



Projektverbund für mehr Ressourceneffizienz in der bayerischen Wirtschaft
insbesondere für KMU und Handwerk – **ForCYCLE II**

Abschlussbericht

*Optimierung der Holz-Beton-Verbundbauweise durch Verwendung natürlicher
und ökologischer Werkstoffe – **HB(Ca)V***

Projektleiter und durchführende Hochschule

Prof. Dr.-Ing. Sergej Rempel
Hochschule Augsburg
Fakultät für Architektur und Bauwesen, Institut für Holzbau (HSA_ifh)
An der Hochschule 1, 86161 Augsburg
Tel. 0821 5586-3637, Fax 0821 5586-3110
E-Mail sergej.rempel@hs-augsburg.de

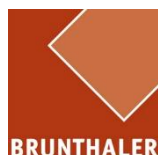
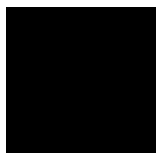
Projektmitarbeiter und -mitarbeiterinnen

Michael Mikoschek, HSA_ifh
Karlheinz Wohlmann, HSA_ifh
Markus Brand, HSA_ifh
Annika Westenhöfer, HSA_ifh

Projektlaufzeit

01.07.2019 – 31.06.2022

Augsburg, Juni 2022



Abstract (Kurzzusammenfassung)

Die Holz-Beton-Verbundbauweise ermöglicht ressourceneffiziente Hybridkonstruktionen, da durch die kraftschlüssige Verbindung der Materialien Holz und Beton die jeweiligen mechanischen Vorteile optimal genutzt werden können und damit höhere Tragfähigkeiten und Spannweiten bei Geschossdecken erzielt werden. Nachteilig ist dabei die Verwendung der Werkstoffe Zement als Betonbindemittel und Stahl in Bewehrungs- und Verbindungselementen, welche herstellungsbedingt hohe CO₂-Emissionen verursachen. Ökologische Alternativen waren bisher nicht marktreif und im Holz-Beton-Verbundbau bauaufsichtlich nicht zulässig. Mit anwendungsorientierten Untersuchungen zur Verwendung von natürlichen und ökologischen Werkstoffen wurde im vorliegenden Projekt die Ressourceneffizienz der HBV-Bauweise optimiert und baupraktische Lösungen entwickelt.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Abstract (Kurzzusammenfassung) | 1 |
| Inhaltsverzeichnis | 2 |
| 1 Hintergrund, Aufgabenstellung und Zielsetzung | 4 |
| 1.1 Ausgangslage und Stand der Technik | 4 |
| 1.2 Projektziele und Lösungsansätze..... | 6 |
| 2 Planung und Ablauf der Arbeiten | 8 |
| 3 Darstellung und Bewertung der Ergebnisse | 11 |
| 3.1 Materialspezifische Grundlagen | 11 |
| 3.1.1. Grundlagen für die Betonentwicklung..... | 11 |
| 3.1.2. Entwicklung von Prüfverfahren..... | 13 |
| 3.1.3. Hydrophobierung des Holzes | 14 |
| 3.1.4. Festlegung und Prüfung geeigneter Betone | 16 |
| 3.2 Anwendungsorientierte Untersuchungen | 19 |
| 3.2.1. Ermittlung der Verbundsteifigkeit und -tragfähigkeit an Scherprüfkörpern ... | 19 |
| 3.2.2. Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens an Bauteilen | 22 |
| 3.2.3. Untersuchung des Langzeitverhaltens | 28 |
| 3.2.4. Rechnerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten | 32 |
| 3.3 Anfertigung von Leitfäden | 37 |
| 3.3.1. Herleitung von Bemessungsansätzen | 37 |
| 3.3.2. Erarbeitung von Herstellungs- und Ausführungsempfehlungen..... | 40 |
| 4 Praktische Anwendbarkeit der Ergebnisse und Darstellung der Kooperation mit Wirtschaftspartnern | 43 |
| 4.1 Baupraktische Anwendbarkeit..... | 43 |
| 4.2 Zusammenarbeit mit den Wirtschaftspartnern..... | 44 |
| 5 Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts | 46 |
| 6 Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern und im Projektverbund | 47 |
| 7 Zusammenfassung | 50 |
| 8 Ausblick | 51 |
| Literaturverzeichnis | 52 |

| | |
|--|-----------|
| Normenverzeichnis | 54 |
| Anhang | 56 |
| Anlage 1: Abkürzungsverzeichnis..... | 56 |
| Anlage 2: Last-Verschiebungsdiagramme der Scherversuche | 57 |
| Anlage 3: Last-Verschiebungsdiagramme der Kurzzeit-Biegeversuche | 58 |
| Anlage 4: Weitere Messergebnisse der Langzeit-Biegeversuche | 59 |
| Anlage 5: Auflistung der Kooperationspartner aus der Wirtschaft | 61 |

1 Hintergrund, Aufgabenstellung und Zielsetzung

1.1 Ausgangslage und Stand der Technik

Der Bausektor gehört zu einem der größten Ressourcenverbraucher und Verursacher von Treibhausgasen weltweit (Weidner et al. 2021). Vor allem die massenhafte Verwendung der Werkstoffe Zement und Stahl in Betonbauteilen belastet die Umwelt besonders stark. Allein die Produktion des Betonbindemittels Zement ist für 5 – 8 % der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich (Kajaste und Hurme 2016). Ähnlich hohe Emissionsanteile sind auch in der bayerischen Zementproduktion bekannt. Die Gründe hierfür sind v. a. die energieintensive Herstellung von Zementklinker in Öfen bei 1450 °C und das chemisch bedingte Austreiben von Kohlenstoffdioxid („Entsäuerung“) aus dem im Rohmehl enthaltenen Kalkstein.

Der Neubau von Deckenkonstruktionen macht je nach Geschossanzahl ca. 40 – 65 % der tragwerksbedingten Emissionen eines Gebäudes aus, da die klassische Stahlbetonflachdecke bislang das meistverwendete Deckensystem ist (Weidner et al. 2021). Durch Hybridbauweisen wie die Holz-Beton-Verbundbauweise (HBV-Bauweise) kann zwar eine gewisse Menge an Beton und Stahl durch Holz substituiert werden, aber traditionsgeprägte Holzbauunternehmen haben dennoch werkstoffbedingte Vorbehalte gegenüber der HBV-Bauweise (Knauf 2017), obwohl die Vorteile v. a. bei Geschossdecken weitreichend bekannt sind. So sind im Vergleich zu üblichen, reinen Holz-Deckenkonstruktionen deutlich höhere Tragfähigkeiten und Steifigkeiten, sowie Verbesserungen der Schall- und Brandschutzeigenschaften möglich.

Das Prinzip von HBV-Decken basiert auf dem schubfesten Verbund zwischen einer Betonplatte an der Deckenoberseite und Holzelementen auf der Unterseite. Stahlkomponenten kommen bei der (Mindest-)Bewehrung des Betons und den Verbindungsmitteln zum Einsatz. Mit dem Verbund wird erzielt, dass die Holzelemente überwiegend auf Zug und die Betonplatte auf Druck beansprucht wird, und so die Baustoffe entsprechend ihrer jeweiligen mechanischen Stärken vorteilhaft genutzt werden. In Abbildung 1 ist beispielhaft der Aufbau einer HBV-Decke und der schematische Spannungsverlauf dargestellt. Darin ist auch abgebildet, wie der schubfeste Verbund die Spannungsverteilung im Vergleich zu einer Holz-Beton-Decke ohne Verbund beeinflusst.

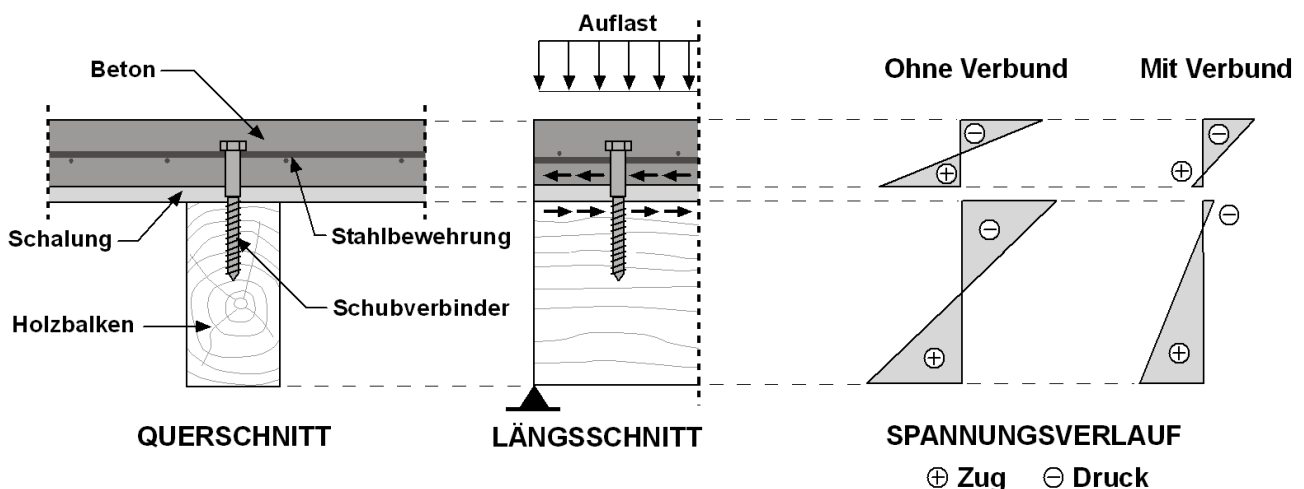


Abbildung 1: Aufbau und Prinzip der Holz-Beton-Verbundbauweise, nach (Holschemacher und Kieslich 2021)

Grundsätzlich können die untenliegenden Holzelemente aus stabförmigen oder plattenförmigen Bauteilen bestehen, wohingegen der Aufbeton immer als Platte ausgeführt wird (siehe Abbildung 2).

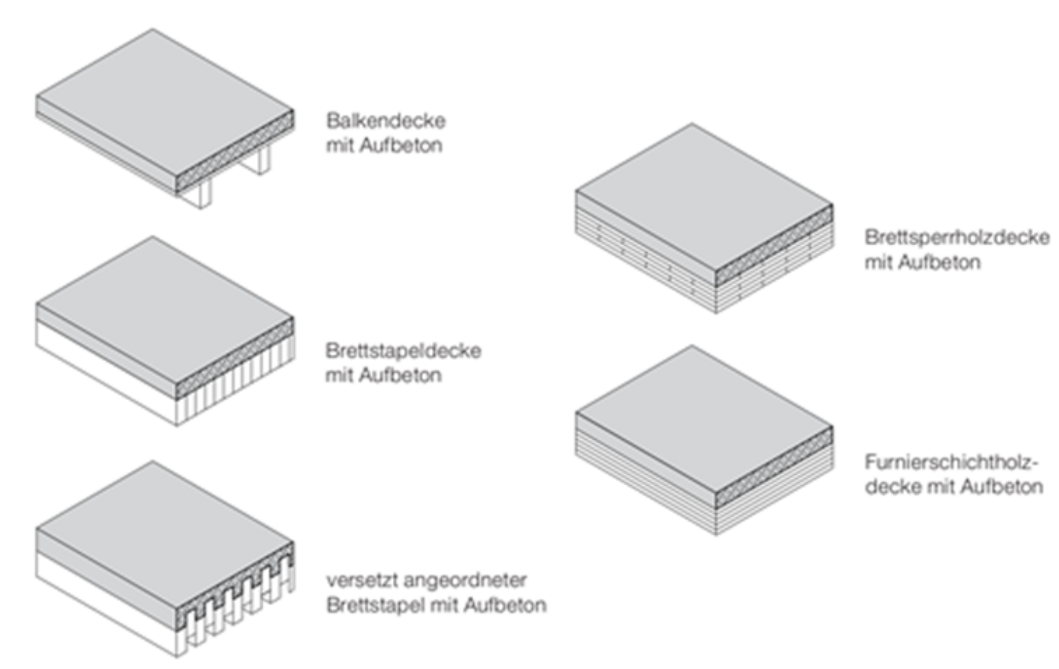


Abbildung 2: Arten von stab- oder plattenförmigen Holzelementen bei HBV-Decken (Kaufmann et al. 2022)

Der Verbund zur Aufnahme der Schubkräfte zwischen Beton und Holz wird häufig mit metallischen Verbindungsmitteln wie Schrauben, Flachstahlschlösser, eingeklebte Streckmetallbleche oder eingeklebte Bewehrungsstäbe hergestellt. Neben der Verwendung von metallischen Verbindungsmitteln ist auch der Einsatz von im Holz eingefrästen Kerfen üblich. Hier wird der Verbund über den Formschluss hergestellt, indem der Frischbeton die Ausnehmungen der Holzprofile ausfüllt. Zusätzlich sind zur Abhebesicherung infolge des Versatzmoments bei Kerfen zusätzlich Schrauben anzuordnen. Abbildung 3 zeigt einen Überblick zu gängigen Verbundarten im Holz-Beton-Verbundbau.

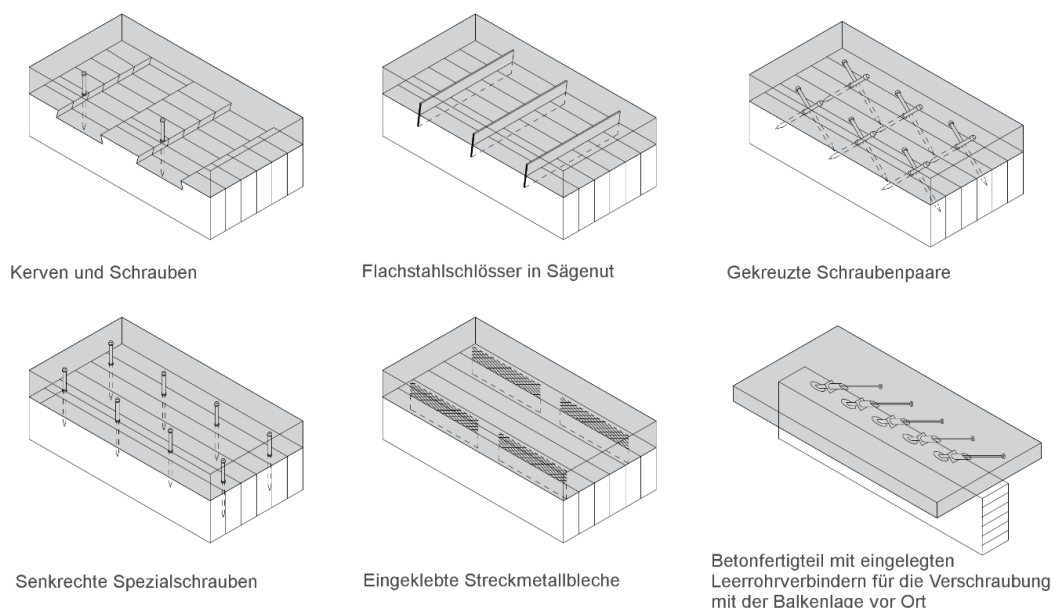


Abbildung 3: Verbundarten bei HBV-Decken (Kaufmann et al. 2022)

Hinsichtlich der baurechtlichen Situation und Anwendbarkeit von HBV-Systemen wurden bisher die Verbundeigenschaften und Bemessungs-/Anwendungsregeln produktbezogen in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen oder europäischen Zulassungen geregelt. Seit Februar 2022 ist nun auch ein Normentwurf als „Technische Spezifikation“ DIN CEN/TS 19103 veröffentlicht, in der erstmals produktunabhängige Regeln für die Bemessung und Konstruktion von HBV-Tragwerken enthalten sind. Der Geltungsbereich beschränkt sich dabei jedoch auf Kerfen und eingeklebte Stahlstäbe sowie auf eine mineralische Deckschicht aus konventionell bewehrtem Zementbeton.

1.2 Projektziele und Lösungsansätze

Gegenüber dem klassischen Stahlbetonbau können Holzbauweisen im Außenbereich bei unzureichenden Schutzmaßnahmen bekanntermaßen Schwächen bezüglich der Dauerhaftigkeit aufweisen. Zwar sind die Gefahren von Bauschäden bei Stahlbetonteilen unter gewissen Expositionen und Einwirkungen auch höher, denen wird aber mit höheren Zementanteilen und größerer Betonüberdeckung begegnet. Bei Innenbauteilen im Wohnungs- und Objektbau stellt sich hingegen grundsätzlich die Frage der Notwendigkeit von zementgebundenen Werkstoffen und Stahl, zumal bei HBV-Decken ein Großteil der Lastabtragung über die Holzelemente erfolgt. So ließe sich die mineralische Deckschicht speziell bei Innenbauteilen mit deutlich ökologischeren Werkstoffen optimieren.

Im vorliegenden Projekt soll daher mit der ökologischen Substitution von Zement und Stahl durch ökologischere Bindemittel und Bewehrung in der Betonplatte herstellungsbedingte CO₂-Emissionen von HBV-Decken um mind. 50 % reduziert werden (Ziel 1). Weiterhin soll trotz der Verwendung von alternativen Baustoffen die Leistungsfähigkeit der HBV-Bauweise erhalten bleiben, d. h. es sollen mindestens gleichhohe Tragfähigkeiten und Steifigkeiten wie bei HBV-Decken mit gängigen Baustoffen erreicht werden (Ziel 2). Die Herleitung von praxisnahen und anwendungsorientierten Herstellungs- und Verarbeitungsempfehlungen sowie Bemessungsansätze sollen als Grundlage für die Erarbeitung von bauaufsichtlichen Zulassungen dienen und damit Basis für die Markteinführung sein (Ziel 3). Insgesamt sollen durch die im Projekt erarbeiteten Möglichkeiten und Lösungen, die werkstoffbedingten Vorbehalte gegenüber der HBV-Bauweise beseitigt und damit Anreize für eine verstärkte Ausführung geschaffen werden.

Bindemittel auf Basis von Calciumsulfat bieten eine Möglichkeit zur ökologischen Optimierung der mineralischen Deckschicht von HBV-Decken, da bei der Herstellung deutlich weniger CO₂-Emissionen verursacht werden als bei herkömmlichen Portlandzement. Calciumsulfat (CaSO₄) unterscheidet sich grundsätzlich von Zement hinsichtlich des Abbindevorgangs und -verhaltens, da es ein nur an der Luft erhärtendes Bindemittel ist. Man spricht dabei von einer hydratischen Verfestigung, bei der keine chemische Umwandlung des Wassers, sondern ein Kristallisationsvorgang stattfindet. Wasserfreies Calciumsulfat (auch „Anhydrit“ genannt) kann in natürlichen Vorkommen abgebaut oder durch technische Verfahren (thermisches und synthetisches Calciumsulfat) hergestellt werden. Zudem sind noch Calciumsulfat-Halbhydrat und Calciumsulfat-Dihydrat – besser bekannt als „(Stuck-)Gips“ – zu nennen. Calciumsulfat-Halbhydrat in der α-Form wird aufgrund seiner hohen mechanischen Festigkeit v. a. in Bauprodukten wie Gipskartonplatten oder Estrich verwendet, da es ein sehr reaktiver Binder ist, der ohne Anreger innerhalb kurzer Zeit mit Wasser reagiert. Die Verwendung von Calciumsulfat in HBV-Bauteilen ist zwar bereits in Teilen erprobt worden (Schmidt 2003; Lehmann 2004; Rautenstrauch et al. 2008), es fehlen jedoch geeignete Bemessungs- und Anwendungsregeln für eine sichere und dauerhafte Ausführung. Zudem sind weitere technische

Problemstellungen, wie z. B. der übermäßige Feuchteintrag in die Holzelemente sowie die langsamere Aushärtung bei größeren Deckschichten zu lösen, um die bisherige Praxistauglichkeit und Leistungsfähigkeit der HBV-Bauweise zu erhalten. Hinzu kommt, dass calciumsulfatgebundene Bauprodukte grundsätzlich empfindlich gegenüber Feuchtigkeit reagieren können und dabei die Festigkeit und Steifigkeit negativ beeinflusst wird.

Aus diesen Gründen ist zur ökologischen Optimierung der Betondeckschicht eine weitere Möglichkeit in den Fokus der Untersuchungen gerückt, welche in manchen Belangen weniger Schwächen aufweist. Bindemittel auf Basis von Calciumsulfoaluminat (kurz: CSA) werden seit mehreren Jahren für Spezialanwendungen eingesetzt, in denen v. a. eine schnelle Aushärtungszeit gefordert wird. Hierbei handelt es sich um ein Dreistoff-System aus Kalkstein, Gips und Bauxit, wobei auch Sekundärrohstoffe wie Flugaschen oder aluminiumhaltige Abfallstoffe verwendet werden können. Die Herstellung des CSA-Klinkers erfolgt bei ca. 1250 °C meist in Drehrohröfen. Damit wird im Vergleich zum Portlandzement nicht nur eine niedrigere Temperatur benötigt, sondern es wird auch ein deutlich carbonatärmeres Rohmehl eingesetzt, wodurch die CO₂-Emissionen um ca. 25 – 35 % geringer sind (Hanein et al. 2018). Hinzu kommt, dass der leichter mahlbare CSA-Klinker weniger Energie benötigt und anschließend mit ca. 10 – 25 % Calciumsulfat vermischt wird. Ein weiterer Vorteil ist, dass es für Mörtel und Betone auf Basis von CSA bauaufsichtlich zugelassene Produkte gibt, welche nach den entsprechenden Betonnormen verwendbar sind. Obwohl hierzu bereits geeignete Rezepturen erprobt wurden, gibt es kaum Langzeiterfahrung mit konstruktiven Betonen und noch weitere ungelöste Problemstellungen für einen breiten Einsatz (Ioannou et al. 2015).

Ein Hauptproblem bei alternativen Betonbindemitteln ist die mögliche Unverträglichkeit mit Bewehrung aus herkömmlichen Betonstahl bzw. die fehlende Dauerhaftigkeit. Generell wird Stahlbewehrung in Zementbeton durch einen hohen pH-Wert, welcher durch das bei der Hydratation entstehende Calciumhydroxid Ca(OH)₂ entsteht, vor Korrosion geschützt. Dies ist durch andere chemische Prozesse bei alternativen Bindemitteln im Beton nicht immer der Fall, sodass der Einsatz nichtrostender Stähle oder Beschichtungen teilweise notwendig wird. Eine weitere Lösung bieten nichtmetallische Bewehrungen aus Fasermaterialien ohne Korrosionsgefahr. Naturfasern aus Flachs oder Hanf scheiden dabei aufgrund zu geringer Steifigkeit und Festigkeit für statische Zwecke aus und technisch hergestellte Carbonfasern können aufgrund des aufwändigen Beton-Recyclingprozess problematisch werden (Bergmeister et al. 2022). Zudem werden Carbonfasern aus erdölbasiertem Polyacrylnitril hergestellt. Daher wurde im Projekt der Fokus auf Basaltfasern gelegt, welche bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften und dem Herstellungsprozess denen von Glasfasern ähneln. Ausgangsstoff von Basaltfasern ist natürliches Basaltgestein, das bei ca. 1400 °C aufgeschmolzen und zu Fäden gezogen wird. Aufgrund des natürlichen, mineralischen Ursprungs verhält sich die Faser im Beton-Recyclingprozess tendenziell unproblematisch, da keine stoffliche Trennung notwendig ist. Zudem bilden Basaltfasern bei der Verarbeitung oder beim Recycling nach aktuellem Kenntnisstand der WHO keine lungenschädigenden Faserstäube (Schiller 2021).

Die primäre Aufgabenstellung des Projekts ist es daher, die einzelnen Komponenten von Holz-Beton-Verbunddecken unter Verwendung alternativer Werkstoffe zu untersuchen und aufeinander abzustimmen, sowie in klein- und großformatigen Bauteilversuchen zu testen. Der genaue Ablauf der Untersuchungen ist im nachfolgenden Kapitel zusammengefasst.

2 Planung und Ablauf der Arbeiten

Mit Bezug auf die Projektziele 1 bis 3 wurde das Arbeitsprogramm des Projekts in die nachfolgenden drei Phasen eingegliedert und geplant:

- Phase 1: Materialspezifische Grundlagen (Dauer: ca. 1 Jahr)
- Phase 2: Anwendungsorientierte Untersuchungen (Dauer: ca. 1 ¼ Jahre)
- Phase 3: Anfertigung von Leitfäden (Dauer: ca. ¾ Jahr)

Dementsprechend sollte mit dem Abschluss jeder Phase ein Projektziel und damit ein Projektmeilenstein erreicht werden. Die Nummerierung der folgenden Arbeitspakete (AP) enthält in der ersten Ziffer die jeweilige Projektphase und in der zweiten Ziffer die fortlaufende Nummer des Arbeitspakets.

In Abbildung 4 ist der Projektablauf mit den entsprechenden Arbeitspaketen und der groben zeitlichen Planung dargestellt.

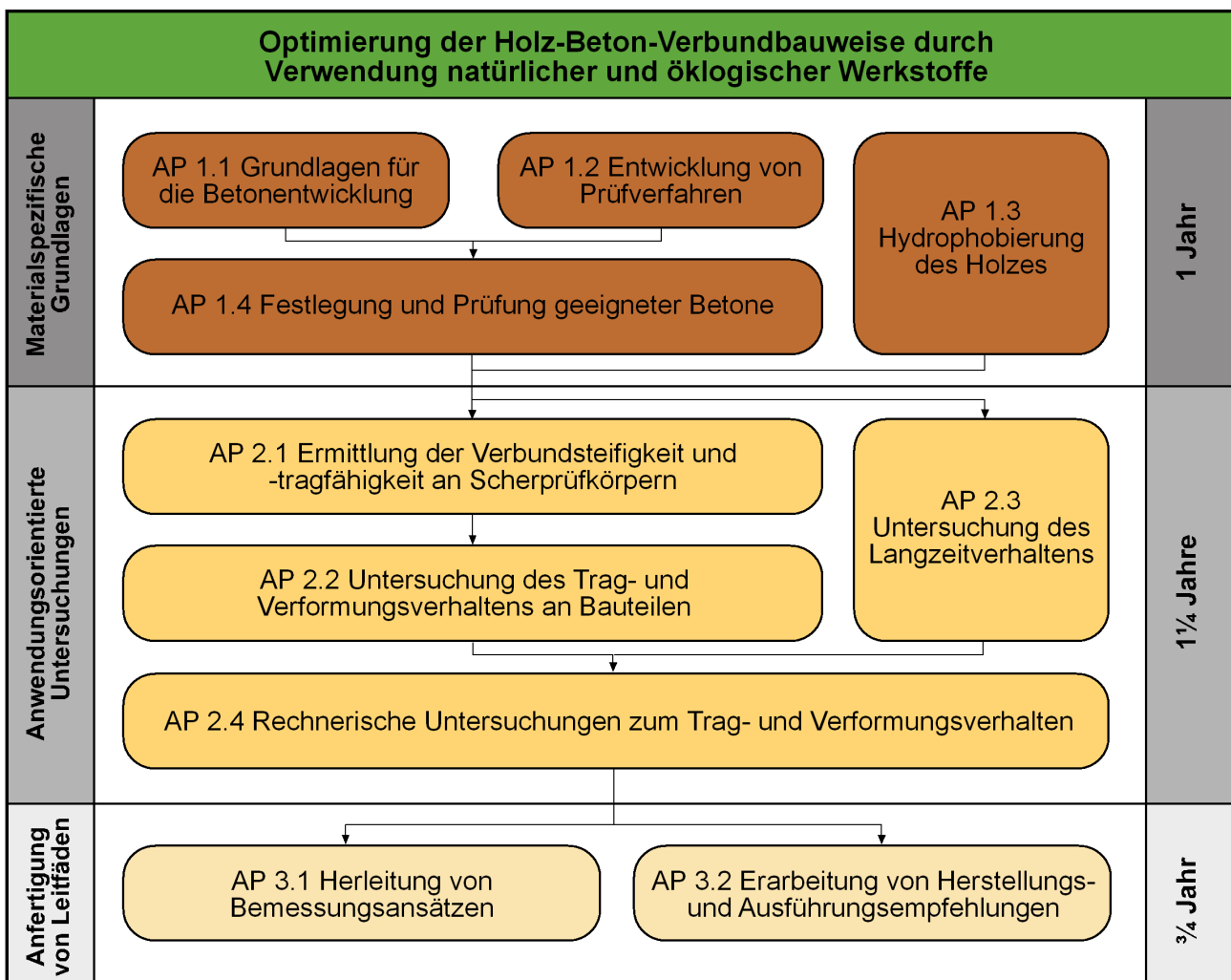


Abbildung 4: Projektflißschema

Nachfolgend sind die einzelnen Arbeitspakete mit deren Inhalt sowie den angewandten wissenschaftlichen und technischen Methoden beschrieben.

AP 1.1: Grundlagen für die Betonentwicklung

Im ersten Arbeitspaket wurden auf Basis von Literaturrecherchen und mittels experimenteller Untersuchungen zu möglichen Rezepturen/Kompositionen von ökologischen Betonen, Optionen zur gezielten Veränderung/Optimierung von Eigenschaften der Betone identifiziert. Von besonderem Interesse waren dabei das Trocknungsverhalten (Aushärtungsdauer) sowie die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften.

