

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

# ABSCHLUSSBERICHT

RUBIN-ISC – Regionale Unternehmerische Bündnisse  
für Innovation – Industriestandard Carbonbeton

Teilvorhaben III-a

Dresden, 30.06.2025

# ABSCHLUSSBERICHT

**Abkürzung:** RUBIN-ISC  
**Teilvorhaben:** III-a - Erarbeitung von  
Werkzeugen für die Planung  
und Dimensionierung von  
Carbonbetonbauteilen

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Dresden  
Institut für Massivbau  
Georg-Bähr-Straße 1  
01069 Dresden

Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Harald Michler  
Dipl.-Ing. Berk Gündogdu  
David Sandmann, M.Sc.  
Nazaib Ur Rehman, M.Sc.  
Dipl.-Ing. Lore Zierul

Förderkennzeichen: 03RU1U031C

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2022 – 31.12.2024

.....

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Direktor und Professor für Massivbau



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

# Inhaltsübersicht

1	Kurze Darstellung - Teilvorhaben.....	3
1.1	Aufgabenstellung .....	3
1.2	Durchführungsvoraussetzungen für das Vorhaben .....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	6
2	Eingehende Darstellung .....	8
2.1	Verwendung der Zuwendung .....	8
	Thema 1: Planung.....	8
	Thema 2: Herstellung .....	17
	Thema 4 Masterelement.....	25
	Thema 5 Entwicklung von Prototypen .....	25
	Thema 6 Controlling und Marketing .....	26
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	29
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	29
2.4	Voraussichtlicher Nutzen bzw. Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	29
	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten .....	29
	Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten .....	30
	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	31
2.5	Kenntnisse zu Fortschritten auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	31
2.6	Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	32
3	References.....	34
A	Ermittlung der Kurzzeitkennwerte bei Raumtemperatur und bei 60°C der nichtmetallischen Bewehrung (Carbonbewehrungsgitter).....	37
B	Ermittlung der Kurzzeitkennwerte bei Raumtemperatur und bei 60°C (J&G Formflechtstab).....	42
C	Nachweis der Dauerhaftigkeit bei 60°C (J&G Formflechtstab).....	50
D	Zeitabhängiges Verhalten auf Bauteilebene.....	56
E	Eigenschaften der verwendeten Betone.....	58
F	Datenblätter .....	60
G	Prüfbericht: Brandversuch zur Ermittlung des Feuerwiderstandes einer Carbonbetondecke	
H	Prüfbericht: Untersuchung der Medienbeständigkeit von Carbonbewehrungen	
I	Prüfbericht: Festigkeitswerte für CFK-Formgitter	
J	Berechnungsbeispiel: Carbonbetonwand mit Normalkraftbeanspruchung	

# 1 KURZE DARSTELLUNG - TEILVORHABEN

## 1.1 AUFGABENSTELLUNG

Angesichts der zunehmenden Forschungsaktivitäten und Realisierungen von Bauvorhaben mit Carbonbeton wird der Bedarf nach einem einheitlichen und normierten Vorgehen immer deutlicher. Die Schaffung verbindlicher Standards und Regelwerke stellt einen entscheidenden Schritt dar, um bestehende Anwendungshürden abzubauen und die breite Nutzung dieses Baustoffs zu erleichtern.

In der Praxis zeigt sich ein Mangel an systematischer Aufbereitung der Forschungserkenntnisse, um diese unmittelbar für Anwenderinnen und Anwender aus der Baupraxis nutzbar zu machen. Zudem machten die bisherigen Untersuchungen und Entwicklungen im Bereich der Carbonbetonbauweise zwar das erhebliche Potenzial des Materials deutlich, sie offenbarten jedoch auch an verschiedenen Stellen bestehende Wissensdefizite.

Vor diesem Hintergrund wurde das Gesamtprojekt Industriestandard Carbonbeton, kurz ISC, initiiert. Ziel war es, durch gezielte Erweiterung des bisherigen Wissensstandes vorhandene Forschungslücken zu schließen. Darüber hinaus sollten die erarbeiteten Ergebnisse in einem konsolidierten, praxisnahen Format aufbereitet und für die Anwendung im Bauwesen bereitgestellt werden.

## 1.2 DURCHFÜHRUNGSVORAUSSETZUNGEN FÜR DAS VORHABEN

Um Forschungslücken zu schließen werden seitens des Instituts für Massivbau (IMB) zahlreiche Versuche durchgeführt. Die Möglichkeit für diese Durchführung bietet das angegliederte Otto-Mohr-Labor, welches mit modernster Messtechnik und einer Vielzahl von Prüfmaschinen ausgestattet ist. Es wird bereits seit den 1990er Jahren an Textilbeton und Carbonbeton geforscht, und so konnte sich über viele Jahre ein großes Wissen und Erfahrungswerte im Bauen mit Carbonbeton etablieren. Die Materialkennwerte, die für das Forschungsvorhaben benötigt werden, konnten aufbauend auf den durchgeführten Versuchsreihen bereitgestellt werden. Das Aufbereiten der Ergebnisse in praxisnahe Formate erfolgt durch die wissenschaftlichen Mitarbeiter am Institut, da ein Wissenstransfer in Form von Lehre stattfindet.

## 1.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS

Im Arbeitsplan wird nach Arbeitspaketen in der Planung (AP 1) und Herstellung (AP 2) von Carbonbetonbauteilen unterschieden. Nachfolgend sind die vom IMB bearbeiteten Arbeitspakete aufgeführt.

- AP 1.1 Vordimensionierung
  - o Zusammenstellung einer Leitlinie zur Materialauswahl unter Berücksichtigung des Ist-Zustandes
  - o Erstellung eines Bauteilkataloges
  - o Zusammenstellung einer Leitlinie zur Vordimensionierung und Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG), sowie Betrachtung des Materialverhaltens für letztgenanntes
  - o Berücksichtigung des Bauzustandes
- AP 1.2 Nachhaltiges Entwerfen

- Entwurfsprinzipien hinsichtlich Materialausnutzung und Tragfähigkeit
  - Erarbeitung Leitlinie zum Schall-, Wärme-, Feuchte- und Brandschutz
- AP 1.5 Planungshilfen für Einbauteile
  - Erstellen von Planungshilfen für Verbindung- und Transportmittel
- AP 1.6 Ausführungs- und Detailplanung
  - Herstellung Probekörper zur Integration der TGA in Carbonbetonbauteilen
  - Erarbeiten von Leitlinien bezüglich zulässiger Toleranzen
- AP 2.1 Handlungsempfehlungen für die Herstellung von Bauteilen mit Carbonbewehrung
  - Für Fertigteile
  - Für Ortbetonteile
- AP 2.3 Erarbeiten von Qualitätsstandards
  - Für die Bewehrung
  - Für die Anwendungsgebiete
  - Hinsichtlich Eigen- und Fremdüberwachung
- AP 2.4 Formbewehrung
  - Prozessentwicklung
  - Beurteilung der Materialeigenschaften
  - Ausgewählte Bauteile: Dimensionierung, Bauteilversuche unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung
- AP 2.5 Herstellung von Fertigteilen und AP 2.6 Herstellung von Halbfertigteilen
  - Prüfen mechanischer Kennwerte
  - Auswertung der erreichten einheitlichen Standards
- AP 4.1 Erarbeitung eines Konzeptes für das Masterelement
  - Entwurf
  - Konstruktive Durchbildung
- AP 4.2 Erstellung des Masterelementes
  - Auswertung: Prüfen mechanischer Kennwerte
- AP 5.1 Entwicklung von Prototypen
  - Erarbeitung Lehrmaterial
  - Evaluierung der Planungshilfen für Carbonbeton
- AP 6.1 Bündnismanagement
  - Organisation des Bündnisses
  - Fortschreibung des Konzeptes
- AP 6.2 Workshops
  - Für potentielle Anwender und Kunden

## 1.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND

Die wissenschaftlichen Grundlagen zur Erforschung textiler Bewehrungssysteme wurden vor etwa zwei Jahrzehnten im Rahmen der beiden Sonderforschungsbereiche (SFB) der DFG (1999–2011) – SFB 528 [1] in Dresden und SFB 532 in Aachen – gelegt. Es konnten erste Forschungsergebnisse in der Baupraxis, unter Beteiligung zahlreicher Industriepartner realisiert werden. Im Zuge dieser Pilotprojekte wurden auch zahlreiche Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) beantragt und erfolgreich umgesetzt.

Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für weiterführende Untersuchungen, die schließlich zur Erteilung der ersten allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) für Anwendungen mit Textilbeton führten. In den letzten Jahren, insbesondere im Großprojekt C<sup>3</sup> [2] wurden die Materialkomponenten (Betonmatrix, textile Bewehrung und Verbund der beiden) intensiv untersucht. Ein großer Fortschritt des SFB 532 war die Entwicklung einer industriell hergestellten Fertigmischung, die als Sackware verfügbar ist und die Durchdringung der textilen Bewehrung bei hoher Festigkeit und Fließfähigkeit gewährleistet [3]. Im Forschungsprojekt C<sup>3</sup> wurden normal- und hochfeste Betone entwickelt, die anschließend an C<sup>3</sup>- Demonstratoren getestet wurden [4]. Aufgrund der nicht korrodierenden Carbonbewehrung konnte der Einsatz von Portlandzementklinker im hydraulischen Bindemittel im Vergleich zu herkömmlichen hochfesten Matrices deutlich reduziert (>300 kg/m<sup>3</sup>) werden.

Ein herausragender Vorteil der neuen Bauweise ist die korrosionsbeständige Bewehrung. In den beiden SFBs wurden vorrangig Fasern, Rovings und Gelege aus alkaliresistentem (AR) Glas untersucht, nachdem sich Werkstoffe wie Polypropylen (PP) und Polyvinylalkohol (PVA) aufgrund ihres geringen E-Moduls als weniger geeignet herausgestellt hatten [5]. Später folgten Untersuchungen an Bewehrung aus Carbonfasern, welche neben einer höheren Steifigkeit und einer höheren Festigkeit zudem eine klar erhöhte Dauerhaftigkeit in Betonen aufwies.

Neben der Optimierung textiler Bewehrungsmaterialien wurde die Forschung am Verbund zwischen Bewehrung und Betonmatrix enorm vorangetrieben. Dies beinhaltete die Entwicklung neuer Probekörper und Versuchsanordnungen, wobei insbesondere ein veränderter Versagensmechanismus in den Fokus trat. Die steiferen Eigenschaften der Tränkung führten dazu, dass es während des Auszuges der textilen Bewehrung zum Spalten des Betons kam. Dieses Phänomen wurde bspw. von [6–8] beobachtet. Durch Anpassung der Versuchsaufbauten wurde versucht, die Kennwertermittlung von diesem Einfluss zu befreien. Des Weiteren konnte an Carbonstäben mithilfe experimenteller Untersuchungen in [9] und in [10] gezeigt werden, dass die Oberflächenprofilierung und das Oberflächenmaterial einen maßgeblichen Einfluss auf das Verbundtragverhalten haben. Anhand der Ergebnisse wurde eine Vorzugsvariante gewählt, welche es in Zukunft näher zu erforschen gilt. Weitere Entwicklungen zur Verbesserung des Verbundverhaltens gab es im Bereich der Materialtränkungen.

Standardisierte Verfahren zu Kennwertermittlung insbesondere im Hinblick auf das Verbundverhalten von Carbonbeton spielen eine wichtige Rolle zum Erlangen von ZiE und abZ. Ein Überblick über verschiedene experimentelle und theoretische Verfahren zur Prüfung des Tragverhaltens im Bereich der bemessungsrelevanten Detailpunkte von Endverankerungs- und Übergreifungsbereichen ist in [11] und in [12] gegeben.

Exemplarisch für den Neubau aus Carbonbeton soll hier auf den Bau zweier schiefwinkliger Straßenbrücken aus Carbonbeton eingegangen werden, in dessen Vorfeld statische und zyklische Versuche an Plattenstreifen mit C-förmiger Querkraftbewehrung an der RWTH Aachen University durchgeführt wurden. Es zeigt die praxisnahen Anwendungsmöglichkeiten auch abseits von filigranen Einzelanwendungen [13]. Außerdem wurden Versuche an großformatigen I-Trägern mit gemischter Bewehrung aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) und Textilbewehrung durchgeführt [14].

Im Großprojekt C<sup>3</sup> wurden Versuche zum Brandverhalten von Carbonbeton sowie Untersuchungen des Materialverhaltens von Carbonbeton unter Hochtemperaturbeanspruchung vorgenommen [15].

Es zeigte sich, dass Zug- und Verbundfestigkeit mit steigender Temperatur abnehmen, da die Tränkung der Carbonfasern beim Überschreiten der Glasübergangstemperatur erweicht.

## **1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN**

Für die Realisierung des Vorhabens hat sich ein Konsortium aus Planenden und Ausführenden gefunden. Hervorzuheben ist das Arbeiten mit assoziierten Partnern, die kontinuierlich über die Projektlaufzeit dem Forschungsvorhaben beitreten konnten. Die Zusammenarbeit mit dem IMB betreffend sind die Firmen Wilhelm Kneitz Solutions in Textile GmbH, solidian GmbH und Schöck Bauteile GmbH zu nennen, die bei zahlreichen Meetings zu einem wertvollen Austausch beitrugen. Durch die gute Zusammenarbeit mit der FOLAB GmbH konnten wir die Untersuchungen mit faseroptischen Sensoren durchführen. Mit Hilfe der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) konnten die Brandversuche an groß- und kleinformatischen Carbonbetonbauteilen durchgeführt werden. Dank des C<sup>3</sup>-Verbandes konnte eine Ergebnisaufbereitung während der Projektlaufzeit unter anderem durch die Organisation der Carbonbetontage und hilfreiche Schulungen erfolgen. Das Bewerben des vom IMB durchgeführten Workshops gelang ebenfalls erfolgreich mit Hilfe der Plattform des Verbandes.

Ein fortlaufender Dialog über Erfahrungen, Fachkenntnisse und Lösungswege konnte durch die regelmäßigen Projekttreffen digital sowie in Präsenz bei verschiedenen Bündnispartnern gewährleistet werden. Diese Treffen sorgten zudem dafür, dass ein Verständnis der Tätigkeiten und mögliche Realisierungen im Rahmen des Projekts von dem gastgebenden Bündnispartner übermittelt wurden. Die intensive Arbeit zur Erstellung des Arbeitspapiers, welches die Grundlage für zukünftige Anwender darstellt, wurde in Fachgruppen besprochen.

Im Thema Planung gab es neben dem monatlichen Projekttreffen die Fachgruppen Vordimensionierung, nachhaltiges Entwerfen, Arbeitsvorbereitung, Digitalisierung, Planungshilfe für Einbauteile und Ausführungs- sowie Detailplanung. Hervorzuheben ist die Zusammenarbeit mit Kahnt & Tietze GmbH, welche die zeichnerische Umsetzung auf Grundlage der vom IMB vorgelegten konstruktiven Durchbildung, in Form von Leitdetails realisierte. Für die Erstellung einer Planungshilfe für Einbauteile wurde sich intensiv mit SFP Planungsgesellschaft mbH, PohlCon GmbH und Johne & Groß GmbH ausgetauscht. Die Entwicklung von Einbauteilen verknüpfte die Fachgruppe mit der Fachgruppe Formbewehrung. Intensive Arbeit zwischen dem IMB und Johne & Groß GmbH führten zu den Untersuchungen der Transportanker. Die Ergebnisdarstellung erfolgte mit intensiver Zusammenarbeit durch die CARBOCON GMBH, insbesondere bei dem Arbeitspapier Planung. Ebenfalls monatliche Meetings führten hier zu einem kontinuierlichen Erfahrungsaustausch und einer anwenderfreundlichen Aufbereitung der Inhalte.

