

BBSR-
Online-Publikation
25/2025

Ultra High Performing Timber Walls 2.0

von

Dominik Merk
Anna Kirschstein
Maximilian Kronau
Klara Winter
Prof. Dr. Oliver Fischer
Prof. Dr. Stefan Winter

Ultra High Performing Timber Walls 2.0

Praxistauglichkeit von Wänden mit zusammengesetztem Querschnitt aus
Brettspertholz und ultrahochfestem Beton als Beitrag zum nachhaltigen
Bauen der Zukunft

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.29

Projektlaufzeit: 08.2021 bis 03.2024

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Steffen Kisseler, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Technische Universität München
Lehrstuhl für Massivbau; Lehrstuhl für Holzbau- und Baukonstruktion

Dominik Merk
dom.merk@tum.de

Anna Kirschstein
anna.kirschstein@tum.de

Maximilian Kronau
maximilian.kronau@tum.de

Klara Winter
klara.winter@tum.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Oliver Fischer (Projektleitung)
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Redaktion

Technische Universität München
Lehrstuhl für Massivbau
Maximilian Kronau

Stand

April 2025

Gestaltung

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Dominik Merk

Bildnachweis

Titelbild: Technische Universität München
Lehrstuhl für Massivbau; Lehrstuhl für Holzbau- und Baukonstruktion

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Merk, D.; Kirschstein, A.; Kronau, M.; Winter, K.; Fischer, O.; Winter, S., 2026: Ultra High Performing Timber Walls 2.0: Praxistauglichkeit von Wänden mit zusammengesetztem Querschnitt aus Brettsperrholz und ultrahochfestem Beton als Beitrag zum nachhaltigen Bauen der Zukunft. BBSR-Online-Publikation 25/2025. Bonn. <https://doi.org/10.58007/yvf9-8995>

DOI 10.58007/yvf9-8995

ISSN 1868-0097

Bonn 2026

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	8
Kurzfassung	9
Abstract	10
1 Einleitung	11
1.1 Hintergrund	11
1.2 Vorgängerprojekt	11
1.3 Ziel	12
2 Delaminierungsversuche	13
2.1 Allgemein	13
2.2 Versuchsdurchführung	13
2.2.1 Material	13
2.2.2 Prüfkörper	14
2.3 Ergebnisse	15
2.4 Fazit	16
3 Kurzzeit- und Langzeitscherversuche	17
3.1 Hintergrund und Ziel	17
3.2 Material	17
3.3 Prüfkörper	17
3.4 Versuchsaufbau	20
3.4.1 Allgemein	20
3.4.2 Kurzzeitscherversuche	20
3.4.3 Langzeitscherversuche	21
3.5 Ergebnisse der Kurzzeitscherversuche	26
3.6 Ergebnisse der Langzeitversuche	27
3.6.1 Prüfkombination	28
3.6.2 Kraftverlauf über das Jahr	28
3.6.3 Äußerer Temperatur und Feuchtebeanspruchung	32
3.6.4 Versagen während Langzeitbeanspruchung	35
3.6.5 Restscherfestigkeit	39
3.7 Zwischenfazit	45
4 Ökobilanzielle Untersuchung	46
4.1 Vorgehensweise	46
4.2 Ziel	46
4.3 Untersuchungsrahmen	46
4.3.1 Funktionales Äquivalent	46

4.3.2	Ermittlung der Querschnittsabmessungen und -zusammensetzungen anhand eines Mustergebäudes	47
4.3.3	Systemgrenzen	50
4.3.4	Funktionelle Einheit	50
4.3.5	Produktsystem	50
4.3.6	Vorgehen bei der Sachbilanz	51
4.3.7	Festlegen der Wirkungsindikatoren	51
4.4	Sachbilanz	52
4.4.1	Vergleich des Bauteilvolumens je 1m ² Außenwandfläche	52
4.4.2	Betrachtung des Volumens einzelner Baustoffe der hybriden Wand	53
4.5	Wirkungsabschätzung	53
4.5.1	Vorgehen bei der Wirkungsabschätzung	53
4.5.2	GWP in der Herstellungsphase (Module A1-3)	53
4.5.3	GWP des gesamten Lebenszyklus (Module A1-3 und C1-4)	54
4.6	Auswertung und Interpretation der Ergebnisse	55
4.7	Zwischenfazit	56
5	Untersuchungen zum Brandverhalten	57
5.1	Hintergrund und Ziel	57
5.2	Stand der Technik	57
5.2.1	Abbrandverhalten von Brettspertholz	57
5.2.2	Ultrahochfester Beton im Brandfall	58
5.3	Brandversuche nach DIN 4102-8	61
5.3.1	Methodik	61
5.3.2	Ergebnis	63
5.4	Restscherfestigkeit der Klebefuge	66
5.4.1	Methodik	66
5.4.2	Ergebnis	67
5.5	Mechanische Eigenschaften	69
5.5.1	Methodik	69
5.5.2	Ergebnis	71
5.6	Zwischenfazit	79
6	Bauteilanschlüsse, Fertigung und Montage	81
6.1	Hintergrund und Ziel	81
6.2	Untersuchungsgegenstand	81
6.3	Stand der Technik	83
6.3.1	Fügetechniken im Holzbau	83
6.3.2	Fügetechniken im Betonfertigteilbetonbau	85
6.4	Variantenuntersuchung	86
6.4.1	Allgemeines	86
6.4.2	Anschluss mit Zugankern	86
6.4.3	Anschluss mit Gewindestangen	87
6.4.4	Anschluss mit Ortbeton	88
6.4.5	Anschluss mit Vorspannung	89

6.4.6	Anschluss mit Mini-Element	90
6.5	Ausarbeitung Variante Mini Element	91
6.5.1	Gründe für Variantenwahl	91
6.5.2	Außenwandanschlussknoten	92
6.5.3	Innenwandanschlussknoten	93
6.5.4	Bauablauf	94
6.6	Zwischenfazit	94
7	Untersuchungen zur Hygrothermik	96
7.1	Hintergrund und Ziel	96
7.2	Untersuchungsgegenstand	97
7.2.1	Materialdaten	97
7.2.2	Regelement	99
7.2.3	Anschlussbereich	100
7.3	Methodik	101
7.3.1	Regelement	101
7.3.2	Anschlussbereich	103
7.4	Ergebnisse der Untersuchungen im Regelement	103
7.5	Ergebnisse der Untersuchungen im Anschlussbereich	110
7.6	Zwischenfazit	112
8	Recycling	114
8.1	Hintergrund und Ziel	114
8.2	Grundlagen	117
8.3	Tastversuche zur Erhitzung der Klebefuge mittels Mikrowellen	118
8.3.1	Wahl der Methode	118
8.3.2	Wirkungsprinzip der Mikrowellen	119
8.3.3	Prüfkörper und Versuchsreihen	119
8.3.4	Versuchsaufbau und Durchführung	121
8.3.5	Ergebnisse der Mikrowellenversuche	122
8.4	Kreislaufkonzept für UHPTW	127
8.5	Zwischenfazit	128
9	Zusammenfassung und Ausblick	130
9.1	Zusammenführung der Ergebnisse	130
9.2	Fazit	131
	Abbildungsverzeichnis	139
	Tabellenverzeichnis	144
	Anlagen	145
	Anlage 1	145
	Anlage 2	146
	Anlage 3	151

Anlage 4	152
Anlage 5	170
Anlage 6	175

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

BSP	Brettsperrholz
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Compound 1/2	Im Rahmen der Forschungsarbeit verwendete ultrahochfeste Compounds
GWP	Global Warming Potential globales Erwärmungspotential
GWP-biogen	Klimawandel biogen – Treibhausgaspotential biogen
GWP-fossil	Klimawandel fossil – Treibhausgaspotential fossile Energieträger und Stoffe
GWP-gesamt	Klimawandel gesamt – Treibhausgaspotential insgesamt
GWP-luluc	Klimawandel Landnutzung und Landnutzungsänderung – Treibhausgaspotential Landnutzung und Landnutzungsänderung
Klebstoff 1/2	Im Rahmen der Forschungsarbeit verwendete Einkomponenten Polyurethanklebstoffe. Die untersuchten Klebstoffe waren der Loctite HB S309 Purbond und der Jowapur 685.30.
m. F.	Mit Fräsung
NKL	Nutzungsklasse
o. F.	Ohne Fräsung
r. LF.	Relative Luftfeuchte
UHPC	Ultra High Performance Concrete ultrahochfester Beton
UHPTW	Ultra High Performing Timber Wall ultrahochfeste Holz Beton Verbundwand
1K-PU	Einkomponenten Polyurethanklebstoff

Kurzfassung

Das Forschungsvorhaben „Ultra High Performing Timber Walls 2.0“ umfasst unterschiedliche Themengebiete die gemeinschaftlich einen Beitrag zur praktischen Anwendung einer ultrahochfesten Verbundwand leisten. Eine ultrahochfeste Verbundwand ist im Grunde genommen Brettsperrholz, in dem eine oder mehrere Holzlagen durch ultrahochfesten Beton ersetzt werden.

Aufbauend auf dem gleichnamigen ersten Forschungsvorhaben wird die kraftschlüssige Verbindung zwischen Holz und ultrahochfesten Beton mithilfe eines Einkomponenten Polyurethanklebstoffes weiter untersucht. Hierbei werden in einem ersten Schritt Delaminierungsversuche mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen durchgeführt. Es zeigt sich, dass eine Satinierung C36 mit vorheriger Fräsung im Gegensatz zu einer schalglatten Oberfläche eine geringere Delaminierung aufweist. Aufbauend darauf werden Langzeitscherversuche mit C36 satinierten Betonoberflächen in unterschiedlichen klimatischen Bedingungen durchgeführt. Dabei wird ein überwiegendes Holzversagen festgestellt. Somit lässt sich eine ausreichende Dauerhaftigkeit der Klebefuge schlussfolgern.

Neben der Untersuchung des Klebeverbundes werden Untersuchungen zum Brandverhalten angestellt. Die maximale Temperatur und die Geschwindigkeit der Temperatureinwirkung auf den ultrahochfesten Beton kann durch um diesen angeordnetes Holz reduziert werden. Dadurch entfällt in einem bestimmten Temperaturbereich ein Verlust der Druckfestigkeit des Betons und kann in bestimmten Fällen zu einer Steigerung der Druckfestigkeit führen. Der Verlust der Steifigkeit wird ebenfalls im Vergleich zu einer direkten Einwirkung auf den Beton reduziert.

Im Rahmen einer ökobilanziellen Betrachtung wird ein Vergleich zwischen einer ultrahochfesten Verbundwand und vergleichbaren Aufbauten aus Brettsperrholz und Stahlbeton erstellt. Dabei wird das globale Erwärmungspotential dieser Bauweisen im Kontext eines Mustergebäudes, unter Berücksichtigung des funktionalen Äquivalents, ermittelt und verglichen. Hierbei wird die Anzahl an Geschossen des Mustergebäudes stufenweise erhöht. Es wird deutlich, dass die Verbundwand durchgehend niedrigere Umweltwirkungen aufweist als die Stahlbetonwand. Auch gegenüber der Brettsperrholzwand kann diese Bauweise, in hochbelasteten Bereichen, ein geringeres globales Erwärmungspotential zur Folge haben.

Die ultrahochfeste Verbundwand wird hygrothermisch stationär und instationär untersucht. Es zeigt sich, dass bei einer entsprechenden Dämmung der Einfluss der diffusionshemmenden Ebene aufgrund des ultrahochfesten Betons keine großen Auswirkungen besitzt. Es bestehen keine Bedenken eines Tauwasserausfalls oder einer Schimmelpilzbildung auf der Oberfläche.

Es werden Anschlussdetails für eine Lastweiterleitung entwickelt. Um eine Kompatibilität mit anderen Bauteilen zu ermöglichen, wird auf klassische Holzbauverbindungen zurückgegriffen. Mit den gegebenen Anschlussdetails können ultrahochfeste Verbundelemente miteinander und mit anderen Holzbauteilen verbunden werden. Ebenfalls werden Möglichkeiten für eine Verbindung mit Ortbeton aufgezeigt.

Um eine zirkuläre Baustoffnutzung zu gewährleisten ist eine materialgerechte Trennung des Verbundwerkstoffes notwendig. Hierzu werden Tastversuche zur Trennung der Klebefuge durchgeführt. Es kann gezeigt werden, dass eine sortenreine Trennung möglich ist und darauf basierend ein Kreislaufkonzept erarbeitet werden kann.

Abstract

The research project "Ultra High Performing Timber Walls 2.0" comprises various topics that jointly contribute to the practical application of an ultra-high-performance composite wall. An ultra-high-performance composite wall is a modified cross-laminated timber that replaces one or more layers with ultra-high-performance concrete.

Building on the first research project of the same name, the force-fit connection between timber and ultra-high performance concrete is being further investigated using a single-component polyurethane adhesive. Delamination tests are carried out in the first step with different surface treatments. It is shown that C36 satin finish exhibits less delamination than a smooth surface. Based on this, long-term shear tests are carried out with C36 satin-finished concrete surfaces in different climatic conditions. A predominant wood failure is determined. Therefore, it can be concluded that the bonded joint is sufficiently durable.

In addition to investigating the adhesive bond, fire behavior tests are also carried out. The maximum temperature and the speed of the temperature effect on the ultra-high-strength concrete can be reduced by placing wood around it. This eliminates the loss of compressive strength of the concrete in a specific temperature range and can lead to an increase in compressive strength in some instances. The loss of stiffness is also reduced compared to a direct effect on the concrete.

As part of a life cycle assessment, a comparison is made between an ultra-high-performance composite wall and comparable construction methods such as cross-laminated timber and reinforced concrete. The global warming potential of these construction methods is determined and compared in the context of a fictitious building, considering the functional equivalent. The number of storeys of the model building is being increased. It becomes clear that the hybrid wall consistently shows lower global warming potential than the reinforced concrete wall. In highly stressed areas, the global warming potential of the hybrid construction method can be lower compared to cross-laminated timber walls.

The ultra-high-performance composite wall is investigated hygrothermally stationary and transient. It is shown that, with appropriate insulation, the influence of the diffusion-inhibiting layer has no significant impact due to the ultra-high performance concrete. There are no concerns about condensation or mold growth on the surface.

Connection details are developed for load transfer. Classic timber construction connection methods are used to ensure compatibility with other building components. With the given connection details, ultra-high-performance composite elements can be connected to each other and to other timber components. Possibilities for a connection with in-situ concrete are also shown.

In order to ensure a circular use of the building material, a material-specific separation of the composite material is necessary. For this purpose, tactile tests are carried out to separate the adhesive joint. It can be shown, that a separation by material is possible, and a recycling concept can be developed.

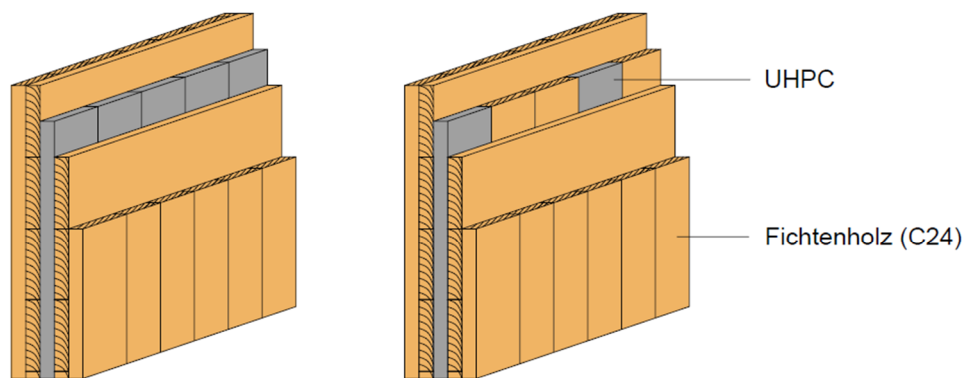
1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die immer weiterwachsende Weltbevölkerung und die stetig voranschreitende Urbanisierung erfordern die Bereitstellung zusätzlichen Wohnraumes in städtischen Gebieten (World Urbanization Prospects - Population Division 2022). Um möglichst wenig der endlichen Ressource *Fläche* zu versiegeln, eignet sich hier vor allem das vertikale Bauen in Form von Hochhäusern. Solche werden meist in Stahlbetonbauweise errichtet, allerdings findet auch der Holzbau zunehmend Anwendung. Dieser gilt, im Vergleich zu anderen Bauweisen, als ressourcenschonend und ökologisch nachhaltig (Kaufmann 2017). Bauteile in den unteren Geschossen von Hochbauten sind hohen Lasten ausgesetzt. Im Bereich des Holzbaus führt dies zu großen Bauteilquerschnitten und somit zu einem hohen Material- und Flächenbedarf.

Durch das Kombinieren von Holz und ultrahochfesten Beton (UHPC) soll eine hochtragfähige, ressourcenschonende und flächenschonende Bauweise in Form von Wandbauteilen für den Hochbau geschaffen werden. Dazu sind im Rahmen der industriellen Brettsperrholzherstellung einzelne Holzlamellen durch UHPC-Fertigteil-Lamellen ausgetauscht (siehe Abbildung 1)

Abbildung 1:
Wandaufbau der ultrahochfesten Verbundwand aus Holz und UHPC-Lamellen



Hybridwand mit durchgehendem
Betonkern

Hybridwand mit alternierendem
Betonkern

Der schlanke UHPC-Kern, welcher außenseitig durch das Holz geschützt ist, nimmt dabei vorwiegend auftretende Druckkräfte auf, während das außenliegende Holz, die aus Biegemomenten entstehenden Druck- und Zugkräfte aufnimmt. Diesem Projekt, Ultra High Performing Timber Walls 2.0, liegen die Erkenntnisse aus dem Vorgängerprojekt *Ultra High Performing Timber Walls von Oberndorfer et al. (2021)* zu Grunde.

1.2 Vorgängerprojekt

Im Rahmen des Vorgängerprojektes *Ultra High Performing Timber Walls von Oberndorfer et al. (2021)* wurde anhand kleinformatiger Versuche bereits die Eignung verschiedener Klebstoffe auf diversen Betonoberflächen untersucht. Anschließend erfolgte auf Basis vielversprechender Klebstoff-Beton-Kombinationen, die Untersuchung des Verbundverhaltens. Hierbei zeigte sich, dass eine kraftschlüssige Verklebung zwischen Holz und UHPC, unter Verwendung geeigneter Klebstoff-Beton-Kombinationen, erzielt werden kann. Als geeigneter Klebstoff erwies sich vor allem ein Einkomponenten-Polyurethanklebstoff. (Oberndorfer et al. 2021)

Zudem war im Rahmen von bauteilgroßen Versuchen unter exzentrischer und zentrischer Lasteinleitung eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung der schlanken Wandkonstruktionen mit UHPC-Lamelle, im Gegensatz zu den reinen BSP-Wänden zu verzeichnen. Eine pauschale Angabe dieser Tragfähigkeitssteigerung ist allerdings nicht möglich. Grund hierfür ist die Abhängigkeit dieser von der Schlankheit der Wand, der Dicke der eingeklebten Betonlamelle sowie der anzusetzenden Lastexzentrizität. Während im Falle einer zentrischen Lasteinleitung stets ein sprödes Versagen auftrat, konnte bei exzentrischer Lasteinleitung ein duktiler Versagen beobachtet werden. (Oberndorfer et al. 2021)

Die im Rahmen der Bauteilversuche erzielten Ergebnisse zeigten gute Übereinstimmungen mit den, mit Hilfe der Schubanalogie berechneten Tragfähigkeiten, horizontalen Dehnungen und Stauchungen. Zusätzlich wird, neben der Bemessung des Verbundquerschnitts mit Hilfe des Verfahrens der Schubanalogie auch die Führung von Spannungsnachweisen im Beton empfohlen. (Oberndorfer et al. 2021)

1.3 Ziel

Das Forschungsprojekt UHPTW-2.0 hat nun zum Ziel, die neuartigen Holz-Beton-Verbund Wandbauteile für die praktische Anwendung vorzubereiten. Anders als im Vorgängerprojekt liegt daher der Fokus nun nicht mehr auf dem Kurzzeittragverhalten, sondern auf dem Langzeittragverhalten des Verbundbauteils und spezifisch der Verbundfuge zwischen UHPC und Holz. Auch die Dauerhaftigkeit spielt hierbei eine große Rolle.

Weiter sind die hygrothermischen Eigenschaften des Verbundbauteils zu untersuchen. Dabei stellen der Wärmeschutz und Feuchteschutz wesentliche Aspekte dar. Auch das Brandverhalten des Verbundbauteils sowie mögliche montage- und fertigungstechnische Aspekte werden betrachtet.

Zudem wird im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse, die wesentliche Eignung der Verbundwand aufgrund der entstehenden Umweltwirkungen und des Ressourcenverbrauchs im Vergleich zu anderen Bauweisen untersucht. Für diese ökologische Betrachtung spielt auch die Recyclingfähigkeit und die Rückbaubarkeit eine zentrale Rolle.

2 Delaminierungsversuche

2.1 Allgemein

Die Delaminierungsversuche dienen der Auswahl einer geeigneten und dauerhaften Verklebungskombination aus Holz, Klebstoff, UHPC und Haftvermittler. Diese Versuche bilden die Grundlage aller weiteren Untersuchungen bezüglich des Verbundes, welche im Rahmen des Forschungsprojektes noch zur Anwendung kommen. Primäres Ziel der nachfolgend beschriebenen Delaminierungsversuche war es zunächst vor allem die geeignetste Betonoberflächenbearbeitung zu identifizieren.

2.2 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Delaminierungsversuche richtet sich nach den Vorgaben der DIN EN 16351, Anhang A, da es sich um brettsperrholzähnliche Verbundbauteile handelt. Allerdings sieht das Verfahren nach Anhang A die Wässerung unter Über- bzw. Unterdruck vor. Aufgrund des sehr dichten Gefüges von UHPC kann dies zu dessen Beschädigung führen. Daher wird alternativ, wie es bereits in Oberndorfer et al. (2021) vorgeschlagen wurde, die Wässerungsphase nach DIN EN 14080, Anhang B.3 bzw. nach DIN EN 301:2018-01, Anhang A für Keilzinken angewandt.

Demnach gliedert sich die Delaminierungsprüfung in drei Phasen. In der ersten Phase erfolgt die sechsstündige Wässerung der Prüfkörper in einem kochenden Wasserbad. Die Temperatur von 90 °C ist über die gesamte Wässerungsdauer aufrechtzuerhalten. Zudem ist darauf zu achten, dass die Prüfkörper durchgehend mit Wasser überdeckt sind. Darauf folgend werden die Prüfkörper für eine Stunde in einem 20 ± 5 °C warmen Wasserbad platziert (zweite Phase). Im letzten Schritt erfolgt nun die Trocknung der Prüfkörper im Trockenofen bei 60 ± 3 °C bis der Feuchtegehalt des Holzes unterhalb 19 % liegt oder die Prüfkörper mindestens 18 Stunden im Trockenofen lagen.

Nach Abschluss des Trockenvorgangs sind die Fugenöffnungen an den Hirnholzflächen der Prüfkörper anzuzeichnen und mit Hilfe von Linealen abzumessen. Die Delaminierung D berechnet sich anschließend wie folgt:

$$D = l_1/l_2 \cdot 100 \quad (1)$$

Mit:

D Delaminierung [%]

l_1 Gesamtlänge der Fugenöffnung [mm]

l_2 Gesamtlänge der Fuge [mm]

2.2.1 Material

Für die Versuche werden zwei ca. ein Jahr alte UHPC-Lamellen bestehend aus dem Compound 1 inklusive Stahlfasern und einem 0/4 Sand verwendet. Compound 1 bezeichnet hierbei eine von zwei verwendeten fertigen Compound Mischungen zur Herstellung von UHPC. Die Holzkomponenten werden aus drei unsortierten Fichtenhölzern mit unterschiedlich dicken Jahrringen herausgesägt. Jeder Betonoberfläche werden hierbei jeweils unterschiedliche Hölzer zugeordnet. Dabei wird darauf geachtet möglichst keine Äste im Prüfkörper und vor allem in Nähe der Klebefuge zu integrieren. Alle Prüfkörperkomponenten lagerten vor der Verklebung sowie erneut vor der Delaminierungsprüfung im Normklima bei 20°C/65 % r. LF. Zu Beginn der Delaminierungsprüfung konnte daher von einer Holzfeuchte von 12 % ausgegangen werden. Im Projekt wurden zwei Einkomponenten Polyurethanklebstoffe verwendet. Im Bericht werden die Klebstoffe als Klebstoff 1 bzw. Klebstoff 2 bezeichnet. Die Verklebung im Rahmen der Delaminierungsversuche erfolgte lediglich mit einem Einkomponenten Polyurethanklebstoff (Klebstoff 2).

2.2.2 Prüfkörper

Vor dem Verkleben der beiden Materialien Holz und ultrahochfestem Beton (UHPC) wurden die UHPC-Lamellen (ca. $60 \times 10 \times 3 \text{ cm}^3$) zunächst einseitig abgefräst, um die oberste ca. 1 mm dicke Schlempenschicht des Betons abzutragen. Anschließend erfolgte eine Unterteilung der Lamellen in etwa acht gleichgroße Stücke. Diese wurden daraufhin durch Schleifen oder Satinieren auf der teils zuvor gefrästen, teils auf der noch schalglatt belassenen Betonoberfläche bearbeitet. Insgesamt entstanden somit 10 unterschiedliche Oberflächen auf einer Fläche von ca. $15 \times 19 \text{ cm}^2$. Um pro Oberfläche mindestens vier Scherfugen für die Delaminierungsprüfung zur Verfügung zu haben, wurden die UHPC-Körper nochmals in je vier Stücke unterteilt. Tabelle 1 gibt einen Überblick der im Rahmen der Vorversuche geprüften Oberflächen und die jeweils zur Verfügung stehenden Scherfugen.

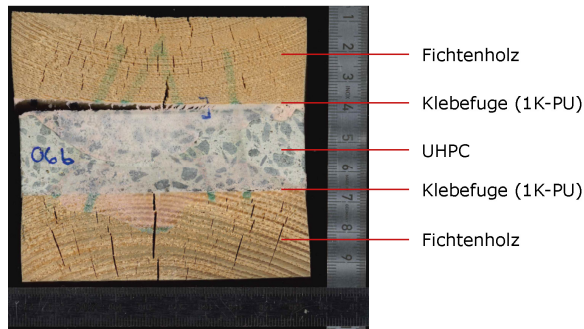
Tabelle 1:
Übersicht über die unterschiedlichen Oberflächenbearbeitungen und die jeweils zur Verfügung stehende Scherfugenanzahl

Oberflächenbehandlung	Stärke	Ohne vorherige Fräsung	Mit vorheriger Fräsung	Anzahl Scherfugen
Geschliffen	K1-C60	X		4
Geschliffen	K0-C24-36	X		4
Satinert	C36	X		4
			X	8
Satinert	C26	X		4
			X	4
Satinert	C60	X		4
			X	4
Gebürstet	C46		X	4
Schalglatt	–			4

Nachdem die Betonoberflächen mit Hilfe von Druckluft gesäubert wurden, erfolgte das beidseitige Aufkleben der Fichtenhölzer. Die Hölzer wurden in einem Zeitraum von 48 h vor der Verklebung auf eine Dicke von 29 mm gehobelt. Die Abmessungen der fertigen Prüfkörper betrugen somit ca. $9,5 \times 7,5 \times 9 \text{ cm}^3$. Die Jahrringausrichtung erfolgte hierbei so, dass die Klebefuge durch das Quellen und Schwinden des Holzes möglichst stark beansprucht wurde (siehe Abbildung 2).

Abbildung 2:

Lage der Jahrringe zur Klebefuge - beispielhaft dargestellt am Prüfkörper 06b, welcher bereits einer Delaminierungsprüfung unterzogen wurde



Der Klebstoffauftrag zwischen Holz und UHPC betrug 200 g/m^2 . Anschließend wurde über Hydraulikpressen ein Pressdruck von $0,75 \pm 0,1 \text{ N/mm}^2$ auf die Prüfkörper aufgebracht. Die offene Zeit, betrug hierbei durchweg weniger als 20 Minuten.

Vor der Delaminierungsprüfung wurden überschüssige Klebstoffreste am Prüfkörper noch mit Hilfe eines Bandschleifers entfernt. So sind auch die Hirnholzflächen der Prüfkörper besser zu erkennen und die anschließende Messung der Fugenöffnung wird erleichtert.

2.3 Ergebnisse

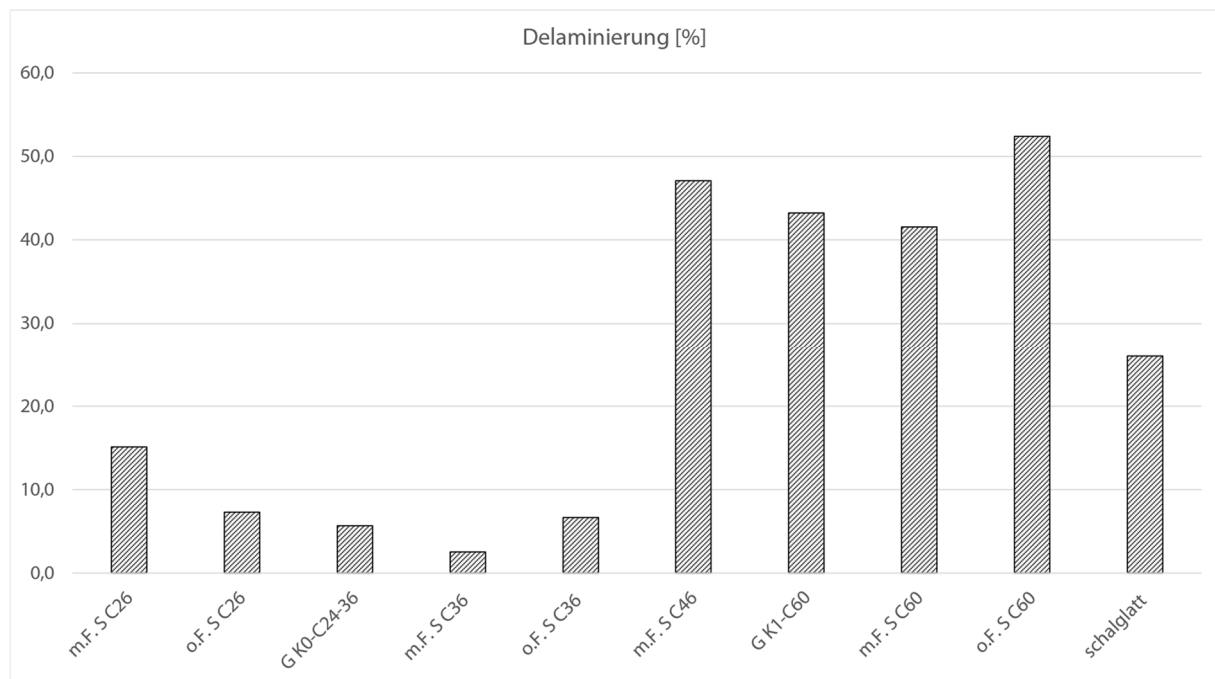
Zunächst ist zu erwähnen, dass es sich bei dem Großteil der Fugenöffnungen um einen Adhäsionsbruch an der Betonoberfläche handelt. Zu einem Kohäsionsbruch im Bereich des Betons kommt es nur stellenweise. Anlage 1 enthält alle Scans der Prüfkörpern nach Durchlaufen der Delaminierungsversuche.

Gute Delaminierungsbeständigkeiten zeigen sich besonders für satinierte Oberflächen mit einer Körnung von C36 und geschliffene Oberflächen mit einer Körnung von K36. Im Falle der C36 satinierten Oberflächen beträgt die Delaminierung im Mittel bei vorherigem Fräsen 3 %. Erfolgte vor dem Satiniervorgang kein Abfräsen der Oberfläche, so kann lediglich ein Mittelwert von 7 % erreicht werden. Im Falle der geschliffenen Betonoberfläche (K0-C24/36) ohne vorheriges Fräsen können ebenfalls gute Ergebnisse mit einer Delaminierung von 6 % im Mittel erreicht werden. Die C26 satinierte Oberfläche ohne vorheriges Fräsen weist einen ähnlichen Mittelwert mit 7 % auf. Hierbei ist zu erwähnen, dass dieser sich aus lediglich einer Delaminierung von 29 % in nur einer Scherfuge ergibt. Anders als bei der C36 satinierten Oberfläche führt ein Fräsvorgang vor dem Satinieren mit C26 im Mittel zu einem erhöhten Delaminierungswert von 15 %. Dies ist auch der Fall bei den in C60 satinierten Oberflächen. Da die Prüfkörper für einen exakten Fräsvorgang zu klein waren und dadurch teils deutliche Unebenheiten auf den Prüfkörperoberflächen erzeugt wurden, lässt dies vermuten, dass die Unebenheiten im Falle der C26 und C60 satinierten und zuvor gefrästen Oberflächen zu einer Abnahme des Verbundes führen. Im Falle der C36 satinierten und zuvor gefrästen Oberfläche können geringere Unebenheiten vorgelegen haben, so dass diese kaum Einfluss auf die Verklebung haben.

In Abbildung 3 ist zu erkennen, dass mit steigend feinerer Oberflächenbearbeitung (S C46, K1-C60, S C60) die Delaminierungswerte zunehmen. Hierbei weist besonders die C60 satinierte und zuvor nicht gefräste Oberfläche einen hohen Delaminierungsmittelwert von 52 % auf.

Die schalglatten Oberflächen zeigen ebenfalls keine zufriedenstellenden Delaminierungen. Mit einem Mittelwert von 26 % weisen diese zwar einen besseren Haftverbund auf, als die C46 bzw. C60 satinierten bzw. geschliffenen Oberflächen, jedoch einen deutlich schlechteren Haftverbund im Vergleich zu den größeren Oberflächen (C26, C36).

Abbildung 3:
Delaminierungswerte der Verbundprüfkörper mit unterschiedlich bearbeiteten UHPC-Oberflächen



2.4 Fazit

Aus den Delaminierungsversuchen ging hervor, dass mit einer satinierten Oberfläche in C36 die geringsten Delaminierungswerte und somit ein guter Haftverbund erzeugt werden kann. Dies ist auch durch ein Abschleifen der schalglatten Oberflächen mit K0-C24-36 realisierbar. Zudem konnte festgestellt werden, dass bei gröberen (C26) bzw. feineren (C46, C60) Oberflächenbehandlungen der Verbund schlechter wird. Ein vorheriges Abfräsen der Betonoberfläche zeigte sich in diesen Vorversuchen widersprüchlich, da hierdurch teils verbesserte, teils verschlechterte Delaminierungswerte hervorgerufen wurden.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden schlussfolgernd zunächst alle weiteren Versuche an zuvor in C36 satinierten Oberflächen durchgeführt. Alternativ ist auch ein Abschleifen der Oberflächen in K0-C24-36 möglich. Von einem vorherigen Abfräsen der Flächen wurde aufgrund der schwierigen Ausführung und dem zusätzlichen Zeitaufwand abgesehen.

3 Kurzzeit- und Langzeitscherversuche

3.1 Hintergrund und Ziel

Zur Untersuchung der Verbundfuge zwischen UHPC und Holz sind sowohl Kurzzeit- als auch Langzeitscherversuche vorgesehen. Die Kurzzeitscherversuche dienen zum einen der Bestimmung der maximalen Scherfestigkeit, und zum anderen der Untersuchung, ob eine Behandlung der satinierten Betonoberfläche durch Primer oder Appreturen einen Einfluss auf die Verbundfestigkeit hat. Aufbauend auf den Kurzzeitscherversuchen werden Langzeitversuche in unterschiedlichen klimatischen Bedingungen durchgeführt, wie sie auch später in der Praxis auftreten können. Ziel dieser Versuche ist zu prüfen, ob sich die Verbundfestigkeit nach konstanter Scherbelastung und unter Einwirkung wechselnder Umwelteinflüsse verändert. Die Laufdauer der Versuche beträgt circa ein Jahr. Nach Abschluss der Dauerbelastung erfolgt die Bestimmung der Restscherfestigkeiten der Prüfkörper in Anlehnung an die Kurzzeitscherversuche.

3.2 Material

Für die Versuche kommen zwei unterschiedliche UHPC-Compounds (Compound 1 und 2) zum Einsatz. Auf Stahlfasern wird bei allen Mischungen verzichtet. Die Betonoberflächen sind vor der Verklebung beidseitig in C36 satiniert und mit Aceton gesäubert. Die Holzlamellen bestehen ausschließlich aus, kurz vor der Verklebung, beidseitig gehobeltem unsortiertem Fichtenholz. Die einzelnen Lamellenlagen sind mit Hilfe zwei unterschiedlicher Klebstoffe (Klebstoff 1/2) verklebt.

Im Rahmen der Kurzzeitscherversuche kommen zudem zwei unterschiedliche UHPC-Oberflächenbehandlungen in Form eines Appretur- bzw. Primerauftrags zur Anwendung. Hierzu erfolgt auf den UHPC-Oberflächen im Falle einer Verklebung mit dem Klebstoff 2 ein Auftrag mit dem dazu gehörigen Primer/Appretur 2. Bei der Verklebung mit dem Klebstoff 1 ist vor der Verklebung ein Primer/Appretur 1 aufzubringen. Die Oberflächenbehandlungen werden bei allen Primern/Appreturen deckend mit Hilfe eines Pinsels aufgebracht.

3.3 Prüfkörper

Oberndorfer et al. (2021) stellten im Rahmen kleinformatiger Verbundversuche bereits fest, dass die Verbundkomponente Holz häufig das schwächste Glied der Verbundfuge darstellt. Daraus lässt sich schließen, dass die Schubfestigkeit des Holzes maßgebend für das Versagen der Verbundkörper unter Schubbeanspruchung ist. Je nach Querschnitt kann dies die Scherfestigkeit des Holzes längs zur Faser (siehe Abbildung 4, links) oder quer zur Faser (Rollschubfestigkeit, Abbildung 4, rechts) sein. Somit ergeben sich zwei unterschiedliche Prüfkörperaufbauten, die es zu untersuchen gilt. Je Prüfkörper sind zwei Scherfugen zwischen UHPC und Holz vorhanden. Die Breite der Scherfläche beträgt bei allen Prüfkörpern 10 cm. Dies entspricht einer gängigen Lamellenbreite im Bereich der Brettspertholzherstellung. Die Scherflächenlänge ergibt sich in Anlehnung an den Prüfaufbau (siehe Kapitel 3.4) im Falle der dreilagigen Prüfkörper zu ca. 37,5 cm und im Falle der fünflagigen Prüfkörper zu ca. 45,1 cm. Aufgrund der höheren Schubtragfähigkeit des Holzes längs zur Faser werden im Rahmen der Kurzzeitscherversuche lediglich die dreilagigen Prüfkörper untersucht. Die fünflagigen Prüfkörper kommen erst im Rahmen der Langzeitversuche zum Einsatz. Die maximale charakteristische Schertragfähigkeit $F_{\text{est},3}$ längs zur Faser ergibt sich zu:

$$F_{est,3} = f_{v,k} \cdot b \cdot l \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 100 \cdot 374,7 \cdot 10^{-3} = 149,88 \text{ kN} \quad (2)$$

Mit:

$f_{v,k}$ Scherfestigkeit längs zur Faser für C 24 in N/mm² nach DIN EN 338

b Breite Verbundfläche in mm

l Länge der Verbundfläche in mm

Im Falle der fünflagigen Prüfkörper beträgt die charakteristische maximale Schertragfähigkeit lediglich 45,08 kN (Formel (3)).

$$F_{est,5} = f_{v,90,k} \cdot b \cdot l \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 100 \cdot 450,8 \cdot 10^{-3} = 45,08 \text{ kN} \quad (3)$$

Mit:

$f_{v,90,k}$ Scherfestigkeit quer zur Faser für C 24 in N/mm² nach DIN EN 338

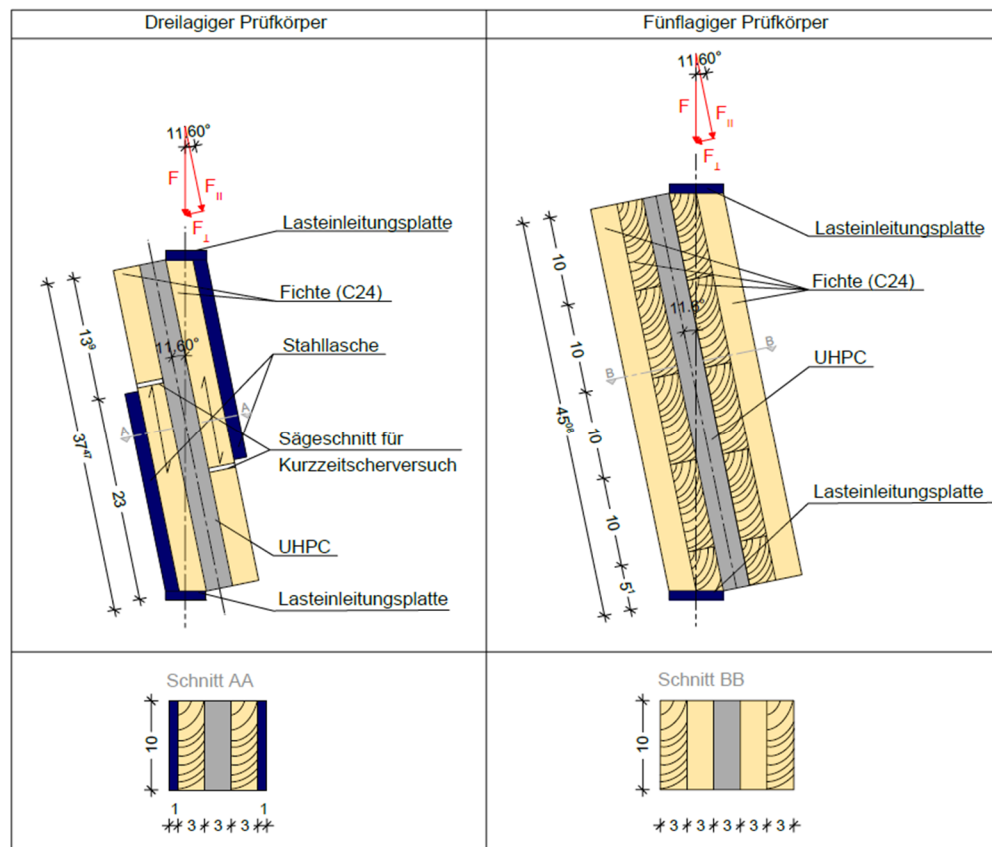
b Breite Verbundfläche in mm

l Länge der Verbundfläche in mm

Da das Holz rechnerisch und experimentell vor dem Erreichen der maximalen Scherfestigkeit auf Druck versagen würde, sind die dreilagigen Prüfkörper mit Hilfe von aufgeklebten Stahllaschen verstärkt (Abbildung 4). Die Lasteinleitung erfolgt über Lasteinleitungsplatten aus Stahl, die auf den Holzlamellen aufliegen. Um im Rahmen der Kurzzeitscherversuche zudem zu vermeiden, dass zuerst die Verbundfuge zwischen Stahllasche und Holz auf Schub versagt, wurde unterhalb der aufgeklebten Stahllaschen zusätzlich ein 5 mm breiter Sägeschnitt angeordnet. Somit verringert sich die Scherflächenlänge von 37,5 cm zu 24 cm. Da das Belastungsniveau im Rahmen der Langzeitscherversuche geringgehalten und zudem überwacht wird, wird hier auf den Sägeschnitt unterhalb der Stahllaschen verzichtet. Zusätzlich zu den dreilagigen Prüfkörpern werden zudem fünflagige Prüfkörper im Langzeitversuch belastet. Da hier das Lastniveau aufgrund der veränderten Faserorientierung an der Verbundfuge zwischen UHPC und Holz deutlich geringer ist, wird auf den Sägeschnitt verzichtet.

Abbildung 4:

Ansicht und Querschnitt der Scherprüfkörper; links: dreilagiger Prüfkörper; rechts: fünflagiger Prüfkörper – Maße in [cm]



Die jeweiligen Verlebungskombinationen, welche in den Kurzzeitscherversuchen untersucht werden, sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die im Rahmen der Langzeitversuche untersuchten Kombinationen ergeben sich aus den Ergebnissen der Kurzzeitscherversuche.

Tabelle 2:

Verklebungskombinationen der dreilagigen Verbundprüfkörper, welche im Rahmen der Kurzzeitscherversuche geprüft werden

Kurzzeitscherversuche					
Reiner Klebstoffauftrag			Klebstoffauftrag inklusive vorherigem Primer-/Appreturauftrag auf UHPC Oberfläche		
Klebstoff	Appretur/Primer	Prüfkörperbezeichnung	Klebstoff	Appretur/Primer	Prüfkörperbezeichnung
Klebstoff 1	ohne	K1-Prüfkörper	Klebstoff 1	Primer/Appretur 1	K1P/A-Prüfkörper
Klebstoff 2	Ohne	K2-Prüfkörper	Klebstoff 2	Primer/Appretur 2	K2P/A-Prüfkörper

3.4 Versuchsaufbau

3.4.1 Allgemein

Für den Versuchsaufbau der Scherversuche kommen zwei verschiedene Prüfaufbauten in Frage. Zum einen der Push-Out-Versuch nach DIN CEN/TS 19103 sowie der geneigte Druckscherversuch zur Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung nach DIN EN 408. Gewählt wurde ein Prüfaufbau in Anlehnung an die DIN EN 408, da es beim klassischen Push-Out-Versuch nach DIN CEN/TS 19103 aufgrund der exzentrischen Lasteinleitung zu einer Querzugbeanspruchung im unteren Bereich kommt.

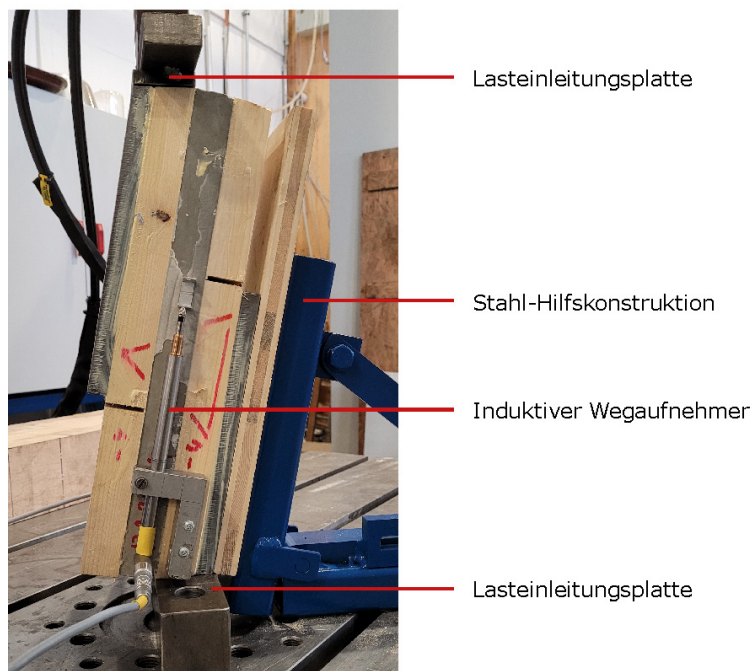
Abweichend von dem um 14° geneigten Prüfkörper nach DIN EN 408 wurden die Prüfkörper in einem 11,6° Winkel belastet. Dies hat den Vorteil, dass der Querdruckanteil, welcher auf die Verbundfuge wirkt, minimiert wird. Während im Versuchsaufbau nach DIN EN 408 die Last über die aufgeklebten Stahllaschen in das Holz eingeleitet werden, so erfolgt die Lasteinleitung hier über die, auf der UHPC-Lamelle, aufgeklebten Holzlamellen. Somit wird beidseitig direkt die Verbundfuge durch eine Scherkraft beansprucht. Über die gesamte Versuchsdauer hinweg, ist diese Kraft in den Verbundfugen möglichst konstant zu halten. Aus dem Neigungswinkel und den Lamellendicken ergibt sich die Prüfkörperlänge wie in Kapitel 3.3 beschrieben.

Der weitere Prüfaufbau inklusive Lasteinleitung unterscheidet sich zwischen Kurzzeit- und Langzeitscherversuchen und wird daher im Folgenden getrennt voneinander beschrieben.

3.4.2 Kurzzeitscherversuche

Die Belastung der Prüfkörper erfolgt weggesteuert mit 5 mm/min, wobei die Vorkraft 500 N beträgt. Die Laststeigerung erfolgt solange, bis die schwächere der beiden Verbundfugen zwischen UHPC und Holz versagt und somit die maximale Scherfestigkeit erreicht ist. Während der Prüfdauer wird sowohl die Prüflast, der Maschinenweg als auch die Relativverschiebung beider Verbundfugen mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern aufgezeichnet. Abbildung 5 zeigt beispielhaft den Prüfaufbau der Kurzzeitscherversuche.

Abbildung 5:
Prüfaufbau der Kurzzeitscherversuche



3.4.3 Langzeitscherversuche

Während der Langzeitversuche soll eine gleichbleibende Scherbeanspruchung in der Klebefuge zwischen UHPC und Holz über ca. ein Jahr hinweg aufrechterhalten werden. Hierzu werden Prüfstände in zwei unterschiedlichen klimatischen Umgebungen, wie diese auch in der Praxis auftreten, aufgestellt. Diese entsprechen der Nutzungsklasse 1 und 2 (NKL1 und NKL2), welche nach der DIN EN 1995-1-1 wie folgt definiert sind:

- Nutzungsklasse 1(NKL1):

„Die Nutzungsklasse 1 ist gekennzeichnet durch einen Feuchtegehalt in den Baustoffen, der einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft entspricht, die nur für einige Wochen je Jahr einen Wert von 65 % übersteigt.“

- Nutzungsklasse 2(NKL2):

„Die Nutzungsklasse 2 ist gekennzeichnet durch einen Feuchtegehalt in den Baustoffen, der einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft entspricht, die nur für einige Wochen je Jahr einen Wert von 85 % übersteigt.“

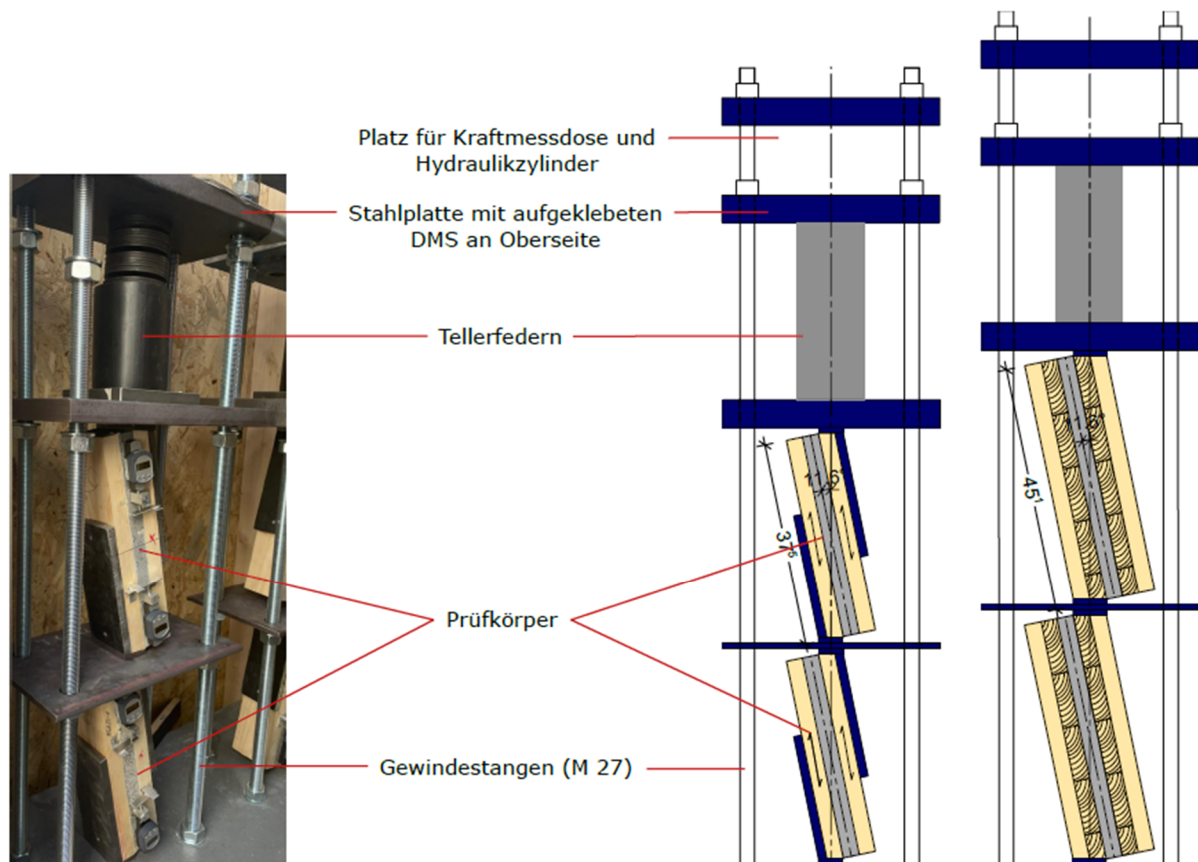
NKL1 entspricht hierbei dem Normklima, welches in den Prüfhallen der Materialprüfanstalt (MPA Bau) herrscht. NKL2 entspricht dem Außenklima, wobei die Prüfkörper zwar der Sonneneinstrahlung und der Umgebungsluft und –feuchte direkt ausgesetzt sind, allerdings vor direkter Beregnung geschützt sind. Hierzu wurden im Außenbereich drei Holzhäuschen mit Makrolondach errichtet in denen sich insgesamt 10 Prüfstände mit jeweils zwei Prüfkörpern befinden (vgl. Abbildung 6). Die unterschiedlichen Farben der Holzhäuschen dienen der erleichterten Organisation der Prüfungsergebnisse.

Abbildung 6:
Prüfhäuser der Langzeitscherversuche in NKL2



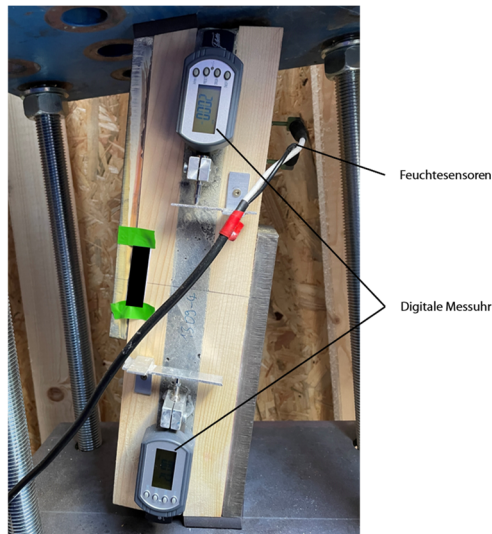
Die Einleitung der Kraft F erfolgt mit Hilfe von Hydraulikzylindern und über das Festdrehen von Muttern, welche an den Prüfständen befestigt sind (siehe Abbildung 7). Durch das Integrieren von Tellerfedern im Prüfstand kann trotz Schwinden und Kriechen der Prüfkörpermaterialien die Auflast relativ konstant gehalten werden und ein Nachziehen der Muttern an den Gewindestangen ist seltener erforderlich. Aufgrund wechselnder klimatischer Bedingungen in NKL 2 können die verfügbaren Kraftmessdosen nicht dauerhaft eingesetzt werden. Deshalb wird die, auf die Prüfkörper wirkende, Kraft in regelmäßigen Abständen beim Nachspannen überprüft. Hierzu wird temporär eine Kraftmessdose eingebaut und während dem Nachspannen die Belastung gemessen. Beim Erreichen der gewünschten Last werden die Muttern, wenn notwendig, justiert und die maximale Last sowie die notwendigen Anpassungen notiert.

Abbildung 7:
Prüfaufbau der Langzeitprüfstände



Da das Außenklima in NKL 2 nicht genormt ist und jederzeit Temperatur- und Feuchteschwankungen auftreten können, ist es erforderlich, mit Hilfe geeigneter Messgeräte, die Umgebungstemperatur und – feuchte, sowie die Holzfeuchte in regelmäßigen Abständen aufzuzeichnen. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Messtechnik wird die Holzfeuchte an jedem Prüfkörper nur einseitig mittels Feuchtesensoren aufgezeichnet (vgl. Abbildung 8). Zusätzlich werden in jedem Prüfhaus die Umgebungstemperatur sowie die relative Luftfeuchte überwacht. Um mögliche Relativverschiebungen in der Verbundfuge zwischen Holz und UHPC aufzuzeichnen sind an den Prüfkörpern jeweils zwei digitale Messuhren (eine Messuhr je Scherfuge) platziert. Diese verfügen über eine manuelle Anzeige, welche in regelmäßigen Abständen kontrolliert werden muss (vgl. Abbildung 8).

Abbildung 8:
Eingebauter 3-lagiger Prüfkörper mit Messtechnik und Feuchtesensoren



Im Rahmen der Kurzzeitscherversuche werden die Prüfkörper bis zum Versagen belastet. Im Rahmen der Langzeitscherversuche ist ein Versagen während der Versuchsdauer nicht erwünscht, weshalb ein oberes Lastniveau festgelegt werden muss.

Eisenhut (2015) belastete Scherprüfkörper mit 2 N/mm^2 . Dies entspricht 25 % der, in Eisenhut (2015) experimentell ermittelten Verbundspannung. Bezogen auf die in DIN EN 338 angegebene charakteristische Scherfestigkeit längs zur Faser, für Holz der Festigkeitsklasse C24, entspricht dies einem Lastniveau von 50 %.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes soll das Lastniveau entsprechend der vorgesehen Lasteinwirkungsdauer von ca. 12 Monaten festgelegt werden. Dies entspricht nach DIN EN 1995-1-1 der Klasse der Lasteinwirkungsdauer „lang“ (6 Monate bis 10 Jahre). In Verbindung mit NKL1 und NKL2 führt dies zu einem Modifikationsbeiwert von $k_{\text{mod}} = 0,7$ (DIN EN 1995-1-1). Daher werden die Prüfkörper im Rahmen der Langzeitscherversuche mit 70 % der Kurzzeitscherfestigkeit nach DIN EN 338 belastet (Gleichung (4) und (5)).

$$F_{3l} = k_{mod} \cdot \frac{F_{est,3}}{\cos(11,6)} = 0,7 \cdot \frac{149,88}{\cos(11,6)} = 107 \text{ kN} \quad (4)$$

Mit:

$F_{est,3}$ Siehe Gleichung (2)

$$F_{5l} = k_{mod} \cdot \frac{F_{est,5}}{\cos(11,6)} = 0,7 \cdot \frac{45,08}{\cos(11,6)} = 32 \text{ kN} \quad (5)$$

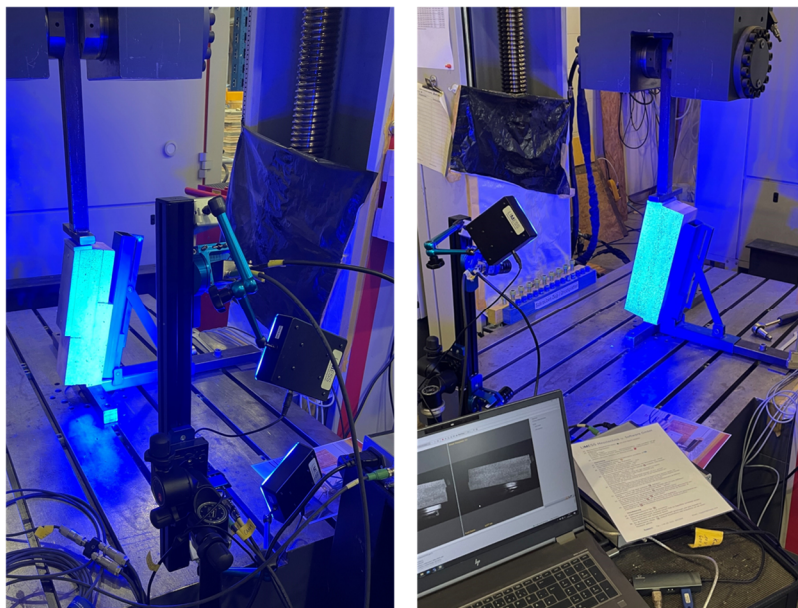
Mit:

$F_{est,5}$ Siehe Gleichung (3)

Allerdings stellt die mechanische Lastaufbringung mittels Hydraulikzylinder und angeschlossener Handpumpe ein sehr sensibles System dar. Um ein Überschießen der gewünschten Last (F_{3l} bzw. F_{5l}) und somit ein frühzeitiges Versagen von Versuchskörpern zu verhindern wird daher ein Lastbereich festgelegt. Dieser liegt zwischen 90 % und 100 % von F_{3l} bzw. F_{5l} . Das entspricht im Falle des dreilagigen Aufbaus zwischen ca. 95 und 107 kN und im Falle des fünflagigen Aufbaus zwischen ca. 28 und 32 kN.

Nach Abschluss der Langzeitbelastung werden die Restscherfestigkeiten geprüft. Der Prüfaufbau entspricht den Kurzzeitscherversuchen (vgl. Kapitel 3.4.2). Jedoch wird die Verformung nicht mit Wegaufnehmern sondern mit einem optischen Messsystem aufgenommen. Das optische Messsystem (Istra 4D) wird verwendet, um auch mögliche Querdruck- Querkzugspannungen zu messen. Hierzu wird eine weiße Grundierung mit Sprengelung aus schwarzen Punkten auf die Prüfkörper aufgebracht. Das System misst die Verschiebungen der einzelnen Punkte und ermittelt dadurch Verformungen und Dehnungen der Prüfkörper. In Abbildung 9 sind die Prüfaufbauten und die Messtechnik zu sehen. Das blaue Licht ist für eine Messung mit dem optischen System notwendig.

Abbildung 9:
Eingebauter 3-lagiger Prüfkörper (links) und 5-lagiger Prüfkörper (rechts) zur Prüfung der Restscherfestigkeiten mithilfe eines optischen Messsystems (Istra 4D)



3.5 Ergebnisse der Kurzzeitscherversuche

Mit dem Klebstoff 1 konnten sowohl mit als auch ohne vorherigen Primer/Appreturauftrag (K1- und K1P/A-Prüfkörper) die höchsten Scherfestigkeiten erfasst werden (vgl. Tabelle 3). Der geringere Variationskoeffizient der Schubspannung im Falle der K1P/A-Prüfkörper lässt einen verbesserten Haftverbund aufgrund des vorherigen Appreturauftrages vermuten. Allerdings fand sowohl bei den K1-Prüfkörpern als auch bei den K1P/A-Prüfkörpern ein Schubversagen innerhalb der Holzkomponente statt. Somit spiegelt der Variationskoeffizient vielmehr die Streuung des Rohstoffes Holz, als die Streuung des Haftverbundes in der Fuge wider.

Im Falle der K2-Prüfkörper sind zwei Prüfergebnisse (K2_1 und K2_2) nicht brauchbar, da hier auf Stahllaschen verzichtet wurde und somit die Prüfkörper als erstes auf Druck versagten. Somit ist lediglich die Schubspannung eines K2-Prüfkörpers verwendbar, welcher eine maximale Schubspannung von $5,10 \text{ N/mm}^2$ aufweist. Ein vorheriger Primer/Appreturauftrag eines mit dem Klebstoff 2 hergestellten Prüfkörpers (K2P/A-Prüfkörper) führt zu einer Verringerung der Scherfestigkeit in der Verbundfuge. Im Mittel konnte hier eine Scherspannung von $2,86 \text{ N/mm}^2$ erreicht werden. Die Verschlechterung des Verbundverhaltens durch das vorherige Primern/Appreturen ist auch im Bruchbild gut zu erkennen. Dieses zeigt bei allen drei K2P/A-Prüfkörpern hauptsächlich ein Versagen in der Kontaktzone zwischen nachträglich behandelter Betonoberfläche und Klebstoff (siehe Anlage 2).

Tabelle 3:

Scherfestigkeiten der Kurzzeitscherversuche; mit x = Mittelwert; s = Standardabweichung; Var = Variationskoeffizient; rot gekennzeichnet sind unbrauchbare Ergebnisse

Klebstoff	Prüfkörper	Max. Kraft [kN]	Scherfläche [mm ²]	Max. Scherspannung [N/mm ²]	
Klebstoff 1	K1_1	133,4	100 x 240	5,56	x = 5,70 N/mm ² s = 1,12 N/mm ² Var = 0,20 %
	K1_2	171,3		7,14	
	K1_3	105,6		4,40	
Klebstoff 1 + Primer/Appretur	K1P/A_1	132,6	100 x 240	5,53	x = 5,68 N/mm ² s = 0,19 N/mm ² Var = 0,03 %
	K1P/A_2	142,5		5,94	
	K1P/A_3	133,6		5,56	
Klebstoff 2	K2_1	125,6	100 x 374,7	3,35	x = 5,10 N/mm ²
	K2_2	173,95		4,64	
	K2_3	122,35	100 x 240	5,10	
Klebstoff 2 + Primer/Appretur	K2P/A_1	91,74	100 x 240	3,82	x = 2,86 N/mm ² s = 0,70 N/mm ² Var = 0,25 %
	K2P/A_1	61,55		2,56	
	K2P/A_1	52,43		2,18	

Da der Primer/Appreturauftrag im Falle der Verklebung mit dem Klebstoff 1 keinen ausschlaggebenden Vorteil erzielt und bei allen sechs Prüfkörpern (J- und JA-Prüfkörper) maßgeblich ein Versagen im Holz festgestellt werden konnte wird aufgrund des zusätzlichen Zeitaufwandes auf das Auftragen eines Primers/Appretur vor dem Verkleben verzichtet.

Da im Falle der Verklebung mit dem Klebstoff 2 das vorherige Primer/Appreturauftrag zu einer deutlichen Haftminderung zwischen Beton und Holz geführt hat wird auch hier auf das Auftragen eines Primers/Appretur, vor der Verklebung verzichtet.

Im Rahmen der Langzeitversuche wird daher lediglich das Verkleben von UHPC und Holz mit dem Klebstoffen 1 und 2 untersucht. Die hier ermittelten maximalen Schubtragfähigkeiten des Holzes liegen hier in allen Fällen deutlich über den 70 % der charakteristischen Schertragfähigkeit nach DIN EN 338, wie sie im Rahmen der Langzeitscherversuche angesetzt wird.

3.6 Ergebnisse der Langzeitversuche

3.6.1 Prüfkombination

Aufgrund der Ergebnisse der Kurzzeitscherversuche ergeben sich die in Tabelle 4 aufgeführten Prüfkörperkombinationen, die es im Rahmen der Langzeitversuche zu untersuchen gilt.

Insgesamt sind in jeder NKL vier Prüfkörper je Verklebungskombination angeordnet. Somit ergeben sich 20 Prüfkörper, die je NKL dauerbelastet werden.

Tabelle 4:

Prüfkörperkombinationen in NKL 1 und NKL 2, welche im Rahmen der Langzeitversuche untersucht werden

Langzeitversuche					
NKL 1			NKL 2		
Dreilagige Prüfkörperkombination					
Anzahl Prüfkörper	UHPC Compound	Klebstoff	Anzahl Prüfkörper	UHPC Compound	Klebstoff
4x	Compound 2	Klebstoff 1	4x	Compound 2	Klebstoff 1
4x	Compound 2	Klebstoff 2	4x	Compound 2	Klebstoff 2
4x	Compound 1	Klebstoff 2	4x	Compound 1	Klebstoff 2
4x	Compound 1	Klebstoff 1	4x	Compound 1	Klebstoff 1
Fünflagige Prüfkörperkombinationen					
4x	Compound 1	Klebstoff 2	4x	Compound 1	Klebstoff 2

Die Prüfkörperbezeichnung setzt sich aus der Compoundnummer, der Klebstoffnummer, der Nutzungsklasse und einer aufsteigenden Prüfkörpernummer (1–4) zusammen. Der erste Prüfkörper mit einem Beton des Compounds 1 mit einer Verklebung mit dem Klebstoff 2 in der Nutzungsklasse 2 trägt die Bezeichnung: C1K2_NKL2_1. Zur Identifikation der 5-lagigen Prüfkörper wird anschließend an die Nutzungsklasse die Zahl 5 eingefügt (Bsp.: C1K2_NKL1_5_1).