Ergänzende Untersuchungen von Fasern zur Bewehrung und Rissbeschränkung des Betons waren ebenfalls Bestandteil des Arbeitspakets. Dabei war besonders die Wirksamkeit der Fasern im Beton anhand von mehreren kleinformatischen Versuchen (z. B. Biegezugversuche) zu untersuchen.

AP 1.2: Entwicklung von Prüfverfahren

Da es noch keine geeigneten Prüfverfahren für Betone auf Calciumsulfatbasis gibt und gängigen Prüfkörperformate aufgrund des Trocknungsverhaltens zu hinterfragen sind, wurden diese speziell für Calciumsulfatbeton getestet und weiterentwickelt. Hierzu wurden maßgebende mechanische Eigenschaften von Calciumsulfatbeton in Anlehnung an einschlägige Estrich- und Betonprüfnormen durch Laborversuche hergeleitet. Die Prüfverfahren wurden v. a. zur späteren Überwachung der Betonfestigkeiten bei der Herstellung der HBV-Prüfkörper (in Projektphase 2) benötigt und waren wesentlicher Bestandteil der praxisorientierten Empfehlungen (Projektphase 3).

AP 1.3: Hydrophobierung des Holzes

Beim Abbinde- bzw. Austrocknungsprozess von Calciumsulfat ist freies Wasser - anders als bei der Zement-Hydratation - länger vorhanden. Zum Schutz des Holzes gegen eine unzuträgliche Feuchtebeanspruchung und der damit verbundenen Festigkeitsbeeinträchtigung werden bei HBV-Systemen üblicherweise Folien zwischen Holz und der mineralischen Deckschicht eingebracht. Anstelle von konventionellen Folien wurden in diesem Arbeitspaket alternative Hydrophobierungsmethoden experimentell erprobt und für eine praxistaugliche Anwendung entwickelt.

AP 1.4: Festlegung und Prüfung geeigneter Betone

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorhergegangenen Arbeitspakete wurden Rezepturen/Kompositionen von geeigneten Betonen für den weiteren Projektverlauf bzw. die zweite Projektphase ausgewählt. Hierfür wurden in systematischen Laborprüfungen die maßgebenden Festigkeits- und Verformungseigenschaften als Basis für die weiteren Untersuchungen und Berechnungen ermittelt und in Hinblick auf die Zielsetzung 1 die notwendigen Analysen über die herstellungsbedingten CO₂-Emissionen durchgeführt.

AP 2.1: Ermittlung der Verbundsteifigkeit und -tragfähigkeit an Scherprüfkörpern

Wesentliche Kennzahlen für die Wirksamkeit sowie das Trag- und Verformungsverhalten des Verbundes zwischen Holz und Beton sind dessen Steifigkeit und Tragfähigkeit. Daher wurden die Verbundsteifigkeit und die Tragfähigkeit von Holz-Beton-Verbundprüfkörpern durch kleinformatische Scherversuche im Prüflabor ermittelt. Unter Berücksichtigung der aktuellen Normentwürfe für den Holz-Beton-Verbundbau wurden im Holz eingefräste Schubkerven als Verbundart und die in AP 1.4 ausgewählten Betone verwendet.

AP 2.2: Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens an Bauteilen

Im AP 2.1 wurden die wesentlichen Kennzahlen für das Trag- und Verformungsverhalten einzelner Verbindungen bzw. Bauteilabschnitte ermittelt. Im Rahmen von 4-Punkt-Biegeversuchen wurde in diesem Arbeitspaket das Tragverhalten von großformatigen Bauteilen realitätsnah untersucht. Die zu ermittelnden Kennzahlen sind hier die maximalen Traglasten und die Biegesteifigkeit. Die Stützweite betrug bei der Versuchsanordnung ca. 5 m und die Bauteilbreite 0,5 m. Referenzprüfkörper mit konventionellem Beton und Stahlbewehrung wurden ebenfalls geprüft. Diese experimentellen Versuche dienen in erster Linie der Bestätigung und dem Vergleich der Ergebnisse aus den Scherversuchen sowie im weiteren Projektverlauf der Kalibrierung der Rechenmodelle in AP 2.4. Zudem wurde die Wirksamkeit der Faserbewehrung und der Hydrophobierung im gesamten HBV-Bauteil durch die großformatigen Prüfkörper besonders anwendungsnah erprobt, welche ein wesentlicher Teil der Untersuchungen und Entwicklungen sind.

AP 2.3: Untersuchung des Langzeitverhaltens

Für die langfristig sichere Verwendung von HBV-Systemen mit alternativen Betonen sind Kenntnisse über das Langzeitverhalten unverzichtbar. Daher wurden Untersuchungen zum Kriechverhalten der Betone sowie Langzeit-Biegeversuche von Bauteilen unter kontinuierlicher Dauerbelastung für ein Jahr zur Ermittlung des Langzeitverhaltens angesetzt. Hierbei wurde das Verformungsverhalten unter Aufzeichnung der klimatischen Bedingungen beobachtet, um die maßgebenden Kennzahlen zur Beschreibung des Kriechverhaltens abzuleiten. Die Bauteil-Prüfkörper hatten dabei die gleichen Abmessungen wie aus den Kurzzeit-Biegeversuchen in AP 2.2 und ermöglichten damit einen direkten Vergleich.

AP 2.4: Rechnerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten

Aus den in den Bauteilversuchen erlangten Erkenntnissen wurden zur Beschreibung des Tragverhaltens unterschiedliche Modelle abgeleitet. Dazu wurde zunächst der lokale Beanspruchungszustand an den Kernen mittels Stabwerkmodell ermittelt. Abschließen wurde unter Zuhilfenahme der Finite-Elemente-Methode (FEM), ein Modell zur Beschreibung des auftretenden Versagens hergeleitet. Diese rechnerischen Untersuchungen dienen v. a. dem besseren Verständnis des beobachteten Tragverhaltens und der Einordnung der Versuchsergebnisse in Hinblick auf das zweite Projektziel.

AP 3.1: Herleitung von Bemessungsansätzen

Basierend auf den Ergebnissen der bereits abgeschlossenen Projektphasen werden praxistaugliche Ansätze zur rechnerischen Beschreibung des Trag- und Verformungsverhaltens von HBV-Systemen hergeleitet. Weiterhin werden im Hinblick auf die Verwendbarkeit Vorschläge zur Bemessung ausgearbeitet. Dies erfolgte in Anlehnung an bisher verwendete und anerkannte Berechnungsverfahren und den aktuellsten Normentwürfen für den Holz-Beton-Verbundbau.

AP 3.2: Erarbeitung von Herstellungs- und Ausführungsempfehlungen

Für eine baupraktische, wirtschaftliche und sichere Verwendbarkeit von Calciumsulfatbeton in HBV-Systemen wurden Empfehlungen hinsichtlich Herstellung, Montage und Ausführung in enger Abstimmung mit den Wirtschaftspartnern erarbeitet. Durch die Veröffentlichung der Projektergebnisse werden zudem die Empfehlungen der Bauindustrie zur Verfügung gestellt.

3 Darstellung und Bewertung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse entsprechend der drei Projektphasen und der untergeordneten Arbeitspakete in einzelnen Abschnitten untergliedert dargestellt.

3.1 Materialspezifische Grundlagen

3.1.1. Grundlagen für die Betonentwicklung

Für die Entwicklung von geeigneten Betonrezepturen wurden anfangs unterschiedliche Ausgangsformen von Calciumsulfatbindern auf ihr Abbindeverhalten und die zeitabhängige Festigkeitsentwicklung untersucht. Verwendet wurde natürliches Calciumsulfat, thermisches Calciumsulfat und synthetisches Calciumsulfat. Das Mischungsverhältnis des Bindemittels zur Gesteinskörnung wurde in Anlehnung an DIN EN 13454-2:2019 zur Bestimmung der mechanischen Festigkeiten festgelegt, dabei entsprach das Verhältnis von Bindemittel zu Gesteinskörnung 1:2. Für den Wassergehalt diente die Norm ebenfalls als Orientierung, wobei mindestens ein Verhältnis von Wasser zu Bindemittel von 0,33 einzuhalten ist. Damit eine bessere Verarbeitbarkeit gegeben ist, wurde ein Verhältnis von 0,45 festgelegt. Dieses Ausgangsmischverhältnis wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit beibehalten. Als Gesteinszuschlag für die Mischungen wurde ein Quarzsand der Korngröße 0 - 2 mm mit einer Sieblinie in Anlehnung an den „CEN-Normsand“ gemäß DIN EN 196-1:2016 verwendet. Das Prüfkörperformat (Prismen $b \times h \times l = 40 \times 40 \times 160$ mm) sowie die Bestimmung der Druck- und Biegezugfestigkeit entsprach ebenfalls dieser Norm. Ein Teil der Ergebnisse ist in Abbildung 5 zusammengefasst.

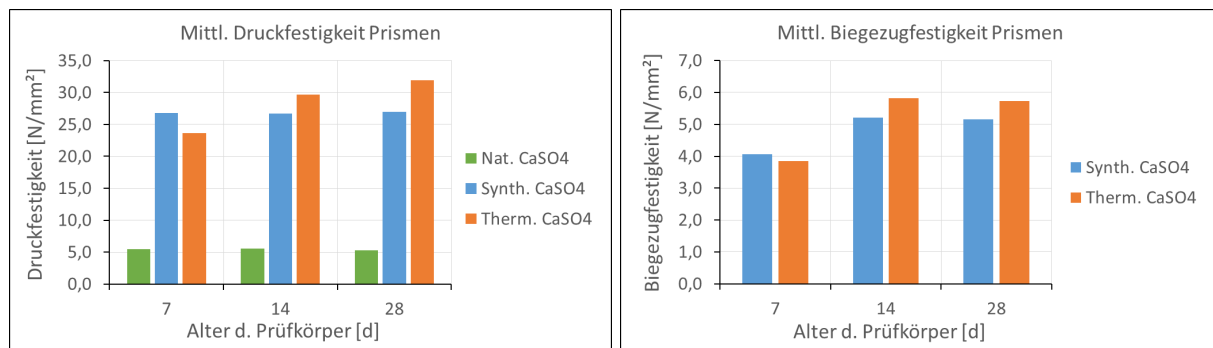


Abbildung 5: Druckfestigkeiten (links) und Biegezugfestigkeiten (rechts) von Prismen-Prüfkörpern

Natürliches Calciumsulfat erreichte im Vergleich die niedrigsten Druckfestigkeiten und konnte in den Biegeversuchen nicht vollständig geprüft werden, da es schon vor Erreichen der Prüfmaschinen-Vorkraft versagte. Diese Ergebnisse könnten auf einen mangelhaften Reinheitsgrad des Naturanhydrits und/oder unzureichende Mahlfineinheit zurückzuführen sein. Die Anpassung der Zugabemenge des Anregerstoffs bewirkte keine Besserung. Die beiden anderen Formen von Calciumsulfat erreichten deutlich bessere Festigkeiten, welche sich mit fortgeschrittener Trocknungszeit teilweise erhöhten.

Im weiteren Verlauf wurden die Druckfestigkeiten an würfelförmigen Prüfkörpern (Kantenlänge 100 mm und 150 mm) und der Elastizitätsmodul an Zylindern ($d \times h = 100 \times 200$ mm² und 150×300 mm²) bestimmt, um den Einfluss auf die trocknungsbedingte Festigkeitsentwicklung zu untersu-

chen. Neben den bisherigen Bindemitteln wurde anstelle des natürlichen Calciumsulfats ein Compoundbinder (Mischung aus Naturanhydrit, therm. Calciumsulfat und Anregerstoff) getestet. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind in Abbildung 6 zusammengefasst.

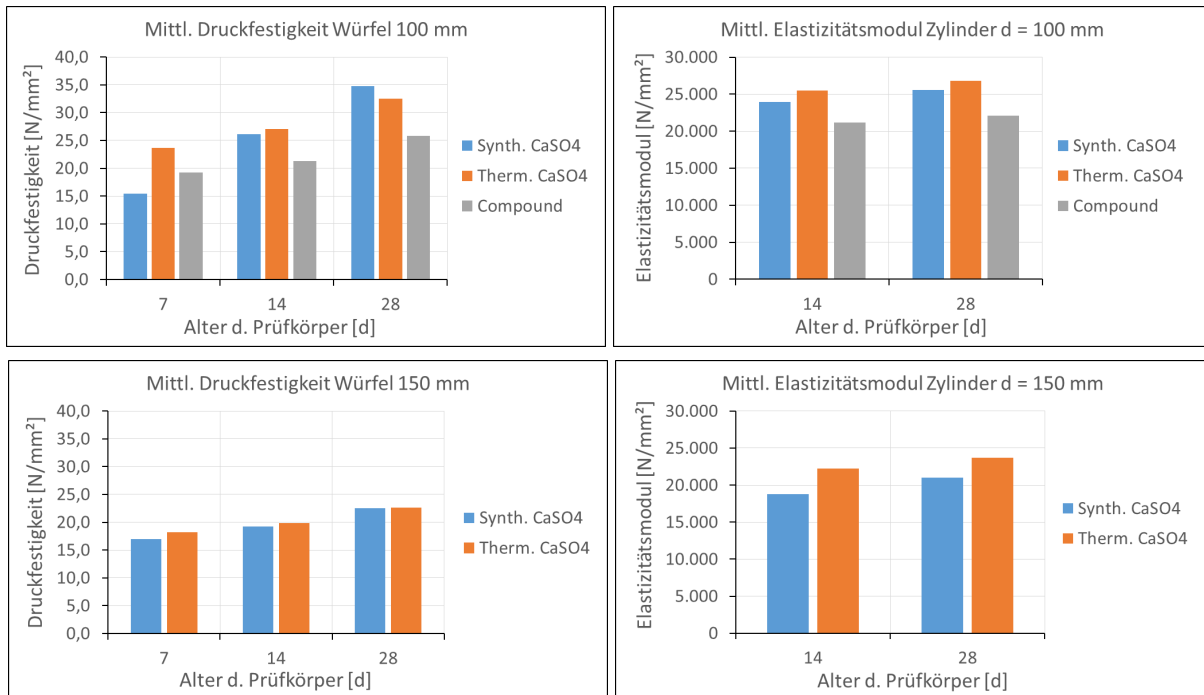


Abbildung 6: Weiterführende Ergebnisse der Betonentwicklung mit Calciumsulfat

Es wurde v. a. deutlich, dass mit größeren Prüfkörperformaten niedrigere Werte der mechanischen Eigenschaften zu erwarten sind. Vergleichbare Festigkeiten nach 28 Tagen waren bei den kleineren Prismen-Prüfkörpern schon nach 7 Tagen feststellbar. Die Werte aus den E-Modulprüfungen stiegen zwischen 14 und 28 Tagen nicht mehr wesentlich, waren aber insgesamt schon in der Größenordnung von Betonen auf Zementbasis ($> 20.000 \text{ N/mm}^2$). Insgesamt wurde trotz der langsamen Festigkeitsentwicklung der geprüften Bindemittelkompositionen ein praxistauglicher Einsatz im Holz-Beton-Verbundbau als möglich bewertet. Größere Gesteinskorngruppen ($> 2 \text{ mm}$) sollten die Festigkeit und Steifigkeit weiter verbessern.

Weitere Versuche als Grundlage für die Entwicklung von Betonrezepturen wurden mit Mischungen aus dem bereits erprobten Bindemittel-Compound (Comp) mit 24 mm langen Basaltfasern (BF24) und zum Vergleich 25 mm langen Glasfasern (GF25) an Prismen-Prüfkörpern durchgeführt (siehe Abbildung 7). Die Faserzugabemenge wurde zwischen 5 kg/m^3 und 10 kg/m^3 variiert.

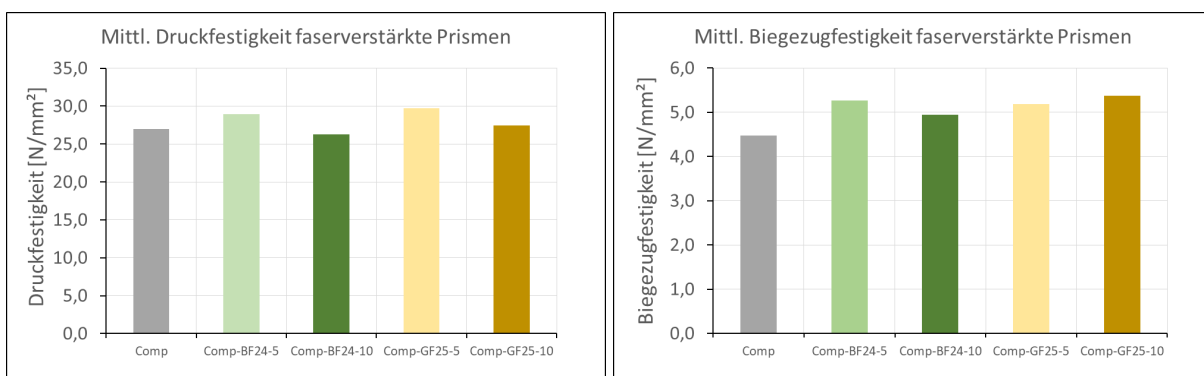


Abbildung 7: Prüfergebnisse mit CAF-Bindemittelcompound und Faserzugabe

Die Biegezugfestigkeit konnte unabhängig vom Fasermaterial geringfügig erhöht werden, während die Druckfestigkeit eher gleich blieb. Das Nachbruchverhalten wurde augenscheinlich deutlich verbessert. Dies sollte vor allem bei den Abscherversuchen in AP 2.1 genauer untersucht werden. Dafür wurden aufgrund der besseren ökologischen Eigenschaften die erprobten Basaltfasern ausgewählt. Um eine bessere Verteilung in der Fasermatrix erzielen zu können, wurde die Faserzugabemenge auf 10 kg/m^3 festgelegt. Größere Mengen würden die Verarbeitbarkeit und Pumpbarkeit des Betons bei der Verwendung von Silomischpumpen gefährden. Ebenso könnten längere Fasern ein Verstopfen der im Projekt verwendeten Silomischpumpen verursachen, weswegen die Faserlänge im Projekt bei 24 mm belassen wurde.

Kleinere Reihen von Tastversuchen gegen Ende des Arbeitspakets AP 1.1 unter der Verwendung von CSA-Zement und Calciumsulfat- α -Halbhydrat zeigten ermutigende Ergebnisse (v. a. hinsichtlich der Festigkeitsentwicklung) und flossen in die weiterführende Betonentwicklung (siehe AP 1.4) ein.

3.1.2. Entwicklung von Prüfverfahren

Bereits in Arbeitspaket AP 1.1 wurden vergleichende Versuche mit unterschiedlichen Prüfkörperformaten durchgeführt. Dabei wurden die Verfahren nach DIN EN 12390-3:2019 und DIN EN 12390-13:2014 getestet. Der Vergleich der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Prüfkörperformate ist in Abbildung 6 sichtbar. Grundsätzlich eignen sich die gängigen Prüfkörperformate aus den einschlägigen Betonprüfnormen auch für Calciumsulfatbeton, wobei die Lagerungsbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse haben können. Üblicherweise sind die Prüfkörper nach DIN EN 12390-2:2019 nach dem Ausschalen in Wasser bei einer Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ oder in einem Feuchtraum ($\geq 95 \text{ } \%$ rel. Luftfeuchte) zu lagern. Aufgrund der Feuchteempfindlichkeit von Calciumsulfat und dem daraus resultierenden Festigkeitsverlust ist eine Wasserlagerung keine Option. Für calciumsulfatbasierte Estrichproben (ausgeschalt) sieht die DIN EN 13892-1:2003 eine Lagerungstemperatur von $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ und eine rel. Luftfeuchtigkeit von $65 \pm 5 \text{ } \%$ vor. Unter diesen klimatischen Lagerungsbedingungen beträgt die Lagerungsdauer bis zur Prüfung 26 Tage. Nach den Vorgaben der Normenreihe der DIN EN 12390 sind die Prüfungen der mechanischen Eigenschaften nach 28 Tagen durchzuführen, was auch für Proben aus Calciumsulfatbeton sinnvoll ist. Daher wurde für den weiteren Verlauf des Projekts eine Kombination der Prüfverfahren der DIN EN 12390 und den Verfahren zur Prüfkörperlagerung aus der DIN EN 13892-1:2003 für Estriche wie folgt festgelegt.

Als Prüfkörperformat für die Bestimmung der Druckfestigkeit wurden gängige Würfelformen mit einer Kantenlänge von $100 - 150 \text{ mm}^2$ gewählt. Für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls sind Zylinder mit den Abmessungen $d \times h = 100 \times 200$ bis $150 \times 300 \text{ mm}^2$ geeignet. Die Schalungsformen für die Prüfkörper sollten im Allgemeinen aus nichtrostendem Stahl oder einem vergleichbaren Werkstoff, der nicht mit den Probenmaterialien reagiert, hergestellt werden. Das Ausschalen der Proben soll 48 ± 2 Stunden nach der Betonage erfolgen. Danach sind die ausgeschalteten Prüfkörper bei $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ und eine rel. Luftfeuchtigkeit von $65 \pm 5 \text{ } \%$ bis zur Prüfung (Betonalter 28 Tage) zu lagern. Das Lagerungsklima gilt im Übrigen auch für Holzproben nach einschlägigen Prüfnormen und entspricht ungefähr dem Raumklima in der Nutzungsklasse 1 (geschlossene und beheizte Räume).

Für die Bestimmung der Frischbetonkonsistenz eignet sich der sog. Ausbreitversuch nach DIN EN 12350-5:2019 oder bei sehr fließfähigen Rezepturen die bereits etablierte Bestimmung des Fließmaßes mit einer 1,3 l PFT-Konsistenzprüfdose. Über das Fließmaß lässt sich die Wasserzugabemenge kontrollieren, indem die Dose auf eine Schrenzlage gestellt mit Beton gefüllt und anschließend angehoben wird. Der Durchmesser des sich dabei ausbreitenden Fladens ist das Fließmaß.

Es ist frühestens 10 Sekunden nach dem Anheben der Prüfdose zu messen und mit dem vorgegebenen/gewünschten Fließmaß zu vergleichen.

Neben Prüfverfahren für Betone wurde in diesem Arbeitspaket auch eine Versuchsmethode entwickelt, um die Wirksamkeit der Hydrophobierung zu ermitteln. Dabei wurde die aus der Estrichtechnologie stammende Prüfmethode „KLR-Messung“ (Messung der korrespondierenden Luftfeuchte) auf Holzproben adaptiert. Der im Folgenden beschriebene Versuchsaufbau der KLR-Messung in Holzproben ist in Abbildung 8 dargestellt.

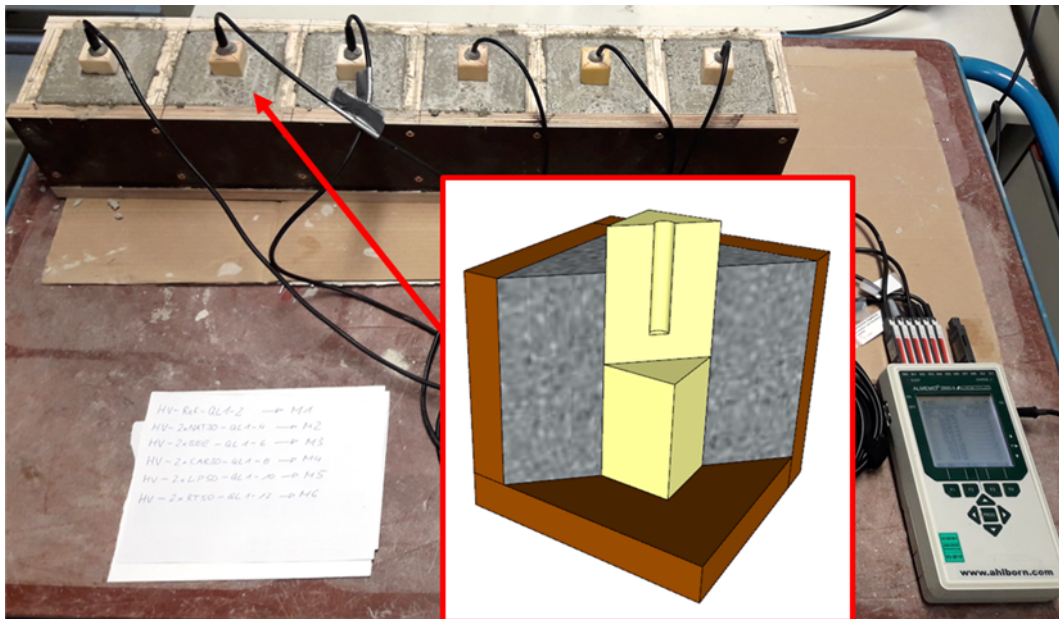


Abbildung 8: KLR-Messung an Holzprismen zur Untersuchung der Hydrophobierung

Dabei sind ast- und fehlerfreie Prismen ($b \times h \times l = 28 \times 28 \times 120 \text{ mm}^3$) aus Nadelholz zu verwenden. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, sollten alle Prismen aus derselben Quadratleiste geschnitten werden. Nach der Hydrophobierung der Holzproben sind die einzelnen Prismen in Würfelschalungen (Kantenlänge 100 mm) stehend einzubauen und von unten zu befestigen. Die Messfühler zur Messung der relativen Luftfeuchte im Holz sind in 50 mm tiefe Bohrlöcher in die oberen Stirnseiten der Holzprismen einzubringen und abzudichten. Nachdem die Würfelschalungen mit Beton befüllt wurden, ist die Messung für mindestens 72 Stunden durchzuführen. Aufgrund des Anmachwassers des Betons erfolgt ein Feuchteeintrag in die Holzproben, wodurch sich die rel. Luftfeuchtigkeit im Bohrloch ändert. Über die gemessene Zunahme der rel. Luftfeuchtigkeit kann die Wirksamkeit der Hydrophobierung qualitativ bewertet werden. Anschließende Darrproben der Hölzer nach ISO 13061-1:2014 können zur Verifizierung der KLR-Messung durchgeführt werden.

3.1.3. Hydrophobierung des Holzes

In gängigen HBV-Deckensystemen erfolgt der Feuchteschutz der Holzelemente in der Regel durch aufgetragene PE-Folien. Der Verzicht auf einen Feuchteschutz ist generell nicht zu empfehlen und wird daher teilweise in den Zulassungen von HBV-Systemen geregelt. Die Notwendigkeit der Hydrophobierung von Holzelementen wurde in Abhängigkeit des umgebenen Betons bzw. Bindemittels nochmals zu Beginn der Untersuchungen verdeutlicht. Dazu wurden die Bindemittel Portlandzement (CEM I), Calciumsulfat (Naturanhydrit), und CSA-Zement bei einem einheitlichen Wasser/Bindemittel-Verhältnis von 0,40 angemischt und mit Holzproben in Schalungen gegossen. Nach 8 Tagen

wurden die Holzproben herausgenommen und die Holzfeuchte nach ISO 13061-1:2014 (Darr-Messung) bestimmt. Die Messung ergab, dass sich die Holzfeuchte in Calciumsulfat von ursprünglich 9,6 % auf 25,6 % erhöht hat. Bei Portlandzement wurden Holzfeuchten von durchschnittlich 19,2 % gemessen. Die Holzproben in CSA-Zement hatten mit 15,2 % den niedrigsten Wert. Bei Bauholz sollte eine Holzfeuchte von 20 % dauerhaft nicht überschritten werden. Die Notwendigkeit einer Hydrophobierung der Holzelemente könnte durch geeignete Betonrezepturen mit CSA-Zement entfallen, da der Feuchteintrag infolge des schnellen Abbindeprozesses geringer ist.

Bei Bindemittelkompositionen mit Calciumsulfat als Hauptbestandteil ist die Feuchte des Anmachwassers deutlich länger vorhanden, weswegen zum Schutz der Holzelemente vor der Feuchtigkeit und zur Reduzierung der Quellverformungen unterschiedliche wasserbasierte Wachsdispersionen mit KLR-Messungen (siehe Abbildung 8) erprobt wurden. Die Rezepturen basierten auf Bienenwachs (BEE), Carnaubawachs (CAR30) sowie einer Mischung aus natürlichen Wachsen und Ölen (NAT30). Der Feststoffgehalt betrug bei den verwendeten Emulsionen zwischen 20 % und 30 %, wobei darin der Anteil an nachwachsenden Rohstoffen zwischen 50 % und 80 % beträgt. Die Applikation der Emulsionen auf die Holzproben erfolgte durch zweifachen Pinselanstrich mit einer Trocknungszeit von mind. 24 Stunden zwischen den Anstrichen. Zum Vergleich wurde eine Referenzmessung (Ref) ohne Hydrophobierung und eine Dispersion auf Basis von Paraffinwachs (PAR50) mitgetestet. Die Ergebnisse der KLR-Messung sind in Abbildung 9 dargestellt.