Für das Thema Herstellung gab es ebenfalls monatliche Projekttreffen und die Fachgruppen Ausführung, Qualitätssicherung und Bewehrung. Bei der Ausführung konnte von der Vielfalt der im Bündnis vertretenen Unternehmen profitiert werden. Einblicke in wichtige Voraussetzungen für die Herstellung im Fertigteilwerk konnten vom Betonwerk Oschatz GmbH und informbeton GmbH gewonnen werden. B.T. innovation GmbH lieferte Möglichkeiten für das Verbinden von Carbonbetonbauteilen durch BT-Spannschlösser und verschiedenste Fugenbänder. SFP Planungsgesellschaft mbH gab Einblicke, welche Details aus planerischer Sicht bei der Herstellung zu beachten sind und das Institut für Baubetrieb konnte mit der Erstellung eines Ausschreibungstools eine wichtige Voraussetzung für den

anwendungsfreundlichen Carbonbeton schaffen. Dieses Zusammenspiel konnte zur erfolgreichen Herstellung zweier Masterelemente führen. Das Masterelement Hochbau wurde maßgeblich durch das IMB mitgestaltet und das Masterelement Hochbau auf seine Tragfähigkeit untersucht. In der Fachgruppe Qualitätssicherung wurden die Erkenntnisse aus Lagesicherungsversuchen mit der CARBOCON GMBH zusammen vorbereitet und mit solidian GmbH, dem Betonwerk Oschatz GmbH, Kahnt & Tietze GmbH, HfB Engineering GmbH, Institut für Baubetrieb und SFP Planungsgesellschaft mbH ausgewertet. Treffen in der Fachgruppe Bewehrung führten zu wertvollen Erkenntnissen zwischen CARBOCON GMBH, Johne & Groß GmbH und dem IMB.

Der letzte thematische Block im Forschungsprojekt war die Multifunktionalität. Monatliche Treffen mit dem Forschungs- und Transferzentrum e.V. an der HTWK Leipzig und der DENKweit GmbH führten zu Angaben, die bereits bei der Planung zu berücksichtigen sind und wurden in Diskussion mit dem IMB und der CARBOCON GMBH aufbereitet und in die beiden Arbeitspapiere Planung und Herstellung integriert.

Insgesamt hat das Konsortium sehr eng zusammengearbeitet und alle Arbeitsschritte in intensiven Diskussionen abgestimmt. Darüber hinaus gab es mit vielen assoziierten Partnern und auch externen Interessierten eine produktive Zusammenarbeit.

Eines der zentralen und praxisrelevantesten Ergebnisse aus dem Projekt „ISC“ ist die Einbindung von Erkenntnissen in die neu erstellte und inzwischen veröffentlichten Richtlinie „Betonbauteile mit nicht-metallischer Bewehrung“ [16] des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb). Aktuell wird intensiv an der 2. Fassung dieser Richtlinie mit erweitertem Anwendungsgebiet und Regelungen gearbeitet. Auch dort werden die Erkenntnisse in regelmäßigen Sitzungen der Arbeitsgruppen und des gesamten Unterausschusses „Nichtmetallische Bewehrung“ eingebracht. Die Überführung der Erkenntnisse in eine Richtlinie bzw. Norm stellt einen der höchsten Grade an Transfer dar, da durch die Richtlinie die Anwendbarkeit der Ergebnisse für alle Beteiligten im Bauwesen verbindlich geregelt ist.

## 2 EINGEHENDE DARSTELLUNG

### 2.1 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG

Nachfolgend werden ausgewählte Erkenntnisse und Ergebnisse aus dem Projekt aufgezeigt und beschrieben. Der Großteil der Projektergebnisse ist in [17–19] sowie weiteren Publikationen veröffentlicht.

#### **THEMA 1: PLANUNG**

##### **AP 1.1 VORDIMENSIONIERUNG**

###### **AS 1.1.1 Erarbeiten von Leitlinien zur Materialauswahl**

Um die Materialauswahl für Planer und Anwender zu erleichtern, wurden für die Carbonbetonbauweise Empfehlungen für geeignete Betone, Bewehrungselemente sowie Materialkombinationen im Arbeitspapier Planung [17] (kurz: AP Planung) des ISC-Bündnisses zusammengestellt. Weiterhin wird dort detailliert auf ergänzende Informationen und Randbedingungen, wie die Verbundeigenschaften in Abhängigkeit des Tränkungsmaterials, Biegesteifigkeitsklassen oder Kosten, eingegangen. Weitere Details sind [17] zu entnehmen.

Speziell für Formbewehrungselemente sind zusätzliche Angaben im Arbeitspapier Herstellung [18] (kurz: AP Herstellung) enthalten. Dazu gehören beispielsweise Randbedingungen wie der Biegerollendurchmesser und Erwärmungszeiten bei nachträglicher Umformung. Die Vielfalt des Materials und Kriterien, die es bei der Materialwahl zu beachten gilt, wurden in [20] veröffentlicht.

###### **AS 1.1.2 Erstellung eines Bauteilkataloges**

In AS 1.1.2 wurde speziell für die Carbonbetonbauweise ein Bauteilkatalog aufgestellt. Die Bauteile spiegeln das Potential des Baustoffs Carbonbeton wider. Dazu gehören vor allem Elemente mit aufgelösten und Hohlkörper-Querschnitten, Sandwichbauteile, Konstruktionen aus Teilquerschnitten oder gekrümmte Elemente. Der Bauteilkatalog resultiert in Leitanwendungen für die Carbonbetonbauweise, um in der Praxis größere Einsatzgebiete zu erschließen.

Der Bauteilkatalog ist in [19], Anlage 1.1 aufgeführt.

Der Bauteilkatalog wird auch im AP Planung [17] und AP Herstellung [18] aufgegriffen, beispielsweise um Empfehlungen für die Herstellung, Anschlussdetails oder die Bemessung weiter zu erläutern.

### **AS 1.1.3 Erarbeiten von Leitlinien zur Vordimensionierung und Bemessung im GZT**

Zwischenziele:

- Belastungen ermitteln
- Beispiele aus Bauteilkatalog (A 1.1.2.2) aufbereiten
- Vordimensionierung für biegebeanspruchtes Bauteil unter Berücksichtigung verschiedener Materialien
- Vordimensionierung für querkraftbeanspruchte Bauteile anhand eines Beispiels
- Bemessungsbeispiel für torsionsbeanspruchtes Bauteil
- Bemessungsbeispiel für normalbeanspruchtes Bauteil

#### Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

Es wurden relevante Belastungen auf Beispielbauteile aufgebracht und diese nach dem derzeitigen Stand der Technik [16] nachgewiesen. Daraus wurden Empfehlungen für die Vordimensionierung dieser Bauteile erarbeitet.

Die Vordimensionierung konnte anhand von Diagrammen für die notwendige Bewehrungsmenge in Abhängigkeit der Spannweite in [19], Anlage 2.1 anschaulich aufbereitet werden. Für die Vordimensionierung querkraftbeanspruchter Bauteile konnten Diagramme für verschiedene Schubschlankheiten in Abhängigkeit des Widerstandsmomentes und der Bauteilhöhe, wie in [19], Anlage 2.2 zu sehen, dargestellt werden. In Anlage J dieses Berichtes ist ein Berechnungsbeispiel für ein normalkraftbeanspruchtes Bauteil enthalten.

Das Ergebnis mit der größten Praxisrelevanz ist das Masterelement Hochbau, welches mit Beispielrechnungen seitens des IMB hergestellt werden konnte. Der Herstellungsbericht wurde in Anlage 7.1 maßgeblich vom IMB mitgestaltet, und eine Bemessung ist in [19], Anlage 7.2 zu finden. Zudem konnte die Bemessung des Masterelements Fußgängerbrücke durch Versuchsdurchführung im Otto-Mohr-Laboratorium des IMB überprüft werden. Der Bericht hierzu ist in [19], Anlage 8.4 enthalten.

Darüber hinaus ergaben sich die nachfolgenden Anwendungsgrenzen, die mit weiterer Forschungsarbeit erweitert werden können. Die Anwendungsgrenzen wurden als Hinweise in den Arbeitspapieren aufgenommen und daraus Empfehlungen für Planende entwickelt.

- Die Vordimensionierung benötigt durch die Vielfalt des Materials Carbonbewehrung umfangreichere Studien mit Iteration der Dehnungsebene;
- Die Vordimensionierung muss anders gedacht werden, da die Vorteile der Carbonbewehrung in dünnwandigen Querschnitten liegen, hier aber bisher die Vordimensionierung aus dem Stahlbeton nicht ausreichend untersucht ist;
- Torsionsbeanspruchung nur für sehr geringe Exzentrizitäten geregelt;
- Die Planung und Bemessung für Carbonbetonbauteile unter Normalkraftbeanspruchung erfordert weitere Untersuchungen und genormte Vorgaben. Dies betrifft vor allem das Modellstützenverfahren, für dessen Anwendung im Carbonbetonbau aktuell keine normativen Regelungen existieren.

#### **AS 1.1.4 Erarbeiten von Leitlinien zur Vordimensionierung und Bemessung im GZG**

##### Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

Es wurden relevante Belastungssituationen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) für Bauteile aus Carbonbeton zusammengestellt.

Aus der Analyse der aktuellen Datenbasis im Kontext des GZG wurden noch offene Fragestellungen für die Bemessung und Normung zusammengestellt:

- Möglichkeit der direkten Verformungsberechnung.
- Einfluss des Betonschwindens auf das Rissbildungsverhalten.
- Verbundspannungsverteilung in Zwischenrisselementen.
- Ermittlung des Völligkeitsbeiwert  $\beta_t$  bzw.  $k_t$  zur Berücksichtigung der Auswirkung langandauernder Zugbeanspruchung auf das Rissbildungsverhalten.
- Spannungsumlagerungen im Querschnitt bei gemischt bewehrten Bauteilen.

Die erforderlichen Nachweise im GZG zur Begrenzung von Spannungen, Rissweiten und Durchbiegungen wurden übersichtlich in Berechnungen zusammengestellt und erläutert.

Die Ergebnisse von AS 1.1.4 werden in [19], Anlage 2.7 veröffentlicht.

#### **AS 1.1.5 Betrachtung des Materialverhaltens von Carbonbeton im GZG**

Zwischenziele:

- Versuchsaufbauten für kleinteilige Versuche und Bauteilversuche
- Standardisierung handhabbarer Versuche
- Ermittlung Rissbreiten und Rissabstände zweier Materialkombinationen

##### Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

Als Basis wurden bisher durchgeführte Versuche an Carbonbeton mit Schnittstellen zur Untersuchung des Verhaltens unter Gebrauchslasten ausgewertet. Dies betrifft vor allem Zugversuche an Carbonbeton, bei denen das Rissbildungsverhalten aufgezeichnet wurde, sowie großformatige Bauteilversuche, die Hinweise auf das Durchbiegungsverhalten geben. Die Datenbank wurde den im Projekt durchgeführten Untersuchungen zugrunde gelegt, um basierend auf den Auswertungen weitere Erkenntnisse zu gewinnen.

Alle experimentellen Untersuchungen wurden anhand standardisierter Prüfaufbauten durchgeführt, die in die DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ [16] eingeflossen und dort aufbereitet sind. Die detaillierten Aufbauten und Randbedingungen der in den nachfolgenden Tabellen gelisteten Versuche sind [16] zu entnehmen. Das Rissbildungsverhalten wurde mittels digitaler Bildkorrelation (DIC; Englisch: digital image correlation) erfasst. Detailliertere Informationen zur Beanspruchung der Bewehrung auch zwischen den Rissen kann jedoch nur durch faseroptische Sensoren (DFOS; Englisch: distributed fiber optic sensors) gewonnen werden. Diese wurde daher intensiv in den experimentellen Untersuchungen eingesetzt.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Versuchsdatenbank wurde ein Versuchsprogramm an kleinformatigen Probekörpern aufgestellt, s. Tabelle 1.

Tabelle 1: Versuchsprogramm kleinformatige Probekörper GZG.

Serie	Anzahl PK	Bewehrung	Beton	Details
DK 1	5	HTC21/21-80	Pagel TF 10	Variation des Referenzbetons
DK 2	6	HTC21/21-80	C50/60	Prüfung nach 7 Tagen; Erfassung der Verbundfestigkeitsentwicklung sowie von Unterschieden im Rissbildungsverhalten bei frühzeitiger Lastaufbringung
DK 3	6	HTC21/21-80	C50/60	Verhalten nach 28 Tagen

Die Auswertemethodik mit DFOS und DIC für das Versuchsprogramm in Tabelle 1 ist exemplarisch in Abbildung 1 für einen Probekörper der Serie DK 2 dargestellt. Dort wurde aus dem Messbereich der DFOS ein mittlerer Rissabstand von 105,7 mm ermittelt.

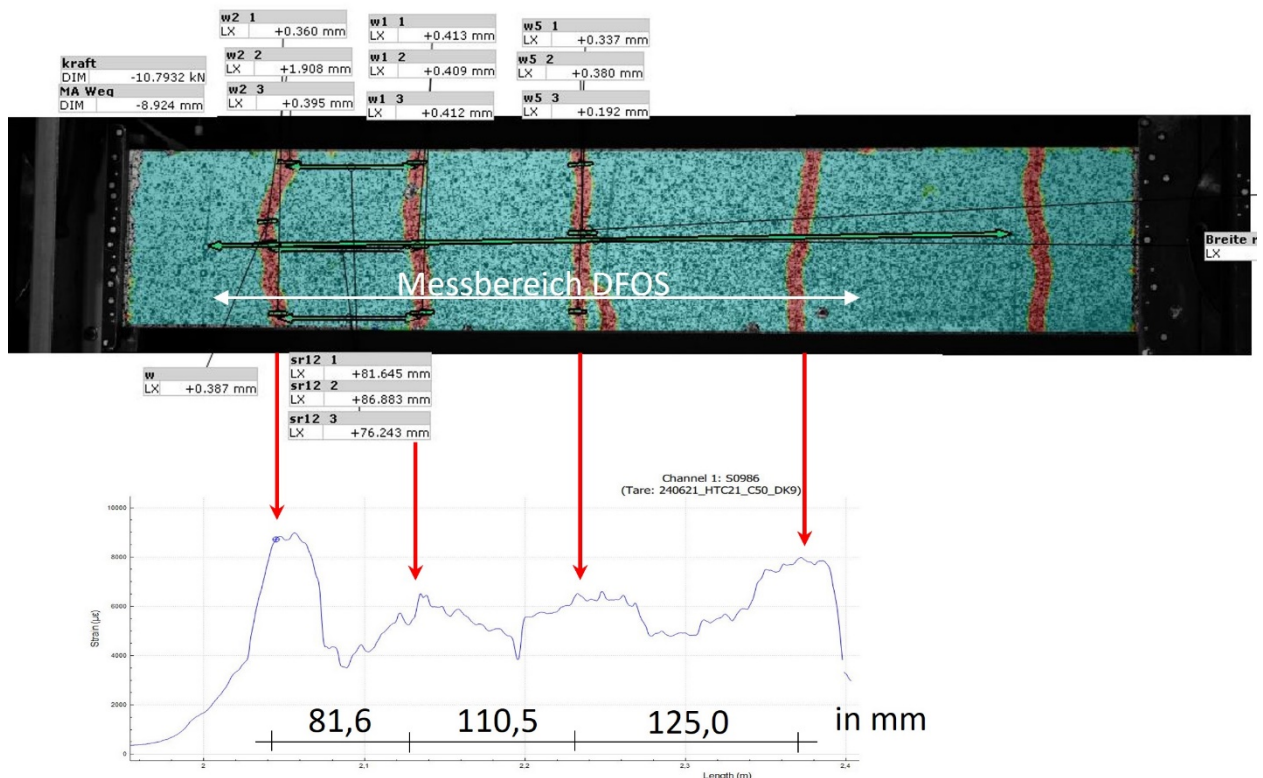


Abbildung 1: Analyse des Rissverhaltens von Carbonbeton mit DFOS und DIC an einem Probekörper.