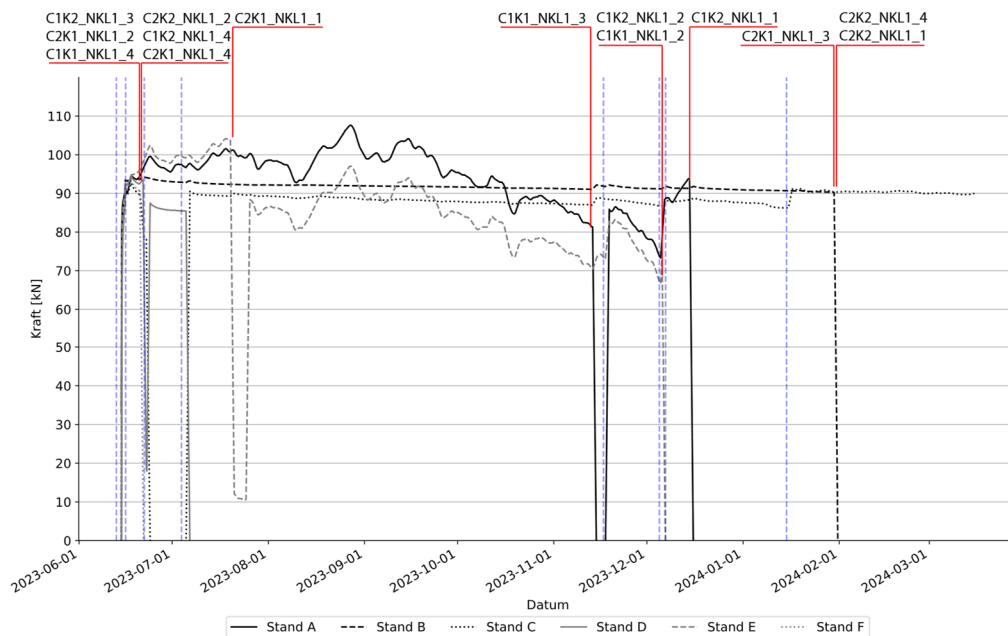
3.6.2 Kraftverlauf über das Jahr

Nutzungsklasse 1

Die Kraftverläufe in der NKL 1 sind für die 3-lagigen Prüfkörper in Abbildung 10 und für die 5-lagigen Prüfkörper in Abbildung 11 dargestellt. Während der Lastaufbringung sind bereits einige Prüfkörper versagt. Diese sind in den Abbildungen mit dem zugehörigen zeitlichen Ereignis gekennzeichnet. Eine differenzierte Auswertung des Versagens während der Langzeitbeanspruchung wird in Kapitel 3.6.4 aufgeführt. Ebenfalls sind in den Abbildungen die Zeitpunkte des Nachspannens mit blau gestrichelten Linien gekennzeichnet. Die Kraftmessung erfolgte durchgehend jede Stunde über den Prüfungszeitraum, startend am 13.06.2023 und endend am 18.03.2024. Die Kraft bewegt sich in einem Bereich zwischen 70 und 109 kN. Die Prüfkörper im Stand C, welche nicht versagten, besitzen eine relativ konstante Last zwischen 88 – 90 kN. Im Gegensatz zu

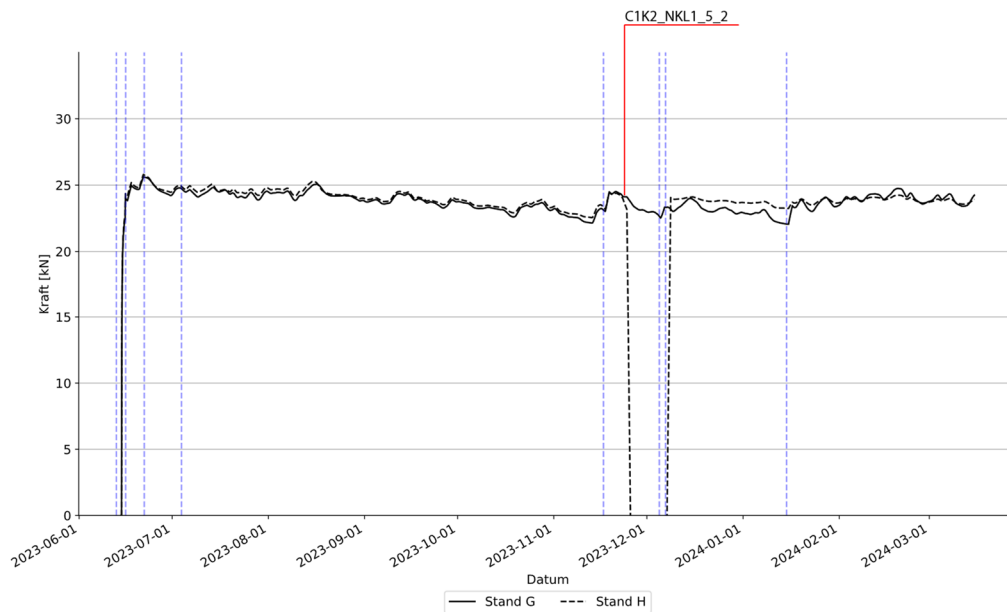
Stand A und E, weisen Stand B und C konstantere Verläufe auf. Diese liegt vermutlich an den, aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit, variierten Tellerfedern. Durch eine größere Anzahl an Tellerfedern in den Ständen B und C kann die Last konstanter gehalten werden.

Abbildung 10:
Kraftverlauf während der Langzeitversuche in der NKL 1 der 3-lagigen Prüfkörper mit eingezeichneten Versagenszeitpunkt der Prüfkörper (rot) und Zeitpunkten des Nachspannens (blau strichliert)



Bei den 5-lagigen Prüfkörpern der Nutzungsklasse 1 kann die Last relativ konstant zwischen 24 – 25 kN gehalten werden. Nachdem in Stand H der Prüfkörper C1K2_NKL1_2 versagte sind die Schwankungen geringer. Dies liegt daran, dass ab diesem Zeitpunkt ein Prüfkörper in dem Stand eingebaut ist, was die auszugleichenden Differenzen der Tellerfedern reduziert.

Abbildung 11:
Kraftverlauf während der Langzeitversuche in der NKL 1 der 5-lagigen Prüfkörper mit eingezeichneten Versagenszeitpunkt der Prüfkörper (rot) und Zeitpunkten des Nachspannens (blau strichliert)

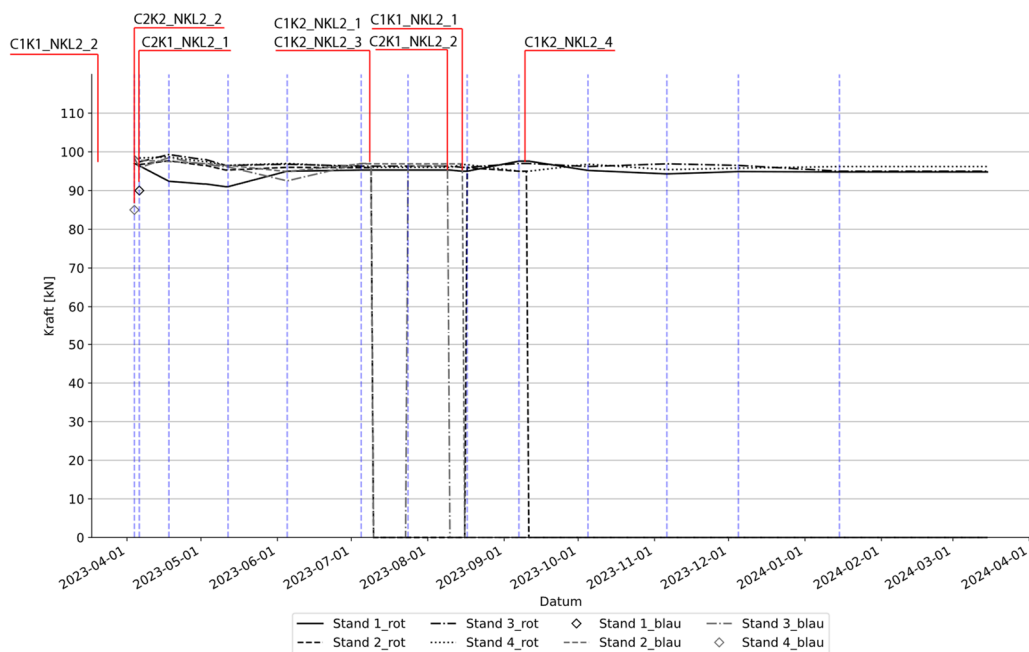


Nutzungsklasse 2

Die Kraftverläufe in der NKL 2 sind für die 3-lagigen Prüfkörper in Abbildung 12 und für die 5-lagigen Prüfkörper in Abbildung 13 dargestellt. Während der Lastaufbringung sind bereits einige Prüfkörper versagt. Diese sind in den Abbildungen mit dem zugehörigen zeitlichen Ereignis gekennzeichnet. Eine differenzierte Auswertung des Versagens während der Langzeitbeanspruchung wird in Kapitel 3.6.4 aufgeführt. In den Abbildungen sind die Zeitpunkte des Nachspannens mit blau gestrichelten Linien gekennzeichnet. Die Kraftmessung erfolgte während des Nachspannens mittels einer Kraftmessdose. Das Nachspannen und kontrollieren der Last erfolgte jeden Monat beginnend am 04.04.2023 und endend am 18.03.2024. Die Kraft bewegt sich bei den 3-lagigen Prüfkörpern in einem Bereich zwischen 90 und 99 kN. Genaue Aussagen über einen Temperaturabhängigen Verlauf sind nicht möglich. Da in der NKL 2 deutlich mehr Tellerfedern zum Einsatz kamen ist davon auszugehen, dass trotz größerer Temperatureinwirkungen im Vergleich zur NKL 1 eine relativ konstante Last aufgebracht werden konnte.

Abbildung 12:

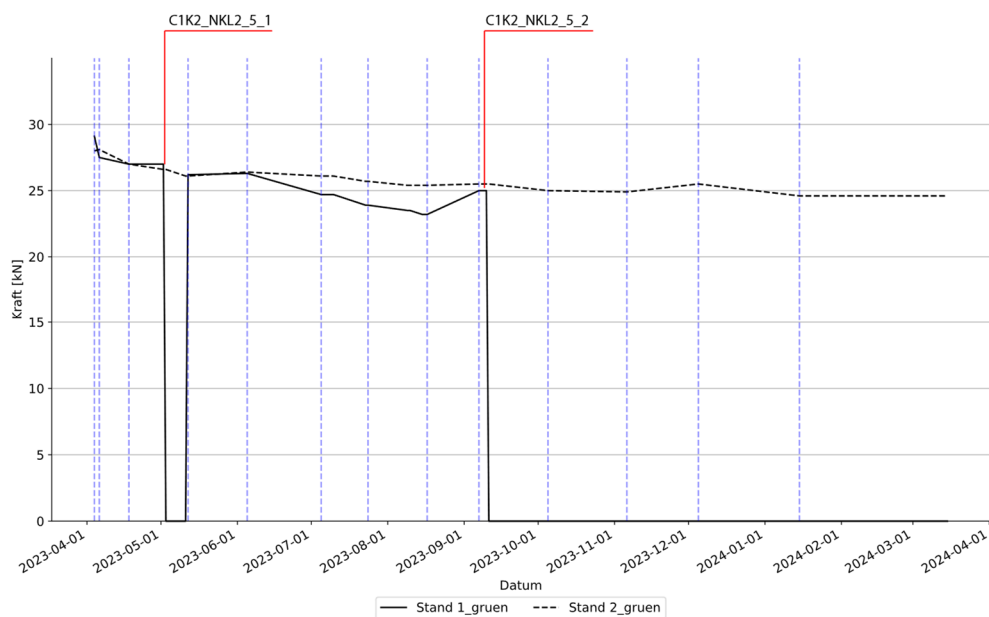
Kraftverlauf während der Langzeitversuche in der Nutzungsklasse 2 der 3-lagigen Prüfkörper anhand der Nachspannprotokolle mit eingezeichneten Versagenszeitpunkt der Prüfkörper (rot) und Zeitpunkten des Nachspannens (blau strichliert)



Bei den 5-lagigen Prüfkörpern der NKL 2 konnte die Last relativ konstant zwischen 24 – 27 kN gehalten werden. Auch hier sind aufgrund des Aufzeichnens der Kräfte beim Nachspannen keine genauen temperaturbedingte Aussagen möglich.

Abbildung 13:

Kraftverlauf während der Langzeitversuche in der NKL 2 der 5-lagigen Prüfkörper anhand der Nachspannprotokolle mit eingezeichneten Versagenszeitpunkt der Prüfkörper (rot) und Zeitpunkten des Nachspannens (blau strichliert)

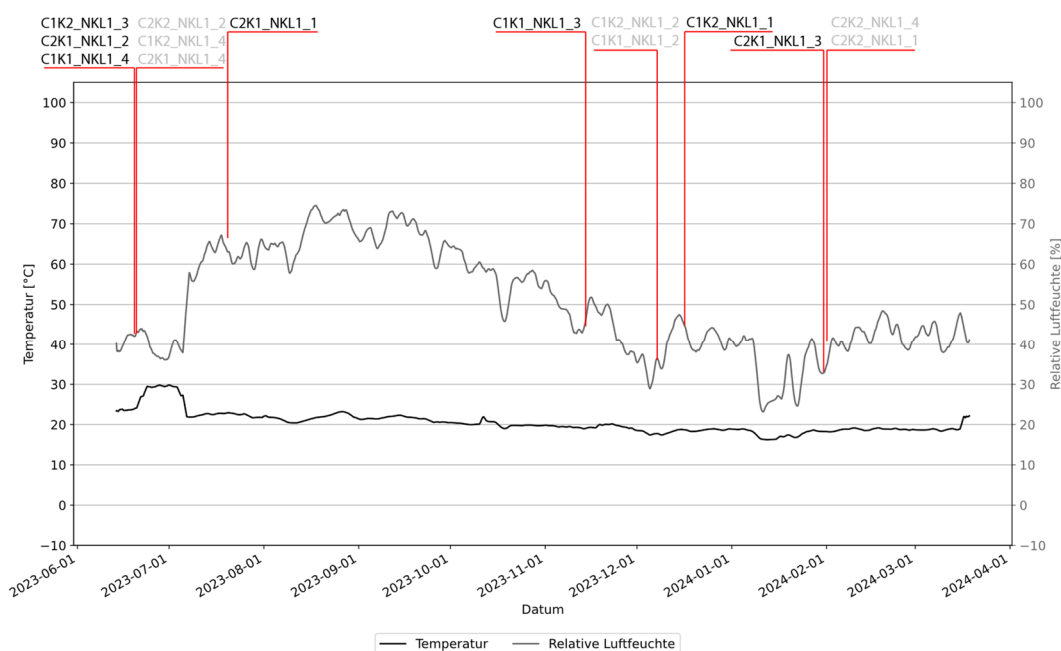


3.6.3 Äußerer Temperatur und Feuchtebeanspruchung

Nutzungsklasse 1

Die Temperatur und die relative Luftfeuchte während der Langzeitbeanspruchung in der NKL 1 ist in Abbildung 14 dargestellt. Wieder mit eingezeichnet sind die jeweiligen Versagenszeitpunkte. Hierbei sind grau markiert die Prüfkörper, welche während des Nachspannens versagten, da hier auf jeden Fall ein hygrothermischer Zusammenhang ausgeschlossen wird. Die Temperatur ist bis auf den Anfangsbereich konstant und beträgt um die 19 bis 22 °C. Die hohen Temperaturen und die geringen relativen Luftfeuchten am Anfang sind darauf zurückzuführen, dass das Messgerät in dieser Zeit neben dem Computer zur Aufzeichnung der Kräfte lag und dieser eine lokale Wärme produzierte. Anschließend wurde das Messgerät umplatziert. Es ist zu erkennen, dass die relative Luftfeuchte ab Mitte August von dem Höchstwert von 70 % kontinuierlich abnimmt und sogar Werte unter 30 % erreicht. Anschließend steigt diese wieder langsam an und pendelt sich auf einem Niveau um die 40 bis 50 % ein. Zwischen den Kraftverläufen der Stände A und E und der relativen Feuchte ist ein Zusammenhang zu erkennen, so steigt die Kraft mit steigender relativer Luftfeuchte und sinkt mit fallender relativer Luftfeuchte (vgl. Abbildung 10). Der letzte Temperaturanstieg kurz vor Ende der Messdaten ist auf den Umzug in das Büro zur Auswertung der Daten zurückzuführen. Somit konnte validiert werden, dass das Messinstrument realistische Daten liefert.

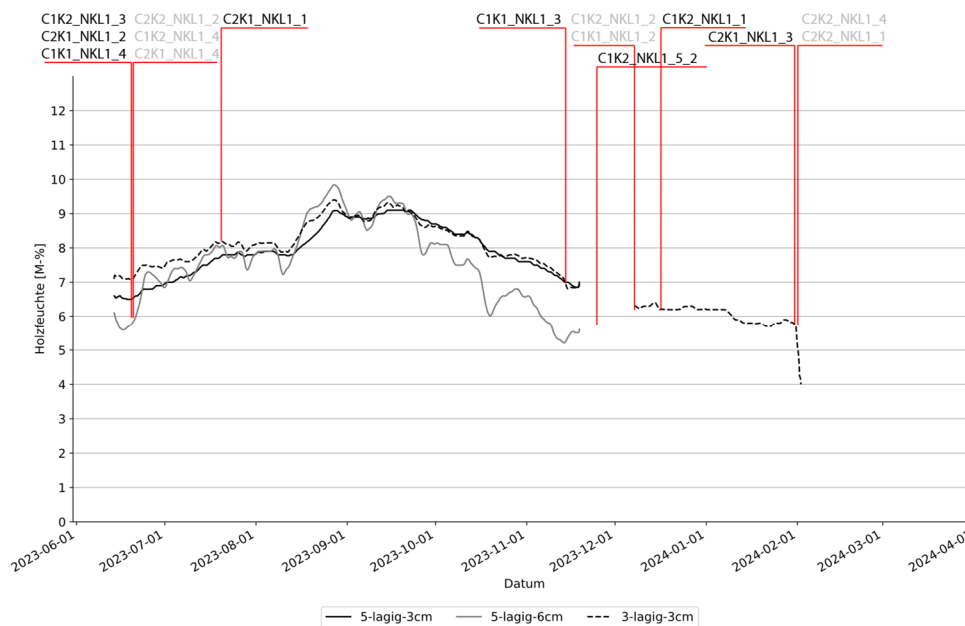
Abbildung 14:
Temperatur und relative Luftfeuchte in der NKL 1 mit eingezeichneten Versagenszeitpunkten



In Abbildung 15 ist die gemessene Holzfeuchte für die 3-lagigen Prüfkörper an der Klebefuge zwischen Beton und Holz und für die 5-lagigen Prüfkörper in der Klebefuge Holz-Holz (3 cm) und die Klebefuge Beton-Holz (6 cm). Es ist festzustellen, dass die Holzfeuchte analog zu der Luftfeuchte verläuft und ab September kontinuierlich abnimmt. Ende Januar versagten die letzten Prüfkörper mit hygrothermischen Messinstrumenten und somit sind für die abschließenden 2 Monate keine Daten vorhanden. Der Abfall der Feuchte ist darauf zurückzuführen, dass die Messstellen nicht mehr komplett im Holz, sondern als Resultat des Prüfkörperversagens frei lagen und somit keine sinnvolle Messung möglich ist. Es ist eine Datenlücke zwischen Ende November bis Anfang Dezember vorhanden. Es gab zwischendurch immer wieder Messausfälle des Systems von ein bis zwei Tagen. Warum das Messsystem in diesem Zeitraum für knapp zehn Tage ausfiel, ist unklar. Anschließend gab es keine Messungen mehr der 5-lagigen Prüfkörper, da der Prüfkörper mit Messsystem versagte. Bei den 5-lagigen Messungen ist zu erkennen, dass die Kontaktfläche

zwischen Beton und Holz schneller Feuchte auf und abnimmt. Dies liegt vermutlich an den vielen frei bewitterten Hirnholzflächen in der Querlage.

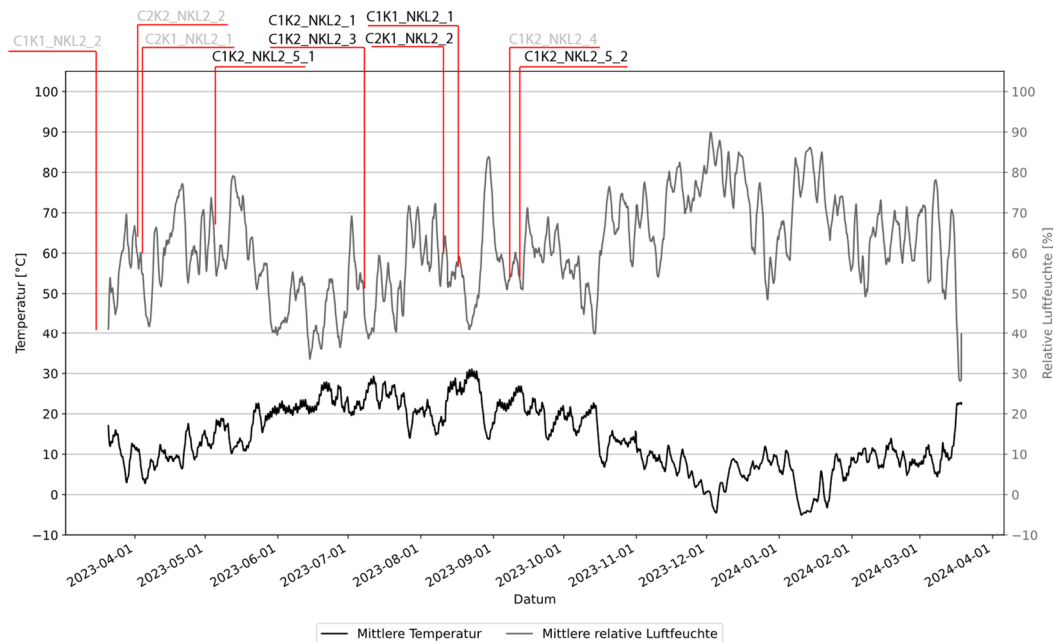
Abbildung 15:
Holzfeuchte in der NKL 1 mit eingezeichneten Versagenszeitpunkten



Nutzungsklasse 2

Für die NKL 2 waren in jedem Haus hygrothermische Messgeräte angebracht. Abbildung 16 zeigt die gemittelten Werte aller Messungen. Die Temperatur liegt zwischen -7°C und $+30^{\circ}\text{C}$. Dies entspricht nicht den absoluten Temperaturhöchstwerten des Jahres, was auf die doch vorhandene Trägheit der Hütten zurückzuführen ist. Diese besitzen ein recht massives Betonfundament und somit werden die Maximalwerte etwas abgemindert. Grundsätzlich zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit den Wetterdaten der Protokolle. So sind Temperaturstürze wie Ende August mit dauerhaften Regen klar ersichtlich und auch der verhältnismäßig warme und milde Februar ist erkennbar. Die relative Luftfeuchte verhält sich entsprechend antizyklisch zur Temperatur. Sinkt die Temperatur so steigt die relative Luftfeuchte und steigt die Temperatur sinkt die relative Luftfeuchte. Ebenfalls sind sehr hohe Werte von langen Regen wie zum Beispiel Ende August erkennbar. Der maximale Wert von knapp 90 % wird Anfang Dezember erreicht. Hier ist ein Temperatursturz mit außergewöhnlichem Schneefall in München zu verzeichnen. Die letzten gemessenen hygrothermischen Datenpunkte sind Messungen im Büro kurz vor der Datenauswertung. Durch die Temperatur und Feuchteänderung wird deutlich, dass die Messinstrumente realistische Daten liefern. Erneut sind die Versagenszeitpunkte der Prüfkörper, welche beim Nachspannen versagten grau hinterlegt. Ein Zusammenhang zwischen Temperatur und relativer Luftfeuchte mit dem Kraftverlauf ist in NKL 2 nicht möglich, da es sich bei den Kräften um die momentanen Kräfte zum Zeitpunkt des Nachspannens handelt und kein zeitlicher Tagesverlauf gemessen wurde.

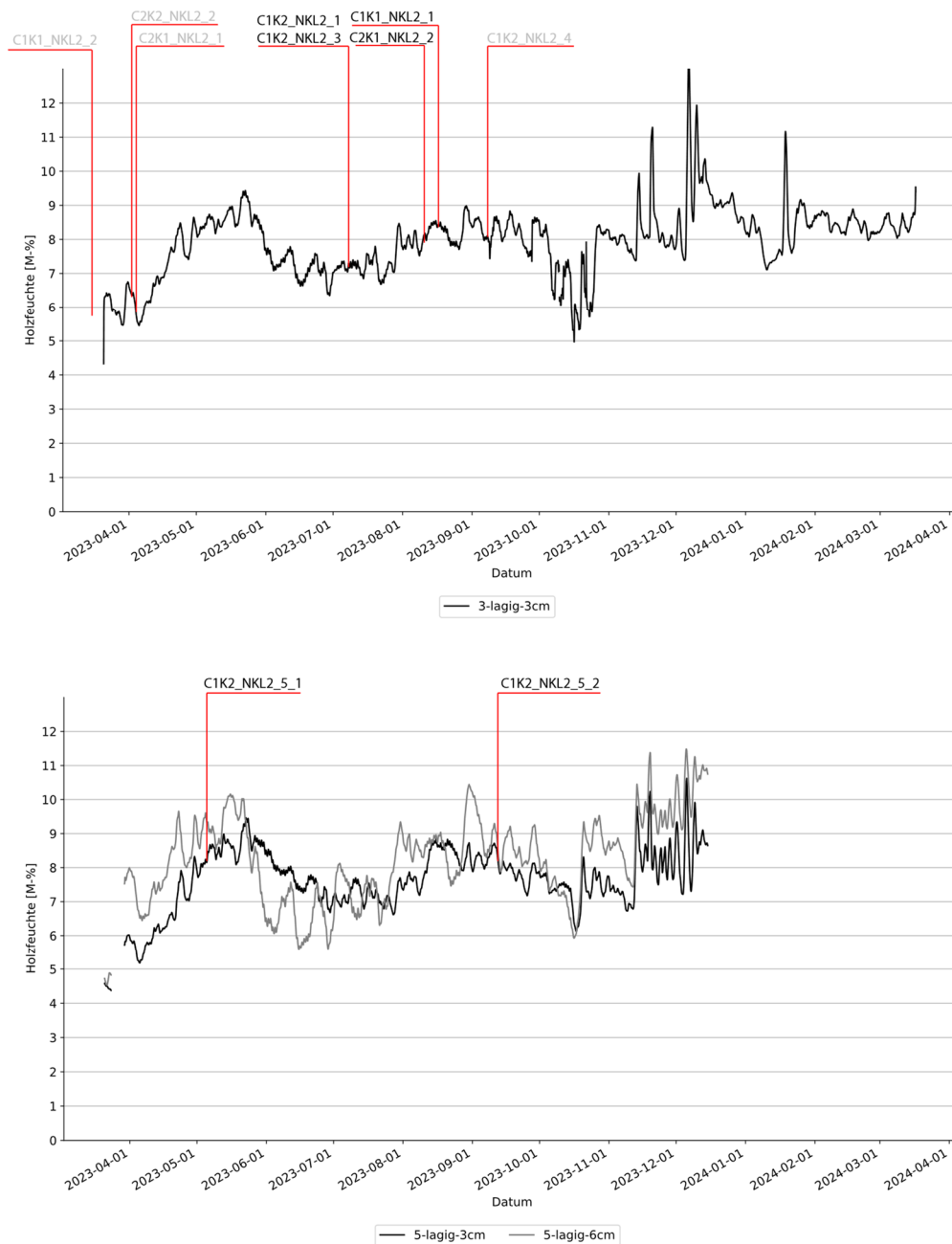
Abbildung 16:
Temperatur und relative Luftfeuchte in der NKL 2 mit eingezeichneten Versagenszeitpunkten



In Abbildung 17 sind die entsprechenden gemittelten Holzfeuchten der Prüfkörper in der Nutzungsklasse 2 eingezeichnet. Die Verläufe für die 5-lagigen und 3-lagigen Prüfkörper folgen der Umgebungsfeuchte. Zu beachten ist, dass das Holz mit einer sehr geringen Holzfeuchte eingebaut wurde. Somit erfolgt zu Beginn eine starke Auffeuchtung. Im Sommer bei den warmen Temperaturen erfolgt ein leichtes Abfallen. Die höchsten Holzfeuchten wurden im November und Dezember gemessen. Ab Mitte Dezember versagte die Messung bei den 5-lagigen Prüfkörpern. Bei den 5-lagigen Messungen ist wie in der Nutzungsklasse 1 zu erkennen, dass die Kontaktfläche zwischen Beton und Holz schneller Feuchte auf- und abnimmt. Dies liegt vermutlich, wie bereits erwähnt, an den frei bewitterten Hirnholzflächen in der Querlage.

Abbildung 17:

Holzfeuchte in der NKL 2 mit eingezeichneten Versagenszeitpunkten für die 3-lagigen Prüfkörper (oben) und 5-lagigen Prüfkörper (unten)



3.6.4 Versagen während Langzeitbeanspruchung

3-lagige Prüfkörper

Während der Langzeitbeanspruchung sind einige Prüfkörper bereits vor dem Ausbau und der Prüfung der Restfestigkeiten versagt. Bei den 3-lagigen Prüfkörpern handelte es sich in der NKL 1 und 2 um ein Holzversagen. Die Versagensbilder sind Anlage 4 zu entnehmen. Holz verliert mit anhaltender Belastungsdauer an Festigkeit. Eine Möglichkeit dies zu beschreiben ist die Madison Gleichung. Bei der maximal gemessenen Last von 112 kN in der NKL 1 wirkt eine Schubbeanspruchung von $2,9 \text{ N/mm}^2$. Bei der Annahme einer durchgängigen Belastung auf diesem Niveau ist ein Versagen nach der Madison Gleichung

nach 35 Jahren zu erwarten (Wood 1951). Somit ist ein reines Versagen aufgrund einer kontinuierlichen Schubbeanspruchungen ausgeschlossen. Interessant ist, dass einige Prüfkörper bereits während der Lastaufbringung bei Kräften deutlich unter der berechneten Schubfestigkeit mit den 5%-Quantil Festigkeitswerten und unter der in den Kurzzeitversuchen versagen. Zu beobachten ist, dass ein Versagen meist unmittelbar nach einem Nachspannen oder mit einer sinkenden Luftfeuchte und steigender Temperatur zusammenhängt.

Eine mögliche Erklärung ist ein kombiniertes Versagen aufgrund Schub und Querkzug. Diese Theorie stützt sich auf einen durch die unterschiedlichen Steifigkeiten der angebrachten Stahlplatte und des Holzes bedingten entstehenden Hebelarm bei der Lasteinleitung. Bei der Berechnung des Schwerpunktes aufgrund der Steifigkeiten ergibt sich ein Hebelarm von 2 cm und ein konstantes Moment im Prüfkörper. Dieses Moment führt einerseits zu einer minimalen Erhöhung der Längskräfte und in Kombination mit einer Verkeilung der Prüfkörper im Einleitungsbereich zu einer lokalen Querkzugbeanspruchung. Eine Zusammenstellung der Versagensarten und Informationen ist für NKL 1 Tabelle 5 und für NKL 2 Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 5:

Zusammenstellung der Versagensarten und Lastniveaus sowie Lastaufbringung und hygrothermische Randbedingungen der 3-lagigen Prüfkörper in der NKL 1

Prüfkörper Nr.	Versagensart	Schubspannung bei Versagen [N/mm ²]	Lastaufbringung	Hygrothermische Randbedingung
C2K1_NKL1_2	Holzversagen	2,59	1 Tag nach Nachspannen	Temperatur konstant, Luftfeuchte recht konstant
C1K1_NKL1_4	Holzversagen	2,59	1 Tag nach Nachspannen	Temperatur konstant, Luftfeuchte recht konstant
C1K2_NKL1_3	Holzversagen	2,51	1 Tag nach Nachspannen	Temperatur konstant, Luftfeuchte recht konstant
C2K2_NKL1_2	Holzversagen	2,14	Beim Nachspannen	-
C1K2_NKL1_4	Holzversagen	2,14	Beim Nachspannen	-
C2K1_NKL1_4	Holzversagen	2,14	Beim Nachspannen	-
C2K1_NKL1_1	Holzversagen	2,78	20 Tage nach Nachspannen, Last stieg konstant an	Luftfeuchte sinkt minimal
C1K1_NKL1_3	Holzversagen	2,19	5 Monate nach Nachspannen	Luftfeuchte bei 40 %, Steigt gerade wieder an
C1K2_NKL1_2	Holzversagen	0,00	Beim Nachspannen	-

Prüfkörper Nr.	Versagensart	Schubspannung bei Versagen [N/mm ²]	Lastaufbringung	Hygrothermische Randbedingung
C1K1_NKL1_2	Holzversagen	0,00	Beim Nachspannen	-
C1K2_NKL1_1	Holzversagen	2,51	11 Tage nach Nachspannen, last ist konstant gestiegen	Luftfeuchte bei 48 %, beginnt gerade zu sinken
C2K1_NKL1_3	Holzversagen	2,40	14 Tage nach Nachspannen	Luftfeuchte sinkt von 40 % auf 33 % Temperatur minimal erhöht
C2K2_NKL1_4	Holzversagen	2,27	Beim Nachspannen	-
C2K2_NKL1_1	Holzversagen	2,27	Beim Nachspannen	-

Tabelle 6:
Zusammenstellung der Versagensarten und Lastniveaus sowie Lastaufbringung und hygrothermische Randbedingungen der 3-lagigen Prüfkörper in der NKL 2

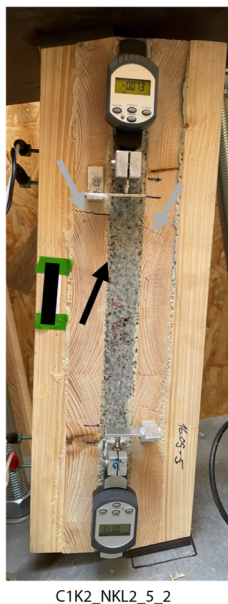
Prüfkörper Nr.	Versagensart	Schubspannung bei Versagen [N/mm ²]	Lastaufbringung	Hygrothermische Randbedingung
C1K1_NKL2_2	Holzversagen	3,20	Während erster Lastaufbringung	-
C2K2_NKL2_2	Holzversagen	2,26	Während erster Lastaufbringung	-
C2K1_NKL2_1	Holzversagen	2,40	Beim Nachspannen	-
C1K2_NKL2_1	Holzversagen	2,58	6 Tage nach Nachspannen	Luftfeuchte sinkt von 70 % auf 50 % Temperatur steigt von 21 °C auf knapp unter 30 °C
C1K2_NKL2_3	Holzversagen	2,56	6 Tage nach Nachspannen	Luftfeuchte sinkt von 70 % auf 50 % Temperatur steigt von 21 °C auf knapp unter 30 °C

Prüfkörper Nr.	Versagensart	Schubspannung bei Versagen [N/mm ²]	Lastaufbringung	Hygrothermische Randbedingung
C2K1_NKL2_2	Holzversagen	2,57	16 Tage nach Nachspannen	Luftfeuchte sinkt von 70 % auf 50%, Temperatur steigt von knapp 20 °C auf 30 °C
C1K1_NKL2_1	Holzversagen	2,56	5 Tage nach Nachspannen	hohe Temperaturen um die 30 °C
C1K2_NKL2_4	Holzversagen	2,60	Beim Nachspannen	-

5-lagige Prüfkörper

Bei den versagten 5-lagigen Prüfkörpern ist im Gegensatz zu den 3-lagigen Prüfkörpern ein Klebeversagen zu beobachten. In Abbildung 18 ist exemplarisch der Prüfkörper C1K2_NKL2_5_2 vor dem Versagen im eingebauten Zustand dargestellt. Es sind bei allen 5-lagigen Prüfkörpern, unabhängig ob ein Versagen während der Langzeitbeanspruchung stattfand, Risse in der Fuge zwischen Beton und Holz zu beobachten (schwarzer Pfeil). Ebenfalls sind Risse im Holz zu beobachten (graue Pfeile). Auffällig ist, dass sich die Risse in der Klebefuge immer auf der oberen Seite einstellen und auch hier die Relativverschiebungen größere Werte aufzeigen. Generell ist auch hier ein Zusammenhang mit dem Nachspannen der Prüfkörper festzustellen. Ebenso ist beim Versagen eine sinkende relative Luftfeuchtigkeit und eine steigende Temperatur zu beobachten.

Abbildung 18:
Risse in Klebefuge (schwarzer Pfeil) und Risse in Holz (graue Pfeile) am versagten 5-lagigen Prüfkörper C1K2_NKL2_5_2



Ein möglicher Grund für das Auftreten des Versagens in der Klebefuge bei den 5-lagigen Prüfkörpern, liegt in der schnelleren und von der Differenz höheren Feuchteänderungen des Holzes, aufgrund der vielen frei

bewitterten Hirnholzoberflächen. Die größeren und schnelleren Feuchteänderungen des an den UHPC angrenzenden Holzes sind in beiden NKL zu beobachten.

Tabelle 7:

Zusammenstellung der Versagensarten und Lastniveaus sowie Lastaufbringung und hygrothermische Randbedingungen der 5-lagigen Prüfkörper in der NKL 1 und 2

Prüfkörper Nr.	Versagensart	Schubspannung bei Versagen [N/mm ²]	Lastaufbringung	Hygrothermische Randbedingung
C1K2_NKL2_5_1	Klebeversagen	0,60	1 Monat nach Nachspannen	Temperatur steigt von 10 °C auf 20 °C, Luftfeuchte sinkt
C1K2_NKL2_5_2	Klebeversagen	0,55	3 Tage nach Nachspannen	Temperatur steigt von 20 °C auf 25 °C, Luftfeuchte sinkt von 60 % auf 50 %
C1K2_NKL1_5_2	Klebeversagen	0,55	5 Tage nach Nachspannen	Luftfeuchtigkeit sinkt, Temperatur konstant

3.6.5 Restscherfestigkeit

3-lagige Prüfkörper

Die 3-lagigen Prüfkörper, welche einer Restscherprüfung unterzogen wurden, sind in Tabelle 8 mit Angabe der Scherfestigkeit bei Versagen gelistet. Die grau hinterlegten Zeilen sind Prüfkörper, welche nicht durchgehend belastet wurden. So erfolgte bei den Prüfkörpern C1K2_NKL2_2 und C2K2_NKL2_1 eine Belastung bis zum 07.09.2023. Anschließend wurden diese unbelastet gelagert. Von einer erneuten Lastaufbringung wurde abgesehen, da beide Prüfkörper bereits zwei Versagensimpulse ausgesetzt waren und bereits kleine Schädigungen erkennbar waren. Dies zeigt sich auch in den geringeren Restscherfestigkeiten.

Tabelle 8:

Auf Restschubfestigkeit geprüfte 3-lagige Prüfkörper mit angegebener Scherfestigkeit bei Versagen

Prüfkörper Nr.	Versagensart	Schubspannung bei Versagen [N/mm ²]
C1K1_NKL1_1	Holzversagen	3,68
C2K2_NKL1_3	Holzversagen	5,14
C1K1_NKL2_3	Holzversagen	4,75
C1K1_NKL2_4	Holzversagen	5,30
C1K2_NKL2_2	Holzversagen	2,70

Prüfkörper Nr.	Versagensart	Schubspannung bei Versagen [N/mm ²]
C2K1_NKL2_3	Holzversagen	5,06
C2K1_NKL2_4	Holzversagen	3,52
C2K2_NKL2_1	Holzversagen	3,23
C2K2_NKL2_3	Holzversagen	5,29
C2K2_NKL2_4	Holzversagen	4,48

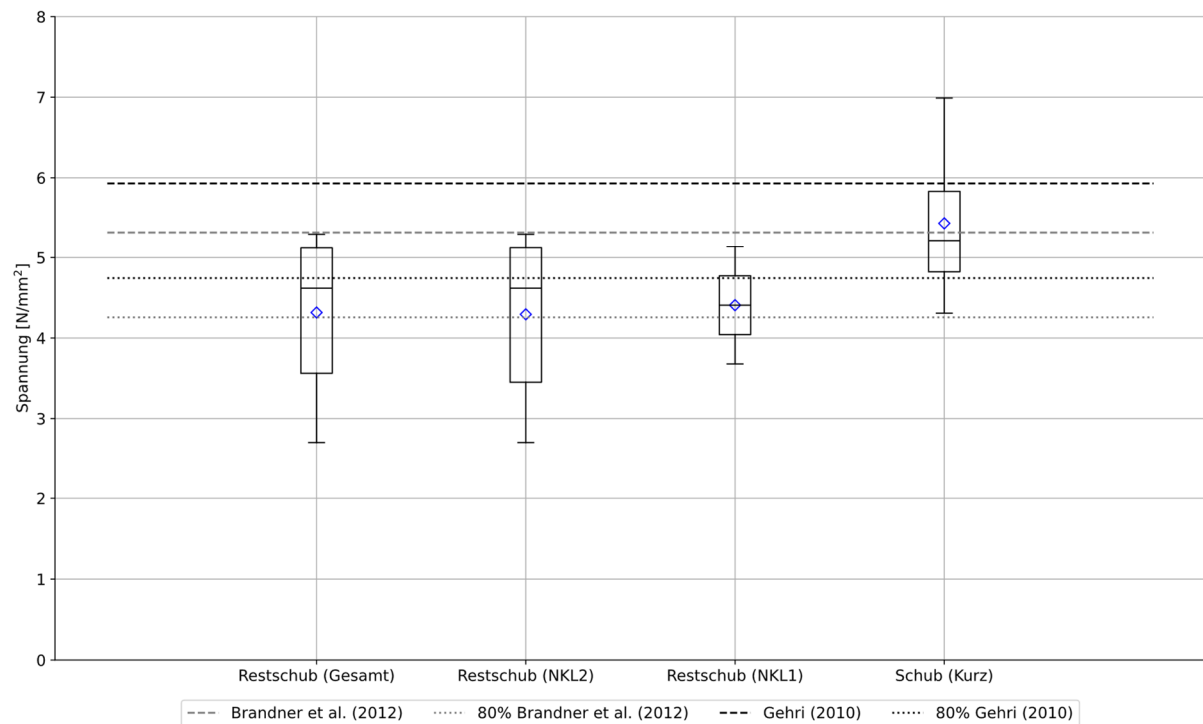
Bei allen Prüfkörpern wird unabhängig von der NKL ein Holzversagen festgestellt (vgl. Abbildung 19 und Anlage 4).

Abbildung 19:
Bruchbild C1K1_NKL2_3 nach Prüfung der Restscherfestigkeit



Ein Vergleich der Restschubfestigkeiten der 3-lagigen Prüfkörper mit den Kurzzeitfestigkeiten ist in Abbildung 20 gegeben. Die gestrichelten grauen Linien beschreiben die Erwartungswerte für die Schubfestigkeit eines Fichtenholzes mit der entsprechenden Schubfläche (Brandner et al. 2012; Gehri 2010). Die erzielten Kurzzeitfestigkeiten liegen im Mittel im erwarteten Bereich. Nach der Langzeitbeanspruchung sind unabhängig von der NKL in etwa noch 80 % der Kurzzeitfestigkeit vorhanden. Die Abminderungen der Erwartungswerte sind entsprechend mit gepunkteten Linien eingezeichnet. Dies sind realistische und erwartbare Werte, da es sich um eine dauerhafte Belastung von unter einem Jahr handelt. Nach DIN EN 1995-1-1 entspricht dies einer mittleren bis langen Beanspruchung. Somit ist eine Restfestigkeit zwischen 70 % und 80 % zu erwarten. Es ist zu erwähnen, dass einige Prüfkörper während der Langzeitbelastung aufgrund eines Versagens eines anderen Prüfkörpers im gleichen Prüfstand einen Impuls ausgesetzt waren. Bei den 3-lagigen Prüfkörpern ist zu erkennen, dass diese Prüfkörper geringere Restschubfestigkeiten, mit einem Mittelwert von 3,65 N/mm² aufweisen. Der Mittelwert der ohne Impuls geprüften Prüfkörper steigt auf 4,73 N/mm² und liegt damit an der 80 % Grenze nach Gehri (2010). Es ist davon auszugehen, dass durch den Impuls zusätzliche Schädigungen im Holz entstanden sind.

Abbildung 20:
Vergleich der Restschubfestigkeiten mit den Schubfestigkeiten mit eingezeichneten Erwartungswerten nach Brandner et al. (2012) und Gehri (2010)



5-lagige Prüfkörper

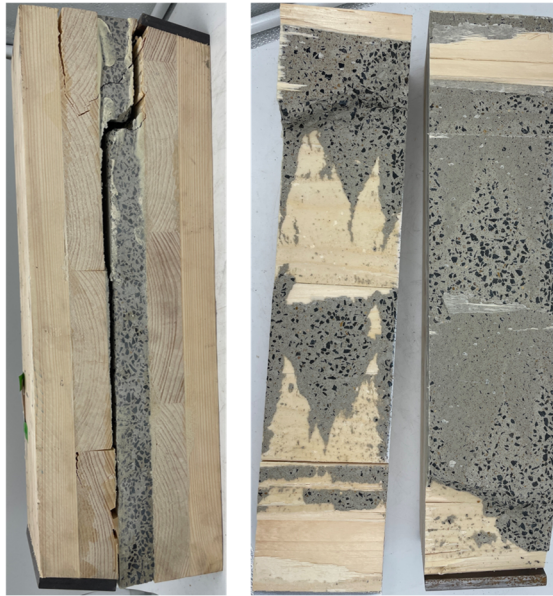
Die 5-lagigen Prüfkörper, welche einer Restscherprüfung unterzogen wurden, sind in Tabelle 9 mit Angabe der Scherfestigkeit bei Versagen gelistet. Die Prüfkörper C1K2_NKL1_5_3 und C1K2_NKL2_5_4 erreichen die geringsten Restscherfestigkeiten. Diese beiden Prüfkörper weisen eine deutliche Schädigung in der Fuge auf (vgl. Abbildung 22).

Tabelle 9:
Auf Restschubfestigkeit geprüfte 5-lagige Prüfkörper mit angegebener Scherfestigkeit bei Versagen

Prüfkörper Nr.	Versagensart	Schubspannung bei Versagen [N/mm ²]
C1K2_NKL1_5_1	Kombiniert Holz und Klebefuge	0,99
C1K2_NKL1_5_3	Kombiniert Holz und Klebefuge	0,72
C1K2_NKL1_5_4	Kombiniert Holz und Klebefuge, primär Holz	0,90
C1K2_NKL2_5_3	Kombiniert Holz und Klebefuge	1,07
C1K2_NKL2_5_4	Kombiniert Holz und Klebefuge	0,72

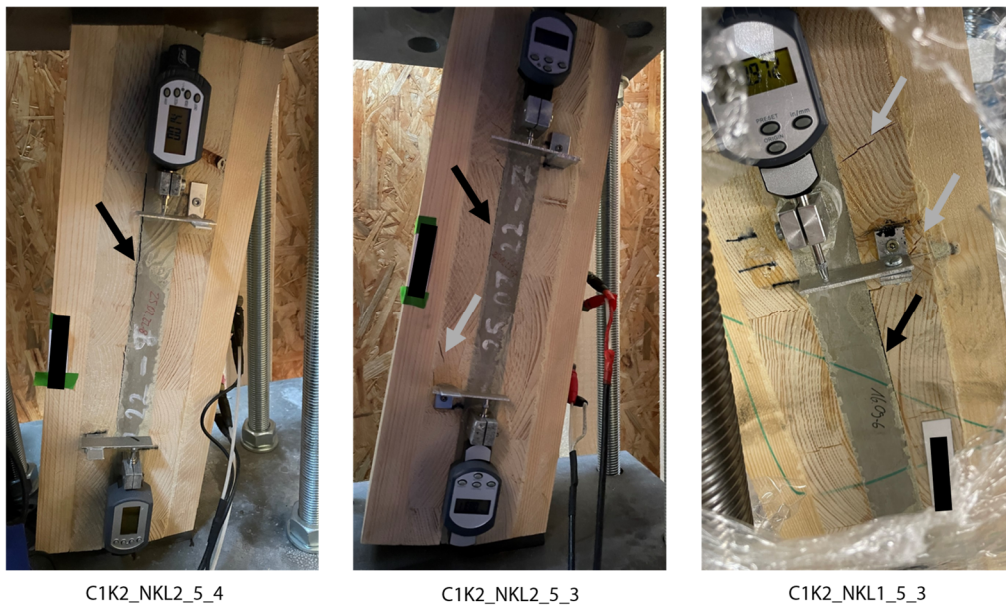
Bei den 5-lagigen Prüfkörpern ist auch unabhängig von der Nutzungsklasse ein gleicher Versagensmechanismus zu beobachten. Charakteristisch ist, dass der Bruchverlauf immer durch den Betonkern führt, sowie teilweise oder länger in der Nähe der Klebefuge verläuft (vgl. Abbildung 21 und Anlage 4).

Abbildung 21:
Bruchbild des Prüfkörpers C1K2_NKL2_5_4 nach Prüfung der Restfestigkeit



Der Rissverlauf in der Nähe der Klebefuge entspricht der während der Langzeitversuche beobachteten Rissbildung im Prüfstand. Die Prüfkörper besaßen teilweise gravierende Risse in der Klebefuge (vgl. Abbildung 22). Teilweise wirkt es so, als ob der Riss im Betonkern verläuft.

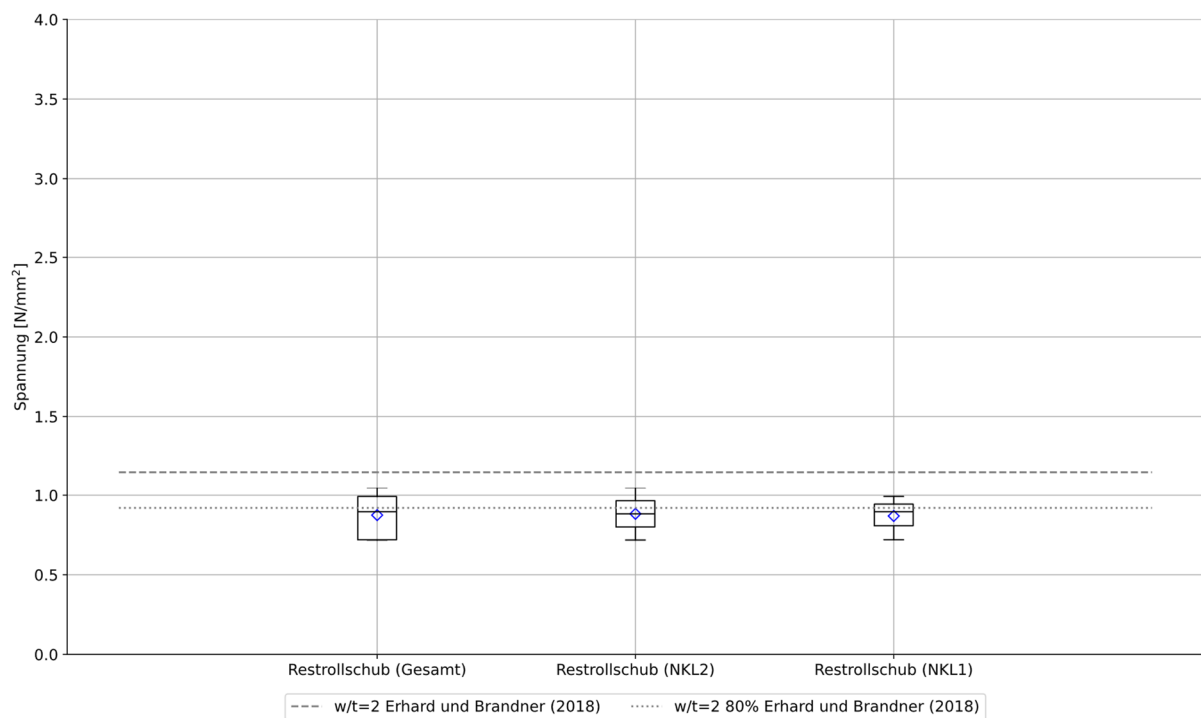
Abbildung 22:
Risse in Klebefuge (schwarzer Pfeil) und Risse in Holz (graue Pfeile) an ausgewählten nicht versagten 5-lagigen Prüfkörpern



Bei der Einordnung der Ergebnisse wird auf Werte der Literatur zurückgegriffen, da für die 5-lagigen Prüfkörper keine Kurzzeitfestigkeiten geprüft wurden. Ehrhart und Brandner (2018) ermittelten für unterschiedliche

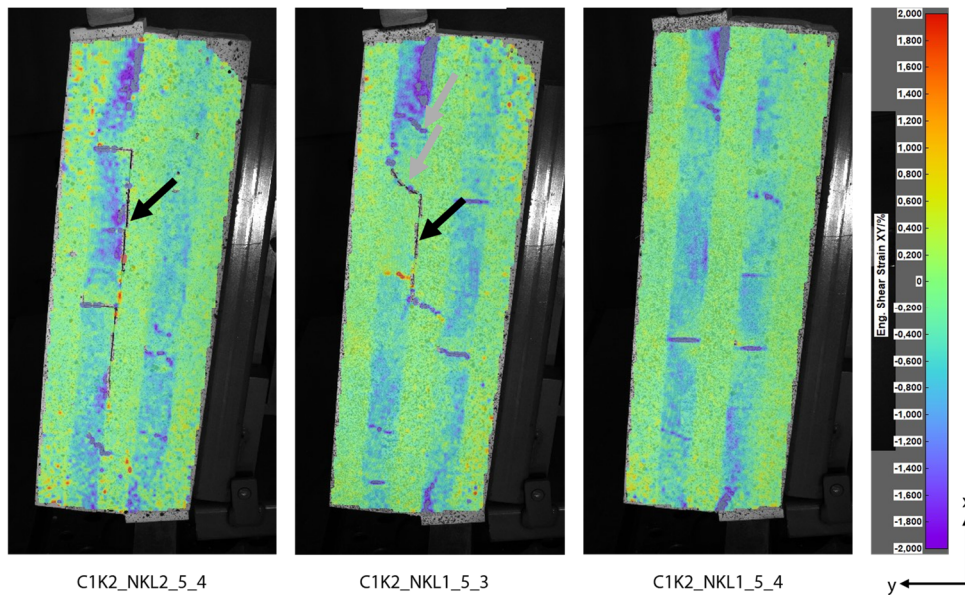
Holzarten die Rollschubfestigkeiten abhängig vom Verhältnis Brettbreite (w) zu Brettdicke (t). Die Rollschubfestigkeit nimmt hierbei mit sinkendem Verhältniswert ab. So beträgt diese für $w/t = 2$ im Mittel $1,15 \text{ N/mm}^2$ und für $w/t = 4$ im Mittel $1,88 \text{ N/mm}^2$. Die betrachteten Prüfkörper besitzen ein Verhältnis von $w/t = 3$ und liegen somit dazwischen. In Abbildung 23 ist für einen konservativen Vergleich die Grenzlinie für $w/t = 2$ und der entsprechende 80 % Wert eingezeichnet. Aufgrund des höheren Verhältnisses und der hohen Restholzfestigkeiten werden Werte, die leicht über der 80 % Linie liegen, erwartet. Dies ist nicht der Fall und deutet darauf hin, dass die Klebefuge in bestimmten Bereichen nicht mehr intakt war und somit vermutlich ein Rollschubversagen in den noch verklebten Teilen stattfand und eine geringer Fläche zur Verfügung stand.

Abbildung 23:
Vergleich der Restscherfestigkeit mit Rollschubfestigkeit nach Ehrhart und Brandner (2018)



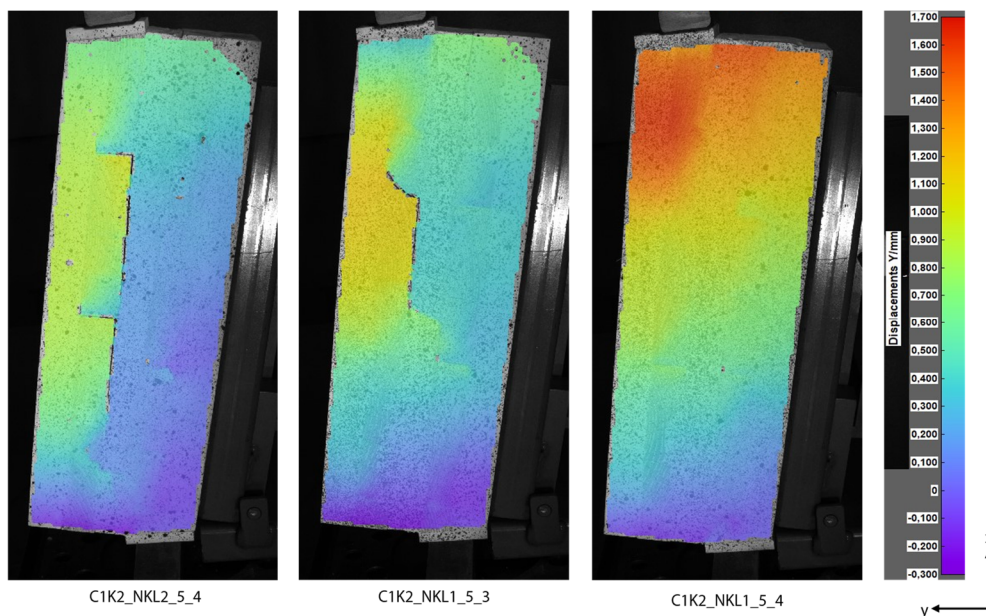
Die Ergebnisse der optischen Messung von ausgewählten Prüfkörpern kurz vor dem Versagen sind in Abbildung 24 dargestellt. Die Vorschädigung aus der Langzeitbeanspruchung sind deutlich zu erkennen (vgl. Abbildung 22). Der Prüfkörper C1K2_NKL1_5_4 zeigte nur geringe Vorschädigungen. Es ist eine klare Rollschubbeanspruchung zu erkennen. Bei allen Prüfkörpern ist zu erkennen, dass die Beanspruchung im oberen Lasteinleitungsbereich größer ist. Auch bei den 5-lagigen Prüfkörpern liegt ein Steifigkeitsunterschied im Lasteinleitungsbereich und somit eine Momentenbeanspruchung vor. Da unten die Verformung durch die Führungsschiene behindert wird geht eine höhere Beanspruchung im oberen Bereich einher.

Abbildung 24:
Ergebnisse des optischen Messsystems für die Schubverzerrung kurz vor dem Versagen der Prüfkörper



Die Beobachtungen des Querzuges können anhand der Verschiebung in y Richtung bestätigt werden (vgl. Abbildung 25). Es ist deutlich zu erkennen, dass bei den vorgeschädigten Prüfkörpern die Klebefuge zuerst auseinandergeht und dort der Prüfkörper eine y-Verschiebung erfährt. Bei dem nicht so stark vorgeschädigten Prüfkörper sind die höheren Werte im oberen Bereich zu erkennen, was den Versagensort und die höheren Spannungen erklärt und auf eine mögliche Interaktion hinweisen kann.

Abbildung 25:
Ergebnisse des optischen Messsystems für die Verschiebung in y-Richtung kurz vor dem Versagen der Prüfkörper



3.7 Zwischenfazit

Anhand der durchgeführten Langzeitversuche konnte gezeigt werden, dass bei den 3-lagigen Prüfkörpern kein Klebefugenversagen stattfindet. Bei den 5-lagigen Prüfkörpern ist ein Klebeversagen bei geringeren Lasten aufgetreten. Als mögliche Ursache sind die starken Spannungsdifferenzen aufgrund von Feuchteänderungen der Querlage zu nennen, da hier viele frei bewitterte Hirnholzflächen vorhanden sind. In einer Anwendung als Bauelement sind keine Feuchteänderungen in dieser Größenordnung zu erwarten, da der direkt bewitterte Hirnholzflächenanteil nahezu null ist und somit maximal Auswirkungen im Randbereich einer Wand zu erwarten sind. Auf Basis der 3-lagigen Versuchskörper und der Restscherfestigkeiten nach der Lastbeanspruchung wird die Verklebung als dauerhaft eingestuft. Das Versagen während der Dauerbelastung ist nicht abschließend geklärt. Vermutlich wirkt im Holz eine Interaktion aus Querkraft und Schub aufgrund der Steifigkeitsunterschiede im Lasteinleitungsbereich.

Während der Durchführung und Auswertung der Versuche wurde festgestellt, dass einige Parameter nicht ausreichend genau bestimmt werden konnten und die Versuchsergebnisse somit beeinflussen können. Die Unsicherheit der Parameter ergibt sich aufgrund von:

- Steifigkeitsunterschied Lasteinleitung
- Kraftmessung NKL 2
- Wegaufnehmerabfall
- Systemwechsel Kurzzeit zu Langzeitversuchen

Als Verbesserungsvorschläge wird empfohlen die Lasteinleitung nur über angeklebte Stahlplatten zu realisieren. Somit kann eine Querkraftbeanspruchung ausgeschlossen werden. In den einzelnen Prüfständen sollte eine durchgehende Lastaufzeichnung erfolgen. Dies wurde in der NKL 2 durch auf den Lasteinleitungsplatten aufgeklebte Dehnmessstreifen versucht. Es stellte sich heraus, dass aufgrund von Temperatur und der Komplexität der Spannungsverteilung, zwei Dehnmessstreifen in der Mitte, keine sinnvolle Rückrechnung ermöglichten. Die Wegaufnehmer sollten nicht an die Prüfkörper geklebt werden. Stattdessen sollte in den Beton bereits herausstehende Metallplatten einbetoniert werden und die Messuhr an das Holz angeschraubt werden. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Kurzzeit- und Langzeitscherfestigkeiten zu erhalten, sollten beide Prüfungen mit dem gleichen Prüfaufbau erfolgen. In diesem Fall hätten die Langzeitprüfkörper eingeschnitten und bei den Kurzzeit- und Restscherversuchen keine Abstützung angebracht werden sollen.

4 Ökobilanzielle Untersuchung

4.1 Vorgehensweise

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde die hybride Wandkonstruktion bezüglich des Treibhausgaspotentials (GWP – Global Warming Potential) analysiert und mit dem Treibhausgaspotential herkömmlicher Wandbauweisen verglichen. Dazu wurde eine Lebenszyklusanalyse der hybriden Konstruktion durchgeführt und die Ergebnisse im Anschluss mit denjenigen Ergebnissen eines äquivalenten Bauteils in Brettspertholzbauweise (BSP) und eines Bauteils in Stahlbetonbauweise verglichen. Die Ökobilanzierung wurde auf Basis der Normen DIN EN ISO 14040:2021-02 und DIN EN ISO 14044:2021-02, sowie den Normen DIN EN 15978:2012-10 und DIN EN 15804:2022-03 durchgeführt. Um einen Vergleich zu ermöglichen, wurde ein funktionales Äquivalent bestimmt, auf dessen Grundlage die Ermittlung der Umweltwirkungen bezogen auf die jeweilige Bauweise durchgeführt wurde. Zur Ermittlung der Umweltwirkungen wurden die Wirkungsindikatoren Klimawandel gesamt (GWP-gesamt), biogen (GWP-biogen) sowie fossil (GWP-fossil) verwendet. Die Ergebnisse wurden anschließend in Hinblick auf eine Einordnung des hybriden Wandbauteils bezüglich der umwelttechnischen Eigenschaften ausgewertet und interpretiert. Neben den in diesem Forschungsbericht durchgeführten ökobilanziellen Betrachtungen, haben weitere ökobilanzielle Untersuchungen stattgefunden. Die Ergebnisse sind in einem Konferenzbeitrag zusammengefasst (Wagner et al. 2023).

4.2 Ziel

Ziel war es, einen ökobilanziellen Vergleich des hybriden Wandbauteils mit konventionellen Wandbauweisen im Kontext eines Mustergebäudes durchzuführen. Als Vergleichsgegenstände sollten Wandbauteile in gängiger Brettspertholzbauweise und in Stahlbetonbauweise dienen. Durch den Vergleich sollte eine Aussage darüber getroffen werden, ob der Einsatz von Ultra High Performing Timber Walls, aus Sicht der sich ergebenden Treibhausgasemissionen, ein nachhaltiges und ressourceneffizientes Bauteil darstellt. Im Forschungsprojekt gewonnene Erkenntnisse wurden hierbei iterativ eingearbeitet.

4.3 Untersuchungsrahmen

4.3.1 Funktionales Äquivalent

Das funktionale Äquivalent ist definiert als „quantifizierte *funktionale Anforderungen* und/oder *technische Anforderungen* an ein *Gebäude* oder ein *zusammengesetztes Bauteil (Bauwerksteil)*, die als Grundlage für Vergleiche dien[en]“ (DIN EN 15978:2012-10). Zur Bestimmung des funktionalen Äquivalents muss die Hauptanforderung des Vergleichsobjektes aus funktionaler und aus technischer Sicht beschrieben werden und dessen Verwendungszweck definiert werden.

Der funktionale Unterschied bei möglichst gleicher Funktionalität der betrachteten Mustergebäude in unterschiedlicher Bauweise, liegt auf der Ebene der Primärkonstruktion der Wände. Deshalb wurde der ökobilanzielle Vergleich des hybriden Wandbauteils mit den beiden anderen Konstruktionsarten nicht auf Gebäudeebene, sondern auf Bauteilebene durchgeführt.

Da die Tragfähigkeit der Primärkonstruktion die funktionelle Hauptanforderung an das betrachtete Bauteil ist und diese das Hauptaugenmerk des Forschungsprojektes darstellt, bildet diese die Grundlage für den Vergleich der Wandbauteile in unterschiedlichen Bauweisen. So macht die Tragfähigkeit auch nach (Oberndorfer et al. 2021) den funktionalen Vorteil gegenüber den herkömmlichen Konstruktionen aus.

Für alle drei zu vergleichenden Bauweisen wurde dieselbe Lebensdauer angenommen, denn es ist davon auszugehen, dass diese nicht maßgebend von der Primärkonstruktion abhängt, sondern durch die Sekundärkonstruktion bedingt ist.

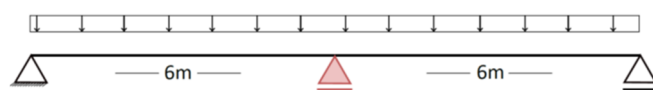
4.3.2 Ermittlung der Querschnittsabmessungen und -zusammensetzungen anhand eines Mustergebäudes

Betrachtungsgegenstand und statisches System

Wie bereits beschrieben ist die Hauptanforderung an das Bauteil aus technischer und aus funktionaler Sicht die Tragfähigkeit. Als Ausgangspunkt für den ökobilanziellen Vergleich funktional äquivalenter Bauteile wurde deshalb der Aufbau der Wandbauteile unter dem Aspekt der Tragfähigkeit ermittelt. Dafür wurde jeweils eine einwirkende Last auf die Wandbauteile (Rohbauzustand) aus fiktiven Mustergebäuden angesetzt. Die Mustergebäude unterschieden sich nur im fiktiven Aufbau der Wände für die jeweilige Bauweise (Hybrid, Brettsper Holz und Stahlbeton). Für die Gebäude unterschiedlicher Bauweise wurden, der Vergleichbarkeit halber, Decken und Dächer in Stahlbetonbauweise angesetzt. Zudem variierte die Höhe des Mustergebäudes und folglich die Geschosszahl.

Als Betrachtungsgegenstand für den Vergleich der unterschiedlichen Bauweisen diente eine tragende Innenwand im Erdgeschoss. Die Anzahl der Geschosse wurde zwischen vier und achtundzwanzig Geschossen variiert. Bei einer Wandhöhe von 3,20m wird die in der Bayrischen Bauordnung (BayBo) definierte Hochhausgrenze von 22m (BayBo) bei sieben Geschossen überschritten. Der Standort des fiktiven Hochbaus liegt am Rande Münchens (Geländekategorie III). Unabhängig von der Bauweise erfolgte über alle Geschosse hinweg die Annahme eines gleichbleibenden statischen Systems (siehe Abbildung 26). Die betrachtete Innenwand ist, wie in Abbildung 26, hierbei durch das mittlere Auflager dargestellt. Es wurde von einem herkömmlichen Büroraster mit Raumtiefen zwischen 3,50m und 5,50m und einem zentralen 1,5m breiten Flur ausgegangen. Folglich betrug die Lasteinzugsfläche in jedem Geschoss 6,0m.

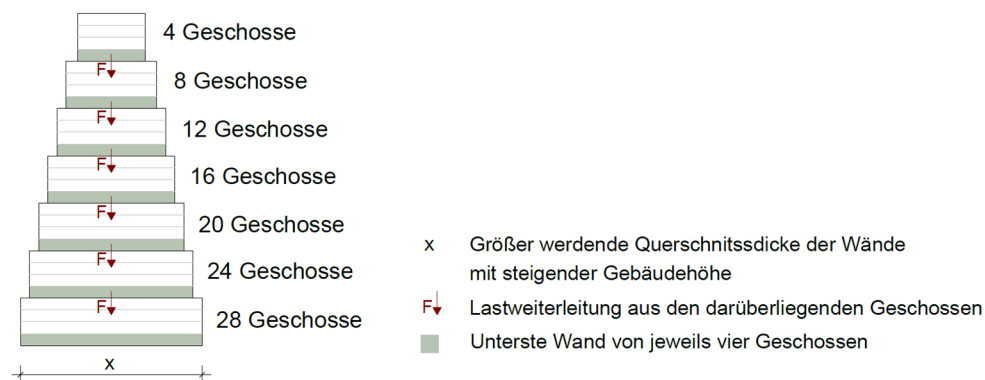
Abbildung 26:
Fiktives statisches System - Darstellung der betreffenden Wand in rot



Alle Wände wurden als Pendelstäbe bemessen. Eine exzentrische Lastenleitung blieb aufgrund des statischen Systems unberücksichtigt.