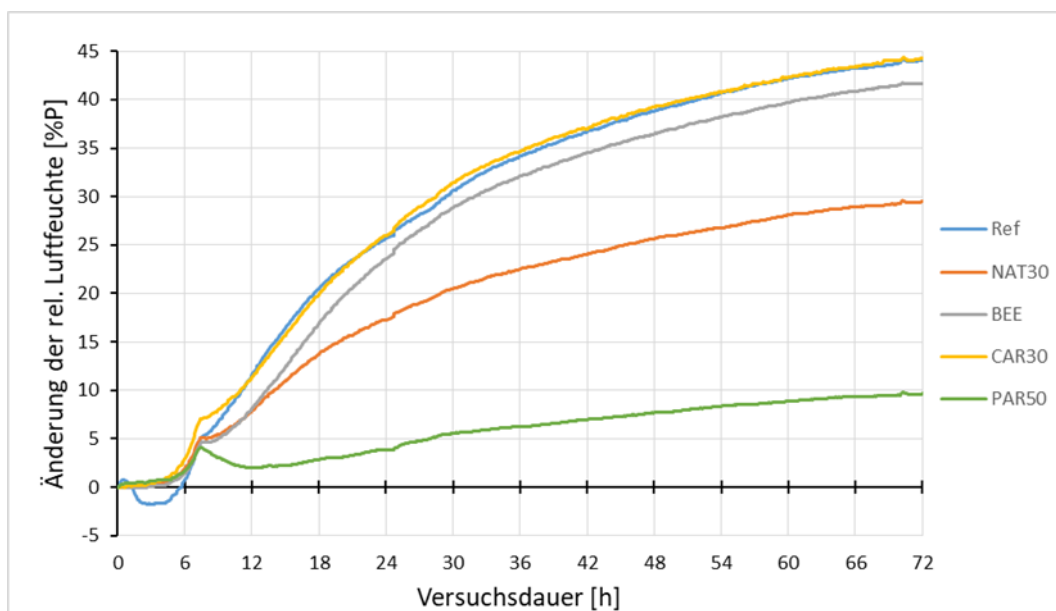


Abbildung 9: Ergebnisse der Hydrophobierungsversuche der Holzelemente

Vergleichbare Ergebnisse wurden bei weiteren KLR-Messungen in herkömmlichem Zementbeton erzielt, wobei insgesamt eine materialbedingte, niedrigere Feuchtigkeit gemessen wurde. Dabei erzielte unter den Wachsdispersionen auf Basis nachwachsender Rohstoffe die Rezeptur NAT30 insgesamt die besten Ergebnisse, welche in weiteren KLR-Messungen mit anderen Betonrezepturen bestätigt wurde. Daher wurde im Projekt für alle weiteren Bauteiluntersuchungen das Holz an der Betonkontaktfläche vor der Betonage zweifach mit NAT30 bestrichen und mind. 24 Stunden bei Raumklima zum Trocknen/Einwirken belassen. Aufgrund der hauptsächlich natürlichen Bestandteile ist die Wachsdispersion laut Hersteller gemäß CLP-Verordnung nicht als gefährlich eingestuft.

3.1.4. Festlegung und Prüfung geeigneter Betone

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden aussichtsreiche Betonrezepturen genauer getestet und weitere Anpassungen der Mischungsentwürfe durchgeführt. Die Anpassung der Mischungsentwürfe betraf v. a. die Größe der Gesteinskörnung sowie die Verwendung weiterer Betonzusatzstoffe (Fließmittel, etc.). Als Zielgröße der mechanischen Eigenschaften wurden Werte eines Normalbetons der Festigkeitsklasse C25/30 angestrebt. Aus diesem Grund wurde zum Vergleich ein Referenzbeton (OPC908) dieser Klasse ausgewählt und in Hinblick auf die Zielsetzung (Ziel 1: 50 % Einsparung der herstellungsbedingten CO₂-Emissionen) bewertet. Die Rezeptur des Referenzbetons OPC908 war hinsichtlich der Verarbeitbarkeit so ausgelegt, dass damit die Konsistenzklasse F5 eingehalten wurde.

Auf Grundlage der Vorversuche in AP 1.1 wurde eine von der Fa. Franken Maxit entwickelte Rezeptur CAF470 erprobt, welche auf einer Bindemittelkomposition aus Naturanhydrit (ca. 10 M.-% des Trockenbetons) und Calciumsulfat- α -Halbhydrat (ca. 30 M.-% des Trockenbetons) sowie Gesteinskörnung der Korngruppe 0 - 4 mm basiert. Die Wasserzugabemenge betrug 16 % der Trockenbetonmasse und führte zu einer gut fließfähigen Konsistenz (Fließmaß 35 – 40 cm mit 1,3 l Prüfdose). Da unter Baustellenbedingungen das Klima deutlich vom festgelegten „Laborlima“ (siehe AP 1.3) abweichen kann, wurden zusätzlich zwei weitere Lagerungsklimata (Winter- und Sommerbetonage) getestet. Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung an Würfeln der Kantenlänge 150 mm unter Berücksichtigung unterschiedlicher Lagerungsklimata sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Würfel-Druckfestigkeit des Betons CAF470 in Abhängigkeit des Lagerungsklimas

| Lagerungsklima | Würfel-Druckfestigkeit [N/mm ²] nach | | | |
|--------------------------|--|-------------|-------------|-------------|
| | 14 Tagen | | 28 Tagen | |
| | Einzelwerte | Mittelwert | Einzelwerte | Mittelwert |
| 10 °C / 70 % r.F. | 36,3 | 35,8 | 39,5 | 38,3 |
| | 36,9 | | 39,1 | |
| | 36,9 | | 40,2 | |
| | 33,7 | | 35,7 | |
| | 35,2 | | 37,0 | |
| 20 °C / 60 % r.F. | 36,8 | 37,3 | 40,6 | 40,8 |
| | 36,4 | | 41,6 | |
| | 35,5 | | 40,4 | |
| | 40,4 | | 42,8 | |
| | 37,4 | | 38,4 | |
| 30 °C / 50 % r.F. | 41,2 | 39,0 | 50,1 | 46,0 |
| | 36,0 | | 52,4 | |
| | 39,1 | | 39,0 | |
| | 39,6 | | 45,3 | |
| | 39,0 | | 43,2 | |

Für einen Normalbeton der Festigkeitsklasse C25/30 wird für Würfel eine mittlere Druckfestigkeit von ca. 38 N/mm² nach 28 Tagen erwartet. Der Beton CAF470 erfüllt im Mittel bei allen drei Lagerungsklimata diese Anforderung. Bei der Prüfung des E-Moduls (jeweils zwei Zylinder, $d \times h = 150 \times 300$ mm²) wurde eine geringere Beeinflussung des Lagerungsklimas festgestellt. Die Mittelwerte betragen insgesamt 23.142 N/mm² nach 14 Tagen und 23.291 N/mm² nach 28 Tagen. Im Anschluss an die Bestimmung des E-Moduls wurde an denselben Betonzylindern die Spaltzugfestigkeit nach

DIN EN 12390-6:2010 geprüft und im Mittel eine Festigkeit von 2,40 N/mm² nach 14 Tagen und 2,85 N/mm² nach 28 Tagen festgestellt. Der Beton CAF470 erfüllte damit auch in etwa die zu erwartende mittlere Zugfestigkeit f_{ctm} von 2,6 N/mm² eines Normalbetons der Klasse C25/30. Hinsichtlich des Schwindverhaltens unter Laborklima zeigte der Beton CAF470 die zu erwartenden Stärken im Vergleich zum Referenzbeton OPC908 (siehe Abbildung 10).

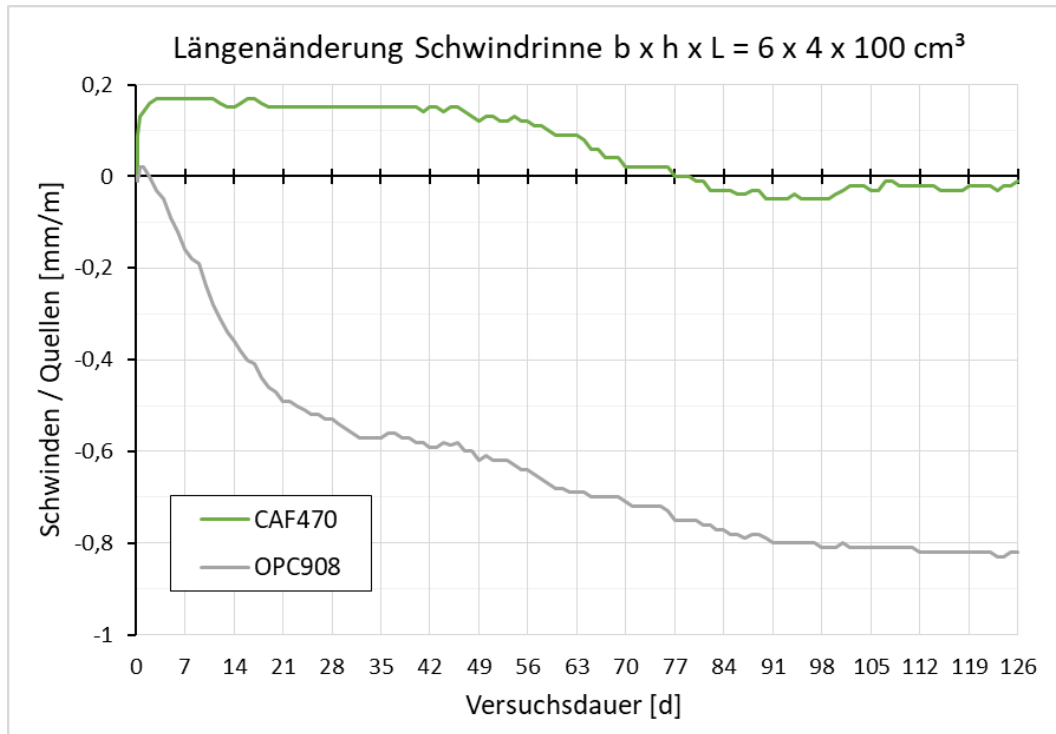


Abbildung 10: Schwindmessung an den Betonen CAF470 und OPC908

Nach einem anfänglichen Aufquellen durch die Aushärtung/Kristallisation (Wiegrink 2002) ist effektiv nur ein Schwinden auf die ursprüngliche Länge innerhalb von 10 Wochen aufgetreten, wohingegen der Referenzbeton auf Zementbasis sich insgesamt bis zu 0,8 ‰ verkürzt hat. Das deutlich bessere Schwindverhalten ist in Hinblick auf die Langzeit-Durchbiegung einer HBV-Decke sehr positiv zu bewerten. Dadurch kann die Schwäche aufgrund des geringeren E-Moduls (ca. 23.000 N/mm²) des Betons CAF470 – bei einem Normalbeton der Klasse C25/30 sind 31.000 N/mm² zu erwarten – eventuell ausgeglichen werden. Dieser Effekt wurde bei den Langzeitversuchen in AP 2.3 noch genauer untersucht.

Neben Betonrezepturen mit calciumsulfatbasiertem Bindemittel wurden auch Betone mit CSA-Zement erprobt. Eine typische Eigenschaft von CSA-Zementen ist die sehr schnelle Festigkeitsentwicklung und hohe Reaktivität, wodurch bereits nach wenigen Stunden die Festigkeit schon so hoch sein kann, wie bei einer 28 Tage alten vergleichbaren Mischung mit Portlandzement. Aus diesem Grund wurden bei der Betonentwicklung die Prüfintervalle verkürzt, sodass die Festigkeiten nach 7 und 14 Tagen getestet wurden. Der verwendete CSA-Zement (mit bauaufsichtlicher Zulassung) bestand aus ca. 85 M.-% Calciumsulfoaluminat-Klinker und ca. 15 M.-% Calciumsulfat inkl. weiterer Nebenbestandteile. In den getesteten Betonrezepturen wurde u. a. Flugasche, Hüttensand, Kalksteinmehl und Trass eingesetzt, um den Bindemittelanteil zu reduzieren. Hinsichtlich der Verarbeitbarkeit und der Festigkeitsentwicklung überzeugte jedoch die Rezeptur CSA906 mit reinem CSA-Zement (ca. 16 M.-% der Trockenbetonmischung) am besten. Die Gesteinskörnung (0 – 8 mm) macht ca. 84 M.-% (inkl. Zusatzmittel wie Verzögerer und Fließmittel) der Trockenbetonmischung

aus. Mit einer Wasserzugabemenge von ca. 8 % auf die Trockenbetonmischung wurde die Betonkonsistenzklasse F4 (sehr weich) erreicht. Die mittlere Würfel-Druckfestigkeit des Betons CSA906 betrug nach 7 Tagen 40,4 N/mm² und nach 14 Tagen 41,6 N/mm². Eine weitere, große Festigkeitsentwicklung wurde nicht erwartet. Nach 14 Tagen wurde ein mittlerer E-Modul von 29.211 N/mm² festgestellt. Die Spaltzugfestigkeit betrug nach DIN EN 12390-6:2010 im Mittel 3,2 N/mm². Bei der Messung des Schwindverhaltens zeigte der Beton CSA906 nach 28 Tagen eine Verkürzung um 0,4 ‰ und bestätigte damit das tendenziell günstige Schwindverhalten von CSA-Zement (Péra und Ambroise 2004).

Hinsichtlich der Druck- und Zug-Festigkeiten liegen die Betone CAF470 und CSA906 im Bereich der Ziel-Festigkeitsklasse C25/30 oder höher. Einzig die Werte des E-Moduls sind im Vergleich niedriger als der zu erwartende Normwert von 31.000 N/mm², wobei der E-Modul des Referenzbetons OPC908 im Mittel auch nur bei ca. 25.000 N/mm² liegt. Nach dem Normenentwurf der DIN CEN/TS 19103:2022 (Berechnung von Holz-Beton-Verbundbauteilen) wird für Kerben mindestens eine Betonfestigkeitsklasse von C20/25 gefordert. Daher wurden die Betone CAF470 und CSA906 für die weiterführenden Untersuchungen in Projektphase 2 als gut geeignet bewertet.

In Bezug auf die weitere Zielsetzung (Halbierung der herstellungsbedingten CO₂-Emissionen) wurden rechnerische Abschätzungen des globalen Erwärmungspotentials (GWP) für die ausgewählten Betone OPC908 (Referenz), CAF470 und CSA906 durchgeführt. Zur Berücksichtigung des Bewehrungsmaterials wurde angenommen, dass der Referenzbeton mit 30 kg/m³ Mindest-(Stahl)Bewehrung und die Betone CAF470 sowie CSA906 mit 10 kg/m³ Basaltfasern armiert sind. Als Berechnungsgrundlage dienten überwiegend die Prozess-Datensätze (für den Prozess „Herstellung A1-A3“) aus dem Informationsportal „ÖKOBAUDAT“ des Bundesministeriums des Inneren, für Bau und Heimat. Die Daten wurden teilweise mit Angaben der „ICE Database“ (Circular Ecology) ergänzt. Weitere Quellen sind (Hanein et al. 2018), (Kreißig und Stoffregen 2007) und (Kromoser 2021). Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 und Abbildung 11 zusammengefasst.

Tabelle 2: Herstellungsbedingte CO₂-Emissionen der Betone

| GWP in kg CO ₂ -Äquivalent pro m ³ Beton für die Bestandteile | OPC908 | CAF470 | CSA906 |
|---|--------------|--------------|--------------|
| Bindemittel | 325,3 | 144,4 | 199,1 |
| Zusatzmittel | 13,9 | 13,4 | 8,9 |
| Sand/Kies | 49,5 | 36,3 | 60,7 |
| Wasser | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| (Mindest-)Bewehrung | 21,9 | 3,0 | 3,0 |
| Summe: | 410,7 | 197,2 | 271,7 |

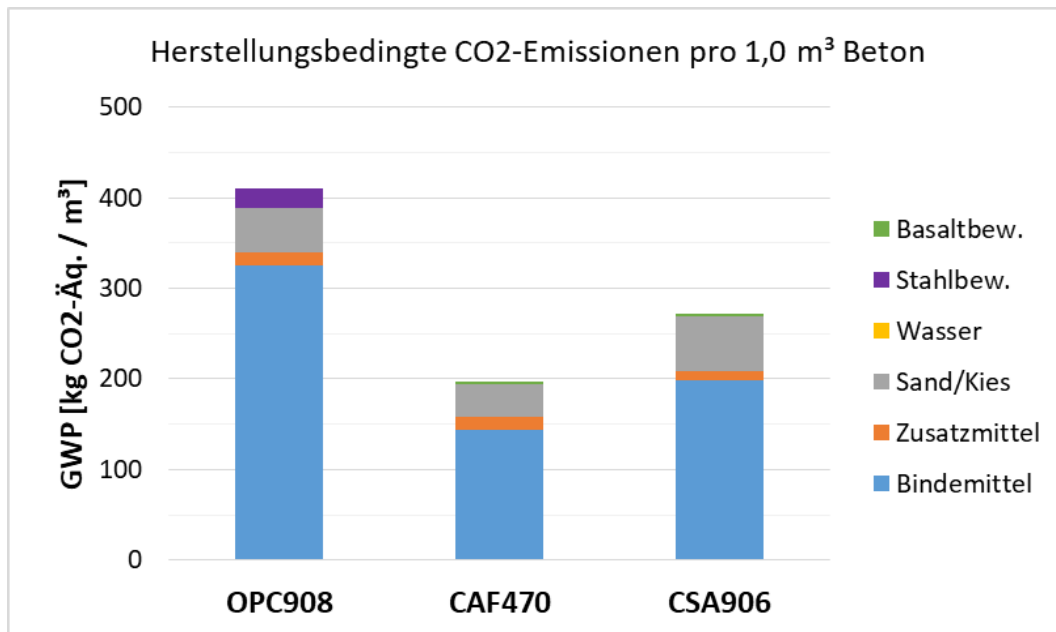


Abbildung 11: Herstellungsbedingtes GWP der ausgewählten Betone

Die Ergebnisse zeigen erneut, dass das größte CO₂-Einsparpotential in der Substitution von Zement (v. a. CEM I) als Bindemittel liegt. Insgesamt betragen die herstellungsbedingten CO₂-Emissionen des Calciumsulfatbetons CAF470 ca. 48 % des GWP des Referenzbetons OPC908 sowie beim CSA-Beton CSA906 ca. 66 %. Mit der Rezeptur CSA906 wird die Zielsetzung zwar um 16 %P verfehlt, unter Berücksichtigung weiterer CO₂-Reduzierungsmaßnahmen bei der Herstellung von CSA-Zement, wäre jedoch eine weitere Einsparung möglich (Hanein et al. 2018). Zudem können aufgrund von möglichen Einsparungen der Bauzeit, infolge der schnellen Festigkeitsentwicklung, an anderer Stelle Emissionen und Ressourcen eingespart werden. Daher wurde der entwickelte CSA-Beton in geringem Umfang in der zweiten Projektphase mitverwendet. Mit dem calciumsulfatbasierten Beton CAF470 wurde Projektziel 1 hinsichtlich der Einsparung herstellungsbedingter CO₂-Emissionen erreicht. Die abschließende Bewertung der Leistungsfähigkeit bezüglich der Verwendung in HBV-Bauteilen wurde in Projektphase 2 geprüft.

3.2 Anwendungsorientierte Untersuchungen

3.2.1. Ermittlung der Verbundsteifigkeit und -tragfähigkeit an Scherprüfkörpern

Nach Abschluss der ersten Projektphase und Festlegung der Betonrezepturen für die anwendungsorientierten Untersuchungen (Projektphase 2), wurden die ersten kleinformigen Holz-Beton-Verbundprüfkörper in Abscherversuchen getestet. Als Verbundart zwischen Holz und Beton wurde die Kerbe gewählt, da diese in der Baupraxis zunehmend verwendet wird (Hölzl 2014) und die Bemessung im Normentwurf der DIN CEN/TS 19103:2022 als zukünftiger Teil der DIN EN 1995-1-1:2010 geregelt ist (unter Verwendung von Zementbeton nach DIN EN 206:2021 und DIN EN 1992-1-1:2011). In diesem Normentwurf ist eine Schraube als Abhebesicherung infolge des Versatzmoments vorgeschrieben. Die Abscherversuche wurden jedoch ohne den Einsatz von Schrauben durchgeführt, um die Auswirkungen zu untersuchen und später alternative Maßnahmen zur Abhebesicherung zu konzipieren.

Es wurden die Betone CAF470 und CSA906 neben dem Referenzbeton OPC908 verwendet. Zudem wurden Prüferien mit Basaltfasern der Länge 24 mm mit einer Zugabemenge von 10 kg/m³ durchgeführt. Die Holz-Prüfkörper (verschraubte Brettstapel, mittlere Rohdichte 412 kg/m³) mit CAF470 wurden vor der Betonage mit der in AP 1.3 erprobten Emulsion NAT30 zur Hydrophobierung zweifach an der Kontaktfläche angestrichen. Mit einer Kerntiefe von 20 mm und einer Kervlänge von 150 mm wurden die Mindestanforderungen der DIN CEN/TS 19103:2022 erfüllt. Nach 14 Tagen Beton-Aushärtungszeit unter Laborlima-Bedingungen (ca. 20 °C; 60 % r. F.) wurden die Versuche durchgeführt. Die mittlere Druckfestigkeit des CAF470 betrug zu diesem Zeitpunkt 36,6 N/mm² und beim Referenzbeton 48,9 N/mm². Der Beton mit der Rezeptur CSA906 hatte eine mittlere Druckfestigkeit von 47,1 N/mm².

Die Belastung und Auswertung (max. Prüflast F_{max} und Verschiebungsmodul K_{ser}) erfolgte nach den Vorgaben der DIN EN 26891:1991. Der Aufbau der Prüfvorrichtung und der HBV-Prüfkörper ist in Abbildung 12 dargestellt.

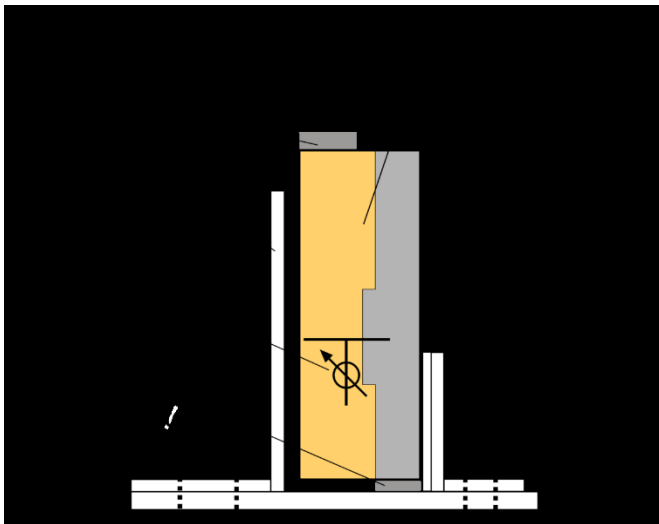


Abbildung 12: Prüfvorrichtung der Abscherversuche

Die Ergebnisse der Abscherversuche sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Last-Verschiebungsdiagramme aller Versuche befinden sich in Anlage 2.

Tabelle 3: Ergebnisse der Abscherversuche

| Versuchsserie (und Prüfkörperanzahl n) | | Mittelwerte (und Variationskoeffizient [%]) | |
|--|-----------------------|---|-----------------------|
| | | F_{max} [kN] | K_{ser} [N/mm] |
| OPC908 | ohne Fasern (5) | 153,8 (6,4) | 202.694 (17,1) |
| | mit Fasern (5) | 136,0 (20,2) | 205.474 (21,8) |
| CAF470 | ohne Fasern (5) | 120,0 (15,7) | 198.832 (16,9) |
| | mit Fasern (5) | 119,0 (9,7) | 216.015 (17,2) |
| CSA906 | ohne Fasern (3) | 134,5 (5,3) | 201.926 (15,5) |
| | mit Fasern (3) | 147,8 (5,4) | 209.545 (29,8) |

Aus der Gegenüberstellung der Ergebnisse ist ersichtlich, dass insgesamt vergleichbare Verbundsteifigkeiten K_{ser} erreicht wurden. Dies lässt sich damit begründen, dass die Verbundsteifigkeit überwiegend vom E-Modul der Holzelemente und der Druckbelastung an der Kerne bestimmt wird. Daher sind die verwendeten Betone in Hinblick auf die Verbundsteifigkeit als gleichwertig anzusehen. Die teils hohen Streuungen der Ergebnisse sind bei Abscherversuchen mit HBV-Prüfkörpern üblich, da vereinzelt Äste und/oder Risse in den Holzelementen das Verhalten beeinflussen. Nach DIN CEN/TS 19103:2022 wäre für die vorliegende Kervengeometrie ein mittlerer K_{ser} -Wert von 240.000 N/mm zu erwarten gewesen. Dies gilt für die darin festgelegte Holz-Festigkeitsklasse von mind. C24 bzw. GL24h, was mit einer mittleren Rohdichte von 420 kg/m³ einhergeht. Bei den hier verwendeten Hölzern wurde im Mittel eine Rohdichte von 412 kg/m³ festgestellt, sodass damit auch der E-Modul geringer sein könnte und das die niedrigeren Verbundsteifigkeiten erklären würde.

Die Tragfähigkeit wurde hauptsächlich von der Betonfestigkeit begrenzt, da generell an der Kerne infolge mehraxialer Spannungszustände auch Zugbeanspruchungen auftreten. Dies wurde durch Schubrisse im Beton ab ca. 90 kN (bei Prüfkörpern mit CAF470-Beton) sichtbar und führte im weiteren Verlauf bei Laststeigerung zu teils starkem Risswachstum (siehe Abbildung 13) sowie einem abschließenden Abscheren der Betons in der Kerne.

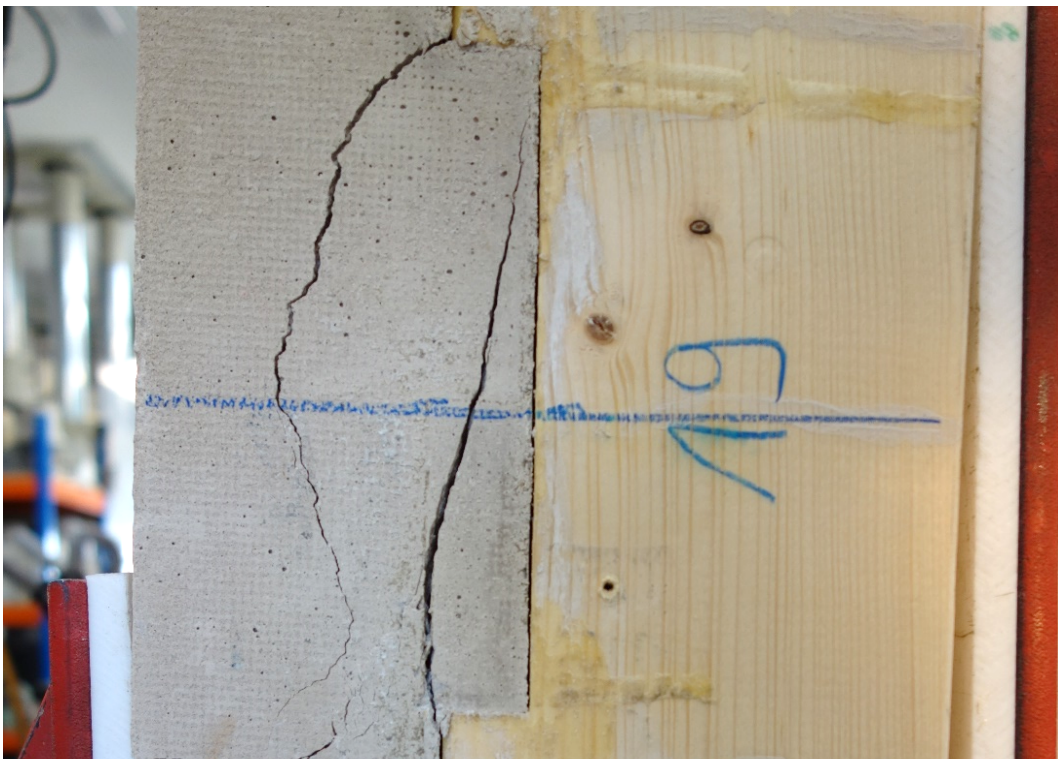


Abbildung 13: Beton-Schubrisse bei einem Scherprüfkörper mit CAF470

Aufgrund der höheren Festigkeiten der Betone OPC908 und CSA906 sind bei Prüfkörpern mit diesen Betonen, Schubrisse bei höheren Prüflasten aufgetreten. Rechnerisch war ab einer Prüflast von ca. 100 kN ein Holz-Druckversagen an der Kerne und ab ca. 120 kN ein Abscheren des Vorholzes zu erwarten, sodass es bei diesen Prüfkörpern teilweise zu weniger ausgeprägten Schubrissen im Beton gekommen ist und die Holzelemente primär auf Druck und Schub im Vorholzbereich versagten (siehe Abbildung 14).



Abbildung 14: Schubversagen der Holzelemente im Vorholzbereich

Insgesamt sind die Traglasten der Prüfkörper mit calciumsulfatbasiertem Beton (CAF470) ca. 20 % unter den Traglasten mit Referenzbeton (OPC908) und CSA-Beton (CSA906) geblieben. Der Einfluss durch die Beimischung von Basaltfasern war bei den Versuchen nicht erkennbar. Dies ist damit zu begründen, dass die Ausrichtung und Verteilung der Kurzfasern in der Betonmatrix nicht beeinflusst werden kann und damit die höherbeanspruchten Zugbereiche im Beton nicht gezielt und ausreichend verstärkt wurden. Für die weiterführenden Bauteilversuche wurden daher anstelle von Basalt-Kurzfasern, Bewehrungslösungen aus Basaltfaser-Textilgelegen verwendet, welche entsprechend des Kraftverlaufs geformt und eingebaut werden können.