Darüber hinaus wurden zwei Versuchsprogramme an großformatigen Bauteilen zur Beurteilung des Materialverhaltens im GZG aufgestellt. Versuchsprogramm 1 beinhaltet Balken aus Carbonbeton. Dies ist in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Versuchsprogramm Großbauteile 1 – Balken aus Carbonbeton.

Serie	Anzahl PK	Bewehrung	Beton	Details
B 1	3 (B1-B3)	3D NetzGT-6	C50/60	LR <sup>1</sup> des NetzGT <sup>2</sup> enthält 6 Garne.
B 2	3 (B4-B6)	3D NetzGT-10	C50/60	LR <sup>1</sup> des NetzGT <sup>2</sup> enthält 6 Garne.
B 3	3 (B7-B9)	2D HTC21/21-80	C50/60	Nachträglich umgeformtes 2D-Gitter mit Zulage aus 2 Bewehrungsstäben in der Zugzone

<sup>1</sup> LR = Längsroving; aus mehreren Garnen bestehender Zugstrang in der Zugzone des Netz-GT

<sup>2</sup> NetzGT = Balken mit 3D-Bewehrung in Form eines Netzgitterträgers

Details und Ergebnisse der Balkenversuche sind in [19], Anlage 9.7 aufgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen Carbonbeton-Balken sind zudem in [21] veröffentlicht.

Im Versuchsprogramm 2 wurden Platten aus Carbonbeton untersucht. Das zugehörige Versuchsprogramm ist in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Versuchsprogramm Großbauteile 2 – Deckenplatten aus Carbonbeton.

Serie	Anzahl PK	Bewehrung	Beton	Details
P 1	2	P1-1: 3D NetzGT-10 P1-2: 2D HTC21/21-80	C50/60	Geometrie L/B/H = 5,00/1,00/0,27 m
P 2	2	3D NetzGT-10; SITGrid E0125; SITGrid 0053 P	C50/60	Geometrie L/B/H = 5,40/2,30/0,27 m
P 3	4	3D NetzGT-10; SITGrid E0125; SITGrid 0053 P	C50/60	Betrachtung der Querkraft-Rissbildung

Die Ergebnisse der Untersuchungen des Bauteilverhaltens der Carbonbeton-Deckenplatten auf Gebrauchslastniveau sind in [22] veröffentlicht. Die Bauteile wurden intensiv mit konventioneller Messtechnik ausgestattet und zudem wurde die Messung mit innovativer faseroptischer Sensorik aufgezeichnet und ausgewertet.

Übergeordnet sind die Erkenntnisse zum Verhalten von Carbonbeton im GZG in Modellen zur rechnerischen Nachweisführung zusammengestellt und im AP Planung [17] bzw. in [19], Anlage 2.1 enthalten. Weiterhin fließen die Versuchsergebnisse und Modelle in die Erweiterung und 2. Fassung der DAfStb-RiLi NMB ein, die sich aktuell in Bearbeitung befindet.

#### AS 1.1.6 Erarbeiten von Leitlinien zur Berücksichtigung für den Bauzustand

Es wird auf AS 1.5.1 verwiesen, in dem Ausführungen zum Bauzustand berücksichtigt wurden.

## **AP 1.2 NACHHALTIGES ENTWERFEN**

### **AS 1.2.1 Entwicklung von Entwurfsprinzipien für den Werkstoff Carbonbeton**

Zwischenziele:

- Ausnutzungsgrade für Beton und Bewehrungsmittel feststellen
- Anpassung des Ausnutzungsgrades, wenn ökologisch und ökonomisch nicht ausgenutzt sind  
-> Kooperation mit Institut für Baubetriebswesen (IBB) der TU Dresden

Grundlegende Entwurfsprinzipien wurden im Arbeitspapier Planung erarbeitet. Hierbei wird auf die Verwendung von dünnwandigen Bauteilen, die Wiederverwertbarkeit, Demontierbarkeit und den Brandschutz eingegangen. Auch an dieser Stelle wird auf Anlage 2.1 in [19] verwiesen, da auf den Entwurf mehrlagig bewehrter Bauteile eingegangen wird. Das Masterelement Hochbau, speziell das Hohlkörperdeckensystem diente als Grundlage für eine Ökobilanzierung. Die Ergebnisse sind in Anlage 7.4 zu finden [19].

#### Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

Die Entwicklung von Entwurfsprinzipien ist durch die bisherige Bemessung mit Betrachtung der Dehnungsebene ein iterativer Prozess und zudem materialabhängig. Die Entwurfsprinzipien von Carbonbeton sind vielschichtiger als für Stahlbeton.

### **AS 1.2.3 Erarbeitung von Leitlinien zum Schall-, Wärme-, Feuchte und Brandschutz**

Im AS 1.2.3 wurde die Schutzwirkung von Brandschutzmaßnahmen für die unter hohen Temperaturen gefährdeten Carbonbetonbauteile experimentell untersucht. Dazu wurden Hohlkörper-Deckenplatten aus Carbonbeton geplant und analog den großformatigen experimentellen Untersuchungen unter Kurzzeit- und Normaltemperaturbeanspruchung dimensioniert, um die Vergleichbarkeit der Bauteile untereinander und die Übertragbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

Die Ergebnisse dieser großformatigen experimentellen Untersuchungen sind in einem umfangreichen Versuchsbericht (Anlage G) detailliert ausgeführt. Es konnte für die dünnen Teilquerschnitte der Hohlkörper-Deckenplatten unter Belastung und gleichzeitiger, direkter Brandbeanspruchung eine Brandschutzdauer von bis zu 30 Minuten erzielt werden. Dabei wurde eine nur 2 mm dünnen Schicht aus einem aufschäumenden Brandschutzanstrich sowie eine zusätzliche Prüflast von 60 kN aufgebracht. Die hohe Belastung bei minimaler Brandschutzmaßnahme lässt somit auf ein noch enormes Potential hinsichtlich des Brandschutzes schließen.

Die Erkenntnisse wurden in wichtigen Leitlinien, vor allem in Verbindung mit Absprachen gegenüber Fachplanern für Baumaßnahmen, im AP Planung [17] zusammengestellt.

## **AP 1.5 PLANUNGSHILFEN FÜR EINBAUTEILE**

### **AS 1.5.1 Erarbeiten von Planungshilfen für die Anwendung von Einbauteilen zur Verbindung von Carbonbetonelementen**

Zwischenziele:

- Marktanalyse vorhandener Verbindungsmittel im Carbonbeton
- Ermittlung relevanter Kennwerte wie Schub- und Auszugskraft
- Entwicklung Versuchsaufbau
- Versuchsdurchführung und Dokumentation
- Aufbereitung für Planungshilfe

#### Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

Es wurden Glasfaserbewehrungspins für die Verwendung in Doppelwänden und Carbonbewehrungen in Fugen untersucht. Maßgebliche Erkenntnisse waren unter anderem:

- Die aufnehmbare Kraft hängt maßgeblich von der Einbindetiefe der Verbindung ab;
- Maßgebend für die Beanspruchung wird der Transportzustand, da ein geringes Alter des Betons bei der Verwendung im Fertigteil vorliegt;
- Die Tragfähigkeit der Verbindungsmittel quer zur Faser ist für nichtmetallische Bewehrung deutlich geringer als die Zugfestigkeit in Längsrichtung, wird jedoch für die Anwendung beim Transport nicht maßgebend.

Die Ergebnisse stützen sich auf Untersuchungen, die in [19], Anlage 5.5 enthalten sowie in [23], [24] und [25] veröffentlicht sind.

### **AS 1.5.2 Erarbeiten von Planungshilfen für die Anwendung von Einbauteilen den Transport von Carbonbetonelementen**

Zwischenziele:

Experimentelle Untersuchung von Verstiftungen, Verbindungsmitteln und Transportankern in textillbewehrten Carbonbetonplatten:

- Ermittlung relevanter Kennwerte, wie Schub- und Auszugskraft,
- Dokumentation der entwickelten Versuchsaufbauten sowie Prüfergebnisse,
- Aufbereitung für Planungshilfe.

#### **Testung von Verbindungsmitteln**

Die experimentelle Untersuchung wurde initiiert, um eine bestehende Wissenslücke bei der Anwendung von Verbindungsmitteln und Transportankern in dünnen Carbonbetonbauteilen zu schließen. Während das Tragverhalten von Befestigungsmitteln in konventionellen Stahlbetonkonstruktionen umfassend erforscht ist, existierten bislang keine systematischen Erkenntnisse über nichtmetallische Verbindungsmittel in Carbonbeton-Elementen mit stark reduzierten Bauteildicken.

Im Rahmen der Untersuchung wurden drei grundlegend verschiedene Befestigungstechniken für den

Carbonstab C4R von Action Composite Technology Limited systematisch getestet: im Frischbeton eingebaute Verbindungsmittel (cast-in-place), nachträglich eingeklebte Verbindungsmittel in vorgefertigte Hohlräume sowie nachträglich eingebohrte und eingeklebte Verbindungsmittel wie in Abbildung 2 zu sehen. Da Transportanker und Verbindungsmittel in Carbonbetonbauteilen bislang ohne ausreichende experimentelle Grundlagen eingesetzt wurden, zielte die Untersuchung darauf ab, grundlegende Materialkennwerte und Tragfähigkeitsparameter experimentell zu bestimmen und Bemessungsgrundlagen zu entwickeln.

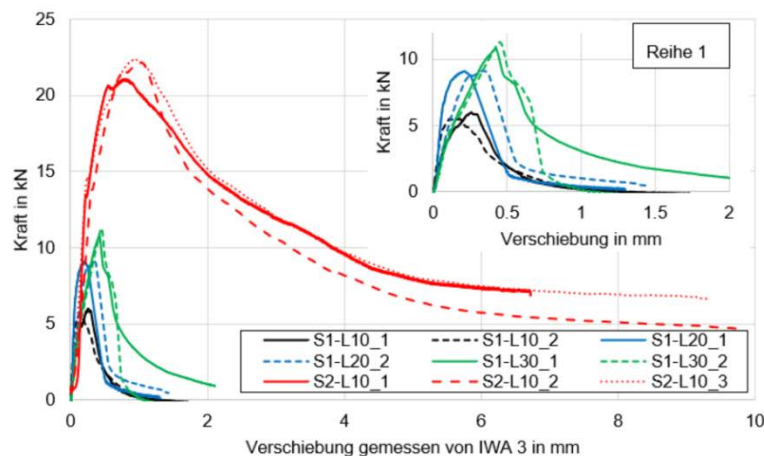


Abbildung 2: Herstellung Prüfkörper - Einbringen von Bohrungen für Verbindungsmittel.

#### Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

- Unbewehrte Betonplatten versagten durch spröden Spaltbruch, Betonplatten mit textiler Carbonbewehrung zeigten duktilen Ausziehversagen,
- Carbondtextilverstärkung erhöhte die Maximalkraft um 253% (6,22 kN auf 22 kN) ,
- Progressive Tragfähigkeitssteigerung mit der Einbindelänge: 54% bei Verdopplung (10 → 20 cm), 87% bei Verdreifachung (10 → 30 cm),
- Textilverstärkung wirkte als Rissüberbrückung und verhinderte Spaltversagen,
- Sichere Anwendung von Transportankern in 4 cm dünnen CRC-Bauteilen bei textiler Carbonbewehrung nachgewiesen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen von Verstiftungen in Bauteilen mit textiler Carbonbewehrung sind in [19] und [23] veröffentlicht.

#### **Testung der Transportanker**

Die experimentellen Untersuchungen von Transportankern aus umgeformten Carbonflechtstäben (CFS) wurden durchgeführt, um eine praktische Lösung für den Transport und die Handhabung von Carbonbeton-Fertigteilen zu entwickeln, da geeignete korrosionsbeständige Alternativen zu konventionellen Stahlhaken fehlten. Wie beispielhaft in Abbildung 3 zu sehen, wurden systematisch drei Va-

rianten getestet: 2D-Transportanker 1. Generation (manuell gefertigt), 2D-Transportanker 2. Generation (maschinell gefertigt) und 3D-Transportanker mit aus der Ebene herausragenden Ankerfüßen, um die Verankerungsgeometrie zu optimieren und grundlegende Tragfähigkeitswerte für verschiedene Ankergeometrien und Betonalter zu ermitteln.

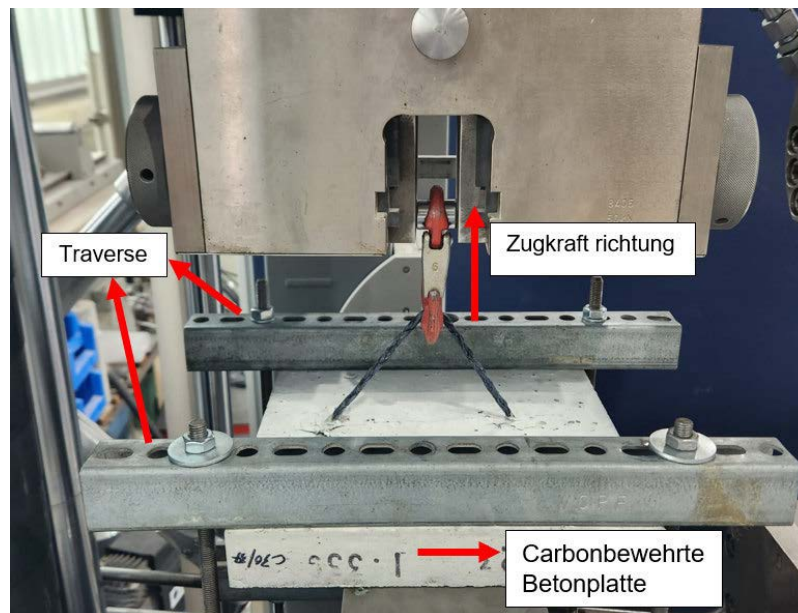


Abbildung 3: Testaufbau zum Testen der Transportanker.

#### Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

- Alle Transportanker versagten durch Ausziehen oder Betonbruch ohne Beschädigung des Carbonflechtstabs,
- 3D-Transportanker zeigten ca. 50% höhere Tragfähigkeit (11,3 kN) gegenüber 2D-Ankern (7,6-8,5 kN),
- Längere Aushärtungszeiten führten zu deutlich höheren Tragfähigkeiten: Steigerung von 6 kN (1 Tag) auf 11,3 kN (7 Tage),
- Transportanker ohne Betondeckung erreichten höhere Tragfähigkeiten (8 kN) als solche mit 2 cm Überdeckung (5,3-5,5 kN),
- Erfolgreiche Entwicklung korrosionsbeständiger Transportanker für CRC-Fertigteile mit ausreichender Tragfähigkeit nachgewiesen.