Da in den oberen Geschossen geringere Querschnittsdicken aufgrund geringerer Belastungen erforderlich waren, wurden jeweils vier Geschosse mit Wandquerschnitten gleicher Querschnittsdicken für die Bemessung angesetzt. Das Vorgehen im Rahmen der Bemessung ist beispielhaft in Abbildung 27 maßstabsfrei dargestellt.

Abbildung 27:
Prinzipielles Modell für die Bemessung der Wandaufbauten (maßstabsfrei)



Die Querschnittsdicke x der Wände je vier Geschosse wurde anhand der jeweils untersten Wand bestimmt (siehe Abbildung 27). Für alle weiter hinzukommenden Geschosse wurden die Lasten aus den bereits bestimmten Querschnitten der darüber liegenden Geschosse angesetzt. Durch die unterschiedlichen

Querschnittsaufbauten der Wände in der jeweiligen Bauweise und die unterschiedliche Geschossanzahl veränderte sich folglich die einwirkende Last auf die unterste Innenwand des jeweiligen Mustergebäudes.

Die Lastannahmen sowie das Vorgehen bei der Bemessung der Innenwände in Abhängigkeit der Geschosszahl und der Bauweise ist in Anlage 3 genauer erläutert.

Ergebnis der Bemessung

In Abhängigkeit der Geschosszahl ergaben sich für die verschiedenen Bauweisen die in Abbildung 7 dargestellten unterschiedlichen Querschnittszusammensetzungen der Innenwände. Anzumerken ist, dass die Mustergebäude zur besseren Vergleichbarkeit für die Ökobilanzierung vereinfacht nur im Rohbauzustand betrachtet wurden. Deshalb wurde das Eigengewicht sekundärer Bauteilschichten wie zum Beispiel der Dach- und Fußbodenaufbau, sowie der Fassadenaufbau nicht berücksichtigt. Eine Berücksichtigung der sekundären Bauteilschichten würde sich auf die Ergebnisse in untenstehender Tabelle und auf die zugehörige Geschosszahl auswirken. Im Vergleich zu den untenstehenden Ergebnissen würde dies, aufgrund höherer Lasten, zu größeren Querschnitten bei gleichbleibender Geschosszahl führen. Da das Ziel der durchzuführenden Ökobilanz die Frage beantworten soll, ob die hybride Bauweise bezüglich des Treibhausgaspotentials einen ökobilanziellen Vorteil gegenüber herkömmlichen Bauweisen aufweisen kann, stand die Primärkonstruktion der Wandbauteile im Fokus. Tabelle 10 zeigt die sich ergebenden Schichtdicken und Querschnittsabmessungen auf Basis in der Praxis gängiger Standardquerschnitte. Nur für die Betonlamellen des hybriden Bauteils wurde teilweise von Standardquerschnitten abgewichen (siehe Kennzeichnung in Tabelle 10).

Tabelle 10:

Bemessungsergebnisse möglichst funktional äquivalenter Wandbauteile in unterschiedlicher Bauweise abhängig der Geschosszahl (Angaben zu: Querschnittsdicke [mm] und Ausnutzung des Querschnitts [%])

Anzahl Geschosse	Hybrid (Fichte C24 und UHPC)	BSP (Fichte C24)	Stahlbeton (C25/30, B500B)
4 Geschosse	20-20-20-20-20 (100mm, 71%*)	20-20-20-20-20 (100mm; 96%*)	150 [mm] (20%)
8 Geschosse	30-20-30**-20-30 (130mm; 88%)	40-20-20-20-40 (140mm; 86%)	150 [mm] (41%)
12 Geschosse	40-20-30**-20-40 (150mm; 90%)	40-30-40-30-40 (180mm; 99%)	150 [mm] (61%)
16 Geschosse	40-30-40-30-40 (180mm; 89%)	60-30-40-30-60 (220mm; 93%)	150 [mm] (81%)
20 Geschosse	60-30-30**-30-60 (210mm; 92%)	80-20-40-20-80 (240mm; 92%)	160 [mm] (99%)
24 Geschosse	60-30-40-30-60 (220mm; 98%)	80-30-80-30-80 (300mm; 89%)	190 [mm] (99%)
28 Geschosse	80-20-40-20-80 (240mm; 94%)	Mit Standardquerschnitt nicht möglich	220[mm] (99%)
* Biegedrucknachweis als maßgebender Nachweis			
** Abweichung von Standardquerschnitt bei Lamelle aus ultrahochfestem Beton			

Die Brettsperrholzbauweise gelangt ab vierundzwanzig Geschossen an ihre Auslastungsgrenze. Unter Verwendung der hybriden Bauweise sind auch achtundzwanzig Geschosse realisierbar. Tabelle 10 lässt zudem erkennen, dass ab vierundzwanzig Geschossen die hybride Wand 8 cm dünner sein kann als die Brettsperrholzwand. Im Vergleich dazu, birgt die hybride Wand in den obersten Geschossen kaum ein Einsparpotential hinsichtlich der verbauten Fläche. Dies liegt auch daran, dass erst ab einer bestimmten Gebäudehöhe der innenliegende Betonkern dauerhaft überdrückt bleibt und somit das Potential der höheren Druckfestigkeit ausgenutzt werden kann. Somit könnte es sich also anbieten in den oberen, geringer belasteten Geschossen reine Brettsperrholzwände zu verwenden und in den unteren, höher belasteten Geschossen hybride Wände. Dadurch kann die Auflast auf die bemessene Wand durch das geringere Eigengewicht reiner Brettsperrholzwände gegenüber den hybriden Wänden verringert werden. Dies wird aus umweltwirkungstechnischer Sicht im Folgenden weiter untersucht.

Die Ergebnisse aus der Bemessung bildeten die Grundlage für den ökobilanziellen Vergleich auf Basis funktionaler Äquivalenz. Wie bereits erwähnt wurde die reine Rohbaukonstruktion betrachtet, was zu geringeren auf das System einwirkenden Lasten als in der Realität führt. Für den im Folgenden beschriebenen Vergleich wurden die in Tabelle 10 dargestellten Querschnittszusammensetzungen und -abmessungen verwendet.

4.3.3 Systemgrenzen

Systemgrenzen des Lebenszyklus

Die Ökobilanz umfasste die Herstellungsphase, in der die Module A1 (Rohstoffbereitstellung), A2 (Transport) und A3 (Herstellung) enthalten sind (DIN EN 15804:2022-03). Auch die bei der Erstellung von Umweltproduktdeklarationen verpflichtend zu berücksichtigende Entsorgungsphase mit den zugehörigen Modulen C1 (Rückbau, Abriss), C2 (Transport), C3 (Abfallbehandlung) und C4 (Deponierung) wurde betrachtet. Modul B6 wurde in die folgende Betrachtung nicht einbezogen, da davon auszugehen ist, dass der Betrieb der Mustergebäude als gleich angenommen wird. Auch das Modul B4 wurde nicht berücksichtigt, da die Primärkonstruktion betrachtet wurde und diese während der Nutzungsdauer der Gebäude von 50 Jahren nicht ausgetauscht werden muss.

Geographische Systemgrenzen

Es ist davon auszugehen, dass die Herstellung der hybriden Wandbauteile in Deutschland stattfindet. Durch die Verwendung geeigneter Datensätze wurde die länderspezifische Situation in Deutschland abgebildet. Der Produktionsstandort der für die Herstellung verwendeten Produkte, sowie deren Transport zum Herstellungsort basierte auf herstellerspezifischen Angaben.

Abschneidekriterium

Für die Ökobilanz der Wandbauteile wurden die Standardabschneidekriterien verwendet. So wurden diejenigen Baustoffe vernachlässigt, deren Gewicht geringer war als 1 % des Gesamtgewichts des Bauteils und der Einsatz erneuerbarer und nicht erneuerbarer Primärenergie geringer war als 1 % des gesamten erneuerbaren oder nichterneuerbaren Primärenergieeinsatzes des Bauteils. Die Summe der abgeschnittenen Baustoffe durfte jedoch nicht größer sein als 5 % der Bauteilmasse. (DIN EN 15804:2022-03)

4.3.4 Funktionelle Einheit

Da es die Hauptfunktion des Wandbauteils ist Raum zu schaffen, wurde die funktionelle Einheit des Wandbauteils zu 1m² Wandfläche definiert.

4.3.5 Produktsystem

Das betrachtete Produktsystem war ein fünfschichtiges hybrides Ultra High Performing Timber Wandbauteil, das aus Lamellen aus ultrahochfestem Beton und aus verklebten Holzlamellen, wie in Brettsper Holz, besteht. Wie für die Holzlamellen an sich, wurde davon ausgegangen, dass auch für das Verkleben des Holzes mit dem Beton ein Einkomponenten-Polyurethangleber verwendet wurde.

Abbildung 28:
Möglicher Aufbau eines hybriden Wandbauteils (nach Wagner et al. 2023)

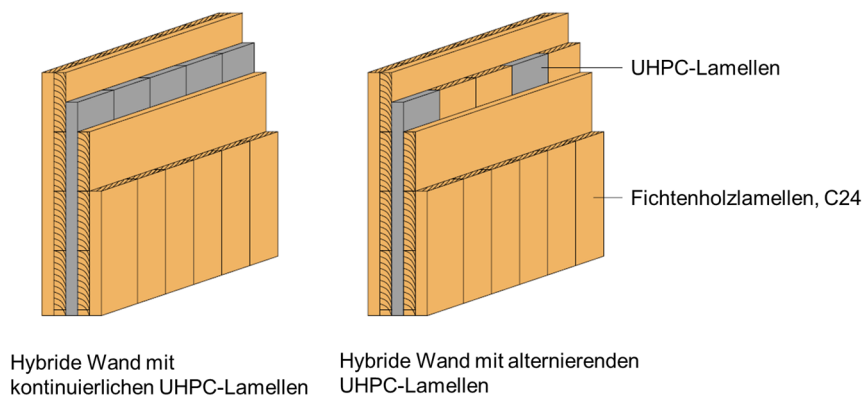


Abbildung 28 zeigt einen möglichen Aufbau eines solchen hybriden Wandbauteils. Für die folgende Untersuchung wurden ausschließlich hybride Wände mit kontinuierlicher UHPC-Lamelle betrachtet. Die

jeweilige Lamellendicke und -anordnung, in Abhängigkeit der Geschosshöhe und folglich der einwirkenden Last, ist Tabelle 10 zu entnehmen.

Die einzelnen Prozessmodule der Herstellung eines hybriden Bauteils aus Holzlamellen und ultrahochfestem Beton wurden bereits in einem im Rahmen des Forschungsprojektes veröffentlichten Konferenzbeitrag (Wagner et al. 2023) genauer erläutert. Die Datengrundlagen und Erkenntnisse aus der Veröffentlichung dienen als Grundlage für die Bearbeitung der nachfolgenden ökobilanziellen Betrachtung im Projekt. Außerdem ist anzumerken, dass die Polypropylenfasern für die Ökobilanz nicht berücksichtigt wurden. Dies wird in Kapitel 5.6 genauer erläutert. Für die Entsorgung der Stahlbetonwand sowie der Brettsperrholzwand wurde der von Wagner et al. 2023 erläuterte Rückbau der jeweiligen Wand, der zugehörige Transport sowie die Bauschuttaufbereitung (Stahlbeton) und die thermische Verwertung (Brettsperrholz) angenommen.

4.3.6 Vorgehen bei der Sachbilanz

Um die Umweltwirkungen der jeweiligen Wandbauteile kalkulieren, analysieren und miteinander vergleichen zu können, mussten zuerst Inventardaten ermittelt werden. Diese Ermittlung wurde im Rahmen der Sachbilanz durchgeführt. Die Inventardaten für die Herstellung und Entsorgung wurden bereits von Wagner et al. 2023 beschrieben und werden deshalb in diesem Forschungsbericht nicht weiter erläutert.

4.3.7 Festlegen der Wirkungsindikatoren

Betrachtete Wirkungsindikatoren

Zur Ermittlung der Umweltwirkungen wurden die Wirkungskategorien Klimawandel – gesamt (GWP-gesamt), Klimawandel – fossil (GWP-fossil) und Klimawandel – biogen (GWP-biogen) verwendet. Das GWP – luluc (Landnutzung und Landnutzungsänderung) musste aufgrund seines geringen Anteils (< 5%) am Indikator Klimawandel – gesamt nicht gesondert betrachtet werden. Bestandteil des GWP-luluc sind unter anderem die biogenen Kohlenstoffemissionen aus natürlichen Wäldern. (DIN EN 15804:2022-03)

Im Folgenden wird kurz genauer auf die einzelnen Indikatoren sowie den Begriff „biogener Kohlenstoff“ eingegangen.

GWP-gesamt

Der Wirkungsindikator GWP-gesamt enthält sowohl den biogenen als auch den fossilen Anteil an Treibhausgasen. Auch das GWP-luluc ist hier enthalten (DIN EN 15804:2022-03).

GWP-fossil

Dieser Indikator beinhaltet „[...] das GWP durch Treibhausgasemissionen und -bindung in allen Medien, die durch die Oxidation oder Reduktion von fossilen Brennstoffen oder fossilen Kohlenstoff enthaltenden Stoffen durch ihre Umwandlung oder ihren Zerfall [...] entstehen“ (DIN EN 15804:2022-03). Durch die Prozesse bei der Materialverarbeitung und die damit verbundenen Aufwendungen während der Herstellungsphase eines Bauteils werden folglich fossile Treibhausgase emittiert. Eine Aufnahme fossiler Treibhausgase ist beispielsweise während der Nutzungsphase eines Gebäudes oder am Lebensende durch den Vorgang der Carbonatisierung durch den Zementstein im Beton möglich. (Becke et al. 2014; DIN EN 15804:2022-03)

GWP-biogen

Die durch Biomasse hervorgerufenen biogenen Emissionen in die Atmosphäre sind Bestandteil des GWP-biogen. Auch wenn biogenes CO₂ von einem in ein anderes Produktsystem übertragen wird, wird dies im GWP-biogen erfasst. Ausgenommen sind hier die im GWP-luluc enthaltenen biogenen Emissionen. (DIN EN 15804:2022-03)

Diejenige Menge an biogenem Kohlenstoff, die in die Atmosphäre zum Beispiel durch Verbrennung oxidiert, ist Teil des GWP-biogen (positives Vorzeichen). Auch der in Biomasse aufgenommene und dort verbleibende Kohlenstoff ist Bestandteil des Indikators GWP-biogen. Dieses Speicherpotential spiegelt sich in einem negativen Anteil an biogenem GWP wider. Es ist anzumerken, dass dieser Speichereffekt so lange fortwährt,

bis das Produkt nicht mehr stofflich genutzt, sondern beispielsweise verbrannt wird und folglich durch Oxidation die äquivalente Menge an gespeichertem CO₂ am Lebensende wieder freigesetzt wird. (DIN EN 15804:2022-03; DIN EN 16449:2014-06; DIN EN ISO 14067:2019-02)

Biogener Kohlenstoff in Holz

Während des Wachstums eines Baumes wird Kohlenstoff gebunden, welcher dann im Holz verbleibt (DIN EN 16449:2014-06). Dieses Speicherpotential spiegelt sich in einem negativen Anteil an biogenem GWP in der Herstellungsphase von Holzprodukten wider (Rüter 2022). Dieser negative Anteil wird in den ökobilanziellen Untersuchungen genauer betrachtet, da dieser, in Abhängigkeit des Anteils an verbautem Holz, sowohl für die Betrachtung der Umweltwirkungen als auch des Ressourcenverbrauchs eine Rolle spielt.

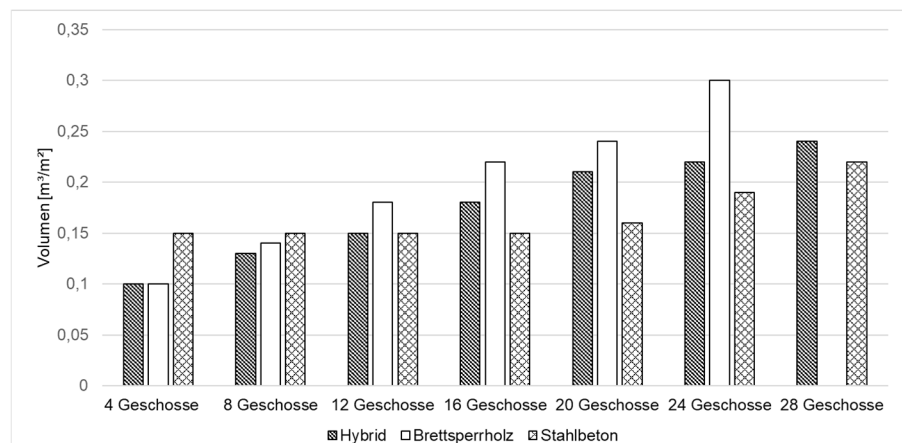
4.4 Sachbilanz

4.4.1 Vergleich des Bauteilvolumens je 1m² Außenwandfläche

Analysiert wurden im Rahmen des ökobilanziellen Vergleichs der unterschiedlichen Wandbauteile die in Kapitel 4.3.2 ermittelten Wandquerschnitte der jeweiligen Bauweise in Abhängigkeit der Geschosshöhe. Hierbei wurden für den Vergleich die Querschnittswerte für ein Mustergebäude angesetzt. Das Volumen je 1m² Wandbauteil in unterschiedlicher Bauweise ist für die betrachteten Gebäude unterschiedlicher Geschosshöhe in Abbildung 29 dargestellt.

Abbildung 29:

Volumen der Wandbauteile [m³] (Hybrid, BSP, Stahlbeton) abhängig der Geschosshöhe je m² Wandfläche



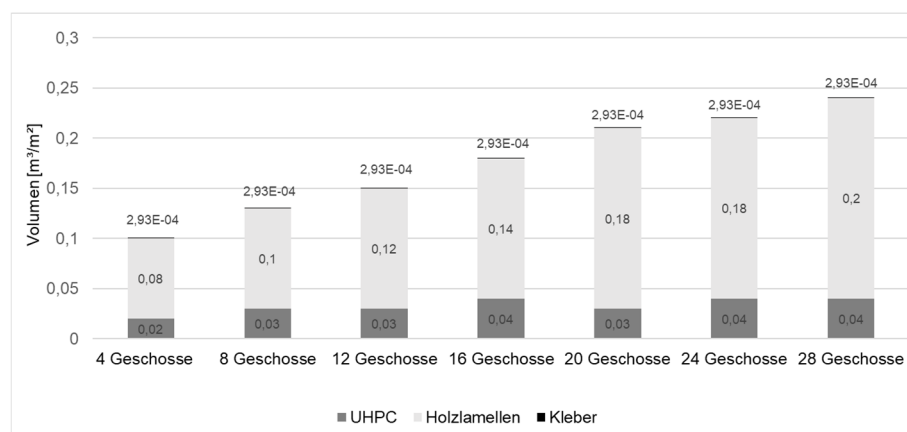
In der Sachbilanz wurden die Bauteilaufbauten (Hybrid, BSP, Stahlbeton) miteinander verglichen. Abbildung 29 zeigt, dass sich durch die mit zunehmender Geschosshöhe steigende Belastung auf das jeweilige Wandbauteil (funktionelle Einheit 1m²), auch die zugehörigen Querschnittswerte und damit einhergehend das jeweilige Bauteilvolumen ändert. Es ist zu erkennen, dass das Volumen mit steigender Geschosshöhe für alle drei Bauweisen zunimmt. Folglich erhöht sich auch das jeweilige Eigengewicht.

Im Vergleich zu den anderen beiden Bauweisen nimmt das Volumen des Brettsperrholzbauteils bei steigender Geschosshöhe stark zu. So ist das Volumen der Brettsperrholzwand bei acht Geschossen nur um 0,01m³ größer als das Volumen des hybriden Bauteils und nur um 0,01m³ geringer als das Volumen des Stahlbetonbauteils. Bei vierundzwanzig Geschossen ist dann bereits ein Unterschied zwischen Brettsperrholzwand und hybrider Wand von 0,08m³ zu verzeichnen und zwischen Brettsperrholz- und Stahlbetonwand von 0,11m³. (Abbildung 29)

4.4.2 Betrachtung des Volumens einzelner Baustoffe der hybriden Wand

Das Volumen der einzelnen Baustoffe in 1m² einer hybriden Wand ist in Abbildung 30 in Abhängigkeit der Geschosshöhe dargestellt.

Abbildung 30:
Volumen [m³] einzelner Baustoffe des Hybrid-Bauteils abhängig der Geschosshöhe je m² Wandfläche



Das Volumen der Holzlamellen ist über alle Gebäude unterschiedlicher Geschosshöhe deutlich größer als dasjenige der Lamellen aus ultrahochfestem Beton. Das Volumen der Holzlamellen nimmt mit zunehmender Geschosshöhe zu. Von zwanzig auf vierundzwanzig Geschosse ist ein Rückgang des Betonvolumens zu erkennen, was mit dem Verwenden einer dünneren UHPC-Lamellen zu begründen ist. Tendenziell nimmt aber auch das Volumen der Betonlamellen der hybriden Wand mit steigender Geschosshöhe und daraus resultierenden steigenden Lasten zu.

Ein Kleberauftrag ist sowohl zum Herstellen des Verbundes zwischen den Holzlamellen und ultrahochfestem Beton als auch zum Herstellen des Verbunds zwischen den Holzlamellen selbst notwendig. Da hier der ökobilanzielle Vergleich der unterschiedlichen Wandbauweisen im Vordergrund stand, wurde auf die Berücksichtigung des Klebers zwischen den Holzlamellen sowohl in der Sachbilanz als auch in der weiteren Wirkungsabschätzung verzichtet. Dies ist damit zu begründen, dass für die Ermittlung der Umweltwirkungen des Brettsperrholzbauteils derselbe Datensatz zum Einsatz kam, wie zur Ermittlung der Umweltwirkungen des hybriden Bauteils. Folglich hätte eine zusätzliche Berücksichtigung des Klebens der Holzlamellen die Vergleichbarkeit der sich ergebenden Umweltwirkungen für die beiden Bauweisen negativ beeinflusst.

4.5 Wirkungsabschätzung

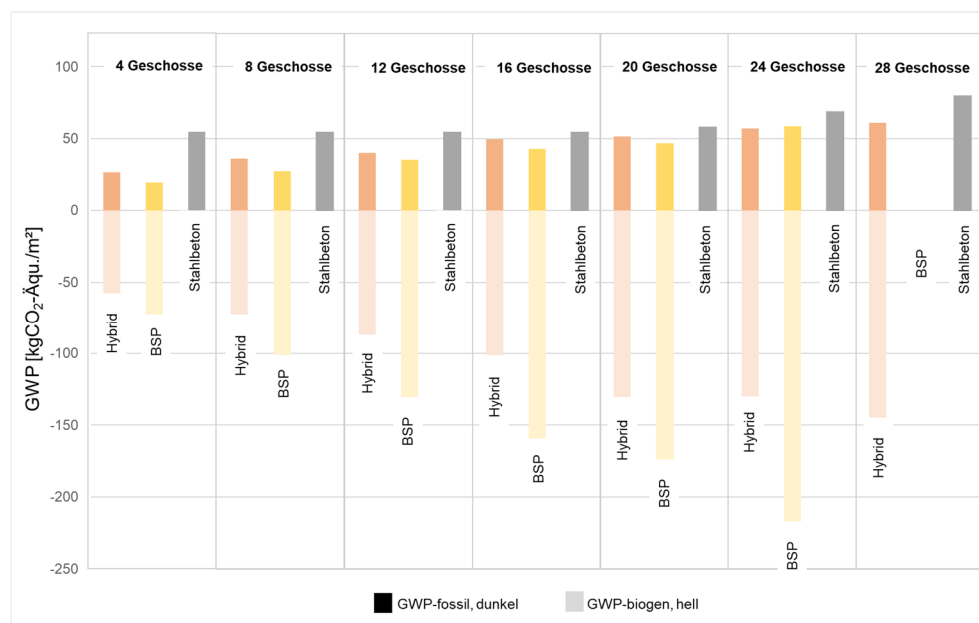
4.5.1 Vorgehen bei der Wirkungsabschätzung

Der Einfluss der Herstellungsphase und der Entsorgungsphase der Wandbauteile wurde für die unterschiedlichen Geschosse in der Wirkungsabschätzung anhand des Wirkungsindikators GWP [kg CO₂ - Äqu.] ermittelt. Zunächst wurden das GWP-fossil und das GWP-biogen allein für die Herstellungsphase betrachtet. Anschließend wurden dann die Ergebnisse für das GWP-gesamt für den „gesamten Lebenszyklus“ (Herstellungs- und Entsorgungsphase) genauer untersucht. Die verwendeten Datensätze und zugrundeliegenden Systemgrenzen für die Entsorgungsphase wurden von Wagner et al. 2023 erläutert.

4.5.2 GWP in der Herstellungsphase (Module A1-3)

In Abbildung 31 ist das Globale Erwärmungspotential der jeweiligen Bauweise für Mustergebäude von vier bis achtundzwanzig Geschossen dargestellt. Es wird zwischen GWP-fossil und GWP-biogen differenziert.

Abbildung 31:
GWP-fossil und GWP-biogen der Wandbauteile abhängig der Geschosshöhe (Module A1-3)



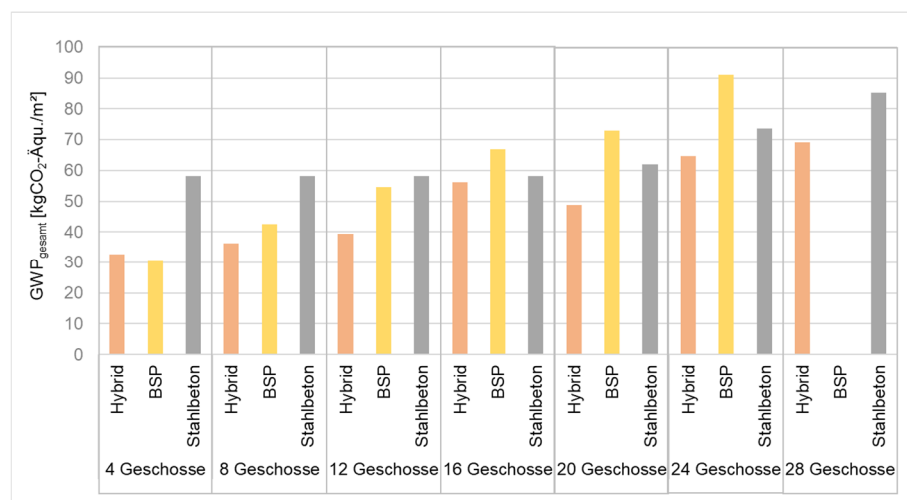
An der geschossweisen Darstellung und separaten Ausweisung des fossilen und des biogenen GWPs wird deutlich, dass das GWP-fossil aller Bauteile mit zunehmender Geschosshöhe steigt. Dies ist mit dem zunehmenden Volumen der Bauteile bei steigender Geschosshöhe zu begründen, was einen erhöhten Verarbeitungsaufwand mit sich bringt. Außerdem ist zu erkennen, dass ein zunehmendes Volumen an Holz im Bauteil (Hybrid und Brettsperrholz), durch ein höher werdendes Mustergebäude, eine Zunahme an gespeichertem biogenem Kohlenstoff zur Folge hat. Dies resultiert in einem betragsmäßig größer werdenden negativen biogenen Treibhausgaspotential.

Der Unterschied zwischen GWP-fossil der Brettsperrholzbauweise und GWP-fossil der hybriden Bauweise wird mit steigender Geschosshöhe geringer. So ist der Anteil an GWP-fossil bei acht Geschossen für 1 m² des hybriden Bauteils um ca. 32% (8,69 kg CO₂-Äqu.) größer als derjenige Anteil der Brettsperrholzbauweise. Bei zwanzig Geschossen beträgt der Unterschied nur noch etwa 10% (4,78 kg CO₂-Äqu.). Bei vierundzwanzig Geschossen ist das GWP-fossil der hybriden Bauweise dann um ca. 2% (4,78 kg CO₂-Äqu.) geringer als dasjenige der Brettsperrholzbauweise. Grund dafür ist, dass die Dicke des BSP-Bauteils mit zunehmender Geschosshöhe deutlich stärker ansteigt als die Querschnittsdicke des Hybrid-Bauteils. Folglich nimmt das Volumen des Bauteils deutlich stärker zu als bei der hybriden Bauweise (siehe Abbildung 29). Dieser Anstieg spiegelt sich in der Menge an verbauten Rohstoffen sowie folglich in den, für deren Herstellung anfallenden fossilen Treibhausgasemissionen wider.

4.5.3 GWP des gesamten Lebenszyklus (Module A1-3 und C1-4)

Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse für das GWP-gesamt über den „gesamten Lebenszyklus“. Unter „gesamter Lebenszyklus“ wurde hier die Herstellungs- und die Entsorgungsphase verstanden.

Abbildung 32:
GWP-gesamt der Wandbauteile abhängig der Geschosshöhe (Module A1-3 mit C1-3)



Es wird deutlich, dass bei gewähltem Entsorgungsszenario (Verbrennung des Holzes, Aufbereitung des Betons für stoffliche Verwertung (Wagner et al. 2023)), die Brettsperrholzbauweise für ein Mustergebäude mit vier Geschossen, niedrigere Umweltwirkungen aufweist als die hybride Bauweise. Ab acht Geschossen weist die hybride Bauweise ein geringeres GWP-total auf als die Brettsperrholzbauweise. Ab einem Mustergebäude von sechzehn Geschossen übersteigen die Umweltwirkungen der Brettsperrholzbauweise auch diejenigen des Mustergebäudes in Stahlbetonbauweise. Des Weiteren ist festzustellen, dass das GWP-total des hybriden Bauteils durchgehend geringer ist als das GWP der Stahlbetonbauweise. Darüber hinaus ist in den Ergebnissen für das hybride Bauteil deutlich zu erkennen, dass mit einer Dickenänderung der UHPC-Lamelle eine signifikante Änderung des GWP-totals für die hybride Bauweise einhergeht. Dies zeigt sich beispielsweise bei der Betrachtung des Mustergebäudes mit zwölf Geschossen im Vergleich zum sechzehngeschossigen Gebäude, bei dem sich die UHPC-Lamellendicke von 3cm auf 4cm erhöht.

4.6 Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zeigen, dass das GWP-fossil, unabhängig von der Bauweise, mit steigender Geschosshöhe zunimmt.

Außerdem wird deutlich, dass für die Herstellungsphase eines Brettsperrholzbauteils, im Vergleich zur hybriden Bauweise und auch zur Bauweise in Stahlbeton, bis einschließlich 20 Geschosse, eine geringere Menge an äquivalenten Treibhausgasen verursacht werden. Dies ist der Fall, auch wenn nur das GWP-fossil betrachtet wird. An dieser Stelle ist anzumerken, dass zukünftig für alle drei Bauweisen Ansätze zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Herstellungs- und Entsorgungsphase geschaffen werden müssen.

Das Stahlbetonbauteil weist im Vergleich zu den anderen Bauteilen Vorteile aufgrund der geringeren Querschnittsdicke und des damit einhergehenden geringeren Volumens auf. Trotzdem bringt dieses, in jedem der betrachteten Mustergebäude unterschiedlicher Geschosshöhen, durchgehend die höchsten Umweltwirkungen mit sich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Herstellung von Stahl und Beton besonders hohe Umweltwirkungen hervorruft.

Bei der Betrachtung des GWP-gesamt der Herstellungs- und der Entsorgungsphase ist das GWP-gesamt der hybriden Bauweise ab einem Mustergebäude von acht Geschossen durchgehend am kleinsten. Für das Mustergebäude von vier Geschossen in unterschiedlicher Bauweise weist die Brettsperrholzbauweise das geringste GWP-total auf. Ab sechzehn Geschossen dreht sich dies um und das im Vergleich höchste GWP-total resultiert aus dem Mustergebäude in Brettsperrholzbauweise. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse der Bemessung der Wände in unterschiedlicher Bauweise, dass das Brettsperrholzbauweise mit zunehmender Geschosshöhe, im Vergleich zu den anderen beiden Bauweisen, sehr dick wird. Folglich kann das

Brettsperrholzbauteil, abhängig von den jeweils vorliegenden Randbedingungen, aus statischen Gesichtspunkten und aus Aspekten des Verlustes an Raum und Fläche im Gebäude, ab einer gewissen Belastung nicht mehr sinnvoll eingesetzt werden. Ist dies der Fall, dann ist der Einsatz des hybriden Wandbauteils und die Stahlbetonvariante sinnvoller.

Die betrachteten Umweltwirkungen des hybriden Wandbauteils über die Herstellungs- und Entsorgungsphase sind durchgehend geringer als diejenigen des Stahlbetonbauteils. Deshalb ist die hybride Bauweise mit Ultra High Performing Timber Walls aus umwelttechnischer Sicht für die Anwendung geeignet, sobald der Einsatz von Brettsperrholzbauteilen nicht mehr sinnvoll ist.

4.7 Zwischenfazit

Die Anwendung von hybriden Wänden aus ultrahochfestem Beton und Holzlamellen ist, aus umweltwirkungstechnischer Sicht, nicht in allen Bereichen sinnvoll. Jedoch kann deren Einsatz vor allem in hochbelasteten Bereichen, wie beispielsweise in den unteren Geschossen im Hochhausbau, an denen Brettsperrholzwände sehr dick oder nicht ausreichend tragfähig sind, eine klimafreundliche und aus konstruktiver Sicht sinnvolle Alternative zum Stahlbeton sein. Aufgrund der höheren statischen Belastungsfähigkeit könnte es von Vorteil sein, beispielsweise an stark belasteten Stellen wie Durchbrüchen, hybride Wände zu installieren. Hierbei wäre es möglich die UHPC-Lamellen nur dort in der Wand zu integrieren, wo erhöhte Lasten auftreten. Innerhalb einer Wand können so Zonen mit variierender Tragfähigkeit entstehen, die zu einer Reduzierung des Bedarfs an UHPC und folglich zu geringeren Umweltwirkungen führen.

5 Untersuchungen zum Brandverhalten

5.1 Hintergrund und Ziel

Ziel ist es zunächst die brandschutztechnischen Eigenschaften des Verbundbauteils, wie die Wärmedurchlässigkeit sowie das Abbrandverhalten während eines Brandes, zu bestimmen. Diese sind erforderlich, um prüfen zu können, ob mit der neuartigen Verbundwand baurechtliche Anforderungen in Hinblick auf den Brandschutz erfüllbar sind.

Aufgrund des sehr dichten Gefüges von UHPC kommt es bei höheren Temperaturen zu einem explosiven Abplatzen des Betons. Um dieses Phänomen einzuschränken bzw. zu vermeiden werden dem UHPC in der Regel Polypropylenfasern zugemischt (Fehling et al. 2014). Es erfolgen Rezepturanpassungen des UHPCs in Hinblick auf das Brandverhalten der Verbundwände. Hierzu wird zunächst lediglich das Hochtemperaturverhalten von UHPC betrachtet, potenzielle Tragfähigkeitssteigerungen im Kaltzustand bleiben außer Betracht. Da das außenliegende Holz den in der Mitte liegenden UHPC-Kern zudem vor sehr hohen Temperaturen schützt, wird auf Basis von Brandversuchen an Verbundbauteilen im Kleinprüfstand, die veränderte Temperatureinwirkungskurve an der UHPC-Oberfläche im Brandfall ermittelt. Anhand dieser Temperaturkurve werden unterschiedliche Betonrezepturen im Muffelofen geprüft und deren Hochtemperaturverhalten aufgezeichnet. Verglichen werden die Restdruckfestigkeiten und Steifigkeiten nach der Abkühlung der Probekörper auf Normaltemperatur. Die Restdruckfestigkeiten liegen aufgrund der zusätzlichen Schädigungen während des Abkühlens unter den Druckfestigkeiten unmittelbar nach einer Brandeinwirkung (Heißdruckfestigkeit). (Hager und Pimienta 2004) Ziel der Untersuchungen ist es die Festigkeiten des ultrahochfesten Betons in einer UHPTW nach einem Brandereignis zu ermitteln und die Schutzwirkung des Holzes zu bestätigen.

5.2 Stand der Technik

5.2.1 Abbrandverhalten von Brettsperrholz

Für die Beschreibung des Abbrandverhaltens von Holz wird die Abbrandrate β herangezogen. Die Abbrandrate beschreibt die Geschwindigkeit in mm/min mit der Holz bei einer Brandbeanspruchung zu Holzkohle übergeht. Beeinflusst wird die Abbrandrate von diversen Materialparametern, wie beispielhaft von der Rohdichte, dem Feuchtegehalt und der Faserorientierung (Werther 2016; Friquin 2011). Die normierte eindimensionale Abbrandrate von Nadelholz beträgt $\beta_0 = 0,65 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$ (DIN EN 1995-1-2).

Charakteristisch für das Abbrandverhalten von Brettsperrholz ist das sogenannte Abfallen von verkohlten Lamellen oder verkohlten Teilen von Lamellen. Besonders bei polyurethanverklebten Elementen ist ein ausgeprägtes Abfallen zu beobachten, welches den Klebstoffeinfluss auf das Brandverhalten darstellt (Hadden et al. 2017; Frangi et al. 2009). Ein Einflussfaktor auf das Abfallverhalten und somit auf die Abbrandrate ist die Orientierung des Brettsperrholzes. Bei einer horizontalen Bauteilorientierung werden höhere Abbrandraten ermittelt als bei vertikalen Bauteilorientierungen. Zurückgeführt wird dies auf ein Abfallen von verkohlten Teilen und Lamellenlagen bei einer horizontalen Ausrichtung. (Kippel et al. 2014) Wenn Lamellen oder Teile von Lamellen abfallen verliert das Holz die im Brandfall natürlich entstehende, das Holz schützende, Holzkohleschicht, welche den Abbrand durch die dämmende Wirkung verlangsamt (Werther 2016). Dadurch erhöht sich die Abbrandrate temporär.

Um dieses Verhalten analytisch abzubilden, gibt es unterschiedliche Ansätze. Ein Ansatz ist für die erste Lamellenlage eine Abbrandrate von $\beta = 0,65 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$ und für jede weitere Lamellenlage eine erhöhte Rate von $\beta = 0,90 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$ zu verwenden (Teibinger 2017). Für vertikal orientierte Brettsperrholzelemente ist ein alternativer Ansatz eine pauschal gemittelte Abbrandrate von $\beta = 0,80 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$ zu verwenden, wenn nur ein leichtes Abfallen von verkohlten Schichtteilen auftritt. Bei horizontal orientierten Bauteilen mit einem

signifikanten Abfallen von Schichtteilen wird ein Stufenmodell empfohlen. Hierbei ist nach dem Abfallen der Lamellenlage für die dahinterliegende, dann dem Brand exponierte Lage, eine deutlich erhöhte Abbrandrate in den ersten 25 mm anzunehmen, bevor wieder die idealisierte Abbrandrate von Vollholz angenommen wird. (Schmid et al. 2017)

Entsprechend dem chemischen Holzverhalten und durchgeführter Versuche kann ein Zusammenhang zwischen Abbrandrate und Temperatur hergestellt werden. Der Übergang von Holz zu Holzkohle in einem Querschnitt wird vereinfacht mit der 300 °C Temperaturisotherme gleichgesetzt (König 2005). Idealisiert sind somit alle Teile eines Querschnittes mit Temperaturen größer gleich 300 °C bereits verkohlt und alle Teile kleiner 300 °C noch Holz.

5.2.2 Ultrahochfester Beton im Brandfall

Materialverhalten

Die Materialeigenschaften von Betonen werden von den im Zementstein enthaltenden Calciumsilikathydraten, Calciumhydroxiten und Calciumaluminahydraten beeinflusst. Im Brandfall werden die Hydrate bei unterschiedlichen Temperaturen zersetzt. Ab 450–550 °C beginnt die Zersetzung von Calciumhydroxid in poröses Calciumoxid und Wasser. Ab 600–700 °C zersetzen sich die übrigen Hydrate. Bis zum Schmelzen des Zementsteins bei 1100 °C finden keine signifikanten weiteren Veränderungen im Gefüge statt. (Huismann 2010; Zhu et al. 2021; Schneider 1973) Zu Beginn der thermischen Prozesse findet die Evaporation des freien, physikalisch gebundenen Wassers (bis 100 °C) statt, gefolgt von der Freisetzung des chemisch gebundenen Wassers zwischen 100–120 °C (Schneider 1973). Neben den chemischen Zersetzungsprozessen und Wasserfreisetzungen kommt es zu Schädigungen des Betongefüges aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten. Bei quarzhaltigen Zuschlägen ist bei der Transformation von β – in α –Phasen in einem Temperaturbereich um die 600 °C eine Ausdehnung zu beobachten. Basaltartige Zuschläge hingegen sind bis zur Schmelztemperatur von 1050 °C thermisch stabil. (Hager 2013)

Druckfestigkeiten

Bei den Druckfestigkeiten muss bei hochfesten Betonen in die Eigenschaften während der Temperaturbelastung (Heiß) und nach der Temperaturbelastung (Rest) unterschieden werden (Hager und Pimienta 2004). Vergleiche von Heiß- und Resteigenschaften in unterschiedlichen Untersuchungen an ultrahochfesten Betonen lassen ein simultanes Verhalten vermuten (Hosser et al. 2012; Fröse 2018; Way und Wille 2012). Die mechanischen Eigenschaften nach dem Abkühlen liegen ab einer maximalen Temperatureinwirkung von 250 °C unter denjenigen während der Temperaturbelastung. Dies liegt an zusätzlichen Schädigungen während des Abkühlens. (Hager und Pimienta 2004) Besonders die Rehydratation von Calciumcarbonat geht mit einer Volumenzunahme einher und führt zur Rissentwicklung.

In Abbildung 33 sind die Heißdruckfestigkeiten eines ultrahochfesten Betons, eines hochfesten Betons und eines normalfesten Betons nach Norm dargestellt. Die Heißdruckfestigkeiten sind wie alle Betoneigenschaften von der exakten Mischung abhängig. Dennoch sind durch die Gegenüberstellung die signifikanten Unterschiede darstellbar. Es ist zu erkennen, dass der Tragfähigkeitsverlust bei ultrahochfesten und hochfesten Betonen zu Beginn schneller stattfindet als bei normalfesten Betonen. Eine Erklärung ist die Ausdehnung des gebundenen Wassers bis zum Verdampfen und die einhergehende Reduktion der Van-der-Waals Kräfte. (Hager 2013) Im Gegensatz zu den hochfesten Betonen ist bei ultrahochfesten Betonen eine Regeneration der Druckfestigkeiten auf Ausgangsniveau zu beobachten. Eine Erklärung ist, dass nach dem Verdampfen des Wassers eine Schrumpfung des Betons und dadurch eine Vergrößerung der Van-der-Waals Kräfte entsteht. Gegenläufig erhöht sich die Porosität des Betons, welche die Druckfestigkeit verringert. Da ultrahochfeste Betone eine geringe Porosität und einen geringen Wassergehalt aufweisen überwiegt die Zunahme der Van-der-Waals Kräfte. (Xiong und Richard Liew 2015) Die Heißdruckfestigkeit beginnt ab 500 °C wieder zu sinken, was auf die Zersetzung der Hydrate zurückzuführen ist.

Abbildung 33:

Relative Heißdruckfestigkeit eines normalfesten, eines hochfesten und eines ultrahochfesten Betons in Abhängigkeit der Temperatur

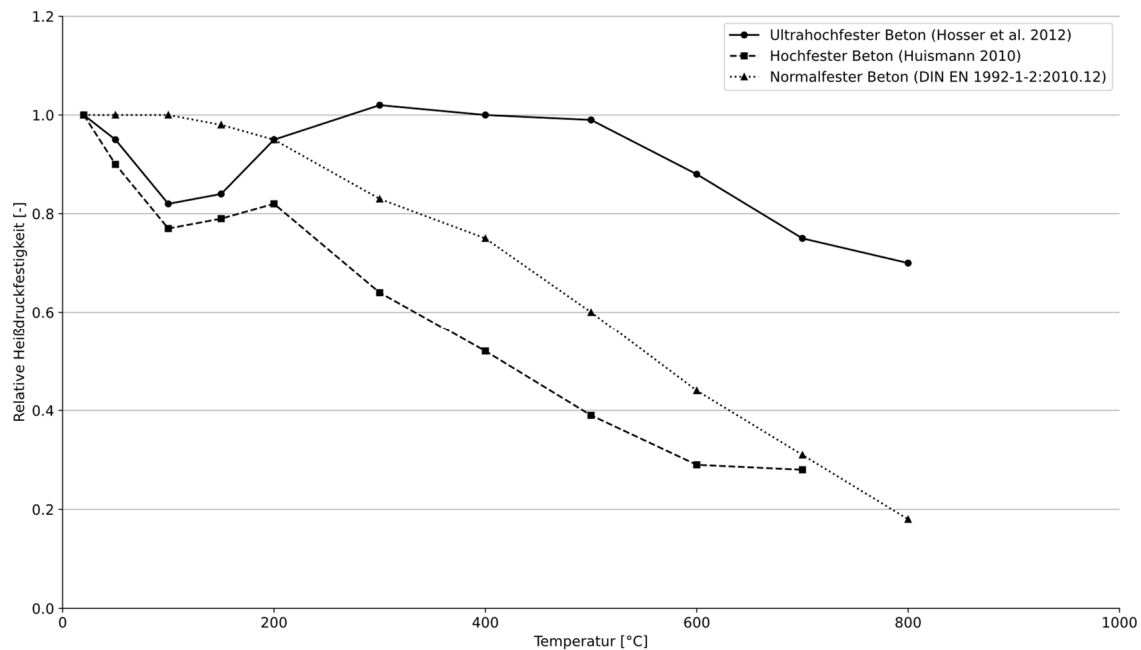
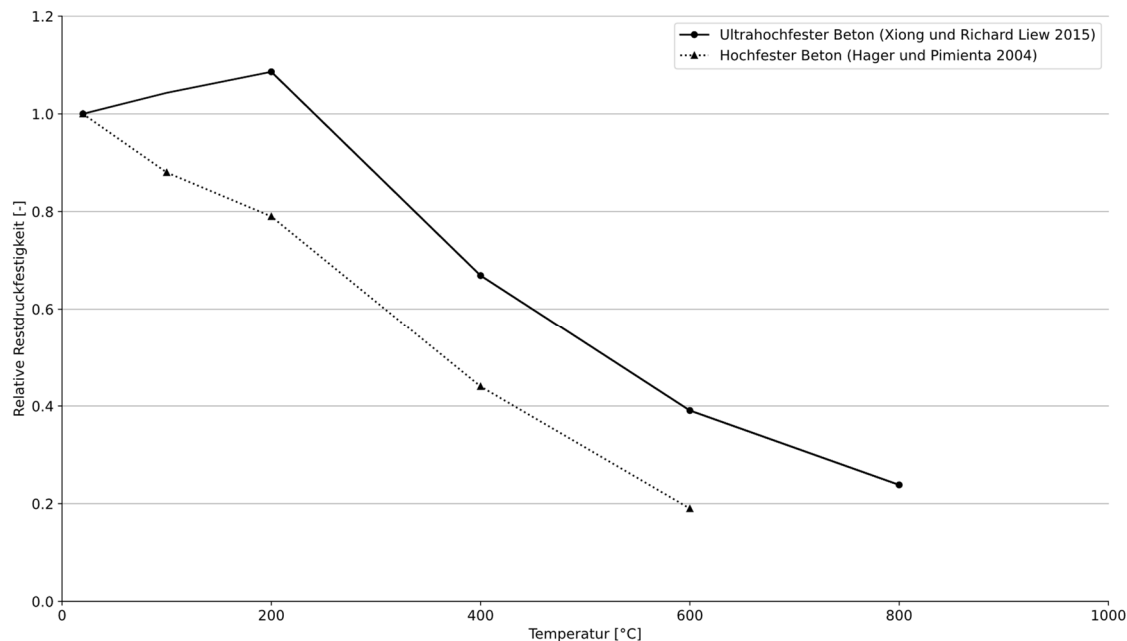


Abbildung 34 zeigt die relativen Restdruckfestigkeiten von einem ultrahochfesten Beton und einem hochfesten Beton. Auch hier sind die Ergebnisse von der exakten Mischungszusammensetzung abhängig. Dennoch ist zu erkennen, dass bei ultrahochfesten Betonen in einem niedrigen Temperaturbereich eine Steigerung der Tragfähigkeit erreicht werden kann. Dies ist erneut auf die überwiegende Druckfestigkeitszunahme durch die Zunahme der Van-der-Waals Kräfte zurückzuführen (Xiong und Richard Liew 2015). Bei hochfesten Betonen ist keine Zunahme der Restdruckfestigkeiten zu beobachten. (Hager 2013) Vermutlich wird die Festigkeitssteigerung der Heißdruckfestigkeiten durch die zusätzlichen Schädigungen während der Abkühlung kompensiert.

Abbildung 34:

Relative Restdruckfestigkeit eines hochfesten und ultrahochfesten Betons in Abhängigkeit der maximalen Temperatur



Elastizitätsmodul

Im Gegensatz zu den Druckfestigkeiten sinkt der Elastizitätsmodul bei hochfesten Betonen mit steigender Temperatur ohne einen kurzfristigen Anstieg (Huismann 2010; Hager 2013). Dabei liegt der Elastizitätsmodul nach dem Abkühlen auf Normaltemperatur unterhalb dem Elastizitätsmodul während der Temperaturbeanspruchung (Hager und Pimienta 2004). Bei ultrahochfesten Betonen ist bis zu 200 °C ein kleiner Anstieg des Elastizitätsmoduls um bis zu 5 % zu verzeichnen. Anschließend fällt dieser kontinuierlich ab. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Prüfkörper mit 0,2 K/min verhältnismäßig langsam erwärmt und abgekühlt werden. (Way und Wille 2012)

Abplatzungen

Das Abplatzverhalten von Betonen wird in Zuschlagstoffabplatzungen, explosionsartige Abplatzungen und in das Abfallen von Betonlamellen unterschieden (Meyer-Ottens 1975). Bei hochfesten und ultrahochfesten Betonen sind insbesondere explosionsartige Abplatzungen von Bedeutung. Hierbei wird in thermo-mechanische und hydro-thermische Effekte unterschieden. Der hydro-thermische Effekt ist die rapide Steigerung des Porendruckes und der thermo-mechanische Effekt sind Spannungen aufgrund hoher Temperaturgradienten. (Kordina K. und Meyer-Ottens 1981; Kalifa et al. 2001; Klingsch 2014) Explosionsartige Abplatzungen sind bereits bei Temperaturen unter 400 °C zu beobachten (Klingsch 2014).

Eine Erklärung der rapiden Steigerung des Porendruckes ist die „moisture clog“ Theorie. Der Ausgangszustand dieser Theorie ist ein Querschnitt mit gleichmäßiger Wasserverteilung. Mit einer Temperatureinwirkung über 100°C beginnt die Verdampfung des Wassers. Der entstehende Wasserdampf wird nun über den bestehenden Porenraum entweder zur Oberfläche oder ins Innere des Querschnittes transportiert. Bei einem Transport nach innen kondensiert das Wasser innerhalb der tiefer liegenden, kühleren Schichten. Es entsteht eine wassergesättigte undurchlässige Schicht. Zwischen der undurchlässigen Schicht und der Oberfläche des Bauteils entsteht eine trockene Zone. Mit weiterer Temperatureinwirkung beginnt mehr Wasser zu verdampfen, welches aufgrund der wassergesättigten undurchlässigen Schicht nicht weiter ins Innere des Bauteils abwandern kann. So entsteht ein hoher Porendruck im Kontaktbereich zur wassergesättigten undurchlässigen Schicht. Übersteigen die durch den Porendruck induzierten Spannungen die Zugfestigkeit des Querschnittes platzt der Beton explosionsartig ab. (Ashton et al. 1961) Bei Betonen mit einer höheren

Rohdichte verringert sich die trockenen Zone und ein explosionsartiges Abplatzen findet früher statt (Huismann 2010).

Dem gegenüber steht die Theorie von Saito H. (1966), welche ein explosionsartiges Abplatzen nur aufgrund von Spannungen infolge hoher Temperaturgradienten zurückführt. Durch den Temperaturgradienten entstehen Druckspannungen an der Oberfläche des Querschnittes und Zugspannungen im Inneren. Explosionsartige Abplatzungen treten dann auf, wenn die Druckspannung die Druckfestigkeit des Betons überschreiten. Einige Autoren kommen zu dem Rückschluss, dass alleine thermisch induzierte Spannungen nicht für ein explosionsartige Abplatzen ausreichen und dass nach der Theorie von Saito H. (1966) explosionsartige Abplatzungen überwiegend bei großen Querschnittsabmessungen stattfinden müssten. Das stimmt nicht mit allgemeinen Erfahrungen überein (Sertmehmetoglu Y. 1977; Dougill 1972; Kordina K. und Meyer-Ottens 1981).

Ein Zusammenwirken der hydro-thermischen und thermo-mechanischen Effekten wird vermutet (Zhukov 1975; Klingsch 2014). Eine weiterführende Untersuchung zeigt, dass zum Zeitpunkt des Abplatzens zu geringe Porendrücke vorhanden sind, um alleine für eine explosionsartige Abplatzung zu sorgen (Khoury 2008). Da bei hochfesten und ultrahochfesten Betonen bereits bei geringen Temperaturgradienten explosionsartige Abplatzungen stattfinden, ist davon auszugehen, dass hier die hydro-thermischen Effekte überwiegen (Klingsch et al. 2013).

Eine Möglichkeit um explosionsartige Abplatzungen bei ultrahochfesten Betonen zu vermeiden ist die Zugabe von Polypropylenfasern (Klingsch et al. 2013; Fehling et al. 2014). In der DIN EN 1992-1-2 wird bei hochfesten Betonen eine Zugabe von 2 kg/m^2 als wirksam angesehen. Bei Betonen mit einem w/z – Wert von weniger als 0,24 wird auf nationaler Ebene eine Zugabe von 4 kg/m^2 gefordert (DIN EN 1992-1-2/NA). Zur Wirkungsweise von Polypropylenfasern existieren unterschiedliche Ansätze. Eine Theorie ist, dass durch das Zersetzen von Polypropylenfasern die sogenannten „Interfacial Transient Zones (ITZ)“ miteinander verbunden werden. Die ITZ sind Zonen um die Gesteinskörnungen, die eine erhöhte Porosität aufweisen und einen höheren Feuchtetransport ermöglichen. Die Verbindung der einzelnen ITZ führt zu einem zusammenhängenden porösen Netzwerk, über welches der Porendruck abgebaut wird. (Bentz 2000) Ein alleiniges Verbinden der ITZ ist nach einigen Autoren jedoch nicht die einzige Ursache für eine Vermeidung der Abplatzungen (Kalifa et al. 2001; Pistol K. 2016). Diese Schlussfolgerung basiert darauf, dass bereits bei Fasergehalten unter der Perkolationschwelle keine explosionsartigen Abplatzungen auftreten. Es wird vermutet, dass die Fasern beim Schmelzen zu Mikrorissen in der Zementmatrix führen. (Kalifa et al. 2001) Polypropylenfasern schmelzen bereits ab 160°C . Die Zersetzung der Fasern beginnt ab einer Temperatur von 350°C . (Pistol K. 2016) Eine Kombination aus Microrissbildung aufgrund des Schmelzens und eine Verbindung und Vergrößerung des Porenraums bei der Zersetzung ist aufgrund des Vermeidens von explosionsartigen Abplatzungen bei ultrahochfesten Betonen unter 350°C wahrscheinlich.

5.3 Brandversuche nach DIN 4102-8

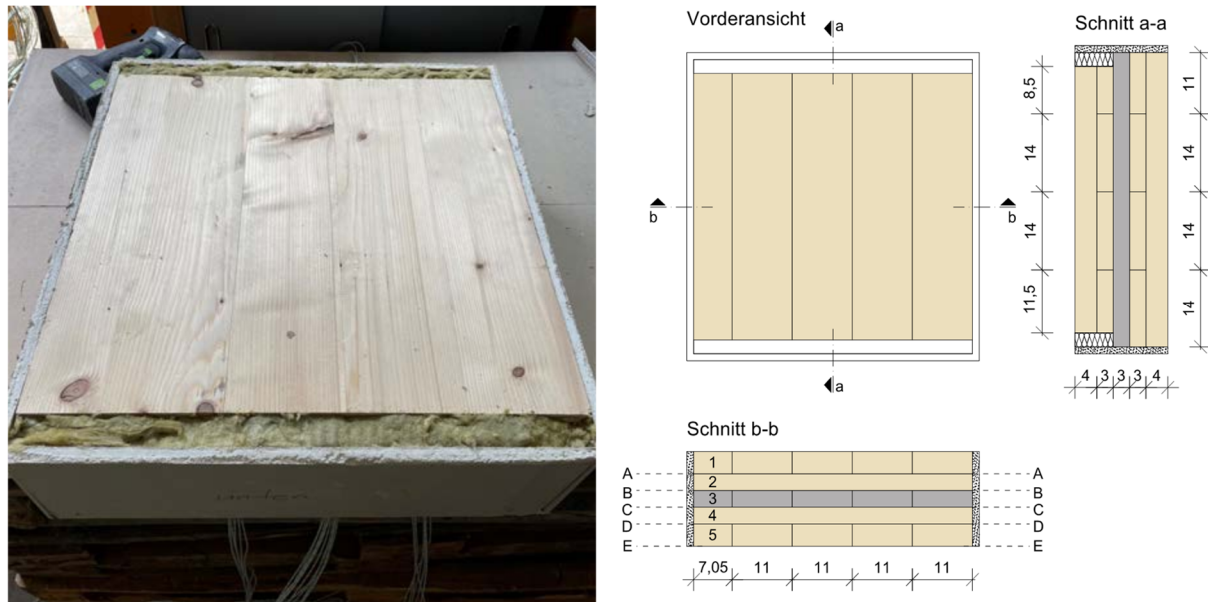
5.3.1 Methodik

Prüfkörper

Es wurden zwei Prüfkörper für die Brandversuche am Verbundbauteil nach DIN 4102-8 hergestellt. Die Größe der Probekörper betrug $51 \times 53 \text{ cm}^2$. Die Prüfkörper besitzen eine Gesamtdicke von 170 mm. Aufgebaut sind die Prüfkörper aus insgesamt 5 Lamellenlagen, mit einer 3 cm dicken Lamellenlage aus UHPC in der Elementmitte (vgl. Abbildung 35). Die Lamellen wurden ohne Schmalseitenverklebung durch ein Einkomponenten Polyurethanklebstoff miteinander verklebt. Um ein Abfallen der feuerzugewandten Holzlamellen im Kleinprüfofen zu ermöglichen, wurden in diesen Lamellenlagen jeweils oben und unten 2,5 cm entfernt und durch Steinwolle ersetzt. Zur Vermeidung eines seitlichen Vorbeiströmens der Brandbeanspruchung wurden abschließend umlaufend Gipskartonplatten mit einem ausreichenden Feuerschutz angebracht. Abbildung 35 zeigt die brandzugewandte Seite eines fertigen Prüfkörpers.

Abbildung 35:

Ansicht eines Prüfkörpers vor dem Einbau (links) und Dreitafelprojektion des Prüfkörpers mit Maßen in Zentimetern (rechts)



Versuchsaufbau

Die Temperatur wird mithilfe von, in den Prüfkörper eingebrachten Thermoelementen Typ K, in jeder Klebefugenschicht und an der brandabgewandten Oberfläche, gemessen. In den Klebefugen Holz-Holz werden je 6 Messstellen und in den Klebefugen Holz-UHPC je 10 Messstellen angebracht. Auf der Oberfläche wird an 6 Messstellen gemessen. Bei der Einbringung der Thermoelemente wurde darauf geachtet, dass diese zuerst parallel zu Temperaturisotherme verlaufen. Die Anordnung der Thermoelemente sowie Bilder der Herstellung sind Anlage 6 zu entnehmen.

Der Kleinprüfstand besteht aus einem Brandraum, einer Beflammungseinrichtung und einer Messeinrichtung. An einer seitlichen Öffnung mit den Abmessungen 450 ± 10 mm wird der Prüfkörper möglichst luftdicht befestigt. In Abbildung 36 ist die Öffnung des Kleinprüfstandes, sowie mit einem eingebautem Prüfkörper dargestellt. Die Beflammungseinrichtung erzeugt eine Einwirkung nach Einheitstemperaturzeitkurve (ETK). Gemessen wird die Einwirkungstemperatur oberflächennah mithilfe eines Temperaturfühlers. Geregelt wird die Temperatur manuell durch Variation der Beflammung und des Ofeninnendrucks.

Abbildung 36:
Öffnung des Prüfofens (links) und vor der Öffnung eingebauter Prüfkörper (rechts)



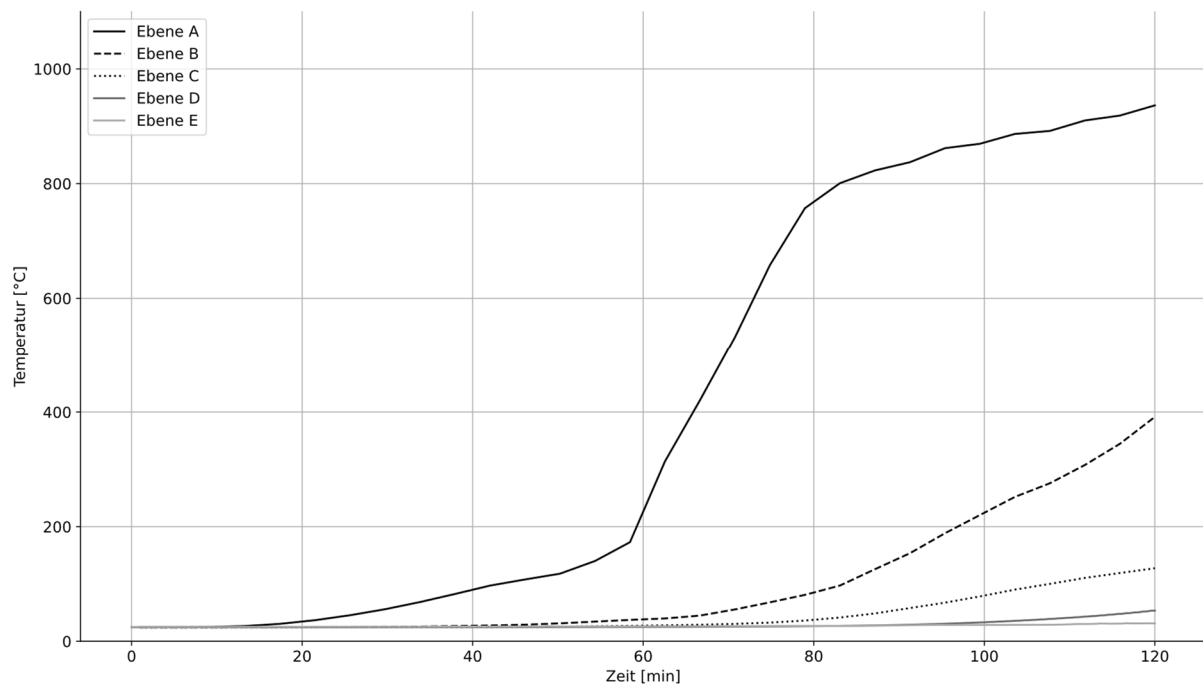
Nach Einbau der Prüfkörper in den Kleinprüfstand beginnt eine Temperatureinwirkung nach ETK über 120 Minuten. Eine fotografische Dokumentation ist durch eine Glasscheibe möglich. Nach 120 Minuten Brandeinwirkung wird der Prüfkörper zeitnah ausgebaut und mithilfe von Wasser gelöscht.

5.3.2 Ergebnis

Temperaturverläufe

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen der einzelnen Kontaktflächen sind in Abbildung 37 dargestellt. Die Bezeichnungen der einzelnen Ebenen sind Abbildung 35 zu entnehmen. Dargestellt sind die Mittelwerte aller Messdaten, welche bei beiden Prüfkörpern jede Sekunde aufgezeichnet wurden.

Abbildung 37:
Gemittelte Temperatur-Zeit-Verläufe in den Kontaktflächen der einzelnen Lamellenlagen



Die Temperaturen hinter der ersten brandzugewandten Lamellenlage (Ebene A) steigen bei 60 Minuten rasant an. Dies entspricht in etwa dem rechnerischen Zeitpunkt des Erreichens der 300 °C Isotherme (Teibinger 2017). Zu diesem Zeitpunkt kann innerhalb des Ofens ein Abfallen der ersten Lamellenlage beobachtet werden. In Abbildung 38 ist links ein Prüfkörper bei Minute 60 und rechts bei Minute 66 dargestellt. Bei Minute 60 sind noch deutlich die vertikalen Zwischenräume der ersten Lamellenlage zu erkennen. Die horizontalen Zwischenräume der zweiten Lamellenlage sind bei Minute 66 zu sehen. Das erhöhte Flammenaufkommen bei Minute 66 ist durch die vor dem Prüfkörper liegenden abgefallenen Lamellen der Lamellenlage 1 zu erklären.

Abbildung 38:
Prüfkörper unter einer Brandbeanspruchung nach Einheitstemperaturkurve nach 60 Minuten (links) und 66 Minuten (rechts)



In der Ebene B, welche der brandzugewandten Kontaktfläche zwischen Holz und UHPC entspricht, ist ab Minute 80 ein stetiger Temperaturanstieg zu beobachten. Es ist jedoch kein schlagartiger Temperaturanstieg wie in Ebene A zu erkennen. Bei einem äquivalenten Aufbau aus Holz ohne UHPC-Lamelle stellt sich rechnerisch bei Minute 94 eine Temperatur von 300 °C ein und ein steiler Temperaturanstieg wäre zu erwarten. In den Versuchen wird eine Temperatur von 300 °C in der Ebene B erst nach 110 Minuten gemessen. Einzelne Thermoelemente zeichnen anschließend einen steileren Anstieg der Temperatur auf. Diese befinden sich in der Nähe der Fugen der zweiten Lamellenlage. Der langsamere Anstieg der Temperatur und der dadurch resultierende langsamere Abbrand ist vermutlich auf die hohe Wärmespeicherkapazität des UHPCs zurückzuführen.

Auf der brandabgewandten Kontaktfläche zwischen UHPC und Holz (Ebene C) wird ein geringer Temperaturanstieg ab Minute 90 aufgezeichnet. Nach 120 Minuten wird eine Temperatur von 100 °C erreicht.

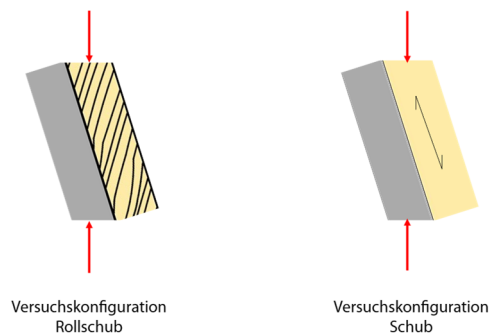
Die Messelemente auf der brandabgewandten Oberfläche (Ebene E) der Prüfkörper zeigen nahezu keine Temperaturänderung über den Verlauf der Prüfung. Ein Rauchaustritt konnte lediglich aus den Bohrungen für die eingebrachten Thermoelemente festgestellt werden.

5.4 Restscherfestigkeit der Klebefuge

5.4.1 Methodik

Als Endprodukt der Versuche nach DIN 4102-8 blieb ein dreilagiger Querschnitt, bestehend aus einer Lage ultrahochfesten Beton und zwei Lagen Holz, zurück. Aus den Endprodukten wurden kleinformative Prüfkörper hergestellt, welche entsprechend auf die Restscherfestigkeit in der Klebefuge zwischen Beton und Holz geprüft wurden. Die Klebefuge entspricht der in Abbildung 35 gekennzeichneten Ebene C. Hierbei wurden zwei Versuchskonfigurationen entsprechend Abbildung 39 durchgeführt. Fünf Prüfkörper wurden entlang der tatsächlichen Lastrichtung in einer ultrahochfesten Verbundwand belastet (Versuchskonfiguration Rollschub, da das Holz auf Rollschub beansprucht wird). Aufgrund der niedrigen Rollschubfestigkeit des Holzes kann es zu einem Versagen des Holzes kommen, bevor die Klebefuge versagt. Um dies zu vermeiden wurden 10 Prüfungen in der Konfiguration belastet, in welcher das Holz auf Längsschub belastet wurde (Versuchskonfiguration Schub). Die Prüfkörper hatten eine Abmessung von 14 x 10 cm². Die Lagendicken in den Versuchen betrugen beginnend mit dem Beton 30 – 30 mm. Die äußerste Brettlage von 40 mm wurde durch einen Schnitt in der Ebene D entfernt.