3.2.2. Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens an Bauteilen

Im AP 2.1 wurden die wesentlichen Kennzahlen für das Trag- und Verformungsverhalten einzelner Kervenverbindungen bzw. Bauteilabschnitte ermittelt. Gegenstand der Kurzzeit-Biegeversuche in diesem Arbeitspaket ist die Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von gesamten HBV-Bauteilen in praxisüblichen Dimensionen. Hierzu wurden HBV-Bauteile mit einer Spannweite von 4,8 m in 4-Punkt-Biegeversuchen in Anlehnung an DIN EN 408:2012 und an Versuche aus der Literatur (Michelfelder 2006) geprüft. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 15 dargestellt.

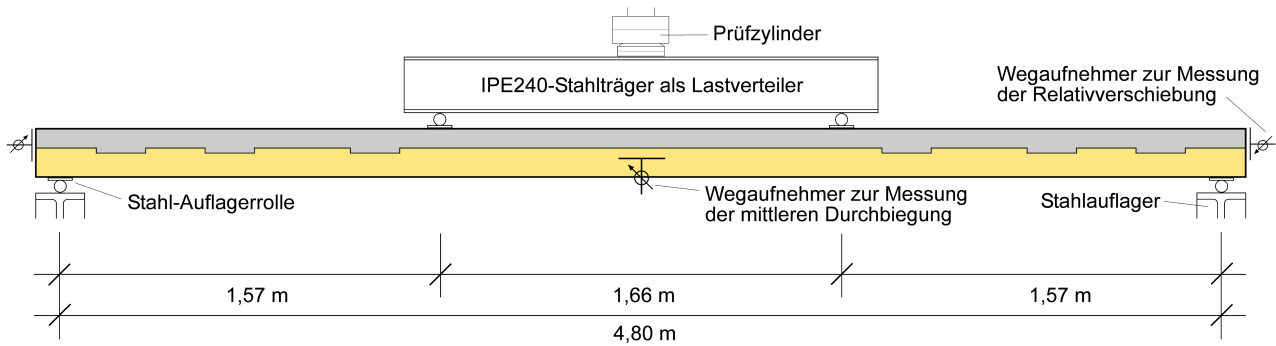


Abbildung 15: Versuchsaufbau der 4-Punkt-Biegeversuche

Die Holzelemente bestanden aus Brettstapeln mit einer Höhe von 0,12 m, welche mit Buchenholzdübeln zu Elementen mit einer Gesamtbreite von 0,48 m verbunden waren. Für die Holzelemente wurden Nadelhölzer der Festigkeitsklasse C24 bestellt, wobei vereinzelt visuell erkennbar war, dass auch Hölzer höherer Festigkeitsklassen verbaut waren. Stichproben zur Ermittlung der Rohdichte ergaben einen Mittelwert von 465 kg/m^3 , was der Festigkeitsklasse C30 zuzuordnen ist. Der nach DIN EN 408:2012 festgestellte Biege-Elastizitätsmodul ergab einen Mittelwert von ca. 14.000 N/mm^2 und weist damit sogar auf die Festigkeitsklasse C40 hin. Zum Zeitpunkt der Biegeprüfung wurden Holzfeuchten von ca. $13,5 (\pm 1) \%$ gemessen.

Auf jeder Auflagerseite waren in die Holzelemente jeweils drei Kerfen mit einer Tiefe von 20 mm und einer Länge von 200 mm eingefräst. Gegenüber der Scherversuche aus AP 2.1 wurde die Kerfenlänge um 50 mm vergrößert, um die Abschertragfähigkeit des Betons in der Kerfe zu erhöhen und so ein vorzeitiges Versagen zu verhindern.

Bei den Referenzprüfkörpern mit Zementbeton OPC908 wurde normgerecht eine Mindestbewehrung (Q188-Stahlmatte) sowie die Abhebesicherung mit Schrauben (zwei pro Kerfe) realisiert. Bei den CAF470-Bauteilen wurde eine Prüfvariante ohne jegliche Bewehrung und eine Variante mit Formteilen und Flächenbewehrung aus Basaltfasergelegen zur Bewehrung getestet (siehe Abbildung 16).

Abbildung 16: Flächenbewehrung und Formteile aus Basaltfasergelegen

Die Formteile wurden entsprechend des Zugspannungsverlaufs und der zu erwartenden Rissbildung geformt und in die Kerben gelegt. Damit sollte die Betonnocke bewehrt bzw. höhere Schertragfähigkeiten ermöglicht werden. Das Untermischen von längeren Kurzfasern wäre nicht zielführend gewesen, da eine gleichmäßige Faserverteilung nicht gewährleistet werden kann und der Mischvorgang sowie die Verarbeitbarkeit beeinträchtigt werden können. Die Abhebesicherung wurde bei diesen Bauteilen durch einen Hinterschnitt im Holz an der Rückseite der Kerben realisiert. Die Abmessungen, Abstände und Ausführungsvarianten der Kerben sind in Abbildung 17 dargestellt.

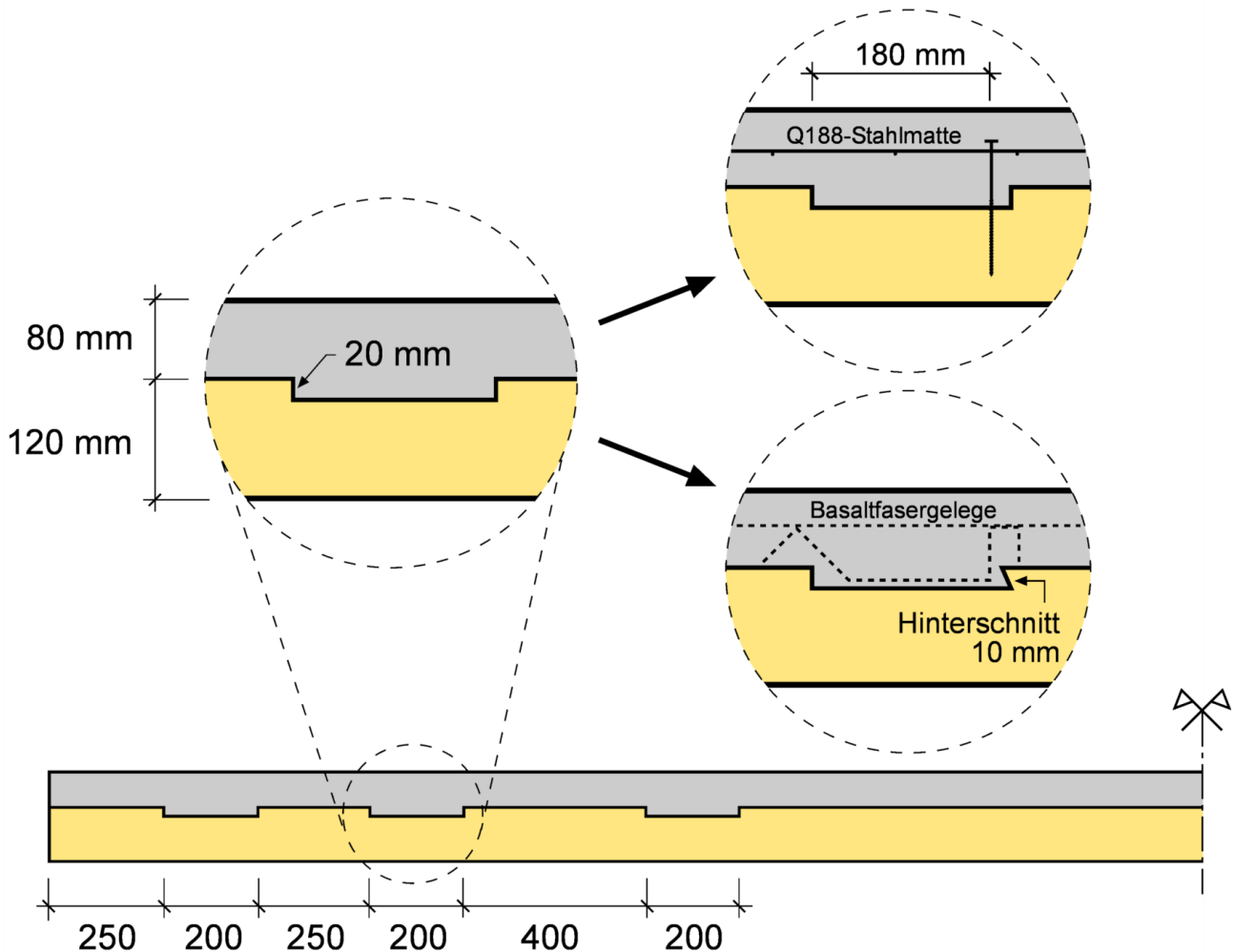


Abbildung 17: Abmessungen (in mm) und Ausführungsvarianten der Kerben

Die Biegeversuche wurden bei einem Betonalter zwischen 14 und 16 Tagen durchgeführt. Die mittleren Druckfestigkeiten betragen dabei $44,3 \text{ N/mm}^2$ (OPC908), $35,5 \text{ N/mm}^2$ (CAF470) und $41,6 \text{ N/mm}^2$ (CSA906). Die Ergebnisse der Kurzzeit-Biegeversuche sind mit den erzielten maximalen Prüflasten F_{\max} und der effektiven Biegesteifigkeit EI_{eff} in Tabelle 4 zusammengefasst. Exemplarische Last-Verschiebungskurven sind in Abbildung 18 dargestellt. Alle Last-Verschiebungsdigramme der Kurzzeit-Biegeversuche befinden sich in Anlage 3.

Tabelle 4: Ergebnisse der Kurzzeit-Biegeversuche

| Beton | Prüfkörpervariante | | Versuchsergebnisse | |
|--------|------------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------------|
| | Bewehrung | Abhebesicherung | F_{max} [kN] | EI_{eff} [kNm ²] *) |
| OPC908 | mit Stahlbewehrung | Schraube | 113,0 | 5.554,5 |
| | mit Stahlbewehrung | Schraube | 119,5 | 5.375,3 |
| CAF470 | ohne Basaltfasergelege | Hinterschnitt | 74,4 | 4.748,2 |
| | ohne Basaltfasergelege | Hinterschnitt | 68,7 | 4.476,8 |
| | mit Basaltfasergelege | Hinterschnitt | 128,0 | 4.696,1 |
| | mit Basaltfasergelege | Hinterschnitt | 123,5 | 4.689,4 |
| CSA906 | mit Basaltfasergelege | Hinterschnitt | 135,1 | 5.223,4 |

*) zwischen 10 kN und 30 kN nach DIN EN 408:2012 ermittelt

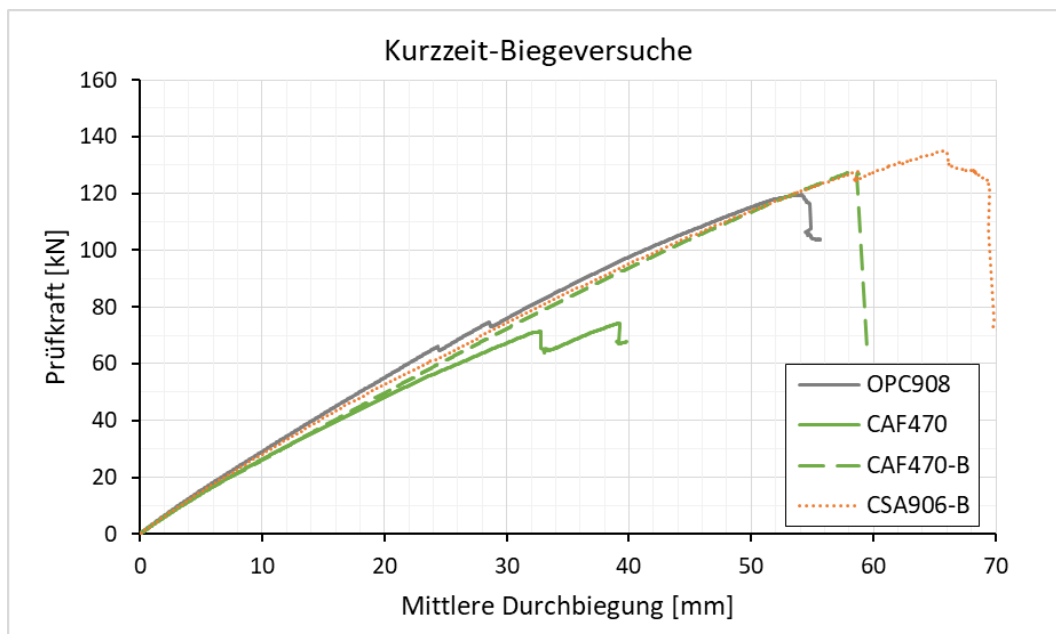


Abbildung 18: Exemplarische Last-Verschiebungskurven der Kurzzeit-Biegeversuche

Die Biegeversuche zeigten, dass die HBV-Bauteile mit CAF470-Beton generell eine geringere Biegesteifigkeit besitzen als die Bauteile mit dem Referenzbeton. Dies ist vor allem mit einem niedrigeren E-Modul des Betons CAF470 zu begründen, aber auch der Tatsache geschuldet, dass die Stahlbewehrung die Drucksteifigkeit im Betonquerschnitt des Referenzbetons erhöht. Die beiden unbewehrten Bauteile mit CAF470-Beton zeigten ab einer Prüflast von ca. 30 kN erste Beton-Schubrisse an den innenliegenden Kerven und versagten bei der max. Prüflast auf Abscheren. Zudem ist der unbewehrte Beton am Hinterschnitt der Kerne infolge des Abhebestrebens herausgebrochen (siehe Abbildung 19). Dies führte bei den unbewehrten CAF470-Bauteilen zu deutlich geringeren Traglasten, da der Beton zu früh versagt hat. Die Holzelemente zeigten insgesamt keine Schäden durch die Belastung.



Abbildung 19: Bruchbild des unbewehrten CAF470-Betons

Die Biegebauteile mit Referenzbeton zeigten zwar im Bereich der Kervendruckflanke ein ähnliches Rissbild, das Risswachstum war jedoch aufgrund der Bewehrung und effektiveren Abhebesicherung der Schrauben geringer. Erst bei Erreichen der Maximallasten kam es zu einem Abheben bzw. Ausknicken der Betonschicht nach oben, was durch das Aufbiegen der Stahlbewehrung scheinbar verstärkt wurde (siehe Abbildung 20). Plastische Verformungen an den Kervendruckflächen deuteten zudem auf eine Überschreitung der Holz-Druckfestigkeit hin.



Abbildung 20: Bruchbild des bewehrten Referenzbetons OPC908

Durch die eingesetzten Formteile aus Basaltfasergelege konnte das vorzeitige Versagen des CAF470-Betons trotz erneuter Schubrissbildung ab ca. 30 kN verhindert werden, sodass die max. Traglast durch das Versagen der Holzelemente (Vorholzabscheren) bestimmt wurde (siehe Abbildung 21). Ein sehr ähnliches Tragverhalten und Versagen wurde auch bei dem Bauteil mit CSA906-Beton beobachtet (siehe Abbildung 22), wobei hier die Biegesteifigkeit fast mit den Werten der OPC908-Bauteile vergleichbar war. Insgesamt kam es in keinem der Bauteilversuche zu einem Biegeversagen der Holzelemente, was ebenfalls auf eine höhere Festigkeitsklasse als C24 schließen lässt. Bestätigt wurde dies durch im Nachgang durchgeführte Biegeversuche mit Ausschnitten der Holzelemente (ohne Beton). Dabei wurden mittlere Biegefestigkeiten von 36 bis 49 N/mm² festgestellt.



Abbildung 21: Holz-Abscheren der Kernen bei bewehrtem CAF470-Bauteil



Abbildung 22: Holz-Abscheren der Kernen bei CSA906-Bauteil

Die maximalen Traglasten der bewehrten CAF470-Bauteile und des einen CSA906-Bauteils übertrafen allesamt die Traglasten der Bauteile mit dem Referenzbeton OPC908, womit ein Teilziel der Projektphase 2 erreicht wurde. Bei Geschossdecken ist jedoch meist die Gebrauchstauglichkeit (Durchbiegung und Schwingungsverhalten) bemessungsmaßgebend, was die effektive Biegesteifigkeit EI_{eff} als primäres Bewertungskriterium in den Vordergrund rücken lässt. Hierbei ist zu erwähnen, dass die in Tabelle 4 aufgelisteten Werte nur auf Grundlage der Durchbiegung infolge der Prüflast ermittelt wurden und nicht die Durchbiegungsanteile durch Eigengewicht und Betonschwinden berücksichtigen. Daher ist zur abschließenden Bewertung über die Leistungsfähigkeit der erarbeiteten Lösungen, noch das Langzeitverhalten der HBV-Bauteile einzubeziehen, da die rechnerische Enddurchbiegung einer Decke meist entscheidender ist als die Anfangsdurchbiegung bzw. Anfangssteifigkeit.

3.2.3. Untersuchung des Langzeitverhaltens

Zu Beginn des Arbeitspakets AP 2.3 wurde vor allem das Kriechverhalten der Betone OPC908 und CAF470 untersucht, da es einen maßgebenden Anteil am Langzeitverhalten von HBV-Bauteilen hat. Unter Kriechen wird die Verformungszunahme des Betons im Laufe der Zeit unter einer konstanten Spannung verstanden, was insbesondere bei Druckbelastungen durch eine Gefügewandlung und Volumenverminderung des Betons auftritt. Aufgrund von materiellen Engpässen konnten keine Untersuchungen des Langzeitverhaltens des CSA-Betons durchgeführt werden. Es wurde ein Messstand in Anlehnung an DIN EN 12390-17:2019 konzipiert und in Betrieb genommen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 23 dargestellt.

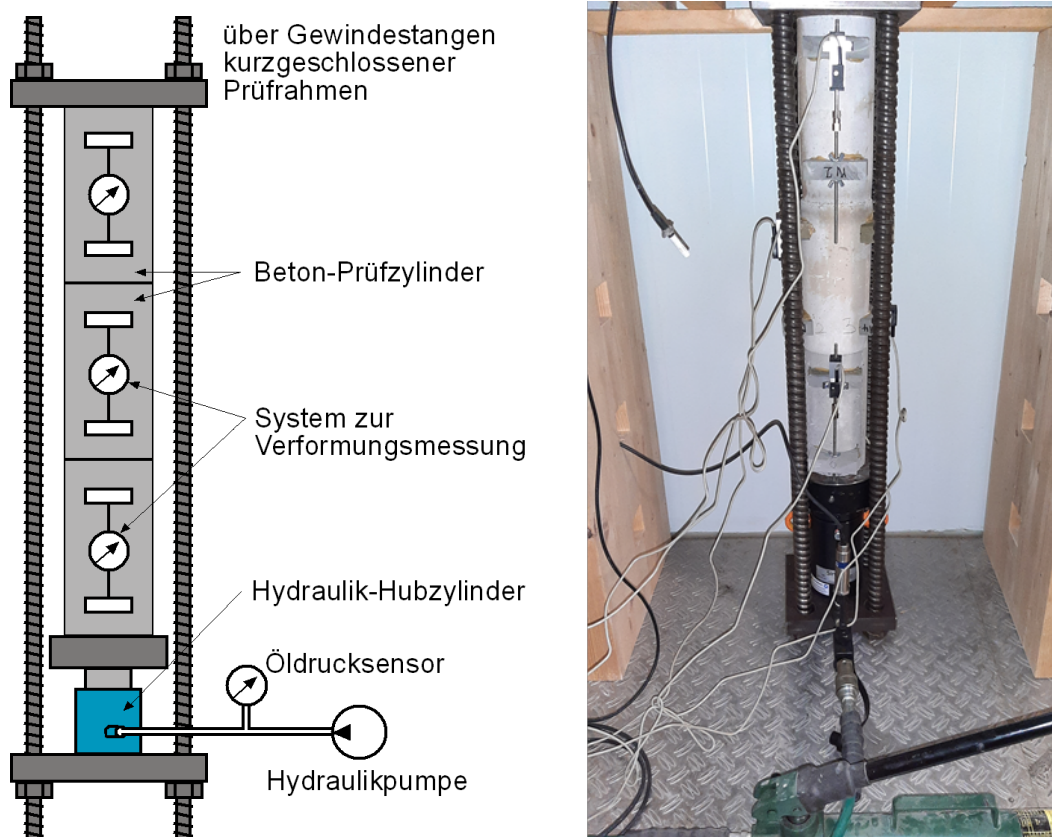


Abbildung 23: Versuchsaufbau des Kriechmessstands

Im Versuchsaufbau wurden unter annähernd konstanter Druckspannung zwei Zylinder ($d \times h = 11 \times 22 \text{ cm}^2$) des Betons CAF470 und zum Vergleich ein Zylinder des Referenzbetons OPC908 belastet und die zeitabhängige Stauchung gemessen. Die Belastung erfolgte nach einer Aushärtungszeit von 28 Tagen mit einer Prüfkraft von 127 kN (Druckspannung: $13,4 \text{ N/mm}^2$). Zum Zeitpunkt der Belastung wurde an Begleitprobekörpern (Zylinder $d \times h = 11 \times 22 \text{ cm}^2$) eine mittlere Druckfestigkeit von $46,3 \text{ N/mm}^2$ (OPC908) und $45,7 \text{ N/mm}^2$ (CAF470) festgestellt. Bei der Prüfung des Elastizitätsmoduls wurden Mittelwerte von 28.551 N/mm^2 (OPC908) und 24.142 N/mm^2 (CAF470) gemessen. Parallel dazu wurde an unbelasteten Zylindern des selbigen Formats die Schwindverkürzung gemessen und zur Korrektur der Kriechverformung herangezogen. Die Versuche erfolgten in einem abgetrennten, nicht-klimatisierten Raum. Die Temperatur betrug im Mittel $23 (\pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ und die rel. Luftfeuchtigkeit ca. $55 (\pm 10) \%$. Die Ergebnisse der Kriechmessung sind mit der zeitlichen Entwicklung der Gesamtkriechzahl (ermittelt nach DIN EN 12390-17) in Abbildung 24 dargestellt.

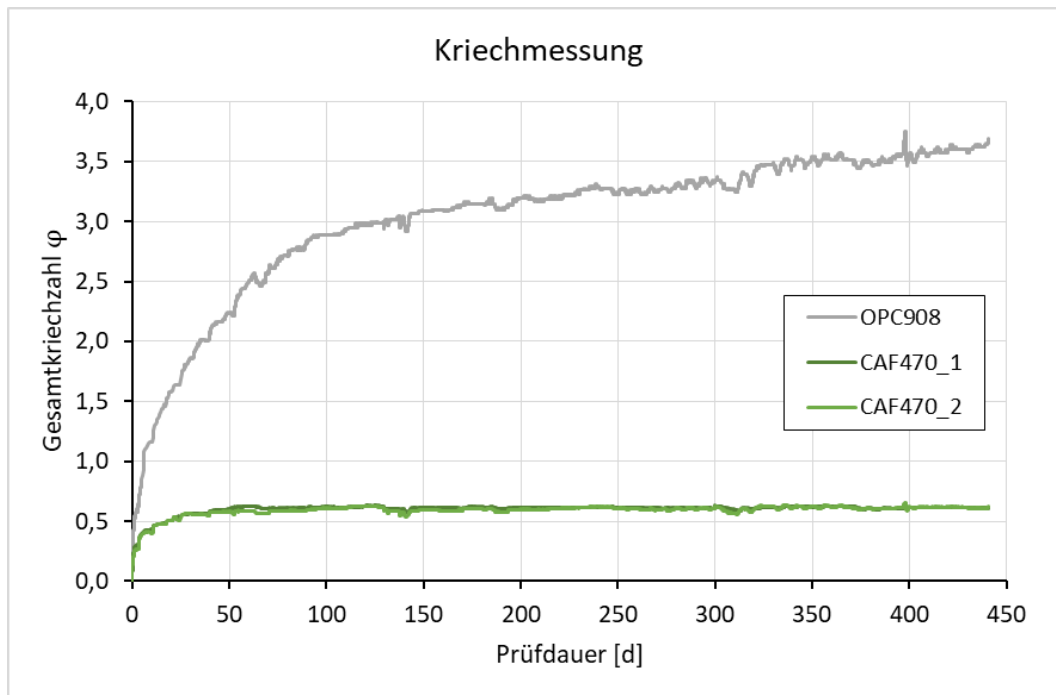


Abbildung 24: Entwicklung der Gesamtkriechzahl der Betone OPC908 und CAF470

Die Messungen bestätigen das u. a. in (Schmidt 2003) festgestellte, gutmütige Kriechverhalten von calciumsulfatbasierten Betonen. Dies wirkt sich v. a. bei der zeitlichen Durchbiegungsentwicklung von HBV-Decken positiv aus, wie es teilweise in den nachfolgend beschriebenen Langzeit-Biegeversuchen beobachtet wurde.

Die 4-Punkt-Biegeversuche zur Erfassung des Langzeitverhaltens wurden mit der Versuchsanordnung der Kurzzeit-Biegeversuche (siehe Abbildung 15) realisiert. Es wurden ein Prüfkörper mit CAF470 (ohne Bewehrung, mit Hinterschnitt als Abhebesicherung) und ein Vergleichsprüfkörper mit Zementbeton OPC908 (Mindestbewehrung Q188, zwei Schrauben pro Kerbe als Abhebesicherung) getestet. Der Versuchsaufbau der Langzeit-Biegeversuche ist in Abbildung 25 dargestellt.

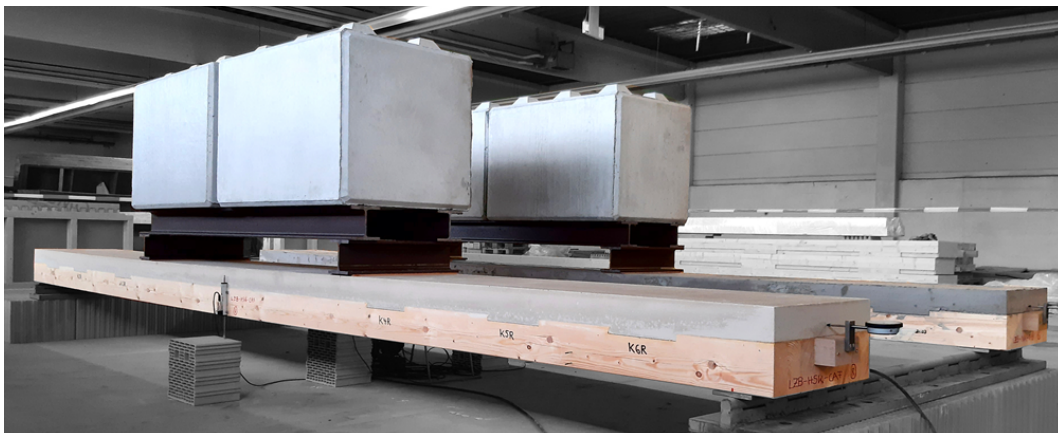


Abbildung 25: Versuchsaufbau der Langzeit-Biegeversuche

Die Dauerbelastung erfolgte über jeweils zwei aufgebraute Betonblöcke und Lastverteiler aus HEB120-Trägern. Das Gesamtgewicht der Belastung beträgt damit ca. 1,6 t und entspricht in etwa 20 % der max. Traglast aus den Kurzzeit-Biegeversuchen mit unbewehrtem CAF470. Auf eine Gleichstreckenlast übertragen wären das ca. 4,4 kN/m bzw. 9,1 kN/m² als dauerhafte Flächenlast.

Die Messung der Durchbiegung in Trägermitte sowie der Relativverschiebung an den Stirnseiten erfolgte für eine Gesamtdauer von einem Jahr in einer unbeheizten, geschlossenen Lagerhalle. Parallel erfolgte die Messung des Umgebungsklimas und der Schwind-/Quellverformung (in Schwindrinnen mit $b \times h \times l = 60 \times 40 \times 1000 \text{ mm}^2$) der verwendeten Betone. Das Schwindverhalten der Betone ist dahingehend für das Langzeit-Verhalten wichtig, da die Durchbiegung der Decke zunimmt, sobald sich der Beton durch seine Verkürzung der äußeren Belastung entzieht (Schänzlin 2003). Dementsprechend nimmt die Deckendurchbiegung ab, sobald der Beton sich ausdehnt.

Die Holzelemente wurden der gleichen Lieferung entnommen, aus denen auch die Kurzzeit-Prüfkörper aus AP 2.2 stammten, sodass ebenfalls mindestens von der Holz-Festigkeitsklasse C30 ausgegangen wurde. Die Holzfeuchte der Brettstapelelemente betrug vor der Betonage ca. 15 (± 1) %. Die Betonage der Prüfkörper wurde anwendungsnah direkt am Prüfstandort mittels Trockenmörtelsilos und daran angeschlossenen Silomischpumpen durchgeführt. Beide Prüfkörper wurden vor der Betonage mittig unterstützt und diese Unterstützung wurde erst kurz vor dem Beginn der Belastung entfernt. Ab diesem Zeitpunkt wurde die Durchbiegungsmessung gestartet, wodurch die Durchbiegung infolge Eigengewicht und Schwinden mitberücksichtigt ist.