Die Ergebnisse zur Herstellung und Untersuchung der Transportanker sind in [19] und [26] veröffentlicht.

## **AP 1.6 PLANUNGSHILFEN FÜR EINBAUTEILE**

### **AS 1.6.4 Entwicklung von Handlungsempfehlungen zur Integration der TGA in Carbonbetonbauteile als Halbfertigteile und Fertigteile**

Zur Beurteilung von Möglichkeiten, Carbonbetonbauteile zur Integration von Technischer Gebäudeausstattung (TGA) nachträglich zu bearbeiten, wurden Probekörper für die Aktivität 1.6.4.3 hergestellt. In Kooperation mit dem IBB wurde ein umfangreicher Versuchsplan erarbeitet, entsprechend dem die notwendige Anzahl an Probekörpern durch das IMB hergestellt wurden.

Die wichtigsten erreichten wissenschaftlich-technische Ergebnisse sind in [18] und [19] aufgeführt.

### **AS 1.6.5 Erarbeiten von Leitlinien bezüglich der zulässigen Toleranzen**

Zwischenziele:

Feststellen der wesentlichen Parameter, die einen Einfluss auf das Einhalten von Lagetoleranzen haben.

#### Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

Im Ergebnis wurde festgestellt, dass folgende Parameter einen Einfluss auf das Einhalten von Lagetoleranzen der Carbonbewehrung haben:

- Anzahl der Abstandshalter je m<sup>2</sup>;
- Form der Abstandshalter (linear oder punktförmig gestützt);
- Steifigkeit des Carbongitters;
- Fließfähigkeit des verwendeten Betons;
- Abstand der Platzierung zum Rand des Bauteils;
- Anzahl der Bewehrungslage.

## **THEMA 2: HERSTELLUNG**

### **AP 2.1 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR DIE HERSTELLUNG VON BAUTEILEN MIT CARBONBEWEHRUNG**

#### **AS 2.1.2 + AS 2.1.3 Erarbeitung einer standardisierten Handlungsempfehlung für die Herstellung von Bauteilen mit Carbonbewehrung – Fertigteile, Halbfertigteile und Ortbeton**

Zwischenziele:

- Festlegung der Untersuchungsparameter in Zusammenarbeit mit anderen Bündnispartnern
- Untersuchung und Auswertung fünf Parameter

#### Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

Es wurden insgesamt 24 Platten mit den oben genannten Parametern untersucht und es konnten Handlungsempfehlungen in das Arbeitspapier Planung [17], Herstellung [18] und in die [19], Anlage 6.3 einfließen. Die Ergebnisse sind zudem in [27] zusammengestellt.

Für das Verwenden von Carbonbewehrung im Kontext des Ortbetons wird auf besondere Sorgsamkeit bei der Herstellung hingewiesen, da diese anders als Stahlbewehrung nicht betretbar ist. Es muss mit Montagegerüsten gearbeitet werden.

In einem ergänzenden Versuch wurde die chemische Beständigkeit der Carbonbewehrung gegenüber typischen Medien untersucht, die im Rahmen von Ortbetonarbeiten oder im Fertigteilwerk freigesetzt werden können und mit der Bewehrung in Kontakt kommen. Parallel dazu wurde der Einfluss verschiedener Lager- und Transportformen – konkret als Mattenware und Rollenware – auf die mechanischen Eigenschaften analysiert.

### Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

Die Ergebnisse zeigen, dass weder die getesteten chemischen Medien noch die Art der Lagerung oder des Transports einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Bewehrung hatten solange diese im vom Hersteller vorgegebenen Rahmen liegen. Um den Verbund im Beton sicherstellen zu können, müssen die Bewehrungselemente frei von Staub, Fetten und anderen Verunreinigungen sein. Die Ergebnisse sind in die Handlungsempfehlungen zur Lagerung und dem Einbau in [18] eingeflossen.

## **AP 2.3 QUALITÄTSSTANDARDS**

### **AS 2.3.2 Erarbeiten von Qualitätsstandards – Bewehrung**

Die experimentellen Untersuchungen wurden durchgeführt, um Einbaubedingungen und zulässige Behandlungsverfahren für Carbonbewehrung zu definieren. Folgende kritische Parameter wurden systematisch untersucht: Einfluss des Krümmungsradius beim aufgerollt gelagerten Bewehrungsmaterial, chemischer Einfluss verschiedener Medien, und Einflüsse durch mechanische Schädigung.

#### Einbaubedingungen und Behandlungsverbote

Die Bewehrung muss frei von verbundmindernden Verunreinigungen (Fett, Erdreich, Betonreste, Staub) sowie von Welligkeiten, Garnbruch und Ausfaserungen sein. Der minimale Krümmungsradius ist einzuhalten und eine Lagesicherung während des Betonierens ist erforderlich. Verboten sind das Betreten/Befahren der Bewehrung, plastische Verformungen, Unterschreitung des Krümmungsradius sowie mechanische Säuberung mit Drahtbürsten.

#### Die wichtigsten wissenschaftlichen Erkenntnisse:

- Bewehrung muss frei von verbundmindernden Verunreinigungen (Fett, Erdreich, Betonreste, Staub) sowie von Welligkeiten, Garnbruch und Ausfaserungen sein,
- Minimaler vom Bewehrungshersteller vorgegebener Krümmungsradius (Transportrolle) ist einzuhalten, und Lagesicherung während des Betonierens ist erforderlich,
- Die untersuchten chemischen Lösungsmittel oder anorganische/organische Flüssigkeiten (z.B. Schalöl, Diesel) haben keinen nennenswerten Einfluss auf die Zugfestigkeit der Bewehrung, wirken aber verbundmindernd und müssen daher restlos entfernt werden,
- Bestimmung der Tragfähigkeitsreduktion durch unsachgemäße mechanische Belastung.

Siehe auch Arbeitspapier Herstellung [18], Abschnitt 2.3.3, Abschnitt 2.3.4 und Anlage H (Medienbeständigkeitsversuche).

### **AS 2.3.3 Erarbeiten von Qualitätsstandards – Anwendungsgebiete**

Zwischenziele:

- Untersuchung von Einwirkungen auf Carbonbetonbauteile,
- Durchführung einer kleinen Versuchsserie zur experimentellen Bewertung der Einflüsse auf die Material-, Trag- und Dauerhaftigkeitseigenschaften.

#### Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

Der Einfluss der herstellungsbedingten Lagetoleranzen der Carbonbewehrung wurde in [27] analysiert und bewertet. Weiterhin ist je nach Anwendungsbereich eine ausreichende Medienbeständigkeit von Relevanz. Dazu wurde eine kleine Versuchsreihe durchgeführt. Um eine ausreichende Dauerhaftigkeit der Carbonbetonelemente zu bestätigen, wurden mehrere kleinere Versuchsreihen an mit Gittern und Stäben bewehrten Betonprobekörpern durchgeführt.

#### **AS 2.3.4 Erarbeiten von Qualitätsstandards – EÜ und FÜ der Produktion und der Bauausführung**

Zwischenziele:

- Beantwortung der Fragen, die in Form von Eigenüberwachung (EÜ)- und Fremdüberwachung (FÜ) auftreten,
- Empfehlungen für Versuche, die die EÜ oder FÜ sicherstellen,
- Entwicklung von Vorgaben hinsichtlich der Inhalte, die für die EÜ oder FÜ notwendig sind.

#### Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

In Anlehnung an Vorgaben aus bisherigen Baumaßnahmen und Zustimmungen im Einzelfall für Carbonbeton-Bauteile wurden in AS 2.3.2 Empfehlungen für durchzuführende Überwachungsmaßnahmen aufgestellt. Die durchzuführenden Versuche und zu ermittelnden Kennwerte sind in [17] zusammengestellt. Zusätzlich wird in [18] auf besonders zu beachtende Parameter eingegangen, bspw. Maß- und Lagetoleranzen, es werden Hinweise zur Ausführungskontrolle gegeben und die Vorgaben für Qualitätsstandards mit aktuell bestehenden Vorgaben aus Regelwerken verknüpft. Die Anwendung der Empfehlungen wird in [19], Anlage 4.2 anhand eines praxisnahen Beispiels gezeigt.

Detaillierte Ausführungen zum AS 2.3.4 sind in [17–19] enthalten.

#### **AS 2.3.5 + 2.3.6 Erarbeiten von Qualitätsstandards, Arbeits- und Gesundheitsschutz, Recycling**

Die Versuchsobjekte aus Carbonbeton wurden in Anlehnung an das Masterelement konzipiert und hergestellt. Ausgangspunkt war die Aktivität 2.3.5.2, in der gemeinsam mit dem Institut für Baubetriebswesen (IBB) erste Versuchskörper zur Beurteilung des Arbeits- und Gesundheitsschutzes beim Bauen mit Carbonbetonbauteilen sowie zur Erarbeitung von Qualitätsstandards entwickelt wurden. Aufbauend darauf erfolgte im Rahmen der Aktivitäten 2.3.5.3 und 2.3.6.4 die Herstellung und Untersuchung von Versuchsobjekten zur Bewertung von Abbruchverfahren und Recyclingmöglichkeiten. Alle Aktivitäten wurden in enger Zusammenarbeit mit dem IBB durchgeführt.

Tabelle 4: Tabellarische Zusammenfassung der Versuchsergebnisse zum Recyclingprozess.

<b>Bewehrungs- material</b>	<b>Geometrie</b>	<b>Betonfestigkeit</b>	<b>Bruchgröße</b>	<b>Ergebnis</b>
Carbon (J&G Flechtstab)	Stabförmig, Ø 4,2 mm	C30/37	10–45 mm (grob)	Sehr starker Verbund, Separation un- zureichend wegen geringem Auf- schluss
Carbon (HTC 21/21-80)	Gitterförmig	C30/37	0–10 mm (fein)	Hoher Feinanteil < 2 mm, kameraba- sierte Sortierung gestört, Siebung sinnvoll
Basalt (Basalt- stab rebar)	Stabförmig, Ø 8 mm	C30/37	10–45 mm (grob)	Stäbe zu lang für effektive Separation, Trennquote < 75 %, bessere Aufberei- tung nötig

Darüber hinaus wurden folgende wesentliche Ergebnisse erzielt:

- Carbonbeton-Abbruchmaterial fiel bislang nahezu ausschließlich im Rahmen von Forschungsprojekten an; Bauwerke mit Erreichen des End-of-Life existieren noch nicht.
- Derzeit fehlen einheitliche Recyclingwege; Reststoffe werden meist deponiert oder thermisch verwertet.
- Konventionelle Abbruchverfahren gemäß DIN 18007 erwiesen sich grundsätzlich als anwendbar.
- Die Deponierung von Carbonfasern ist stark eingeschränkt, ebenso deren thermische Verwertung in regulären Anlagen (wegen Leitfähigkeit).
- Kamerabasierte Sortierung zeigte mit bis zu 98 % die höchste Effizienz, jedoch Einschränkungen bei Feinanteilen < 2 mm.
- Aufbereitungstechnologien wie Pyrolyse und Solvolyse gelten als etabliert, werden jedoch bislang selten wirtschaftlich eingesetzt.
- Ein optimaler Recyclingprozess wurde auf Basis aktueller Erkenntnisse entworfen.

## **AP 2.4 FORMBEWEHRUNG**

### **AS 2.4.1 Prozessentwicklung für vorgeformter Bewehrung im Carbonbeton**

Zunächst wurde eine DMA-Analyse durchgeführt (vgl. Anhang K: Bericht DMA-Analyse), um die ideale Umformtemperatur für die thermoplastisch getränkte flächige Bewehrung festzulegen.

Zur grundlegenden Charakterisierung des unverformten Materials wurden anschließend Zug- und Verbundversuche bei Raumtemperatur und basierend auf den Ergebnissen der DMA Analyse, bei 60°C durchgeführt. Der geplante Versuchsaufbau und ein Ingenieurmodell zur Bemessung wurde auf den 15. Carbon- und Textilbetontagen 2023 vorgestellt [28] sowie in [29] veröffentlicht.

## **Wichtigste wissenschaftliche Ergebnisse:**

Die Glasübergangstemperatur  $T_g$  beider untersuchten Bewehrungsproben betrug etwa 120°C und lag damit deutlich oberhalb der Anwendungstemperatur der Bewehrung, sowie der für die Versuche relevanten maximalen Temperatur von 60 bis 80°C.

## **AP 2.4 FORMBEWEHRUNG**

### **AS 2.4.2 Beurteilung der Materialeigenschaften der Formbewehrung am Bewehrungselement**

#### **Grundcharakterisierung, Bestimmung des Einflusses der Temperatur und Langzeitverhalten unter Dauerlast der nichtmetallischen Bewehrung mit thermoplastischer Matrix**

Zur grundlegenden Charakterisierung des unverformten Materials wurden Zug- und Verbundversuche bei unterschiedlichen Temperaturen geplant. Zunächst wurden Kurzzeitversuche an der Stab- und Mattenbewehrung durchgeführt. Diese dienten als Referenzversuche für die später folgenden Langzeitversuche zur Ermittlung eines zeitabhängigen Abminderungsfaktors der nichtmetallischen Bewehrung. Einen Einblick in mögliche Formbewehrung gibt [20].

#### Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

##### **Grundcharakterisierung des unverformten Bewehrungsmaterials**

Für flächige und stabförmige Bewehrungselemente wurden jeweils Zug- und Verbundversuche am nicht umgeformten Material durchgeführt. Ziel war es, grundlegende mechanische Kennwerte zu ermitteln. Hierbei wurde ein geeigneter Beton ausgewählt, welcher in nachfolgenden Arbeitspaketen für die Herstellung der Prototypen und in Bauteilen für Bauteilversuche eingesetzt wurde.

Die Zugversuche an flächiger und stabförmiger Bewehrung zeigten eine lineare elastische Spannungs-Dehnungs-Beziehung bis zum Versagen ohne signifikante plastische Deformation, typisch für Faser-verbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix. Der charakteristische Wert der Zugfestigkeit lag in Abhängigkeit von der Tränkungsqualität und der Faserorientierung im Bereich von 2400 bis 2600 MPa bei flächiger Bewehrung und 2500 bis 2600 MPa bei stabförmiger Bewehrung. Die Ergebnisse sind in den Anhängen A und B ausführlich dargestellt.

##### **Einfluss der Temperatur auf das Materialverhalten**

Die mechanischen Eigenschaften der thermoplastischen Matrix sind stark temperaturabhängig. Zur Quantifizierung dieses Effekts wurden temperaturabhängige Zug- und Verbundversuche durchgeführt. Der Fokus lag auf praxisrelevanten Temperaturbereichen entsprechend realer Einsatzszenarien im Bauwesen. Eine signifikante temperaturabhängige Zugfestigkeitsabnahme war nicht feststellbar. Die Ergebnisse sind in den Anhängen A und B ausführlich dargestellt.

Die Verbundversuche zeigten ein temperaturabhängiges Verhalten bei flächiger und stabförmiger Bewehrung. Besonders der Formflechtstab (FFS) wies bei erhöhten Temperaturen eine deutliche Reduktion der Verbundkennwerte auf – mit bis zu 25 % Abfall der maximalen Verbundspannung bei ca.

