äußeren Holzlamellen auf Druck und Biegung wird der Druckanteil quadriert. Bei der kombinierten Beanspruchung aus Zug und Biegung werden beide Anteile linear überlagert. Seitens des Betons erfolgt ein Drucknachweis mit der maximalen Betondruckspannung. Zusätzlich wird geprüft, dass keine Zugspannungen im Betonquerschnitt auftreten.

$\left(\frac{\sigma_{N,Holz,max,d}}{f_{Holz,c,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,Holz,d}}{f_{Holz,m,d}} \leq 1,0$	$\left(\frac{12,12}{12,92}\right)^2 + \frac{1,69}{14,77} = 0,99 \leq 1,0$
$\frac{\sigma_{N,Holz,min,d}}{f_{Holz,t,d}} + \frac{\sigma_{m,Holz,d}}{f_{Holz,m,d}} \leq 1,0$	$\frac{0,23}{8,62} + \frac{1,79}{14,77} = 0,14 \leq 1,0$
$\frac{\sigma_{Beton,max}}{f_{Beton,c,d}} \leq 1,0$	$\frac{29,02}{73,67} = 0,39 \leq 1,0$
$\sigma_{Beton,min} \geq 0$	$13,08 \geq 0$

Iterativer Prozess:

Die Schritte 3,4 und 6 werden iterativ durchgeführt. Dabei wird die gewählte Kraft stets um ein kN erhöht und darauf aufbauend die Schritte 4,5 und 6 berechnet. Sobald einer der Nachweise nicht mehr erfüllt ist, wird die Iteration abgebrochen. Der letzte durchgeführte Iterationsschritt enthält die maximal aufnehmbare Kraft.