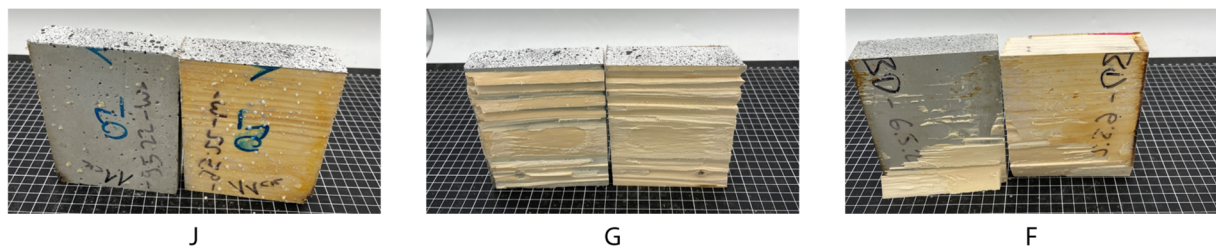
Abbildung 39:
Versuchskonfiguration mit Holz auf Rollschub (links) und mit Holz auf Längsschub (rechts)



Während der Prüfung wurden mithilfe eines optischen Messgerätes die Verformungen aufgenommen. Hierzu war eine weisse Grundierung des Prüfkörpers und ein Besprenkeln mit schwarzen Punkten notwendig. Anhand des Kontrastes zur weißen Grundierung, ist die optische Messung in der Lage, die Verschiebung der schwarzen Punkte zu messen. Daneben zeichnete die Prüfmaschine die Maschinenkraft und den Maschinenweg auf. Ein in der Prüfmaschine eingebaute Prüfkörper ist in Abbildung 40 abgebildet. Die Blaufärbung entsteht aufgrund des für die optische Messung benötigten blauen Lichtes.

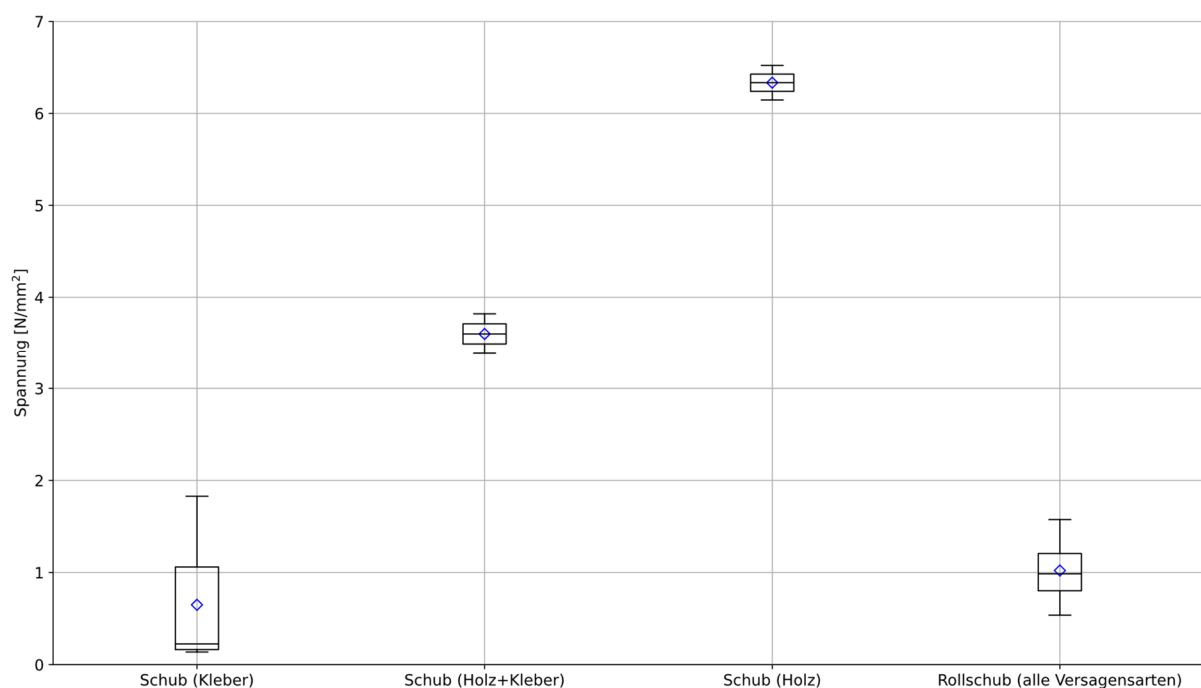
Es ist zu erkennen, dass die Prüfkörper, welche im mittleren Bereich einer hohen Temperatureinwirkung ausgesetzt waren, ein Klebstoffversagen aufzeigen. Ausgenommen ist Prüfkörper B. Bei diesem tritt ein kombiniertes Klebstoff- und Holzversagen auf. Dabei werden hinter dem Prüfkörper B im Vergleich zu den anderen Prüfkörpern geringere Temperaturen gemessen. Prüfkörper F zeigt ebenfalls ein kombiniertes Holz und Klebeversagen auf. Der Bereich des Prüfkörpers mit einer Orientierung zur Mitte weist ein Klebstoffversagen und der Randbereich ein Holzversagen auf (vgl. Abbildung 42). Dies erlaubt den Rückschluss, dass im Randbereich geringere Temperaturen wirken und erklärt warum die Prüfkörper N und G ein Holzversagen aufzeigen.

Abbildung 42:
Darstellen der unterschiedlichen Versagensarten am Beispiel der Prüfkörper J, G und F



Ein Vergleich der maximal auftretenden Spannungen verteilt über die Scherfläche ist in Abbildung 43 dargestellt. Die Ergebnisse sind aufgeteilt nach Versuchskonfiguration und Versagensart. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei der Versuchskonfiguration Schub das Klebefugenversagen bei geringeren Spannungen auftritt als das Holzversagen. Die Prüfkörper mit einem kombinierten Holz und Klebeversagen liegen zwischen diesen Grenzbereichen. In der Versuchskonfiguration Rollschub sind keine differenzierbaren Aussagen aufgeteilt nach Versagensart möglich, da hier zu viele unterschiedliche Versagen bei einer geringen Probenmenge auftreten. Die ermittelten Spannungen liegen hierbei unter denen einer erwarteten reinen Rollschubbeanspruchung.

Abbildung 43:
Maximale Schubspannungen in der Klebefuge zwischen Holz und Beton differenziert nach Versuchskonfiguration und Versagensart



5.5 Mechanische Eigenschaften

5.5.1 Methodik

Prüfkörper

Für die Prüfung der mechanischen Eigenschaften nach einer Temperaturbelastung wurden Prüfzylinder mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm herangezogen. Die Mischung erfolgte mithilfe eines Doppelwellen-Chargenmischers. Nach dem Einbringen in die Schalung wurden die Prüfkörper 48 Stunden bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte gelagert. Anschließend wurden die Prüfkörper ausgeschalt und 48 Stunden bei 90 °C wärmebehandelt. Durch die Wärmebehandlung wird bereits nach 7 Tagen die maximale Druckfestigkeit erreicht (Sagmeister 2017). Nach der Wärmebehandlung wurden die Prüfkörper bis zur weiteren Prüfung mindestens jedoch 3 Tage bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit gelagert.

Die Zusammensetzung und Bezeichnung der untersuchten Betonmischungen ist in Tabelle 11 zusammengefasst. Alle Betonrezepturen basierten auf einer kleinformatig durchgeführten Mischungsoptimierung. Teilweise werden im Verlauf des Berichts Ergebnisse dargestellt, welche auf kleine Variationen der Mischungen zurückgehen. Diese Passagen sind entsprechend gekennzeichnet und die jeweilige Abweichung wird beschrieben.

Tabelle 11:
Zusammensetzung und Bezeichnung der untersuchten Betonmischungen

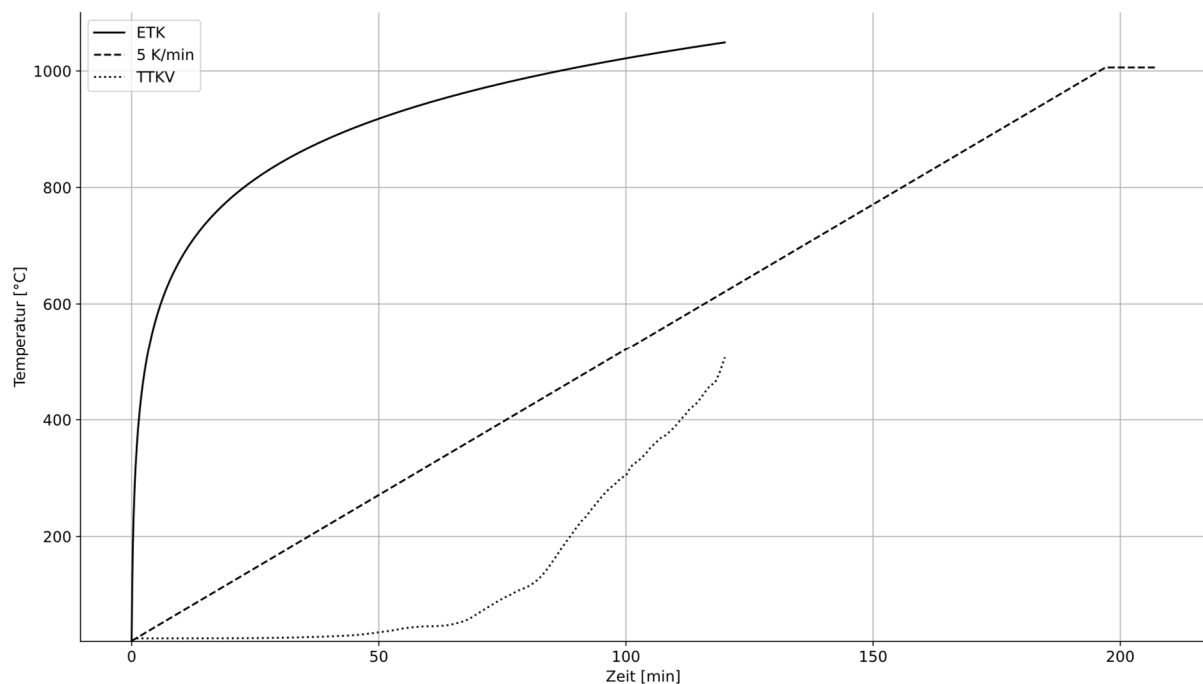
Bestandteile	A	B	C
	[kg/dm ³]		
Compound 1	0,9914	1,1426	–
Compound 2	–	–	0,9914
Rhein Sand 0/2 mm (lufttrocken)	–	–	–
Basalt Sand 0/2 mm (lufttrocken)	0,4594	1,0729	0,4594
Basalt Splitt 2/5 mm (lufttrocken)	0,8794	–	0,8794
Wasser	0,1586	0,1809	0,1586
Fließmittel BASF ACE 460	–	–	–
Fließmittel BASF ACE 396	0,0109	0,0151	0,0109
Fließmittel VP 2013/5,2	0,0035	0,0091	0,0056
Polypropylenfasern 6/0,018	0,0020	0,0020	0,0020

Temperatureinwirkung

Untersucht wurden drei verschiedene Temperatureinwirkungen. Diese sind eine Temperaturerwärmung von 5 K/min, eine Temperatureinwirkung nach Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) und nach der ermittelten

Temperatureinwirkung in der Ebene B (vgl. Abbildung 35) der Versuche nach DIN 4102-8. Bei der Temperatureinwirkung in der Ebene B wurde das 95 %-Quantil der gemessenen Werte in der Ebene B herangezogen. Die Einwirkung in der Ebene B wird im Folgenden als tatsächliche Temperaturzeitkurve der Versuche (TTKV) bezeichnet. Die Einwirkungen sind in Abbildung 44 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die maximale Temperatur bei der TTKV mit knapp 500 °C deutlich unter den maximalen Temperaturen der anderen Einwirkungen liegt. Die schnellste Temperatursteigerung erfolgt bei der Erwärmung nach ETK. Die Einwirkung mit 5 K/min wird bis zu einer Temperatur von 1006 °C betrachtet. Dies entspricht der Temperatur bei 90 Minuten nach ETK. Die maximale Temperatur wurde hier für weitere fünf Minuten gehalten, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Prüfkörper zu erzielen.

Abbildung 44:
Betrachtete Temperatureinwirkungen dargestellt als Temperatur referenziert zur Zeit

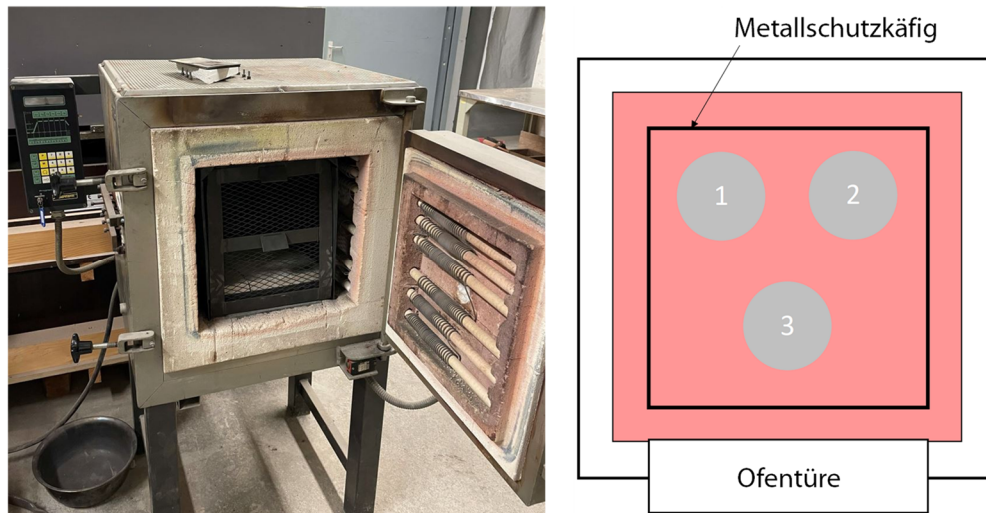


Die im folgenden Untersuchten Temperatureinwirkungen sind:

■ Kalt		Referenzprüfungen ohne Temperatureinwirkung bei 20°C
■ 5 K/min 1006°C		5 K/min bis zu einer Temperatur von 1006°C
■ ETK90		Einheitstemperaturzeitkurve bis Minute 90
■ ETK120		Einheitstemperaturzeitkurve bis Minute 120
■ TTKV90		Tatsächliche Temperaturzeitkurve bis Minute 90
■ TTKV120		Tatsächliche Temperaturzeitkurve bis Minute 120

Erzeugt wurde die Temperatureinwirkung durch einen Muffelofen. Mit diesem können durch die Angabe linearer Intervalle beliebige Temperaturkurven erzeugt werden. Um den Muffelofen vor möglichen explosionsartigen Abplatzungen zu schützen wurde ein Metallschutzkäfig aus feuerbeständigem Stahl im Muffelofen platziert. In diesem wurden bei jeder betrachteten Mischung und Temperatureinwirkung jeweils drei Prüfyylinder platziert. (vgl. Abbildung 45)

Abbildung 45:
Muffelofen mit Metallschutzkäfig aus feuerbeständigem Stahl (links) und Prüfkörperanordnung im Muffelofen (rechts)



Prüfung

Da die Restdruckfestigkeiten von ultrahochfesten Betonen aufgrund zusätzlicher Schädigungen während des Abkühlungsprozesses unter den Heißdruckfestigkeiten liegen, wurden nur die Restdruckfestigkeiten geprüft. Gemessen wurden die maximalen Zylinderdruckfestigkeiten und der Elastizitätsmodul.

5.5.2 Ergebnis

Abplatzverhalten

Im Rahmen einer Voruntersuchung und Mischungsvariation des ultrahochfesten Betons wurden Proben ohne eine Zugabe von Polypropylenfasern geprüft. Bei vier unterschiedlichen Mischungszusammensetzungen kommt es unter einer langsamen Erwärmung von 5 K/min in einem Temperaturbereich von 280 – 330 °C zu explosionsartigen Abplatzungen. Abbildung 46 zeigt zwei durch die Temperatureinwirkung zerstörte Normprismen. Durch eine Zugabe von 2 kg/m³ Polypropylenfasern konnten im weiteren Verlauf bei keiner Prüfung explosionsartige Abplatzungen festgestellt werden. Der beobachtete Temperaturbereich deckt sich mit den in der Literatur bekannten Werten für explosionsartige Abplatzungen. (Klingsch 2014; Zhu et al. 2021)

Abbildung 46:

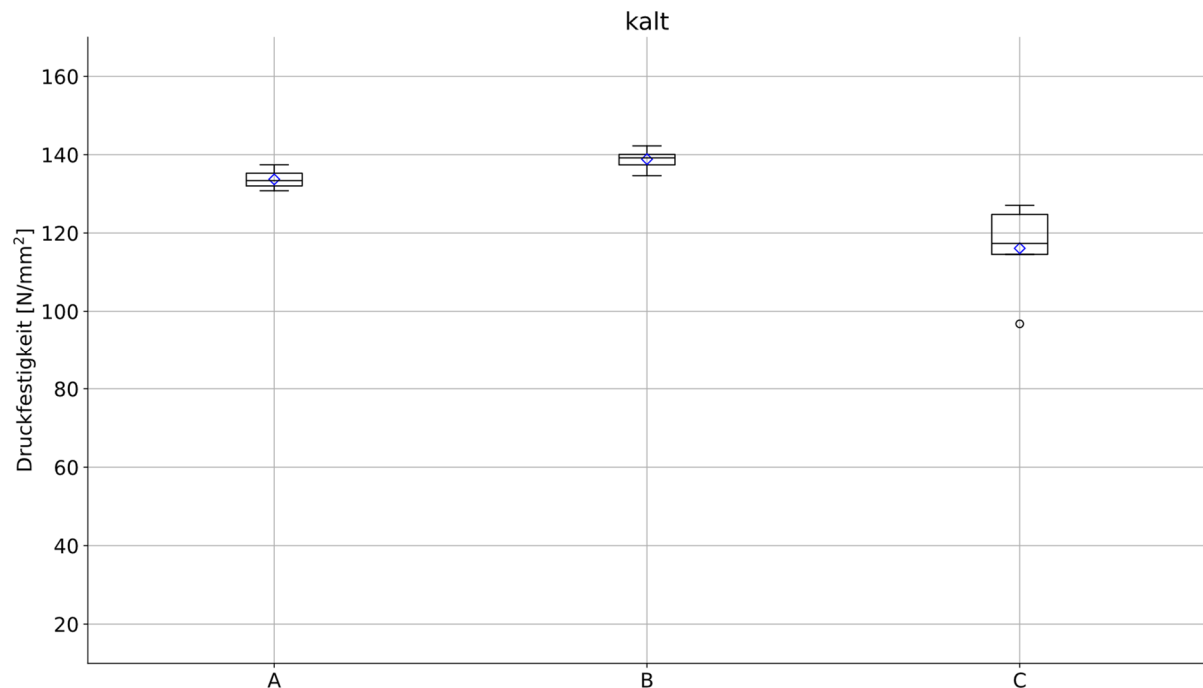
Durch eine Temperatureinwirkung von 5 K/min bei 280 – 330 °C explosionsartig abgeplatzte Prüfkörper



Druckfestigkeiten

In Abbildung 47 sind die Zylinderdruckfestigkeiten der untersuchten Betonmischungen im Ausgangszustand dargestellt. Der Probenumfang beträgt bei den Mischungen A und B neun und bei Mischung C fünf. Die Mischung B erreicht die höchsten Druckfestigkeiten. Mischung C besitzt neben den geringsten Druckfestigkeiten auch eine größere Streuung, obwohl eine geringere Probenanzahl vorliegt. Es kann nicht abschließend geklärt werden, warum bei dieser Mischung geringere Festigkeiten erreicht werden. Kleinformative Betonagen zeigten höhere Druckfestigkeiten von etwa 130 N/mm². Da im Folgenden die relativen Restdruckfestigkeiten im Verhältnis zu dem Mittelwert der kalt geprüften Druckfestigkeiten verglichen werden sind die Daten trotz der unterschiedlichen Ausgangszustände vergleichbar.

Abbildung 47:
Druckfestigkeiten im Ausgangszustand (kalt)

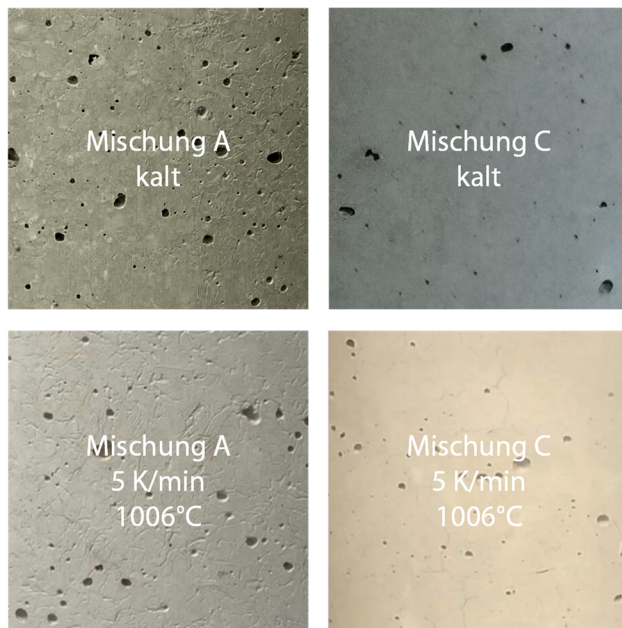


Die absoluten und relativen Restdruckfestigkeiten der Mischungen A, B und C sind in Abbildung 49 für unterschiedliche Temperatureinwirkungen dargestellt. Als Basis für die Ermittlung der relativen Restdruckfestigkeiten wird der jeweilige Mittelwert der kalt geprüften Druckfestigkeiten verwendet.

In einer ersten Analyse werden nur die Temperaturbelastung nach ETK (ETK90 und ETK120) und nach 5 K/min bis auf eine Endtemperatur von 1006 °C betrachtet. Es ist festzustellen, dass die Mischung C sowohl in absoluten als auch relativen Werten bei Temperaturbelastungen von 5 K/min auf 1006 °C, ETK90 und ETK120 die geringsten Werte aufweist. Diese erhöhte Schädigung ist vermutlich auf einen erhöhten Quarzanteil im Compound 2 zurückzuführen. Gestützt wird dies durch die rötliche Verfärbung der Mischung C (vgl. Abbildung 48). Eine rötliche Verfärbung deutet auf einen höheren silikatischen Anteil hin (Hager 2013).

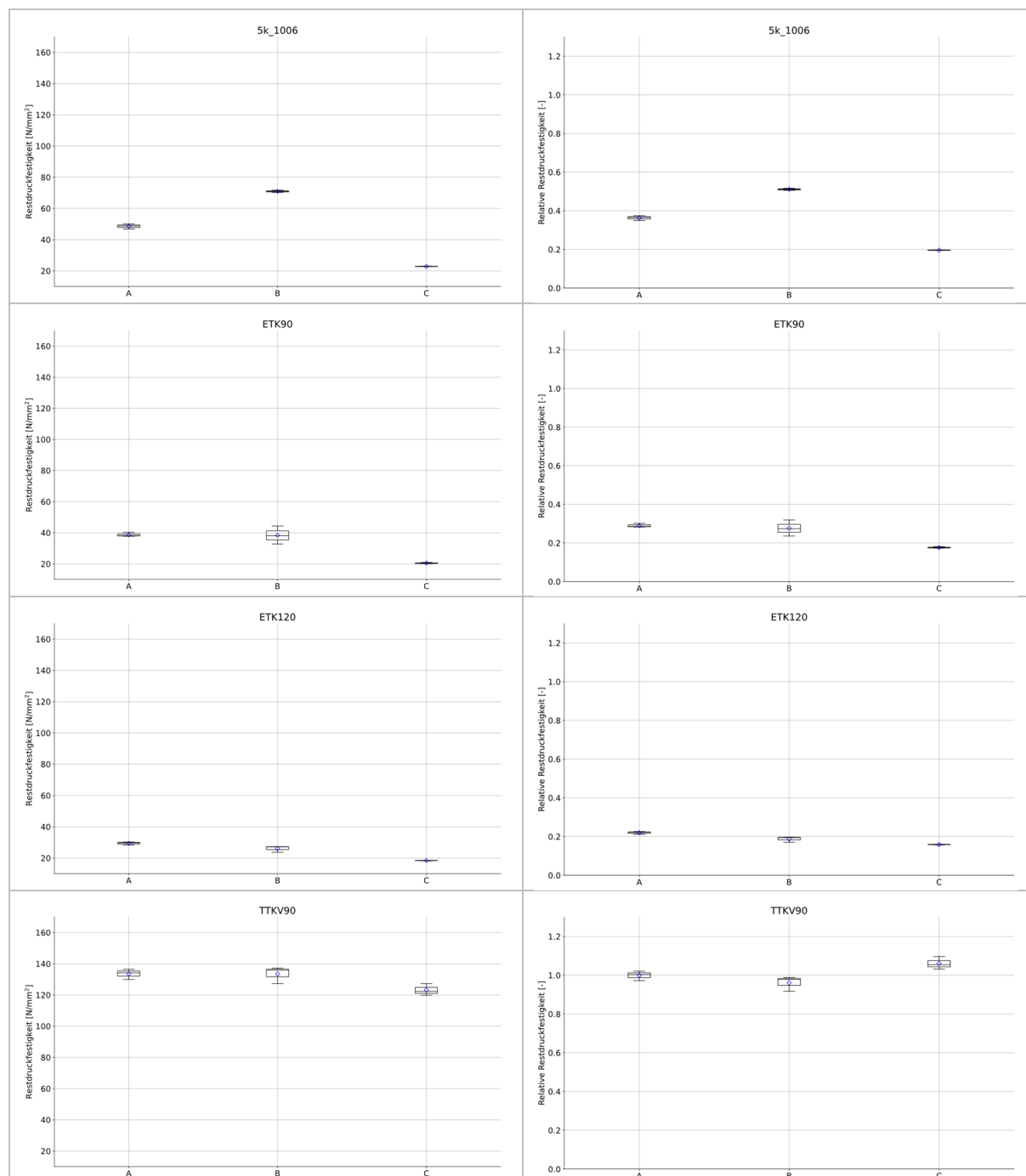
Die Mischung B erreicht bei einer Temperatureinwirkung von 5 K/min die höchsten relativen und absoluten Restdruckfestigkeiten. Bei einer ETK90 und ETK120 Belastung liegen die Restdruckfestigkeiten in der Größenordnung der Mischung A bzw. teilweise leicht darunter. Die Mischungen unterscheiden sich primär anhand der Größe der Zuschlagsstoffe und der Menge an Compound. Da Basalt bis zu seiner Zersetzung bei 1050 °C thermisch stabil bleibt, wird eine Schädigung aufgrund von unterschiedlichen Temperatúrausdehnungskoeffizienten ausgeschlossen. Da es sich bei einer Erwärmung mit 5 K/min um eine sehr langsame Erwärmung handelt und im gesamten Prüfkörper Temperaturen erreicht werden, in welchen sich die Hydrate im Zement zersetzen, ist davon auszugehen, dass bei beiden Mischungen die Zementmatrix ähnlich geschädigt ist. Eine Annahme für die höheren relativen Restdruckfestigkeiten könnte sein, dass durch den kleineren Zuschlag mehr Kontaktflächen zur Zementmatrix vorhanden sind und dadurch eine bessere Verteilung der Druckkräfte im Prüfkörper entsteht. Eine weitere Möglichkeit wäre, dass aufgrund des bei der Mischung B größeren Porenraums die Schädigungen der Zementmatrix geringer ausfallen. Bei einer Temperaturbelastung nach ETK wird davon ausgegangen, dass aufgrund der hohen Temperaturunterschiede eine starke Schädigung der Zementmatrix, hervorgerufen von thermisch induzierten Spannungsrissen, entsteht und somit andere Effekte vernachlässigbar klein sind. Um diese Annahme zu bestätigen wären mikroskopische Untersuchungen der Prüfkörper notwendig.

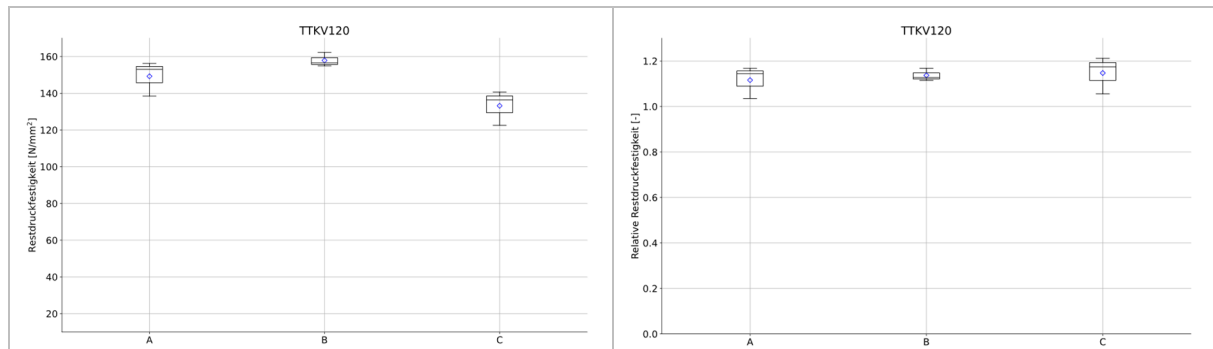
Abbildung 48:
Oberflächen der Mischungen A und C kalt und nach einer Temperaturbeanspruchung von 5 K/min bis auf 1006°C



Bei der Betrachtung der tatsächlichen Einwirkungen TTKV90 und TTKV120 fällt auf, dass nahezu kein Festigkeitsverlust zu beobachten ist. Lediglich die Mischung B weist nach TTKV90 eine leicht geringere Restdruckfestigkeit als im Ausgangszustand auf. Dies ist gegenläufig zu dem unter 5 K/min beobachteten Unterschied. Die geprüften Prüfkörper der Charge der Mischung B unter einer tatsächlichen Temperatureinwirkung wiesen einen höheren Luftporengehalt im Vergleich zu den kalt geprüften Probekörpern auf. Dadurch könnte der geringe Festigkeitsverlust bei 90 Minuten erklärt werden. Nach 120 Minuten weisen alle Mischungen eine Festigungssteigerung auf. Die Prüfkörper weisen bei dieser Beanspruchung, im Bereich zwischen einem Zentimeter Entfernung von der Oberfläche und Mittelpunkt, eine Temperatur zwischen 200 – 394 °C auf. In diesem Bereich sind entsprechend der Literatur die größten festigungssteigernden Effekte zu beobachten, da noch keine Zersetzung der Hydrate stattfindet. Selbst an der Oberfläche werden hier nur Temperaturen von 500 °C gemessen und somit beginnt dort gerade einmal die chemische Zersetzung. Die Festigungssteigerungen liegen zwischen 11,5 – 14,7 %. Die größte Festigungssteigerung wird sowohl nach 90 als auch nach 120 Minuten bei der Mischung C beobachtet. Die Mischung C weist den geringsten Luftporengehalt auf. Eventuell ist aufgrund der dadurch minimal höheren Wärmeleitfähigkeit eine schnellere Durchwärmung der Prüfkörper möglich und dadurch ein frühzeitigeres und stärkeres Auftreten der Festigungssteigerungen zu beobachten. Diese Vermutung könnte anhand einer gezielten Temperaturmessung während der Erwärmung bestätigt werden. Generell zeigt die Mischung C verhältnismäßig große Standardabweichungen auf. Aufgrund des geringen Probenumfangs von drei Prüfkörpern je Temperaturbelastung könnten aber auch zufällig drei festere Proben ausgewählt worden sein. Für einen Beleg sind weitere Untersuchungen durchzuführen.

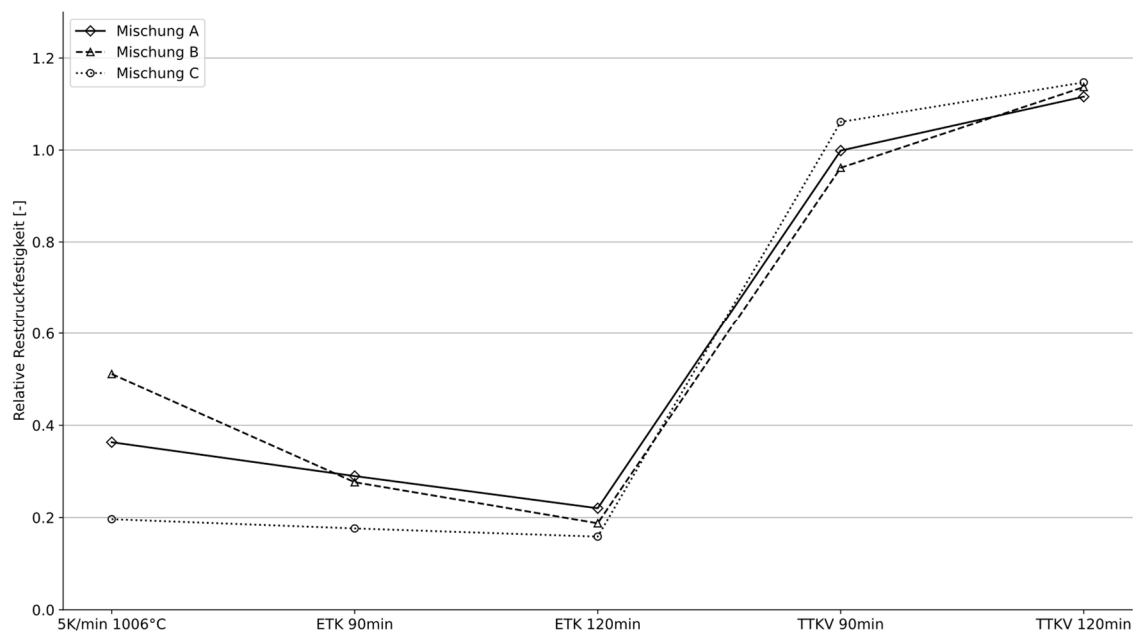
Abbildung 49:
Absolute (links) und relative (rechts) Restdruckfestigkeiten der betrachteten Mischungen bei unterschiedlichen Temperatureinwirkungen





Ein Vergleich der Mittelwerte der relativen Restdruckfestigkeiten aller Mischungen in Abhängigkeit der Temperatureinwirkung ist in Abbildung 50 dargestellt. Es ist nochmals die höhere relative Restdruckfestigkeit der Mischung B bei 5 K/min zu erkennen. Die Grafik zeigt primär das Potenzial der Schutzwirkung des Holzes auf den ultrahochfesten Betonkern in einer ultrahochfesten Verbundwand auf. Aufgrund der geringeren Endtemperaturen und der im Vergleich zur Einheitstemperaturzeitkurve langsameren Erwärmung kann der ultrahochfeste Beton seine Druckfestigkeit behalten und sogar teilweise erhöhen.

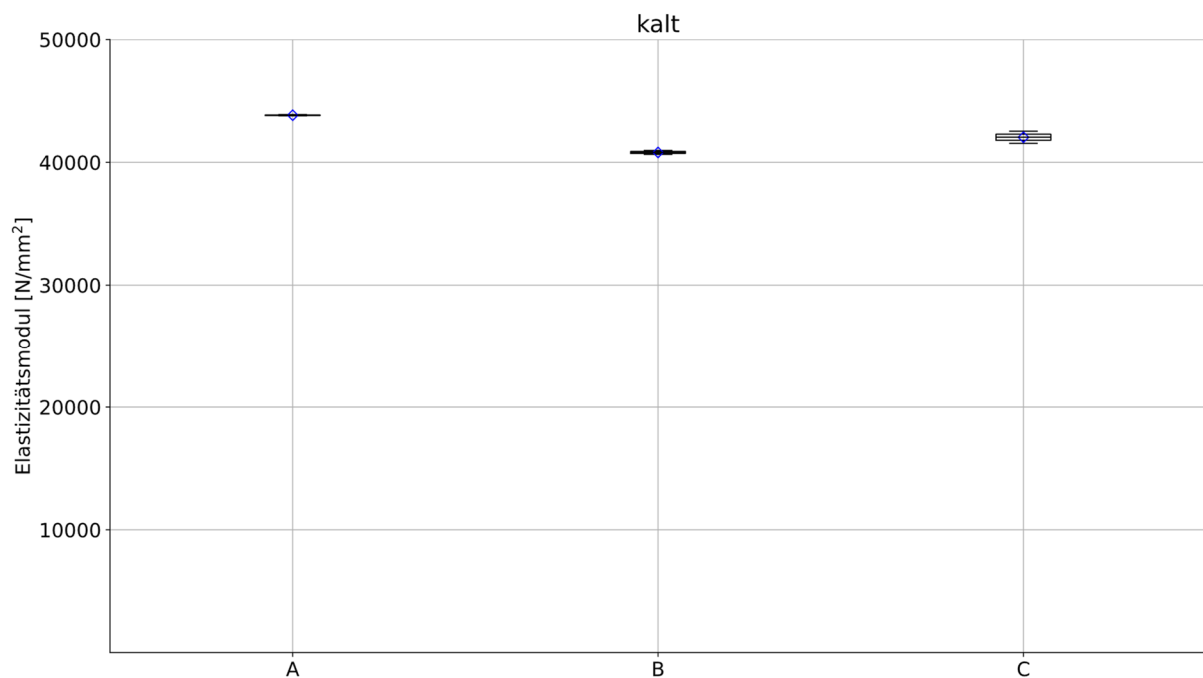
Abbildung 50:
Relative Restdruckfestigkeiten der unterschiedlichen Betonmischungen in Abhängigkeit der Temperatureinwirkung



Elastizitätsmodul

Abbildung 51 zeigt die absoluten Elastizitätsmodule im Ausgangszustand bei 20 °C. Hierbei erreicht nicht wie bei den Druckfestigkeiten Mischung B sondern Mischung A die höchsten Werte. Generell liegen die Elastizitätsmodule auf einem ähnlichen Niveau zwischen 40.800 und 43.838 N/mm². Die im Folgenden angegebenen relativen Elastizitätsmodule nach einer Temperaturbeanspruchung beziehen sich auf die Mittelwerte der kalt geprüften Prüfkörper.

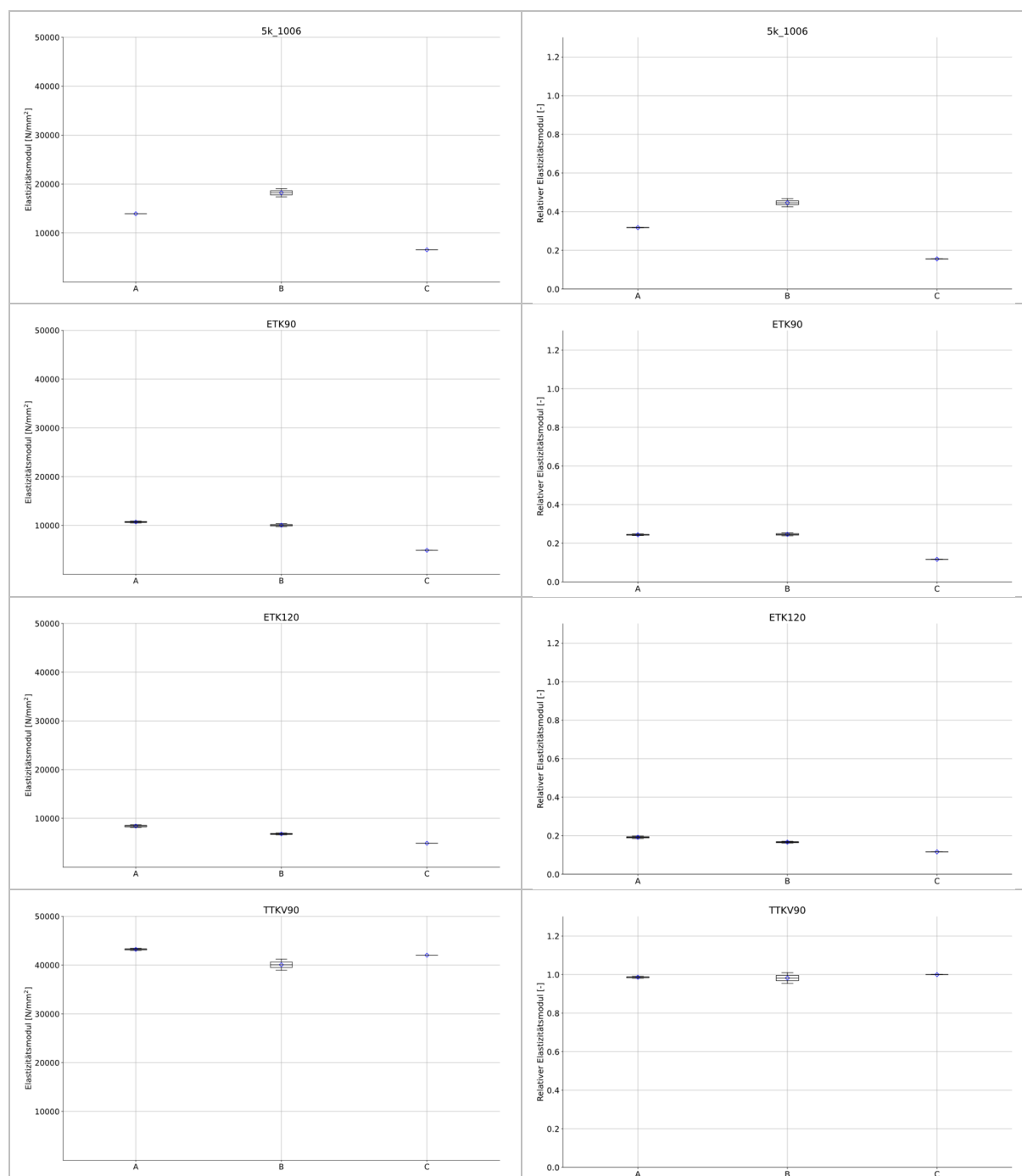
Abbildung 51:
Elastizitätsmodul im Ausgangszustand bei 20°C



Bei den absoluten und relativen Elastizitätsmodulen ist, unter den Temperatureinwirkungen 5 K/min, ETK90 und ETK120, ein analoges Verhalten zu den Restdruckfestigkeiten zu beobachten (vgl. Abbildung 52). Mischung C weist hierbei durchgehend die geringsten Werte auf, was analog zu den Druckfestigkeiten auf die erhöhte Schädigung der Zementmatrix zurückzuführen ist. Ebenfalls erreicht erneut die Mischung B bei einer Temperaturbelastung mit 5 K/min auf 1006 °C den vergleichsweise höchsten Elastizitätsmodul. Dabei kann erneut nur vermutet werden, dass durch die kleineren Zuschlagsstoffe ein engeres Zuschlagsgefüge und größere Flächen zur Lastübertragung entstehen und/oder aufgrund des größeren Porengehalts der Mischung geringere Schädigungen entstehen.

Unter der tatsächlichen Temperatureinwirkung sind im Gegensatz zu den Restdruckfestigkeiten weder nach 90 noch nach 120 Minuten Steigerungen des Elastizitätsmoduls zu verzeichnen. Dies deckt sich mit Beobachtungen aus der Literatur für hochfeste Betone (Hager und Pimienta 2004; Huismann 2010). Eine Steigerung des Elastizitätsmoduls wie bei Way und Wille (2012) kann nicht beobachtet werden. Es wird vermutet, dass aufgrund der größeren Temperaturgradienten die Zerstörung der Zementmatrix überwiegt und nur bei sehr langsamen Temperatureinwirkungen Steigerungseffekte erzeugt werden können. Nach 90 Minuten werden aufgrund der geringen Temperatureinwirkung nur minimal Abweichungen zum Ausgangszustand beobachtet. Nach 120 Minuten sinken die relativen Elastizitätsmodule auf 78,8–81,5%.

Abbildung 52:
Absolute und relative Elastizitätsmodule der betrachteten Mischungen nach unterschiedlichen Temperatureinwirkungen



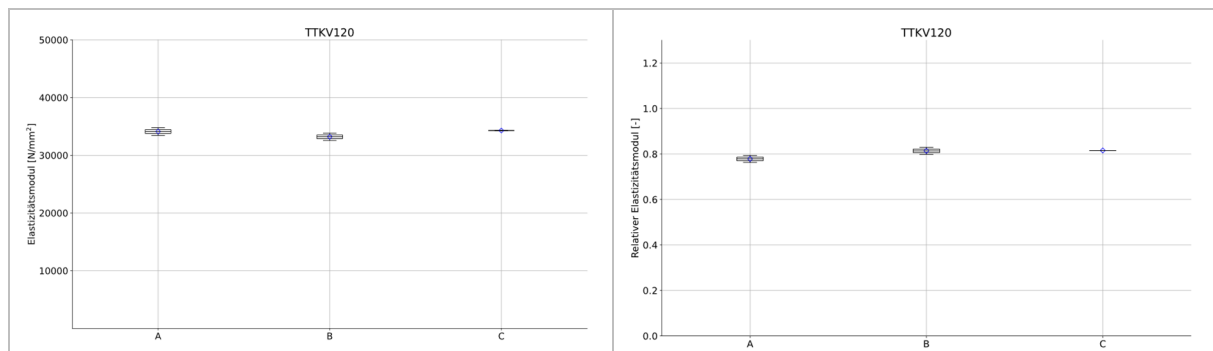
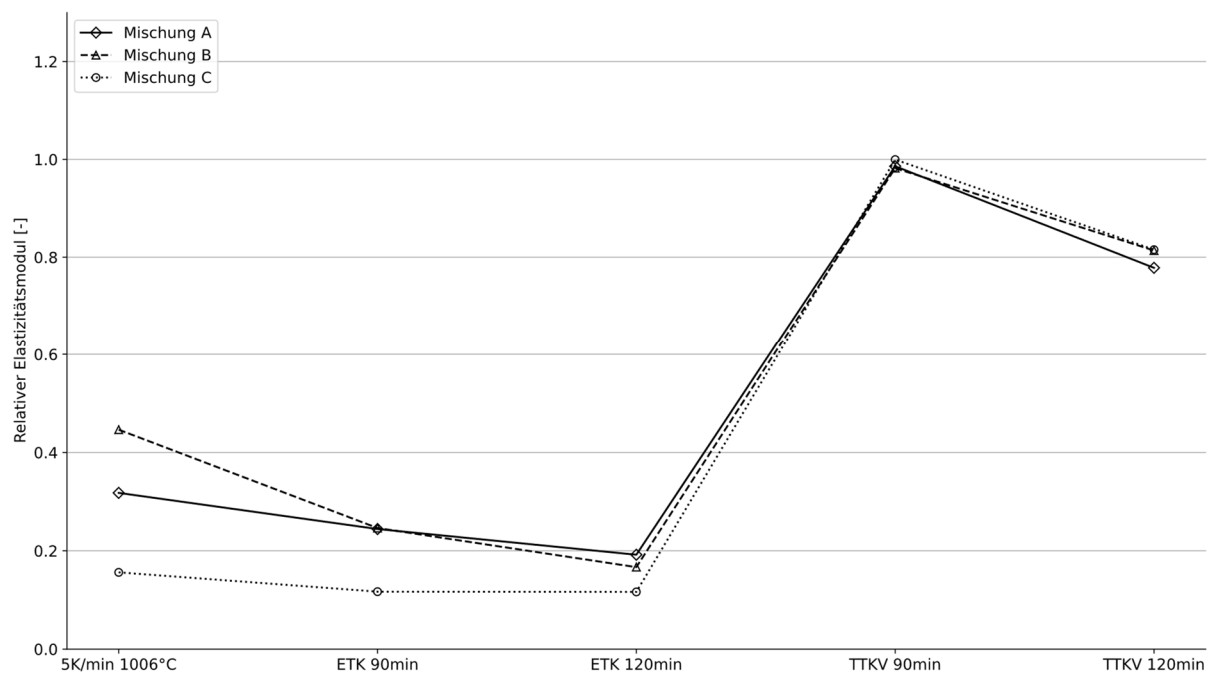


Abbildung 53 zeigt die relativen Elastizitätsmodule der Mischungen separiert nach den jeweiligen Temperatureinwirkungen. Ähnlich zu den Restdruckfestigkeiten liegen die Werte unter einer tatsächlichen Temperatureinwirkung über denen mit einer direkten Einwirkung nach ETK oder mit 5 K/min. Dies liegt erneut an der Schutzwirkung des Holzes, welches die maximalen Temperaturen und die Einwirkungsgeschwindigkeit auf den ultrahochfesten Beton im Vergleich zur ETK verlangsamt. Im Gegensatz zu den Restdruckfestigkeiten ist bei dem Elastizitätsmodul erwartungsgemäß keine Steigerung festzustellen.

Abbildung 53:
Relativer Elastizitätsmodul der unterschiedlichen Betonmischungen in Abhängigkeit der Temperatureinwirkung



5.6 Zwischenfazit

Es konnte gezeigt werden, dass die Geschwindigkeit des Abbrands in der ersten Lamelle einer ultrahochfesten Verbundwand keinen Unterschied zu Brettsperrholzwandelementen aufzeigt. Die Abbrandgeschwindigkeit der an der UHPC Lamelle anliegenden Holzlamellenlage ist etwas geringer als in einem ausschließlich aus Holz bestehenden Element. Dies liegt vermutlich an der hohen Wärmespeicherkapazität des ultrahochfesten Betons. Jedoch ist das Abfallverhalten aufgrund der Versuchsdimension kritisch zu hinterfragen und in großflächigen Versuchen genauer zu untersuchen.

Die Notwendigkeit von Polypropylenfasern konnte durch Vorversuche bei geringen Aufheizraten festgestellt werden. Explosionsartige Abplatzungen traten bei den polypropylenfaserfreien Mischungen bei geringen Temperaturen auf, sodass auch innerhalb einer ultrahochfesten Verbundwand Polypropylenfasern verwendet werden sollten. Bei Ausführungen von Wänden bei denen sichergestellt werden kann, dass nach der gewünschten Feuerwiderstandszeit am Beton Temperaturen $\leq 90^\circ\text{C}$ auftreten, kann auf eine Verwendung von Polypropylenfasern verzichtet werden. Die Grenze von 90°C wird hierbei gewählt, da die Proben ohne Polypropylenfasern bei einer Temperatur von 90°C für eine schnellere Festigkeitsentwicklung nachbehandelt wurden und keine Abplatzungen auftraten.

Die durchgeführte Untersuchung zur Restscherfestigkeit zeigt, dass bereits ab einer Temperatur von 120°C mit einem starken Festigkeitsverlust der Klebefuge zu rechnen ist. Da in den Randbereichen ein Holzversagen beobachtet wird, ist davon auszugehen, dass bei geringeren Temperaturen keine Festigkeitsverluste auftreten. Aufgrund fehlender Temperaturmessdaten in den Randbereichen ist hierzu keine genauere Aussage möglich. Für eine umfangreichere Beurteilung sind weiterführende Versuche mit variierenden Querschnittsorientierungen und konstant aufgetragenen Temperaturen notwendig. Grundsätzlich ist aber davon auszugehen, dass die Verbundwirkung entsprechend gängiger Klebstoffzulassungen bis zu 60°C auch bei einer Verklebung von Holz und Beton intakt bleibt.

Die ultrahochfeste Betonlamelle erreicht bei dem gewählten Aufbau eine gemittelte Temperatur auf der brandzugewandten Seite von 400°C und auf der brandabgewandten Seite von 130°C . Versuche an Prüfzylindern in einem Muffelofen zeigten, dass diese Temperaturgradienten in einem Prüfzylinder in etwa nachgebildet wird. Die Druckfestigkeiten der Prüfzylinder wiesen unabhängig von der Mischung nach 120 Minuten erhöhte relative Restdruckfestigkeiten auf. Nach 90 Minuten ist nur ein geringer Festigkeitsverlust zu beobachten. Die Elastizitätsmodule nehmen auch unter einer tatsächlichen Einwirkung ab, jedoch im Vergleich zu ungeschützten Betonen aufgrund der geringen Temperaturen weniger gravierend. Alle Erkenntnisse beziehen sich auf einen fünfteiligen Aufbau mit den Abmessungen 40-30-30-30-40. Da als Ergebnis der ökobilanziellen Betrachtung nur Querschnitte mit dickeren Holzschichten in Betracht kommen, sind bei diesen Querschnitten bis zu 90 Minuten Brandeinwirkung aufgrund der geringen Temperaturen keine Festigkeitsänderungen und nur minimale Steifigkeitsverluste zu erwarten. Auf Basis dieser Erkenntnis und der geringen Temperaturen am Betonkern ist ein Materialversagen des Betons im Brandfall auszuschließen. Untersucht werden muss der unsymmetrische Querschnitt als Ergebnis eines einseitigen Abbrandes und dessen Folgen auf die Stabilitätsnachweise im Brandfall.

Aufgrund des Zusammenwirkens der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Holzes und der geringen Porosität des ultrahochfesten Betons ist ein guter Raumabschluss der UHPTW zu erwarten. Im Kleinbrandversuch wurden auf der brandabgewandten Oberfläche über 120 Minuten ETK Belastung keine erhöhten Temperaturen gemessen. Ebenfalls konnte kein Rauchaustritt im Regelbereich festgestellt werden.

6 Bauteilanschlüsse, Fertigung und Montage

6.1 Hintergrund und Ziel

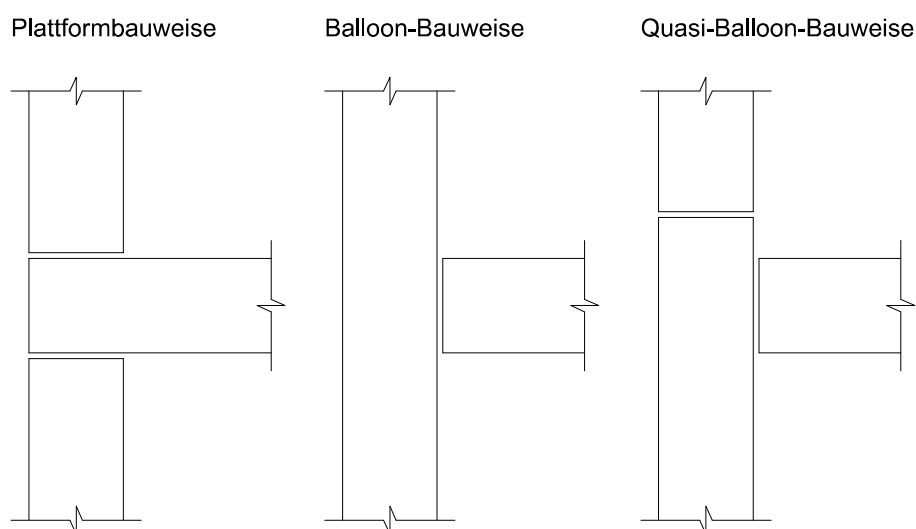
Um die Praxistauglichkeit hybrider Wandbauteile aus Holzlamellen und ultrahochfestem Beton zu gewährleisten, ist es erforderlich mögliche Anschlüsse wie zum Beispiel Wand–Wand oder Wand–Decke, unter konstruktiven Aspekten zu entwickeln. Neben der Weiterleitung der Lasten, ist eine einfache Ausführung und Montierbarkeit der Verbindung zu berücksichtigen. Ferner soll eine möglichst einfache und schadungsfreie Rückbaubarkeit der Fügung gewährleistet sein. Ziel hiervon ist, dass Bauteile oder dessen Bestandteile einfach wieder- bzw. weiterverwendet oder anderweitig stofflich verwertet werden können. Schlussendlich handelt es sich bei Anschlüssen immer um Konstruktionsdetails die projektbedingt entwickelt und dimensioniert werden müssen. Die Untersuchung zeigt mögliche Anschlussdetails und gibt eine Abwägung bezüglich der Verwendbarkeit.

6.2 Untersuchungsgegenstand

Für die Ausführung von Stoßfugen zwischen zwei Wandelementen kann auf die im Massivholzbau üblichen Systeme zurückgegriffen werden. Da die Beanspruchungen in Scheibenebene nahezu ausschließlich über das Holz abgetragen werden, ist eine kraftschlüssige Verbindung in dieser Ebene erstrebenswert. Eine Übersicht über mögliche Anschlussvarianten wird im Stand der Technik (6.3) aufgezeigt. Der Fokus wird auf die Ausbildung eines effizienten und einfachen Bauteilanschlusses zwischen Wand und Decke gelegt.

Im klassischen Holzbau existieren drei mögliche Bauweisen für einen Wand–Decken Anschluss. Diese sind die Plattformbauweise, die Balloon-Bauweise und die Quasi-Balloon-Bauweise. Bei der Plattformbauweise lagert die Decke direkt auf der Wand auf. Hingegen läuft die Wand bei der Balloon-Bauweise über das Stockwerk hindurch und die Decke wird durch einen Randbalken oder eine Ausklinkung angeschlossen. Den Unterschied zwischen Quasi-Balloon und Balloon-Bauweise stellt der Wandstoß oberhalb des Deckenanschlusses im Falle der Quasi-Balloon-Bauweise dar. Schematisch dargestellt sind die unterschiedlichen Bauweisen in Abbildung 54.

Abbildung 54:
Systematische Darstellung der unterschiedlichen Wand-Decken Konstruktionsweisen



Der große Vorteil der Plattformbauweise ist die einfache und schnelle Montage. Bei einer Ausführung in Holzbauweise kann es allerdings zu Problemen aufgrund der Querdruckbeanspruchung des Deckenquerschnittes kommen. Aufgrund der Querdruckbeanspruchung und der größeren Querschnittsreduzierung bei Trocknungsvorgängen quer zur Faser ist mit größeren Setzungen zu rechnen, welche zu Quetschfalten im Wärmedämmverbundsystem führen können. Ebenfalls nachteilig ist die aufwendige und sorgfältige Führung der Luftdichtung. Die luftdichte Ebene ist hingegen bei der Ballon-Bauweise bzw. Quasi-Balloon-Bauweise aufgrund der durchgehenden Wand unproblematisch. Bei diesen Bauweisen wiederum ist der dadurch entstehende exzentrische Lasteintrag nachteilig. (Mahrin und Schopbach 2022)

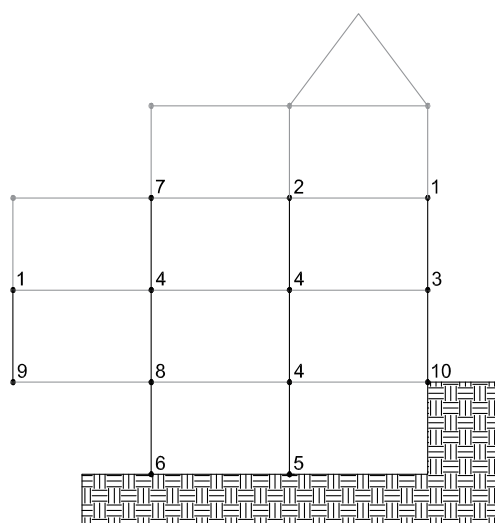
Aus einer, im Rahmen einer Masterarbeit, durchgeführten Befragung diverser ausführender Firmen wird erkenntlich, dass mit dem Hintergrund einer einfachen und schnellen Montage, primär die Plattformbauweise gebaut wird (Stadler 2022). Da die Nachteile der Plattformbauweise aufgrund der Querdruckbeanspruchung durch die Hinzunahme einer Betonlamelle und der Ausbildung eines Betonrandbalkens verhindert werden können, überwiegen die Vorteile der schnellen und einfachen Montage. Deshalb wird bei der Ausbildung der Anschlussdetails die Plattformbauweise fokussiert.

Grundsätzlich ist in drei geometrische Arten eines Wand-Wand-Decken-Anschlusses zu unterscheiden. Diese sind eine Wand-Wand ohne Deckenanschluss, Wand-Wand mit einseitigem Deckenanschluss und Wand-Wand mit beidseitigen Deckenanschluss. Hinzu kommt die Unterscheidung in die statischen Anforderungen des Anschlusses. Über einen Wand-Decken-Anschluss müssen immer vertikale, häufig aber auch horizontale Beanspruchungen übertragen werden können. Im Folgenden werden daher Lösungen für den kombinierten vertikalen und horizontalen Lastabtrag betrachtet.

In Abbildung 55 sind die unterschiedlichen Wand-Decken Knotenpunkte, welche in einem Gebäude auftreten, schematisch dargestellt. Als schwarze Linien sind die möglichen Einsatzorte für eine UHPTW dargestellt. Graue Linien stellen die Deckenelemente beziehungsweise die Wandelemente dar, in denen es aus ökologischer Sicht nicht sinnvoll sei könnte UHPTW Elemente zu verwenden. Näher betrachtet werden die Knotenpunkte 3 und 4. Bei Knotenpunkt 3 handelt es sich um einen klassischen Außenwandanschluss. Dieser ist ebenfalls für die hygrothermische Betrachtung relevant. Knotenpunkt 4 ist eine Innenwand mit beidseitigem Deckenanschluss. Die zwei gewählten Knotenpunkte decken den Großteil der in der Praxis auftretenden Anschlusspunkte ab. Die Knotenpunkte 1,2 und 7 können aus den Knotenpunkten 3 und 4 abgeleitet und analog konstruiert werden.

Abbildung 55:

Skizze und Nummerierung von unterschiedlichen Wand-Decken Knotenpunkten in einem Gebäude mit UHPTW



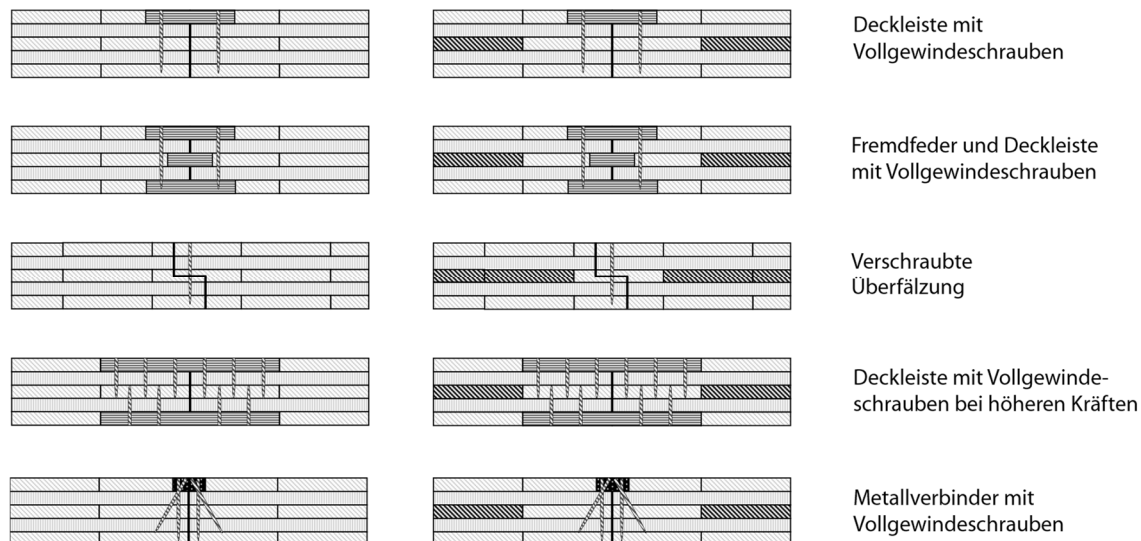
6.3 Stand der Technik

6.3.1 Fügetechniken im Holzbau

Stoßfugen

Brettsperrhölzer können auf unterschiedlichste Arten gefügt werden. Hierbei ist die jeweilige Anforderung an die Fügung zu berücksichtigen und der Fügungsbereich entsprechend zu dimensionieren. In Abbildung 56 sind einige bekannte Fügetechniken, sowie eine mögliche Übertragung für eine ultrahochfesten Verbundwand dargestellt. Hierbei muss im Anschlussbereich zweier Elemente eine Holzlamelle im Kern verlegt werden, dann kann auf die bewährten und bekannten Konstruktionsarten zurückgegriffen werden. Wenn die Varianten mit Deckleisten und Vollgewindeschrauben – abhängig von der Beanspruchung – nur bis in die zweite Lage verschraubt werden müssen, dann kann der Betonkern durchlaufend ausgeführt werden. Des Weiteren ist bei diesen Varianten eine zusätzliche Schraubenpressklebung denkbar (Winter und Mestek 2009).

Abbildung 56:
Fügetechniken für Brettsper Holz (links) und deren Übertragung auf eine ultrahochfeste Betonwand (rechts) angelehnt an Winter und Mestek (2009)



Je nach Beanspruchung ist auch eine Fügung mit reinen zimmermannsmäßigen Verbindungen aus Holz denkbar. Beispielhafte Fügungen mit konisch geschnittenen Schwalbenschwanzverbindern sind in Abbildung 57 dargestellt. Diese können quer oder längs eingebracht werden. Bei einer queren Ausführung wäre eine Ausführung ohne Unterbrechung der Betonlamelle denkbar.

Abbildung 57:
Holzbasierte Fügungstechniken für BSP (links) und deren Übertragung auf eine ultrahochfeste Verbundwand (rechts)

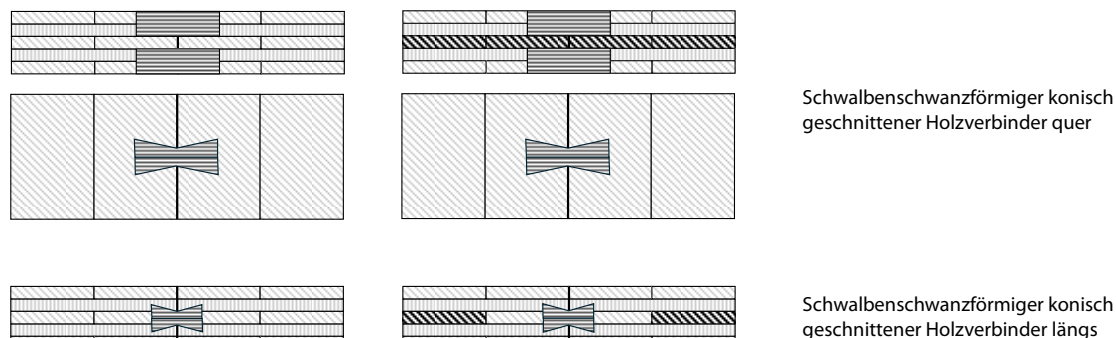
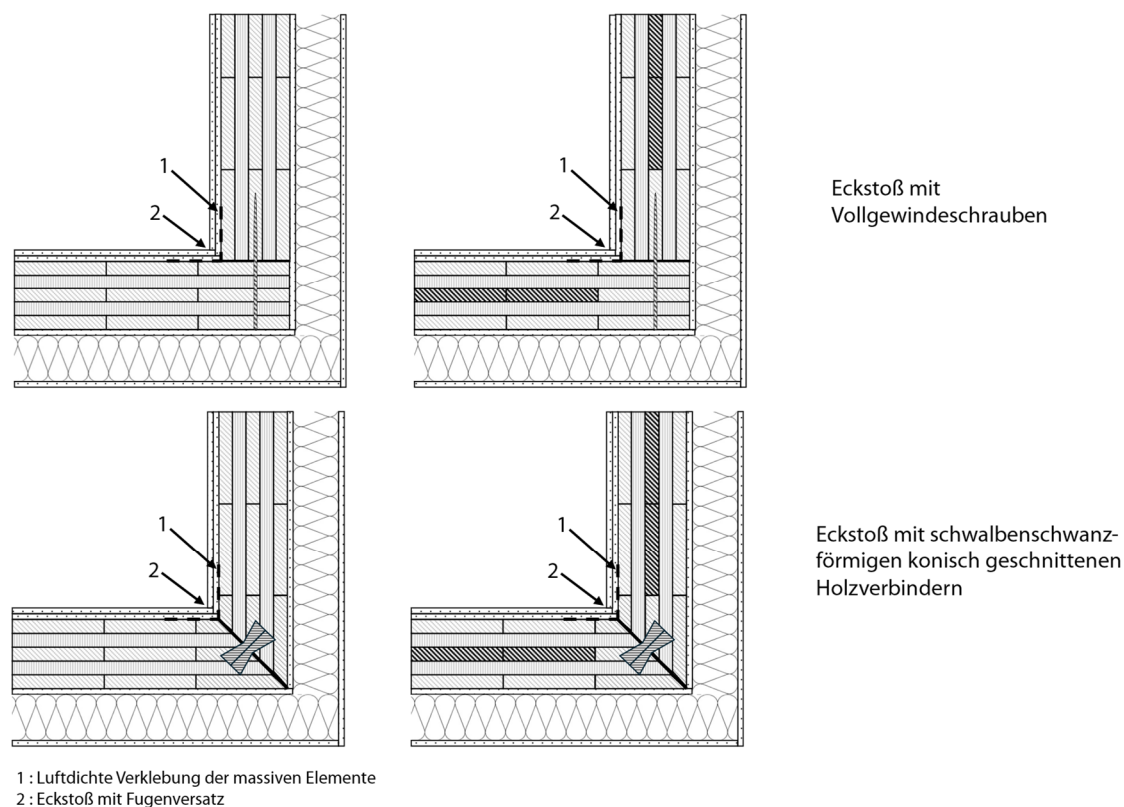


Abbildung 58 beinhaltet zwei schematische Eckausführungen. Hierbei wird ein Wärmedämmverbundsystem und eine innenseitige Bekleidung mitskizziert. Aus hygrothermischen Aspekten wird durch außenliegende Dämmung der vollständigen Ecke die Gefahr eines Tauwasserausfalls aufgrund der geometrischen Wärmebrücke gemindert. Ebenfalls ist die Luftdichtheit der Fuge sicherzustellen. Hierzu wird die Fuge innenseitig mit einer Folie verklebt. Die Fugen können auch mit Kompressionsbändern oder Dichtungsschläuchen strömungsdicht ausgeführt werden. Flächige Brettsperrholzelemente können durch die Anordnung von Plattenwerkstoffen oder Schmalseitenverklebung eine ausreichende Strömungsdichtheit und somit eine entsprechende Luftdichtheit erreichen. (Informationsdienst Holz 2010) Die innenseitige Bekleidung kann aus praktikablen Gründen oder je nach Gebäudeklasse brandschutztechnisch notwendig werden. Da eine primäre Anwendung in hohen Häusern geplant wird, ist von einer Einordnung in die Gebäudeklasse 5 auszugehen, sodass die tragenden Holz-Wände mit einer Bekleidung mindestens 30 Minuten vor einer Entzündung zu schützen sind. (MHolzBauRL 2022).