60 °C. Die textile Bewehrung reagierte moderater, mit einem Rückgang von etwa 5 %. Ursache ist die Erweichung der thermoplastischen Matrix, die den Formschluss im Verbundbereich schwächt.

### **Langzeitverhalten unter Dauerlast**

Während der Projektlaufzeit wurden Dauerstandversuche zur Ermittlung des Dauerzug- und Dauerverbundverhaltens an Carbonbewehrungsgittern und Carbonbewehrungsstäben an je einem Beispielmaterial durchgeführt. Dabei wurden dieselben Materialien aus den vorangegangenen Kurzzeitversuchen verwendet.

Bei den Bewehrungsgittern zeigte sich unter Dauerzugbeanspruchung keine nennenswerte Schädigung durch Temperatureinwirkung im beheizten Wasserbad. Die Probekörper überdauerten die vorgesehenen Prüfzeiten ohne Versagen, und die anschließende Restfestigkeitsprüfung ergab teilweise höhere Werte als die Kurzzeitversuche. Die degressiven Zeit-Verformungs-Kurven deuteten auf ein sich einstellendes Verformungsverhalten ohne kritische Materialschädigung hin, wodurch ein Abminderungsfaktor von 73% der charakteristischen Kurzzeitfestigkeit ermittelt werden konnte.

Im Gegensatz dazu wiesen die Dauerverbundversuche der Bewehrungsgitter progressive Zeit-Verformungs-Verläufe und vorzeitiges Versagen der Langzeitprobekörper auf. Beide Phänomene stellen Indikatoren für kritisches Materialversagen dar. Da jedoch deutlich höhere Verbundspannungen als zulassungskonform untersucht wurden, konnte gefolgert werden, dass für Zulassungsversuche der Dauerverbundfestigkeit ein aufwendigeres Prüfprogramm mit Zeit-Temperatur-Verschiebung erforderlich ist, welches Versuche bei verschiedenen Temperaturen voraussetzt, um das Langzeit-Auszugverhalten konservativ zu bestimmen. Die Ergebnisse sind in [30] zusammengefasst.

Ein vergleichbares Verhalten bezüglich der Dauerzug- und Verbundeigenschaften zeigte sich auch beim Formflechtstab. Die Ergebnisse sind in Anlage 50C ausführlich dargestellt.

### **Betrachtung des Einflusses der Umformbarkeit auf die Festigkeit**

Zur Bestimmung des Einflusses einer Umformung von flächigen und stabförmigen Bewehrungselemente auf deren Materialeigenschaften wurde ein geeigneter Versuchsaufbau entwickelt. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 4 zu sehen. Mit diesem, an Yarn-Pull-Out (YPO) angelehnten, Versuchsaufbau war es möglich, verschiedenste Prüfparametervariationen zu untersuchen. Folgende Prüfparameter konnten dabei angepasst werden:

- Biegerollendurchmesser
- Vorverankerungslänge (Bereich der Last zugewandten Seite vor der Umformung)
- Nachverankerungslänge (Bereich der Last abgewandten Seite nach der Umformung)
- Umformwinkel
- Bewehrungstyp

Während der Auszugversuche wurden verschiedene Größen messtechnisch erfasst:

- Bewehrungseinzug
- Bewehrungsauszug
- Maschinenkraft

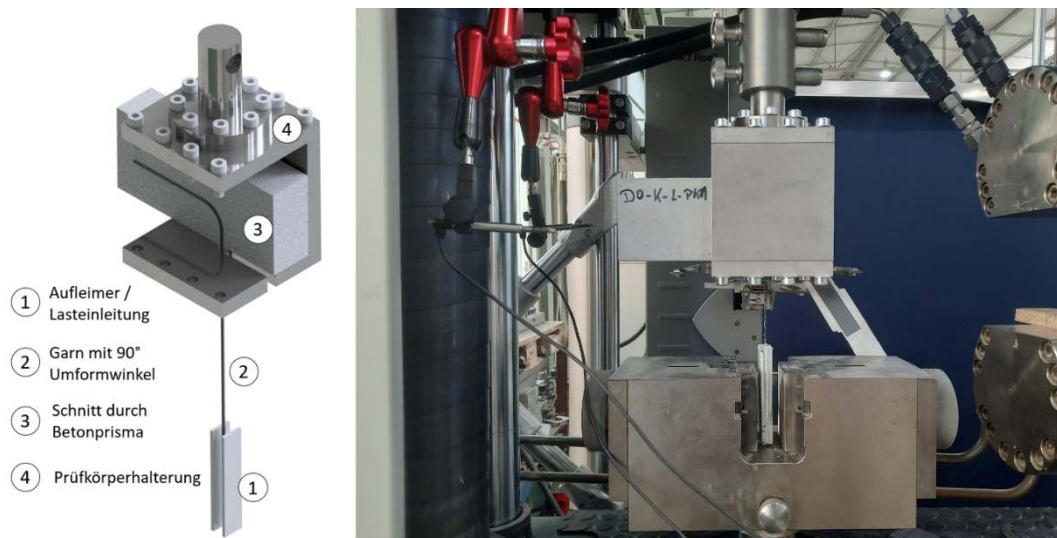


Abbildung 4: Entwickelter Prüfaufbau für die Prüfung von umgeformten Bewehrungen.

Die wichtigsten wissenschaftlichen Erkenntnisse:

- Die Vorverankerung hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Tragfähigkeit des gesamten Verbundbereichs der Formbewehrung,
- Mit steigendem Biegerollendurchmesser steigt die mechanische Tragfähigkeit der Bewehrung im Umformbereich,
- Eine Erhöhung der Nachverankerung über 10 mm hat keinen Einfluss auf die aufnehmbare Last im Umformbereich (nur gültig für HTC 21/21-80 mit Biegerollendurchmesser 30 mm).

Die Ergebnisse des Arbeitspakets sind in Anlage 5.6 aus [19], in Anlage I dieses Berichtes und in [31] detailliert dargestellt.

### AS 2.4.3 Beurteilung der Formbewehrung an ausgewählten Bauteilen

Der Versuchsaufbau für die experimentelle Untersuchung von Hohlkörperbalken mit 3D-Textilbewehrung im Vier-Punkt-Biegeversuch ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt.

Zwischenziele:

- Vergleich händische mit serieller Fertigung
- Anwendungsgrenzen - Bestimmung der geometrischen Komplexitätsgrenzen für die vorgestellten Fertigungsverfahren
- Systematische Untersuchung der strukturellen Unterschiede

In der experimentellen Studie wurde das Tragverhalten von Hohlkörperbalken (HKB) aus Carbonbeton mit verschiedenen 3D-Textilbewehrungstypen untersucht. Es wurde die, für das Masterelement festgelegte Betonmischung verwendet. Die Bewehrung bestand aus 2D-Textilgitterbewehrung (HTC 21/21-80) in den Flanschen und trapezförmiger 3D-Bewehrung in den Stegen. Drei verschiedene 3D-

Bewehrungstypen kamen zum Einsatz: Typ 0 mit einem einzelnen Carbonroving und 6 kantenüberlappenden Rovingsträngen, Typ 1 mit doppeltem Roving und 10 kantenüberlappenden Rovingsträngen sowie Typ 2, der durch thermo-mechanische Verformung eines 2D-Textilgitters hergestellt wurde.

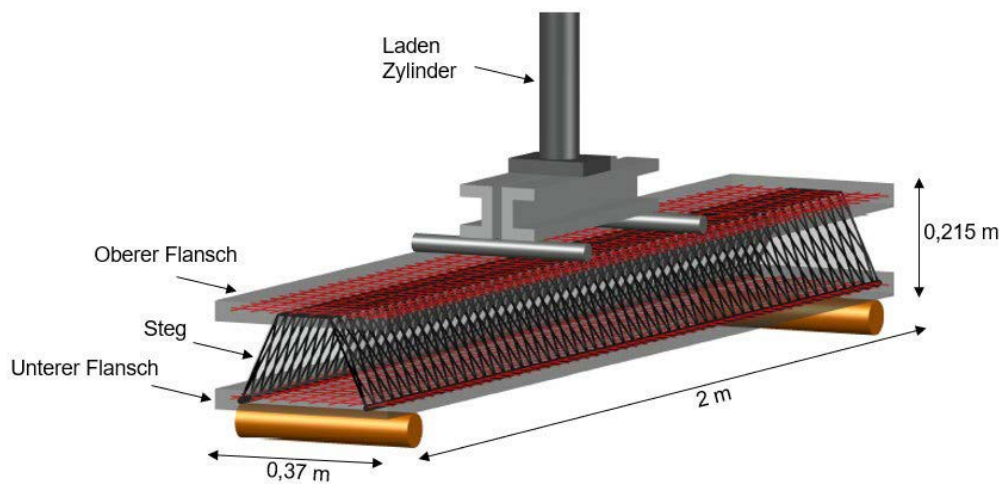


Abbildung 5: Entwickelter Versuchsaufbau des Vier-Punkt-Biegeversuchs für die Bauteilversuche (schematisch).

Die wichtigsten wissenschaftlichen Erkenntnisse:

- Balken mit 3D-Bewehrung Typ 0 und Typ 1 versagten hauptsächlich durch Biegung
- Typ 1 erreichte aufgrund größerer Bewehrungsfläche höhere Momenten Tragfähigkeiten (90-121 kN vs. 82-117 kN bei Typ 0)
- Balken mit kleineren a/d-Verhältnissen zeigten größere Kräfte bei Erstriss
- Typ 2-Balken versagten durch Querkraftversagen bei deutlich niedrigeren Lasten (48,5-62,5 kN)
- Hohe Querkraftkapazität der 3D-Bewehrung in den Stegen bestätigt
- Experimentelle und analytische Werte bei Typ 0 nahezu identisch
- Bei Typ 1 durchschnittlicher Unterschied von 24 % zwischen Experiment und Analyse, was auf unvollständige Aktivierung der zusätzlichen Bewehrungsfläche hindeutet

Die Versuchsergebnisse sind in Anlage 9.7 aus [19] detailliert dargestellt.

Weiterführend wurde Formbewehrung ebenfalls in den Masterelementen Hochbau und Brückenbau eingesetzt. Die Ergebnisse und Interpretation des Masterelementes Hochbau sind in [22], die des Masterelementes Brückenbau in [19], Anlage 8 zusammengestellt.

**AP 2.5 UND AP 2.6 HERSTELLUNG VON FERTIGTEILEN UND HALBFERTIGTEILEN**

In AP 2.5 und 2.6 wurden die hergestellten Halbfertigteile und Fertigteile aus Carbonbeton sowie die entwickelten Prototypen in speziell entwickelten Versuchsaufbauten experimentell untersucht und das Tragverhalten analysiert.

Die Prototypen sind in [18] zusammengestellt. Die Ergebnisse und Auswertungen der experimentellen Untersuchungen an den Prototypen sind in [19], Anlagen 3, 5 und 9 sowie in [21] und [26] enthalten.

Weiterhin wurde das Tragverhalten von Halbfertigteilen und Fertigteilen an balken- und plattenartigen Elementen experimentell untersucht. Die Ergebnisse und Auswertungen sind in [19], Anlagen 7, 8 und 9 sowie in [22] zusammengestellt.

## **THEMA 4      MASTERELEMENT**

### **AP 4.1   ERARBEITUNG EINES KONZEPTES FÜR DAS MASTERELEMENT**

#### **AS 4.1.1 und AS 4.1.2 Entwurf und konstruktive Durchbildung des Masterelementes nach den ausgearbeiteten Entwurfsprinzipien**

Aufbauend auf dem durchgeführten Workshop zum Masterelement wurden zwei Strategien für Masterelemente mit finalen Entwürfen angefertigt. Ein Masterelement fokussiert den Hochbau aus Carbonbeton, ein weiteres den Brückenbau.

Ein ausführlicher Bericht mit dem Entwurf, Detailplanung, Bemessung und Plänen ist in [19], Anlage 7 sowie [32] enthalten. Für das Masterelement Brückenbau ist dies in [19], Anlage 8 zusammengestellt.

### **AP 4.2   ERSTELLUNG DES MASTERELEMENTES**

#### **AS 4.2.1 Auswertung**

Aufbauend auf AP 4.1 wurde die Konstruktion der Masterelemente Hochbau und Brückenbau experimentell untersucht und ausgewertet. Die Ergebnisse und Interpretation des Masterelementes Hochbau sind in [21, 22, 26], die des Masterelementes Brückenbau in [19], Anlage 8 zusammengestellt.

## **THEMA 5      ENTWICKLUNG VON PROTOTYPEN**

### **AP 5.1   PLANUNG – WEITERBILDUNG**

#### **A 5.1.2 Erarbeitung des Lehrmaterials für die Schulungen und Weiterbildungen im Bereich der Planung und Berechnung von Carbonbetonkonstruktionen**

Die Aufbereitung von Bemessungsbeispielen wurde in enger Kooperation mit CARBOCON GMBH in monatlichen Meetings besprochen. Des Weiteren wurden für die Teilnehmer des Workshops „Planung von Carbonbetonbauteilen“ Unterlagen zur Verfügung gestellt.

#### Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

- Anschauliche Schemata helfen für das Verständnis komplexer Sachverhalte
- Bemessungstabellen für Ingenieure sind eine Hilfe für tägliche Berechnungen
- Umfangreiche Berechnungstabellen in Excel wurden für die Vordimensionierung, Bemessung im GZT und GZG erstellt

Die Bemessungshilfen sind in [19], Anlage 2.3 zu finden. Diese wurden umfangreich im Rahmen von Bemessungsbeispielen auf der Weiterbildung für Tragwerksplanung der TU Darmstadt [33] vorgestellt und erläutert.

## THEMA 6 CONTROLLING UND MARKETING

### AP 6.1 BÜNDNISMANAGEMENT

#### AS 6.1.1 Bündnisorganisation

Zwischenziele:

- Schnittstellen zu Anschlussvorhaben schaffen
- Argumente für stärkere Nutzung von Carbonbeton bei gleichzeitiger kritischer Bewertung
- Verstetigung der Forschungs- und Entwicklungsleistungen

#### Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

Die Bündnisorganisation wurde in Form von regelmäßigen, zusätzlichen Projekttreffen umgesetzt. Dabei wurden Zwischenstände aller Partner sowie des gesamten Konsortiums präsentiert und diskutiert sowie das weitere Vorgehen kontinuierlich gemeinsam festgelegt. Zudem wurden die Möglichkeiten des Otto-Mohr-Laboratoriums des IMB zur Versuchsdurchführung durch eine Führung und Workshop mit den Projektpartnern aufgezeigt. Die komplexen, partnerübergreifenden experimentellen Untersuchungen wurden dort gemeinsam diskutiert und Lösungsmöglichkeiten für die Prototypen, Masterelemente und weitere Versuche erarbeitet.



Abbildung 6: Teilnehmer des Projekttreffens im 12/2023.



Abbildung 7: Besuch des Otto-Mohr-Labors.

Die im Bündnis erarbeiteten Produkte und Bauteile werden in ein Technology Readiness Level (TRL) eingeordnet und die Einordnung erfolgt in die Themenbereiche des Vorhabens (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Technology Readiness Level der untersuchten Bewehrungsprodukte und Bauteile.