Die Belastung der Prüfkörper erfolgte bei einem Betonalter von 21 Tagen. Die mittlere Druckfestigkeit betrug zu diesem Zeitpunkt 43,8 N/mm² (OPC908) und 34,2 N/mm² (CAF470). Bei der Prüfung des E-Moduls wurden mit 23.993 N/mm² (OPC908) und 20.258 N/mm² (CAF470) vergleichsweise niedrige Werte ermittelt. Dies ist wahrscheinlich auf eine höhere bzw. schwankende Wasserzugabemenge während der Betonage und niedrigen Temperaturen (ca. 13 (± 5) °C) während der Aushärtungszeit zurückzuführen. Innerhalb der 21 Tage Aushärtungszeit ist der Beton OPC908 ca. 0,2 ‰ geschwunden, während am Beton CAF470 ein Quellmaß von ca. 0,17 ‰ festgestellt wurde. Der zeitliche Verlauf der Schwind- und Quellmessungen, die Messwerte der Relativverschiebungen und räumlichen Klimadaten sind zusammen mit der Änderung der Holzfeuchte in Anlage 4 zusammengefasst. In Abbildung 26 ist die zeitliche Entwicklung der Durchbiegung in Trägermitte dargestellt und in Tabelle 5 sind auszugsweise Durchbiegungswerte aufgelistet.

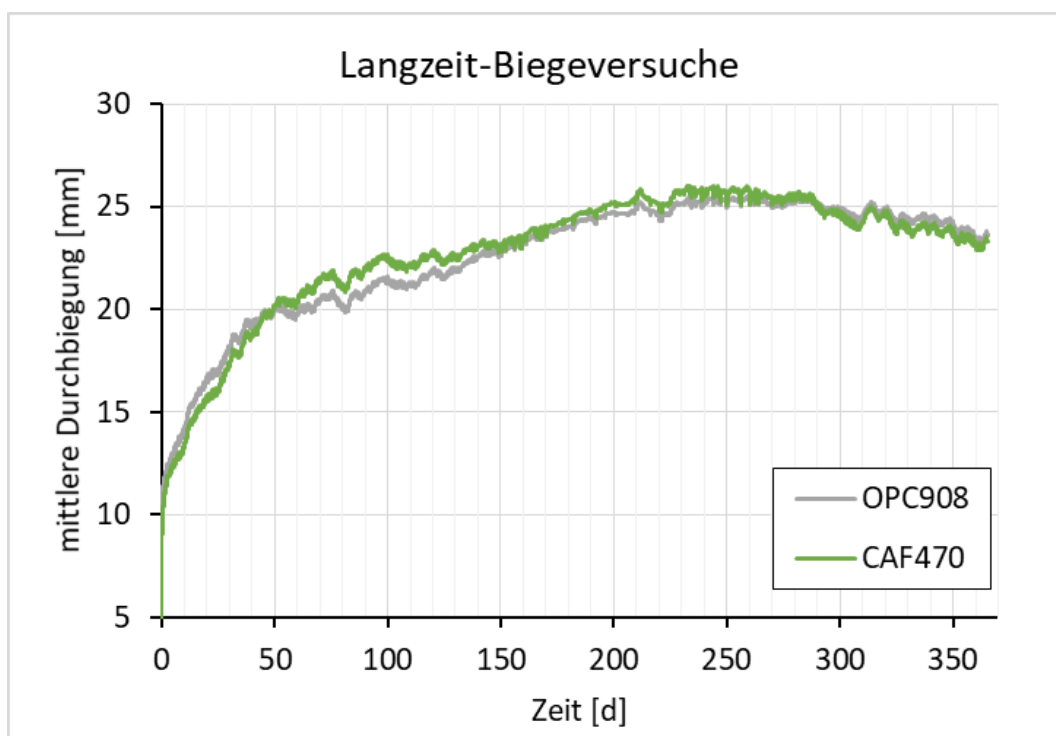


Abbildung 26: Mittlere Durchbiegung bei den Langzeit-Biegeversuchen

Tabelle 5: Werte der mittleren Durchbiegung für ausgewählte Zeitpunkte

| Beton | Mittlere Durchbiegung [mm] an Tag | | | | | | | |
|--------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 ^{*)} | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 365 |
| OPC908 | 9,81 | 19,95 | 21,42 | 22,69 | 24,74 | 25,04 | 24,81 | 23,72 |
| CAF470 | 7,51 | 20,14 | 22,43 | 22,91 | 25,18 | 25,07 | 24,54 | 23,43 |

^{*)} Direkt nach Belastungsbeginn gemessen

Gleich nach Beginn der Belastung wurde deutlich, dass die bis dahin ausgebliebene Schwindverkürzung des Betons zu einer geringeren Anfangsdurchbiegung des CAF470-Bauteils führte. Dieser Effekt relativierte sich wahrscheinlich infolge des geringeren E-Moduls und dem Einsetzen der Schwindverkürzung (siehe Anlage 4) innerhalb der darauffolgenden Tage, sodass bis zum 50. Belastungstag die Durchbiegungen beider Bauteile ungefähr gleichauf waren. Ab diesem Zeitraum kam es aufgrund von Sturmschäden zu Undichtigkeiten des Hallendachs und zu Wasseransammlungen (jedoch nicht direkt an/auf den Prüfkörpern) sowie einer hohen rel. Luftfeuchtigkeit (> 70 %). Es wird vermutet, dass es dadurch zu einer stärkeren Durchbiegungszunahme beim CAF470-Bauteil kam. Calciumsulfat gleicht sich den thermischen und hygri-schen Verhältnissen der Umgebungsluft an und nimmt daher bei feuchter Luft oder bei Kontakt mit Wasser wieder Feuchte auf (Wiegrink 2002). Dies kann einen vorübergehenden Festigkeitsverlust von bis zu 30 % verursachen und auch dazu führen, dass die Kriechverformungen stark zunehmen. So wurde beispielsweise in (Twelmeier 2010) gezeigt, dass Kriechdehnungen von Halbhydraten im Klima 20 °C und 95 % r.F. etwa 5-mal so hoch sein können wie die Dehnungen im Klima 20 °C und 65 % r.F. Mit der Rücktrocknung des Betons sind Festigkeitsverluste jedoch reversibel (Engelke 1979). So zeigte sich nach Reparatur des Hallendachs und der darauffolgenden Abnahme der Luftfeuchtigkeit ab ca. Tag 150 ein Wiederangleichen der beiden Durchbiegungskurven. Im weiteren Verlauf stieg die Durchbiegung mit leichten, klimabedingten Schwankungen bei beiden Prüfkörpern gleichmäßig an und erreichte das bisherige Maximum zwischen Tag 200 und 250. Mit dem Ende des Winters und darauffolgendem Temperaturanstieg in der unbeheizten Halle dehnten sich die Betondeckschichten aus, sodass die Durchbiegung etwas zurückging. Erfahrungsgemäß wird ab dem Herbst die Durchbiegung wieder zunehmen und die bisherige max. Durchbiegung etwas übertreffen. Die größte Durchbiegungszunahme erfolgt jedoch in der Regel innerhalb des ersten Jahres (Schänzlin 2003). Dennoch werden die Langzeit-Biegeversuche noch weitergeführt und das Verhalten stetig beobachtet. Risse und Schäden wurden am unbewehrten Beton CAF470 bisher nicht gesichtet, sodass das optische Erscheinungsbild gewahrt wird.

Trotz der teils ungünstigen Bedingungen, zeigte der Biegeversuch mit Beton CAF470 bisher im Langzeitverhalten keine großen Abweichungen des bekannten Langzeitverhaltens von HBV-Decken. Die hohe Luftfeuchtigkeit für einen längeren Zeitraum ist in der vorgesehenen Nutzungsklasse 1 (beheizte Innenräume; nach DIN EN 1995-1-1:2010: Temperatur um 20 °C und einer relativen Luftfeuchte, die nur für einige Wochen je Jahr einen Wert von 65 % übersteigt) nicht zu erwarten. Dennoch sind bezüglich der Anwendung in und über Feuchträumen gewisse Einschränkungen festzulegen. Hier könnten Lösungen mit CSA-Betonen stellenweise sinnvoll sein und diese „Lücke“ schließen, sobald hier mehr Langzeiterfahrungen vorliegen.

Insgesamt wird in Hinblick auf das zweite Projektziel die Leistungsfähigkeit von HBV-Decken mit Calciumsulfatbeton positiv bewertet. Das günstige Schwind- und Kriechverhalten konnte den geringeren E-Modul des Betons CAF470 scheinbar ausgleichen. Dies muss aber in rechnerischen Untersuchungen noch bestätigt werden.

3.2.4. Rechnerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten

Auf Basis der in den vorangegangenen Arbeitspaketen erlangten Erkenntnisse wurden rechnerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten durchgeführt. Diese rechnerischen Untersuchungen dienen v. a. dem besseren Verständnis des beobachteten Tragverhaltens und der Bewertung der Leistungsfähigkeit der entwickelten Lösungen.

Zu Beginn wurden auf Grundlage der Beobachtungen der Langzeit-Biegeversuche (AP 2.3) rechnerische Abschätzungen der Enddurchbiegung durchgeführt. Basis hierfür waren die Rechenverfahren und Empfehlungen aus dem Norm-Entwurf der DIN CEN/TS 19103:2022 (Berechnung von Holz-Beton-Verbundbauteilen) sowie dem γ -Verfahren aus Anhang B der DIN EN 1995-1-1:2010. Zum Kriechverhalten von Calciumsulfat-Fließestrich wurden umfangreiche FE-Simulationen in (Schmidt 2003) durchgeführt und eine Kriechzahl von 0,75 - 1,5 vorgeschlagen. Auf der sicheren Seite liegend wurde in den hier beschriebenen Berechnungen für die Kriechzahl des Betons CAF470 ein Wert von 2,5 verwendet, um die feuchteren Raumkonditionen zu berücksichtigen. Zudem können damit die Regeln zur Modifikation der Kriechzahlen aus der DIN CEN/TS 19103:2022 (Tabelle 7.1) angewendet werden. Aufgrund der klimatischen Bedingungen in der unbeheizten Prüfhalle wurden für die Holzelemente Rechenwerte der Nutzungsklasse 2 (nach DIN EN 1995-1-1:2010: Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte, die nur für einige Wochen je Jahr einen Wert von 85 % übersteigt.) gewählt. Alle für die Berechnung angenommenen Werte sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Angenommene Werte für die Berechnung der Enddurchbiegung

| | Einheit | OPC908 | CAF470 | Brettstapel |
|----------------|-------------------|---------|---------|-------------|
| E-Modul | N/mm ² | 25.000 | 20.000 | 13.500 |
| Kriechzahl | - | 3,5 | 2,5 | 0,8 |
| Endschwindwert | - | -0,0008 | -0,0004 | 0 |

Verschiebungsmodul K_{ser} nach DIN CEN/TS 19103:2022: 480.000 N/mm

Die rechnerischen Abschätzungen haben ergeben, dass sich der Prüfkörper mit OPC908 zum Endzeitpunkt $t = \infty$ (in der Regel nach 50 Jahren) 41,2 mm durchbiegt und der Prüfkörper mit CAF470 eine Durchbiegung von 31,7 mm vorweist. Fraglich bleibt dabei, ob die Langzeit-Tragfähigkeit des CAF470 für diesen Zeitraum ausreichen würde, da bei den unbewehrten CAF-Bauteilen im Kurzzeit-Biegeversuch ab einer Durchbiegung von ca. 32 mm der Beton an den Kerven teils schon abgeschert war. Aus diesem Grund wurde in den weiteren rechnerischen Untersuchungen verstärkt versucht das Versagen des Betons zu modellieren und die Ergebnisse aus den Kurzzeit-Biegeversuchen rechnerisch nachzubilden.

Um das Kurzzeit-Tragverhalten der getesteten HBV-Bauteile in einem Modell nachzubilden zu können, wurden zunächst die zur Modellierung erforderlichen Eingangsgrößen ermittelt. Hierzu zählten u. a.

die an den Kerven angreifenden Schubkräfte. Mit dieser Kraft als Einwirkung wurde anschließend die Belastungssituation an der Kerne genauer betrachtet. Zur Bestimmung der Kervenkräfte wurde der 4-Punkt-Biegeversuch mit dem in (Grosse et al. 2003) entwickelten Stabwerkmodell nachgebildet (siehe Abbildung 27). Dabei wurden die Verbundelemente (hier Kerven) an den entsprechenden Stellen über spezielle Ersatzstäbe und der Ersatz-Biegesteifigkeit EI^* modelliert. Dieses hat im Vergleich zu anderen gängigen Berechnungsverfahren den Vorteil, dass ein diskontinuierlicher Verbund realitätsnah erfasst und die jeweilige Kervenkraft direkt abgelesen werden kann.

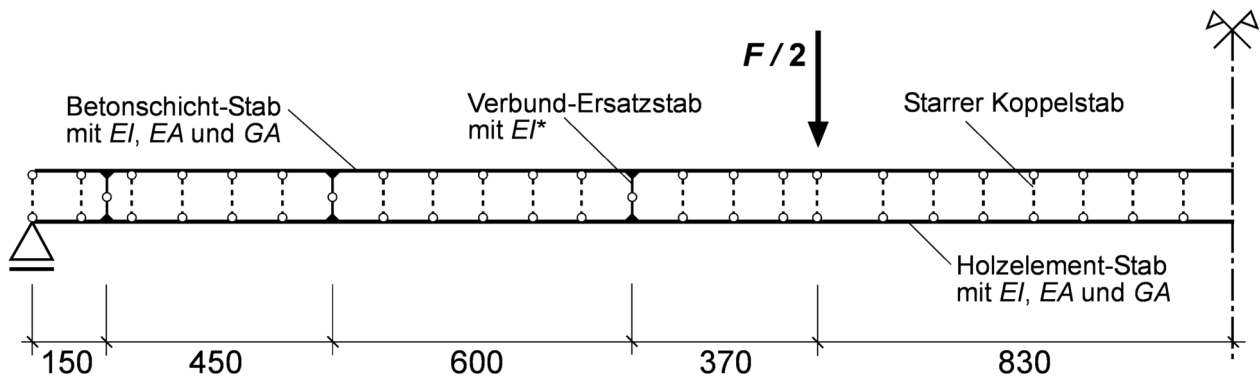


Abbildung 27: Stabwerkmodell nach (Grosse et al. 2003), Abmessungen in mm

Um möglichst präzise Ergebnisse zu erhalten, wurde das Stabwerkmodell anhand der tatsächlichen Versuchsergebnisse aus Arbeitspaket AP 2.2 angepasst. Dabei war zu beachten, dass ein zu niedrig angesetzter K_{ser} -Wert zu einer Unterschätzung der Kervenkräfte führen kann. Daher wurde anstelle des empfohlenen K_{ser} -Werts aus der DIN CEN/TS 19103:2022 auf Grundlage der Untersuchungen in (Michelfelder 2006) und dem vorliegenden höheren E-Modul der Holzelemente, ein K_{ser} -Wert von 655.000 N/mm für eine Kerne angenommen. Weitere im Stabwerkmodell verwendete Werte sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Angenommene Werte für Stabwerksberechnungen

| | Einheit | CAF470-Beton | Brettstapel |
|------------|-------------------|--------------|-------------|
| Schubmodul | N/mm ² | 8.000 | 810 |
| E-Modul | N/mm ² | 20.000 | 13.500 |

Ersatzsteifigkeit EI^* nach (Grosse et al. 2003): 50,0 kN/m²

Wie bereits erwähnt wurde, lässt sich die Kervenkraft, die über die Kervendruckflanke übertragen wird, aus der Querkraft der Verbund-Ersatzstäbe ableiten. Bei der Ermittlung der Kervenkraft galt es zu beachten, dass ab dem Einsetzen der Rissbildung in der Deckschicht nichtlineares Materialverhalten vorherrscht. Diese kann von dem gewählten Stabwerkmodell allerdings nicht abgebildet werden. Dennoch lässt sich anhand des Stabwerkmodells eine Aussage über die Lasteinwirkung an der maßgebenden Kerne treffen, indem der Fokus auf das Kervenverhalten kurz vor dem Auftreten der Erstrissbildung gelegt wird. Somit lässt sich die Kervenkraft quantifizieren, bei der es zur Erstrissbildung an den Kerven gekommen ist. Im Falle der CAF470-Bauteile war dieses Verhalten einheitlich zuerst an den innenliegenden Kerven bei einer Prüflast von etwa 30 kN aufgetreten. Wird das Stabwerkmodell entsprechend mit 30 kN belastet, erhält man aus der Querkraft der Verbund-Ersatzstäbe

eine Kervenkraft von 58,8 kN. Diese Kraft wurde den Kerven-Tragfähigkeiten nach der Nachweisführung aus DIN CEN/TS 19103:2022 gegenübergestellt. Demnach ergeben sich unter Verwendung der charakteristischen Festigkeiten von C24-Holz und einem Beton der Festigkeitsklasse C25/30 die folgenden Tragfähigkeiten:

- Druckversagen Holz: 201,6 kN
- Druckversagen Beton: 240 kN
- Schubversagen Holz: 480 kN
- Schubversagen Beton: 304,3 kN

Die rechnerisch ermittelten Tragfähigkeiten liegen v. a. für das Schubversagen des Betons deutlich über der Kervenkraft von 58,8 kN, weswegen die Ansätze der DIN CEN/TS 19103:2022 nicht ohne weiteres verwendet werden können. Dies könnte damit zusammenhängen, dass es anders als in der DIN CEN/TS 19103:2022 beschrieben, nicht zu einem reinen (horizontalen) Abscheren des Betons entlang der Kerne gekommen ist, sondern infolge der Diagonalrissbildung (siehe Abbildung 19) eher zu einem Querkraftversagen des Betons. Trotz mittlerweile mehrjähriger Forschung im Themengebiet des Holz-Beton-Verbundbaus wurde die Versagensart eines Diagonalrisses im Beton stets nur am Rande thematisiert. Dies liegt vermutlich darin begründet, dass diese Versagensform je nach Geometrieverhältnis der Teilquerschnitte und vorhandener Materialeigenschaften nicht zwangsläufig auftritt. So lässt sich nach (Kudla 2017) bis zu einem Verhältnis zwischen Beton- und Holzhöhe von maximal 1/3 keine Rissbildung im Beton erkennen. Das Höhenverhältnis der Biegeversuche aus AP 2.2 beträgt 2/3 und liegt demnach oberhalb dieses Grenzwertes. Außerdem deutet die Bildung eines Diagonalrisses auf die äußerst komplexe Versagensform eines Beton-Schubversagens hin (Boccardo et al. 2017). Hierfür konnte nach (Zilch und Zehetmaier 2010) für unbewehrten Beton bisher noch kein allgemein anerkanntes, mechanisch begründetes Tragmodell, welches zuverlässig Aussagen über die Versagenslast liefert, entwickelt werden. Ebenso sei hier auf den Verlust der Gültigkeit der technischen Biegetheorie, der mit dem Entstehen eines Risses im Beton einhergeht, hingewiesen.

Ergänzend zu den bisher durchgeführten Berechnungen sollten genauere numerische Nachbildungen der Kurzzeit-Biegeversuche mit CAF470-Beton eine detailliertere Untersuchung und Quantifizierung der Spannungen im Bauteil ermöglichen. So wurden, unabhängig von weiteren zeit- und kostenaufwendigen experimentellen Untersuchungen, zusätzliche Erfahrungen zur Beschreibung des Tragverhaltens gesammelt. Die Modellierung erfolgte mit der Finite-Element Software ANSYS 2021 R1. Da bis zum Beginn der Rissbildung ein weitestgehend lineares Last-Verformungsverhalten beobachtet werden konnte, wurden linear-elastische Berechnungen durchgeführt. Die gewählten Materialeigenschaften des linear-elastisch definierten Materials sind für die Brettstapelelemente und die mineralische Deckschichten Tabelle 8 zu entnehmen.

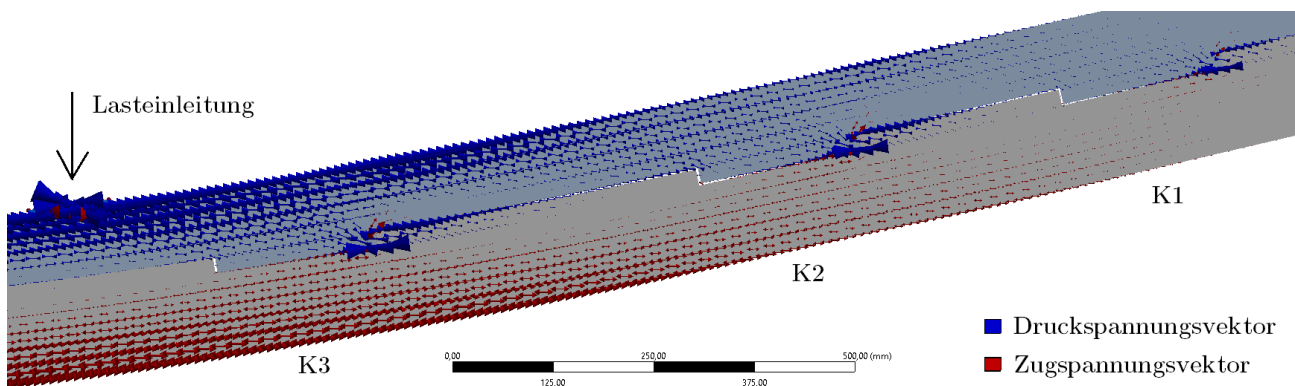
Die Querdehnzahl wurde für den CAF470-Beton nach (Schmidt 2003) mit 0,25 angenommen. Die Implementierung der Brettstapelelemente fand vereinfacht anhand eines quasi-isotropen Werkstoffverhaltens nach (Neuhaus 2017) statt. Dies bedeutet, dass für den eigentlich anisotropen Werkstoff Holz, der Schubmodul, der in Faserrichtung gültige E-Modul E_0 und die Querdehnzahl unabhängig voneinander definiert wurden. Die experimentell nicht ermittelten Eigenschaften (senkrecht zur Faserrichtung gültiger E-Modul E_{90} , Schubmodul G) wurden anhand einer Interpolation zwischen den Werten der DIN EN 338:2016 und dem E-Modul E_0 bestimmt. Der Schubmodul G_{yz} wird nach (Neuhaus 2017) mit $G/10$ angenommen. Die Querdehnzahlen der zur Eingabe verwendeten anisotropen Steifigkeitsmatrix wurden zu Null gewählt.

Tabelle 8: Modellierung des Materialverhaltens

| | Einheit | CAF470-Beton | Brettstapel |
|---------------------|-------------------|--------------|---------------|
| Materialgesetz | - | isotrop | quasi-isotrop |
| E-Modul E_0 | N/mm ² | 20.000 | 13.500 |
| E-Modul E_{90} | N/mm ² | | 450 |
| Schubmodul G | N/mm ² | 7.900 | 845 |
| Schubmodul G_{yz} | N/mm ² | | 85 |
| Querdehnzahl | - | 0,25 | 0 |

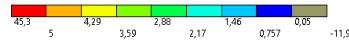
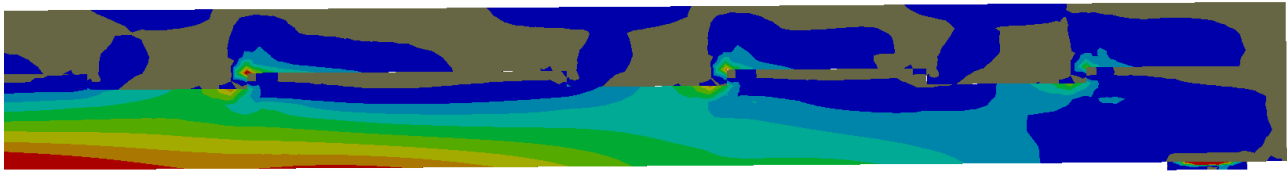
Die Verifizierung der numerischen Berechnung erfolgte durch Vergleich der berechneten Systemsteifigkeit und den Systemsteifigkeiten der Kurzzeit-Biegeversuche. Die Ergebnisse zeigten im relevanten Bereich (Prüflast 10 – 30 kN) mit Abweichungen von +1,6 % und -4,2 % eine gute Übereinstimmung, wodurch die Modellierung als valide angesehen wurde.

Im weiteren Verlauf wurde das allgemeine Tragverhalten eines mit Kerwen versehenen Verbundträgers betrachtet. Hierbei wurde bewusst vorerst auf die Modellierung einer Abhebesicherung verzichtet. Anhand der Zug- und Druckspannungsvektoren ist in Abbildung 28 zu erkennen, dass die Kraftübertragung zwischen Deckschicht und Holzquerschnitt nahezu ausschließlich über die Kervenflanke erfolgt. Zusätzlich sind Zugspannungen am oberen, druckbeanspruchten Kerveneck zu erkennen, welche in ihrer Lage und Orientierung mit dem entstehenden Diagonalrissbild übereinstimmen.

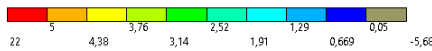
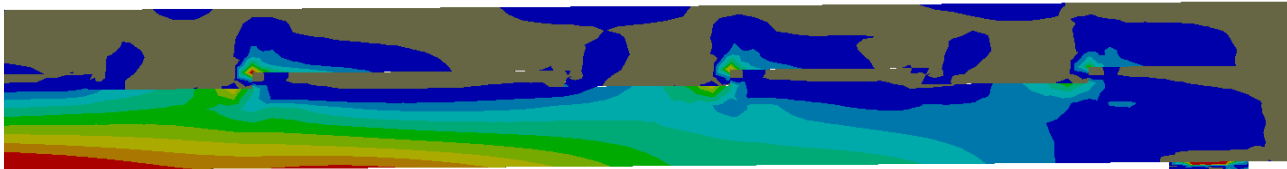
**Abbildung 28:** Zug- und Druckspannungsvektoren eines CAF470-Bauteils ohne Abhebesicherung

Die in der Deckschicht nahe der Lasteinleitung ausgeprägt vorhandenen Druckspannungen bauen sich in Richtung des Auflagers immer weiter ab. Dabei ist zu beobachten, dass die innenliegende Kerbe K3 am stärksten und Kerbe K1 am geringsten beansprucht wird. Dies deckt sich mit den während der Versuchsdurchführung dokumentierten Beobachtungen und mit den Ergebnissen des Stabwerkmodells.

Abbildung 29 zeigt die Hauptzugspannung eines mittigen Längsschnitts unter der zur Rissbildung führenden Prüflast. Zu Vergleichszwecken ist in Teilbild a) erneut der bereits in Abbildung 28 abgebildete Verbundträger ohne Abhebesicherung/Hinterschnitt aufgeführt.



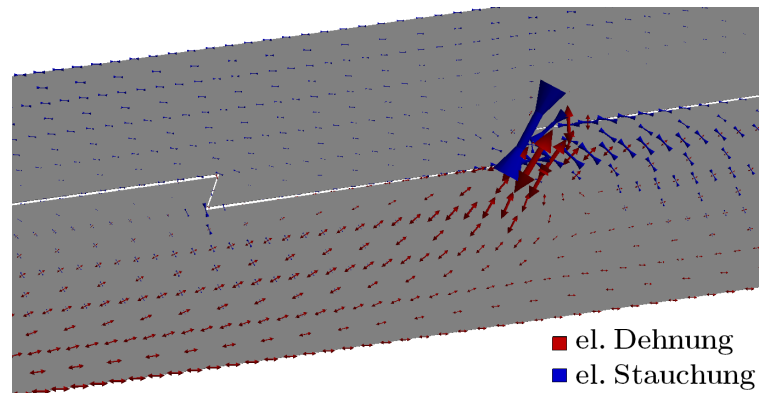
a) Ohne Hinterschnitt bei $F = 30 \text{ kN}$



b) Mit Hinterschnitt bei $F = 30 \text{ kN}$

Abbildung 29: Maximale Hauptspannungen unter der zur Erstrissbildung führenden Prüflast F

Trotz der unterschiedlichen oder nicht vorhandenen Abhebesicherung ist das qualitative Auftreten der Zugspannungen im dargestellten Schnitt nahezu identisch. Die bereits in Abbildung 28 identifizierbaren Zugbeanspruchungen in der Deckschicht oberhalb der Kervendruckflanke sind in ihrer Prägnanz deutlich zu erkennen. Die geringen, horizontal gerichteten Zugspannungen an der Bauteiloberkante resultieren aus der Biegebeanspruchung des oberen Teilquerschnitts und lassen sich ebenfalls dem nach (Grosse et al. 2003) ermittelten durchschlagenden Verlauf des Biegemoments entnehmen. In Hinblick auf die Bewertung der Leistungsfähigkeit des Hinterschnitts als Abhebesicherung, wurde dieser Bereich noch genauer betrachtet (siehe Abbildung 30).



■ el. Dehnung
■ el. Stauchung

Abbildung 30: 20-fach überhöhte Darstellung der elastischen Hauptdehnungen an der Kerve bei $F = 30 \text{ kN}$

Es ist deutlich erkennbar, dass es aufgrund der Normalbeanspruchung der Teilquerschnitte in Längsrichtung zu einer Stauchung der Deckschicht und zu einer Dehnung des Holzquerschnitts kommt. Daraus resultiert eine Fugenbildung im Bereich des Hinterschnitts, wodurch die Funktion als Abhebesicherung vorerst gestört ist. Nimmt die Durchbiegung und somit die Verdrehung im Bauteil zu, berühren sich die Flanken des Hinterschnitts jedoch erneut und verhindern so das vollständige Herausheben der Deckschicht aus der Kerve. Dies wurde auch anhand des Bruchbilds am Hinterschnitt der unbewehrten CAF470-Bauteilen sichtbar (siehe Abbildung 19). Dieses Bruchbild konnte erfolgreich durch die Formteile aus Basaltfasergelege verhindert werden, sodass durch diese Maßnahme ein Hinterschnitt als funktionstüchtige Lagesicherung bewertet werden kann.