Abbildung 58:
Varianten für Eckanschlüsse von Brettsperrholz (links) und angepasst für eine ultrahochfeste Verbundwand (rechts) angelehnt an Gräfe et al. (2015)

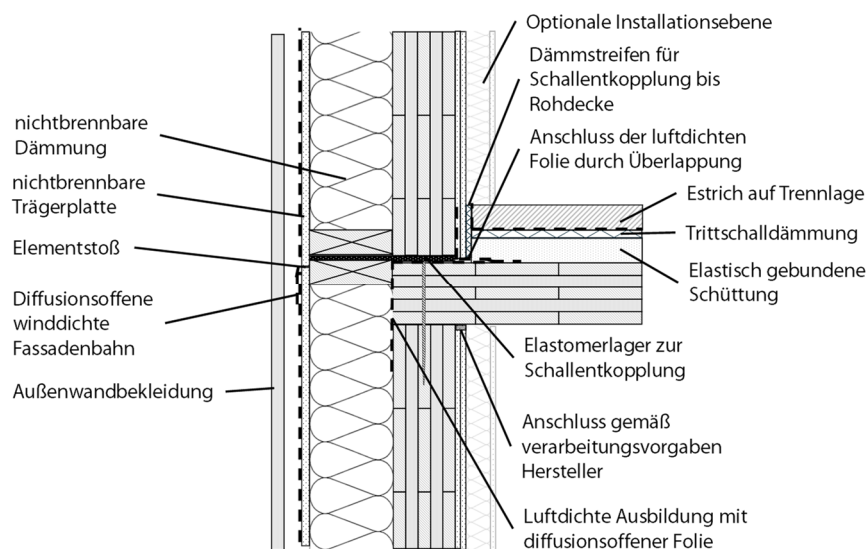


Wand-Decken-Anschluss

Ein im Holzbau typischer Außenwandanschluss mit Brettsperrholzelementen in Plattformbauweise ist in Abbildung 59 gezeichnet. Die Kraftübertragung erfolgt in vertikaler Richtung über eine Auflagerung der Decke auf der unteren Wand. Lagegesichert wird diese Ausführung durch eine Schraube. Die darüberliegende Wand steht auf der Decke und wird durch einen Stahlwinkel fixiert (in der Zeichnung nicht dargestellt). Die lagesichernde Schraube und der Stahlwinkel können je nach Dimensionierung auch die Schubübertragung in die untere Wand sicherstellen. Der winterliche Wärmeschutz wird durch eine aufgetragene Wärmedämmung gewährleistet. Neben der Sicherstellung der Winddichtheit von außen durch eine diffusionsoffene winddichte Fassadenbahn ist ebenfalls eine luftdichte Ausbildung der Element- bzw. Bauteilfügung aus hygrothermischen und schallschutztechnischen Gründen notwendig. Hierbei ist auf eine korrekte Ausführung durch eine Überlappung mit einer weiteren Folie zu achten. Die Schallübertragung wird durch eingelegte Elastomerlager reduziert. Es ist eine korrekte Ausführung der Befestigungselemente (Schrauben, Winkel) im Anschlussbereich notwendig, um die maximale Wirkung der Elastomerlager zu erzielen (Broßat M. 2022).

Abbildung 59:

Außenwandanschluss mit Brettsperrholzelementen (Orientierung an dataholz.eu (2024) und Informationsdienst Holz (2010))

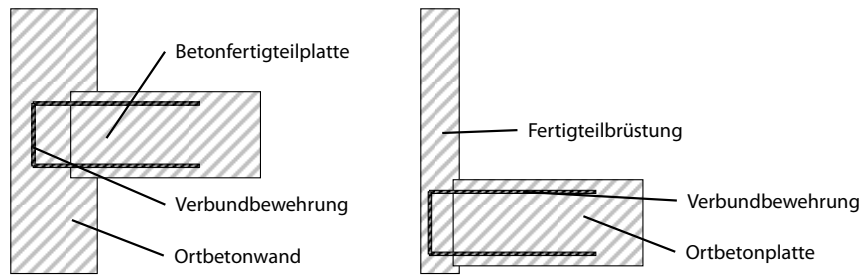


6.3.2 Fügetechniken im Betonfertigteiletbetonbau

Wand Decken Anschluss

Die Fügung im Betonfertigteiletbau erfolgt meist über aus den Fertigteilen herausstehenden Bewehrungsseisen und angerauten Betonoberflächen um vor Ort mit Ortbetonergänzungen einen monolithischen kraftschlüssigen Verbund zu erzeugen (siehe Abbildung 60) (Lohmeyer 1994). Durch den monolithischen Verbund wird eine Luftdichtheit gewährleistet. Eine Schallübertragung ist aufgrund der hohen flächenbezogenen Masse im Vergleich zum Holzbau als weniger kritisch anzusehen.

Abbildung 60:
Anschlüsse im Betonfertigteilbau mit Ortbeton (Orientierung an Lohmeyer (1994))



Die klassische Fugenausbildung geschieht über ein Mörtelbett. Trockene Druckfugen waren nach der zurückgezogenen DIN 1045-1:2008-08 bis zu einer mittleren Betonspannung von $0,4 \cdot f_{cd}$ möglich. Hierbei ist auf eine ausreichende Qualität der Ausführung im Werk und auf der Baustelle zu achten. Vorteilhaft ist, dass bei trockener Auflagerungen kein Mörtel auf der Baustelle benötigt wird. Nach Bachmann et al. (2009) sollten dabei aber zumindest Weichfaserplatten oder ähnliches verwendet werden um einen direkten Kontakt zu verhindern. Weitere mögliche Zwischenlagen bestehen aus Kunststoff, Kautschuk oder Metallen. (Lohmeyer 1994) Neue Erkenntnisse zeigen, dass Trockenfugen bei ultrahochfesten Betonen mit der einhergehenden Verbesserung der Toleranzen bei der Fertigteilherstellung prinzipiell möglich sind (Sandtner 2016).

6.4 Variantenuntersuchung

6.4.1 Allgemeines

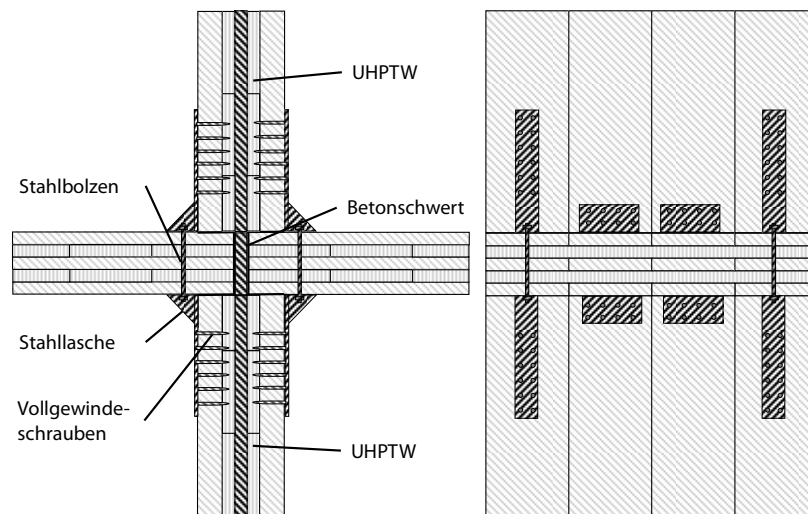
Im Folgenden werden einige Skizzen gezeigt, die während der Bearbeitung entstanden sind. Diese werden jeweils kurz hinsichtlich der Lastweiterleitung und der Montage beschrieben. Abschließend erfolgt ein einordnendes Fazit der jeweiligen Variante. Die Skizzen sind auf das Thema Tragfähigkeit beschränkt und besitzen keine Aussagen bezüglich der bauphysikalischen Anforderungen.

6.4.2 Anschluss mit Zugankern

Beschreibung

Bei dem Anschluss mit Zugankern handelt es sich um eine Plattformbauweise (vgl. Abbildung 61). Die vertikale Drucklast wird über eingestellte Betonschwerter geleitet. Um hierbei einen kraftförmigen Verbund herzustellen, wird an den Kontaktstellen ein hochfester Verpressmörtel aufgetragen. Die Schubkraftübertragung erfolgt über Stahlwinkel. Die entstehende vertikale Zugkraft wird über Zuganker, in einen durch die Decke gesteckten Stahlbolzen und von diesem in den entsprechenden Zuganker die darunter stehende Wand geleitet. Die Kraftübertragung zwischen Stahlbauteilen und Holz erfolgt über Vollgewindeschrauben.

Abbildung 61:
Anschlussvariante mit Zugankern



Montage

Nach dem Stellen der unteren Wand werden die Decken aufgelegt. Anschließend wird Mörtel aufgetragen und die Betonschwerter eingelegt. Die obige Wand wird platziert und die Stahlwinkel und Zuganker angebracht. Zum Schluss wird die Betonfuge mit Mörtel verpresst.

Beurteilung

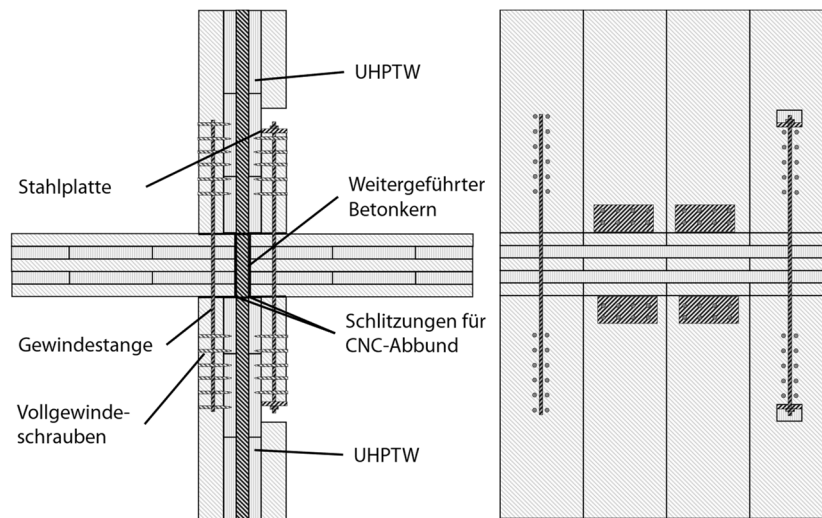
Durch die vertikale Druckkraftübertragung in das Betonschwert wird eine Querdrukbelastung in der Decke vermieden. Das arbeitsintensive und diffizile Einbringen des Mörtels geht mit einem erhöhten Zeitaufwand in der Montage einher. Eventuell kann bei hoher Fertigungsgenauigkeiten auf den Verpressmörtel verzichtet werden.

6.4.3 Anschluss mit Gewindestangen

Beschreibung

Bei der Anschlussvariante mit Gewindestangen wird der Betonkern der unteren Wand bis zum Betonkern der darüber liegenden Wand weitergeführt (vgl. Abbildung 62). So kann die vertikale Druckkraft direkt weitergeleitet werden. Hierfür muss der Betonkern eingeschlitzt werden, um einen CNC-Abbund zu gewährleisten. Die Zugkräfte werden über eingeklebte oder gesteckte Gewindestangen übertragen. In der Skizze sind beide Varianten dargestellt. Die gesteckte Variante wird mit entsprechenden Muttern gesichert und die Kraftübertragung erfolgt mithilfe einer Stahlplatte. Zur Vermeidung von Quersugrissen werden neben den Gewindestangen Vollgewindeschrauben angeordnet. Eine Schubübertragung erfolgt über Stahlwinkel und ebenfalls über die Gewindestangen.

Abbildung 62:
Anschlussvariante mit Gewindestangen



Montage

Die untere Wand kommt ohne Löcher und Gewindestangen auf die Baustelle. Die Decke wird auf die Wand aufgelegt. Danach werden die Löcher für die Gewindestangen durch die Decke und die untere Wand vorgebohrt. Die obere Wand wird mit bereits eingeklebten Gewindestangen auf der anderen platziert und anschließend werden die Gewindestangen verklebt. Bei der gesteckten Variante wird nicht geklebt, sondern die Muttern entsprechend angezogen. Abschließend werden die Schrauben zur Querkraftübertragung angebracht und die Fuge zwischen den Betonkernen verpresst.

Beurteilung

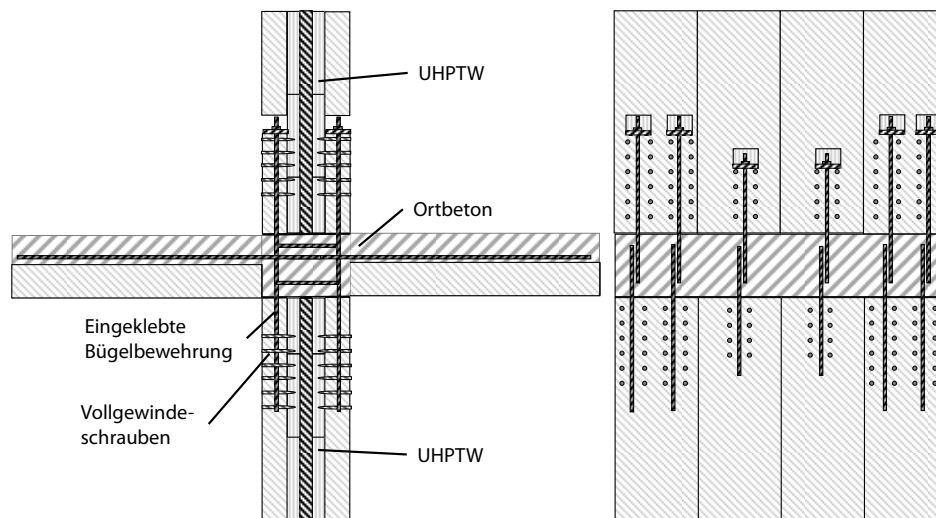
Auch in dieser Variante wird die Problematik des Querdruckes in der Decke durch den Betonkern behoben. Es muss eine hohe Genauigkeit bei der Planung und Ausführung der Löcher für die Gewindestangen gewährleistet sein. Eine Baustellenklebung ist aufgrund von externen Einflussparametern zu vermeiden und die gesteckte Variante zu bevorzugen. Hierbei könnte durch ein Verspannen auch ohne Verpressmörtel eine ausreichende vertikale Druckkraftübertragung über den Betonkern erfolgen (Sandtner 2016).

6.4.4 Anschluss mit Ortbeton

Beschreibung

Der Anschluss orientiert sich an der Betonbauweise. Die vertikale Druckkraft wird von dem Betonkern in den Ortbeton und von dort in den Betonkern der unteren Wand übertragen. Die Zug- und Schubkräfte werden durch eingeklebte beziehungsweise eingesteckte Bügelbewehrungen übertragen. Zur Vermeidung von Querkissen werden neben den Gewindestangen Vollgewindeschrauben angeordnet (vgl. Abbildung 63).

Abbildung 63:
Anschlussvariante mit Ortbeton



Montage

Die untere Wand wird mit bereits im Werk eingeklebter Bügelbewehrung aufgestellt. Anschließend wird die Holz-Beton-Verbunddecke gestellt. Diese kann entweder leicht auf der Wand aufliegen oder temporär auf eine an die Wand angeschraubten Holzbalken gelegt werden. Ebenfalls ist eine Ausführung als bereits fertiges HBV-Element oder eine komplette Ausführung mit Ortbeton denkbar. Im Anschlussbereich wird an die überstehende Bewehrung der HBV-Decken und die Bügelbewehrung der unteren Wand eine nach oben stehende Bügelbewehrung gewunden. Daraufhin wird der Anschlussbereich mit Ortbeton ausgegossen. Die obere Wand wird auf die Bügelbewehrung gesteckt und mit einer Mutter verspannt.

Beurteilung

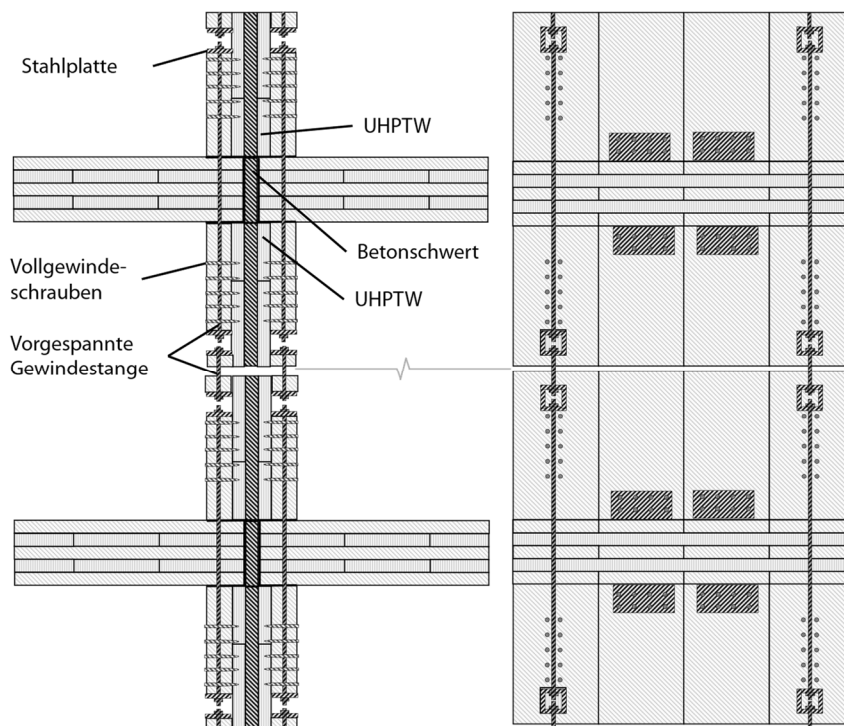
Durch den Ortbeton ist eine Querdruckbeanspruchung der Decke ausgeschlossen. Die Lastweiterleitung ist aber von der Betongüte des Ortbetons abhängig. Ebenfalls ist kritisch zu hinterfragen, ob die Bügel während des Betoniervorgangs die exakte Ausrichtung behalten und die obere Wand entsprechend einfach eingefädelt werden kann. Eine Lösung könnte eine Schablone sein, welche die Abstände fixiert. Hierbei muss sehr genau gearbeitet werden.

6.4.5 Anschluss mit Vorspannung

Beschreibung

Dieser Anschluss orientiert sich an den Anschluss mit Gewindestange. Die vertikale Lastübertragung erfolgt entweder über ein Betonschwert oder über einen weitergeführten Betonkern. Die Gewindestangen übernehmen die Zugkräfte. Durch eine Stahlplattenkonstruktion und Spannglieder im Plattenbereich werden alle übereinanderstehenden Wände gekoppelt. So wird die Zugkraft im Stahl weitergegeben (vgl. Abbildung 64). Über die Vorspannung kann die gesamte Wandkonstruktion steifer werden.

Abbildung 64:
Anschlussvariante mit Vorspannung



Montage

Die untere Wand kommt mit Löchern und Gewindestangen auf die Baustelle. Die Decke wird in die Gewindestangen aufgefädelt und auf die Wand aufgelegt. Die obere Wand wird in die Gewindestangen gefädelt und verspannt. Vor dem Vorspannen werden die Schrauben zur Querkzugverstärkung angebracht. Aufgrund der Verspannung wird davon ausgegangen, dass ohne Verpressmörtel eine ausreichende vertikale Druckkraftübertragung erfolgt (Sandtner 2016).

Beurteilung

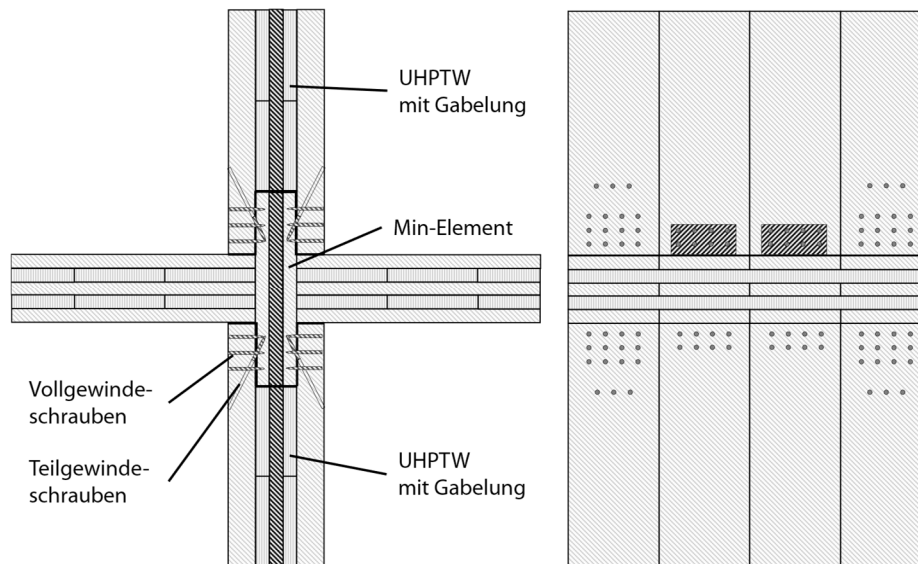
Aufgrund der hohen Anzahl an Gewindestangen und Knotenpunkte ist eine aufwändige Montage notwendig. Es muss eine hohe Genauigkeit bei der Planung und Ausführung der Löcher für die Gewindestangen sowohl in den Wänden als auch in der Decke gewährleistet sein.

6.4.6 Anschluss mit Mini-Element

Beschreibung

Die vertikale Lastübertragung der Drucklasten erfolgt über ein mittig eingestelltes UHPTW Element mit geringer Höhe, nachfolgend Mini-Element genannt (vgl. Abbildung 65). Die Zug- und Schubkräfte werden durch eine entsprechend angebrachte Verschraubung des Mini-Elementes mit dem Hauptelement sichergestellt. Hierzu sind bei den Hauptelementen die äußeren Holzlagen wie eine Gabelung überstehen zu lassen. Ein flächiger Kontakt wird durch schräg eingebrachte Teilgewindeschrauben sichergestellt. Für ein verbessertes Einbringen und eine größere wirksame Länge der Schrauben könnten Mini-Elemente vorgesehen werden, in welchen abschnittsweise kein Betonkern vorgesehen wird. In dem Mini-Element wird die Holzfaserrichtung entsprechend der Längslagen (äußeren Holzlagen) angeordnet, um eine maximale Kraftübertragung zu gewährleisten. Sind die Kräfte klein bzw. ist eine robotische Drehung der Querlagen im Auflagerbereich möglich, kann in der unteren Wand auch ein entsprechendes Gegenstück zur oberen Gabelung gefertigt werden. Dann kann auf die unteren metallischen Verbindungsmittel verzichtet werden. Die Verbindungsmittel werden entsprechend der Lasten angeordnet. In den Randbereichen eines Wandelementes sind somit mehr Schrauben anzuordnen, um die entstehenden Zugkräfte aufzunehmen. Für

Abbildung 65:
Anschlussvariante mit Mini-Element



Zuerst wird die untere Wand aufgestellt. Anschließend wird das Mini-Element eingebracht und verschraubt. Eine andere Option wäre diese bereits im Werk zu befestigen beziehungsweise entsprechend zu verkleben. Auf der Baustelle werden dann die Decken aufgelegt. Zuletzt wird die obere Wand auf das Mini-Element gestellt und durch Schrauben kraftschlüssig verbunden.

Der vertikale Kraftfluss erfolgt ohne eine Querdruk und Querkzugbeanspruchung der Decke. Neben Stahlschrauben sind keine weiteren metallischen Verbindungsmittel wie Gewindestangen oder Winkel notwendig. Ausgenommen sind hier die für den Schubeintrag der Decke notwendigen Stahlwinkel. Ebenfalls wird die Decke im Vergleich zu den anderen Varianten nur dem Schub der in diesem Geschoss entstehenden Schublasten beansprucht. Das Einbringen der Schrauben ist aufwändig. Wenn das Mini-Element und die untere Wand bereits im Werk verklebt werden können, halbiert sich die Montagezeit. Dies ist zu bevorzugen.

6.5.1 Gründe für Variantenwahl

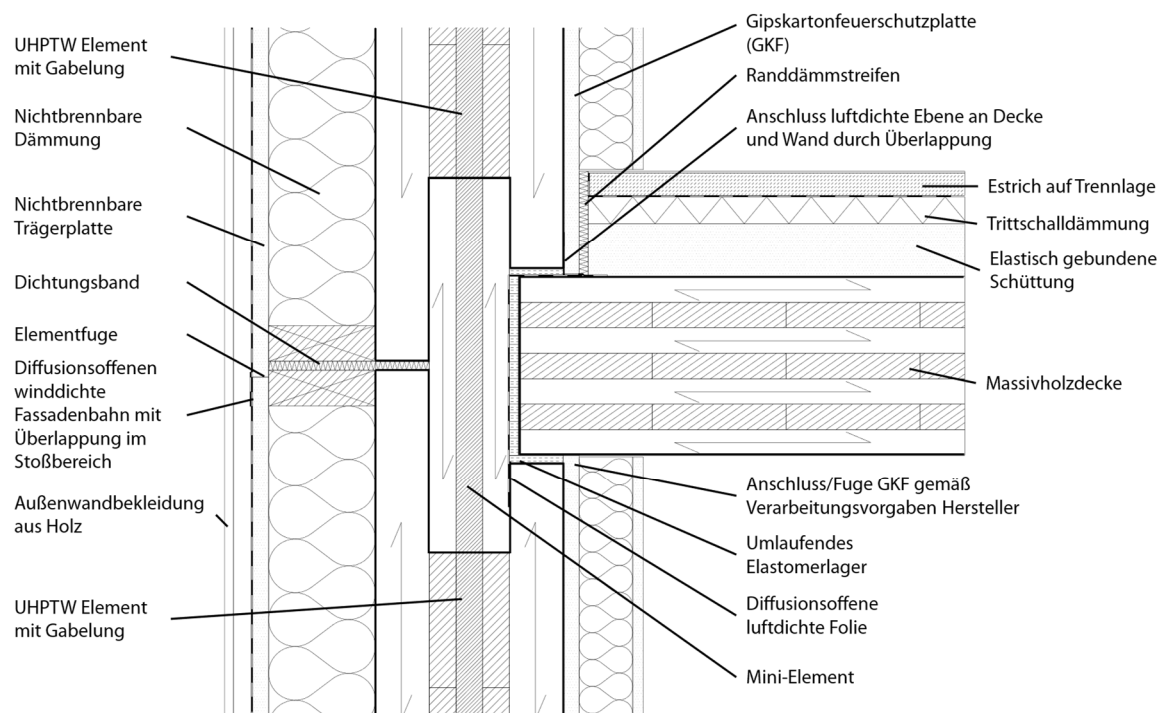
Im Weiteren wird nur der Anschluss mit einem Mini ultrahochfesten Verbundelement weiter ausgearbeitet. Der Anschluss ist flexibel einsetzbar und ermöglicht eine Lastweiterleitung ohne Querzug und -druck. Im Gegensatz zu den anderen Varianten sind hier die geringsten Auswirkungen auf den Bauablauf zu erwarten. Die Toleranzen reduzieren sich auf die Werksfertigung, da bis auf die Verschraubungen alles werkseitig gefertigt werden kann. Je nach Last kann die Anzahl der Verbindungsmittel angepasst werden. Durch die Weiterleitung der Schubbeanspruchung von oberer Wand über das Mini-Element in die untere Wand, wird die Beanspruchung der Decke reduziert. Dadurch müssen unterhalb der Decke keine Schubwinkel angebracht werden und die Anzahl kann halbiert werden. Die Anbringung der Schrauben ist individuell je nach

Belastungsgröße optimierbar und die Schrauben können für eine weitere Optimierung entsprechend dem Kraftfluss eingebracht werden.

6.5.2 Außenwandanschlussknoten

Abbildung 66 zeigt einen vollständigen Außenwandanschluss der Variante mit einem Mini-Element.

Abbildung 66:
Außenwandknoten Variante Mini-Element



Winterlicher Wärmeschutz

Der winterliche Wärmeschutz wird durch eine außenliegende Dämmebene sichergestellt. Bezüglich der Dimensionierung wird auf Kapitel 7 verwiesen. Die Luftdichtheit wird durch eine diffusionsoffene winddichte Fassadenbahn gewährleistet. Hierbei ist im Bereich der aus dem Bauablauf auftretenden Elementfugungen auf eine ausreichende Folienüberlappung zu achten.

Schallschutz

Bezüglich des Schallschutzes ist zwischen Trittschall und Luftschall zu unterscheiden. Der Trittschall wird durch eine im Deckenaufbau verbaute Trittschalldämmung gemindert. Die Trittschallübertragung von der Decke auf die Wand wird durch eingelegte Elastomerlager entkoppelt. Hierbei ist wichtig, dass der Fußbodenaufbau durch einen durchgehenden Randdämmstreifen von der Wandkonstruktion getrennt wird und die Beplankungen der Vorsatzschale keinen Kontakt zur Decke aufweisen. Auf das untere Elastomerlager könnte gegebenenfalls verzichtet werden, da die Gipskartonfeuerschutzplatte aus brandschutztechnischen Gründen entsprechend mit der Decke verbunden werden muss, somit ist die Wirkung des Lagers an dieser Stelle beschränkt. Der Luftschall kann vom Senderraum durch die obere Wand über den Anschluss in die untere Wand geleitet werden und von dort in den Empfängerraum. Es ist unklar wie groß diese Auswirkung ist, da es sich um einen Übertragungsweg mit Sprüngen in der Biegesteifigkeit und Materialität handelt. Die Übertragung kann durch eine entsprechende Vorsatzschale im Senderraum minimiert werden. Ebenfalls kann in Bereichen mit geringeren Lasten auch das Mini-Element mit Elastomerlagern umrandet werden. Dadurch könnte eine vollständige Entkopplung gewährleistet werden. Die exakten Auswirkungen sind mit Versuchen zu bestimmen.

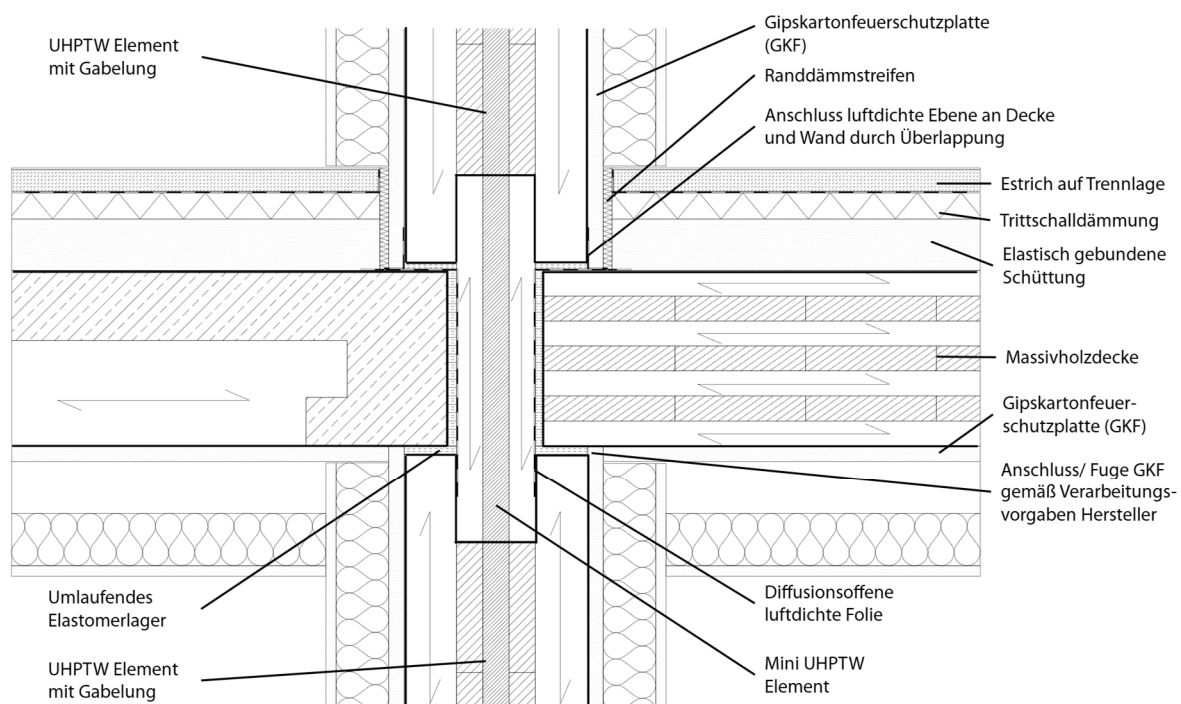
Brandschutz

Bei der Verwendung einer Holzfassade müssen die konstruktiven Regeln der MHolzBauRL 2022 berücksichtigt werden. Bei der dargestellten Außenwand wird eine nichtbrennbare Trägerplatte in Form einer 18 mm dicken Gipsfaserplatte verwendet. Innenseitig werden die Wände mit einer 18 mm dicken Gipskartonfeuerschutzplatte bekleidet. Dies entspricht der Notwendigkeit bei tragenden Bauteilen aus Massivholz in der Gebäudeklasse 4 und 5 im Fall einer sichtbaren Massivholzdecke (MHolzBauRL 2022). Beim Anschluss der GKF im Fugenbereich ist auf eine brandschutztechnisch wirksame Ausführung entsprechend der Herstellerangaben zu achten.

6.5.3 Innenwandanschlussknoten

In Abbildung 67 ist ein Innenwandknoten der Variante mit einem Mini-Element dargestellt.

Abbildung 67:
Innenwandknoten Variante Mini-Element



Schallschutz

Im Schallschutz sind die gleichen Prinzipien wie im Außenwandknoten zu beachten. Durch die abgehängte Decke wird der Schallschutz verbessert.

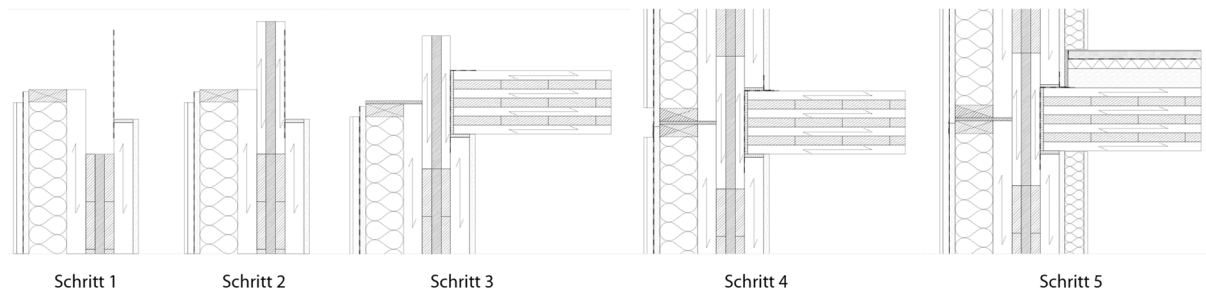
Brandschutz

Innenseitig werden die Wände wieder mit einer 18 mm dicken Gipskartonfeuerschutzplatte bekleidet. Da in diesem Fall eine abgehängte Decke mit einem Hohlraum ausgeführt wird, ist eine Bekleidung der Massivholzdecke empfohlen. Im Gegenzug könnten 25 % der Wandoberflächen brennbare Oberflächen aufweisen. (MHolzBauRL 2022) In der Stoßfuge der GKF im Anschlussbereich ist eine brandschutztechnisch korrekte Ausführung entsprechend der Herstellerangaben zu beachten.

6.5.4 Bauablauf

Der Bauablauf für den Außenwandknoten ist in Abbildung 68 dargestellt.

Abbildung 68:
Bauablauf für die Variante mit Mini-Element exemplarisch für den Außenwandanschluss



Schritt 1 + 2

In Schritt 1 wird eine UHPTW mit Gabelung aufgestellt. An dieser sind außenseitig die Dämmung und die Außenwandbekleidung angebracht. Ebenfalls ist innenseitig bereits eine Gipskartonfeuerschutzplatte angebracht. Als nächstes wird das Mini-Element in die Gabelung gesetzt und verschraubt (Schritt 2). Gegebenenfalls sind hier in der trockenen Fuge entsprechende Zwischenlagerungen einzubringen. Wie bereits erwähnt kann in Rahmen einer robotischen Fertigung auch das Mini-Element im Werk in der unteren Wand integriert und verklebt werden. Wichtig ist, dass die diffusionsoffene luftdichte Folie bereits verklebt ist. Wenn das Mini-Element nachträglich montiert wird, ist die Anordnung der Folie wie dargestellt. Andernfalls muss die Folie um die Ecke geführt und unter der innenseitigen Gipskartonfeuerschutzplatte verklebt werden.

Schritt 3

In diesem Schritt wird die Decke auf den Elastomerlagern aufgelegt. Die Decke kann mit einer Schraube lagegesichert werden. Die luftdichte Folie wird eingeklappt und auf der Decke verklebt.

Schritt 4

Als nächstes wird die aufgehende UHPTW eingehoben. In diesem Beispiel besitzt diese den gleichen Schichtaufbau wie die Untere. Wichtig ist, dass die luftdichte Folie für die Überlappung im Anschlussbereich bereits im Werk unter der Gipskartonfeuerschutzplatte verklebt wird. Nach dem Aufstellen kann die Wand mit Schrauben befestigt werden und die Folie zur Überlappung auf der Decke verklebt werden. Ebenfalls muss außenseitig die diffusionsoffene luftdichte Fassadenbahn mit einer Überlappung auf der von der unteren Wand aufgeklebt werden.

Schritt 5

Im letzten Schritt wird der Fußbodenaufbau bestehend aus mineralisch gebundener Schüttung, Trittschalldämmung, Estrich und Fußbodenbelag hergestellt. Ebenfalls wird die Holzfassade über den Anschlussbereich hinweg geschlossen. Individuell und je nach Anforderungen kann innenseitig einen Installationsebene oder Vorsatzschale für eine Verminderung der Schallübertragung angebracht werden.

6.6 Zwischenfazit

Bei einer tragenden und nichttragenden vertikalen Stoßfuge kann auf im Holzbau bewährte Verbindungsmittel zurückgegriffen werden. Mögliche Varianten sind metallische, aber auch hölzerne Verbindungsmittel.

Im Anschlussbereich ist aus Gründen des Bauablaufes die Plattformbauweise zu bevorzugen. Dabei sind Querdruck- und Querkzugspannungen in der Decke zu vermeiden. Dies ist durch eine Leitung der vertikalen Drucklasten im Betonkern oder durch Betoneinbauteile möglich. Eine Ausführung mit einem eingesetzten

mini ultrahochfesten Verbundelements zeigte sich am effektivsten. Dadurch können durch eine Schraubenverbindung die Lasten effizient übertragen werden. Aus bauphysikalischen Gründen ist auf eine richtige Ausführung der luftdichten Ebenen und der Elastomerlager zu achten. Die Ausbildung einer trockenen Verbundfuge durch eine Verspannung mit Teilgewindeschrauben ist praktisch zu überprüfen. Hierzu und für eine exakte schalltechnische Beurteilung sind Bauteilversuche notwendig.

7 Untersuchungen zur Hygrothermik

7.1 Hintergrund und Ziel

Um mögliche bauphysikalische Schwachstellen zu identifizieren und geeignete praxistaugliche baukonstruktive Vorschläge zu machen, wird neben dem Funktionsprinzip des Tragens auch das Funktionsprinzip des Einhüllens und folglich des Wärme- und Feuchteschutzes (Hygrothermik) betrachtet. Der Wärme- und Feuchteschutz ist in der Funktionalität jedoch nicht nur auf das Einhüllen beschränkt, sondern umfasst daneben die Dauerhaftigkeit der Bausubstanz und garantiert eine Nutzung der Räumlichkeiten (Fouad 2013).

In Deutschland ist aufgrund der klimatischen Bedingungen sowohl der sommerliche als auch der winterliche Wärmeschutz zu berücksichtigen. Anforderungen an den sommerlichen und winterlichen Wärmeschutz ergeben sich aus dem Gebäudeenergiegesetz (GEG). Um Aussagen über den sommerlichen Wärmeschutz treffen zu können, sind Daten zu Fensterflächen, Raumgrößen und – orientierung notwendig. Im vorliegenden Bericht wird eine Bauteilstudie durchgeführt und deshalb der Fokus auf den winterlichen Wärmeschutz gelegt. Der winterliche Wärmeschutz wird durch den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) definiert. Für Außenwände wird ein Grenzwert von $U \leq 0,24 \frac{W}{m^2K}$ festgelegt (GEG). Für Neubauten von Bundesgebäuden wird der Grenzwert auf $U \leq 0,18 \frac{W}{m^2K}$ im Sinne der Vorbildfunktion des Bundes gesenkt (BBSR 2021). Zur Erreichung eines Passivhausstandards nach Passivhaus Institut ist ein $U \leq 0,15 \frac{W}{m^2K}$ für opake Außenbauteile notwendig (PHI 2015). Alle Grenzwerte verfolgen das Ziel den Heizenergiebedarf zu reduzieren. Das Forschungsprojekt nimmt als Grenzwerte $U \leq 0,20 \frac{W}{m^2K}$ an. Dieser Wert hält die rechtliche bindende Bedingung des Gebäudeenergiegesetzes ein. Der gewählte Grenzwert ist in etwa der Mittelwert der gesetzlichen Anforderung und des Passivhausstandards. Somit wird durch das Einhalten des Grenzwertes der Heizenergiebedarf erheblich reduziert und dennoch ökonomisch sinnvolle Bauteilaufbauten ermöglicht.

Um eine Dauerhaftigkeit des Bauteils zu gewährleisten sind im Bereich des Feuchteschutzes das Schimmelpilzwachstum an der Bauteiloberfläche (Anforderungen in DIN 4108-2), sowie der Tauwasserausfall im Bauteilinneren (Anforderungen in DIN 4108-3) zu verhindern (Fouad 2013). Bezüglich des Schimmelpilzwachstums werden zusätzlich aktuelle Erkenntnisse hinsichtlich der minimalen Wachstumsvoraussetzungen in Abhängigkeit der relativen Feuchte und Temperatur herangezogen (Sedlbauer 2001). Infolgedessen werden bereits mögliche Schimmelpilzbildungen ab relativen Feuchten $\geq 75\%$ berücksichtigt. Hinsichtlich des Tauwasserausfalls im Bauteilinneren muss das Diffusionsvermögen und der Temperaturverlauf im Bauteil berücksichtigt werden. Um Schäden zu verhindern, muss das anfallende Tauwasser in der Verdunstungsperiode vollständig austrocknen können. Ebenso dürfen bestimmte Grenzwerte des massebezogenen Feuchtegehaltes nicht überschritten werden. Für Holzwerkstoffe ist ein Grenzwert der Holzfeuchte von $u \leq 20 M - \%$ nicht zu überschreiten um Bauschäden zu vermeiden (DIN 68800-2). Insbesondere die dichte Struktur des ultrahochfesten Betons und dessen Auswirkungen auf das Diffusionsverhalten sind hierbei zu berücksichtigen. Ein konvektiver Wasserdampftransport ist durch die luftdichte Gebäudehülle ausgeschlossen (Fouad 2013). Die Luftdichtheit wird durch eine geschlossene Oberfläche des Brettsperrholzes (durchgängige Platte, Schmalseitenverklebung) und einer sorgfältigen Ausführung der Fugen mit Kompressionsbändern, Folien und Dichtungsschläuchen erreicht (siehe Kapitel 6).

Neben den Herausforderungen in den Regelbereichen sind geometrische- und materialbedingte Wärmebrücken zu berücksichtigen. Materialbedingte Wärmebrücken resultieren aus unterschiedlichen Materialeigenschaften innerhalb eines Bauteils. Geometriebedingte Wärmebrücken entstehen beispielsweise in Außenecken durch das unterschiedliche Verhältnis von innen zu Außenoberfläche. Die Auswirkungen auf den Jahres-Heizwärmebedarf durch konstruktive Wärmebrücken muss entsprechend der anerkannten Regeln der Technik so gering wie möglich sein (GEG). Zusätzlich sind analog zum Regelbereich die gleichen Untersuchungen bezüglich Schimmelpilzbildung und Tauwasserausfall notwendig.

7.2 Untersuchungsgegenstand

7.2.1 Materialdaten

Die für eine hygrothermische Betrachtung notwendigen Materialdaten sind in Tabelle 12 für die Materialien Holz, Brettsperrholz, Beton und ultrahochfesten Beton zusammengefasst. Die Materialdaten variieren in Abhängigkeit der Rohdichte. Es gilt je geringer die Rohdichte, desto geringer die Wärmeleitfähigkeit und der Wasserdampfdiffusionswiderstand. Zusätzlich sind die Materialparameter temperatur- und feuchteabhängig.

Für Holz und Holzwerkstoffe steigt die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Wassergehalt und steigender Temperatur an. Die Variation in Abhängigkeit der Feuchte ist größer als die in Abhängigkeit der Temperatur. Außerdem ist die Wärmeleitfähigkeit von Holz längs der Faser in etwa doppelt so groß wie quer zur Faser. Die spezifische Wärmekapazität von Holz und Holzwerkstoffen ist ebenfalls von der Holzfeuchte abhängig. Eine Zunahme erfolgt mit steigendem Feuchtegehalt aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität von Wasser. Die Rohdichte besitzt hier keinen signifikanten Einfluss. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand von Holz und Holzwerkstoffen nimmt mit steigender Holzfeuchte ab und ist tangential größer als longitudinal. (Niemz und Sonderegger 2021)

Die Wärmeleitfähigkeit von Beton ist neben der Rohdichte von dem Feuchtegehalt, dem Betonzuschlag, der Mischungszusammenstellung und der Zementart abhängig (Schneider 1982; Weigler und Karl 1989).

Tabelle 12:

Notwendige Materialdaten für die hygrothermische Betrachtung der Materialien Holz, Brettsperrholz, Beton und ultrahochfestem Beton unter Normaltemperatur

Materialkennwerte	Holz	Brettsperrholz	Beton	UHPC
Rohdichte $\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	450-700	300-1000	1800-2400	2500
Spezifische Wärmekapazität $c_p \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$	1600	1600	1000	1200
Bemessungs-wärmeleitfähigkeit $\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,12-0,18	0,09-0,24	1,15-2,50	3,00
Wasserdampf-diffusionswiderstand $\mu [-]$	20-200	50-250	60-130	1693-1921
Porosität [-]	0,55-0,70	0,55-0,70	0,15-0,22	0,039-0,06
Quellen	(DIN 10456; EN 14056; ISO 14056; Niemi und Sonderegger 2021)	(DIN 10456; EN 14056; ISO 14056; Niemi und Sonderegger 2021)	(DIN 10456; EN 14056; ISO 14056; Fraunhofer Institut für Bauphysik 2023b)	(Sudholt-Wasemann 2023; Wolf 2016; Fehling et al. 2005)

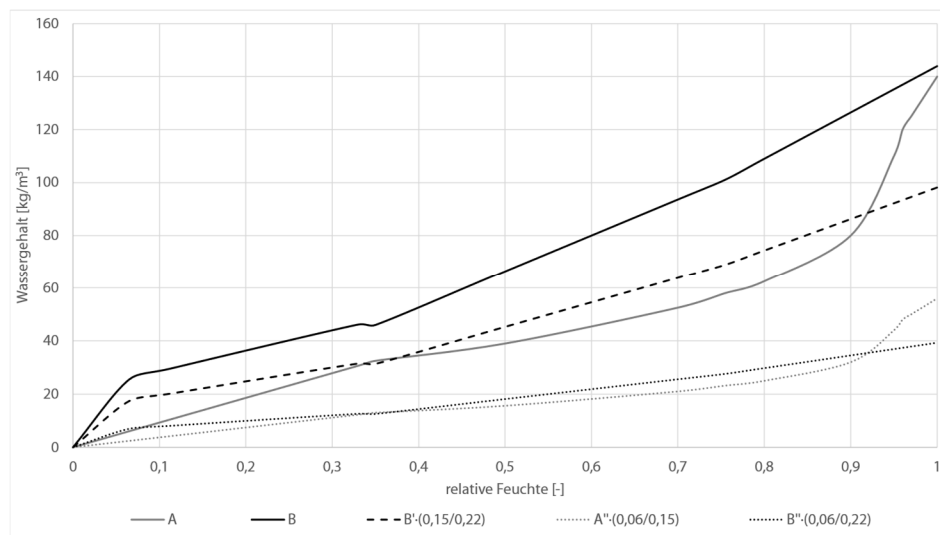
Die hohe Wärmeleitfähigkeit des ultrahochfesten Betons ist dem Datenblatt des Nanodur 5941 entnommen (Sudholt-Wasemann 2023). Dies ist auf das dichtere Gefüge im Vergleich zu Normalbeton zurückzuführen (Weigler und Karl 1989). Untersuchungen von Wolf (2016) zeigen widersprüchliche Ergebnisse. Dabei wurden

Wärmeleitfähigkeiten von ultrahochfestem Betonen zwischen $\lambda = 1,19 - 1,64 \frac{W}{m \cdot K}$ gemessen. Als Begründung werden der geringere Gesteinskörnungsanteil und die überwiegend verschlossenen Mesoporensysteme genannt. Ein weiterer Grund für den Unterschied kann das Vorhandensein von Stahlfasern in der Testmischung von Sudholt-Wasemann (2023) sein. Die niedrigere Wärmekapazität im Vergleich zu Normalbetonen ist auf den geringeren Wassergehalt zurückzuführen (Schneider 1982).

Die Wasserdampfdiffusionszahl ist bei ultrahochfesten Betonen aufgrund des dichteren Gefüges und des schlecht vernetzten Gesamtporensystems erheblich höher als bei Normalbetonen. Gemessene Werte liegen im Wertebereich zwischen $\mu = 1693$ und $\mu = 1921$. (Wolf 2016) Die Betonschicht ist somit bei einer Dicke von 0,04 m als diffusionshemmend und ab einer Dicke von 0,08 m als diffusionssperrend einzuordnen (DIN 4108-3).

Aufgrund der geringen Auswirkungen von Feuchte und Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität von Betonen werden diese für den ultrahochfesten Beton als konstant angenommen. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl wird konservativ als konstant über die Temperatur und Zeit angenommen. Ein Abfall mit steigender relativer Feuchte kann zu unsicheren Ergebnissen führen. Der Anstieg der Feuchtespeicherung mit steigender relativer Feuchte wird entsprechend dem Verhältnis der Porosität berücksichtigt. Dieser Ansatz stützt sich auf der Annahme, dass die Wasseraufnahme zum einen von Oberflächenkräften an den Porenwänden und zum anderen von benetzbaren Kapillarporen abhängt (Krus M. 1996). Ein Vergleich von Betonen mit bekannten Feuchtespeicherfunktionen zeigt, dass dies als überschlägige Annahme zu zufriedenstellenden Ergebnissen führt (siehe Abbildung 69). Als Vergleich wird ein Beton mit einer Porosität von 0,15 (Beton A) und ein Beton mit einer Porosität von 0,22 (Beton B) herangezogen. Für den UHPC wird eine Porosität von 0,06 angenommen. Entsprechend der Porenverhältnisse werden die Feuchtespeicherfunktionen multipliziert. Es ist zu erkennen, dass bei einer Multiplikation des Betons B mit dem Verhältnis Porenanteil Beton A zu Porenanteil Beton B die Werte sich der Feuchtespeicherfunktion des Betons A annähern ($B' \approx A$). Es ergeben sich ähnliche Werte für beide Betone bei einer Multiplikation mit dem Porenanteil des UHPCs im Vergleich zu dem jeweiligen Porenanteil ($A'' \approx B'' \approx \text{UHPC}$).

Abbildung 69:
Herleitung der angenommenen Feuchtespeicherfunktion für UHPC



7.2.2 Regelement

Für die hygrothermische Betrachtung werden die im Rahmen der Ökobilanzierung ermittelten Wandaufbauten herangezogen. Mithilfe einer stationären Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten und dessen Beschränkung auf $U \leq 0,20 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ wird die jeweils benötigte außenliegende Dämmschichtdicke berechnet. Hierbei wird eine in Wärmedämmverbundsystemen standardmäßig eingesetzte Mineralwolle angesetzt. Durch die Betrachtung eines vorangestellten Wärmedämmverbundsystems wird die generelle Verwendbarkeit und das Funktionsprinzip ausreichend untersucht. Die Ergebnisse erlauben Rückschlüsse auf alternative Vorhangfassaden. Die Aufbauten und die berechneten stationären U-Werte sind Tabelle 13 zu entnehmen. Die Varianten 2 und 3 besitzen bei einer Dämmschichtdicke von 100 mm einen stationären U-Wert von $U \approx 0,206 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ und liegen somit über dem zuvor definierten Grenzwert. Deshalb wird, um die Variantenanzahl zu beschränken, eine einheitliche Außendämmung von 120 mm angenommen.

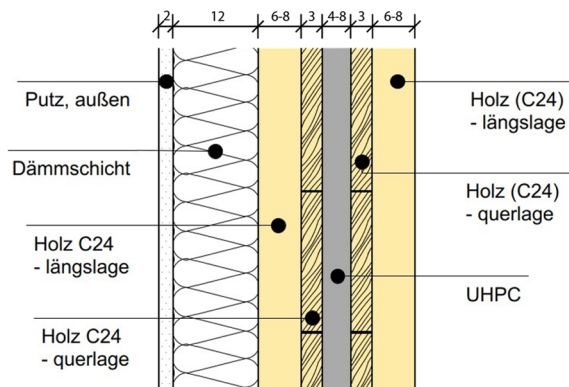
Tabelle 13:

Zusammenstellung der unterschiedlichen Varianten sowie die berechneten stationären Wärmedurchgangskoeffizienten

	Material	Bemessungs- wärmeleitfähigkeit $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	Variante 1 [mm]	Variante 2 [mm]	Variante 3 [mm]
Schicht 1:	Holz	0,13	60	80	80
Schicht 2:	Holz	0,13	30	30	30
Schicht 3:	UHPC	3,00	40	40	80
Schicht 4:	Holz	0,13	30	30	30
Schicht 5:	Holz	0,13	60	80	80
Schicht 6:	Dämmung	0,035	120	120	120
Schicht 7:	Putz	0,80	10	10	10
Gesamtdicke			350	390	430
U-Wert ohne Dämmung $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$			<u>0,593</u>	<u>0,501</u>	<u>0,498</u>
U-Wert mit Dämmung $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$			0,195	0,184	0,184

Für eine vollständige Betrachtung wird eine außenliegende Putzebene in die Berechnungen integriert. Ebenfalls werden innenseitig die in der Gebäudeklasse 5 die maximal notwendigen brandschutztechnischen Bekleidungen mitbetrachtet. Bei der Ermittlung der Dämmschichtdicken werden diese vernachlässigt, da in Ausnahmefällen auf die brandschutztechnisch notwendige Bekleidung verzichtet werden kann. Die betrachteten Regelemente sind in Abbildung 70 dargestellt.

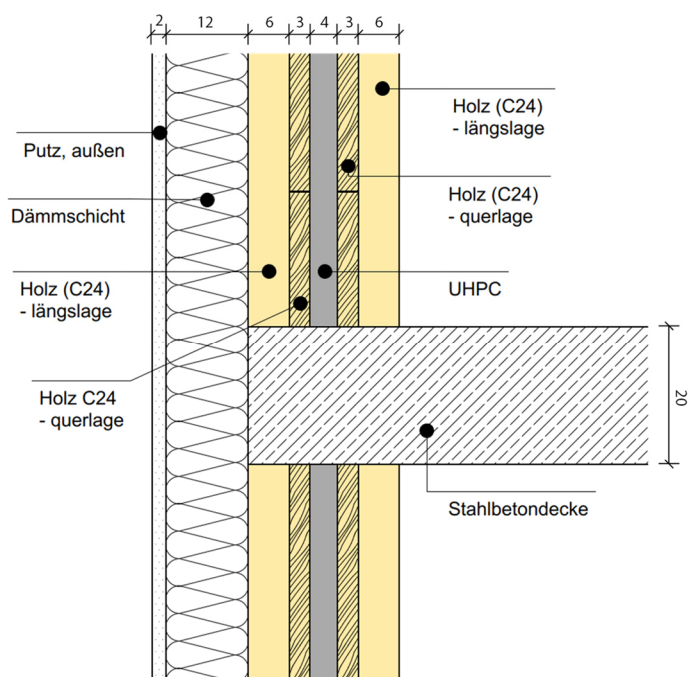
Abbildung 70:
Betrachtetes Regelement mit den Abmessungsbereichen für alle untersuchten Varianten



7.2.3 Anschlussbereich

Aufbauend auf den Untersuchungen des Regelementes wird ein Wand-Decke-Wand Anschluss betrachtet. Wie im Kapitel 6.2 erläutert wird für den vereinfachten Baufortschritt und den einfacheren Detailpunkten eine Plattformbauweise bevorzugt. Übliche Deckenkonstruktionen im modernen Hochhausbau sind Massivholz-, Holz-Beton-Verbund und Stahlbetondecken. Dabei weisen materialbedingt Decken aus Stahlbeton die höchste Wärmeleitfähigkeit auf. Für die Untersuchung der maximalen Wärmebrücke wird im Folgenden eine Stahlbetondecke angesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass die ermittelte notwendige Dämmebene über den Anschlussbereich weitergezogen wird. Der untersuchte Aufbau ist in Abbildung 71 dargestellt.

Abbildung 71:
Darstellung des hygrothermisch untersuchten Anschlussbereiches



7.3 Methodik

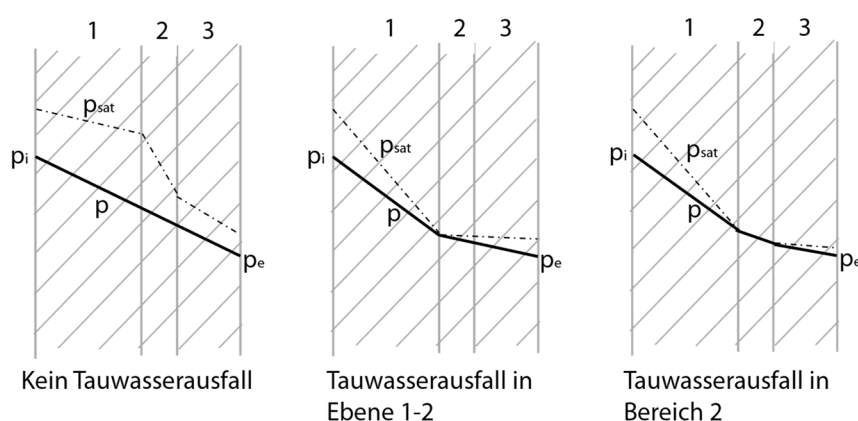
7.3.1 Regelement

Das Regelement wird sowohl stationär mithilfe des Glaserverfahrens als auch instationär durch Simulationen untersucht. Das Glaserverfahren (Periodenbilanzverfahren) beschränkt sich auf die Überprüfung des Tauwasserausfalls im Bauteilinneren. Darüber hinaus ermittelt die Simulation mithilfe der von Sedlbauer (2001) entwickelten Isophletenkurven, ob eine Schimmelpilzbildung an der Bauteiloberfläche zu erwarten ist. Dadurch wird eine umfassende Beurteilung ermöglicht.

Mithilfe des Glaserverfahrens kann sowohl die Tauperiode als auch die Verdunstungsperiode betrachtet werden. Eine Betrachtung der Verdunstungsperiode wird lediglich notwendig, wenn in der Tauperiode Tauwasser im Bauteilinneren ausfällt. Für die Überprüfung eines Tauwasserausfalles wird die tatsächliche Wasserdampfdruckverteilung (p) mit der Sättigungsdampfdruckverteilung (p_{sat}) verglichen. Liegt die tatsächliche Wasserdampfdruckverteilung durchgehend unterhalb der Sättigungsdampfdruckverteilung fällt kein Tauwasser an. Berühren oder überlagern sich die Verteilungen, so fällt in diesem Punkt beziehungsweise Bereich Tauwasser aus. Meist wird eine grafische Darstellung über die Bauteilebene erstellt (vgl. Abbildung 72)

Abbildung 72:

Grafische Darstellung eines Bauteils mit 3 Ebenen und drei Fällen der Wasserdampfdruckverteilung (p) mit dem entsprechenden raumseitigen Dampfdruck (p_i) und dem außenseitigen Dampfdruck (p_e) und möglichen Sättigungsdampfdruckverteilungen (p_{sat})



Die DIN 4108-3 legt die anzunehmenden Randbedingungen für die Tau- und Verdunstungsperiode fest. Ebenfalls werden für das Periodenbilanzverfahren Anwendungsgrenzen festgelegt. Zum Beispiel ist eine Anwendung bei erdberührten Bauteilen und Bauteilen zu unbeheizten Nebenräumen nicht möglich. Für eine außen gedämmte Wandkonstruktion ist das Verfahren anwendbar. Die anzusetzenden Randbedingungen für die stationäre Untersuchung mithilfe des Periodenbilanzverfahrens in der Tauperiode sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14:

Randbedingungen des Periodenbilanzverfahrens nach DIN 4108-3

	Innenklima	Außenklima
Temperatur [°C]	20	-5
Relative Luftfeuchte [%]	50	80
Wasserdampfdruck [Pa]	1168	321

Da es sich um einen geklebten Querschnitt handelt werden die Klebeschichten zwischen den einzelnen Schichten mitberücksichtigt. Die entsprechenden Materialdaten sind in Tabelle 15 aufgelistet.

Tabelle 15:
Materialdaten für die hygrothermische Untersuchung von Polyurethanklebstoff nach Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP (2023b)

Materialdaten	Polyurethanklebstoff
Rohdichte [kg/m ³]	1200
Spezifische Wärmekapazität [J/kgK]	1800
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	0,25
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]	6000

Für eine instationäre Simulation wird als Standort Holzkirchen mit einer Westausrichtung gewählt. Diese Orientierung und Klima führen zu den feuchtetechnisch maßgebendsten Randbedingungen. Da es sich bei der Anwendung von UHPTW aufgrund des erhöhten vertikalen Lastabtrags um eine primäre Anwendung in stark belasteten Bereichen von hohen Gebäuden handelt, wird für die Positionierung der untere Bereich eines hohen Gebäudes gewählt. Die Simulation beginnt am 1. Oktober für eine Worst-Case Betrachtung wird der Simulationszeitraum auf drei Jahre festgelegt. (Silva Padilla 2023) Ein Auszug der Simulationsparameter ist in Tabelle 16 zusammengefasst. Die numerische Elementanzahl im Bauteil beträgt 100 Stück.

Tabelle 16:
Simulationsparameter für eine eindimensionale hygrothermische Simulation

Simulationsparameter	Wert	Einheit
Wärmeübergangswiderstand außen R_{se}	0,0588	$\frac{m^2 K}{W}$
Wärmeübergangswiderstand außen R_{si}	0,125	$\frac{m^2 K}{W}$
Regenwasseraufnahmekoeffizient mit Putz	0	-
Regenwasseraufnahmekoeffizient ohne Putz	0,7	-
Kurzwellige Strahlungsabsorption mit Putz	0,2	-
Kurzwellige Strahlungsabsorption ohne Putz	0,4	-
Terrestrischer kurzwelliger Reflexionsgrad	0,2	-
Relative Anfangsfeuchte Bauteilschichten	80	%
Anfangstemperatur Bauteilschichten	20	°C
Berechnungsdauer	3	Jahre

Simulationsparameter	Wert	Einheit
Startzeitpunkt	01.Oktober	Datum
Schrittweite	1	Stunden

Ein Abbau durch holzerstörende Pilze findet nach WTA 6-8 bei Massivholzprodukten nicht statt solange die relative Porenluftfeuchte abhängig von der Temperatur unter 95 % bei 0 °C und 86 % bei 30 °C bleibt. Zwischen den Werten wird linear interpoliert. Ein im Simulationsprogramm berücksichtigtes Verfahren sind die LIM_{Bau} Isoplethen Kurven. Das Verfahren gibt zwei Grenzkurven in Abhängigkeit des Substrates an, welches auf Schimmelpilzbildung untersucht wird. Die Grenzkurve LIM_{Bau-I} ist für biologisch verwertbare Substrate und die Grenzkurve LIM_{Bau-II} für Substrate mit porigem Gefüge, in welche Holz eingeordnet wird. Die Kurven beschreiben, ab welcher relativen Luftfeuchte in Abhängigkeit von der Temperatur eine Sporenauskeimung bzw. ein Myzelwachstum auf dem jeweiligen Substrat zu erwarten ist. Liegen die gemessenen bzw. simulierten Werte unterhalb dieser Kurven ist von keiner Schimmelpilzbildung auszugehen. (Sedlbauer 2001)

7.3.2 Anschlussbereich

In der DIN 4108 Beiblatt 2 werden zahlreiche Anschlussdetails einer Wärmebrückenkategorie zugeordnet. Bei einem Anschluss der Kategorie A darf mit einem pauschalen Wärmebrückenzuschlag von $\Delta U_{WB} = 0,05 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ und bei einem Anschluss der Kategorie B mit $\Delta U_{WB} = 0,03 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ gerechnet werden (DIN V 18599-2). Hinzu kommt, dass bei Anschlussdetails nach DIN 4108 Beiblatt 2 der Nachweis der Schimmelpilzfreiheit entfällt (Holzabsatzfonds 2008).

Neben der vereinfachten Betrachtung der Wärmebrücken nach Norm wird eine zweidimensionale hygrothermische Simulation des Anschlusspunktes durchgeführt. Die Simulationsparameter entsprechen denen des Regelbereichs. Bei dem numerischen Gitter wird eine minimale Elementzahl von 2 und eine maximale Elementzahl von 70 je Bauteil in x und y Richtung festgelegt. Überprüft werden die Bauteilfeuchten, ein möglicher Tauwasserausfall sowie das Schimmelpilzrisiko an der Bauteilinnenseite.

7.4 Ergebnisse der Untersuchungen im Regelement

Bei der Auswertung des Glaserverfahrens wird sich exemplarisch auf die Variante 1 beschränkt (vgl. 7.2.2). Diese wird einmal mit Dämmebene (Variante 1) und einmal ohne Dämmebene (Variante 1E) betrachtet. Aufgrund des geringsten Holzanteils sind hier die Bauteiltemperaturen am geringsten und somit ausschlaggebend. In der Tabelle 17 sind die Aufbauten und die entsprechenden s_d -Werte und Sättigungsdampfdruckverteilungen angegeben.

Tabelle 17:
 s_d -Wert und Sättigungsdampfdruckverlauf der einzelnen Schichten der betrachteten Varianten 1 und 1E

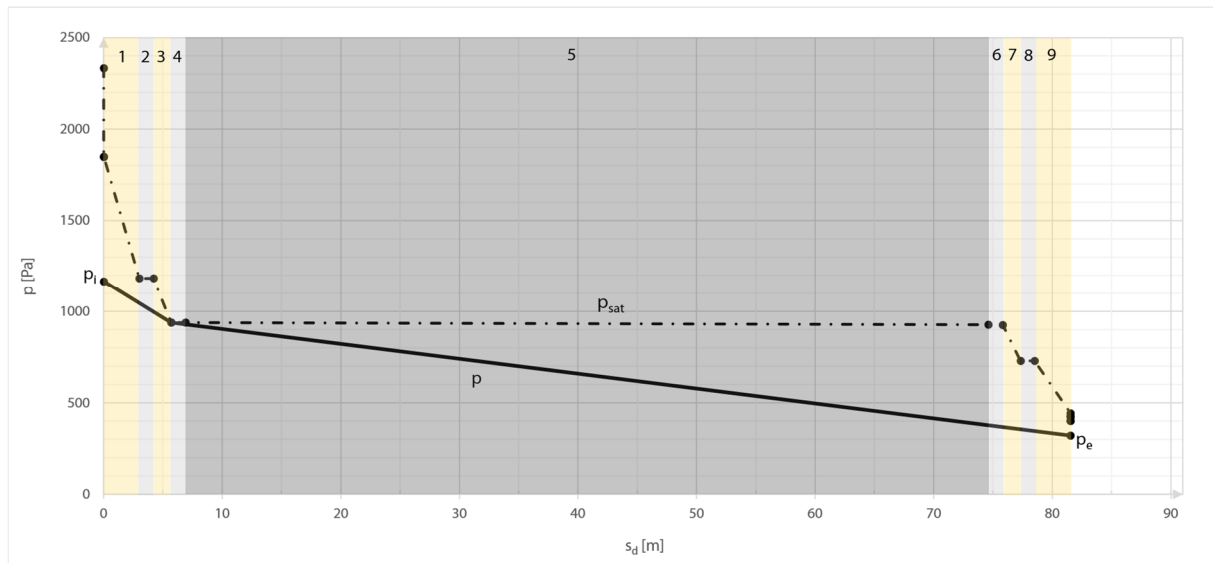
Schicht-Nr.	Material	Variante 1			Variante 1E (nur UHPTW Element)		
		d [mm]	s_d [m]	p_{sat} [Pa]	d [mm]	s_d [m]	p_{sat} [Pa]
0	Wärmeübergang			2332,60			2332,60
1	Holz	60	3,00	2162,53	60	3,00	1849,75
2	Klebstoff	0,02	1,20	1876,97	0,02	1,20	1184,17

Schicht-Nr.	Material	Variante 1			Variante 1E (nur UHPTW Element)		
		d [mm]	s_d [m]	p_{sat} [Pa]	d [mm]	s_d [m]	p_{sat} [Pa]
3	Holz	30	1,50	1876,50	30	1,50	1183,23
4	Kleber	0,02	1,20	1747,04	0,02	1,20	938,82
5	UHPC	40	67,77	1746,60	40	67,77	938,06
6	Kleber	0,02	1,20	1739,78	0,02	1,20	926,14
7	Holz	30	1,50	1739,34	30	1,50	925,38
8	Kleber	0,02	1,20	1618,27	0,02	1,20	729,26
9	Holz	60	3,00	1617,86	60	3,00	728,65
10	Dämmung	120	8,40	1397,45	–	–	411,16
11	Putz	1	0,10	411,16	–	–	–
12	Wärmeübergang			409,02			409,02
				401,74			401,74

Die grafischen Ergebnisse des Periodenbilanzverfahrens sind in Abbildung 73 für die Variante 1E und in Abbildung 74 für die Variante 1 mit außenliegender Dämmebene dargestellt. Bei der Untersuchung des reinen ultrahochfesten Wandelements ist ein Tauwasserausfall an der innenseitig liegenden Kontaktfläche zwischen ultrahochfesten Beton und Holz Querlage festzustellen. Ebenfalls ist zu erkennen, dass die dünnen Klebeschichten aufgrund des hohen Wasserdampfdiffusionswiderstandes einen nicht zu vernachlässigen s_d -Wert besitzen. Den größten Beitrag zum s_d -Wert besitzt der ultrahochfeste Beton aufgrund des hohen Wasserdampfdiffusionswiderstandes und in Kombination mit der großen Bauteildicke.