TRL	Bewehrungsprodukt/ Bauteil	Erläuterung und Einordnung in Themenbereiche des Vorhabens
6	Transportanker	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prototyp in Einsatzumgebung, da der Bündnispartner Betonwerk Oschatz GmbH diese Transportanker für das Herstellen von Fertigteilen verwendet</li> <li>- Themenbereich Planung: Bemessung für Transportzustände der Hohlkörperträger und -decken, Berücksichtigung der Anker in Ausführungszeichnungen</li> <li>- Themenbereich Herstellung: Transportanker als Formbewehrung in verschiedenen Geometrien hergestellt, Berücksichtigung des Biegerollendurchmessers</li> </ul>
6/5	Verstiftungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prototyp in Einsatzumgebung, da herkömmliche Bewehrungsprodukte dafür verwendet werden können/ Versuchsaufbau in Einsatzumgebung, da Parameter wie Einbindelänge hinsichtlich Tragfähigkeit im Projekt untersucht wurden</li> <li>- Themenbereich Planung: Bemessung für Transportzustände, Betrachtung nachhaltiges Entwerfen durch Demontierbarkeit, Berücksichtigung als Einbauteil hinsichtlich Kontaktkorrosion</li> <li>- Themenbereich Herstellung: Erstellung von Handlungsempfehlungen für die Verwendung von Fertigteilen und Ortbetonteilen</li> </ul>
5	Masterelement Hochbau	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Versuchsaufbau in Einsatzumgebung, da das Masterelement den Beanspruchungen aus Wind und Schnee auf dem Gelände des Betonwerk Oschatz ausgesetzt ist und als Ecke im Hochbau einen realen Anwendungsfall darstellt</li> <li>- Themenbereich Planung: Nachweise im GZT und GZG, konstruktive Durchbildung von carbonbewehrten Betonbauteilen, Vorversuche am Netzgitterträger für eine materialeffiziente Ausnutzung</li> <li>- Themenbereich Herstellung: Verwendung von Transportankern und 3D-Bewehrung im Netzgitterträger, Realisierung von assemblierten Carbonbetonbauteilen, Zusammenarbeit vieler Partner und Verwendung multifunktionaler Fassade</li> </ul>
4	Masterelement Fußgängerbrücke	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Versuchsaufbau im Labor, da Testen der Tragfähigkeit im Labor erfolgte, allerdings kein Bauteil außerhalb der Laborhallen realer Belastung ausgesetzt wurde</li> <li>- Themenbereich Planung: Nachweise im GZT und GZG, konstruktive Durchbildung von carbonbewehrten Betonbauteilen, Versuchsplanung</li> <li>- Themenbereich Herstellung: Verwendung von Transportankern und nachträglich umgeformter Bewehrung (Gitterkörbe)</li> </ul>

## AP 6.2 WORKSHOPS

### AS 6.2.1 Workshops für zukünftige Kunden

Zwischenziele:

- Aufbereitung der Forschungsergebnisse für Anwender und das Konsortium
- Ausstellungsstücke, Tagungs- und Informationsmaterial erarbeiten
- Organisation von drei öffentlichkeitswirksamen Workshops, je ein Workshop je Projektjahr.

Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

- Bauweise bei Planern und Ausführenden in der Baubranche erläutert und diese so vorangebracht;
- Großes Interesse durch mehr als 40 Teilnehmerinnen und Teilnehmern am Workshop „Planen von Carbonbetonbauteilen“;
- Anerkennung des Workshops von der Architekten- und Ingenieurkammer für die Teilnehmenden;
- Bekanntheit des Bündnisses und der Carbonbetonbauweise für zukünftige Kooperationen vergrößert.



Abbildung 8: Sicht auf Teilnehmer während des Workshops 2024.



Abbildung 9: Ausstellerstand der informbeton GmbH beim Workshop 2024.

## **2.2 WICHTIGSTE POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES**

Der zahlenmäßige Nachweis für den Zeitraum vom 01.01.2022 bis zum 31.12.2024 erfolgt gesondert mit den dazugehörigen Unterlagen.

## **2.3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT**

Das Teilvorhaben RUBIN-ISC-III-a war essentiell für die wissenschaftlich-technische Weiterentwicklung der Carbonbetontechnologie zu einer markttauglichen Bauweise. Die Notwendigkeit der durchgeführten Arbeiten ergab sich aus dem dringenden Bedarf nach standardisierten Werkzeugen und belastbaren Daten für die Überführung in allgemeingültige Nachweisformate und Regelwerke.

Carbonbeton hat sich von einer Zukunftsvision zur praktischen Realität entwickelt und findet mit seinen hervorragenden mechanischen Eigenschaften zunehmend Anwendung in Neubau und Sanierung. Die Vorteile – geringer Ressourcenverbrauch, reduzierte CO<sub>2</sub>-Emissionen und wirtschaftliche Attraktivität – machen diese Technologie zu einem wichtigen Baustein für nachhaltiges Bauen. Um diese Potentiale vollständig ausschöpfen zu können, waren umfangreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen unerlässlich.

Die Angemessenheit der geleisteten Arbeiten zeigt sich in der zielgerichteten Auslegung der experimentellen Untersuchungen für spezifische offene Fragestellungen und der vollständigen, sparsamen Verwendung der bereitgestellten Mittel und Personenmonate. Das interdisziplinäre Team entwickelte erfolgreich Halbfertigteile, nichtmetallische Transportanker- und Verbindungslösungen sowie vertiefte Erkenntnisse zur Formbewehrung. Faseroptische Messverfahren ermöglichten detaillierte Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Zahlreiche Bemessungsbeispiele wurden während der Projektlaufzeit angefertigt.

Das Erreichen der geplanten Ergebnisse im vorgesehenen Umfang bestätigt die realistische Einschätzung des beantragten Arbeitsaufwands und kann als Nachweis für die Angemessenheit der durchgeführten Tätigkeiten angesehen werden. Das Projekt knüpfte erfolgreich an die Entwicklungsarbeit des C3-Konsortiums an und stärkte durch die Verzahnung von Forschung und Praxis sowohl das wissenschaftliche Know-how als auch die praktische Anwendbarkeit der Carbonbetontechnologie.

## **2.4 VORAUSSICHTLICHER NUTZEN BZW. VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE IM SINNE DES FORTGESCHRIEBENEN VERWERTUNGSPLANS**

### **WIRTSCHAFTLICHE ERFOLGSAUSSICHTEN**

Das Teilvorhaben RUBIN-ISC-III-a war als wissenschaftlich-technisch ausgerichtetes Vorhaben konzipiert, wobei die TU Dresden keine unmittelbare wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse plante. Mit

der zunehmenden Verwendung von Carbonbeton wächst der Bedarf an klar formulierten Werkzeugen für einen Standard, die den Einsatz und die Verwendung von Carbonbeton erleichterten. Das durchgeführte Projekt bildete ein weiteres Werkzeug für die Ausweitung der Marktanteile der am Konsortium beteiligten Firmen.

Durch die intensive Forschungsarbeit wurde sichergestellt, dass das Know-how des Instituts für Massivbau der TU Dresden in diesem Bereich verstetigt, gefestigt und erweitert wurde, wodurch der bestehende Wettbewerbsvorteil erhalten und ausgebaut werden konnte. Die Verzahnung von Forschung und Praxis sowie der Ausbau der führenden Rolle im Bereich der Carbonbetonforschung im Umfeld eines wachsenden Marktes ermöglichten es, dass neben den Unternehmen auch die Universität profitierte. Das Teilvorhaben konnte die Grundlage zur Einwerbung weiterer nationaler sowie internationaler Forschungsgelder bilden und somit zum Erhalt und zur Schaffung von Arbeitsplätzen an der TU Dresden und bei den beteiligten Firmen beitragen.

## **WISSENSCHAFTLICHE UND TECHNISCHE ERFOLGSAUSSICHTEN**

Das interdisziplinäre Team aus Unternehmen verschiedener Fachrichtungen von Bauingenieurwesen bis zur Elektrotechnik sowie Forschungseinrichtungen zielte darauf ab, die Carbonbetontechnologie zu einer allgemein anwendbaren und markttauglichen Bauweise zu entwickeln. Für die angestrebte fortschreitende Standardisierung der Carbonbetonbauweise wurden die Ergebnisse in Form von Arbeitspapieren [17–19] für die Praxis entsprechend aufbereitet. Die wichtigsten Ergebnisse wurden mittels Publikationen und Fachvorträgen einem nationalen und internationalen Publikum vorgestellt, wobei die internationale Bekanntheit des Institutes für Massivbau die Verbreitung der Ergebnisse erheblich vereinfachte. Dank faseroptischer Messverfahren konnte der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit eingehend untersucht werden. Entsprechend des Masterelements "Hochbau" wurden Halbfertigteile entwickelt, hergestellt, geprüft und optimiert. Des Weiteren wurden verschiedene nichtmetallische Transportankerlösungen und Verbindungslösungen erarbeitet, entwickelt und erfolgreich angewandt. Zudem konnten bisherige Erkenntnisse im Bereich der Formbewehrung vertieft werden. Versuche zur Dauerhaftigkeit für kleinteilige Prüfkörper bis hin zu Bauteilversuchen ermöglichten einen detaillierten Einblick in das Materialverhalten des Carbonbetons. Dies ergab zugleich die Möglichkeit, die Hinweise der Richtlinie anzuwenden und mit den erwarteten Ergebnissen zu vergleichen.

Eines der zentralen und praxisrelevantesten Ergebnisse aus dem Projekt „ISC“ ist die Einbindung von Erkenntnissen in die neu erstellte und inzwischen veröffentlichten Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ [16] des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb). Aktuell wird intensiv an der 2. Fassung dieser Richtlinie mit erweitertem Anwendungsgebiet und Regelungen gearbeitet. Auch dort werden die Erkenntnisse in regelmäßigen Sitzungen der Arbeitsgruppen und des gesamten Unterausschusses „Nichtmetallische Bewehrung“ eingebracht. Die Überführung der Erkenntnisse in eine Richtlinie bzw. Norm stellt einen der höchsten Grade an Transfer dar, da durch die Richtlinie die Anwendbarkeit der Ergebnisse für alle Beteiligten im Bauwesen verbindlich geregelt ist.

## **WISSENSCHAFTLICHE UND WIRTSCHAFTLICHE ANSCHLUSSFÄHIGKEIT**

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit wurde durch den praxistauglichen Wissenstransfer nach Projektabschluss sichergestellt, wodurch neue Synergien entstanden, Partner gefunden und das Carbonbetonnetzwerk gestärkt und erweitert wurde. Die aus diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse konnten vielfältig weitergenutzt werden, da das Teilvorhaben dem Institut für Massivbau die Möglichkeit bot, weiterführende Erkenntnisse im Bereich des Carbonbetons zu erlangen und damit die Grundlage für weitere Forschungsprojekte zu schaffen. Durch die Veröffentlichung der Ergebnisse wurde die Expertise des Instituts im Hinblick auf Materialverhalten und darauf aufbauende Bemessungskonzepte in der Fachwelt gestärkt, wodurch zukünftige wissenschaftliche Mitarbeiter und interessierte Forscher auf das IMB aufmerksam gemacht wurden. Die Integration von Firmen aus notwendigen Bereichen der entstehenden ISC-Wertschöpfung gewährleistete die Verwertung des Verbundprojektes, während die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Standardisierung von Carbonbeton dem Bauwesen zugutekamen und die Bekanntheit der Hochschule im Bereich des Carbonbetons weiter steigerten. Die Arbeitspapiere Planung und Herstellung stellen ein enorm wichtiges Werkzeug für zukünftige Planer aus Industrie und Wissenschaft dar.

## **2.5 KENNTNISSE ZU FORTSCHRITTEN AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN**

Im Bewilligungszeitraum sind keine für die Durchführung des Vorhabens relevanten Fortschritte und Ergebnisse Dritter bekannt geworden.

## 2.6 VERÖFFENTLICHUNGEN DER ERGEBNISSE

Im Rahmen des Projektes wurden die Projektergebnisse bereits veröffentlicht:

- [16] DAfStb-Richtlinie Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung: 2024-01, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Berlin, Germany, Jan. 2024.
- [20] K. Aldermann, A. Schumann, T. Rudloff, K. Zernsdorf, R. Wiel, and H. Michler, 2023, "Industriestandard Carbonbeton – durch Standards in eine ressourcenschonende Art des Bauens," *BUST*, vol. 118, no. 10, pp. 757–765, doi: 10.1002/best.202300052.
- [21] N. Ur Rehman, H. Michler, B. Beckmann, and S. Marx, "Lightweight Hollow Core Beams Reinforced with 3D Carbon Reinforcement," in *20th fib Symposium Proceedings in Christchurch - (2024)*, New Zealand, Christchurch, New Zealand, 2024, pp. 1403–1412. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85216926305&origin=inward&txGid=f1bd948f86b3925827038b12197e0c09>
- [22] D. Sandmann, L. Zierul, N. Ur Rehman, H. Michler, and S. Marx, 2025, "Lightweight carbon-reinforced hollow core slab with 3D carbon reinforcement," *Preprint*, doi: 10.5281/zenodo.15776745, <https://doi.org/10.5281/zenodo.15776745>.
- [23] N. Ur Rehman, D. Sandmann, H. Michler, and S. Marx, 2024, "Experimental Study on the Pull-Out Behavior of Fasteners in Carbon Textile Reinforced Concrete Plates," in *RILEM Bookseries, Transforming Construction: Advances in Fiber Reinforced Concrete*, V. Mechtcherine, C. Signorini, and D. Junger, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, pp. 731–738. 2024, doi: 10.1007/978-3-031-70145-0\_87.
- [24] L. Zierul, "Fasteners Inside Double Wall Elements - Test on Non-Metallic Reinforcements," in *ACI Spring Convention 2025*, Toronto, Canada, 2025, poster contribution, <https://doi.org/10.5281/zenodo.15619908>, doi: 10.5281/zenodo.15619908.
- [25] L. Zierul, E. Baumgärtel, D. Sandmann, and S. Marx, 2024, "Shear Transfer in Concrete Joints with Non-Metallic Reinforcement," *Buildings*, vol. 14, no. 7, p. 1975, doi: 10.3390/buildings14071975.
- [26] L. Zierul, Nazaib Ur Rehman, Tilo Senckpiel-Peters, and Birgit Beckmann, "Planning Carbon-Reinforced Concrete Components – Innovations from Theory to Practice," in *Proceedings of DFH Symposium 2024*.
- [27] L. Zierul, B. Gündogdu, B. Beckmann, and S. Marx, "Investigation of spatial position of carbon grids in planar textile-reinforced concrete members," in *21th fib Symposium Proceedings in Antibes - (2025)*, France, Antibes, France, 2025, pp. 1515–1523.
- [28] B. Gündogdu and T. Senckpiel-Peters, "Carbonformbewehrung - mit Versuchsergebnissen und Ingenieurmodell zur Bemessung," in *Tagungsband der 15. Carbon- und Textilbetontage*, Dresden, Sep. 2023.
- [29] T. Senckpiel-Peters and B. Gündogdu, "CFK-Formstäbe – Konventioneller Bewehrungsbau

für den Carbonbeton," Ulmer Betontage. Ulm, 14.-16.05.24.