Insgesamt konnte am Ende der zweiten Projektphase mit der Bestätigung der Leistungsfähigkeit der erarbeiteten Lösungen, das zweite Projektziel als erreicht angesehen werden. Das vorzeitige Versagen des CAF470-Betons wurde durch sehr wirksame Formteile aus Basaltfasergelege unterbunden und die bisherigen Ergebnisse der Langzeitversuch zeigten zusammen mit der rechnerischen Prognose die materialbedingten Vorteile des Calciumsulfatbetons. Dennoch sollten in der Praxis HBV-Bauteile nur bis zur Erstrissbildung an den Kerven und mit ausreichenden Sicherheitsreserven belastet werden, da über Basaltfasern noch nicht ausreichende Langzeiterfahrungen vorliegen. Mit den in diesem Arbeitspaket erlangten Erkenntnissen und dem besseren Verständnis über das Tragverhalten, wurden dennoch Grundlagen zur Erarbeitung von Bemessungsansätzen erarbeitet.

3.3 Anfertigung von Leitfäden

3.3.1. Herleitung von Bemessungsansätzen

Mit dem Wissen der vorangegangenen Projektphasen wurden in diesem Arbeitspaket Ansätze zur Erfassung des Trag- und Verformungsverhaltens hergeleitet. Als Grundlage hierfür dienten lediglich die Versuche aus diesem Projekt, sodass die vorgestellten Ansätze als konzeptuelle Vorschläge ohne allgemeingültigen Bemessungscharakter anzusehen sind. Weitere Untersuchungen mit variierenden Bauteil- und Systemgeometrien können daher notwendig sein.

Nach der DIN EN 1992-1-1:2011 kann der Querkraftnachweis für ungerissene Trägerstege ohne Querkraftbewehrung durch eine Begrenzung der Hauptzugspannungen erfolgen. Dabei wird die maximale Hauptzugspannung im Beton aus der Normalspannung und der Schubspannung ermittelt und dem Bemessungswert der Betonzugfestigkeit gegenübergestellt. Die in der Norm aufgeführten Bemessungsgleichungen setzen allerdings voraus, dass sich die maßgebende Stelle im Bauteil außerhalb eines Diskontinuitätsbereichs befindet und somit die technische Biegelehre ihre Gültigkeit behält. Der Kervenbereich des Verbundträgers stellt aufgrund der Querschnittsänderung und des Kraftabtrags über die druckbeanspruchte Kervenflanke einen Diskontinuitätsbereich dar. Demnach ist das beschriebene Bemessungskonzept nicht 1:1 auf die auftretende Diagonalrissbildung übertragbar. Die Gegenüberstellung der maximalen Hauptspannung und der Zugfestigkeit der Betondeckschicht liefert jedoch einen plausiblen Ansatz für die rechnerische Beschreibung der Erstrissbildung an der Kerve. Hierzu wurde erneut die Spannungssituation an der innenliegenden, maßgebenden Kerve K3 aus den Bauteilversuchen betrachtet (siehe Abbildung 31).

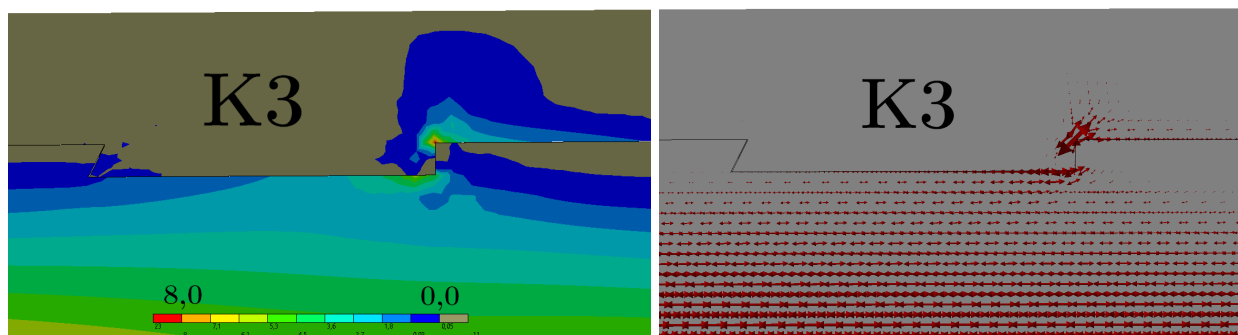


Abbildung 31: Maximale Hauptspannungen (links) und Hauptspannungsvektoren (rechts) an Kerve K3

Werden die in Abbildung 31 dargestellten Hauptspannungen betrachtet, so ist die Zugbeanspruchung oberhalb der druckbeanspruchten Kervenflanke deutlich zu erkennen. Die an dieser Stelle

vorhandenen Hauptspannungsvektoren verlaufen in etwa senkrecht zu der auftretenden Diagonalrissbildung. Wird eine Zugstrebe entsprechend der abgebildeten Vektorneigung für ein Modell des Kervenversagen in das Bauteil eingebracht, beschreibt das Versagen dieser Strebe das Auftreten einer Rissbildung. Zusätzlich lässt sich aus den Druckspannungsvektoren der Abbildung 28 eine Druckstrebe ableiten, welche ausgehend von der Schwerachse der Deckschicht, in Richtung der Kervendruckflanke verläuft. Als Einwirkung wurde die am Schnittpunkt der Zug- und Druckstrebe angreifende Kervendruckkraft $F_K = 58,8 \text{ kN}$ herangezogen. Aus den Gleichgewichtsbedingungen am Knotenpunkt (1) wurde das in Abbildung 32 veranschaulichte, lokale Stabwerkmodell erstellt.

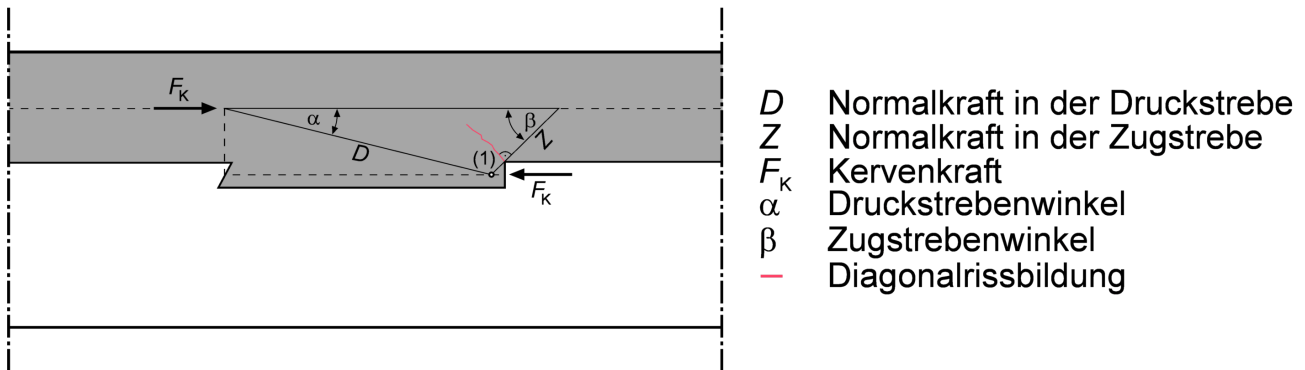


Abbildung 32: Lokales Stabwerkmodell zur Beschreibung der Kervenkräfte

Das abgebildete, dreiecksförmige Stabwerk lässt sich anhand der Kervenkraft F_K und der Zug- und Druckstrebenneigungen definieren. Die Druckstrebenneigung α ist mit dem in DIN CEN/TS 19103:2022 festgelegten Umlenkpunkt über der Abhebesicherung gegeben und beträgt 14° , wobei je nach Auslegung und Wirksamkeit des Hinterschnitts Winkel zwischen 10° und 15° plausibel wären. Der Ermittlung des Zugstrebenwinkels β wurden die festgestellten Rissgeometrien aus den Kurzzeit-Biegeversuchen zugrunde gelegt. Hierzu wurde die häufig nicht zweifelsfrei exakt bestimmbare Neigung der Diagonalrisse im Bereich des Rissbeginns vermessen und ein Winkel zwischen 25° und 30° festgestellt.

Die Berechnung des Stabwerkmodells der Abbildung 32 erfolgte anhand der nachfolgenden Gleichungen. Dabei wurde die in der Zugstrebe wirkende Kraft anhand des Sinussatzes nach Gleichung Gl. 1 bestimmen. Entsprechend des Nachweiskonzepts der DIN EN 1992-1-1:2011 wurde die Zugkraft Z mit der Gleichung Gl. 3 in die Hauptspannung σ_{vorh} umgewandelt. Dabei wurde modellhaft von einer über die Fläche $b \cdot b_Z$ konstanten Spannung ausgegangen. Die Tragfähigkeit der Kervenverbindung ist dann erreicht, wenn die vorhandene Spannung die Zugfestigkeit des Betons erreicht, siehe Gleichung Gl. 4.

$$\gamma = 180^\circ - \alpha - \beta \quad \text{Gl. 1}$$

$$Z = \frac{F_K}{\sin \gamma} \cdot \sin \alpha \quad \text{Gl. 2}$$

$$\sigma_{\text{vorh}} = \frac{Z}{b \cdot b_Z} = \frac{F_K \cdot \sin \alpha}{\sin \gamma \cdot b \cdot b_Z} \quad \text{Gl. 3}$$

$$\sigma_{\text{vorh}} = f_{\text{ctm}} \quad \text{Gl. 4}$$

mit b = Bauteilbreite und b_Z = äquivalente Breite der Zugstrebe

Die einzige, bislang nicht definierte Variable, ist die äquivalente Breite der Zugstrebe b_z . Wie in Abbildung 31 zu sehen, handelt es sich im zugbeanspruchten Bereich der Beton-Deckschicht nicht um einen konstanten Spannungsverlauf. Aufgrund der Singularität an der oberen Ecke der Kervendruckflanke, entfällt die Möglichkeit, aus einem rechtwinklig zur Zugstrebe angeordneten, linearisierten Spannungsverlauf eine äquivalente Zugstrebenbreite zu ermitteln. Entsprechend Abbildung 31 wurde daher für die Breite b_z Werte zwischen 10 mm – 20 mm angenommen und mit der festgestellten mittleren Zugfestigkeit $f_{ctm} = 2,4 \text{ N/mm}^2$ (siehe AP 1.4) eine Parameterstudie durchgeführt. Die Ergebnisse dieser rechnerischen Studie sind in Abbildung 33 dargestellt.

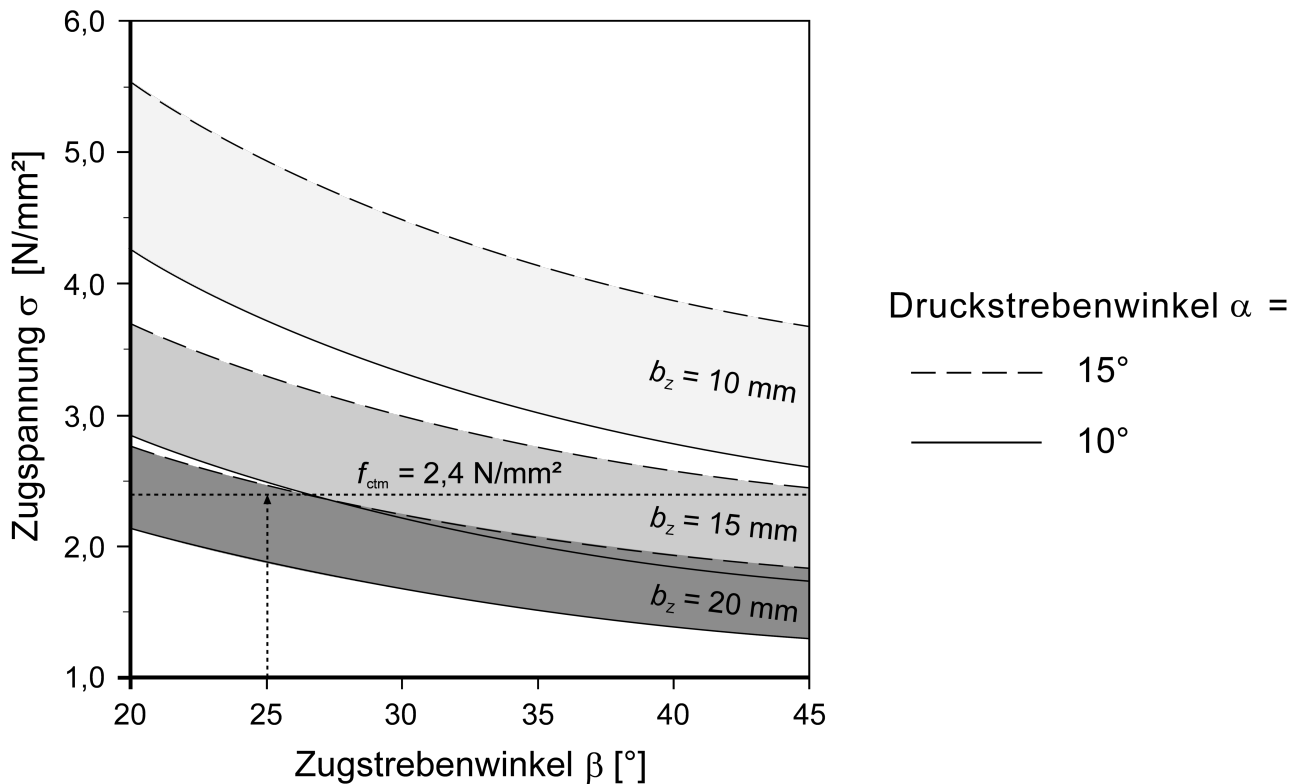


Abbildung 33: Vergleich der Beton-Zugfestigkeit f_{ctm} mit der vorhandenen Spannung σ_{vorh} in der Zugstrebe. Der Zugstrebenwinkel β ist auf der Abszisse aufgeführt und bildet, aufgrund seiner nicht zweifelsfreien Bestimmbarkeit, einen Bereich von $20 - 45^\circ$ ab. Die einzelnen „Spannungs-Bänder“ werden oberhalb von einem Druckstrebenwinkel $\alpha = 15^\circ$ und unterhalb von $\alpha = 10^\circ$ begrenzt. Zwischen diesen Grenzwerten kann linear interpoliert werden. Auf der Ordinate ist die Zugspannung σ abgebildet. Die anhand des Stabwerkmodells ermittelte vorhandene Spannung σ_{vorh} lässt sich, je nach äquivalenter Zugstrebenbreite b_z , den einzelnen Bändern entnehmen. Die Zugfestigkeit f_{ctm} der Betons CAF470 ist mittels einer horizontalen, gepunkteten Linie in das Schaubild eingearbeitet. So liegt in etwa bei einer äquivalenten Breite von $b_z = 20 \text{ mm}$ und den Winkeln $\alpha = 14^\circ$ und $\beta = 25^\circ$ ein Ausnutzungsgrad von $\sigma_{vorh} / f_{ctm} = 1$ vor. Dies entspricht auch den Beobachtungen aus den Kurzzeit-Biegeversuchen und den rechnerischen Untersuchungen aus Projektphase 2, sodass dieser Modellierungsansatz als plausibel und praktikabel bewertet wird. Für den Nachweis der Abhebesicherung durch den Hinterschnitt kann die Abhebekraft durch ein ähnliches Stabwerkmodell ermittelt und den entsprechenden Festigkeiten (Beton-Zugfestigkeit, Basaltfaser-Zugfestigkeit, Holz-Querzugfestigkeit) gegenübergestellt werden.

Für eine weitere Konkretisierung des Modells empfiehlt es sich, die generell stark streuende Zugfestigkeit von Betonen durch eine größere Anzahl an Versuchen genauer zu erfassen und/oder Basaltfaser-Formteile mit definierten Winkeln entsprechend einzusetzen, sodass das Stabwerk mit genauen Querschnitten und der Festigkeit der Basaltfaserstränge bestimmt werden kann. Außerdem sind – wie bereits erwähnt – für die allgemeine Verwendbarkeit des Stabwerkmodells in Form eines Bemessungsmodells, die Einflüsse weiterer Parameter (z. B. Kerventiefe, Kervlänge, Abstand der Kerben, Systemlänge, Höhe des Holzquerschnitts und der Beton-Deckschicht) auszumachen und zu untersuchen.

Mangels fundierter Erkenntnisse über das Alterungsverhalten von calciumsulfatbasiertem Beton sowie den dazugehörigen Abminderungsfaktoren und Teilsicherheitsbeiwerten, wird vorerst empfohlen bei Holz-Beton-Verbunddecken den Verbund zum Calciumsulfatbeton nur für die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) anzusetzen. Bei CSA-Beton wäre aufgrund der teilweise bestehenden Zulassung auch die Ansetzung des Betons im Grenzzustand der Tragfähigkeit möglich. Für die Nachweise im GZG werden jedoch noch Kriechzahlen benötigt, welche durch weiterführende Untersuchungen bestimmt werden müssen. Für Calciumsulfatbeton wird für die Kriechzahl ein Wert von 2,5 empfohlen. Für das Endschwindmaß kann eine Verkürzung von insgesamt 0,4 ‰ angenommen werden. Diese Empfehlungen gelten für die folgenden Randbedingungen:

- Vollflächige Holzelemente (Brettschichtholz, Brettstapelholz, Brettsperrholz)
- Calciumsulfat- α -Halbhydrat als Hauptbestandteil des Bindemittels
- Nutzungsklasse 1 nach DIN EN 1995-1-1:2010
- Beton-Expositionsklasse X0 sowie Beton-Feuchtigkeitsklasse WO nach DIN 1045-2:2008
- Max. Spannweite 5 m
- Max. Betondeckschicht 8 cm
- Verhältnis zwischen Beton- und Holzhöhe von max. 2/3

Außerdem sind die Empfehlungen auf Kerben als Verbundart beschränkt und in diesem Zusammenhang wird auf die Bemessungs- und Ausführungsregeln der DIN CEN/TS 19103:2022 hingewiesen. Abweichend von diesen Regeln wird als min. Kervlänge 200 mm vorgeschlagen. Die Tragfähigkeit der Kerbe sollte auch für die Nachweise im GZG mindestens für die seltene Lastkombination geprüft werden. Weitere Herstellungs- und Ausführungsempfehlungen sind im nachfolgenden Arbeitspaket zusammengefasst.

3.3.2. Erarbeitung von Herstellungs- und Ausführungsempfehlungen

Die hier beschriebenen Empfehlungen sollen ausführenden Unternehmen als grundlegende Informationen für die Ausführung von Holz-Beton-Verbunddecken mit Beton auf Basis von Calciumsulfat dienen und auf die Besonderheiten hinweisen. Außerdem können damit Hersteller von Betonen und Estrichen eigene Entwicklungen vorantreiben. Wie schon bei den Bemessungsansätzen aufgeführt wurde, ist die Verwendung von Calciumsulfat- α -Halbhydrat mit der hohen Reaktivität und der schnellen Festigkeitsentwicklung eine wichtige Voraussetzung. Generell sollten wie in DIN CEN/TS 19103:2022 gefordert, Festigkeiten des Betons erreicht werden, welche mit der Festigkeitsklasse C20/25 oder höher vergleichbar sind.

Bei der Betonage wird grundsätzlich empfohlen, mit Trockenmörtelsilos und angeschlossenen Silomischpumpen zu arbeiten. Transportbeton kann aufgrund der teils kurzen Verarbeitungszeit (< 30 Minuten) zu Problemen führen. Die Ausführbarkeit von HBV-Fertigteilen mit Calciumsulfatbeton war

nicht Gegenstand der Projekt-Zielsetzung und wurde daher nicht in diesem Arbeitspaket behandelt. Die Holzelemente sollten jedoch weitestgehend vorgefertigt auf die Baustelle geliefert und dort von Fachpersonal montiert werden. Vor dem Betonieren müssen folgende Vorbereitungen für die Holzdecke/Holzelemente getroffen werden:

- Montage der Deckenelemente inklusive konstruktiver Verschraubung.
- Randabschalung montieren, Durchbrüche verschließen und abdichten, sodass Fugen nicht ungewollt mit Beton ausgefüllt werden.
- Sprießung der Decken gemäß Sprießplan montieren (Überhöhung beachten, bei mehreren Geschossen von unten nach oben sprießen).
- Installationen und Rohrleitungen kontrollieren (keine ungeplanten oder dem Tragwerksplaner nicht bekannten Installationen anderer Gewerke dulden).
- Sichtoberflächen im Bauwerk vor dem Betonieren schützen oder abdecken.
- Holzdecke vor dem Betonieren mit Druckluft oder Staubsauger vor Verunreinigungen säubern.
- Holzelemente vor dem Betonieren hydrophobieren (am besten werksseitig) und Hydrophobierung vor der Betonage kontrollieren sowie ggf. nachbessern.

Die Bewehrung des Calciumsulfatbetons kann – anders als im Projekt ausgeführt – mit nicht-rostenden Stahl ausgeführt werden, was an besonders beanspruchten Bereichen (z. B. bei Punktlasten) sinnvoll sein kann. Bei der Verwendung von Fasergelegen (Basalt-, Glas- oder Carbonfasern) in Form von Matten und/oder Formteilen sind die folgenden Empfehlungen zu beachten:

- Ein Knicken der Gelege muss während des Transports und beim Verlegen dringend vermieden werden. Geknickte Gelege sind auszutauschen.
- Die Lage im Beton muss durch geeignete Maßnahmen (Abstandshalter, Klammern, etc.) gesichert werden.
- Die Gitteröffnungen der Gelege MW_{min} müssen auf das Größtkorn d_g des Betons abgestimmt sein ($MW_{min} = 2,6 \cdot d_g + 5,4$).
- Gegebenenfalls müssen die Fasergelege durch eine vorherige Tränkung oder Beschichtung vor der Alkalität des Betons geschützt werden.

Zum Zeitpunkt der Betonage sollte die Gebäudehülle bereits fertig sein, sodass eine Beregnung oder sonstige Befeuchtung/Verschmutzung des Betons verhindert werden kann. Für die Betonage sind folgende Punkte zu beachten:

- Bei Verwendung von Trockenmörtelsilos sind die Hersteller-Leitfaden für die Inbetriebnahme (Strom-, Wasseranschluss, Reinigungsanweisung) zu beachten.
- Das Einstellen der Wassermenge erfolgt nach Herstellerangaben bzw. nach Rezeptur.
- Calciumsulfat darf nicht mit noch feuchten, zementgebundenen Baustoffen in Berührung kommen, da die enthaltenen Sulfate chemische, volumenvergrößernde Reaktionen (sog. Sulfat- bzw. Ettringittreiben) hervorrufen können.
- Die Frischbeton-Konsistenz ist dringend zu prüfen und zu dokumentieren. Es sollte eine Konsistenz der Klasse F5 oder höher angestrebt werden, um ein vollständiges Ausgießen der Kernen und das Umschließen der Fasergelege sicherzustellen. Die Kontrolle erfolgt über das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5:2019 oder mit einer 1,3l Prüfdose (siehe AP 1.2).
- Die Temperaturgrenzen von 5 °C – 30 °C dürfen während der Betonage nicht unterschritten/überschritten werden.

- Es werden generell Überwachungsmaßnahmen der Überwachungsklasse 2 nach DIN EN 13670:2011 und DIN 1045-3:2012 empfohlen.
- Die Fasergelege dürfen nicht betreten und auch nicht durch andere schwere Gegenstände (z. B. Betonierschlauch) belastet werden. Zum Schutz der Gelege während der Bauphase eignen sich sogenannte „Nagelbretter“ (siehe Abbildung 34), welche die Lasten auf die darunterliegenden Holzelemente abtragen.

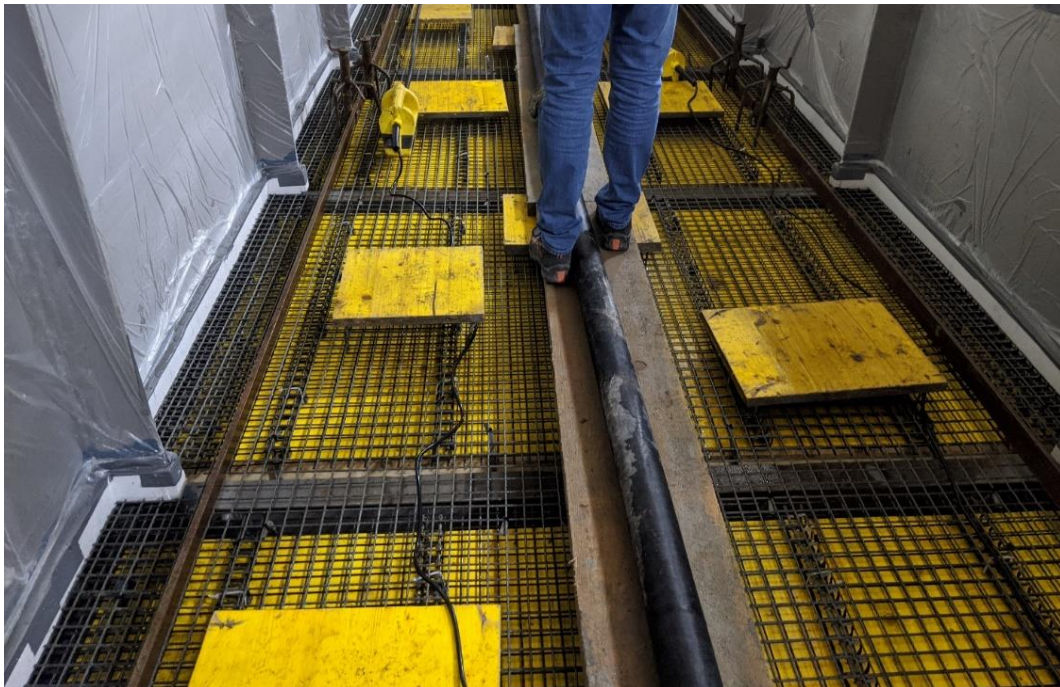


Abbildung 34: Nagelbretter zum Schutz der Fasergelege

Nach dem Erreichen der Sollhöhe ist sofort mit der Verdichtung/Entlüftung des Betons (z. B. mittels Schwabbelstange) zu beginnen. Mit der Schwabbelstange ist zunächst längs und kräftiger, dann quer und etwas leichter durchzuschlagen. Die entstehende Wellenbewegung sorgt für eine gute Entlüftung und Nivellierung des Betons.

Ab der Fertigstellung der Betonage sind Fenster und Türen 24 Stunden geschlossen zu halten. In dieser Zeit ist Zugluft und starke Sonneneinstrahlung des Betons zu vermeiden. Zur Schaffung günstiger Trocknungsbedingungen wird auf einschlägige Merkblätter und Hinweise für Calciumsulfat-Fließestriche hingewiesen. Die Beton-Oberfläche ist in der Regel nach 24 Stunden begehbar und nach 3 Tagen leicht belastbar. Es sind jedoch die Herstellerangaben des Betons zu beachten und die Untersperrung erst nach Erreichen einer ausreichenden Beton-Festigkeit zu entfernen. Für nachfolgende Baumaßnahmen wie Fußbodenaufbauten und Fußbodenbeläge ist die Restfeuchte zerstörungsfrei zu bestimmen und eine ausreichende Austrocknung einzuhalten.

Calciumsulfatbasierte Baustoffe sind nicht wasserbeständig. Während eine vorübergehende Durchfeuchtung (z. B. durch einen Wasserschaden) nicht sofort zum Schaden führt, kann eine länger einwirkende oder wiederholte Durchfeuchtung einen Festigkeitsverlust zur Folge haben. Aus diesem Grund sind HBV-Decken mit Calciumsulfatbeton nicht in Außenbereichen, Garagen/Parkhäusern, Nassräumen, Schwimmbädern, oder ähnlichen Einsatzbereichen mit Feuchtebeanspruchung, geeignet. In allen anderen Bereichen wird dennoch das Aufbringen einer vollflächigen Feuchtesperre zum Schutz vor einer unplanmäßigen Feuchtebeanspruchung empfohlen. Hierzu wird auf die Hin-

weise und Ausführungsgrundsätze der DIN 18534-1:2017 verwiesen, welche den Einsatz von Calciumsulfat-Fließestrichen in den Wassereinwirkungsklassen W0-I und W1-I regelt. Neben einer dauerhaften Feuchtebeanspruchung ist Calciumsulfatbeton vor andauernder Temperatur von über 55 °C zu schützen, was den Einsatz in Industriebereichen mit heißen Produktionsprozessen (z. B. Gießereien) untersagt. Beim Erhitzen geht das Kristallwasser verloren, wodurch die festigkeitsstützende Struktur von Calciumsulfatbeton zerstört wird. Im Brandfall kann dies jedoch aufgrund der Umwandlung von Kristallwassers zu Wasserdampf, positiv wirken und einen zusätzlichen aktiven Brandschutz bieten. Calciumsulfat ist als nichtbrennbarer Baustoff (Baustoffklasse A1 nach DIN 4102-1:1998) eingestuft.