Abbildung 73:

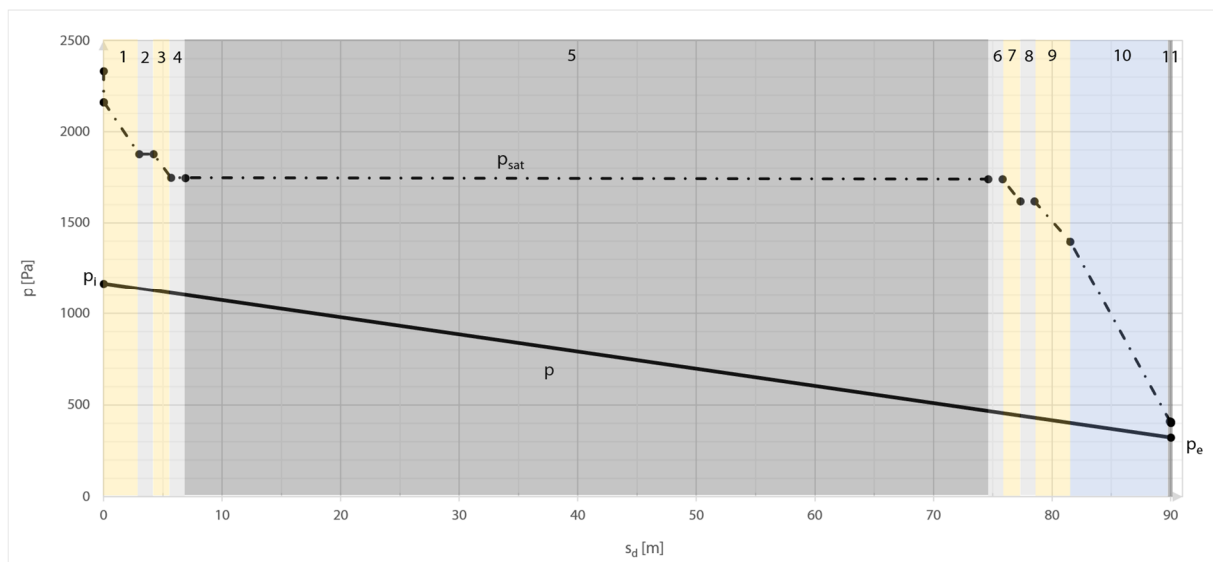
Grafische Darstellung der Partialdampfdruckverteilung (p) und der Sättigungsdampfdruckverteilung (p_{sat}) der Variante 1E mit Nummerierung und schematischer Darstellung der Schichten



Durch das Aufbringen einer Dämmebene wird einerseits der geforderte Wärmedurchgangskoeffizient eingehalten und gleichzeitig ein Tauwasserausfall verhindert. Die Dämmebene sorgt für einen Temperaturerhöhung im Bauteil und dadurch steigt der Sättigungsdampfdruck.

Abbildung 74:

Grafische Darstellung der Partialdampfdruckverteilung (p) und der Sättigungsdampfdruckverteilung (p_{sat}) der Variante 1 mit Nummerierung und schematischer Darstellung der Schichten

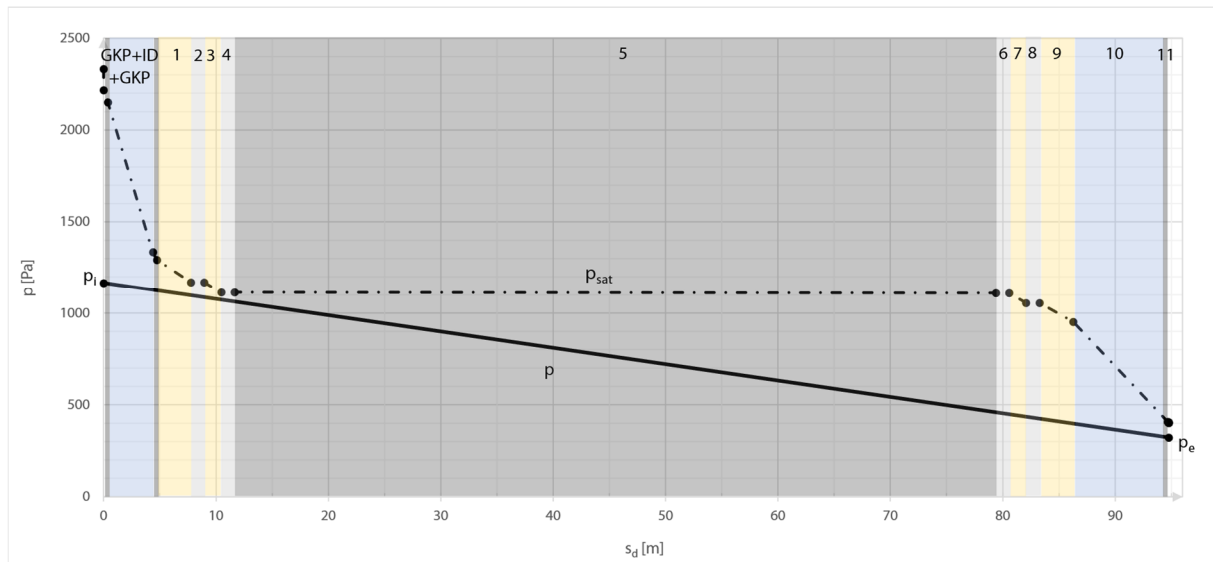


In einer abschließenden Untersuchung wird zur Variante 1 eine innenliegende gedämmte Installationsebene mit Gipskartonplatten an beiden Seiten der gedämmten Installationsebene (GKP+ID+GKP) hinzugefügt. Dadurch wird ein Worst-Case Szenario abgebildet. Durch die innenliegende Dämmung sinkt die Temperatur im Bauteil schneller ab und dadurch auch der Sättigungsdampfdruck. Die Gipskartonplatte ermöglichen eine Anwendung als abweichend feuerbeständige tragende Außenwand nach MHolzBauRL 2022. Die Abbildung 75 beinhaltet die Ergebnisse des Periodenbilanzverfahrens mit einer Innenliegenden Dämmung mit einer

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$ und einer Schichtdicke von 0,08 m. Die Schichtdicken der beiden Gipskartonplatten betragen auf der sicheren Seite liegend jeweils 0,036 m.

Abbildung 75:

Grafische Darstellung der Partialdampfdruckverteilung (p) und der Sättigungsdampfdruckverteilung (p_{sat}) der Variante 1 mit Innendämmung und Gipskartonplatten sowie Nummerierung und schematischer Darstellung der Schichten

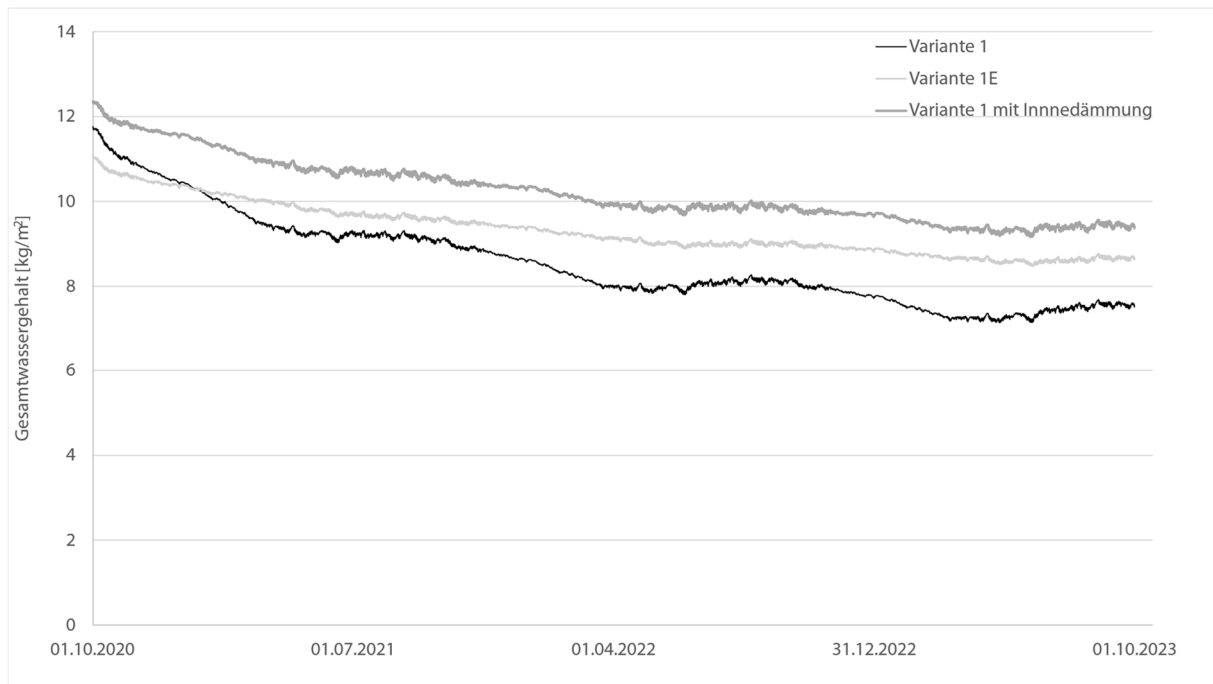


Als Ergebnis des Periodenbilanzverfahrens ist festzuhalten, dass mit einer ausreichenden Außendämmung keine Gefahr eines Tauwasserausfalls in der Konstruktion besteht. Ebenfalls ist bei den gegebenen Randbedingungen ein Anbringen einer innenliegenden Dämmung von bis zu 0,08 m möglich. Konstruktionen mit Innendämmung sollten jedoch mit einer numerischen Simulation überprüft werden.

Die Ergebnisse der Simulation für die Variante 1 und Variante 1E werden exemplarisch dargestellt. Die Ergebnisse der anderen Varianten sind von den grundlegenden Aussagen gleich und befinden sich in der Anlage 5. Die Simulation wurde mithilfe der Software WUFI Pro durchgeführt (Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP 2023b)). In Abbildung 76 ist der Gesamtwassergehalt der Varianten über den Untersuchungszeitraum von drei Jahren dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Wassergehalt bei allen Ausführungen kontinuierlich abnimmt. Die Abnahme bei der Variante 1 erfolgt schneller und liegt bis auf den Anfangsbereich über der Variante 1E. Den höchsten Gesamtwassergehalt verzeichnet die Variante 1 mit Innendämmung.

Abbildung 76:

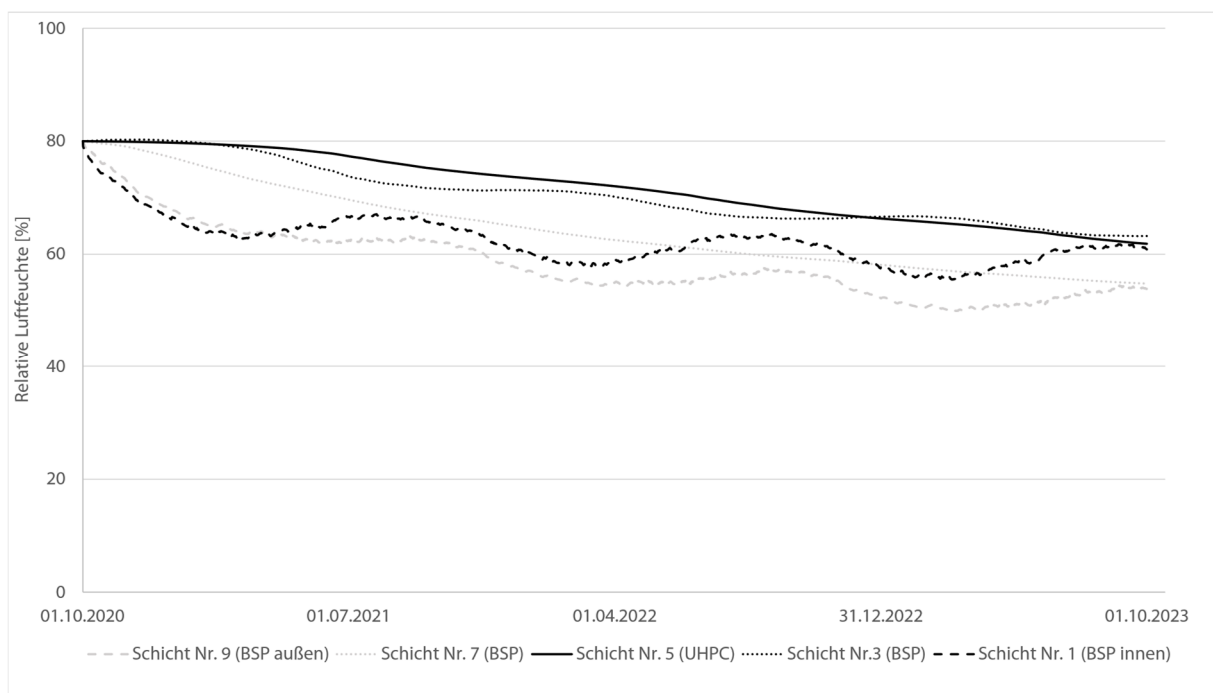
Gesamtwassergehalt der Variante 1, Variante 1E und Variante 1 mit Innendämmung über einen Simulationszeitraum von 3 Jahren



Die relative Luftfeuchte in den einzelnen Schichten des Konstruktionsaufbaus nimmt über den Simulationszeitraum ebenfalls ab. In den äußeren Schichten sind die jährlichen Schwankungen aufgrund der Klimaänderungen im Sommer und Winter deutlich zu erkennen. Am kritischsten ist, wie im Periodenbilanzverfahren bereits festgestellt, Schicht Nr. 3. In dieser ist in der Simulation auch ein leichter Abfall der relativen Luftfeuchte und keine Auffeuchtung zu beobachten. Ebenfalls bleibt der Feuchtegehalt deutlich unter 100 % und es ist kein Tauwasserausfall zu erwarten. (vgl. Abbildung 77)

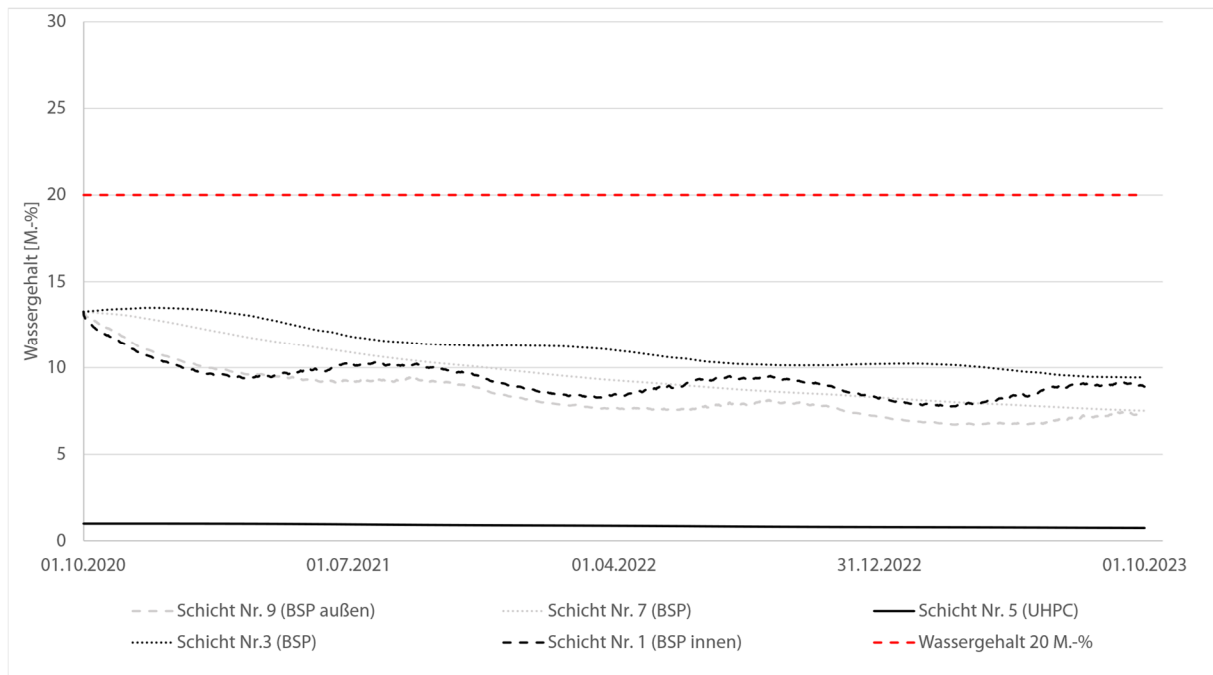
Abbildung 77:

Relative Luftfeuchte der Variante 1 in den einzelnen Bauteilschichten über einen Simulationszeitraum von 3 Jahren



Der Wassergehalt in Masseprozent ist in Abbildung 78 für die Variante 1 dargestellt. Dieser liegt in allen Konstruktionsschichten unter dem für eine für Holzbauteile festgelegten Grenzwert von 20 M-%. Somit ist eine tragende Anwendung möglich. Der massebezogene Wassergehalt der ultrahochfesten Betonschicht ist sehr gering mit 0,8 – 1 M-%. Dies liegt an der hohen Rohdichte und der draus resultierenden hohen Masse des Betons.

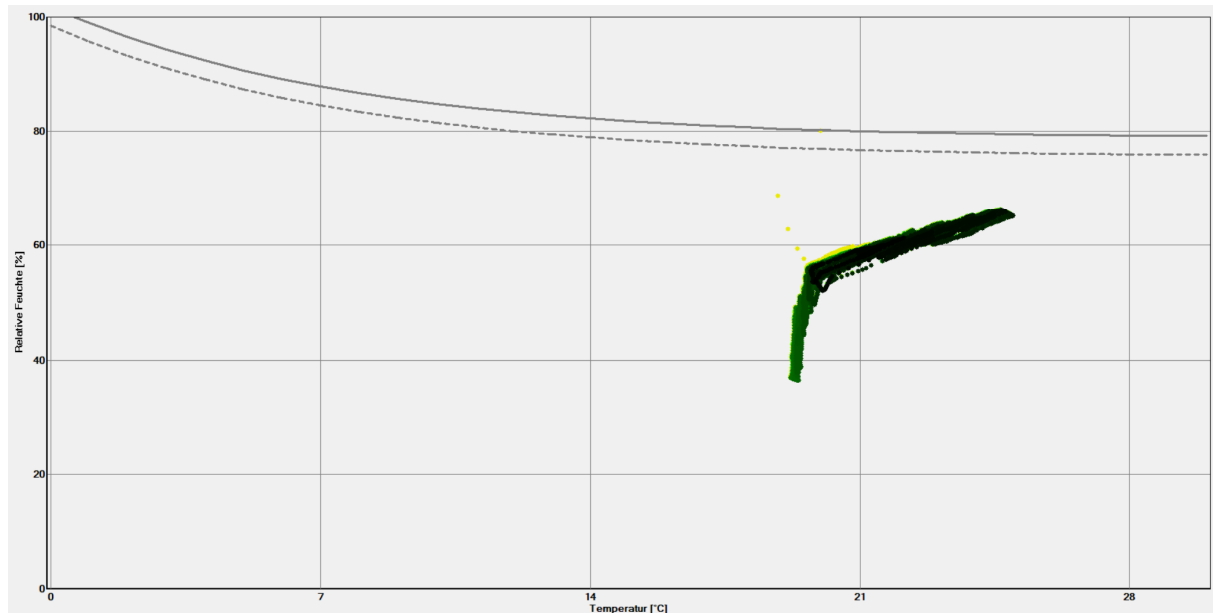
Abbildung 78:
Wassergehalt der Variante 1 in Masseprozent in den einzelnen Bauteilschichten über einen Simulationszeitraum von 3 Jahren



In Abbildung 79 ist ein Diagramm mit einer Gegenüberstellung der Temperatur zur vorhandenen relativen Feuchte mit eingezeichneten Grenzisoplethenkurven nach Sedlbauer (2001) für die Variante 1 an der Innenoberfläche über einen Simulationszeitraum von drei Jahren dargestellt. Die simulierten Werte befinden sich deutlich unter den Grenzlinien und somit ist von keiner Schimmelpilzbildung auszugehen.

Abbildung 79:

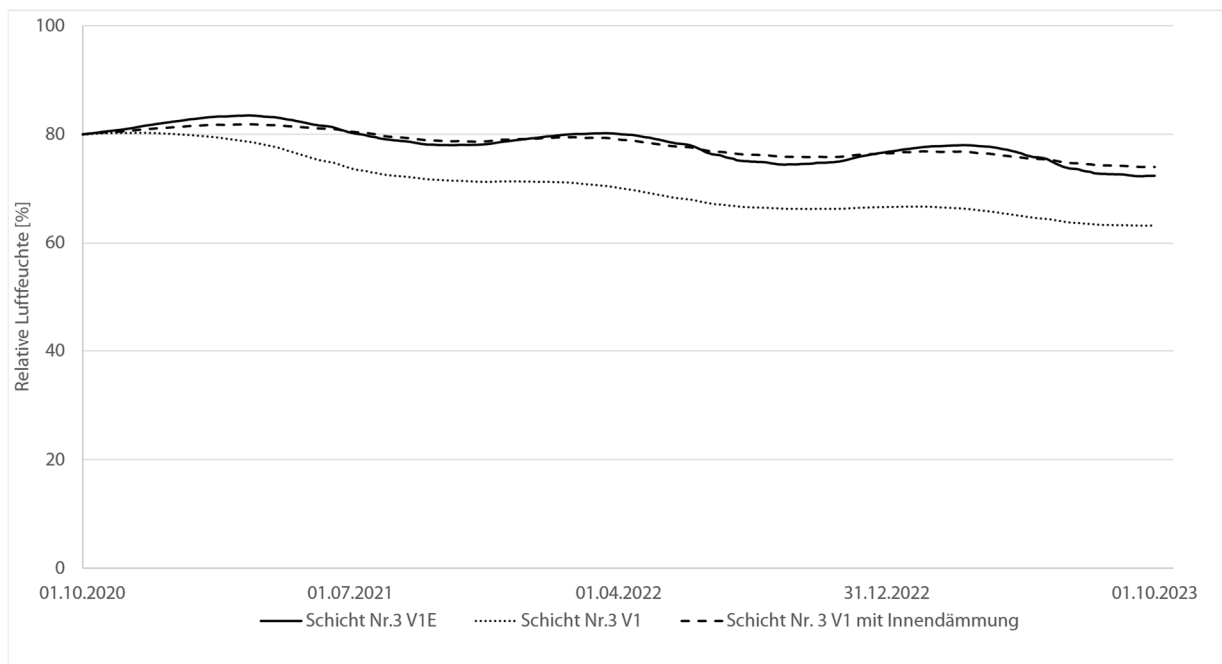
Temperatur zu relativer Feuchte an der Innenoberfläche der Variante 1 über einen Simulationszeitraum von 3 Jahren mit eingezeichneten Grensisoplethen (- - LIM_{Bau-I} und - LIM_{Bau-II}) (Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP 2023b)



Aufgrund der im Periodenbilanzverfahren identifizierten kritischen Schicht Nr. 3 wird hierzu noch ein Vergleich der Variante 1 mit der Variante 1E und der Variante 1 mit Innendämmung vorgenommen. In Abbildung 80 ist die relative Luftfeuchte der Schicht Nr. 3 dargestellt. Die Variante 1E erreicht hier die höchsten relativen Feuchten gefolgt von der Variante 1 mit Innendämmung. Nach einem kurzen Anstieg im ersten Winter sinken aber auch bei diesen beiden Varianten die Luftfeuchten kontinuierlich ab. Die höheren Werte decken sich mit den Untersuchungen nach dem Periodenbilanzverfahren.

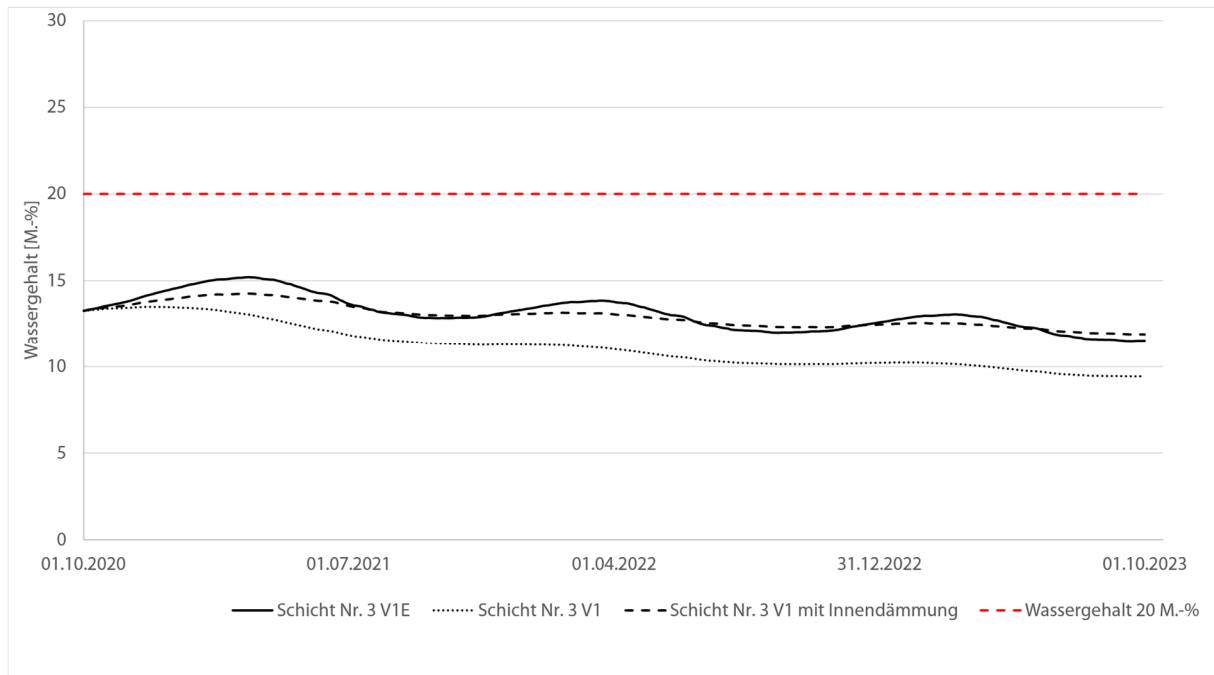
Abbildung 80;

Vergleich der relativen Luftfeuchte in Schicht 3 der Variante 1, Variante 1E und Variante 1 mit Innendämmung über einen Simulationszeitraum von 3 Jahren



Der Vergleich der Wassergehalte in Masseprozent zeigt ähnliche Ergebnisse wie die relative Luftfeuchte (vgl. Abbildung 81). Auch hier erreicht die Variante 1E die höchsten Werte gefolgt von der Variante 1 mit Innenraumdämmung. Ebenfalls ist nach einem Anstieg im ersten Winterjahr ein kontinuierlicher Rückgang zu beobachten. Alle Varianten bleiben deutlich unter der Grenze von für Holzbauteile in Bezug auf die Tragfähigkeit kritischen Wassergehalt von 20 M-%.

Abbildung 81:
Vergleich des Wassergehaltes in Schicht 3 der Variante 1, Variante 1E und Variante 1 mit Innendämmung über einen Simulationszeitraum von 3 Jahren

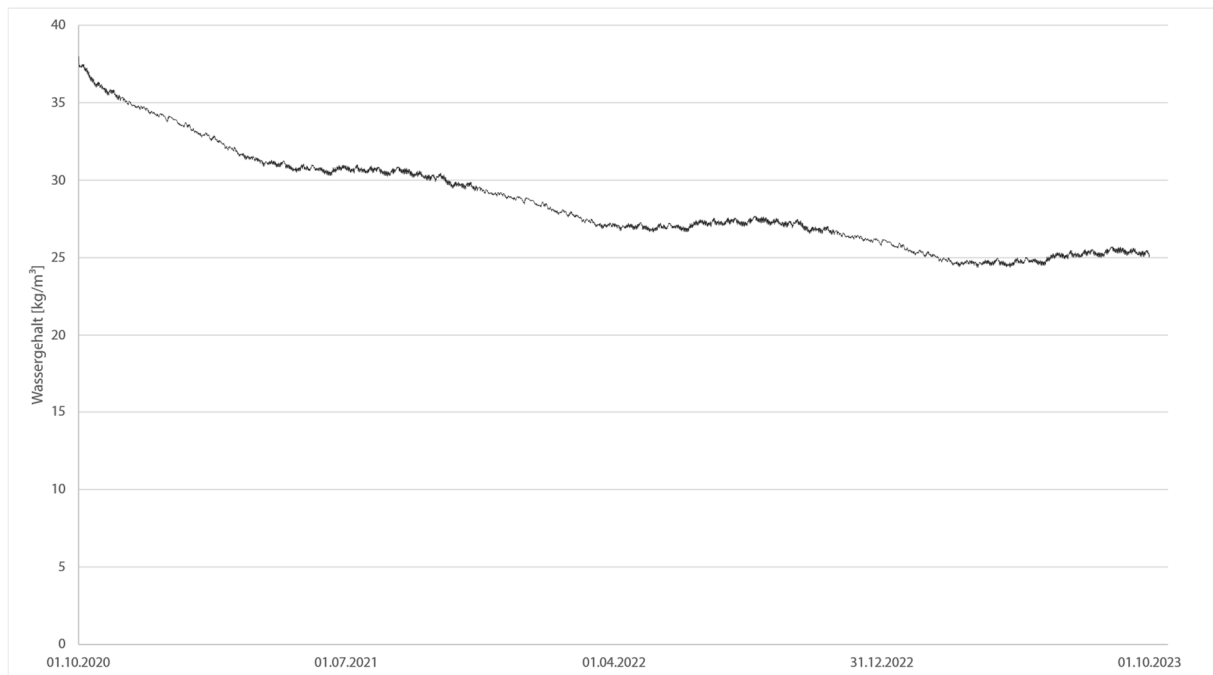


7.5 Ergebnisse der Untersuchungen im Anschlussbereich

Nach DIN 4108 Beiblatt 2 kann der Wand–Decke–Wand Anschluss mit einer Wärmedämmung größer gleich 100 mm in die Kategorie B eingeordnet werden und ein Nachweis der Schimmelpilzfreiheit kann entfallen. Des Weiteren kann aufgrund der Anbringung der Dämmung mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\leq 0,04 \text{ W/(mK)}$ auf eine Berücksichtigung der Wärmebrücken verzichtet werden (Bagatellregelung) (Holzabsatzfonds 2008). Die geringfügige Auswirkung der Wärmebrücke wird in der durchgeführten Simulation bestätigt.

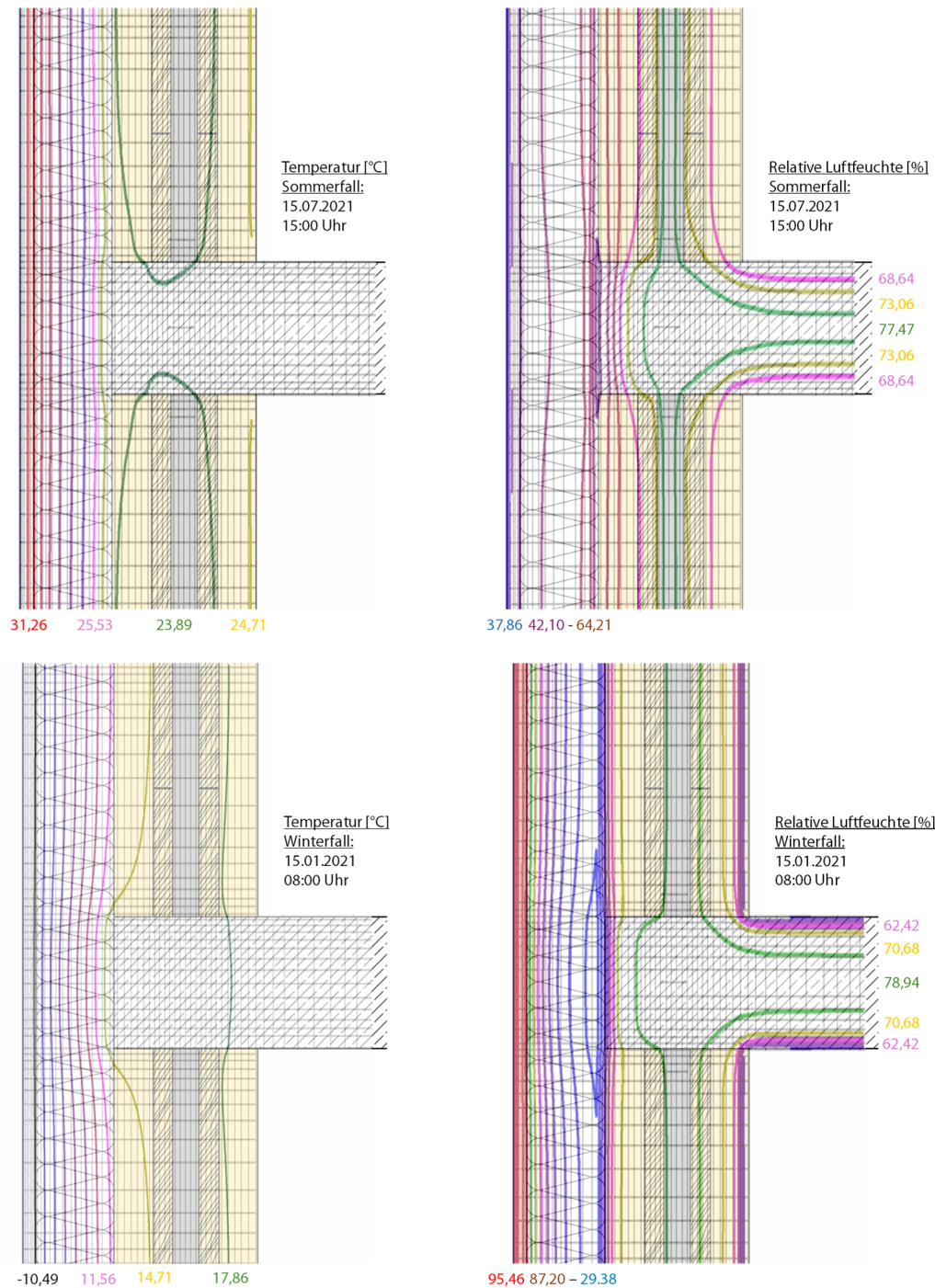
Die Simulationen wurden mit dem Programm WUFI 2D durchgeführt (Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP 2023a). Abbildung 82 verdeutlicht, dass auch im Anschlussbereich der Gesamtwassergehalt der Konstruktion über den Simulationszeitraum kontinuierlich abnimmt und keine Wasseransammlung zu erwarten ist.

Abbildung 82:
Gesamtwassergehalt im Anschlussbereich über den Simulationszeitraum von 3 Jahren



Die Temperaturen und relativen Luftfeuchten im Anschlussbereich sind für den Sommer und Winterfall in Abbildung 83 dargestellt. Als Erstes werden die Temperaturen betrachtet. Der Einfluss der höheren Wärmeleitfähigkeit der Betondecke ist besonders im Winterfall zu erkennen. Im Winter ist der Bereich wärmer aufgrund des direkten Kontakts zum Innenraumklima. Wenn Bekleidungen und abgehängte Decken berücksichtigt werden ist dieser Effekt vermutlich kleiner. Generell ist jedoch aufgrund der durchgehenden Dämmebene keine große Auswirkung der materiellen und konstruktiven Wärmebrücke zu erkennen. Bei der relativen Luftfeuchtigkeit ist zu erkennen, dass aufgrund der höheren Temperaturen im Beton höhere relative Luftfeuchtigkeiten auftreten. Generell bewegen sich die Werte sowohl im Winter- als auch im Sommerfall in einem akzeptablen Bereich und es ist kein Tauwasserausfall zu erwarten.

Abbildung 83:
Temperaturen (links) und relative Luftfeuchte (rechts) im Anschlussbereich für den Sommerfall (oben) und den Winterfall (unten)



7.6 Zwischenfazit

Es konnte gezeigt werden, dass die ultrahochfeste Verbundwand durch geeignete vorangestellte Dämmsysteme ausreichende Wärmedurchgangskoeffizienten erreichen kann. Bei korrekter Dimensionierung der Außendämmung ist mit keinem Tauwasserausfall im Inneren des Bauteils zu rechnen. Ebenfalls ist kein Schimmelpilzwachstum an der Bauteilinnenoberfläche zu erwarten. Die Auswirkungen der diffusionshemmenden Ebene aus ultrahochfestem Beton sind den Simulationsergebnissen zufolge gering.

Bei einer korrekten Ausführung des Anschlussdetails entstehen marginale Wärmebrückenverluste. In den Anschlussbereichen ist ebenfalls mit keinem Tauwasserausfall und keiner Schimmelpilzbildung zu rechnen. Die Ergebnisse sind auf andere Anschlussdetails (Sockelbereich) und Vorhangfassaden aus Holz, soweit diese korrekt nach den anerkannten Regeln der Technik ausgeführt werden, übertragbar.

8 Recycling

8.1 Hintergrund und Ziel

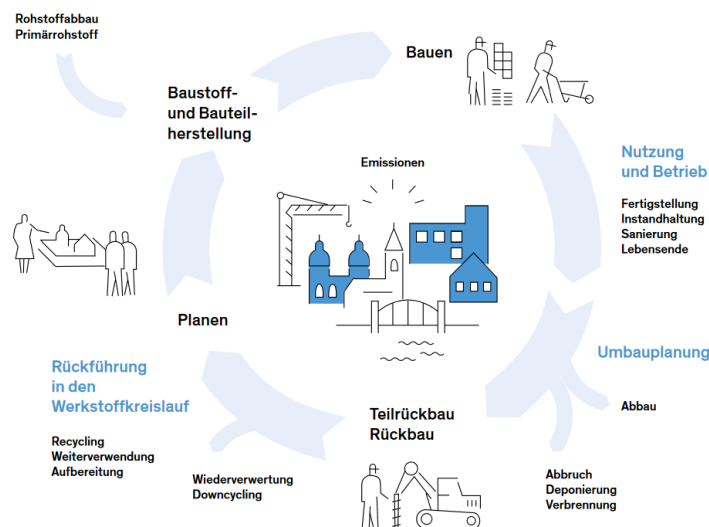
Die fortschreitende Erderwärmung und die zunehmende Knappheit natürlicher Ressourcen zählen zu den drängendsten Herausforderungen unserer Zeit. Diese Problematik tritt im Bauwesen, einem der ressourcenintensivsten Sektoren der globalen Wirtschaft, besonders stark hervor. Vor diesem Hintergrund findet derzeit ein fundamentales Umdenken innerhalb der Branche statt: Der Wechsel von der traditionellen, linearen Bauweise, die auf dem Prinzip des „Bauens, Nutzens und Entsorgens“ beruht, hin zu einem zirkulären Wirtschaftsmodell, das den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes in den Blick nimmt. Die Implementierung einer Kreislaufwirtschaft im Bauwesen spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Sie strebt danach, Baustoffe und Bauteile so zu verwenden und zu gestalten, dass diese am Ende ihrer Lebensdauer möglichst einfach wiederverwendet, verwertet oder recycelt werden können.

Neuartige und innovative Werkstoffkombinationen, wie die UHPTW, nutzen die vorteilhaften mechanischen Eigenschaften unterschiedlicher Materialien und verfolgen daher den Ansatz einer effizienteren Ressourcennutzung sowie zu einer verbesserten CO₂-Bilanz. Allerdings kann der Einsatz solcher Werkstoffkombinationen das Recycling nach dem Rückbau komplexer gestalten. Daher ergibt sich die Notwendigkeit, Lösungen zu entwickeln, die es ermöglichen, die Materialverbindungen am Ende ihrer Nutzungsdauer optimal in die Kreislaufwirtschaft einzubinden und einem Recyclingprozess zuzuführen. Nur so lassen sich die positiven Aspekte dieser Materialkombinationen auch in einer ganzheitlichen Betrachtung bewahren.

Die Idee der Kreislaufwirtschaft ist in Deutschland im Kreislaufwirtschaftsgesetz festgehalten (KrWG). Das Gesetz zielt darauf ab, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und die Umweltbelastung sowohl bei der Gewinnung von Rohstoffen als auch bei der Entsorgung von Abfällen zu verringern.

Im Bauwesen manifestiert sich das Prinzip der Kreislaufwirtschaft durch die Anwendung von Strategien, die zunächst auf Abfallvermeidung und den effizienten Ressourceneinsatz ausgerichtet, und schließlich auf die Maximierung der Wiederverwendung, Wiederverwertung und das Recycling von Baustoffen und Bauteilen fokussiert sind. Eine holistische Herangehensweise bereits bei der Planung spielt dabei eine entscheidende Rolle (vgl. (Pauli 2024; Friedrichsen 2018)). Der Grundgedanke der Kreislaufwirtschaft in der Bauwirtschaft ist in Abbildung 84 dargestellt.

Abbildung 84:
Schematische Darstellung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen (BSBK 2020)



Im Kontext der UHPTW sind die Konzepte der Wiederverwendung, Wiederverwertung und des Recyclings eine spezielle Herausforderung. Die Wandelemente kombinieren die Stärken von Holz und ultrahochfestem Beton, was zu Vorteilen bei der effizienten Ressourcennutzung führt. Jedoch stellt der integrierte Materialverbund, d.h. die Verklebung der Holz- und Betonlamellen, besondere Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft. In diesem Zusammenhang sind die Begrifflichkeiten Wiederverwertung, Wiederverwendung und Recycling folgendermaßen einzuordnen:

Wiederverwendung zielt auf den Einsatz von ganzen UHPTW-Elementen in einem neuen Einsatzbereich ab, ohne signifikante Veränderungen oder Aufbereitungen vorzunehmen. Voraussetzung ist, dass die Wandelemente in einem Zustand sind, der ihre direkte Wiederverwendung ermöglicht. Dies könnte etwa das Entfernen und erneute Installieren von unveränderten Wandsegmenten in einem anderen Bauprojekt umfassen, wobei die strukturelle Integrität und die Leistungsfähigkeit der Verbundmaterialien erhalten bleiben.

Wiederverwertung umfasst den Neueinsatz der Komponenten Holz und UHPC aus der UHPTW in neue (Bau)Produkte. Im Gegensatz zur Wiederverwendung, bei der die ursprüngliche Struktur beibehalten wird, erfordert die Wiederverwertung eine Umgestaltung oder Verarbeitung. Die effiziente Trennung, Aufbereitung und der Neueinsatz der Komponenten aus abgebauten UHPTW-Elementen ist ein exemplarisches Vorgehen im Rahmen einer Wiederverwertung.

Recycling beschreibt die Neuaufbereitung der Rohstoffe in einem Produkt in sog. Sekundärrohstoffe. Dabei wird das ursprüngliche Erzeugnis in seine Einzelbestandteile zerlegt und daraus neue Produkte hergestellt. Beim Recycling der UHPTW-Elemente steht die Herausforderung im Fokus, die unterschiedlichen Materialien – Holz und Beton – so in die Rohstoffe zu zerlegen, dass sie effektiv zur Herstellung neuer Bauteile eingesetzt werden können.

Die im Rahmen des Forschungsprojekts getätigten Untersuchungen fokussieren sich vor diesem Hintergrund auf folgende Kernziele:

- Identifikation von Methoden zur Trennung von Klebeverbindungen allgemein, um grundlegende Erkenntnisse über effektive Trennungsprozesse zu gewinnen.
- Überprüfung der Übertragbarkeit dieser Trennungsmethoden auf die spezifische Verklebung von Holz und Beton, die bei den UHPTWs verwendet wird, um deren Anwendbarkeit und Wirksamkeit zu bewerten.

-
- Durchführung von Tests zur Trennung der Klebefuge mittels Labormikrowelle, um eine innovative und möglicherweise effiziente Methode für die Zerlegung dieser Verbundmaterialien zu erproben.
 - Skizzieren einer Kreislaufstrategie für UHPTW-Elemente basierend auf den Ergebnissen der Recherche und Versuche, die eine Wiederverwendung, Wiederverwertung oder das Recycling der Materialien ermöglicht und so den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft gerecht wird.

8.2 Grundlagen

In der Baubranche kommen verschiedene Arten von Klebstoffen zum Einsatz, die jeweils spezifische Eigenschaften aufweisen und für unterschiedliche Anwendungen konzipiert sind. Bei der Verklebung der UHPTWs wurden für die Betrachtung auf Bauteilebene zwei verschiedene Klebstoffe verwendet, ein Ein-Komponenten-Polyurethan (PU) sowie Melaminharz (MUF) (Oberndorfer et al. 2021). Um geeignete Trennverfahren und Recyclingmethoden für diese Klebstoffarten zu identifizieren, ist der Blick in andere Industriebranchen sinnvoll. Im Allgemeinen werden dort verschiedene Ansätze verfolgt, um Klebeverbindungen zu lösen und die verklebten Komponenten für den Wertstoffkreislauf zu separieren. Diese Ansätze nutzen die physikalischen oder chemischen Eigenschaften der Klebstoffe, um eine effiziente Trennung zu ermöglichen. Folgende Herangehensweisen sind gängig:

- Starkes Herabkühlen des Klebers
- Erhitzen des Klebers
- Verwendung von Trennflüssigkeiten
- Mechanische Trennung

Das Prinzip der Trennung geklebter Materialien durch Abkühlung basiert auf einer zielgerichteten Temperaturreduktion, die dazu führt, dass der Klebstoff versprödet oder seine Adhäsionsfähigkeit verliert. Dadurch wird eine Trennung der verbundenen Materialien ermöglicht. Entscheidend für den Erfolg dieser Methode sind die Auswahl des passenden Kühlmediums sowie die präzise Steuerung der Kühlbedingungen, um eine effiziente Trennung ohne Schädigung der Materialien sicherzustellen. Die Kühlzeit und -intensität müssen genau justiert werden, um die Klebebindung zu lösen, ohne dabei die Materialien selbst zu beeinträchtigen. Diese Technik findet bereits Anwendung in verschiedenen Industriebereichen, z.B. bei der Trennung von Leichtbaustrukturen (Ditter et al. 2019; Bartley et al. 2023).

Das Entfügen von Klebeverbindungen durch Erwärmung nutzt die gezielte Wärmezufuhr, um die Bindungskräfte eines Klebstoffs zu verringern oder aufzulösen. Die Technik zielt darauf ab, die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Klebstoffs so zu verändern, dass die Klebewirkung geschwächt oder gänzlich zerstört wird. Die verbundenen Komponenten können schließlich voneinander gelöst werden. Die präzise Steuerung der Erwärmungsparameter ist entscheidend, um eine effektive und sichere Trennung zu erreichen. Dabei ist die Anpassung des Erwärmungsprozesses an die spezifischen Anforderungen der Materialien und Klebstoffe essenziell. In der Industrie gibt es derzeit verschiedene Erwärmungsmethoden zum Lösen von Klebstoffverbindungen. Dazu gehören beispielsweise das induktive Erwärmen, die Infraroterwärmung oder die Erwärmung mittels Mikrowellen (Liebezeit et al. 2016).

Das Prinzip von Trennflüssigkeiten bei der Trennung von Klebeverbindungen basiert auf der Anwendung spezifischer Chemikalien oder Lösungsmittel, die gezielt auf die Klebstoffschicht einwirken, um deren adhäsive Bindungen zu schwächen oder aufzulösen. Diese Flüssigkeiten dringen in die Klebefuge ein und reagieren chemisch mit dem Klebstoff, was zu einer Veränderung seiner Eigenschaften führt. Dadurch verliert der Klebstoff seine Haftkraft, und die verbundenen Materialien können voneinander gelöst werden. Die Auswahl der geeigneten Trennflüssigkeit hängt dabei von der Art des Klebstoffs sowie der Materialien ab, die getrennt werden sollen.

Das Prinzip der mechanischen Trennung von Klebeverbindungen beruht auf der Anwendung von Kräften, die durch die betroffene Klebefuge nicht mehr aufgenommen werden können. Durch das Aufbringen von Zug-, Druck- oder Scherkräften auf die Fügeteile oder durch den Einsatz von Schneidwerkzeugen, die Spaltkräfte nutzen, wird die Klebeverbindung überlastet, was zu einem Adhäsions- oder Kohäsionsbruch führt. Obwohl mechanische Verfahren effektiv die Klebeverbindung lösen, bergen sie das Risiko, das Werkstück durch die Krafteinwirkung zu beschädigen. Zudem erfordert die vollständige Entfernung der Klebereste von den Oberflächen der getrennten Teile oft weiteres präzises Fräsen oder Schleifen. In der Baubranche wird die mechanische Einwirkung vor allem im Zusammenhang mit der Zerkleinerung von Bauabfällen weit verbreitet. Ziel ist dabei nicht etwa die Trennung einer verklebten Verbindung, als vielmehr die gezielte Zerkleinerung

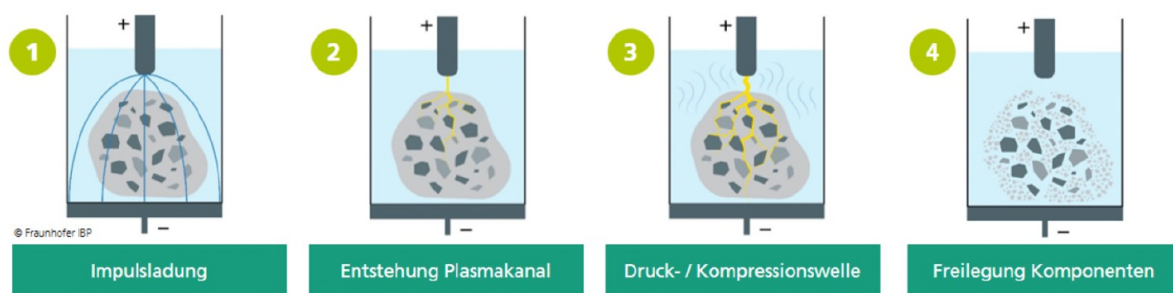
des Materials und damit der Gewinnung eines Recyclingprodukts. Häufig kommen dafür stationäre Aufbereitungsanlagen zum Einsatz. (Müller 2018)

Elektrodynamische Fragmentierung

Ein vielversprechendes Verfahren zur Trennung von Stoffen und Materialverbünden im Allgemeinen ist die elektrodynamische Fragmentierung (EDF). Die Herangehensweise lässt sich nicht in die oben genannten Trennprinzipien einordnen, gilt jedoch als eine innovative Methode unter anderem für das Zerlegen von Beton in seine einzelnen Bestandteile. Daher ist auch eine künftige Anwendung bei den UHPC-Bestandteilen der UHPTWs interessant.

Das Trennprinzip beruht auf hochintensiven elektrischen Impulsen, die zu starken Sprengkräften und schließlich zur Trennung des behandelten Materials in seine Einzelbestandteile führen. Ein zu behandelnder Festkörper wird dafür unter Wasser zwischen zwei Elektroden gesetzt und eine elektrische Entladung mit einer Pulsdauer unter 500 Nanosekunden ausgelöst. Da die Durchschlagsfestigkeit von Wasser bei ultrakurzen Pulsen höher ist als die der meisten Feststoffe, verläuft der Impuls durch den Festkörper und nicht durch das Wasser, um zur Gegenelektrode zu gelangen. Die daraus resultierende Druck- bzw. Kompressionswellen innerhalb des Feststoffes bewirken eine präzise und selektive Zerkleinerung der Materialien entlang ihrer natürlichen Schwachstellen. (Seifert et al. 2014) In Abbildung 85 ist die Funktionsweise der EDF schematisch dargestellt.

Abbildung 85:
Schematische Darstellung der Funktionsweise der elektrodynamischen Fragmentierung (Thome 2023)



Durch die gezielte Fragmentierung von Betonbauteilen können die Bestandteile wie Gesteinskörnung und Zementstein effektiv voneinander getrennt werden. Die Vorteile der EDF beim Betonrecycling liegen vor allem in der Qualität der gewonnenen Sekundärmaterialien. Die Methode ermöglicht es, Gesteinskörnung zu gewinnen, die kaum noch anhaftenden Zementleim aufweist, was zu einer höheren Qualität der Recyclingaggregate führt. Diese können dann in der Herstellung neuer Betonmischungen verwendet werden, wodurch die Eigenschaften des recycelten Betons denen von Beton aus Primärmaterialien ähnlicher werden. (Seifert et al. 2014)

8.3 Tastversuche zur Erhitzung der Klebefuge mittels Mikrowellen

8.3.1 Wahl der Methode

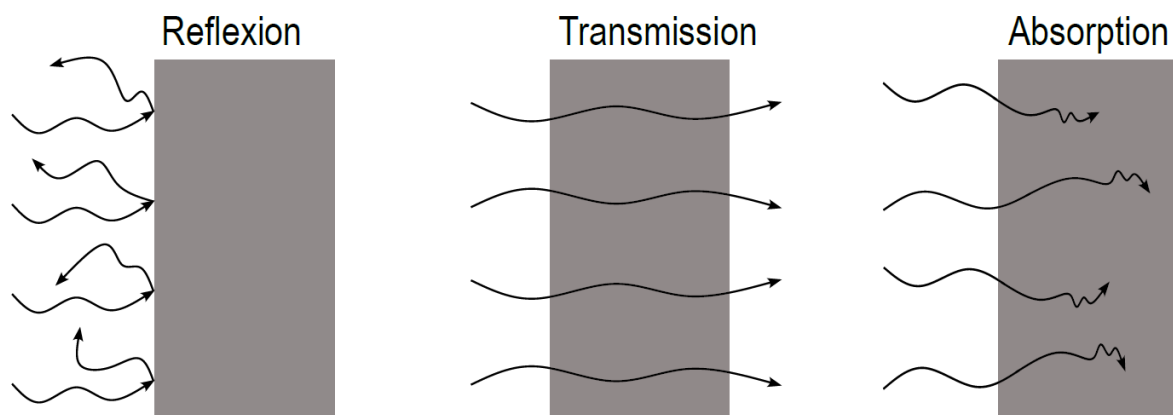
Nach Evaluierung der Trennprinzipien wurde sich für die Anwendung von Mikrowellen bei den hier dokumentierten Versuchen entschieden. Die Herabkühlen der Klebefuge bei den UHPTW-Elementen wurde nach Abstimmung mit einer in diesem Bereich tätigen Firma als wenig praxistauglich eingeschätzt. Die Holzlamellen haben eine Art Dämmwirkung und schützen die Klebefuge vor starken Temperaturänderungen in der Umgebung. Ferner weisen die Elemente große Abmessungen auf. Daher wäre das starke Herabkühlen sehr energieaufwendig und teuer, was eine industrielle und breite Anwendung deutlich erschwert. Auch die Anwendung von Trennflüssigkeiten ist durch die großflächige Verklebung nicht praxisrelevant. Eine

mechanische Trennung führt zwangsweise zur Zerstörung der Komponenten, was den weiteren Recyclingprozess erschwert oder verhindert.

8.3.2 Wirkungsprinzip der Mikrowellen

Das Funktionsprinzip von Mikrowellen beruht auf der Anregung von Molekülen durch elektromagnetische Wellen im Mikrowellenfrequenzbereich, was zu einer Erwärmung des behandelten Materials führt. Die Wirksamkeit der Mikrowelleneinwirkung ist stark abhängig von der Fähigkeit eines Materials, Mikrowellenenergie zu absorbieren. Die Mikrowellenankopplung ist stark von den dielektrischen Eigenschaften des Materials abhängig. Je besser diese Eigenschaften, desto effizienter können die Mikrowellen absorbiert werden (vgl. Abbildung 86 (rechts)). Wird die Mikrowellenstrahlung reflektiert, liegen in der Regel Stoffe mit hohen elektrischen Leitfähigkeiten vor (schlechte dielektrische Eigenschaften), und es findet keine signifikante Erwärmung statt (vgl. Abbildung 86 (links)). Die Mikrowellen können nicht in das Material eindringen und ihre Energie abgeben. Beispiele für reflektierende Materialien sind Metalle wie Aluminium und Stahl. Bei unpolaren Stoffen – d.h. ihre Moleküle besitzen keine Dipoleigenschaften – durchdringen die Mikrowellen mit minimaler Wechselwirkung das Material (Transmission). Folglich findet keine oder kaum Erwärmung statt (vgl. Abbildung 86 (Mitte)).

Abbildung 86:
Schematische Darstellung des Wirkungsprinzips von Mikrowellen (nach Oc-praktikum (2022))



Um die Erwärmung in Materialien mit geringen dielektrischen Eigenschaften zu verbessern, kommen Suszeptoren zum Einsatz. Diese Zusatzstoffe absorbieren Mikrowellen stark und erwärmen dadurch das umliegende Material. Häufig verwendete Suszeptoren sind Graphit und bestimmte Metallpulver wie Eisenoxid. Durch das Einbringen an bestimmten Stellen im Material – wie beispielsweise im Bereich einer Klebefuge – können diese so gezielt erhitzt werden.

Das Wirkungsprinzip von Mikrowellen bietet die Möglichkeit, die UHPTW-Elemente durch gezieltes Erwärmen der unterschiedlichen Komponenten zu trennen. Der Ansatz nutzt die variierenden dielektrischen Eigenschaften von Holzlamellen, UHPC-Lamelle und Klebstoff, um unterschiedliche Temperaturen in der Wand zu generieren. Diese Temperaturunterschiede können je nach Ausprägung und Materialverhalten zur Trennung der Materialien führen. Das Erwärmungsverhalten der UHPTW bei Mikrowelleneinwirkung ist jedoch unklar. Deshalb wurden Tastversuche durchgeführt, die das Verhalten der Materialien unter Mikrowelleneinfluss aufzeigen und Hinweise auf den effektiven Einsatz zur Trennung geben sollen.

8.3.3 Prüfkörper und Versuchsreihen

Für die experimentelle Untersuchung wurden Versuchskörper aus einem fünfteiligen Wandelement geschnitten, das bereits im Vorgängerprojekt (vgl. (Oberndorfer et al. 2021)) im Rahmen der Prüfung ganzer Wandbauteile hergestellt wurde. Die Dicke der Wandelements betrug 15 cm. Die UHPC-Lamellenoberfläche wurde vor der Verklebung geschliffen, die Klebstoffauftragsmenge betrug 170 g/m². Die Verklebung fand mit

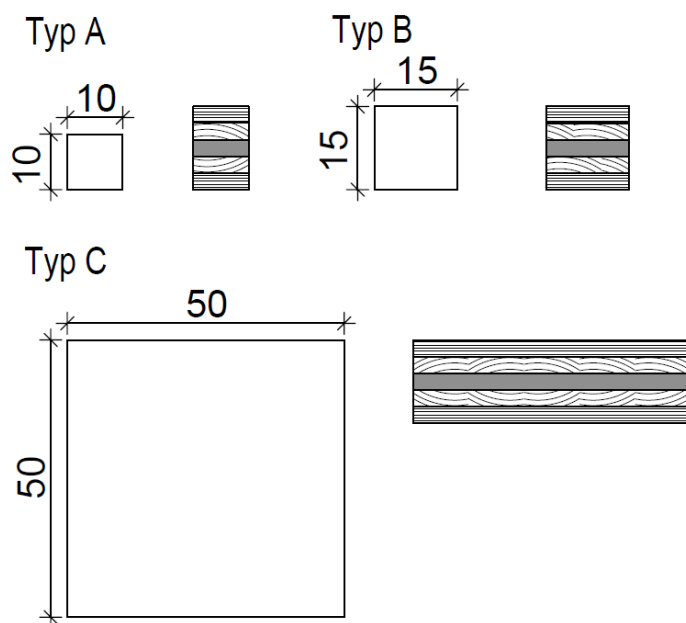
einem Ein-Komponenten Polyurethan-Klebstoff satt. Die Holzlamellen bestehen aus Fichtenholz der Festigkeitsklasse C24. Die Herstellung des Wandelements und die Materialien sind in Oberndorfer et al. (2021) (Kapitel 6) detailliert beschrieben.

Um den Einfluss der Versuchskörpergröße zu erfassen, wurden drei verschiedene Versuchskörpertypen gefertigt:

- Typ A umfasst Versuchskörper mit einer Grundfläche von 10x10 cm,
- Typ B hat eine Abmessung von 15x15 cm,
- Typ C besteht aus 50x50 cm großen Wandscheiben.

In Abbildung 87 sind die Probekörpertypen schematisch dargestellt.

Abbildung 87:
Unterschiedliche Abmessungen und Typenbezeichnungen der untersuchten Probekörper



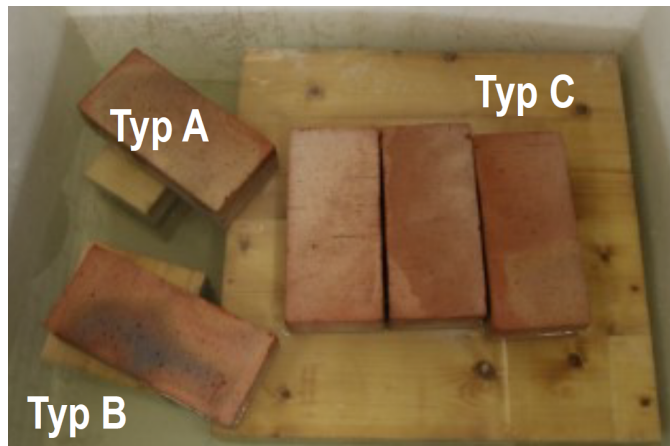
Im Rahmen der experimentellen Untersuchung wurden die Versuchskörpertypen in verschiedenen Konfigurationen getestet, um unterschiedliche Einflussfaktoren auf die Effizienz der Mikrowelleneinwirkung und geeignete Bedingungen für das Lösen der verklebten Materialien identifizieren zu können. Folgende Konfigurationen wurden getestet:

Konfiguration 1 – liegende Anordnung in der Mikrowelle: Bei dieser Versuchsreihe wurden die Versuchskörper so in die Mikrowelle platziert, dass die Schnittflächen direkt den Magnetronen (Emissionsort der Mikrowellen) zugewandt sind.

Konfiguration 2 – stehende Anordnung in der Mikrowelle: In dieser Versuchsreihe wurden die Versuchskörper vertikal positioniert, sodass die Holzlamellen in direkter Ausrichtung zu den Magnetronen standen.

Konfiguration 3 – stehende Anordnung und gewässert: Zusätzlich zu der stehenden Positionierung in der Mikrowelle wurden die Versuchskörper in dieser Reihe vor der Erwärmung eine Woche unter Wasser gelagert (vgl. Abbildung 88). Dadurch soll der Einfluss der Feuchtigkeit auf die Mikrowellendurchdringung und die Wärmegenerierung innerhalb der Versuchskörper untersucht werden, da Wasser gute dielektrische Eigenschaften aufweist und die Mikrowellen absorbiert.

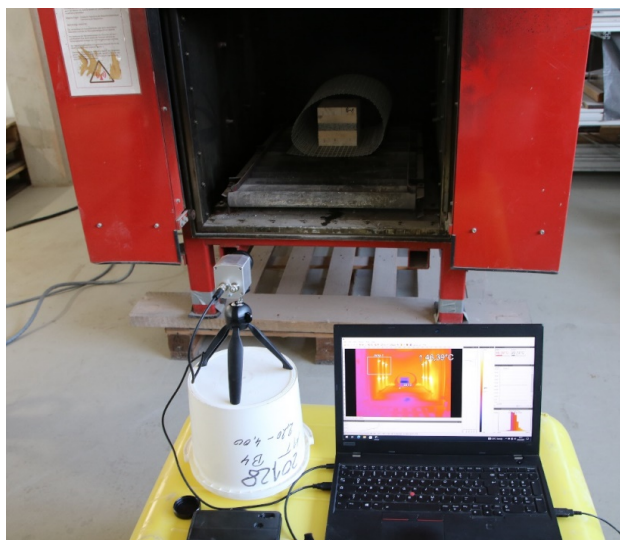
Abbildung 88:
Wässerung der Prüfkörper



8.3.4 Versuchsaufbau und Durchführung

Die experimentellen Untersuchungen wurden am Institut für Angewandte Bauforschung (IAB) in Weimar durchgeführt. Hierbei kam eine spezialisierte Labormikrowelle des Typs LK 14.4 von der MWT GmbH zum Einsatz, die mit zwölf leistungsstarken Magnetronen ausgerüstet ist, jede mit einer Kapazität von 14,4 kW. Diese Konfiguration (eine sog. Multi-Node-Applikation) ermöglicht eine direkte und gleichmäßige Energieabgabe in den Kammerinnenraum. Die getesteten Probekörper wurden sorgfältig in die Mikrowelle eingesetzt und mit einem Kunststoffgitter umhüllt, um den Innenraum vor möglichen Beschädigungen durch Abplatzungen zu schützen. Zur präzisen Temperaturerfassung nach der Mikrowellenbehandlung dienten eine Wärmebildkamera und ein laserbasiertes Temperaturmessgerät, wodurch eine schnelle Messung gewährleistet und ein Abkühlen der Probekörper vor der Messung vermieden wurde. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 89 dargestellt.

Abbildung 89:
Versuchsaufbau und Durchführung der Microwellenversuche



Bei der Versuchsdurchführung wurde die volle Leistung der Labormikrowelle verwendet. Über verschiedene Zeitintervalle hinweg erfolgte die Messung der Temperatur an den unterschiedlichen Materialien der Versuchskörper. Das Ende der Mikrowelleneinwirkung wurde entweder durch das Auftreten eines Bruchs des UHPC in den Probekörpern oder situationsbedingt bei den Probekörpern des Typ C nach dem Ermessen der durchführenden Wissenschaftler festgelegt. Die Messergebnisse wurden fortlaufend dokumentiert.

8.3.5 Ergebnisse der Mikrowellenversuche

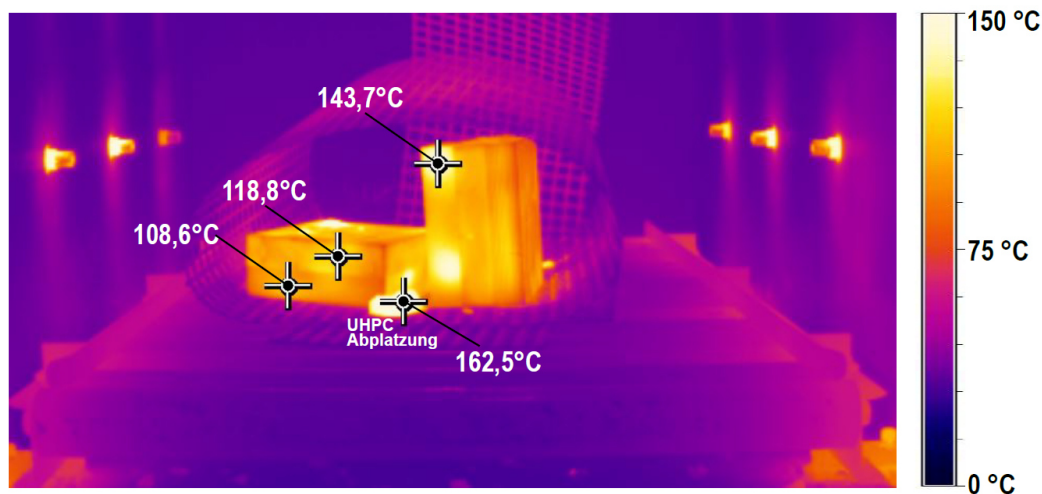
Konfiguration 1 und 2

Die Ergebnisse der Konfiguration 1 und 2 zeigen bei der Betrachtung des gleichen Probekörpertyps keine signifikanten Unterschiede bei der Einwirkungsdauer bis zum Bruch, den Oberflächentemperaturen und dem Bruchverhalten.