- [31] B. Gündogdu, H. Michler, S. Scheerer, and S. Marx, "Formed carbon reinforcement: Influences on the load-bearing behavior," *Preprint*, doi: 10.5281/zenodo.15776887, <https://doi.org/10.5281/zenodo.15776887>.
- [32] N. Ur Rehman, H. Michler, M. Stümpel, B. Beckmann, P. Penzel, L. Hahn, C. Cherif, and S. Marx, 2023, "DEVELOPMENT OF CARBON-REINFORCED HOLLOW CORE SLAB," in *Proceedings of 11th International Conference on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2023)*, D. C. Cardoso, K. A. Harries, and F. A. Silva, Eds., Rio de Janeiro, Brasil, pp. 1800–180824.-26. July 2023, doi: 10.5281/zenodo.8116760.
- [33] D. Sandmann, "Bemessen mit nichtmetallischer Bewehrung - Bemessungsbeispiel 1 – Biegung und Querkraft," Weiterbildung für Tragwerksplanung - Aus der Praxis für die Praxis. Darmstadt, 19.02.2025. [Online]. Available: [https://www.massivbau.tu-darmstadt.de/massivbau/veranstaltungen\\_fgm/weiterbildungfrtragswerksplaner\\_fgm/index.de.jsp#tabelle\\_1](https://www.massivbau.tu-darmstadt.de/massivbau/veranstaltungen_fgm/weiterbildungfrtragswerksplaner_fgm/index.de.jsp#tabelle_1)

#### Eingereicht:

- [17] ISC-Bündnis, Ed., *ISC Arbeitspapier Planung: Arbeitspapier des Forschungsvorhabens RUBIN-ISC (Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation - Industriestandard Carbonbeton)*: Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB), eingereicht 2025.
- [18] ISC-Bündnis, Ed., *ISC Arbeitspapier Herstellung: Arbeitspapier des Forschungsvorhabens RUBIN-ISC (Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation - Industriestandard Carbonbeton)*: Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB), eingereicht 2025.
- [19] ISC-Bündnis, Ed., *ISC Anlagen zu den Arbeitspapieren: Anlagen zu den Arbeitspapieren des Forschungsvorhabens RUBIN-ISC (Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation - Industriestandard Carbonbeton)*: Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB), eingereicht 2025.
- [30] B. Gündogdu, H. Michler, S. Scheerer, and S. Marx, "Carbonbeton unter Dauerlast – Beitrag zur Bewertung des Zug- und Verbundtragverhaltens," *Beton- und Stahlbetonbau*, eingereicht 05/2025.

#### Weitere geplante Veröffentlichungen:

- N. Ur Rehman, D. Häßler, H. Michler, L. Stelzner, S. Marx, and S. Hothan, "Fire Resistance of coated innovative hollow core slab system," planned 2025.

### 3 REFERENCES

- [1] M. Curbach and R. Ortlepp, "Sonderforschungsbereich SFB 528 - Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung - Abschlussbericht," Technische Universität Dresden, May. 2012, <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-86425>.
- [2] M. Curbach, "Schlussbericht C3-B3-I-a Entwicklung von Bemessungs- und Sicherheitskonzepten sowie standardisierter Prüfkonzepte zur Materialcharakterisierung von Carbonbeton," Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden, Dec. 2016.
- [3] M. Curbach, J. Hegger, F. Schladitz, M. Tietze, and M. Lieboldt, *Handbuch Carbonbeton*: Wiley, 2023.
- [4] M. Frenzel, A. Schmidt, and S. Scheerer, 2023, "ZiE für Carbonbetonbauteile in Halbfertigteil- und Fertigteilbauweise im Gebäudeteil BOX des CUBE," *BUST*, vol. 118, S2, pp. 49–56, doi: 10.1002/best.202200105.
- [5] M. Curbach, H. Fuchs, J. Hegger, and P. Offermann, "DAfStb-Heft 488 - Sachstandbericht zum Einsatz von Textilien im Massivbau," Jan. 1999, doi: 10.2366/12477501.
- [6] P. Preinstorfer, B. Kromoser, and J. Kollegger, 2018, "Einflussparameter auf die Spaltrissbildung in Textilbeton," *BUST*, vol. 113, no. 12, pp. 877–885, doi: 10.1002/best.201800071.
- [7] E. Schütze and M. Curbach, 2019, "Zur experimentellen Charakterisierung des Verbundverhaltens von Carbonbeton mit Spalten als maßgeblichem Versagensmechanismus/Experimental characterisation of the bond behaviour of carbon reinforced concrete with concrete splitting as significant failure mode," *Bauingenieur*, vol. 94, no. 04, pp. 133–141, doi: 10.37544/0005-6650-2019-04-61.
- [8] J. Bielak, A. Spelter, N. Will, and M. Claßen, 2018, "Verankerungsverhalten textiler Bewehrungen in dünnen Betonbauteilen," *BUST*, vol. 113, no. 7, pp. 515–524, doi: 10.1002/best.201800013.
- [9] A. Schumann, M. May, and M. Curbach, 2018, "Carbonstäbe im Bauwesen - Teil 1: Grundlegende Materialcharakteristiken," *BUST*, vol. 113, no. 12, pp. 868–876, doi: 10.1002/best.201800077.
- [10] A. Schumann, M. May, F. Schladitz, S. Scheerer, and M. Curbach, 2020, "Carbonstäbe im Bauwesen - Teil 2: Verbundverhalten," *BUST*, vol. 115, no. 12, pp. 962–971, doi: 10.1002/best.202000047.
- [11] E. Lorenz, E. Schütze, F. Schladitz, and M. Curbach, 2013, "Textilbeton – Grundlegende Untersuchungen im Überblick," *BUST*, vol. 108, no. 10, pp. 711–722, doi: 10.1002/best.201300041.
- [12] E. Lorenz, E. Schütze, and S. Weiland, 2015, "Textilbeton - Eigenschaften des Verbundwerkstoffs," *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 110, S1, pp. 29–41, doi: 10.1002/best.201400114.
- [13] J. Bielak, S. Bergmann, and J. Hegger, 2019, "Querkrafttragfähigkeit von Carbonbeton-Plattenbrücken mit C-förmiger Querkraftbewehrung," *BUST*, vol. 114, no. 7, pp. 465–475, doi: 10.1002/best.201900001.
- [14] J. Bielak, M. Schmidt, J. Hegger, and F. Jesse, 2020, "Structural Behavior of Large-Scale I-Beams with Combined Textile and CFRP Reinforcement," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 13, p. 4625, doi: 10.3390/app10134625.
- [15] K. Holz and M. Curbach, 2023, "Carbon reinforced concrete exposed to high temperatures,"

- Struct Concrete*, vol. 24, no. 3, pp. 3178–3190, doi: 10.1002/suco.202200343.
- [16] *DAfStb-Richtlinie Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung: 2024-01*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Berlin, Germany, Jan. 2024.
- [17] ISC-Bündnis, Ed., *ISC Arbeitspapier Planung: Arbeitspapier des Forschungsvorhabens RUBIN-ISC (Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation - Industriestandard Carbonbeton)*: Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB), eingereicht 2025.
- [18] ISC-Bündnis, Ed., *ISC Arbeitspapier Herstellung: Arbeitspapier des Forschungsvorhabens RUBIN-ISC (Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation - Industriestandard Carbonbeton)*: Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB), eingereicht 2025.
- [19] ISC-Bündnis, Ed., *ISC Anlagen zu den Arbeitspapieren: Anlagen zu den Arbeitspapieren des Forschungsvorhabens RUBIN-ISC (Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation - Industriestandard Carbonbeton)*: Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB), eingereicht 2025.
- [20] K. Aldermann, A. Schumann, T. Rudloff, K. Zernsdorf, R. Wiel, and H. Michler, 2023, "Industriestandard Carbonbeton – durch Standards in eine ressourcenschonende Art des Bauens," *BUST*, vol. 118, no. 10, pp. 757–765, doi: 10.1002/best.202300052.
- [21] N. Ur Rehman, H. Michler, B. Beckmann, and S. Marx, "Lightweight Hollow Core Beams Reinforced with 3D Carbon Reinforcement," in *20th fib Symposium Proceedings in Christchurch - (2024)*, New Zealand, Christchurch, New Zealand, 2024, pp. 1403–1412. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85216926305&origin=inward&txGid=f1bd948f86b3925827038b12197e0c09>
- [22] D. Sandmann, L. Zierul, N. Ur Rehman, H. Michler, and S. Marx, 2025, "Lightweight carbon-reinforced hollow core slab with 3D carbon reinforcement," *Preprint*, doi: 10.5281/zenodo.15776745, <https://doi.org/10.5281/zenodo.15776745>.
- [23] N. Ur Rehman, D. Sandmann, H. Michler, and S. Marx, 2024, "Experimental Study on the Pull-Out Behavior of Fasteners in Carbon Textile Reinforced Concrete Plates," in *RILEM Bookseries, Transforming Construction: Advances in Fiber Reinforced Concrete*, V. Mechtcherine, C. Signorini, and D. Junger, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, pp. 731–738, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-70145-0\_87.
- [24] L. Zierul, "Fasteners Inside Double Wall Elements - Test on Non-Metallic Reinforcements," in *ACI Spring Convention 2025*, Toronto, Canada, 2025, poster contribution, <https://doi.org/10.5281/zenodo.15619908>, doi: 10.5281/zenodo.15619908.
- [25] L. Zierul, E. Baumgärtel, D. Sandmann, and S. Marx, 2024, "Shear Transfer in Concrete Joints with Non-Metallic Reinforcement," *Buildings*, vol. 14, no. 7, p. 1975, doi: 10.3390/buildings14071975.
- [26] L. Zierul, Nazaib Ur Rehman, Tilo Senckpiel-Peters, and Birgit Beckmann, "Planning Carbon-Reinforced Concrete Components – Innovations from Theory to Practice," in *Proceedings of DFH Symposium 2024*.
- [27] L. Zierul, B. Gündogdu, B. Beckmann, and S. Marx, "Investigation of spatial position of carbon grids in planar textile-reinforced concrete members," in *21th fib Symposium Proceedings in Antibes - (2025)*, France, Antibes, France, 2025, pp. 1515–1523.
- [28] B. Gündogdu and T. Senckpiel-Peters, "Carbonformbewehrung - mit Versuchsergebnissen und Ingenieurmodell zur Bemessung," in *Tagungsband der 15. Carbon- und Textilbetontage*, Dresden, Sep. 2023.

- [29] T. Senckpiel-Peters and B. Gündogdu, "CFK-Formstäbe – Konventioneller Bewehrungsbau für den Carbonbeton," Ulmer Betontage. Ulm, 14.-16.05.24.
- [30] B. Gündogdu, H. Michler, S. Scheerer, and S. Marx, "Carbonbeton unter Dauerlast – Beitrag zur Bewertung des Zug- und Verbundtragverhaltens," *Beton- und Stahlbetonbau*, eingereicht 05/2025.
- [31] B. Gündogdu, H. Michler, S. Scheerer, and S. Marx, "Formed carbon reinforcement: Influences on the load-bearing behavior," *Preprint*, doi: 10.5281/zenodo.15776887, <https://doi.org/10.5281/zenodo.15776887>.
- [32] N. Ur Rehman, H. Michler, M. Stümpel, B. Beckmann, P. Penzel, L. Hahn, C. Cherif, and S. Marx, 2023, "DEVELOPMENT OF CARBON-REINFORCED HOLLOW CORE SLAB," in *Proceedings of 11th International Conference on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2023)*, D. C. Cardoso, K. A. Harries, and F. A. Silva, Eds., Rio de Janeiro, Brasil, pp. 1800–180824.-26. July 2023, doi: 10.5281/zenodo.8116760.
- [33] D. Sandmann, "Bemessen mit nichtmetallischer Bewehrung - Bemessungsbeispiel 1 – Biegung und Querkraft," Weiterbildung für Tragwerksplanung - Aus der Praxis für die Praxis. Darmstadt, 19.02.2025. [Online]. Available: [https://www.massivbau.tu-darmstadt.de/massivbau/veranstaltungen\\_fgm/weiterbildungfrtragswerksplaner\\_fgm/index.de.jsp#tabelle\\_1](https://www.massivbau.tu-darmstadt.de/massivbau/veranstaltungen_fgm/weiterbildungfrtragswerksplaner_fgm/index.de.jsp#tabelle_1)

# Anlagen

## A ERMITTLUNG DER KURZZEITKENNWERTE BEI RAUMTEMPERATUR UND BEI 60°C DER NICHTMETALLISCHEN BEWEHRUNG (CARBON-BEWEHRUNGSGITTER)

### Carbonbewehrungsgitter

HTC 21/21-80 der Fa. Hitexbau GmbH

Wurde im gesamten Forschungsvorhaben bei Kleinkörper- und Großbauteilversuchen als konventionelle nichtmetallische Bewehrung als auch als Ausgangsmaterial für nachträglich umgeformte nichtmetallische Bewehrung eingesetzt.

### Bestimmung der Zugfestigkeit

Zur Bestimmung der Zugfestigkeit des Bewehrungsgitters im Beton wurden Dehnkörperversuche nach [16] durchgeführt. Die Ergebnisse sind in standardisierten Auswerteprotokollen zusammengestellt.

Zur Bestimmung der Spannungswerte wird nicht der Bruttoquerschnitt des Garns, sondern der reine Faserquerschnitt des Garns herangezogen. Statisch angesetzt wird lediglich die Kettrichtung.

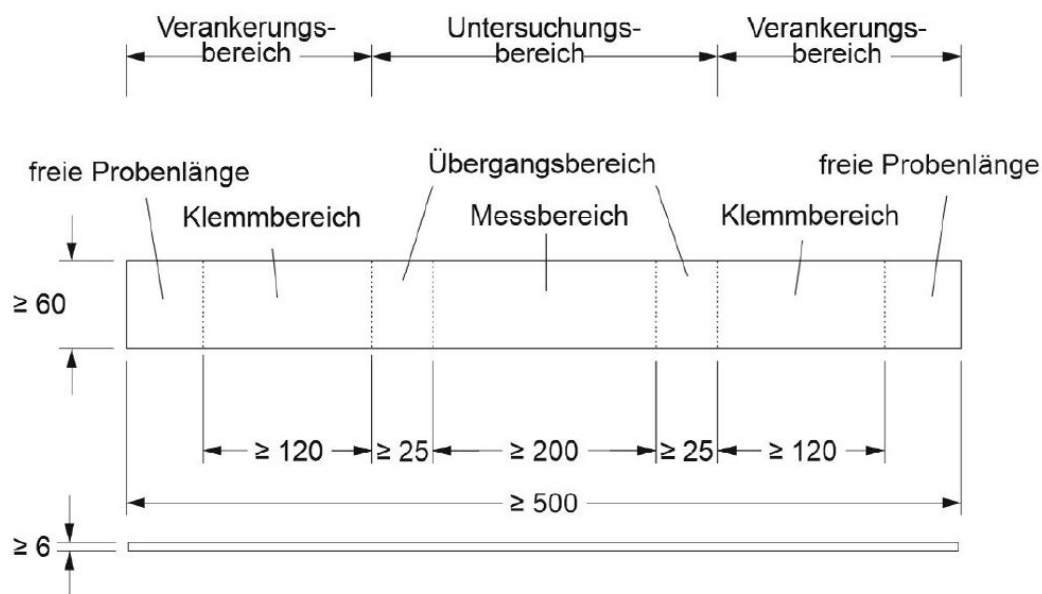
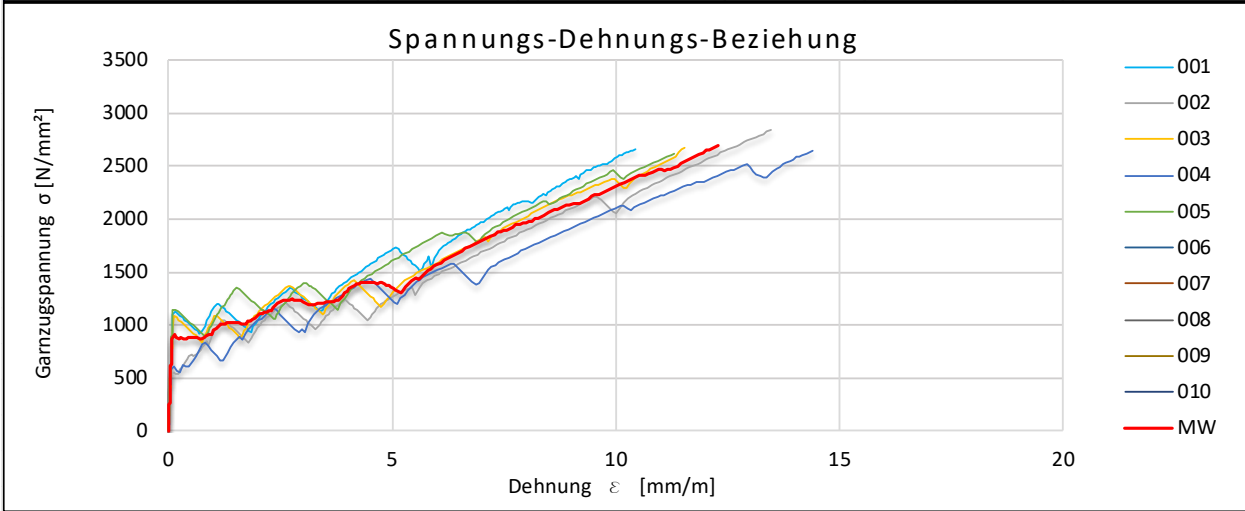


Abbildung 10: Prüfkörperaufbau zur Bestimmung der Zugfestigkeit von Bewehrungsgittern nach [16].