Beim Rückbau von Holz-Beton-Verbunddecken zum Ende der Gebäudenutzungszeit, können die nachfolgenden Hinweise dienlich sein. Nach dem Entfernen des Fußbodenaufbaus sind die HBV-Decken ggf. mit Sprießen abzustützen, um ein plötzliches Absacken der Decke beim Rückbau zu vermeiden und die Druckspannung aus der Betondeckschicht zu reduzieren. Wenn die genaue Lage der Kerven bekannt ist, kann direkt über dem Kervenhinterschnitt der Beton quer zur Spannrichtung aufgeschnitten werden. Dadurch wird die planmäßige Abhebesicherung deaktiviert und die Betonplatte kann segmentweise von den Holzelementen getrennt werden. Der rückgebaute Calciumsulfatbeton kann in den bereits vereinzelt vorhandenen Gipsrecyclinganlagen aufbereitet und dem Rohstoffkreislauf zurückgeführt werden. Im Calciumsulfatbeton enthaltene Basaltfasern sollten aufgrund des mineralischen Ursprungs keine Beeinträchtigung des Recyclingprozesses verursachen (Schiller 2021).

4 Praktische Anwendbarkeit der Ergebnisse und Darstellung der Kooperation mit Wirtschaftspartnern

Während die praktische Anwendbarkeit der im Projekt erarbeiteten Lösungen grundsätzlich durch die verschiedenen Untersuchungen und Ergebnisse gezeigt wurde, ist im baupraktischen Sinne noch ein maßgeblicher Schritt für die Anwendung notwendig. Um die in den Bauordnungen der Bundesländer geforderte Sicherheit von Bauwerken gewährleisten zu können, ist es notwendig die Produkteigenschaften, Aspekte der Planung, Bemessung und Ausführung sowie Betrieb und Wartung in einer bauaufsichtlichen Zulassung zu beschreiben. Mit den in der letzten Projektphase entwickelten Grundlagen wurde die Basis für Zulassungen geschaffen und ein entsprechender Antrag gestellt. Der genaue Hintergrund und das weitere Vorgehen werden im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

4.1 Baupraktische Anwendbarkeit

Die Anwendbarkeit von Bauprodukten und Bauarten ist in Deutschland in den jeweiligen Landesbauordnungen festgelegt. Die Landesbauordnungen definieren die allgemeinen Anforderungen an bauliche Anlagen und regeln das Zulassungs- und Genehmigungsverfahren für Bauprodukte und Bauarten. Die allgemeinen Anforderungen an bauliche Anlagen werden durch sog. Technische Baubestimmungen der Länder konkretisiert. Muster für Technische Baubestimmungen werden vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) im Auftrag der Länder veröffentlicht.

Laut dem DIBt kann sich die Verwendung von Bauprodukten sowie die Anwendung von Bauarten auf die bauaufsichtlichen Schutzziele (öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und natürliche Lebensgrundlagen) auswirken. Deshalb muss für Bauprodukte und Bauarten nachgewiesen werden, dass diese ausreichend sicher ver- bzw. angewendet werden können. In den Landesbauordnungen wird davon ausgegangen, dass diese Bedingung erfüllt ist, wenn die Technischen Baubestimmungen oder die allgemein anerkannten Regeln der Technik (z. B. Normen) eingehalten sind. Es ist jedoch auch möglich, den Bereich der Technischen Baubestimmungen zu verlassen. Gegebenenfalls müssen die verantwortlichen Wirtschaftsakteure dann nachweisen, dass das Bauprodukt oder die Bauart ausreichend sicher ver- bzw. angewendet werden kann. Dies geschieht in der Regel mit einer „Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung/Bauartgenehmigung (abZ)“, welche vom DIBt erteilt werden kann.

Im Frühjahr 2021 wurde in Zusammenarbeit der Wirtschaftspartner dieses Teilprojekts, ein Antrag zur Erteilung einer Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung beim DIBt gestellt. Gegenstand dieses Antrags ist ein Holz-Beton-Verbundsystem der Fa. Brunthaler Holzbau, welches neben der Verwendung eines üblichen Zementbetons auch den in diesem Projekt untersuchten Calciumsulfatbeton beinhaltet.

Einige der Untersuchungsergebnisse wurden bereits mit dem DIBt besprochen, und auch in den entsprechenden Fachreferaten sowie Sachverständigenausschüssen läuft die Abstimmung zur Gesamthematik. Für die Erteilung der Zulassung notwendige, zusätzliche Untersuchungen sind in Planung oder aktuell in Bearbeitung. Dies erfolgt in Zusammenarbeit mit sachkundigen Gutachtern, welche die Ergebnisse abschließend bewerten und Empfehlungen für die Erteilung der Zulassung aussprechen. Vor der Erteilung einer Zulassung ist unter Umständen die baupraktische Anwendbarkeit im Rahmen einer „Zustimmung im Einzelfall“ oder „vorhabenbezogene Bauartgenehmigung“ möglich. Diese Option wird bei einem geeigneten Bauprojekt eventuell vorab von den Wirtschaftspartnern in Erwägung gezogen.

Unabhängig von einer Zulassung wäre die Anwendbarkeit des Calciumsulfatbetons in HBV-Decken ausschließlich für die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit möglich. Dabei werden die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit allein für die Holzelemente geführt. Ab einer Spannweite von ca. 4,0 m wirkt sich der Verbund zum Calciumsulfatbeton sehr vorteilhaft in Hinblick auf das Schwingungs- und Schallschutzverhalten aus. Raumklimatische Vorteile können sich aufgrund der guten Wasserdampfdurchlässigkeit ebenfalls ergeben. An dieser Stelle sei jedoch nochmal auf die eingeschränkte Anwendbarkeit hingewiesen: Calciumsulfatbeton sollte bei HBV-Decken nicht in und über Feuchträumen eingesetzt werden. Hier kann die Anwendung durch den Einsatz von CSA-Beton auf Basis von bereits erteilten Zulassungen sinnvoll ergänzt werden. Weiterentwicklungen sind hierzu mit den Wirtschaftspartnern ebenfalls vorgesehen.

4.2 Zusammenarbeit mit den Wirtschaftspartnern

In der ersten Projektphase erfolgte die Betonentwicklung gemeinsam mit dem Wirtschaftspartner Franken Maxit Mauermörtel. Die Zusammenarbeit beinhaltete dabei v. a. die Absprache und Beratung bei der Auswahl geeigneter Bindemittelkompositionen, Zusatzstoffe und Gesteinskörnungen. Darüber hinaus erfolgte die Unterstützung im Projekt neben der Bereitstellung von Versuchsmaterial auch durch gemeinsame Rezepturmischungen und Erprobungen in den Laboratorien. Nach den Prüfungen der Versuchskörper wurden die jeweiligen Ergebnisse besprochen und weiterführende

Schritte vereinbart. Die Einbindung der baupraktischen Erfahrung der Fa. Franken Maxit Mauermörtel in die Untersuchungen und Entwicklungen sorgte für einen stetigen Anwendungsbezug. Im weiteren Verlauf der Zusammenarbeit erfolgten anwendungsorientierte Erprobungen und Betonagen unter Verwendung von bewährten Trockenmörtelsilos und Silomischpumpen. Hierbei wurde vor allem die Pumpbarkeit von Beton mit Basaltfasern geprüft und die Auswirkungen der Fasern auf die Konsistenz geprüft. Silomischpumpen und die dazugehörigen Schläuche könnten theoretisch durch die Fasern verstopfen, weswegen hierzu beim Wirtschaftspartner unterschiedliche Erprobungen stattgefunden haben (siehe Abbildung 35).



Abbildung 35: Praxiserprobungen von faserbewehrtem Beton in Silomischpumpen

Mit der Fa. Brunthaler Holzbau wurden bei den Praxiserprobungen ebenfalls Absprachen getroffen, um die Anwendbarkeit und Vereinbarkeit mit holzbauspezifischen Belangen zu sichern. Eine engere Zusammenarbeit erfolgte auch im Arbeitspaket zur Hydrophobierung der Holzelemente, wobei hier die Kooperation überwiegend durch Abstimmung der Hydrophobierungsmittel und Applikationsverfahren erfolgte.

Nach Abschluss der ersten Projektphase und dem Anlaufen der zweiten Projektphase (Anwendungsorientierte Untersuchungen) fand mit beiden Wirtschaftspartnern eine erste anwendungsnahe Herstellungserprobung von zwei HBV-Testdecken ($L \times B = 6,5 \times 3,0 \text{ m}^2$) in einer Halle statt. Eine Decke wurde mit dem Referenzbeton OPC908 auf Zementbasis und die andere Decke mit Calciumsulfatbeton CAF470 hergestellt. Die Holzelemente wurde zuvor von der Fa. Brunthaler Holzbau angeliefert und auf zwei Wandstreifen (Mauerwerk und Holzrahmenwand) aufgelegt. Die anschließende Betonage erfolgte durch Fachpersonal der Fa. Franken Maxit. Wissenschaftliche Mitarbeiter der Hochschule Augsburg begleiteten die Herstellungserprobung und verwendeten die Testdecken für mehrere Messungen und Versuchsreihen in den darauffolgenden Wochen zu Untersuchung des Langzeitverhaltens. In Abbildung 36 sind auszugsweise Fotos während und nach der Herstellungserprobung dargestellt.



Abbildung 36: Herstellungserprobung von HBV-Testdecken

Die Herstellungserprobung diente an erster Stelle dem Sammeln von Praxiserfahrung unter baustellenähnlichen Bedingungen. Mögliche Fehlerquellen und Gefahrenpotentiale bei der Herstellung sollten dadurch ebenfalls identifiziert werden, was aufgrund der guten Vorbereitung und Abstimmung zwischen den Gewerken auf ein Minimum reduziert werden konnte. Die weiteren Untersuchungen an den Testdecken sowie an den Abscher- und Biegeprüfkörpern (siehe AP 2.1, AP 2.2 und AP 2.3) wurden ebenfalls unter ständigem Austausch zwischen den Wirtschaftspartnern und der Hochschule Augsburg durchgeführt und bestätigten die gute Zusammenarbeit im Teilprojekt HB(Ca)V.

Im projektabschließenden Arbeitspaket war eine enge Kooperation aller Projektpartner von besonderer Wichtigkeit, um eine baupraktische Anwendbarkeit der Projektergebnisse zu gewährleisten. Hierzu flossen größtenteils die Erfahrungen der Wirtschaftspartner in die Herstellungsempfehlungen und die Erkenntnisse aus den anwendungsorientierten Untersuchungen zusammen in die Leitfäden ein. Weiterführende, gemeinsame Untersuchungen und Erprobungen sind im Zusammenhang mit der Beantragung einer bauaufsichtlichen Zulassung über das vorliegende Projekt hinaus geplant.

5 Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts

Eine schriftliche Publikation zur Veröffentlichung der Ergebnisse in einer Fachzeitschrift steht vor der Fertigstellung. Weitere darauf aufbauende Veröffentlichungen sind geplant und folgen mit den fortlaufenden Entwicklungen zu der Thematik. Die Wirtschaftspartner werden zudem unter Rücksichtnahme des Fortschritts im Zulassungsverfahren, eigene Veröffentlichungen (z. B. auf Fachveranstaltungen, Messen, etc.) auf den Weg bringen.

Eine Präsentation der Projektergebnisse vor Fachpublikum erfolgte bei den Betontagen 2022 in Ulm (ursprünglich im Februar 2022 geplant, jedoch auf den 21.- 23. Juni 2022 verlegt) in der „Arena Forschung 3 – Fokus Holz-Beton-Verbundbau“. Diese Fachsession wurde vom Projektleiter Prof. Dr.-Ing. Sergej Rempel moderiert und war eine gute Plattform für die Diskussion der Ergebnisse.

Zudem wurde im Rahmen der „Langen Nacht der Wissenschaft“ in Augsburg (16.07.2022) das Projekt bürgernah und für alle verständlich an einem Infostand mit Postern und Exponaten präsentiert.

6 Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern und im Projektverbund

Im Projektverbund fand mit dem Teilprojekt 9 „BGMR“ der Universität Augsburg ein wissenschaftlicher Austausch und eine Zusammenarbeit zum Thema „alternative Bindemittel“ statt. Das Team um Prof. Dr. Richard Wehrich des Instituts für Materials Resource Management beschäftigte sich grundsätzlich mit bei Gießprozessen anfallenden Stäuben, welche teils wertvolle Metallrohstoffe beinhalten. In diesem Zusammenhang war es die Aufgabe, Prozesse zu entwickeln und zu optimieren, um die Metalle aus den Stäuben ressourceneffizient in die Produktion zurückzuführen, Abfälle zu reduzieren und neue Verwertungswege zu identifizieren. Dabei wurde u. a. die Beimischung von Gießereistäuben zu SiC-Presslingen untersucht. SiC-Presslinge werden im Kupolofen zugegeben um die Schmelze an Silizium anzureichern. Die erprobte Formulierung bestand anfangs aus 10 Gew.-% Zement, um den Formling zusammen zu halten. Es wurden bis zu 50 Gew.-% Stäube beigemischt und herausgefunden, dass dies funktioniert ohne den Zementanteil erhöhen zu müssen und der Formling dabei trotzdem noch eine ausreichende Stabilität hat. Das Problem dabei war, dass Zement generell im Ofen verschlackt. Deshalb wurde auch versucht, den Zementanteil durch Substitution mit einem anderen Bindemittel sukzessive zu verringern. Hierfür wurden beispielsweise Bindemittel auf Stärke-Basis erprobt. Eine weitere Idee entstand durch den wissenschaftlichen Austausch, indem vorgeschlagen wurde, klassischen Portlandzement durch Bindemittel auf Basis von Calciumsulfoaluminat (CSA-Zement) zu ersetzen. Bindemittel mit Calciumsulfat wären nicht zielführend gewesen, da sie bei zu großer Hitzeeinwirkung und dem daraus folgenden Entweichen des Kristallwassers schnell ihre Festigkeit verlieren. Daher wurden der Universität Augsburg und deren Wirtschaftspartner (GPS SIC Keßl GmbH u. Co. KG) eine Testmenge des im vorliegenden Teilprojekt verwendeten CSA-Zements zugesendet und nach Absprache erprobt. Über die Ergebnisse wird im Abschlussbericht des Teilprojekts 9 „BGMR“ berichtet.

Im Gegenzug wurde im Teilprojekt 4 „HB(Ca)V“ die Erprobung von Gießereistäuben als Zementersatzstoff oder Füller in Betonkompositionen durchgeführt. Ziel war es, mittels experimenteller Tastversuche den Einflüssen von unterschiedlichen Gießereistäuben in Bezug auf die Festigkeitsentwicklung von Portlandzement-Beton zu untersuchen. Nach einer Analyse der verfügbaren Gießereistäube, wurden die folgenden Proben zur Verfügung gestellt:

- FG-EO-S2: Franken Guss - "Staub 2 - Filterstaub E-Ofen"
- GH-EQ12: Gießerei Heunisch - EQ12
- GH-EQ20: Gießerei Heunisch - EQ20

Die drei bereitgestellten Gießereistäube wurden dazu genutzt, in zwei Verhältnissen (5 % und 30 %) Portlandzement OPC (CEM I 42,5) zu substituieren (siehe Rezeptur 1 – 8 in Tabelle 9). Es wurden Prismen in Anlehnung an DIN EN 196-1:2016 hergestellt (Abmessungen der Prismen: 40 x 40 x 160 mm³). Diese wurden nach 48 Stunden ausgeschalt und anschließend Unterwasser gelagert. Nach 14 Tagen wurden die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit bestimmt.

Tabelle 9: Erprobte Rezepturen 1 – 8 mit Gießereistäuben

| Rezeptur 1 | | | |
|-------------------|--------------------|-----------------|----------|
| | Bindemittel | Baustoff | g |
| | 100,0% | OPC | 450 |
| | 0,0% | - | 0 |
| | | CEN-Sand | 1350 |
| | | Wasser | 225 |
| Σ | 100,0% | | 2025 |

| Rezeptur 2 | | | |
|-------------------|--------------------|-----------------|----------|
| | Bindemittel | Baustoff | g |
| | 100,0% | OPC | 450 |
| | 0,0% | - | 0 |
| | | CEN-Sand | 1350 |
| | | Wasser | 225 |
| Σ | 100,0% | | 2025 |

| Rezeptur 3 | | | |
|-------------------|--------------------|-----------------|----------|
| | Bindemittel | Baustoff | g |
| | 95,0% | OPC | 428 |
| | 5,0% | FG-EO-S2 | 23 |
| | | CEN-Sand | 1350 |
| | | Wasser | 225 |
| Σ | 100,0% | | 2025 |

| Rezeptur 4 | | | |
|-------------------|--------------------|-----------------|----------|
| | Bindemittel | Baustoff | g |
| | 70,0% | OPC | 315 |
| | 30,0% | FG-EO-S2 | 135 |
| | | CEN-Sand | 1350 |
| | | Wasser | 225 |
| Σ | 100,0% | | 2025 |

| Rezeptur 5 | | | |
|-------------------|--------------------|-----------------|----------|
| | Bindemittel | Baustoff | g |
| | 95,0% | OPC | 428 |
| | 5,0% | GH-EQ12 | 23 |
| | | CEN-Sand | 1350 |
| | | Wasser | 225 |
| Σ | 100,0% | | 2025 |

| Rezeptur 6 | | | |
|-------------------|--------------------|-----------------|----------|
| | Bindemittel | Baustoff | g |
| | 70,0% | OPC | 315 |
| | 30,0% | GH-EQ12 | 135 |
| | | CEN-Sand | 1350 |
| | | Wasser | 225 |
| Σ | 100,0% | | 2025 |

| Rezeptur 7 | | | |
|-------------------|--------------------|-----------------|----------|
| | Bindemittel | Baustoff | g |
| | 95,0% | OPC | 428 |
| | 5,0% | GH-EQ20 | 23 |
| | | CEN-Sand | 1350 |
| | | Wasser | 225 |
| Σ | 100,0% | | 2025 |

| Rezeptur 8 | | | |
|-------------------|--------------------|-----------------|----------|
| | Bindemittel | Baustoff | g |
| | 70,0% | OPC | 315 |
| | 30,0% | GH-EQ20 | 135 |
| | | CEN-Sand | 1350 |
| | | Wasser | 225 |
| Σ | 100,0% | | 2025 |

Bereits nach zwei Tagen konnten während des Ausschalens erhebliche Unterschiede an den Prismen festgestellt werden. Die Rezepturen 3 und 4 zeigten eine starke bräunliche Färbung. Die Rezepturen 5 und 6 (mit GH-EQ12) konnten in den ersten beiden Tagen keine nennenswerte Festigkeit entwickeln, sodass diese während des Auslösens aus der Schalung zerbrochen sind. Auch nach 14 Tagen konnte die Rezeptur 6 keine Festigkeitsentwicklung aufweisen (die Proben konnten mit dem Daumen zerdrückt werden). Die Prüfergebnisse sind in Abbildung 37 zusammengefasst.

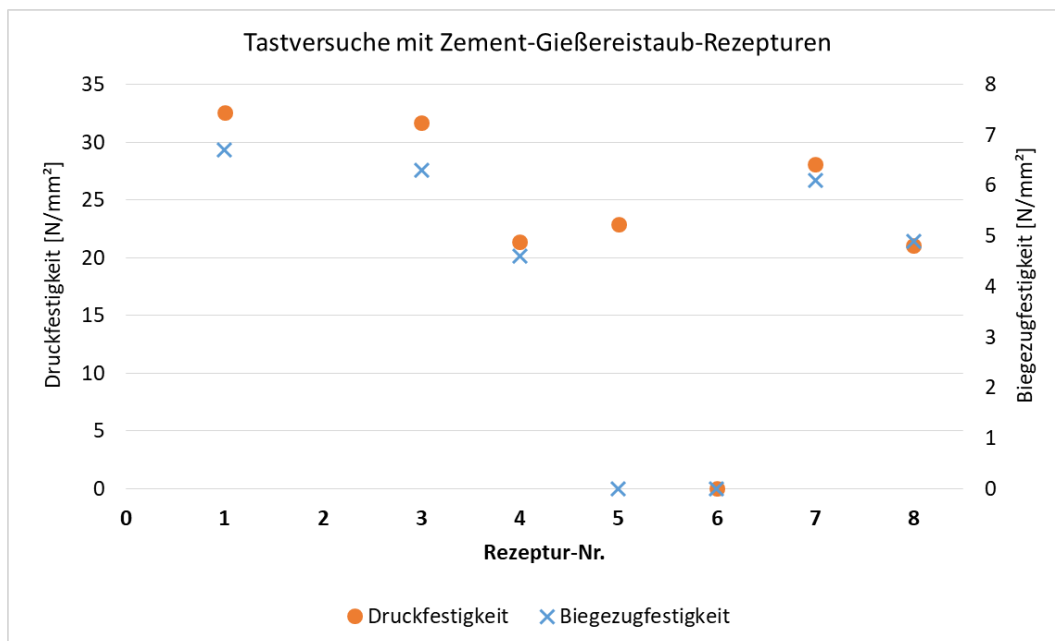


Abbildung 37: Ergebnisse der Tastversuche mit Gießereistäuben

Die Tastversuche geben ausschließlich eine Auskunft über die Festigkeitsentwicklung von Zementprismen nach 14 Tagen. Hierbei konnte festgestellt werden, dass kein Gießereistaub zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit (wie bei puzzolanischen oder latenthyaualischen Zusatzstoffen) geführt hat. Der Staub "Franken Guss - Staub 2 - Filterstaub E-Ofen" zeigt das größte Potential für die Verwendung als Füllstoff in Beton. Der Staub "Gießerei Heunisch - EQ12" sorgte dafür, dass im Zement die Festigkeitsentwicklung gestört wurde und sollte daher keinesfalls in Zusammenhang mit Zement verwendet werden. Für weitere Untersuchungen wurden zwei Rezepturen zwischen den bereits erprobten Verhältnissen 5 % und 30 % zusammengestellt (siehe Tabelle 10). Dafür wurde ausschließlich der Gießereistaub FG-EO-S2 verwendet.

Tabelle 10: Weitere erprobte Rezepturen 9 – 10 mit Gießereistaub FG-EO-S2

| Rezeptur 9 | | | | Rezeptur 10 | | | |
|-------------------|--------------|----------|------|--------------------|--------------|----------|------|
| | Bindemittel% | Baustoff | g | | Bindemittel% | Baustoff | g |
| | 86,7% | OPC | 390 | | 78,4% | OPC | 353 |
| | 13,3% | FG-EO-S2 | 60 | | 21,6% | FG-EO-S2 | 97 |
| | | CEN-Sand | 1350 | | | CEN-Sand | 1350 |
| | | Wasser | 225 | | | Wasser | 225 |
| Σ | 100,0% | | 2025 | Σ | 100,0% | | 2025 |

Die festgestellte Druckfestigkeit (nach 60 Tagen) der Prismen betrug bei Rezeptur 9 im Mittel 48,5 N/mm² und bei Rezeptur 10 45,0 N/mm². Die Biegezugfestigkeit betrug 3,5 N/mm² (Rezeptur 9) und 4,7 N/mm² (Rezeptur 10).

Weitere denkbare Anwendungsmöglichkeiten von Gießereistäuben mit besonders hohen Aluminiumanteil könnte die Herstellung von Calciumsulfoaluminat sein. Hier wird als Aluminiumquelle aktuell häufig Bauxit verwendet, was in Hinblick auf die Umweltschäden beim Abbau sehr bedenklich ist. Aluminiumhaltige Abfallstoffe werden aktuell bereits erprobt oder bei der Herstellung verwendet.

7 Zusammenfassung

Holz-Beton-Verbunddecken werden aufgrund ihrer vielseitigen Vorteile bezüglich der hohen Tragfähigkeit, Steifigkeit und guter bauphysikalischer Eigenschaften vermehrt im Neubau eingesetzt. Vor allem flächige Holzelemente mit Kerven-Verbund stellen aufgrund des hohen Vorfertigungsgrads und des einfachen Konstruktionsprinzips eine praktikable Alternative dar. Trotz des – im Vergleich zu konventionellen Stahlbetondecken – geringeren Betonanteils, wirkt sich die Verwendung von Zement als Bindemittel sowie der bislang notwendigen Komponenten aus Stahl (Schrauben zur Abhebesicherung und flächige Bewehrung) nachteilig aus, da die Werkstoffe einen hohen Ressourcenverbrauch und herstellungsbedingt große Mengen an CO₂-Emissionen verursachen. Ökologischere Alternativen wurden zwar bereits teilweise erprobt, aber nicht bis zur Marktreife weiterentwickelt. Zudem fehlen die notwendigen bauaufsichtlichen Zulassungen, welche einen baupraktischen Einsatz in großem Stile erst möglich machen. Das Gesamtziel des Projekts war es daher, baupraktische und marktreife Lösungen für die Verwendung von natürlichen und ökologischen Werkstoffen im Bau von Geschossdecken in Holz-Beton-Verbundbauweise zu entwickeln. Dabei war es essenziell, dass durch die Verwendung alternativer Baustoffe die Leistungsfähigkeit der HBV-Bauweise erhalten bleibt, d. h. es sollten mindestens gleichhohe Tragfähigkeiten wie bei gängigen HBV-Decken mit Zementbeton erreicht werden.

Zu Beginn des Projekts wurden zielführende Rezepturen und Prüfverfahren für ökologische Betone auf Basis von Calciumsulfat und Basaltfaserbewehrung erarbeitet und ausgewählt. Dabei konnten Einsparungen der herstellungsbedingten CO₂-Emissionen von ca. 50 % erreicht werden. Weitere Problemstellungen, wie der erhöhte Feuchteintrag in die Holzelemente, wurden dadurch gelöst, dass Anstriche mit Wachsdispersionen aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen eine übermäßige Wasseraufnahme der Holzelemente verhinderten. Die ausgewählten Werkstoffe wurden im weiteren Projektverlauf in Holz-Beton-Verbundbauteilen mit Kerven-Verbund anhand von experimentellen und theoretischen Untersuchungen geprüft. Dies beinhaltete kleinformatische Abscherversuche zur Ermittlung der Verbundsteifigkeit und Verbundtragfähigkeit sowie großformatige Bauteilbiegeversuche zur Untersuchung des Kurzzeit- und Langzeittragverhaltens. Gemäß der Zielsetzung konnte das Traglastniveau der Referenzprüfkörper mindestens erreicht oder sogar überschritten werden. Die im Vergleich zu den Bauteilen mit Referenzbeton etwas geringere Steifigkeit kann durch die günstigen Schwind- und Kriecheigenschaften des Betons auf Calciumsulfatbasis ausgeglichen werden, da eine geringere Durchbiegung in Hinblick auf das Langzeitverhalten rechnerisch erwartet wird. Die aus allen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse wurden mit dem Fokus auf eine baupraktische Verwendbarkeit abschließend in Leitfäden zusammengefasst. Hierzu wurden Bemessungsansätze und Herstellungsempfehlungen für die Bauindustrie hergeleitet. Die Anwendung ist für übliche Deckenspannweiten gut geeignet, wobei die Räume keiner dauerhaften Feuchtebeanspruchung ausgesetzt sein dürfen.

Insgesamt wurden durch die im Projekt erarbeiteten Lösungen und die erreichten Ziele, notwendige Grundlagen für bauaufsichtliche Zulassungen geschaffen. Außerdem können damit weitere Impulse für Neu- und Weiterentwicklungen gesetzt werden, um den Fortschritt der (Holz-)Bauwirtschaft nachhaltig zu stärken und einen vermehrten, ressourceneffizienten Einsatz von nachwachsenden und natürlichen Werkstoffen zu fördern. In Hinblick auf die Klimaschutzziele ist dies eine sehr wirkungsvolle Maßnahme, da der Bausektor zu einem der größten Ressourcenverbraucher und Verursacher von Treibhausgasen weltweit gehört.

8 Ausblick

Weitere Untersuchungen zum Langzeittragverhalten – speziell zum Einfluss von möglichen Festigkeitsverlusten infolge Dauerstandsbeanspruchung der Betone – sind notwendig, um die nach den Bemessungsnormen geforderten Beiwerte zu bestimmen. Hierfür sind weitere experimentelle Versuche erforderlich, um anschließend durch probabilistische Berechnungen Teilsicherheitsbeiwerte zu ermitteln. Die im Projekt gestarteten Langzeit-Biegeversuche sowie die Kriechversuche werden hierzu weiterhin beobachtet und ausgewertet. Ergänzende Untersuchungen werden derzeit ebenfalls geplant und im Verlauf des eingeleiteten Zulassungsverfahrens durchgeführt. Ein fundierteres Wissen über das Langzeitverhalten die Ermüdung von Basaltfasern wird ebenfalls benötigt, was teilweise bereits Gegenstand der aktuellen Forschung ist (Yang et al. 2022). Auch das Recycling von faserbewehrten Betonen oder Textilbetonen wird derzeit noch genauer betrachtet (siehe z. B. Projekt „FaBer“ der RWTH Aachen)

Darüber hinaus können Weiterentwicklungen der hergeleiteten Betonrezepturen die werkstoffbedingten Nachteile von Calciumsulfat bei Feuchteeinwirkung beseitigen. Aussichtsreiche Ansätze hierzu liegen beim Wirtschaftspartner bereits vor und sollen in Nachfolgeprojekten bearbeitet werden. Betonentwicklungen auf der Basis von bereits zugelassenen CSA-Zementen bergen ebenfalls noch Potential, zumal sie ohne größeren Aufwand zu marktreifen Produkten führen können. Hierbei sind jedoch die vergleichsweise hohen Materialkosten hinderlich, was wiederum die Forschung und Entwicklung an anderen, günstigeren Bindemittelalternativen in den Vordergrund rückt. Da die Themen „Nachhaltigkeit“ und „Ressourcenschonung“ generell im Betonbau seit einiger Zeit eine hohe Aufmerksamkeit bekommen, siehe z. B. (Gartner 2004) und (Imbabi et al. 2012), können unterschiedliche Lösungen in nächster Zeit erwartet werden und auch im Bereich des Holz-Beton-Verbundbaus weiter erprobt werden.