Bei Probekörpern vom Typ A wurde nach etwa 40-45 Sekunden in der Mikrowelle der Bruch des UHPC durch erste Knackgeräusche angekündigt, nach weiteren 50 Sekunden erfolgte schließlich das Zerplatzen des UHPC, folglich nach etwa 95 Sekunden Gesamtzeit. Durch die größeren Abmessungen der Probekörper vom Typ B wurden etwas längere Einwirkungszeiten in der Mikrowelle benötigt, auch die ersten Knackgeräusche wurde etwas später vernommen. Der Bruch der Proben erfolgte schließlich zwischen 150 – 180 Sekunden.

Die gemessenen (Oberflächen)Temperaturen direkt nach der Mikrowelleneinwirkung der Probekörper des Typs A und B befinden sich im gleichen Wertebereich. Die etwas längere Einwirkungszeit egalisiert die größeren Probekörperabmessungen bei Typ B. Der Bruch wird folglich bei ähnlichen Temperaturen im UHPC ausgelöst und betragen zwischen 130 - 190 °C. Die Holzoberflächen weisen eine Temperatur zwischen 65 – 120 °C auf. Zwischen den inneren und äußeren Holzlamellen konnten keine charakteristischen Temperaturunterschiede festgestellt werden, was auch auf die Messung an der Oberfläche zurückzuführen ist. Die Temperaturen auf den Kleber sind nicht eindeutig zu bestimmen, da aufgrund der dünnen Schicht diese immer in Wechselwirkung mit den anderen Materialien steht. Die Temperatur des Klebers befindet sich folglich in der Regel zwischen den Werten des UHPC und des Holzes, in etwa bei 100 – 140 °C. Eine exemplarische Wärmebildaufnahme nach dem Bruch einer Probe von Typ B bei stehender Positionierung in der Mikrowelle ist in Abbildung 90 dargestellt.

Abbildung 90:
Exemplarische Oberflächentemperaturen nach Mikrowelleneinwirkung beim Prüfkörpertyp B



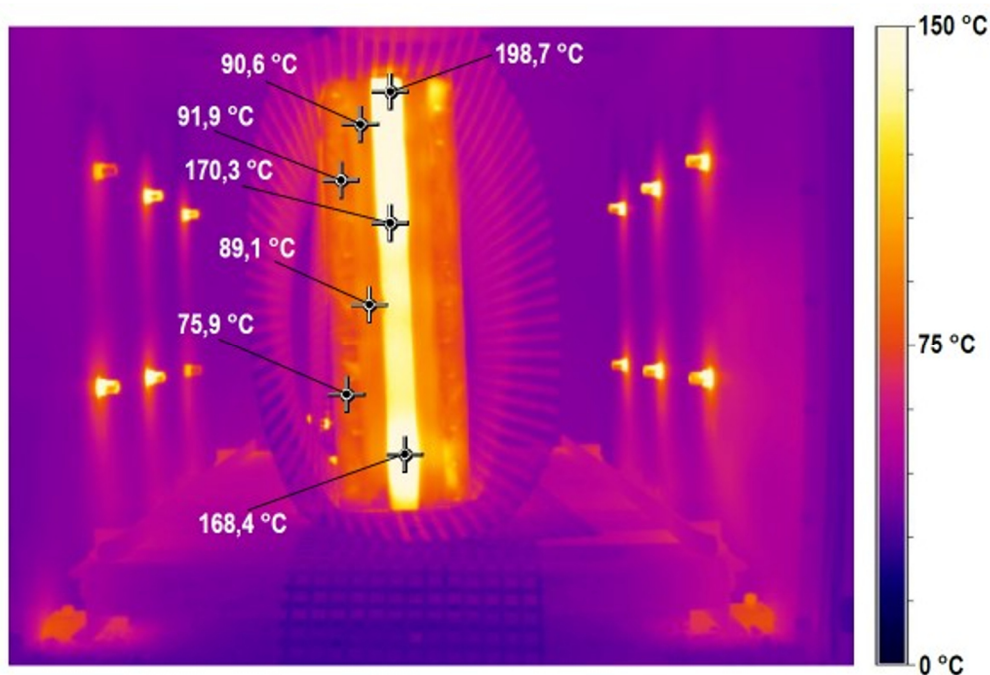
Durch den schlagartigen Bruch des UHPC erfolgte eine saubere Trennung an der Klebefuge, kleinere noch einseitig anhaftende UHPC-Teile konnten mechanisch leicht abgeklöpft werden. Der Kleberstoff verbleibt fast vollständig auf der inneren Holzlamelle. Größere Betonstücke, die sich nicht gelöst haben, konnten nach wiederholter Mikrowelleneinwirkung durch weiteres Zerplatzen abgelöst werden. Abbildung 91 zeigt exemplarisch zerbrochene Probekörper des Typs A (links) und B (rechts) nach der Mikrowelleneinwirkung. Es gibt dabei keinen signifikanten Unterschied im Bruchverhalten. Das Holz weist keine augenscheinliche Schädigung auf, der UHPC zerbricht in abgelöste, kleinere Stücke.

Abbildung 91:
Exemplarische Bruchbilder des Probekörpertyps A (links) und des Probekörpertyps B (rechts)



Die großflächigeren Wandelemente vom Typ C weichen vor allem hinsichtlich der Dauer bis zum Bruch und des Bruchverhaltens von den kleinformigen Geometrien ab. Durch die wandartige Probekörpergeometrie wird der UHPC derart durch die Holzlamellen gehalten, dass kein zeitgleiches Lösen der Klebeverbindung beim Zerplatzen des UHPC stattfindet. Lediglich an den freien Rändern der UHPC-Lamelle fanden kleinere Abplatzungen statt. Die ersten Knackgeräusche wurden hier erst nach etwa 60 Sekunden registriert, die nach etwa 60 weiteren Sekunden durch kleinere Randabplatzungen begleitet wurden. Dies entspricht in etwa der Dauer bis zum Bruch bei den Probekörpern des Typs A und B. Die Mikrowelleneinwirkung wurde hier nicht mit dem Bruch des UHPC und dem Ablösen der Holzlamellen beendet, sondern nach Ermessen der beteiligten Personen. Bei Konfiguration 1 wurde der Versuch nach starker Rauchentwicklung und etwa 9 Minuten abgebrochen, der Probekörper in der Konfiguration 2 wurde präventiv bereits nach 7 Minuten aus der Mikrowelle entnommen. Die Oberflächentemperaturen bei diesem Versuch sind vergleichbar zu den kleineren Probekörperabmessungen, liegen jedoch am oberen Ende der Temperaturskala oder leicht darüber. Eine Wärmebildaufnahme der Probe ist in Abbildung 92 dargestellt.

Abbildung 92:
Wärmebildaufnahme bei stehender Anordnung in der Mikrowelle und Versuchskörpertyp C kurz nach Beenden der Mikrowelleneinwirkung



Ein direkter Vergleich zwischen stehender und liegender Positionierung von Probekörper Typ C ist durch die geschilderte Rauchentwicklung leider nicht möglich. Abbildung 93 zeigt den rauchenden Probekörper in der Labormikrowelle. Erste Anzeichen einer Rauchentwicklung konnten nach etwa 8 Minuten beobachtet werden, der Versuch wurde nach 9 Minuten abgebrochen. Temperaturmessungen wurden aufgrund der schlechten Luftverhältnisse nicht durchgeführt. Bei der anschließenden Ursachenuntersuchung konnten verkohlte Messkabel gefunden werden, deren Plastikummantelung bei den hohen Temperaturen geschmolzen und verkohlt sind und für die Rauchentwicklung verantwortlich waren. Die Kabel sind aus vorherigen mechanischen Versuchen im Material verblieben. Bei weiteren Versuchen dieser Art oder bei einem möglichen Einsatz von Mikrowellen als Trennverfahren sollte daher darauf geachtet werden, dass alle zusätzlichen Materialien wie Stromkabel oder Einbauteile sorgfältig rückgebaut und getrennt werden.

Abbildung 93:

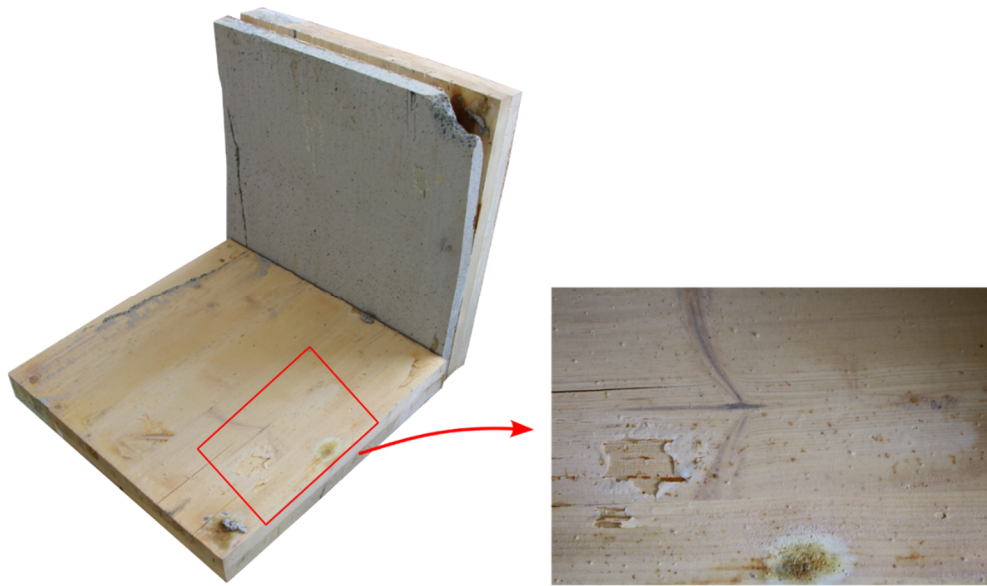
Rauchentwicklung in der Labormikrowelle (links) und verschmorte Stellen aufgrund eingeklebter Messkabel im Probekörper (rechts)



Nach der Mikrowellenbehandlung war es bei beiden Probekörpern des Typs C möglich, die verklebten Komponenten mechanisch durch Abstemmen zu trennen. Der verwendete Polyurethanklebstoff „Melanin“ verlor folglich durch die Hitzeeinwirkung signifikant an Klebkraft, beim Probekörper mit 9 Minuten Anwendungsdauer konnten sogar einige Stellen identifiziert werden, die auf einen geschmolzenen Klebstoff hinweisen. Nach dem mechanischen Trennen blieb dabei der Klebstoff, wie bereits bei den kleinformatigen Probekörpern, überwiegend auf den Holzlamellen haften (vgl. Abbildung 94). Eine Trennung der Materialien könnte folglich nicht nur durch Zerplatzen des UHPC erreicht werden, sondern auch durch ein starkes Erhitzen des Klebers und die damit verbundene Verringerung der Klebstoffeigenschaften.

Abbildung 94:

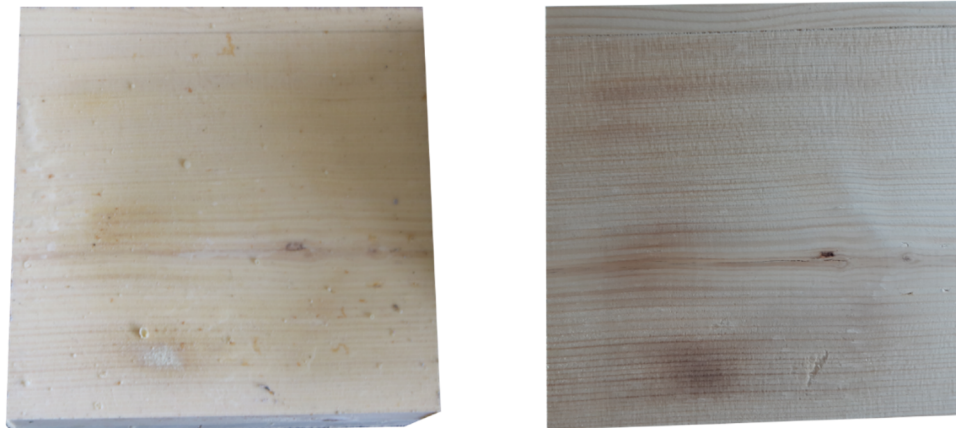
Flächiges Ablösen der UHPC Lamelle (links) und Verbleib des Klebers auf den Holzlamellen (rechts) an den Prüfkörpern des Typs C



Im Nachgang der Versuche wurde ein getrenntes Holzelement (Probekörper Typ B) mit dem verbliebenen Klebstoff mit einem konventionellen Holzhobel um 1,0 mm abgehobelt. Es konnte der Klebstoff vollständig entfernt und eine glatte, neuwertige Oberfläche hergestellt werden. In Abbildung 95 ist die abgehobelte Oberfläche zu sehen.

Abbildung 95:

Ein Prüfkörper vor (links) und ein Prüfkörper nach (rechts) der Nachbehandlung der verklebten Holzoberfläche



Konfiguration 3

In den Versuchen mit den gewässerten Probekörpern der Typen A, B und C zeigte sich grundsätzlich ein ähnliches Verhalten wie bei den Proben der Konfiguration 1 und 2. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch bei der Einwirkungsdauer bis zum Bruch beim Probekörper von Typ B. Während sich zeitlich der Probekörper von Typ A nicht wesentlich von den trockenen Proben unterschied, verzögerte sich der Bruch bei Typ B etwas. Die Zeit bis zum Bruch betrug hier etwa 3,5 Minuten und damit etwa 30 – 60 Sekunden länger. Auch die ersten Knackgeräusche wurden erst nach circa 2,5 – 3,0 Minuten vernommen. Der Abstand zwischen dem ersten Knacken und dem Bruch betrug etwa die gleiche Zeit.

Hinsichtlich Oberflächentemperaturen und Bruchverhalten ergeben sich keine Unterschiede zwischen den trockenen und vorgehässigten Probekörpern. Dies gilt auch für gewässerte Probe des Typs C, die nach

15 - minütiger Einwirkungsdauer und damit ähnlichen Oberflächentemperaturen wie beim trocknen Äquivalenzkörper aus der Labormikrowelle genommen wurde.

Durch die erhöhte Feuchtigkeit wurde ein Teil der einwirkenden Mikrowellen vom Wasser absorbiert. Folglich steigt die benötigte Einwirkungsdauer mit zunehmenden Probekörperabmessungen an, um die gleichen Effekte zu erzielen.

Zusammenfassung der Ergebnisse

- Das Bruchverhalten hängt wesentlich von der Größe der Probekörper ab. Bei den kleineren Probekörperabmessungen des Typs A und B wurde ein schlagartiges Zerplatzen des Betons festgestellt, was häufig bereits zur Trennung der Klebeverbindung zwischen den Holzlamellen und der UHPC-Lamelle führte. Bei den größeren Probekörpern des Typs C konnte die Trennung der Materialien im Nachgang problemlos durch mechanisches Spalten der Verbindung erreicht werden. Unterschiede zwischen den trockenen und feuchten Proben gab es nicht.
- Die benötigte Einwirkungsdauer nimmt mit steigender Probekörpergeometrie zu. Feuchte Probekörper benötigen grundsätzlich länger in der Mikrowelle, um auf ein ähnliches Temperaturniveau wie die trockenen Proben erwärmt zu werden. Ab wann das Lösen der Klebeverbindung bei den Probekörpern von Typ C praktikabel ist, konnte nicht explizit festgestellt werden.
- Die Temperaturen beim Bruch des UHPC liegen zwischen bei 130 - 190°C, die Holzlamellen weisen Oberflächentemperaturen von 65 – 120°C auf. Hinsichtlich Probekörperabmessung und Konfiguration gibt es keine signifikanten Temperaturunterschiede beim Zeitpunkt des Bruchs. Bei Typ C können durch die Dauer der Einwirkung die Temperaturen flexibel gesteuert werden, da kein Zerplatzen des UHPC auftritt.

8.4 Kreislaufkonzept für UHPTW

Um UHPTW-Elemente effektiv in eine ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft zu integrieren, ist es entscheidend, alle Bereiche und Aspekte einer Kreislaufwirtschaft mitzudenken. In Abbildung 96 sind mögliche Schritte eines Lebenszyklus von UHPTW-Elementen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft exemplarisch skizziert. Zunächst das ressourceneffiziente Planen und Konstruieren von zentraler Bedeutung, um möglichst wenig Primär- und Sekundärrohstoffe der Kreislaufwirtschaft zuführen zu müssen. Die UHPTW-Elemente können dabei durch die Vereinigung zweier Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften und Vorteilen einen Beitrag leisten. Ferner ist es erforderlich, bereits bei der Planung das Lebensende des Bauwerks und damit auch der Wandelemente mitzudenken. Höchste Priorität sollte es sein, eine möglichst lange Nutzungsdauer durch intelligente, zeitlose Konzepte zu ermöglichen sowie mögliche Umnutzungen einzuplanen (z.B. Büroräume zu Wohnraum). Wird das Gebäude in seiner ursprünglichen Form nicht mehr benötigt, können bereits bei der Planung die Grundlagen für einen einfachen Umbau oder Modernisierung und damit dem Erhalt der Bausubstanz gelegt werden. Eine intelligente, modulare Bauweise, die die Verwendung von Wandelementen mit einfachen Bauteilanschlüssen (vgl. Kapitel 6) einschließt, ist dabei von zentraler Bedeutung.

Abbildung 96:
Möglicher Materialkreislauf im Zusammenhang der UHPTW



Ist das Gebäude trotz Umnutzung und Umbau nicht mehr zu erhalten, folgt der Rückbau. Bei einem durchdachten und modularen Gebäude aus UHPW-Elementen bietet sich hier vor allem der Vorteil, die Wände

schnell demontieren zu können, ohne die Bauteile zu beschädigen. Nach der Rückbaumaßnahme erfolgt die Entfernung der Einbauteile wie Stromkabel oder Lichtschalter aus den gewonnenen Wandelementen. Nun kann geprüft werden, ob die Wandelemente in dieser oder in modifizierter Form weiterverwendet werden können. Durch die direkte Wiederverwertung einzelner Komponenten für die Herstellung neuer Wandelemente oder die Wiederverwendung ganzer Module für neue Bauwerke kann der Kreislauf bereits geschlossen werden. Sind einzelne Module die Teile der Wand nicht wiederzuverwenden, müssen die einzelnen Komponenten recycelt werden. Dazu werden die verklebten Materialien zunächst voneinander gelöst, um eine sortenreine Trennung zu ermöglichen.

Ein praktikables Konzept zur Umsetzung dieser Trennung könnte das Zerschneiden der Wandelemente in definierte Streifen sein, welche anschließend kontinuierlich durch eine Mikrowellenanlage gefördert werden. Diese Behandlung schwächt die Wirkung des verwendeten Klebstoffs durch hohe Temperaturen entscheidend, und ermöglicht durch eine mechanische Nachbearbeitung die Trennung der miteinander verklebten Lamellen aus Holz und UHPC.

Nach der Trennung kann der UHPC gebrochen und als Recyclingmaterial, beispielsweise im Straßenbau oder als RC-Zuschlag bei der Betonherstellung als Sekundärrohstoff herangezogen werden. Zukünftig könnte die Anwendung der elektrodynamischen Fragmentierung (EDF) eine weitere sortenreinere Trennung der UHPC-Zuschläge ermöglichen, wodurch die gewonnenen Sekundärrohstoffe in hochwertiger Qualität für die Herstellung neuer Baustoffe herangezogen werden können. Die Holzlamellen bieten ebenfalls ein erhebliches Recyclingpotenzial. Nach dem Abhobeln der Klebstoffreste können diese in qualitativ hochwertige Holzprodukte umgewandelt werden, wie neuen UHPTW-Elementen, Fassadenbauteilen oder Holzbausteinen. Aus den Holzbausteinen können beispielsweise neue Holzhäuser errichtet werden, wodurch der Baustoffkreislauf effektiv geschlossen wird. Entstehen bei der Trennung beschädigte Lamellen oder kleinere Teile, können diese zu Brettsperholz oder anderen Holzprodukten verarbeitet werden.

Der Materialfluss aus der Kreislaufwirtschaft sollte minimiert werden. Sind nicht alle Teile und Baustoffe – beispielsweise durch Beschädigung bei Rückbau oder durch Einbauteile – aufzubereiten und dem Baustoffkreislauf zurückzuführen, sollte eine energetische Verwertung oder bei Alternativlosigkeit eine angemessene Deponierung angestrebt werden.

8.5 Zwischenfazit

Die synergetische Nutzung verschiedener Baustoffe, die ihre jeweiligen Stärken in den Bauwerken vereinen, ist ein innovativer und wertvoller Ansatz im Bauwesen. Es ist jedoch entscheidend, dass die Vorteile dieser Materialkombinationen nicht am Ende der Lebensdauer der Bauwerke durch das Fehlen effektiver Kreislaufmöglichkeiten zunichte gemacht werden. Um die Nachhaltigkeit zu gewährleisten, muss bereits bei der Konzeptionierung neuer Verbundmaterialien und in der Planungsphase neuer Bauwerke vorausschauend bedacht werden, wie Materialien am Lebensende den Gedanken der Kreislaufwirtschaft erfüllen können.

Durch die Tastversuche zur Trennung der Klebefuge mittels Mikrowellen konnten vielversprechende Ergebnisse erzielt werden. Die Methodik ermöglicht eine praktikable und saubere Trennung der verklebten Komponenten UHPC und Holz. Die separierten Materialien können dann für eine weitere Verarbeitung oder weiterführende Recyclingmaßnahmen genutzt werden. Für eine industrielle und skalierte Anwendung des untersuchten Trennverfahrens sind jedoch noch weitere Untersuchungen erforderlich. Im Rahmen der weiteren Entwicklung des Verfahrens ist der Umbau der Mikrowellenanlage zu einer Durchlaufmikrowelle denkbar, um eine kontinuierliche Trennung großformatiger Wandelemente zu ermöglichen. Dabei könnten die Wandelemente zunächst in definierte Streifen zugeschnitten werden, die auf die Kapazität der Anlage abgestimmt sind. Dieser Schritt würde es ermöglichen, die Probekörper in einem durchgängigen Prozess durch den Mikrowellenbereich zu führen, was den Ablauf optimieren und die fortlaufende Behandlung mehrerer Wandstreifen ohne Unterbrechung ermöglichen würde.

Ein weiterer Schwerpunkt künftiger Untersuchungen würde in der Folge bei der Abstimmung der Durchfahrgeschwindigkeit und der Nachbearbeitung liegen, um eine möglichst effiziente Trennung

sicherzustellen. Hierbei müssen verschiedene Parameter, wie die Geschwindigkeit, mit der die Wandelemente durch die Mikrowellenanlage transportiert werden, sowie die Intensität der Mikrowellenbestrahlung, untersucht werden. Dabei ist es wichtig, eine Balance zwischen einer vollständigen Trennung der Materialien und der Qualität der getrennten Produkte zu finden, um eine nachfolgende Weiterverwendung der separierten Komponenten zu ermöglichen. Eine optimierte Abstimmung der Durchlaufgeschwindigkeit und Mikrowellenintensität würde auch den Energieeinsatz reduzieren und das Verfahren energieeffizienter gestalten. Zur Beurteilung der Umweltwirkungen und des Ressourceneinsatzes solcher Verfahren wären weiter ökobilanzielle Untersuchungen erforderlich. Ein ökobilanzieller Vergleich mit anderen Recyclingverfahren, z.B. für Stahlbetonbauteile, ist ebenfalls noch durchzuführen und im Kontext der Umweltwirkungen und des Ressourceneinsatzes über den gesamten Lebenszyklus zu untersuchen. Nach der Trennung muss die Qualität der separierten Materialien bewertet werden, um deren potenzielle Weiterverwendung zu bestimmen. Weitere Verarbeitungsschritte hängen von der Reinheit der getrennten Materialien sowie möglichen Beschädigungen ab. Zudem sollte die Ausarbeitung einer Entscheidungsmatrix zur Bewertung der Materialien und der darauffolgenden Verfahrensschritte in künftigen Untersuchungen berücksichtigt werden.

Die UHPTW kann sich gut in die Kreislaufwirtschaft einfügen. Das modulare Konzept ermöglicht einen weitgehend zerstörungsfreien Rückbau und damit die Grundlage für eine Wiederverwendung oder Wiederverwertung. Selbst wenn dieser Ansatz nicht mehr möglich ist, bieten die verklebten Werkstoffe erhebliches Recyclingpotential. Die Mikrowellenversuche haben gezeigt, dass eine sortenreine Trennung der Materialien mit angemessenem Aufwand gewährleistet werden kann und eine Weiterverarbeitung der getrennten Komponenten zu Sekundärrohstoffen prinzipiell möglich ist. Die Vorteile der Ultra High Performing Timber Walls bleiben so auch über den gesamten Lebenszyklus hinweg bestehen.

Die Nachfrage nach intelligent konzipierten Bauteilen wird in der Zukunft voraussichtlich weiter steigen. Solche intelligenten Konzepte sind in der heutigen Zeit unerlässlich, um den Herausforderungen eines nachhaltigen und umweltverträglichen Bauens gerecht zu werden. Durch die Entwicklung und Implementierung dieser Konzepte kann sichergestellt werden, dass die Bauindustrie ihren Teil zur Schonung der natürlichen Ressourcen beiträgt und gleichzeitig ökonomisch effizient bleibt. Die UHPTW kann auch bei einer holistischen Betrachtung diesen Ansprüchen gerecht werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenführung der Ergebnisse

Das Forschungsvorhaben umfasste unterschiedliche Themengebiete die gemeinschaftlich einen Beitrag zur praktischen Anwendung einer ultrahochfesten Verbundwand leisten. In dem Vorhaben konnte gezeigt werden, dass die Klebefuge zwischen ultrahochfesten Beton und Holz sowohl in der Nutzungsklasse 1 als auch in der Nutzungsklasse 2 eine dauerhafte Verbindung darstellt. Während der Langzeitversuche wurde bei den 3-lagigen Prüfkörpern ein Holzversagen und bei den 5-lagigen Prüfkörpern ein Versagen der Klebefuge festgestellt. Da es sich bei den fünf-lagigen Prüfkörpern um ein Versagen der Klebefuge bei deutlich geringeren Lasten handelt ist davon auszugehen, dass die Schädigung durch die erhöhten feuchteinduzierten Spannungen aufgrund der frei bewitterten Hirnholzflächen der Querlagen handelt. In einem geschlossenen Element sind keine entsprechenden Feuchteschwankungen zu erwarten und somit wird die Verklebung als dauerhaft eingestuft.

Im Rahmen einer ökobilanziellen Betrachtung wurde festgestellt, dass das UHPTW Wandelement ein geringeres Treibhausgaspotential mit sich bringt als eine aus statischer Sicht funktional äquivalente Stahlbetonwand. Im Vergleich zu Brettspertholzwänden weist eine UHPTW unter hohen Lasten (hier ab einem achtgeschossigen Mustergebäude) ebenfalls ein geringeres globales Erwärmungspotenzial auf. Dies zeigt, dass der Einsatz von UHPTW Wandelementen in hochbelasteten Bereichen aus umweltwirkungstechnischer Sicht sinnvoll sein kann. Dabei könnte der Einsatz von Elementen mit alternierender UHPC-Lamelle, das globale Erwärmungspotential verringern.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Ökobilanz konnte gezeigt werden, dass unter der Verwendung einer vorgestellten Dämmebene kein Tauwasserausfall und keine Schimmelpilzbildung zu erwarten sind. Hierzu wurden sowohl stationäre Untersuchungen mithilfe des Periodenbilanzverfahrens als auch instationäre Simulationen durchgeführt. Der verhältnismäßig dichte ultrahochfeste Beton und die dadurch entstehende diffusionsdichte Ebene im Bauteil haben dann nur geringfügige Auswirkungen.

Des Weiteren wurden aufbauend auf den ergebnen Geometrien der ökobilanziellen Betrachtung Anschlussdetails entwickelt. Hierbei wurde auf im Holzbau typische Anschlüsse in der Plattformbauweise zurückgegriffen um einerseits einen raschen Baufortschritt und andererseits eine hohe Kompatibilität zu anderen Holzbauteilen zu ermöglichen. Eine hygrothermische Simulation im Anschlussbereich zeigt geringe Auswirkungen von Wärmebrücken und keine Gefahr eines Tauwasserausfalls und einer Schimmelpilzbildung auf.

In Bezug auf den Brandschutz zeigte sich eine gute Symbiose der beiden Materialien. Zur Ermittlung des Temperaturverlaufes wurden kleinformative Versuche nach DIN 4102-8 durchgeführt. Durch die im Brandfall wärmedämmenden Eigenschaften des Holzes können die Temperaturen und die Geschwindigkeit der Temperatureinwirkung auf den ultrahochfesten Beton reduziert werden. Versuche an Prüfzylindern nach unterschiedlichen Erwärmungsszenarien zeigten, dass dadurch die Schädigungen der Betonmatrix reduziert und die Druckfestigkeit erhalten bleibt. In bestimmten Temperaturbereichen sind sogar Steigerungen der Druckfestigkeit zu verzeichnen. Die Steifigkeit des Betons nimmt aufgrund der Schutzwirkung des Holzes nur geringfügig ab.

Abschließend wurde eine Analyse der Recyclingfähigkeit von UHPTW durchgeführt. Es konnte mittels Tastversuchen gezeigt werden, dass eine saubere materielle Trennung prinzipiell möglich ist. Dies bildet die Grundvoraussetzung für einen Baustoffkreislauf.

9.2 Fazit und Ausblick

Das Forschungsprojekt UHPTW-2.0 hatte zum Ziel, die neuartigen Holz-Beton-Verbund Wandbauteile für die praktische Anwendung vorzubereiten. Insgesamt ist festzuhalten, dass eine ultrahochfeste Verbundwand bei hohen Lasten eine gute dauerhafte Alternative ist. Besonders in hochbeanspruchten Bereichen könnte mit diesen Elementen auf die erhöhten Beanspruchungen reagiert werden, ohne einen kompletten Systemwechsel der Konstruktion zu vollziehen. Die Ergebnisse erlauben auch Rückschlüsse auf andere Anwendungssituationen, in denen eine kraftschlüssige Verbindung zwischen ultrahochfesten Beton und Holz mittels Klebstoff erzeugt wird. Ein Beispiel ist die Anwendung in Deckentragwerken in Form einer verklebten Holz Beton Verbunddecke.

Die folgenden Untersuchungen werden vor einer baulichen Anwendung empfohlen. Das Anschlussdetail sollte schallschutztechnisch entweder durch genaue Simulationen oder bestenfalls durch Versuche analysiert werden. Bei einem Verzicht auf Polypropylenfasern sollten großformatige Brandversuche durchgeführt werden, um das Abplatzverhalten ausschließen zu können. Ebenfalls ist bei einem Verzicht auf brandschutztechnische Bekleidung der unsymmetrische Abbrand zu berücksichtigen und in Großversuche zu überprüfen. Die kleinformatischen Überprüfungen zur sortenreinen Trennung sind großformatig zu überprüfen.

Die erzielten Ergebnisse und bauphysikalischen Überlegungen schaffen eine Grundlage für interessierte Unternehmen, die über eine Verwendung von verklebten Bauteilen aus Holz und ultrahochfesten Beton nachdenken. Natürlich sind im Fall einer baulichen Anwendung noch, auf diesen Ergebnissen aufbauende, Verwendbarkeitsnachweise notwendig. Anhand der Ergebnisse kann jedoch das wirtschaftliche Risiko für einen entsprechenden Verwendbarkeitsnachweis abgeschätzt werden. Im Falle einer ersten praktischen Anwendung sollte auf eine universitäre Begleitung zurückgegriffen werden.

10 Literaturverzeichnis

Literatur

- Ashton, L. A.; Bate, S. C. C.; Hill, A. W.; Harris, A. J.; Shennan, D. J. G.; Walley, F. et al. (1961): Discussion. The Fire-Resistance of prestressed concrete beams. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 20 (2), S. 305–320. DOI: 10.1680/iicep.1961.11228.
- Bachmann, H.; Steinle, A.; Hahn, V. (2009): Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau. Sonderdruck aus dem Betonkalender 2009. Berlin: Ernst & Sohn.
- Bartley, Aurélie; Chudalla, Nick; Meschut, Gerson; Wibbeke, Tim Michael (2023): Low temperature debonding of toughened structural adhesive joints: A new approach to repairs in the automotive industry. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 126. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2023.103486.
- BBSR (2021): Energieeffizienzfestlegung für klimaneutrale Neu-/Erweiterungsbauten und Gebäudesanierungen des Bundes. Vorbildfunktion Bundesgebäude für Energieeffizienz. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung (BBSR).
- Becke, Alice; Reiners, Jochen; Ceyda, Sülün (2014): Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH.
- Bentz, D. P. (2000): Fibers, Percolation, and Spalling of High Performance Concrete. In: *ACI Materials Journal* 97 (3), S. 351–359. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/d-bentz/publication/234155149_fibers_percolation_and_spalling_of_highperformance_concrete.
- Brandner, R.; Getternig, W.; Schickhofer, G. (2012): Determination of shear strength of structural and glued laminated timber. In: *CIB-W18 Meeting Vol. 45*.
- Broßat M. (2022): Schallschutz im Holzbau: Konstruktion, Dämmung, Details. Hg. v. Deutsches Architektenblatt. Online verfügbar unter <https://www.dabonline.de/2022/01/27/schallschutz-im-holzbau-konstruktion-trittschall-daemmung-details-nachweise-normen/>, zuletzt geprüft am 27.03.2024.
- BSBK (2020): Baukultur Bericht 2020/21. Öffentliche Räume. Hg. v. Bundesstiftung Baukultur (BSBK).
- dataholz.eu (2024). Hg. v. Holzforschung Austria - Österreichische Gesellschaft für Holzforschung. Online verfügbar unter <https://www.dataholz.eu/>, zuletzt aktualisiert am 27.03.2024.
- Ditter, Jan; Meschut, Gerson; Wibbeke, Tim Michael (2019): Entfüge- und Fügekonzepte für geklebte Leichtbaustrukturen. In: *Lightweight Des* 12 (3), S. 38–45. DOI: 10.1007/s35725-019-0031-9.
- Dougill, J. W. (1972): Modes of failure of concrete panels exposed to high temperatures. In: *Magazine of Concrete Research* 24 (79), S. 71–76. DOI: 10.1680/mac.1972.24.79.71.
- Ehrhart, T.; Brandner, R. (2018): Rolling shear: Test configurations and properties of some European soft- and hardwood species. In: *Engineering Structures* 172, S. 554–572. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.05.118.
- Eisenhut, Lars (2015): Geklebter Verbund aus Holz und hochfestem Beton - Untersuchungen zum Langzeitverhalten. Kassel: Kassel University Press.
- Fehling, E; Schmidt, M; Teichmann T (2005): Entwicklung, dauerhaftigkeit und berechnung ultrahochfester betone (UHPC). Online verfügbar unter <https://scholar.google.de/citations?user=l3xIs9kaaaaj&hl=de&oi=sra>.
- Fehling, E.; Walraven, J.; Schmidt, M.; Fröhlich, S.; Leutbecher, T. (2014): Ultra-high performance concrete UHPC. Fundamentals, design, examples. Berlin: Ernst & Sohn (BetonKalender). Online verfügbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783433604076>.
- Fouad, Nabil A. (Hg.) (2013): Lehrbuch der Hochbaukonstruktionen. 4., vollst. überarb. und aktual. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint: Springer Vieweg.

Frangi, Andrea; Fontana, Mario; Hugi, Erich; Jübstl, Robert (2009): Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire. In: *Fire Safety Journal* 44 (8), S. 1078–1087. DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.07.007.

Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP (2023a): WUFI 2D. Wärme und Feuchte instationär. Version 2D, zuletzt geprüft am 12.12.2023.

Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP (2023b): WUFI Pro. Wärme und Feuchte instationär. Version Pro 6.7, zuletzt geprüft am 12.12.2023.

Friedrichsen, Stefanie (2018): Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Friquin, Kathinka Leikanger (2011): Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber. In: *Fire Mater.* 35 (5), S. 303–327. DOI: 10.1002/fam.1055.

Fröse, Johannes Michael (2018): Optimierung der stofflichen Zusammensetzung von ultrahochfesten Betonnrezepturen zur Steigerung deren thermischer Beanspruchbarkeit. Masterarbeit. Technische Universität München.

Gehri, E. (2010): Shear problems in timber engineering–Analysis and solutions. In: *11th World Conference on Timber Engineering*.

Gräfe, Martin; Merk, M.; Werther, N.; Fülle, C.; Leopold, N.; Sprinz, D. et al. (2015): Regeldetailkatalog für den mehrgeschossigen Holzbau in Gebäudeklasse 4, Bauforschung für die Praxis: Fraunhofer IRB Verlag. Online verfügbar unter <https://scholar.google.de/citations?user=75bmgsuaaaaj&hl=de&oi=sra>.

Hadden, Rory M.; Bartlett, Alastair I.; Hidalgo, Juan P.; Santamaria, Simón; Wiesner, Felix; Bisby, Luke A. et al. (2017): Effects of exposed cross laminated timber on compartment fire dynamics. In: *0379-7112* 91, S. 480–489. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.074.

Hager, I. (2013): Behaviour of cement concrete at high temperature. In: *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* 61 (1), S. 145–154. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0013.

Hager, I.; Pimienta, P. (2004): Mechanical properties of hpc at high temperatures (43). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/pierre-pimienta/publication/293226828_mechanical_properties_of_hpc_at_high_temperatures.

Holzabsatzfonds (Hg.) (2008): Wärmebrücken. Unter Mitarbeit von Jörg Bühler, Werner Eckert, Dominik Herfurth, Peter Jonak, Daniel Kehel, Georg Lange et al. Informationsdienst Holz. Reihe 3: Bauphysik (Teil 2: Wärmeschutz, Folge 7: Wärmebrücken).

Hosser, D.; Kampmeier, B.; Hollmann, D. (2012): Behavior of ultra high performance concrete (UHPC) in case of fire.

Huismann, Sven (2010): Materialverhalten von hochfestem Beton unter thermomechanischer Beanspruchung. 1. Aufl. Berlin: Beuth Verlag GmbH (DAfStb-Heft, 590).

Informationsdienst Holz (2010): Bauen mit Brettsperrholz. Tragende Massivholzelemente für Wand, Decke und Dach. Unter Mitarbeit von P. Mestek, N. Werther und S. Winter. Hg. v. Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. (Reihe 4, Teil 6 Folge 1).

Kalifa, Pierre; Chéné, Grégoire; Gallé, Christophe (2001): High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres. In: *Cement and Concrete Research* 31 (10), S. 1487–1499. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00596-8.

Kaufmann, H. (2017): Atlas Mehrgeschossiger Holzbau. DETAIL Atlas. Unter Mitarbeit von Stefan Krötsch und Stefan Winter. München: Detail Business Information GmbH The (Detail Atlas Ser). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4943513>.

- Khoury, G. A. (2008): Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modelling criteria. In: *Magazine of Concrete Research* 60 (3), S. 189–204. DOI: 10.1680/mac.2007.00042.
- Kippel, M.; Leyder, C.; Frangi, A.; Fontana, M. (2014): Fire Tests on Loaded Cross-laminated Timber Wall and Floor Elements. In: *Fire Saf. Sci.* 11, S. 626–639. DOI: 10.3801/iafss.fss.11-626.
- Klingsch, E.W.H. (2014): Explosive spalling of concrete in fire. ETH Zürich. Online verfügbar unter <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/82978/eth-8557-02.pdf>.
- Klingsch, Eike; Frangi, Andrea; Fontana, Mario (2013): Explosive spalling of concrete in fire: Test report. In: *IBK Bericht* 351. DOI: 10.3929/ethz-a-010076314.
- König, Jürgen (2005): Structural fire design according to Eurocode 5—design rules and their background. In: *Fire Mater.* 29 (3), S. 147–163. DOI: 10.1002/fam.873.
- Kordina K.; Meyer-Ottens, C. (1981): Beton-Brandschutz-Handbuch: Beton-Verlag.
- Krus M. (1996): Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion. In: *IBP-Mitteilung*.
- Liebezeit, S.; Müller, A.; Leydolph, B.; Palzer, U. (2016): Mikrowelleninduziertes Grenzflächenversagen zur Trennung von Materialverbunden. Online verfügbar unter http://www.abw-recycling.de/art/publik/Veroeffentlichungen_2016/2016_MNA_465-480_Liebezeit.pdf.
- Lohmeyer, Gottfried C. O. (1994): Stahlbetonbau. Bemessung, Konstruktion, Ausführung. 5., neubearbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).
- Mahrin, Bernd; Schopbach, Holger (2022): Das virtuelle Digitalgebäude. Bauweisen (Deckenauflagerungen). Hg. v. Bundesbildungszentrum des Zimmerer- und Ausbaugewerbes gGmbH. Online verfügbar unter <https://wiki.bubiza.de/doku.php?id=bauweisen-deckenauflagerung#plattformbauweise>, zuletzt aktualisiert am 24.06.2022, zuletzt geprüft am 09.01.2023.
- Meyer-Ottens, C. (1975): Zur Frage der Abplatzungen an bauteilen aus Beton bei Brandbeanspruchungen. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton* 248. Online verfügbar unter <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573950399340601984>.
- Müller, Anette (2018): Baustoffrecycling. Entstehung - Aufbereitung - Verwertung. Springer Vieweg: MORGAN KAUFMANN.
- Niemz, P.; Sonderegger, W. U. (2021): Holzphysik. Eigenschaften, Prüfung und Kennwerte. München: Carl Hanser Verlag München.
- Oberndorfer, T.; Hunger, F.; Fischer, O. (2021): Ultra High Performing Timber Walls - Einsatz von schlanken Lamellen aus ultrahochfestem Beton in Brettsperrholzelementen zur Steigerung der Tragfähigkeit: Fraunhofer IRB Verlag. Online verfügbar unter <https://www.baufachinformation.de/ultra-high-performing-timber-walls-einsatz-von-schlanken-lamellen-aus-ultrahochfestem-beton-in-brettsperrholzelementen-zur-steigerung-der-tragfaehigkeit/fb/254239>.
- Oc-praktikum (2022): Einsatz alternativer Energiequellen zur Initiierung und Durchführung chemischer Reaktionen und Prozesse: Mikrowellentechnik. Online verfügbar unter https://www.oc-praktikum.de/nop/de/articles/pdf/MicrowaveGeneral_de.pdf.
- Pauli, Martin (2024): Zirkuläre Bauwirtschaft. Wiesbaden: Springer Nature.
- PHI (2015): Qualitätsanforderungen an Passivhäuser. Hg. v. Passivhaus Institut. Online verfügbar unter https://passiv.de/de/02_informationen/02_qualitaetsanforderungen/02_qualitaetsanforderungen.htm, zuletzt aktualisiert am 11.12.2023.

- Pistol K. (2016): Wirkungsweise von Polypropylen-Fasern in brandbeanspruchtem Hochleistungsbeton. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Online verfügbar unter https://opus4.kobv.de/opus4-bam/files/35734/diss146_vt.pdf.
- Rüter, Sebastian (2022): Kapitel 3: zukunftsfähiger baustoff, Der Umweltbeitrag der Holznutzung. Hg. v. Informationsverein Holz e.V. Düsseldorf. Online verfügbar unter <https://informationsdienst-holz.de/urbaner-holzbau/kapitel-3-zukunftsfahiger-baustoff/der-umweltbeitrag-der-holznutzung>, zuletzt aktualisiert am 2022, zuletzt geprüft am 31.02.2022.
- Sagmeister, Bernhard (2017): Maschinenteile aus zementgebundenem Beton: Beuth Verlag GmbH.
- Saito H. (1966): Explosive Spalling of Prestressed Concrete in Fire. In: *Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering* 15 (2), S. 23–30. DOI: 10.11196/kasai.15.23.
- Sandtner, G. (2016): Fügetechnik im UHPC - Schalenbau. Dissertation. Technische Universität Graz.
- Schmid, J.; Klippel, M.; Frangi, A. (2017): Brettsperrholz im Brandfall. Online verfügbar unter https://www.forum-holzbau.ch/pdf/28_hbs17_schmid.pdf.
- Schneider, U. (1973): Zur kinetik festigkeitsmindernder Reaktionen in Normalbetonen bei hohen Temperaturen.
- Schneider, Ulrich (1982): Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen. = Behaviour of concrete at high temperatures. Berlin: Ernst (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, H. 337).
- Sedlbauer, K. (2001): Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Online verfügbar unter <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/8467d51c-8628-4436-9df1-15e6f2cdea51/details>.
- Seifert, S.; Thome, V.; Karlstetter, C. (Hg.) (2014): Elektrodynamische Fragmentierung. Eine Technologie zur effektiven Aufbereitung von Abfallströmen (7).
- Sertmehmetoglu Y. (1977): On a mechanism of spalling of concrete under fire conditions. University of London.
- Silva Padilla, R. C. (2023): Hygrothermische Untersuchung für eine Ultra-High-Performing-Timber-Wall (UHPTW). Bachelorarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Stadler, Anna (2022): Entwicklung funktionaler Bauteilanschlüsse für UHFB-Holz-Verbundbauteile. Masterarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Sudholt-Wasemann (2023): Ultra High Performance Concrete. Der innovative hightech Werkstoff. Hg. v. Sudholt-Wasemann. Online verfügbar unter <https://www.sudholt-wasemann.de/de/technologie>, zuletzt geprüft am 08.02.2023.
- Teibinger, Martin (2017): Brandbemessung im Holzbau. Online verfügbar unter https://derteibinger.at/wordpress/wp-content/uploads/2017/01/bemessung_im_brandfall.pdf.
- Thome, V. (2023): Innovatives Aufbereitungsverfahren für Altbeton zur Rückgewinnung sekundärer Rohstoffe. Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP. Technische Universität München, 2023.
- Wagner, Anna; Winter, Klara; Nestmann, Anna; Ott, Stephan; Winter, Stefan; Fischer, Oliver (2023): Comparative life cycle assessment of timber-concrete-composite walls with concrete and CLT-wall elements. In: *World Conference on Timber Engineering (WCTE)*, S. 967–975. DOI: 10.52202/069179-0132.
- Way, R.; Wille, K. (2012): Material Characterization of an Ultra High-Performance-Fibre Reinforced Concrete under Elevated Temperatures. Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, pp. 565-572.
- Weigler, Helmut; Karl, Sieghart (1989): Beton. Arten, Herstellung, Eigenschaften. Berlin: Ernst (Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau).

Werther, N. (2016): Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungsverfahren. Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

Winter, S.; Mestek, P. (2009): Vorlesung zu Brettsper Holz - Konstruktionen. Hg. v. Technische Universität München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

Wolf, Marco (2016): Optimierung von Ultra-Hochleistungsbeton zur Verwendung als Konstruktionsmaterial für statisch-konstruktive Vacuum Insulated Wall (VIW-) Elemente. Dissertation. Universitätsbibliothek, Magdeburg.

Wood, Lyman W. (1951): Relation of Strength of Wood to Duration of Load: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

World Urbanization Prospects - Population Division (2022). Hg. v. United Nations. Online verfügbar unter <https://population.un.org/wup/>, zuletzt aktualisiert am 12.04.2022, zuletzt geprüft am 12.04.2022.

Xiong, Ming-Xiang; Richard Liew, J. Y. (2015): Spalling behavior and residual resistance of fibre reinforced Ultra-High-Performance-Concrete after exposure to high temperatures. In: *materconstrucc* 65 (320), e071. DOI: 10.3989/mc.2015.00715.

Zhu, Yanping; Hussein, Husam; Kumar, Aditya; Chen, Genda (2021): A review: Material and structural properties of UHPC at elevated temperatures or fire conditions. In: *Cement and Concrete Composites* 123, S. 104212. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104212.

Zhukov, V. V. (1975): Explosive failure of concrete during a fire (Translation No. DT).

Normen und Richtlinien

DIN EN 338: Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Juli 2016.

DIN EN ISO 10456: Baustoffe und Bauprodukte. Deutsches Institut für Normung e. V., Mai 2010.

BayBo: Bayrische Bauordnung (BayBo). Bayrisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, 2007. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayBO>true>.

DIN 4102-8: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 8: Kleinprüfstand. Deutsches Institut für Normung e.V., Oktober 2003.

DIN CEN/TS 19103: DIN CEN/TS 19103:2022-02. Deutsches Institut für Normung e.V., Februar 2022.

DIN V 18599-2: Energetische Bewertung von Gebäuden. Deutsches Institut für Normung e. V., September 2018.

DIN EN 1991-1-1: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke. Deutsches Institut für Normung e.V., Dezember 2012.

DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Deutsches Institut für Normung e.V., Januar 2011.

DIN EN 1992-1-2: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Tragwerksbemessung für den Brandfall. Deutsches Institut für Normung e.V., Dezember 2010.

DIN EN 1995-1-2: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-2 Allgemeines - Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsches Institut für Normung e.V., Dezember 2010.

DIN EN 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten -Teil 1-1: Allgemeines- Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsches Institut für Normung e.V., Dezember 2010.

WTA 6-8: Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen - Vereinfachte Nachweise und Simulation. Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., August 2016.

KrWG: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, Kreislaufwirtschaftsgesetz. Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz, 2012. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>.

GEG: Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze, 2020.

DIN EN 16449:2014-06: Holz und Holzprodukte – Berechnung des biogenen Kohlenstoffgehalts im Holz und Umrechnung in Kohlenstoffdioxid. Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 2014.

DIN EN 408: Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften. Deutsches Institut für Normung e.V., Oktober 2012.

DIN EN 14080: Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen. Deutsches Institut für Normung e.V., September 2013.

DIN EN 16351: Holzbauwerke - Brettspertholz - Anforderungen. Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 2021.

DIN 68800-2: Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Deutsches Institut für Normung e. V., Februar 2022.

DIN EN 301:2018-01: Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen. Deutsches Institut für Normung e.V.

MHolzBauRL 2022: Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL). Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz, Oktober 2022.

DIN EN 15978:2012-10: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode. Deutsches Institut für Normung e.V., Oktober 2012.

DIN EN 15804:2022-03: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Deutsches Institut für Normung e.V., März 2022.

DIN EN 1991-1-1/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkung auf Tragwerke. Deutsches Institut für Normung e.V., Dezember 2010.

DIN EN 1992-1-2/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter -Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Tragwerksbemessung für den Brandfall. Deutsches Institut für Normung e.V., Dezember 2010.

DIN 1045-1:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Deutsches Institut für Normung e. V., August 2008.

DIN EN ISO 14067:2019-02: Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung. Deutsches Institut für Normung e.V., Februar 2019.

DIN EN ISO 14044:2021-02: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Deutsches Institut für Normung e.V., Februar 2021.

DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Deutsches Institut für Normung e.V., Februar 2021.

DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Deutsches Institut für Normung e. V., Februar 2013.

DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz. Deutsches Institut für Normung e. V., Oktober 2018.

DIN 4108 Beiblatt 2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Deutsches Institut für Normung e. V., Juni 2019.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wandaufbau der ultrahochfesten Verbundwand aus Holz und UHPC-Lamellen	11
Abbildung 2: Lage der Jahrringe zur Klebefuge - beispielhaft dargestellt am Prüfkörper 06b, welcher bereits einer Delaminierungsprüfung unterzogen wurde	15
Abbildung 3: Delaminierungswerte der Verbundprüfkörper mit unterschiedlich bearbeiteten UHPC-Oberflächen	16
Abbildung 4: Ansicht und Querschnitt der Scherprüfkörper; links: dreilagiger Prüfkörper; rechts: fünflagiger Prüfkörper – Maße in [cm]	19
Abbildung 5: Prüfaufbau der Kurzzeitscherversuche	21
Abbildung 6: Prüfhäuser der Langzeitscherversuche in NKL2	22
Abbildung 7: Prüfaufbau der Langzeitprüfstände	23
Abbildung 8: Eingebauter 3-lagiger Prüfkörper mit Messtechnik und Feuchtesensoren	24
Abbildung 9: Eingebauter 3-lagiger Prüfkörper (links) und 5-lagiger Prüfkörper (rechts) zur Prüfung der Restscherfestigkeiten mithilfe eines optischen Messsystems (Istra 4D)	25
Abbildung 10: Kraftverlauf während der Langzeitversuche in der NKL 1 der 3-lagigen Prüfkörper mit eingezeichneten Versagenszeitpunkt der Prüfkörper (rot) und Zeitpunkten des Nachspannens (blau strichliert)	29
Abbildung 11: Kraftverlauf während der Langzeitversuche in der NKL 1 der 5-lagigen Prüfkörper mit eingezeichneten Versagenszeitpunkt der Prüfkörper (rot) und Zeitpunkten des Nachspannens (blau strichliert)	30
Abbildung 12: Kraftverlauf während der Langzeitversuche in der Nutzungsklasse 2 der 3-lagigen Prüfkörper anhand der Nachspannprotokolle mit eingezeichneten Versagenszeitpunkt der Prüfkörper (rot) und Zeitpunkten des Nachspannens (blau strichliert)	31
Abbildung 13: Kraftverlauf während der Langzeitversuche in der NKL 2 der 5-lagigen Prüfkörper anhand der Nachspannprotokolle mit eingezeichneten Versagenszeitpunkt der Prüfkörper (rot) und Zeitpunkten des Nachspannens (blau strichliert)	31
Abbildung 14: Temperatur und relative Luftfeuchte in der NKL 1 mit eingezeichneten Versagenszeitpunkten	32
Abbildung 15: Holzfeuchte in der NKL 1 mit eingezeichneten Versagenszeitpunkten	33
Abbildung 16: Temperatur und relative Luftfeuchte in der NKL 2 mit eingezeichneten Versagenszeitpunkten	34
Abbildung 17: Holzfeuchte in der NKL 2 mit eingezeichneten Versagenszeitpunkten für die 3-lagigen Prüfkörper (oben) und 5-lagigen Prüfkörper (unten)	35
Abbildung 18: Risse in Klebefuge (schwarzer Pfeil) und Risse in Holz (graue Pfeile) am versagten 5-lagigen Prüfkörper C1K2_NKL2_5_2	38
Abbildung 19: Bruchbild C1K1_NKL2_3 nach Prüfung der Restscherfestigkeit	40
Abbildung 20: Vergleich der Restschubfestigkeiten mit den Schubfestigkeiten mit eingezeichneten Erwartungswerten nach Brandner et al. (2012) und Gehri (2010)	41
Abbildung 21: Bruchbild des Prüfkörpers C1K2_NKL2_5_4 nach Prüfung der Restfestigkeit	42

Abbildung 22: Risse in Klebefuge (schwarzer Pfeil) und Risse in Holz (graue Pfeile) an ausgewählten nicht versagten 5-lagigen Prüfkörpern	42
Abbildung 23: Vergleich der Restscherfestigkeit mit Rollschubfestigkeit nach Ehrhart und Brandner (2018)	43
Abbildung 24: Ergebnisse des optischen Messsystems für die Schubverzerrung kurz vor dem Versagen der Prüfkörper	44
Abbildung 25: Ergebnisse des optischen Messsystems für die Verschiebung in y-Richtung kurz vor dem Versagen der Prüfkörper	44
Abbildung 26: Fiktives statisches System - Darstellung der betreffenden Wand in rot	47
Abbildung 27: Prinzipielles Modell für die Bemessung der Wandaufbauten (maßstabsfrei)	47
Abbildung 28: Möglicher Aufbau eines hybriden Wandbauteils (nach Wagner et al. 2023)	50
Abbildung 29: Volumen der Wandbauteile [m^3] (Hybrid, BSP, Stahlbeton) abhängig der Geschosszahl je m^2 Wandfläche	52
Abbildung 30: Volumen [m^3] einzelner Baustoffe des Hybrid-Bauteils abhängig der Geschosszahl je m^2 Wandfläche	53
Abbildung 31: GWP-fossil und GWP-biogen der Wandbauteile abhängig der Geschosszahl (Module A1-3)	54
Abbildung 32: GWP-gesamt der Wandbauteile abhängig der Geschosszahl (Module A1-3 mit C1-3)	55
Abbildung 33: Relative Heißdruckfestigkeit eines normalfesten, eines hochfesten und eines ultrahochfesten Betons in Abhängigkeit der Temperatur	59
Abbildung 34: Relative Restdruckfestigkeit eines hochfesten und ultrahochfesten Betons in Abhängigkeit der maximalen Temperatur	60
Abbildung 35: Ansicht eines Prüfkörpers vor dem Einbau (links) und Dreitafelprojektion des Prüfkörpers mit Maßen in Zentimetern (rechts)	62
Abbildung 36: Öffnung des Prüfofens (links) und vor der Öffnung eingebauter Prüfkörper (rechts)	63
Abbildung 37: Gemittelte Temperatur-Zeit-Verläufe in den Kontaktflächen der einzelnen Lamellenlagen	64
Abbildung 38: Prüfkörper unter einer Brandbeanspruchung nach Einheitstemperaturkurve nach 60 Minuten (links) und 66 Minuten (rechts)	64
Abbildung 39: Versuchskonfiguration mit Holz auf Rollschub (links) und mit Holz auf Längsschub (rechts)	66
Abbildung 40: Eingebauter Prüfkörper zur Bestimmung der Restschwerfestigkeit	67
Abbildung 41: Prüfkörperbezeichnungen für die Versuche der Restscherfestigkeit nach einer Temperatureinwirkung mit gekennzeichnete Versuchskonfiguration, Versagensart und falls vorhanden maximale Temperatur	67
Abbildung 42: Darstellen der unterschiedlichen Versagensarten am Beispiel der Prüfkörper J, G und F	68
Abbildung 43: Maximale Schubspannungen in der Klebefuge zwischen Holz und Beton differenziert nach Versuchskonfiguration und Versagensart	68
Abbildung 44: Betrachtete Temperatureinwirkungen dargestellt als Temperatur referenziert zur Zeit	70
Abbildung 45: Muffelofen mit Metallschutzkäfig aus feuerbeständigem Stahl (links) und Prüfkörperanordnung im Muffelofen (rechts)	71
Abbildung 46: Durch eine Temperatureinwirkung von 5 K/min bei 280 – 330 °C explosionsartig abgeplatzte Prüfkörper	72
Abbildung 47: Druckfestigkeiten im Ausgangszustand (kalt)	73

Abbildung 48: Oberflächen der Mischungen A und C kalt und nach einer Temperaturbeanspruchung von 5 K/min bis auf 1006°C	74
Abbildung 49: Absolute (links) und relative (rechts) Restdruckfestigkeiten der betrachteten Mischungen bei unterschiedlichen Temperatureinwirkungen	75
Abbildung 50: Relative Restdruckfestigkeiten der unterschiedlichen Betonmischungen in Abhängigkeit der Temperatureinwirkung	76
Abbildung 51: Elastizitätsmodul im Ausgangszustand bei 20°C	77
Abbildung 52: Absolute und relative Elastizitätsmodule der betrachteten Mischungen nach unterschiedlichen Temperatureinwirkungen	78
Abbildung 53: Relativer Elastizitätsmodul der unterschiedlichen Betonmischungen in Abhängigkeit der Temperatureinwirkung	79
Abbildung 54: Systematische Darstellung der unterschiedlichen Wand-Decken Konstruktionsweisen	81
Abbildung 55: Skizze und Nummerierung von unterschiedlichen Wand-Decken Knotenpunkten in einem Gebäude mit UHPTW	82
Abbildung 56: Fügetechniken für Brettsperrholz (links) und deren Übertragung auf eine ultrahochfeste Betonwand (rechts) angelehnt an Winter und Mestek (2009)	83
Abbildung 57: Holzbasierte Fügungstechniken für BSP (links) und deren Übertragung auf eine ultrahochfeste Verbundwand (rechts)	84
Abbildung 58: Varianten für Eckanschlüsse von Brettsperrholz (links) und angepasst für eine ultrahochfeste Verbundwand (rechts) angelehnt an Gräfe et al. (2015)	84
Abbildung 59: Außenwandanschluss mit Brettsperrholzelementen (Orientierung an dataholz.eu (2024) und Informationsdienst Holz (2010))	85
Abbildung 60: Anschlüsse im Betonfertigteilbau mit Ortbeton (Orientierung an Lohmeyer (1994))	86
Abbildung 61: Anschlussvariante mit Zugankern	87
Abbildung 62: Anschlussvariante mit Gewindestangen	88
Abbildung 63: Anschlussvariante mit Ortbeton	89
Abbildung 64: Anschlussvariante mit Vorspannung	90
Abbildung 65: Anschlussvariante mit Mini-Element	91
Abbildung 66: Außenwandknoten Variante Mini-Element	92
Abbildung 67: Innenwandknoten Variante Mini-Element	93
Abbildung 68: Bauablauf für die Variante mit Mini-Element exemplarisch für den Außenwandanschluss	94
Abbildung 69: Herleitung der angenommenen Feuchtespeicherfunktion für UHPC	98
Abbildung 70: Betrachtetes Regelelement mit den Abmessungsbereichen für alle untersuchten Varianten	100
Abbildung 71: Darstellung des hygrothermisch untersuchten Anschlussbereiches	100
Abbildung 72: Grafische Darstellung eines Bauteils mit 3 Ebenen und drei Fällen der Wasserdampfdruckverteilung (p) mit dem entsprechenden raumseitigen Dampfdruck (p_i) und dem außenseitigen Dampfdruck (p_e) und möglichen Sättigungsdampfdruckverteilungen (p_{sat})	101
Abbildung 73: Grafische Darstellung der Partialdampfdruckverteilung (p) und der Sättigungsdampfdruckverteilung (p_{sat}) der Variante 1E mit Nummerierung und schematischer Darstellung der Schichten	105

Abbildung 74: Grafische Darstellung der Partialdampfdruckverteilung (p) und der Sättigungsdampfdruckverteilung (p_{sat}) der Variante 1 mit Nummerierung und schematischer Darstellung der Schichten	105
Abbildung 75: Grafische Darstellung der Partialdampfdruckverteilung (p) und der Sättigungsdampfdruckverteilung (p_{sat}) der Variante 1 mit Innendämmung und Gipskartonplatten sowie Nummerierung und schematischer Darstellung der Schichten	106
Abbildung 76: Gesamtwassergehalt der Variante 1, Variante 1E und Variante 1 mit Innendämmung über einen Simulationszeitraum von 3 Jahren	107
Abbildung 77: Relative Luftfeuchte der Variante 1 in den einzelnen Bauteilschichten über einen Simulationszeitraum von 3 Jahren	107
Abbildung 78: Wassergehalt der Variante 1 in Masseprozent in den einzelnen Bauteilschichten über einen Simulationszeitraum von 3 Jahren	108
Abbildung 79: Temperatur zu relativer Feuchte an der Innenoberfläche der Variante 1 über einen Simulationszeitraum von 3 Jahren mit eingezeichneten Grenzisoplethen (- - LIM _{Bau-I} und - LIM _{Bau-II}) (Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP 2023b)	109
Abbildung 80: Vergleich der relativen Luftfeuchte in Schicht 3 der Variante 1, Variante 1E und Variante 1 mit Innendämmung über einen Simulationszeitraum von 3 Jahren	109
Abbildung 81: Vergleich des Wassergehaltes in Schicht 3 der Variante 1, Variante 1E und Variante 1 mit Innendämmung über einen Simulationszeitraum von 3 Jahren	110
Abbildung 82: Gesamtwassergehalt im Anschlussbereich über den Simulationszeitraum von 3 Jahren	111
Abbildung 83: Temperaturen (links) und relative Luftfeuchte (rechts) im Anschlussbereich für den Sommerfall (oben) und den Winterfall (unten)	112
Abbildung 84: Schematische Darstellung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen (BSBK 2020)	115
Abbildung 85: Schematische Darstellung der Funktionsweise der elektrodynamischen Fragmentierung (Thome 2023)	118
Abbildung 86: Schematische Darstellung des Wirkungsprinzips von Mikrowellen (nach Oc-praktikum (2022))	119
Abbildung 87: Unterschiedliche Abmessungen und Typenbezeichnungen der untersuchten Probekörper	120
Abbildung 88: Wässerung der Prüfkörper	121
Abbildung 89: Versuchsaufbau und Durchführung der Mikrowellenversuche	121
Abbildung 90: Exemplarische Oberflächentemperaturen nach Mikrowelleneinwirkung beim Prüfkörpertyp B	122
Abbildung 91: Exemplarische Bruchbilder des Probekörpertyps A (links) und des Probekörpertyps B (rechts)	123
Abbildung 92: Wärmebildaufnahme bei stehender Anordnung in der Mikrowelle und Versuchskörpertyp C kurz nach Beenden der Mikrowelleneinwirkung	123
Abbildung 93: Rauchentwicklung in der Labormikrowelle (links) und verschmorte Stellen aufgrund eingeklebter Messkabel im Probekörper (rechts)	124
Abbildung 94: Flächiges Ablösen der UHPC Lamelle (links) und Verbleib des Klebers auf den Holzlamellen (rechts) an den Prüfkörpern des Typs C	125

Abbildung 95: Ein Prüfkörper vor (links) und ein Prüfkörper nach (rechts) der Nachbehandlung der verklebten Holzoberfläche	125
Abbildung 96: Möglicher Materialkreislauf im Zusammenhang der UHPTW	127

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die unterschiedlichen Oberflächenbearbeitungen und die jeweils zur Verfügung stehende Scherfugenanzahl	14
Tabelle 2: Verklebungskombinationen der dreilagigen Verbundprüfkörper, welche im Rahmen der Kurzzeitscherversuche geprüft werden	20
Tabelle 3: Scherfestigkeiten der Kurzzeitscherversuche; mit $\bar{x}$ = Mittelwert; s = Standardabweichung; Var = Variationskoeffizient; rot gekennzeichnet sind unbrauchbare Ergebnisse	27
Tabelle 4: Prüfkörperkombinationen in NKL 1 und NKL 2, welche im Rahmen der Langzeitversuche untersucht werden	28
Tabelle 5: Zusammenstellung der Versagensarten und Lastniveaus sowie Lastaufbringung und hygrothermische Randbedingungen der 3-lagigen Prüfkörper in der NKL 1	36
Tabelle 6: Zusammenstellung der Versagensarten und Lastniveaus sowie Lastaufbringung und hygrothermische Randbedingungen der 3-lagigen Prüfkörper in der NKL 2	37
Tabelle 7: Zusammenstellung der Versagensarten und Lastniveaus sowie Lastaufbringung und hygrothermische Randbedingungen der 5-lagigen Prüfkörper in der NKL 1 und 2	39
Tabelle 8: Auf Restschubfestigkeit geprüfte 3-lagige Prüfkörper mit angegebener Scherfestigkeit bei Versagen	39
Tabelle 9: Auf Restschubfestigkeit geprüfte 5-lagige Prüfkörper mit angegebener Scherfestigkeit bei Versagen	41
Tabelle 10: Bemessungsergebnisse möglichst funktional äquivalenter Wandbauteile in unterschiedlicher Bauweise abhängig der Geschosszahl (Angaben zu: Querschnittsdicke [mm] und Ausnutzung des Querschnitts [%])	49
Tabelle 11: Zusammensetzung und Bezeichnung der untersuchten Betonmischungen	69
Tabelle 12: Notwendige Materialdaten für die hygrothermische Betrachtung der Materialien Holz, Brettsperholz, Beton und ultrahochfestem Beton unter Normaltemperatur	97
Tabelle 13: Zusammenstellung der unterschiedlichen Varianten sowie die berechneten stationären Wärmedurchgangskoeffizienten	99
Tabelle 14: Randbedingungen des Periodenbilanzverfahrens nach DIN 4108-3	101
Tabelle 15: Materialdaten für die hygrothermische Untersuchung von Polyurethanklebstoff nach Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP (2023b)	102
Tabelle 16: Simulationsparameter für eine eindimensionale hygrothermische Simulation	102
Tabelle 17: S_d -Wert und Sättigungsdampfdruckverlauf der einzelnen Schichten der betrachteten Varianten 1 und 1E	103

Anlagen

Anlage 1

Delaminierungsversuche

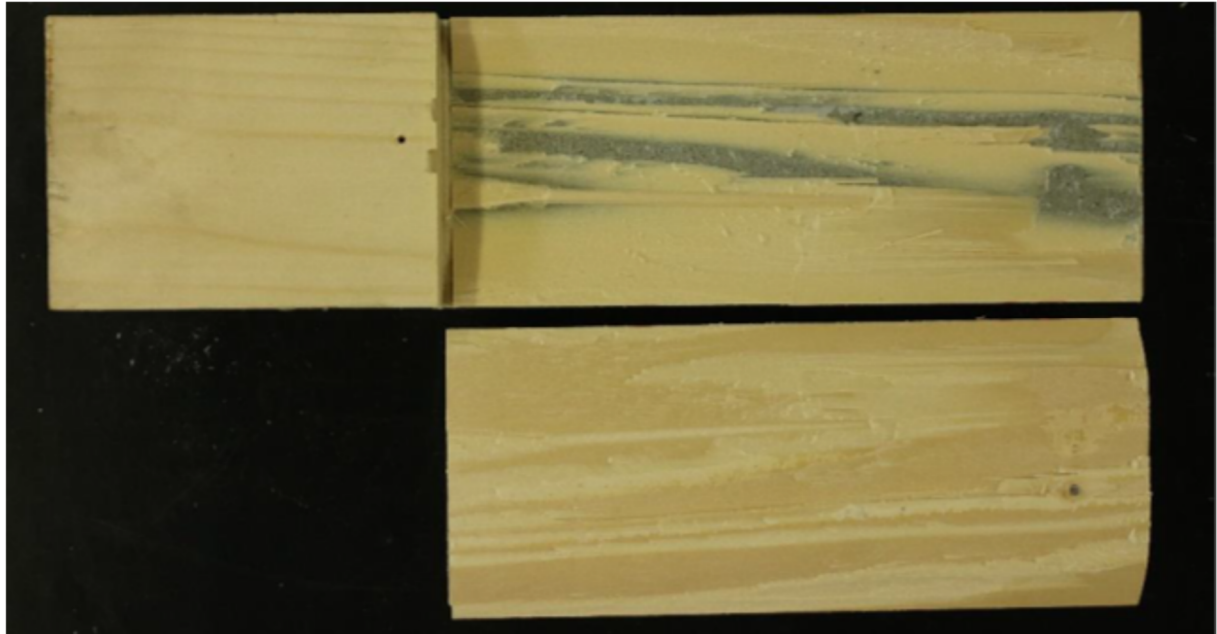
Im Folgenden sind die Scans der Delaminierungsversuche eingefügt. Eine Zuordnung der Zahlen auf den Prüfkörpern zu den Oberflächenbehandlungen ist der folgenden Tabelle zu entnehmen. Das Kürzel a oder b beschreibt die Betrachtungsrichtung des Scans.

Prüfkörperbezeichnung Nummer	Oberflächenbehandlung
01-04	m.F. SC36 - links o.F. SC36 - rechts
05-08	m.F. SC46 -links o.F. SC26 - rechts
09-12	GK1-C60
13-16	GK0-C24-36
17-20	m.F. SC60
20-24	m.F. SC26 - links Schalglatt - rechts
24-27	o.F. SC60
28-31	m.F. SC36

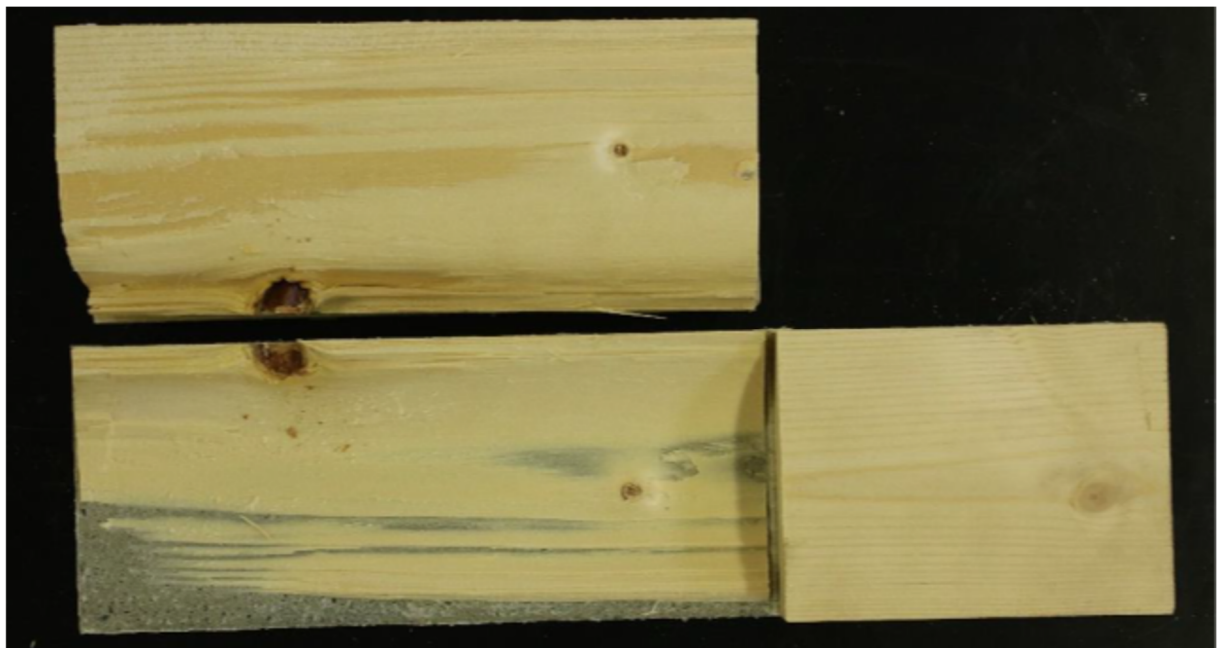
Anlage 2

Kurzzeitscherfestigkeiten

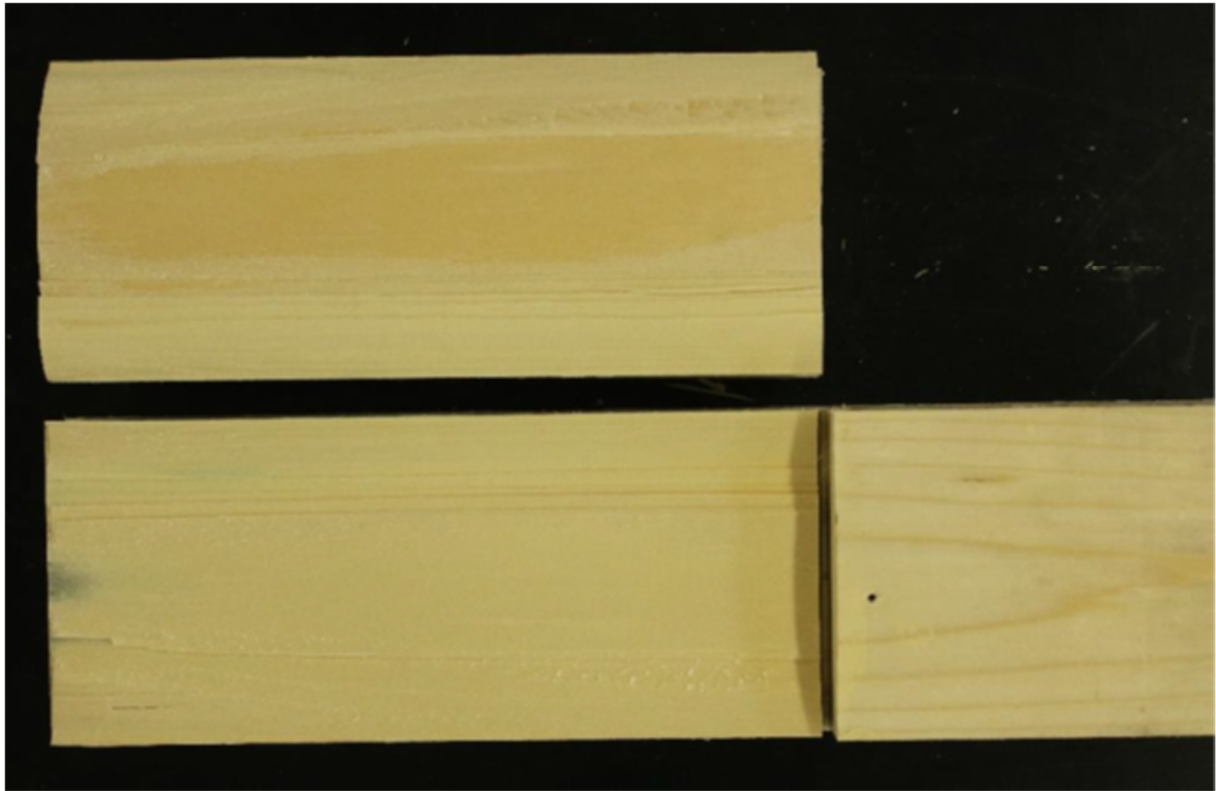
Prüfkörper K1_1



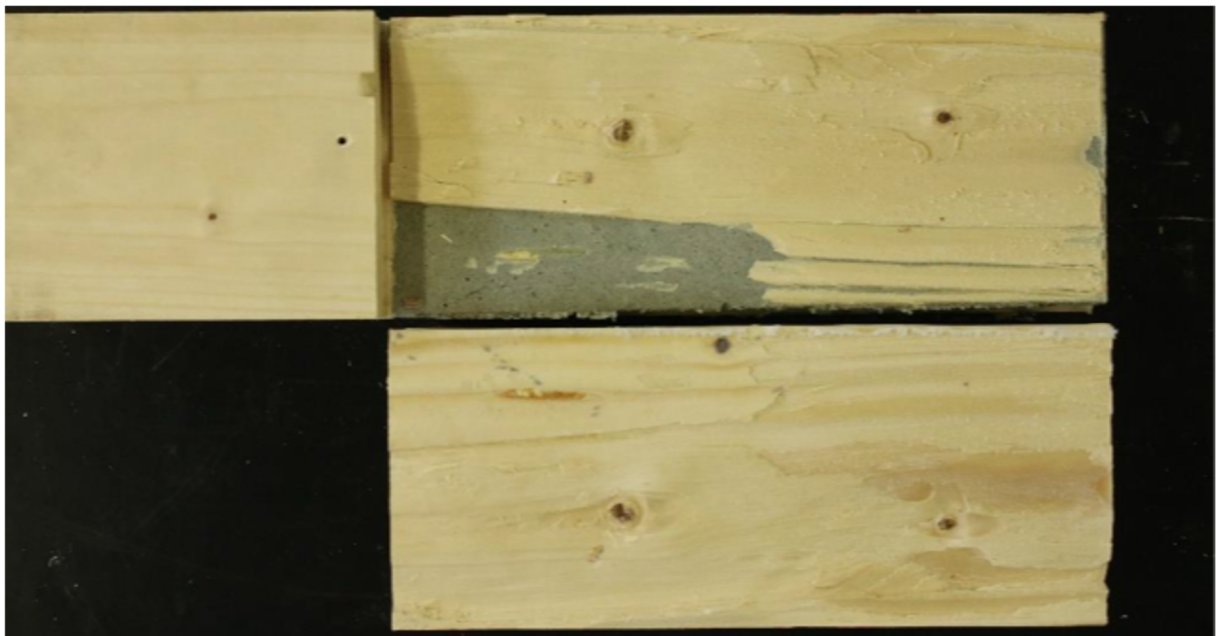
Prüfkörper K1_2



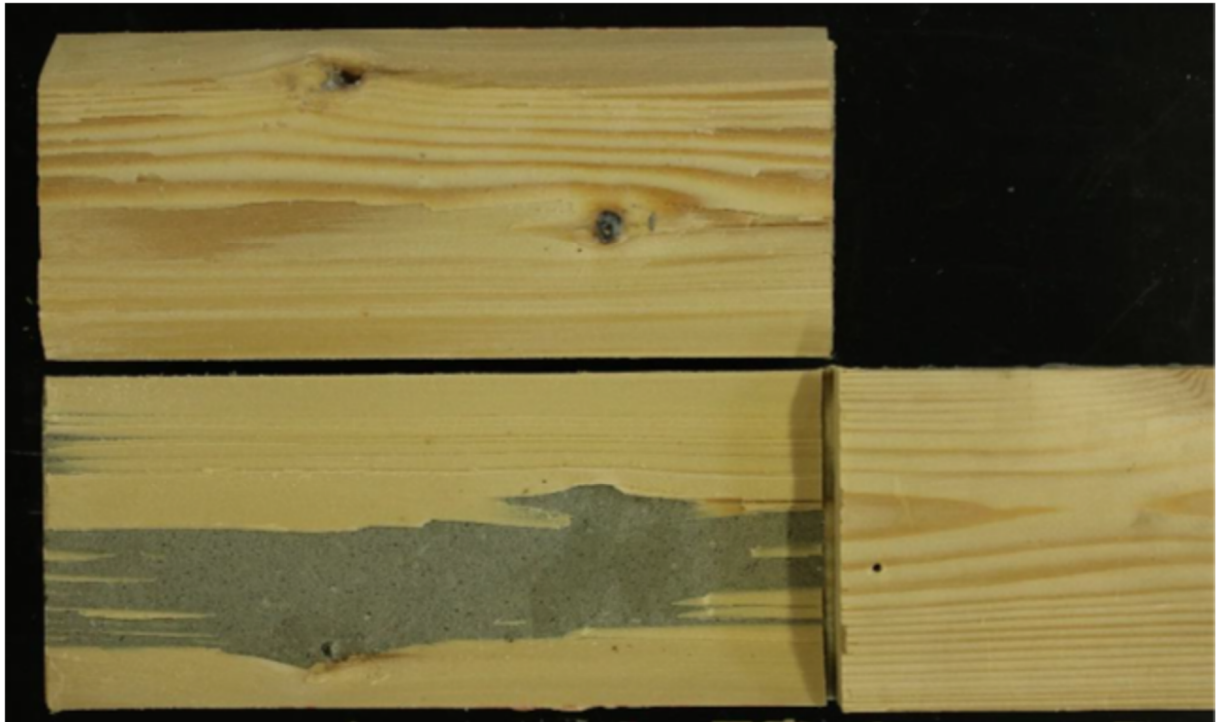
Prüfkörper K1_3



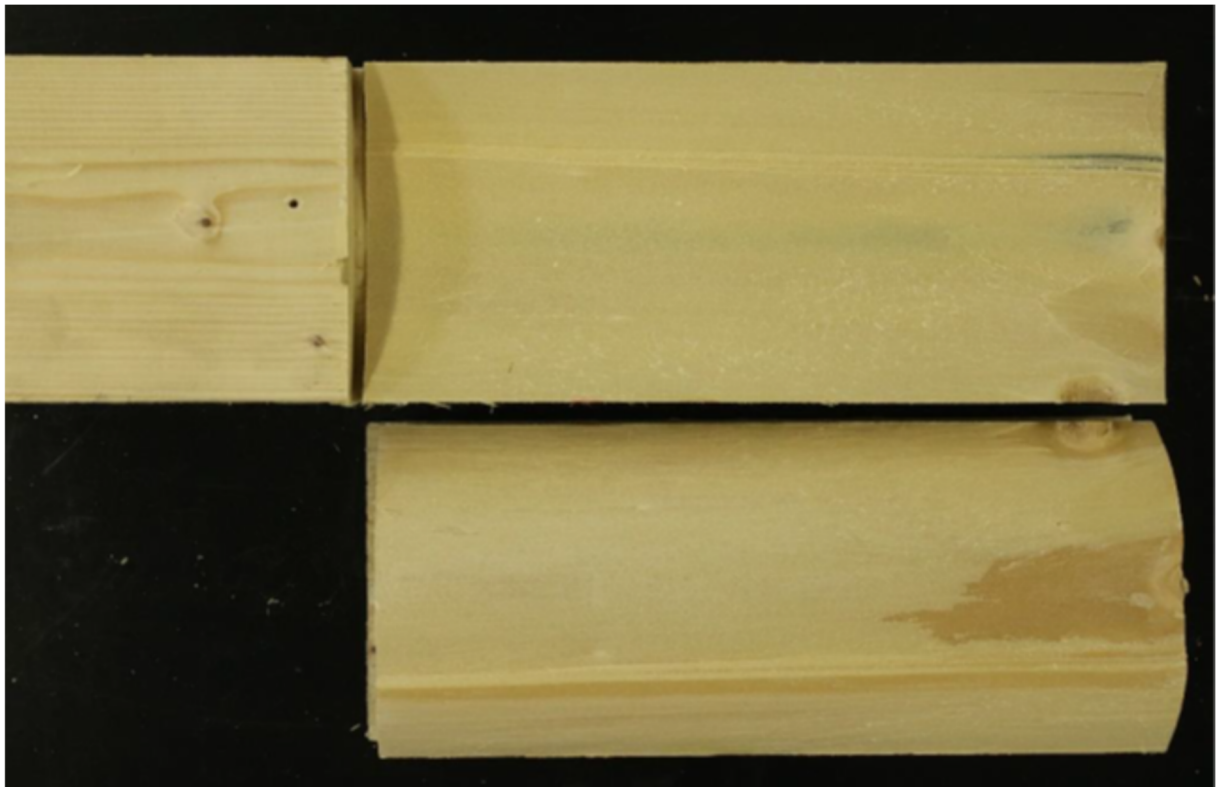
Prüfkörper K1P/A_1



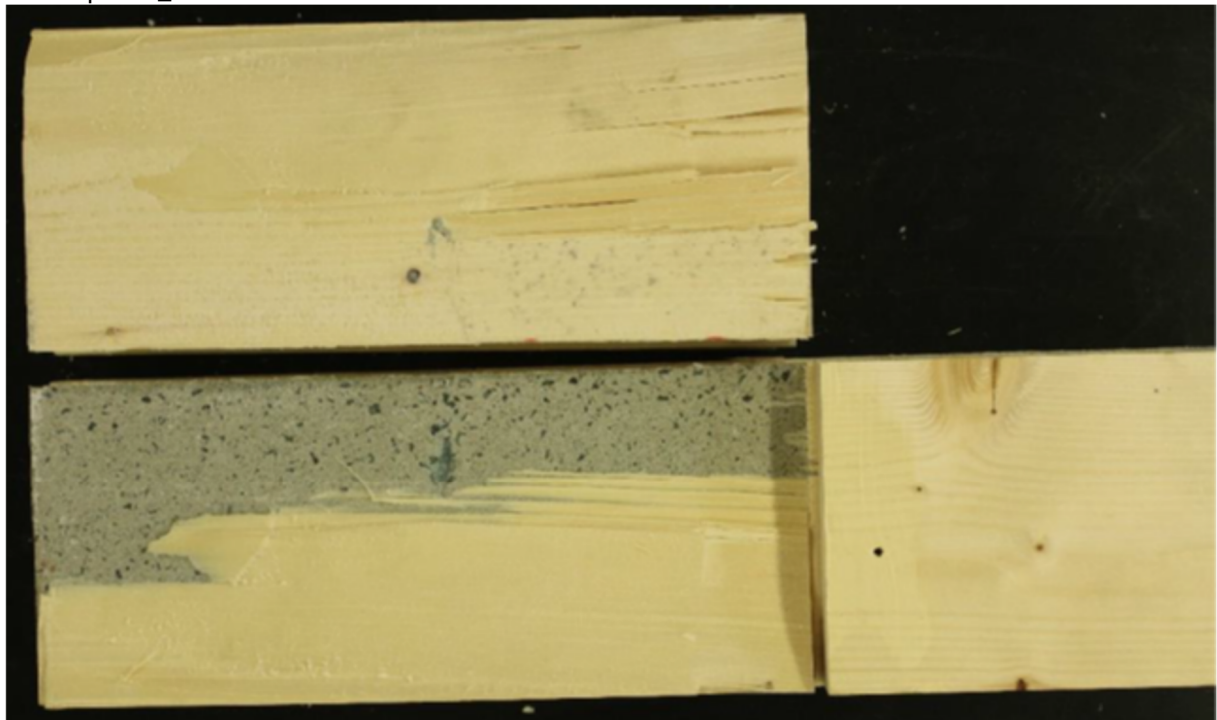
Prüfkörper K1P/A_2



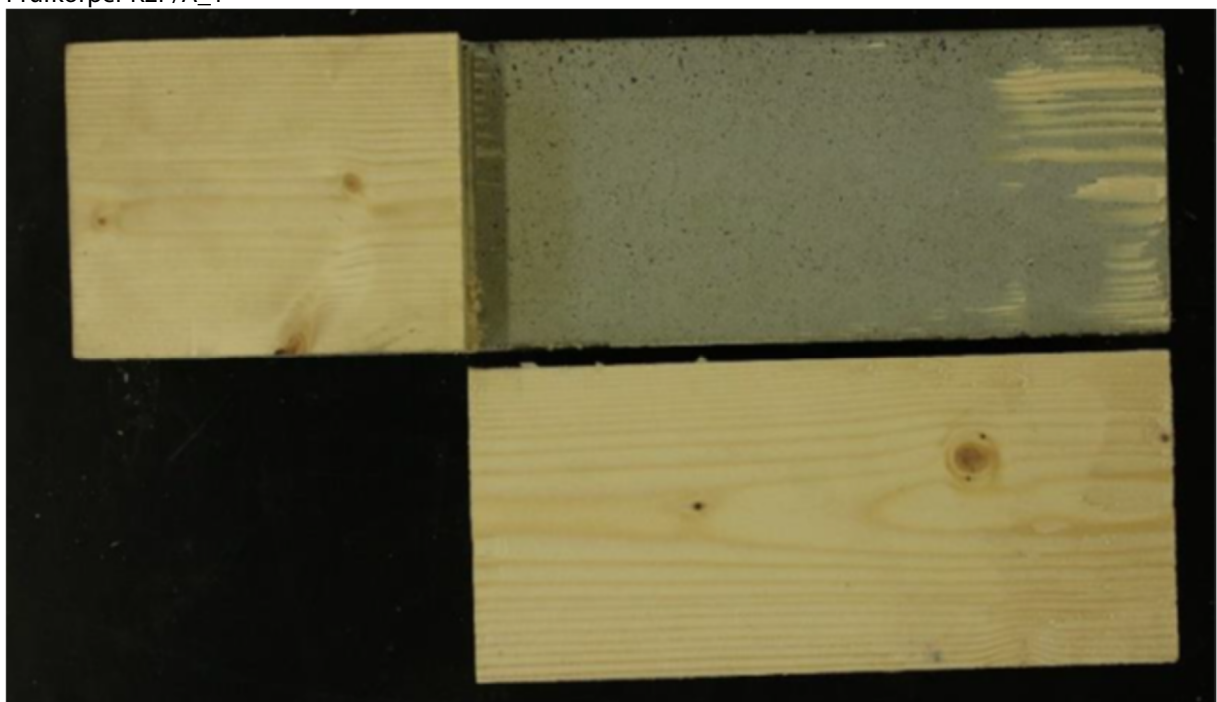
Prüfkörper K1P/A_3



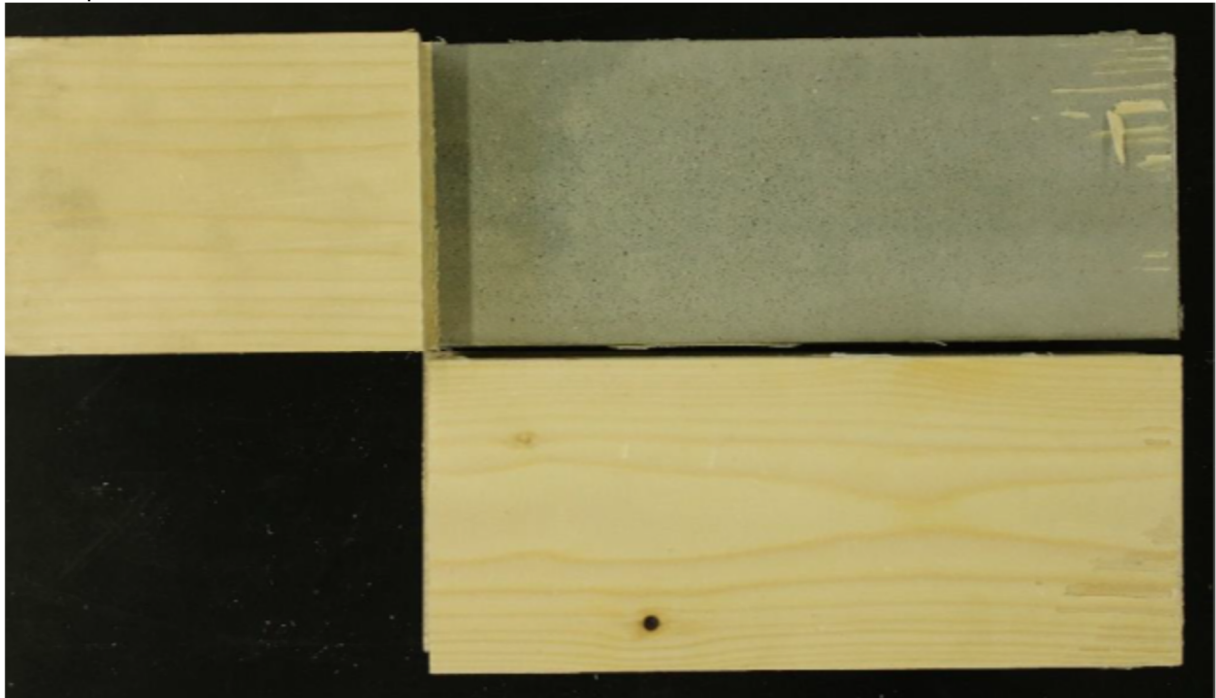
Prüfkörper K2_3



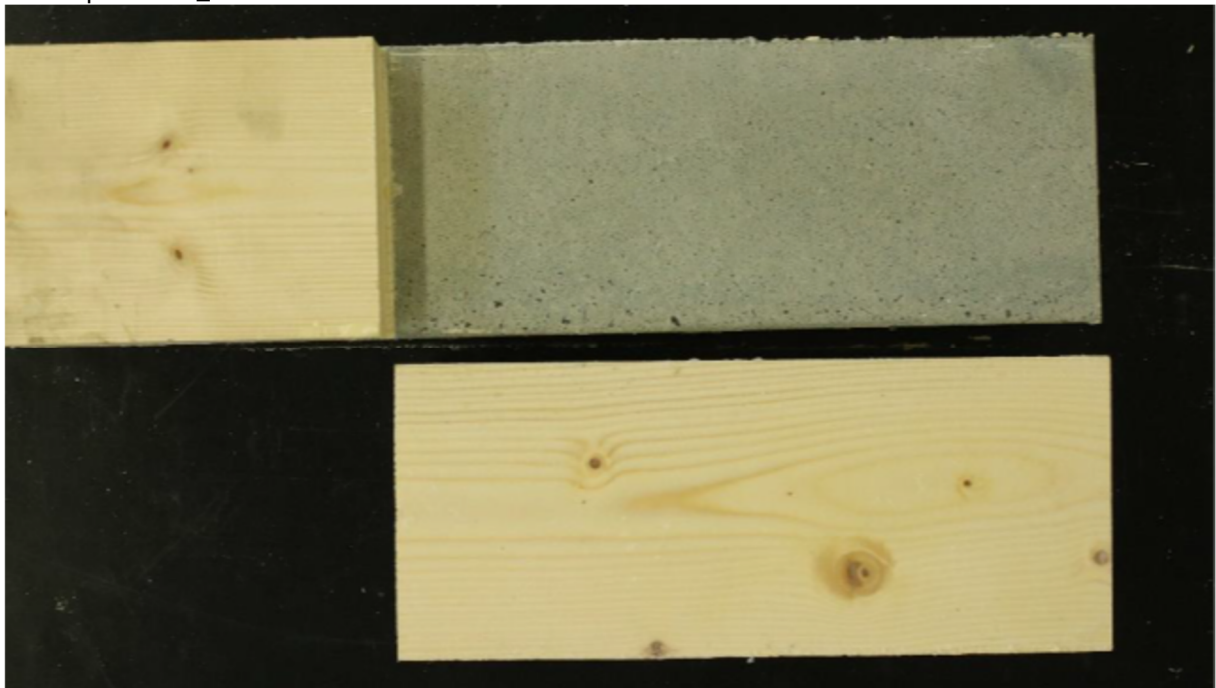
Prüfkörper K2P/A_1



Prüfkörper K2P/A_2



Prüfkörper K2P/A_3



Anlage 3

Veränderliche Lasten

Für die Geschossdecken wurde eine Nutzlast von 5 kN/m^2 (Büronutzung) angesetzt. Nach DIN EN 1991-1-1/NA ist daher kein Trennwandzuschlag zu berücksichtigen. Weiter gilt, dass diese, sofern nicht bereits in der maßgebenden Lastkombination mit einem Kombinationsbeiwert ψ abgemindert, durch den Abminderungsfaktor α_n abgemindert werden darf (DIN EN 1991-1-1).

Die Schnee- und Windlasten bezogen sich auf den Standort München. Vereinfacht wurde nur die maximale Druckkraft aus Wind bzw. Schnee berücksichtigt.

Eigenlasten und Bemessung der Brettsperrholzbauweise und Hybridbauweise

Die tragenden Wände wurden in der jeweiligen Bauweise durch alle Geschosse hinweg in reiner Brettsperrholzbauweise bzw. Hybridbauweise geplant.

Die Dimensionierung der Wände erfolgte für beide Bauweisen mit Hilfe des Verfahrens der Schubanalogie unter Berücksichtigung der jeweiligen Steifigkeiten. Zusätzlich wurde im Falle der Hybridwände darauf geachtet, dass die innere Betonlamelle stets überdrückt ist. Bei der Wahl der Wandquerschnitte der Brettsperrholzbauweise wurde auf die, in der Baupraxis üblichen Standardquerschnitte, zurückgegriffen. Bei der Wahl der Querschnitte für die hybride Wand wurde sich an Standard-BSP-Querschnitten orientiert, Abweichungen vom Regelquerschnitt erfolgten lediglich hinsichtlich der Betonlamellendicke. Zudem wurden lediglich fünflagige Querschnitte berücksichtigt, so dass im Falle der Hybridwand nur die mittlere Holzlamelle durch eine UHPC-Lamelle ausgetauscht wurde. An dieser Stelle ist anzumerken, dass sich die jeweilige Quer- und Längslage, ab einer Lamellendicke von 40mm, aus zwei faserparallelen Lamellen zusammensetzt (Wagner et al. 2023). Dies machte in Hinblick auf die Bemessung allerdings keinen Unterschied und wurde daher vereinfacht als fünflagiger Querschnitt betrachtet. Die für die Berechnung der Wände angesetzten Steifigkeits- und Festigkeitsparameter sind (Wagner et al. 2023) zu entnehmen.

Eigenlasten und Bemessung der Stahlbetonbauweise

Die Bemessung der Stahlbetonbauteile erfolgte nach DIN EN 1992-1-1. Es wurde sowohl das Flachdach und die Geschossdecken für die Mustergebäude aller drei Bauweisen sowie die Wände für die Stahlbetonbauweise bemessen. Um den Beton in die Bewehrung einbringen zu können, wurde von einer Mindestquerschnittsdicke der Stahlbetonwände von 15cm ausgegangen.

Anlage 4

Bilder der während Langzeitbeanspruchung versagten 3-lagigen Prüfkörper der Nutzungsklasse 2

C1K1_NKL2_1

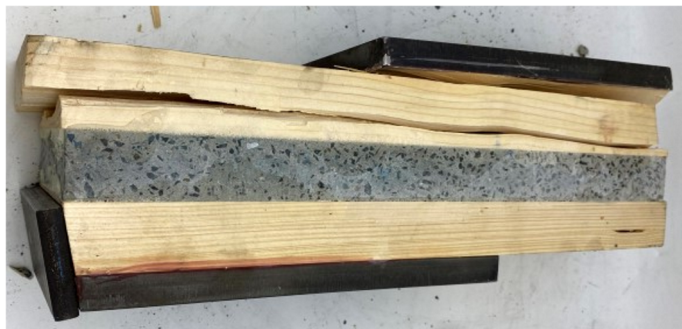


C1K1_NKL2_2



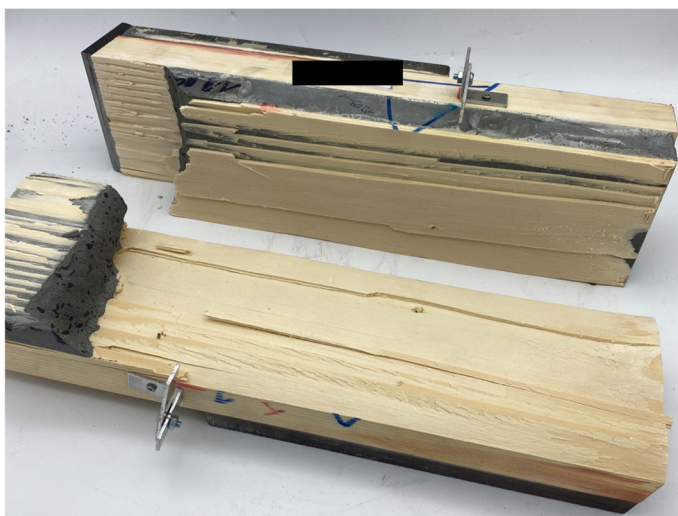
C1K2_NKL2_1C1K2_NKL2_3C1K2_NKL2_4

C2K1_NKL2_1C2K1_NKL2_2C2K2_NKL2_2

Bilder der während Langzeitbeanspruchung versagten 3-lagigen Prüfkörper der Nutzungsklasse 1C1K1_NKL1_2C1K1_NKL1_3

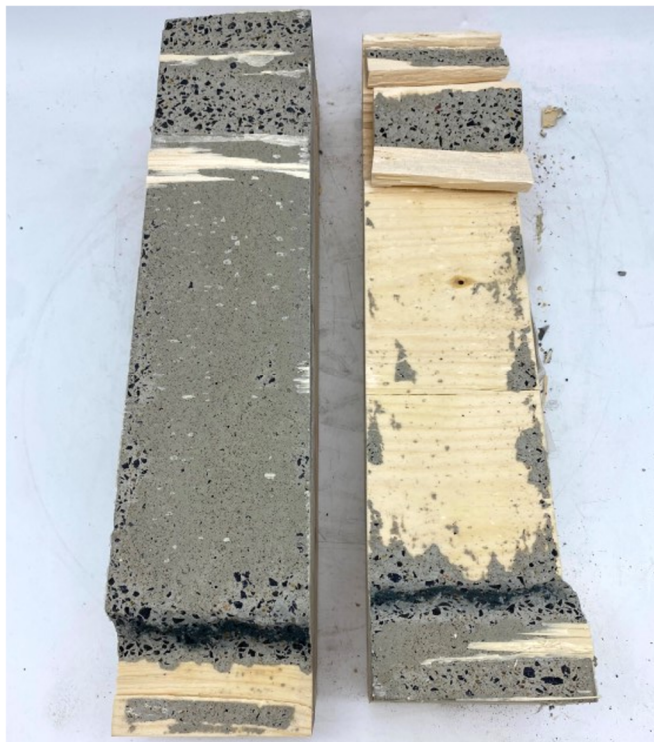
C1K1_NKL1_4C1K2_NKL1_1

C1K2_NKL1_2C1K2_NKL1_3

C1K2_NKL1_4C2K1_NKL1_1C2K1_NKL1_2

C2K1_NKL1_3C2K1_NKL1_4C2K2_NKL1_1

C2K2_NKL1_2C2K2_NKL1_4

Bilder der während Langzeitbeanspruchung versagten 5-lagigen Prüfkörper der Nutzungsklasse 1C1K2_NKL1_5_2

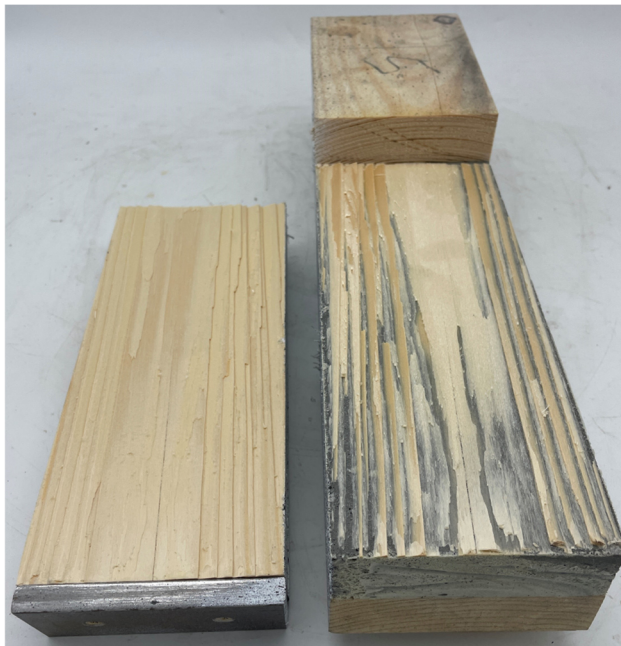
Bilder der während Langzeitbeanspruchung versagten 5 -lagigen Prüfkörper der Nutzungsklasse 2C1K2_NKL2_5_1C1K2_NKL2_5_2

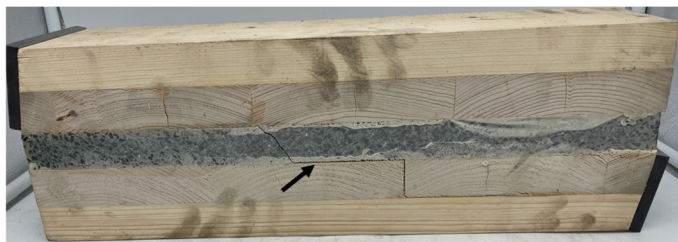
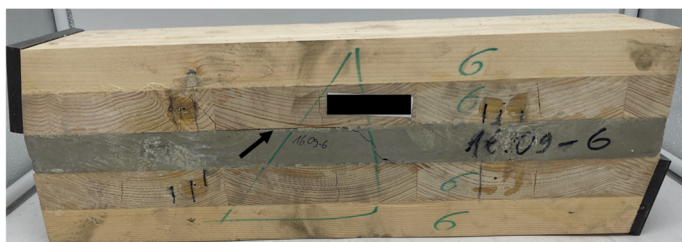
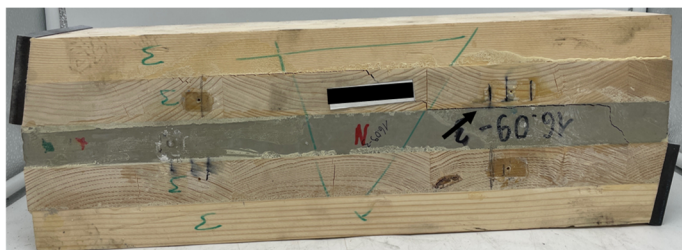
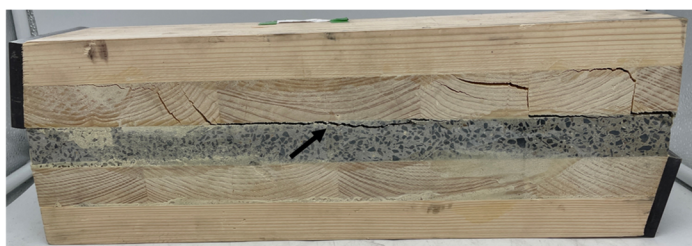
Bruchbilder nach Prüfung der Restscherfestigkeit 3-lagig NKL 1**C1K1 NKL1 1****C2K1 NKL1 1**

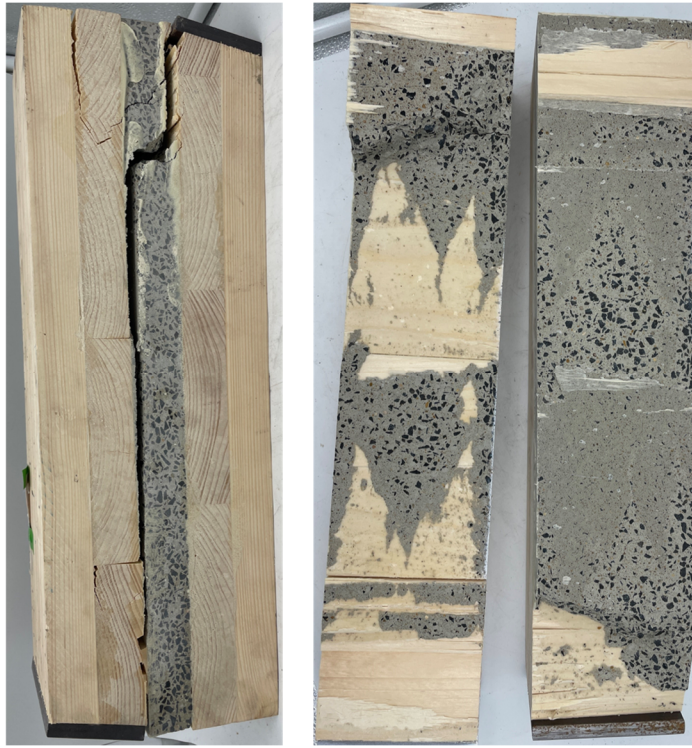
Bruchbilder nach Prüfung der Restscherfestigkeit 3-lagig NKL 2**C1K1_NKL2_3****C1K1_NKL2_4**

C1K2 NKL2 2C2K1 NKL2 3

C2K1 NKL2 4C2K2 NKL2 1

C2K2 NKL2 3C2K2 NKL2 4

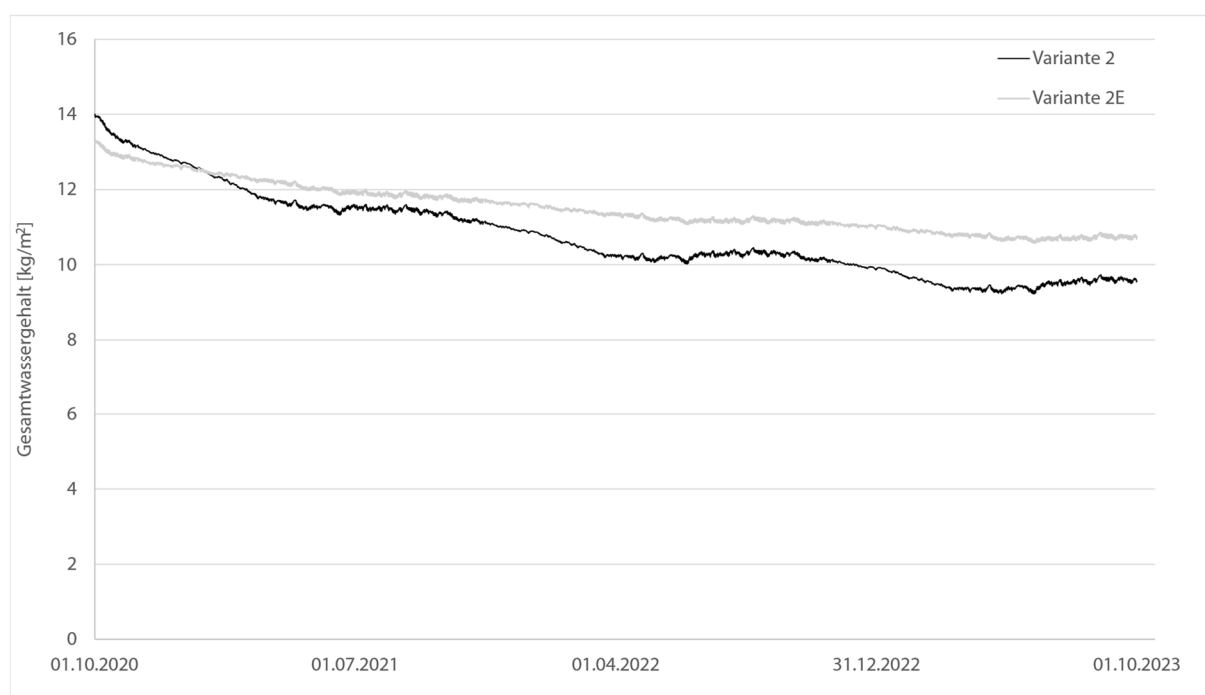
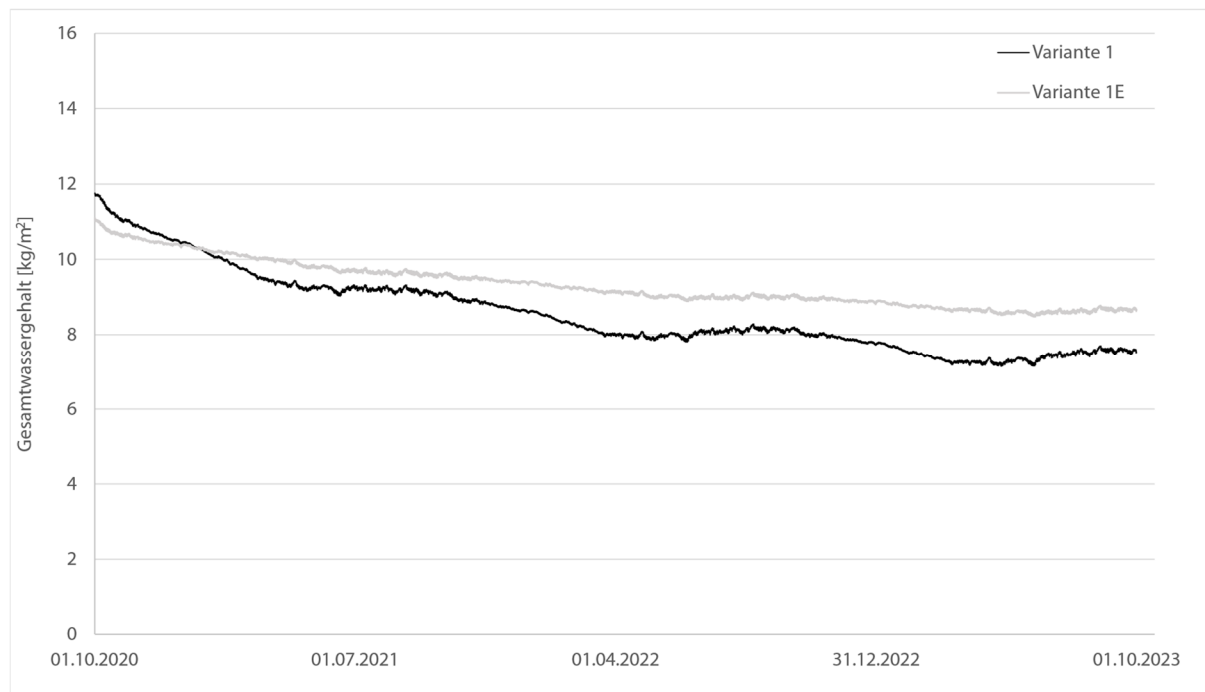
Bruchbilder nach Prüfung der Restscherfestigkeit 5-lagigC1K2_NKL1_5_1C1K2_NKL1_5_3C1K2_NKL1_5_4C1K2_NKL1_5_3

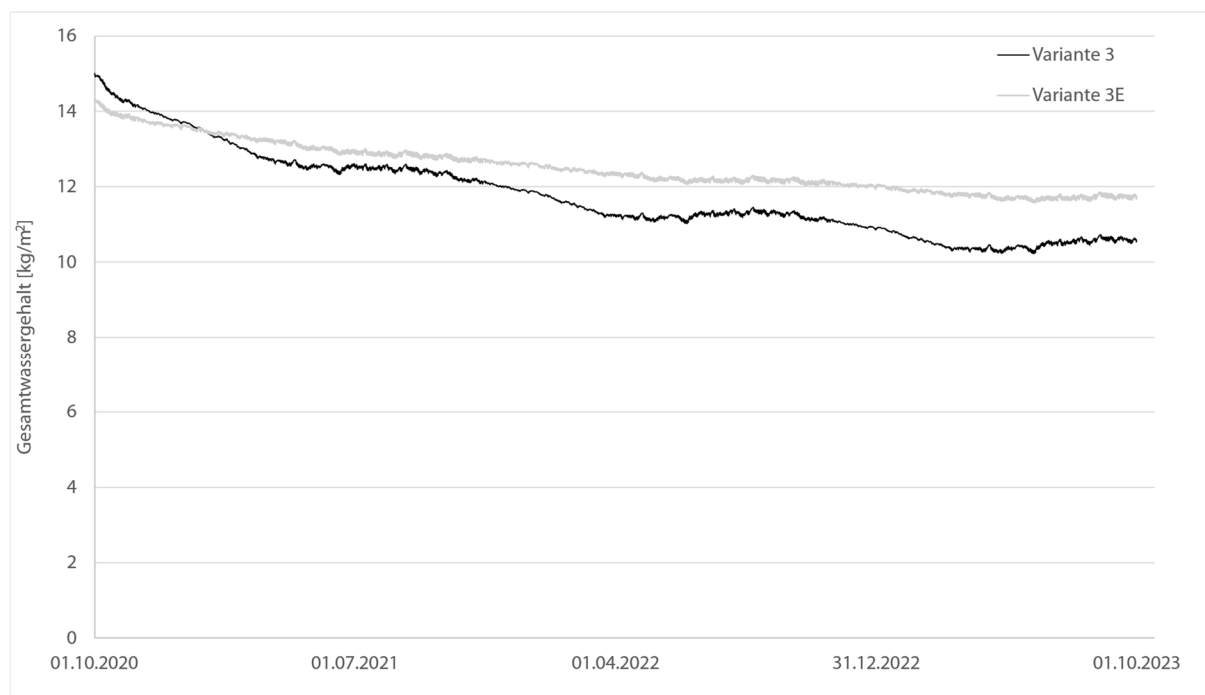
C1K2 NKL1 5 4

Anlage 5

Gesamtwassergehalt Varianten

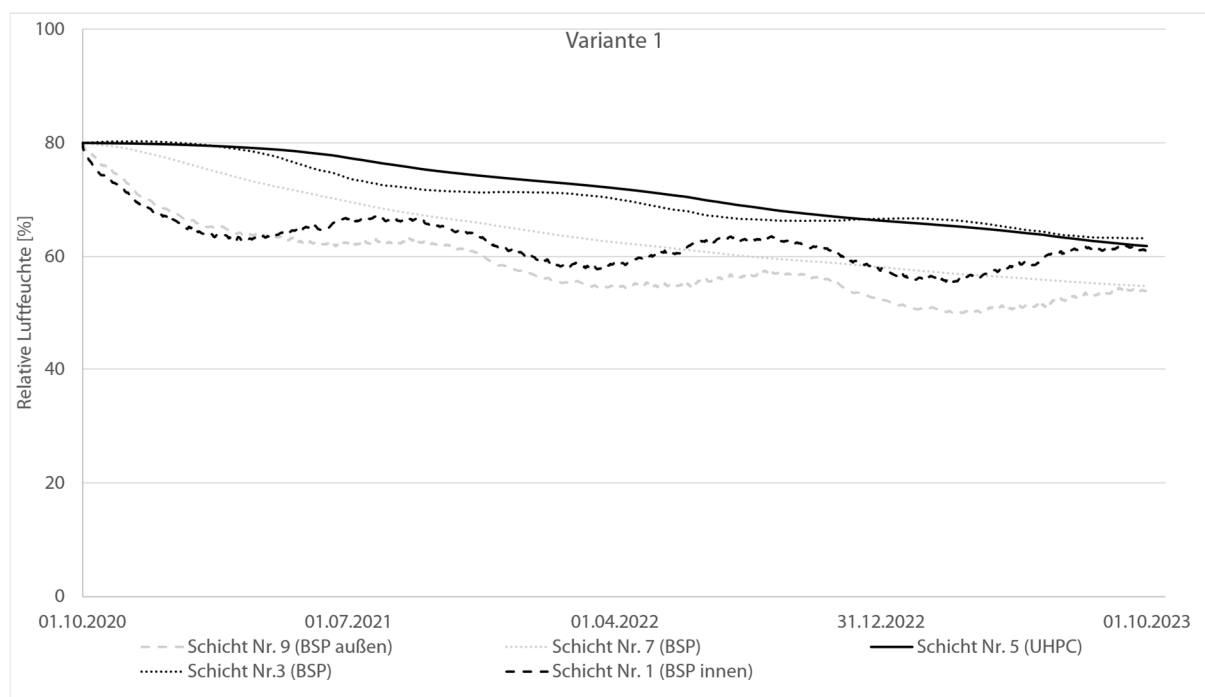
In den Abbildungen sind die Gesamtwassergehalte der Konstruktionen dargestellt. Es wird jeweils die Variante nur Element (Kürzel E) und die Variante mit Wärmedämmverbundsystem betrachtet.

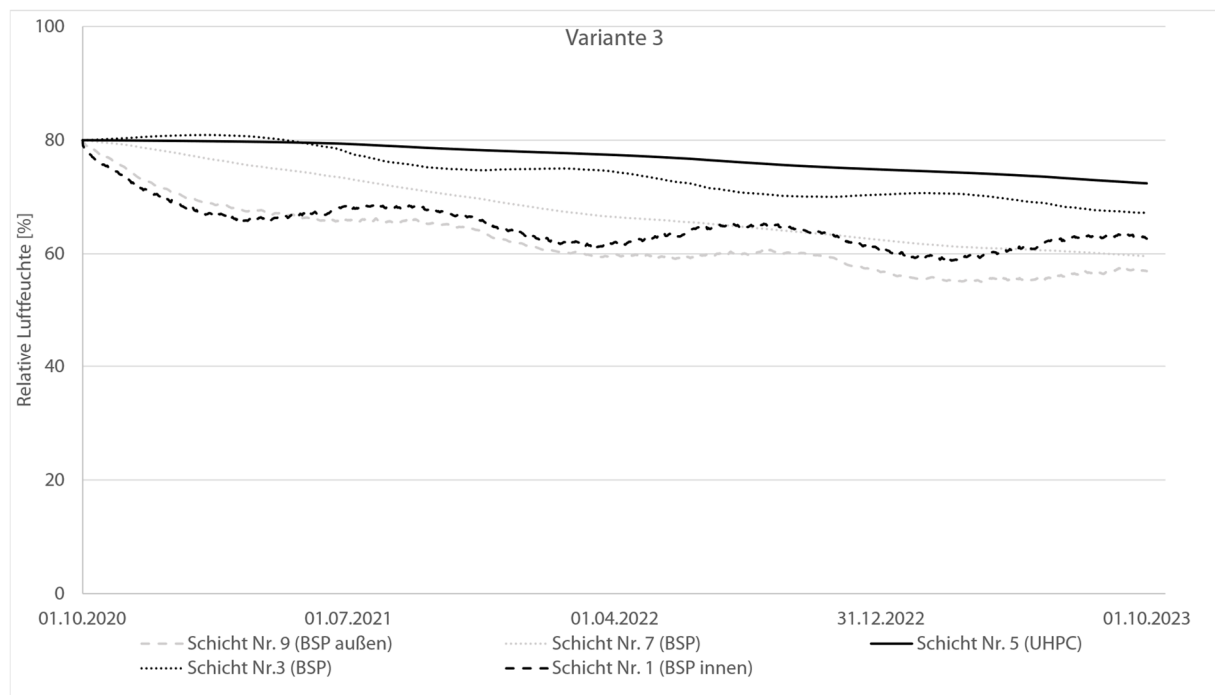
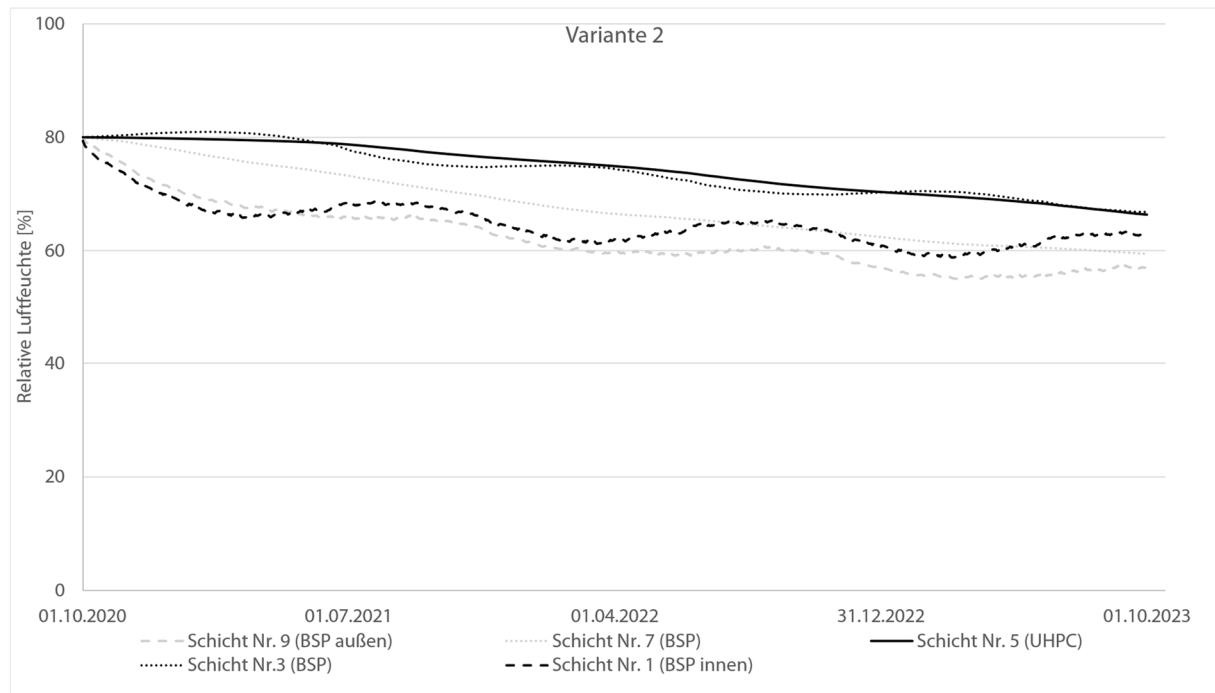




Relative Luftfeuchte in Bauteilschichten

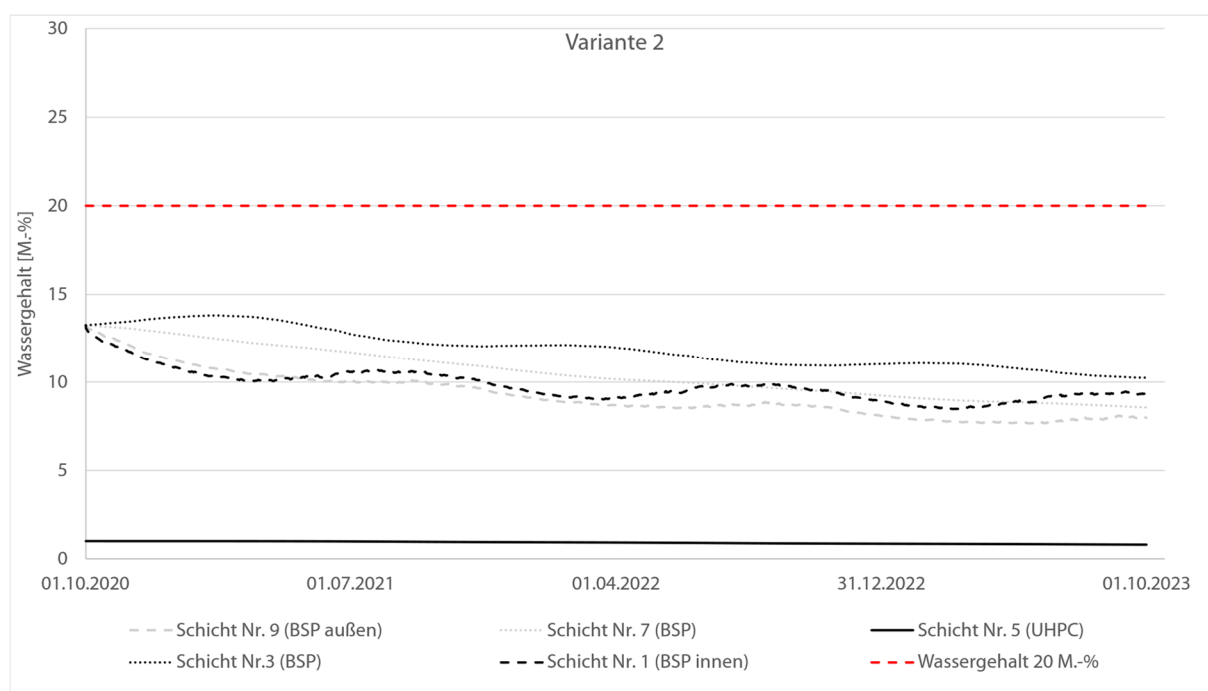
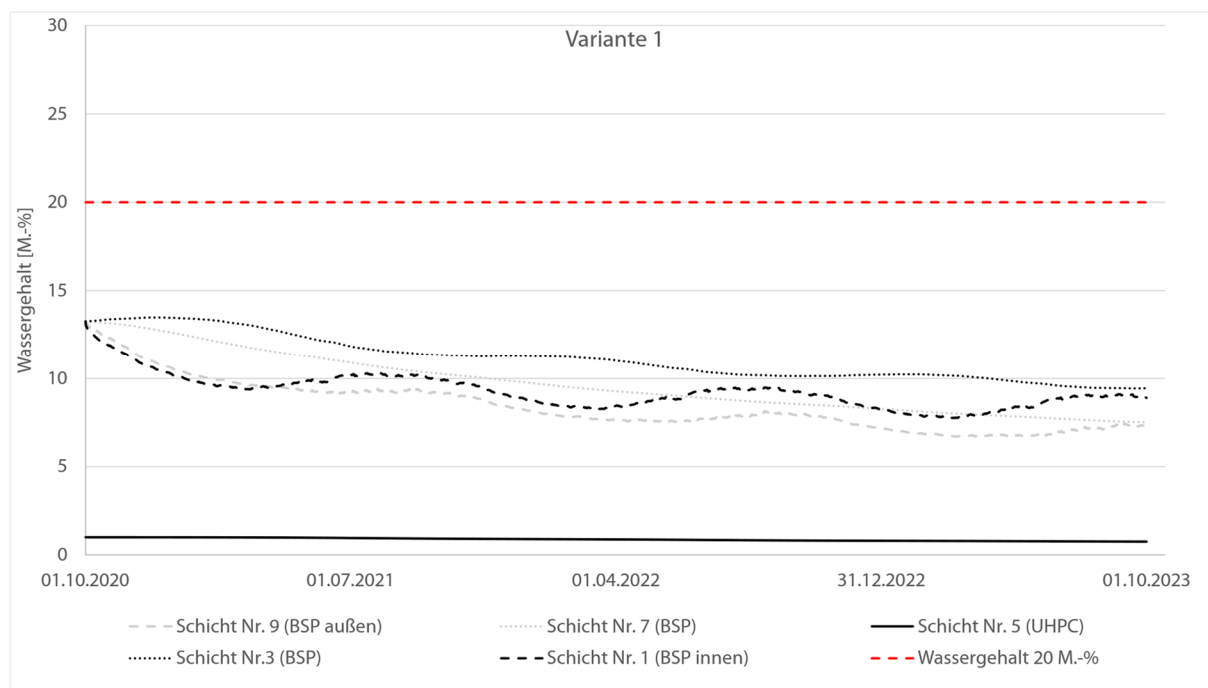
In den Abbildungen sind die relativen Luftfeuchten der einzelnen Schichten gegliedert nach Varianten dargestellt.

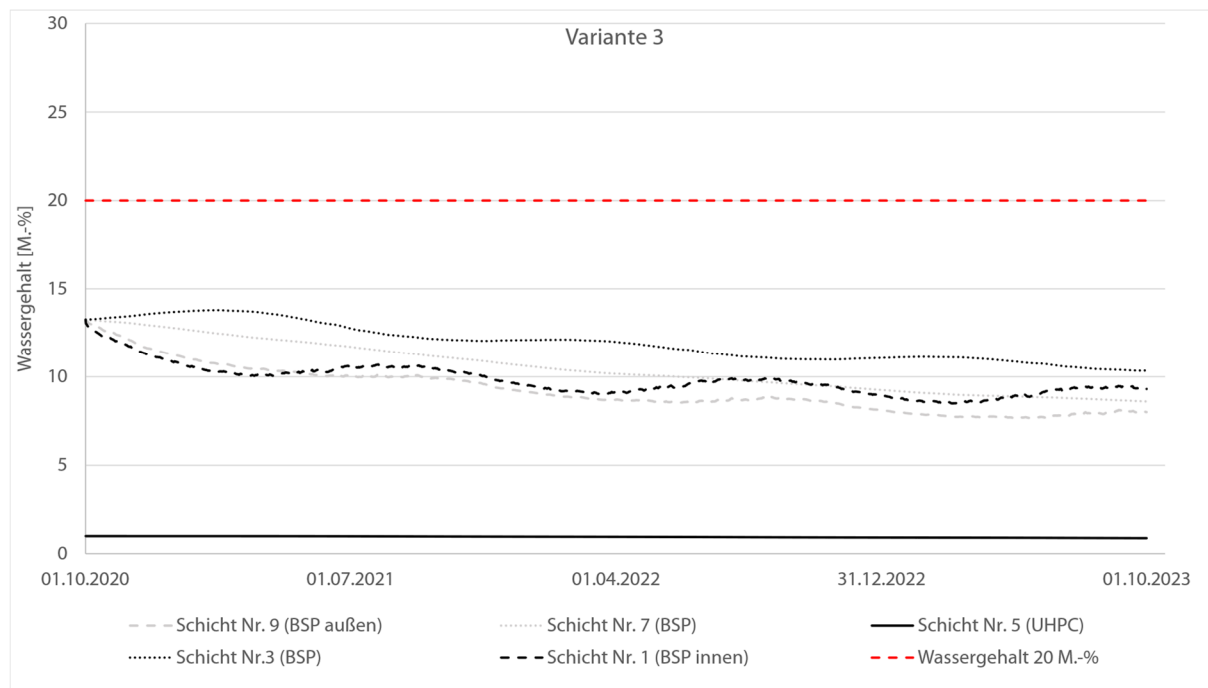




Wassergehalt in Masseprozent in Bauteilschichten

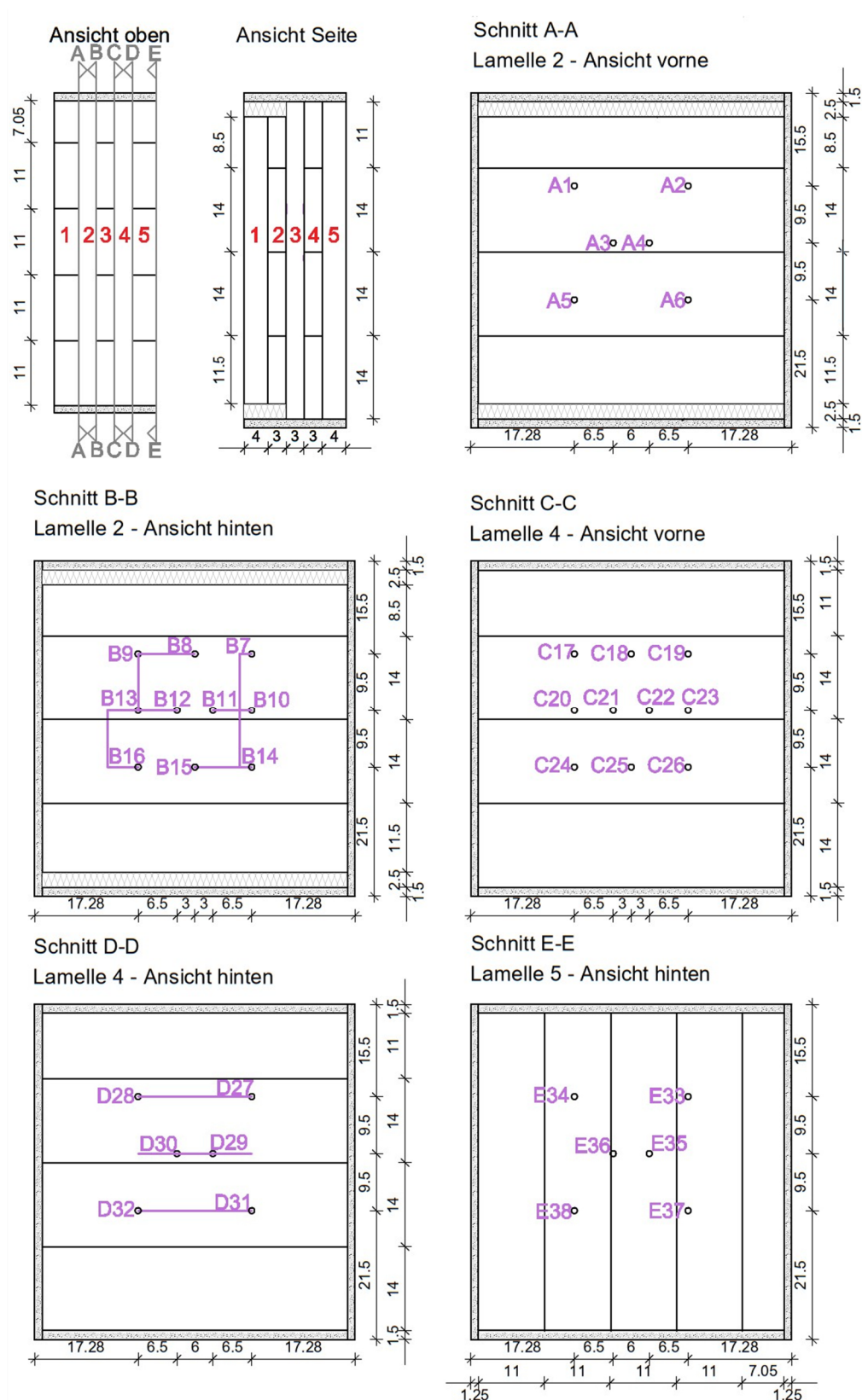
In den Abbildungen sind die Wassergehalte der einzelnen Schichten in Masseprozent gegliedert nach den untersuchten Varianten dargestellt.





Anlage 6

Anordnung der Thermoelemente in den Prüfkörpern der Brandversuche



Bilder der Herstellung der Prüfkörper der Brandversuche