Insgesamt müssen hinsichtlich drohender Ressourcenverknappungen und Lieferschwierigkeiten vermehrt Hybridbauweisen in den Fokus des Bauens rücken. Hierzu ist es notwendig, dass materialbedingte Vorbehalte beseitigt werden (Knauf 2017). Lösungsansätze wie im vorliegenden Projekt können dabei Abhilfe schaffen und Impulse für weitere neue Konzepte und Methoden entlang der gesamten Bau-Prozesskette geben. Vereinfachungen der Zulassungs- und Genehmigungsverfahren könnten zudem die Markteinführung von ökologischen Bauprodukten beschleunigen und Bauherren sowie Bauplaner zu einer verstärkten Nutzung von nachhaltigeren Baustoffen animieren.

Literaturverzeichnis

- Bergmeister, Konrad; Fingerloos, Frank; Wörner, Johann-Dietrich (Hg.) (2022): Nachhaltigkeit, Digitalisierung, Instandhaltung. 111. Jahrgang. Berlin: Ernst & Sohn (Beton-Kalender, 111. Jahrgang (2022)).
- Boccardo, Lorenzo; Steiger, René; Zweidler, Simon; Frangi, Andrea (2017): Analysis of shear transfer and gap opening in timber–concrete composite members with notched connections. In: *Mater Struct* 50 (5).
- Engelke, H. (1979): Veränderung mechanischer Eigenschaften von Gipsbaustoffen bei und nach Durchfeuchtung. In: *Zement-Kalk-Gips* (11), S. 560–568.
- Gartner, Ellis (2004): Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. In: *Cement and Concrete Research* 34 (9), S. 1489–1498.
- Grosse, M.; Hartnack, R.; St. Lehmann; Rautenstrauch, K. (2003): Modellierung von diskontinuierlich verbundenen Holz-Beton-Verbundkonstruktionen / Teil 1: Kurzzeittragverhalten. In: *Bautechnik* 80 (8), S. 534–541.
- Hanein, Theodore; Galvez-Martos, Jose-Luis; Bannerman, Marcus N. (2018): Carbon footprint of calcium sulfoaluminate clinker production. In: *Journal of Cleaner Production* 172, S. 2278–2287.
- Holschemacher, Klaus; Kieslich, Hubertus (2021): Holz-Beton-Verbund. In: *Beton Kalender 2021*: John Wiley & Sons, Ltd.
- Hölzl, Stefan (2014): Wirtschaftliche Betrachtung von Holz-Beton-Verbunddecken. Masterarbeit. TU Graz. Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft.
- Imbabi, Mohammed S.; Carrigan, Collette; McKenna, Sean (2012): Trends and developments in green cement and concrete technology. In: *International Journal of Sustainable Built Environment* 1 (2), S. 194–216.
- Ioannou, Socrates; Paine, Kevin; Reig, Lucia; Quillin, Keith (2015): Performance characteristics of concrete based on a ternary calcium sulfoaluminate–anhydrite–fly ash cement. In: *Cement and Concrete Composites* 55, S. 196–204.
- Kajaste, Raili; Hurme, Markku (2016): Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. In: *Journal of Cleaner Production* 112, S. 4041–4052.
- Kaufmann, Hermann; Krötsch, Stefan; Winter, Stefan (2022): Atlas mehrgeschossiger Holzbau. Grundlagen - Konstruktionen - Beispiele. 4. Auflage. München: Edition Detail.
- Knauf, M. (2017): Holz-Beton-Verbund – ein Schlüssel zu mehr Holzbau. Analyse der Marktpotenziale von Holz-Beton-Konstruktionen in Deutschland. In: *Holz-Zentralblatt*, Nr. 7, S. 173–174.
- Kreißig, Johannes; Stoffregen, Alexander (2007): Datenprojekt Grunddatensätze Gips und Gipsprodukte im Netzwerk Lebenszyklusdaten. Projektbericht. Hg. v. Forschungszentrum Karlsruhe. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse. Karlsruhe.
- Kromoser, Benjamin (2021): Ressourceneffizientes Bauen mit Betonfertigteilen Material – Struktur – Herstellung. In: *Beton Kalender 2021*: John Wiley & Sons, Ltd, S. 305–356.

-
- Kudla, Katrin (2017): Kerven als Verbindungsmittel für Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken. Dissertation. Institut für Konstruktion und Entwurf. Universität Stuttgart.
- Lehmann, Steffen (2004): Untersuchungen zur Bewertung von Verbundbauteilen aus Brettstapелеlementen im Flächenverbund mit mineralischen Deckschichten. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar.
- Michelfelder, Birgit Christiane (2006): Trag- und Verformungsverhalten von Kerven bei Brettstapel-Beton-Verbunddecken. Unter Mitarbeit von Universität Stuttgart.
- Neuhaus, Helmuth (2017): Ingenieurholzbau. Grundlagen - Bemessung - Nachweise - Beispiele. 4. Auflage. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg (Lehrbuch).
- Péra, J.; Ambroise, J. (2004): New applications of calcium sulfoaluminate cement. In: *Cement and Concrete Research* 34 (4), S. 671–676.
- Rautenstrauch, Karl; Schober, Kay-Uwe; Simon, Antje; Dorn, Christian; Jahreis, Markus; Müller, Jens; Stief, Alexander (2008): Innovative nachhaltige Bauwerke durch effiziente Kombination von nachwachsenden Rohstoffen und einfach in Kreisläufe integrierbaren mineralischen Baustoffen in einer Hybrid-Bauweise. Forschungsbericht. Forschungsprojekt FNR 22024505. Bauhaus-Universität Weimar.
- Schänzlin, Jörg (2003): Zum Langzeitverhalten von Brettstapel-Beton-Verbunddecken. Unter Mitarbeit von Universität Stuttgart.
- Schiller, Bernd (2021): Stark wie Stein mit Basaltfasern. Mineralischer Stoff für Entwässerungsrinnen und nachhaltiges Bauen. In: *Deutsches Ingenieurblatt* (12), S. 54–56.
- Schmidt, Jörg (2003): Holz/Calciumsulfatfließestrich-Verbunddecken. Dissertation. Hg. v. R. Thiele und M. Kaliske. Shaker Verlag. Aachen (Berichte aus dem Institut für Statik und Dynamik der Tragstrukturen, Band 7).
- Twelmeier, Heiko (2010): Dauerhaftigkeitsprognose der Verfügu ng von gipshaltigem historischem Mauerwerk. Universitätsbibliothek Braunschweig.
- Weidner, Stefanie; Mrzigod, Alexandra; Bechmann, Roland; Sobek, Werner (2021): Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 116 (12), S. 969–977.
- Wiegink, Karl-Heinz (2002): Modellierung des Austrocknungsverhaltens von Calciumsulfat-Fließestrichen und der resultierenden Spannungen und Verformungen. Dissertation. TU München.
- Yang, Jingyu; Guo, Yinchuan; Tan, Jingjing; Shen, Aiqin; Wu, Hua; Li, Yue et al. (2022): Strength deterioration and crack dilation behavior of BFRC under dynamic fatigue loading. In: *Case Studies in Construction Materials* 16, e01051.
- Zilch, Konrad; Zehetmaier, Gerhard (2010): Bemessung im konstruktiven Betonbau. Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2). 2. Aufl. 2010: Springer Berlin Heidelberg.

Normenverzeichnis

- DIN CEN/TS 19103:2022-02: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Berechnung von Holz-Beton-Verbundbauteilen - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- DIN EN 13454-2:2019-04: Calciumsulfat-Binder für Estriche - Teil 2: Prüfverfahren
- DIN EN 196-1:2016-11: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
- DIN EN 12390-3:2019-10: Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern
- DIN EN 12390-13:2014: Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul)
- DIN EN 12390-2:2019-10: Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen
- DIN EN 13892-1:2003-02: Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen - Teil 1: Probenahme, Herstellung und Lagerung der Prüfkörper
- DIN EN 12350-5:2019-09: Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß
- DIN EN 12390-6:2010-09: Prüfung von Festbeton - Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern
- ISO 13061-1:2014-10: Physikalische und mechanische Eigenschaften von Holz - Prüfverfahren für kleine, fehlerfreie Prüfkörper - Teil 1: Bestimmung des Feuchtegehalts für physikalische und mechanische Prüfungen
- DIN EN 1995-1-1:2010-12: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- DIN EN 206:2021-06: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- DIN EN 1992-1-1:2011-01: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- DIN EN 26891:1991-07: Holzbauwerke; Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln; Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens (ISO 6891:1983)
- DIN EN 408:2012-10: Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften
- DIN EN 12390-17:2019-12: Prüfung von Festbeton - Teil 17: Bestimmung des Kriechens von Beton unter Druckspannung
- DIN EN 338:2016-07: Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen
- DIN 1045-2:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- DIN EN 13670:2011-03: Ausführung von Tragwerken aus Beton
- DIN 1045-3:2012-03: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 3: Bauausführung - Anwendungsregeln zu DIN EN 13670

DIN 18534-1:2017-07: Abdichtung von Innenräumen - Teil 1: Anforderungen, Planungs- und Ausführungsgrundsätze

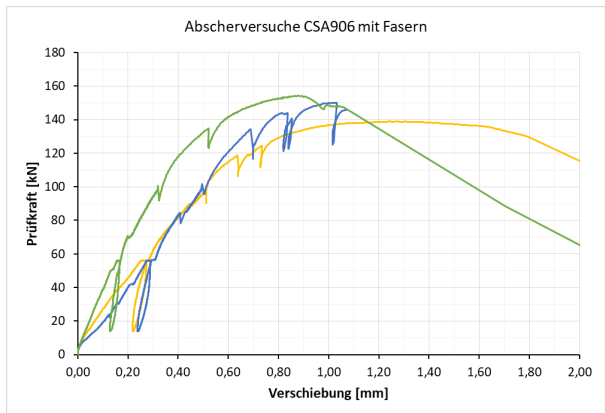
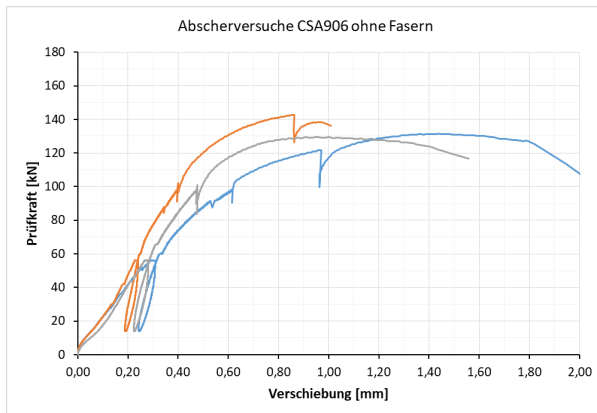
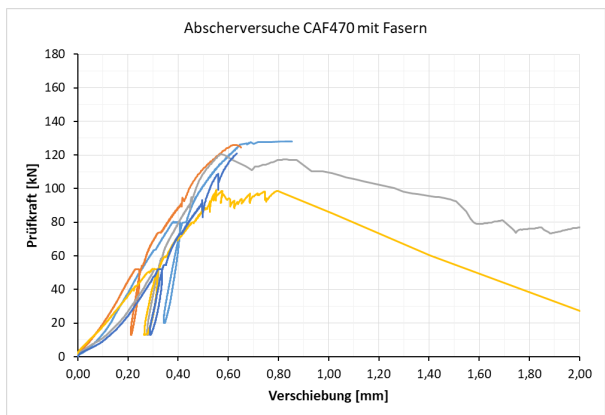
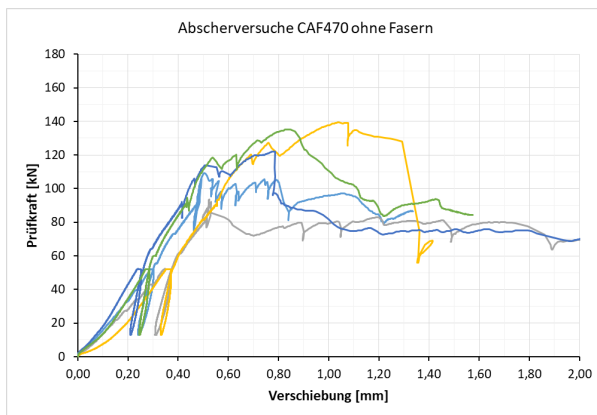
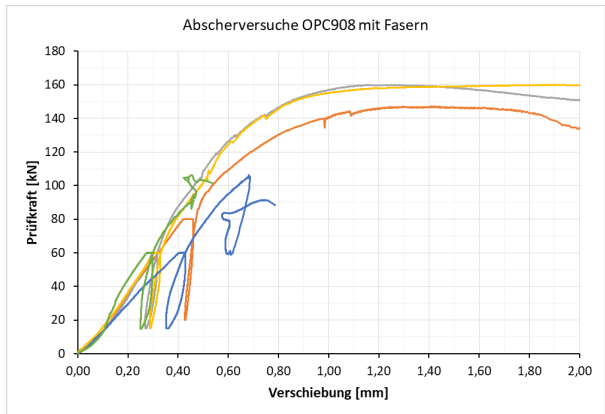
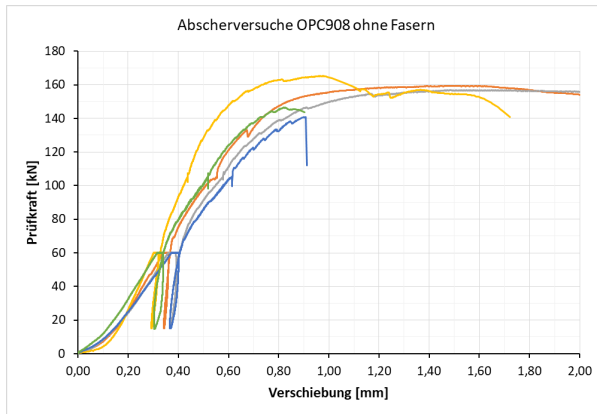
DIN 4102-1:1998-05: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen

Anhang

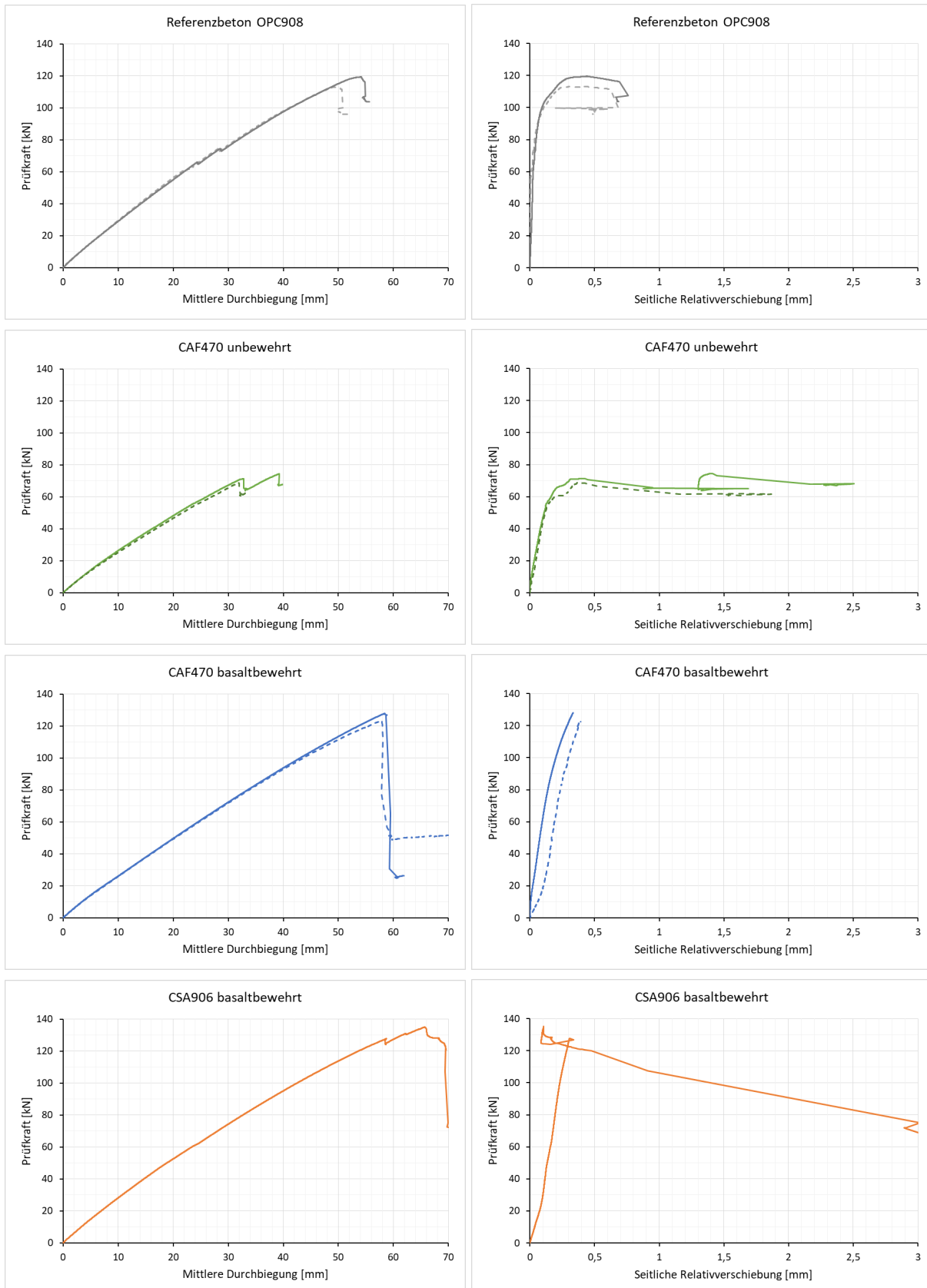
Anlage 1: Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Bedeutung |
|------------------|---|
| HBV | Holz-Beton-Verbund |
| OPC | Ordinary Portland Cement (deutsch: Üblicher Portlandzement) |
| CAF | Calciumsulfat |
| CSA | Calciumsulfoaluminat |
| AP | Arbeitspaket |
| FEM | Finite-Elemente-Methode |
| GZT | Grenzzustand der Tragfähigkeit |
| GZG | Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit |
| DIBt | Deutsches Institut für Bautechnik |

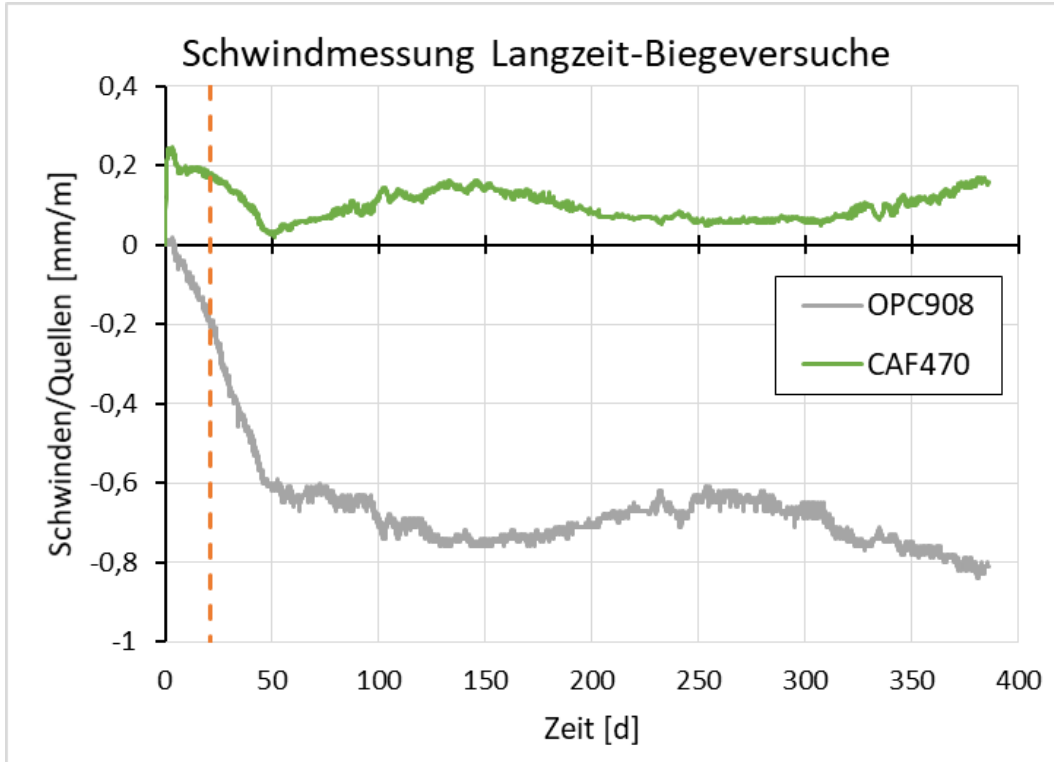
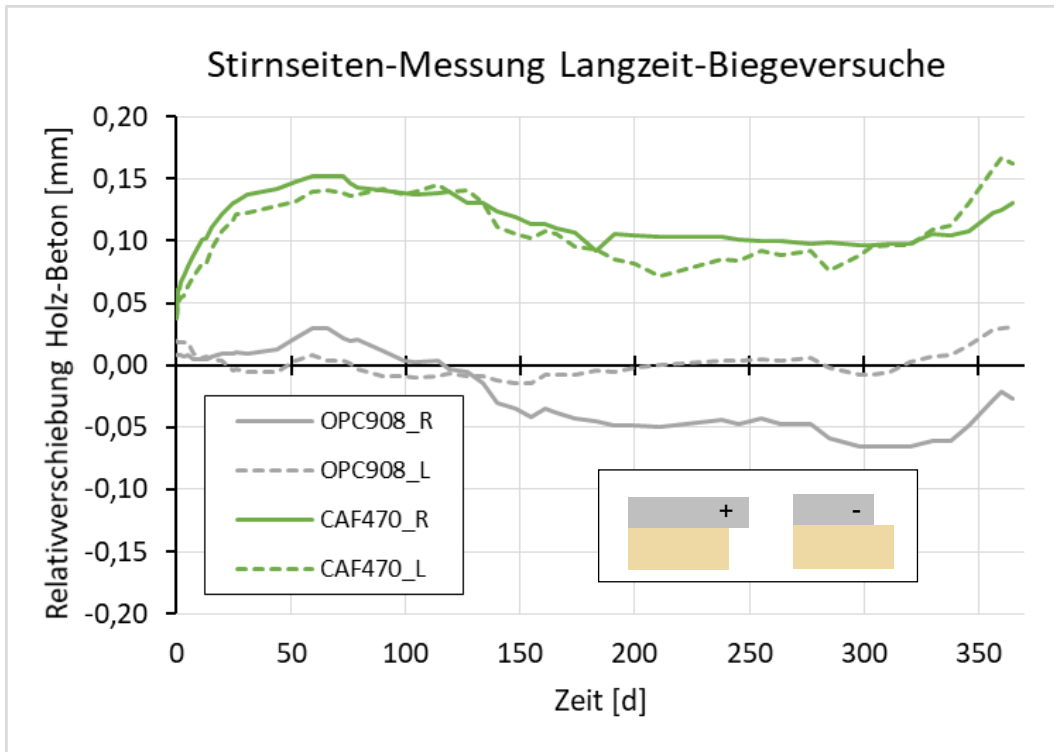
Anlage 2: Last-Verschiebungsdiagramme der Scherversuche

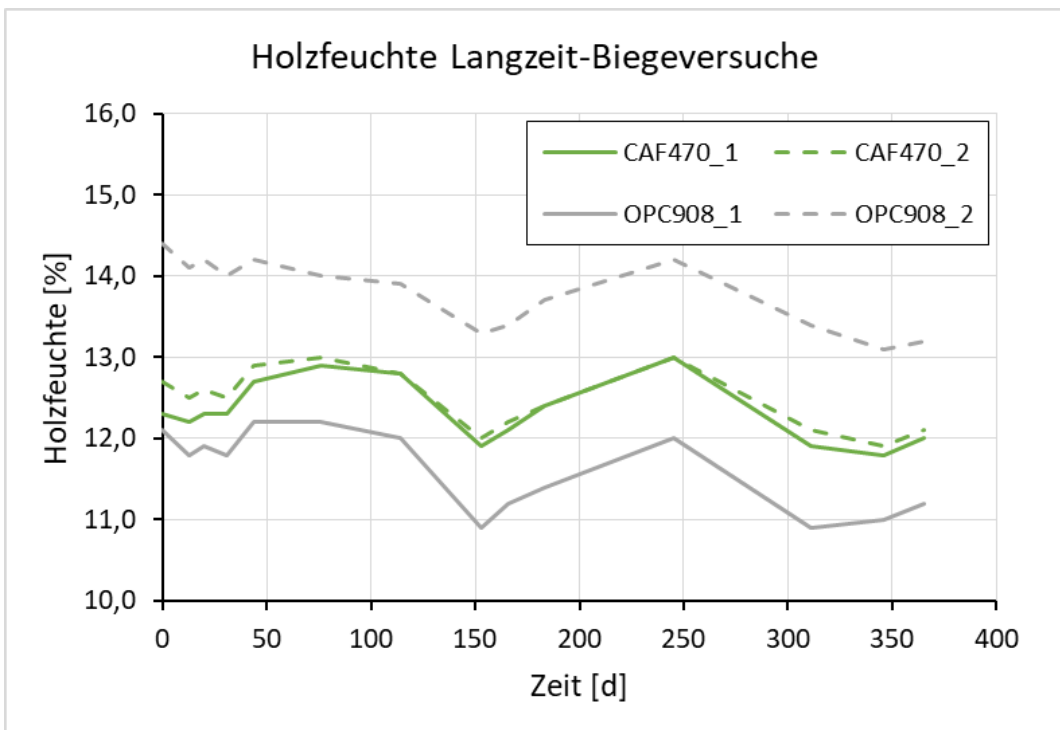
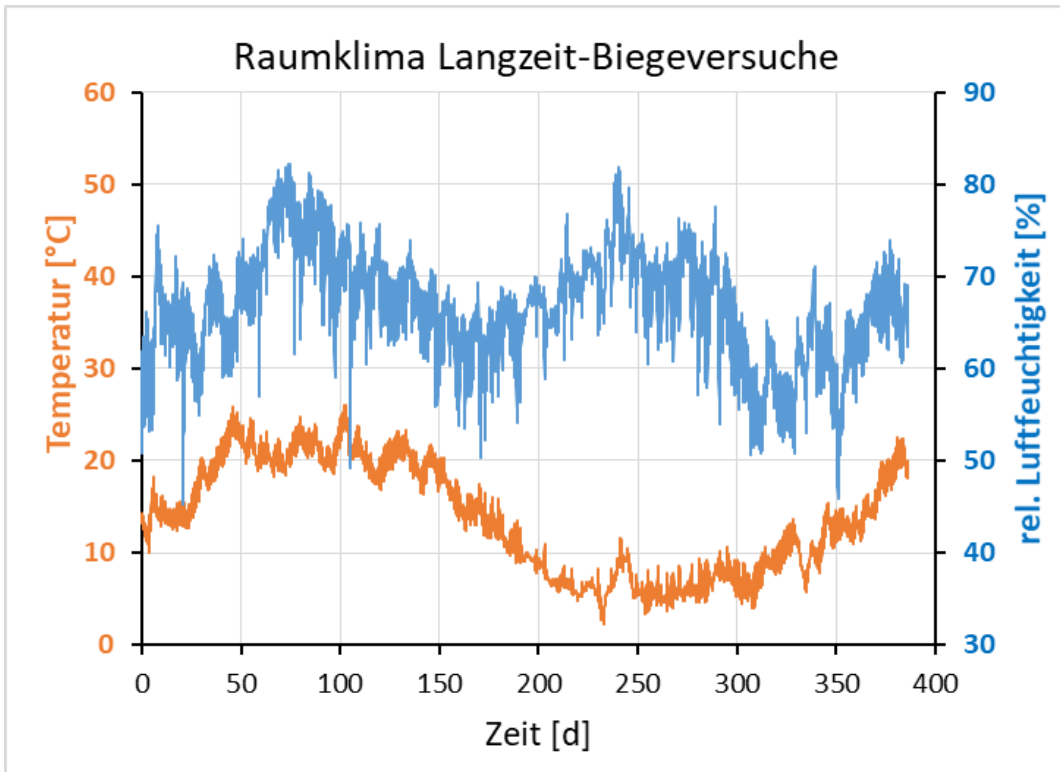


Anlage 3: Last-Verschiebungsdiagramme der Kurzzeit-Biegeversuche



Anlage 4: Weitere Messergebnisse der Langzeit-Biegeversuche





Anlage 5: Auflistung der Kooperationspartner aus der Wirtschaft

Brunthaler Holzbau GmbH & Co. KG,
Pfarrkirchener Str. 31, 84385 Eglham

Franken Maxit Mauermörtel GmbH & Co.
Azendorf 63, 95359 Kasendorf

Ausgeschiedene Kooperationspartner

-