# Auswertung Dehnkörperversuche

Projekt:	0
Serie:	0
Textil:	HTC 21/21 80
Beton:	RUBIN C50/60

Betonagedatum:	23.06.2023	Prüfdatum:	21.07.2023		
Prüfrichtung:	K	[-]	Probekörperdicke:	24	mm
$A_{Garn}$ :	1,82	mm <sup>2</sup>	Betondeckung:	12	mm
Lagen Textil:	1	[-]	E-Modul:	195.728	N/mm <sup>2</sup>
Anzahl Garne je Lage:	4	[-]	Messlänge:	300	mm

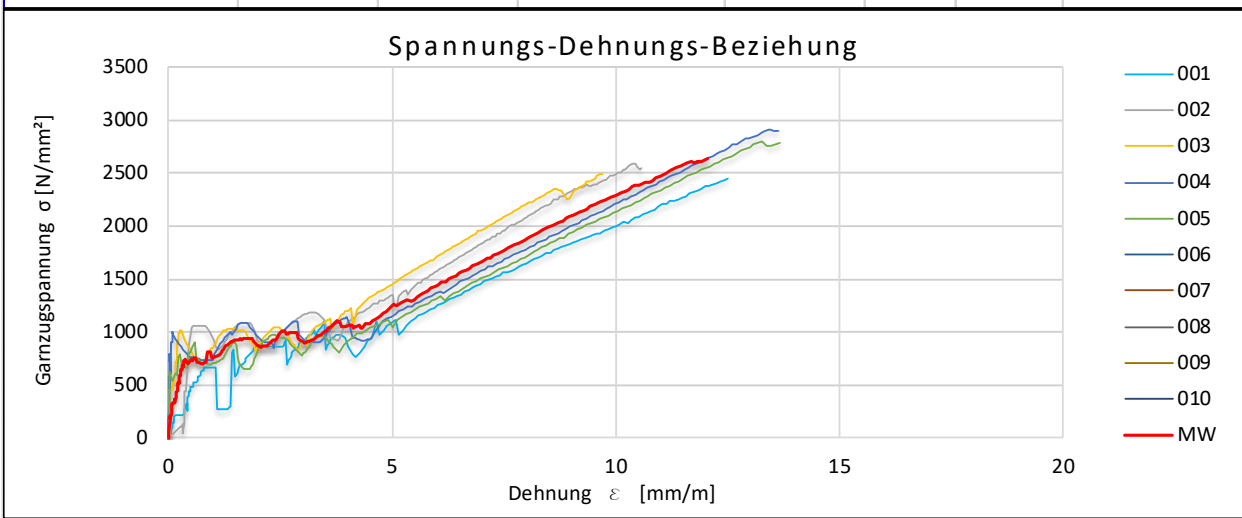


Probe	Alter	Anzahl Risse im MB	Art des Versagens	$F_u$	$\epsilon_u$	$\sigma_{c,cr}$	$\sigma_{tu}$
[-]	[d]	[-]	[-]	[kN]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
001	28	4	Riss -	19,37	10,42	459,66	2661,37
002	28	5	Riss -	20,85	13,64	222,77	2864,22
003	28	4	Riss -	19,75	11,68	400,12	2712,72
004	28	5	Riss -	19,27	14,40	245,19	2646,55
005	28	3	Riss -	19,03	11,30	474,64	2614,52
006	28						
007	28						
008	28						
009	28						
010	28						
			Mittelwert	19,66	12,29	360,48	2699,87
			Standardabweichung	0,64	1,49	106,48	88,07
			Variationskoeffizient	0,033	0,121	0,295	0,033
			5-%-Quantil	19,1	10,6	227,3	2620,9
			95-%-Quantil	20,6	14,3	471,6	2833,9

Abbildung 11: Auswerteprotokoll Zugfestigkeit im Beton HTC 21/21-80 bei 20°C.

# Auswertung Dehnkörperversuche

<b>Projekt:</b>	0				
<b>Serie:</b>	0				
<b>Textil:</b>	HTC 21/21 80				
<b>Beton:</b>	RUBIN C50/60				
<b>Betonagedatum:</b>	23.06.2023		<b>Prüfdatum:</b>	21.07.2023	
<b>Prüfrichtung:</b>	K	[-]	<b>Probekörperdicke:</b>	24	mm
<b>A<sub>Garn:</sub></b>	1,82	mm <sup>2</sup>	<b>Betondeckung:</b>	12	mm
<b>Lagen Textil:</b>	1	[-]	<b>E-Modul:</b>	206.239	N/mm <sup>2</sup>
<b>Anzahl Garne je Lage:</b>	4	[-]	<b>Messlänge:</b>	300	mm



Probe	Alter	Anzahl Risse im MB	Art des Versagens	F <sub>u</sub>	ε <sub>u</sub>	σ <sub>c,cr</sub>	σ <sub>tu</sub>
[-]	[d]	[-]	[-]	[kN]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
001	28	9	Riss -	17,83	12,51	277,98	2449,29
002	28	7	Riss -	18,86	10,70	183,14	2591,22
003	28	8	Riss -	18,30	9,81	422,53	2508,02
004	28	6	Riss -	21,16	13,62	414,03	2906,58
005	28	8	Riss -	20,46	13,67	258,79	2810,92
006	28						
007	28						
008	28						
009	28						
010	28						
			Mittelwert	19,32	12,06	311,29	2653,21
			Standardabweichung	1,28	1,56	92,97	176,40
			Variationskoeffizient	0,066	0,129	0,299	0,066
			5%-Quantil	17,9	10,0	198,3	2461,0
			95%-Quantil	21,0	13,7	420,8	2887,5

Abbildung 12: Auswerteprotokoll Zugfestigkeit im Beton HTC 21/21-80 bei 60°C.

## Untersuchung der Übergreifungslänge

Zur Bestimmung der Verbundfestigkeit und der Endverankerungslänge des Bewehrungsgitters im Beton wurden Dehnkörperversuche mit verschiedenen Übergreifungslängen nach [16] durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 13 zusammengestellt.

Endverankerungsversuche dienen zur Kontrolle bzw. direkten Bestimmung der Verankerungslänge durch Variation der Einbindelänge. Die erforderliche Einbindelänge ist erreicht, wenn der Probekörper durch Bruch der Fasern in der Textilebene eintritt und nicht durch Faserauszug oder Spalten.

## Versuchsdurchführung

Der Probekörperaufbau entsprach einem Dehnkörper mit mittig angeordnetem symmetrischem Übergreifungsstoß aus zwei separaten Gitterabschnitten. Durch systematische Variation der Übergreifungslänge wurde ein Faserstrangspannungs-Übergreifungslängen-Diagramm entwickelt, aus dem die übertragbaren Kräfte für verschiedene Verankerungs- und Übergreifungslängen abgelesen werden konnten. Die Übergreifungslänge wurde sukzessiv erhöht, bis Zugversagen der Gelege vor Auszugs- oder Spaltversagen auftrat und die Carbonfasern ihre Zugfestigkeit erreichten. Die ermittelte Übergreifungslänge entspricht dabei direkt der erforderlichen Endverankerungslänge.

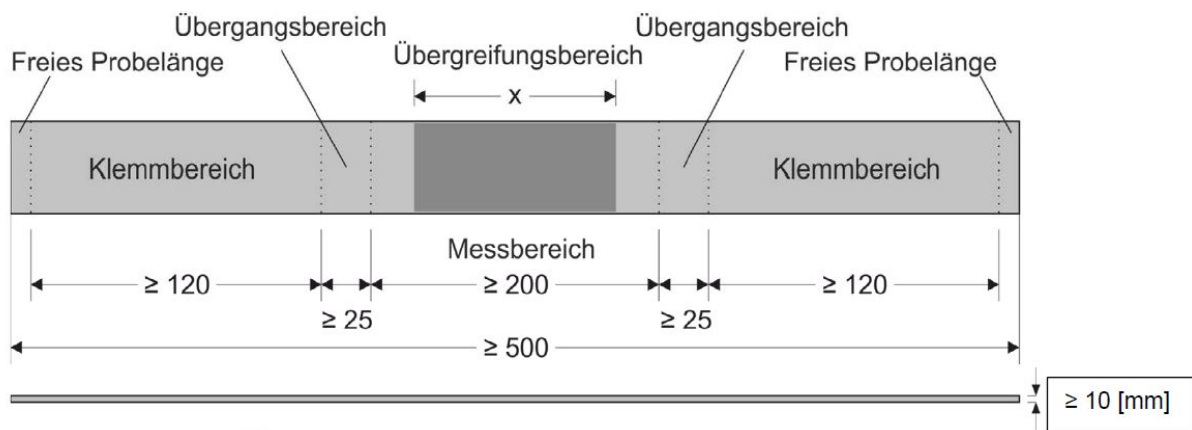


Abbildung 13: Versuchsaufbau Dehnkörper mit Übergreifung zur Bestimmung der Endverankerungslänge [16].

Tabelle 6: Versuchsserien zur Bestimmung der Übergreifungslänge (ÜG), Carbongitter HTC 21/2-80.

Bezeichnung Serie	Anzahl PK	Übergreifungslänge $l_{ver}$ in mm
ÜG 100	5	100
ÜG 250	5	250
ÜG 300	5	300
ÜG 400	5	400
ÜG 500	5	500

## Auswertung

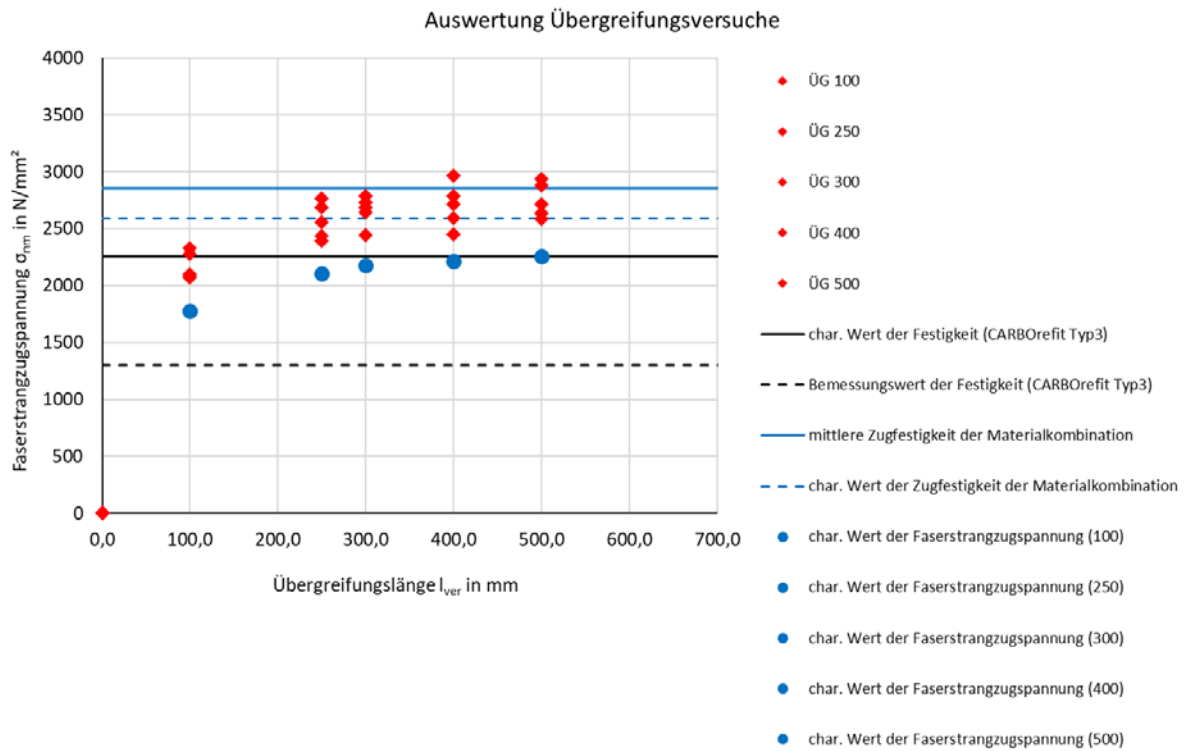


Abbildung 14: Diagramm zur Bestimmung der Endverankerungslänge.

Die Ergebnisse der Übergreifungsversuche in Abbildung 14 zeigten eine kontinuierliche Laststeigerung mit zunehmender Übergreifungslänge. Zwischen 300 und 400 mm Übergreifungslänge versagten alle Probekörper durch Zugbruch des Carbongitters, wobei die erreichten Bruchspannungen gut mit dem charakteristischen Wert der Zugfestigkeit aus den Dehnkörperversuchen (dargestellt als horizontale, gestrichelte Linie) übereinstimmten. Diese Länge ermöglichte somit die vollständige Verankerung des Gitters im Beton ohne vorzeitiges Verbundversagen.

## B ERMITTLUNG DER KURZZEITKENNWERTE BEI RAUMTEMPERATUR UND BEI 60°C (J&G FORMFLECHTSTAB)

### Bestimmung der Zugfestigkeit ohne Beton (Formflechtstab)

Formflechtstab (FFS) der Firma Johne & Groß GmbH

- Wurde im gesamten Forschungsvorhaben bei Kleinkörper- und Großbauteilversuchen als konventionelle nichtmetallische Bewehrung als auch als Ausgangsmaterial für nachträglich umgeformte nichtmetallische Bewehrung eingesetzt.
- Wurde im Forschungsvorhaben als Transportanker erforscht und eingesetzt.

Die Bestimmung der Zugfestigkeit und des E-Moduls von Stäben erfolgt nach [16] durch Stabzugversuche wie in Abbildung 15 zu sehen.

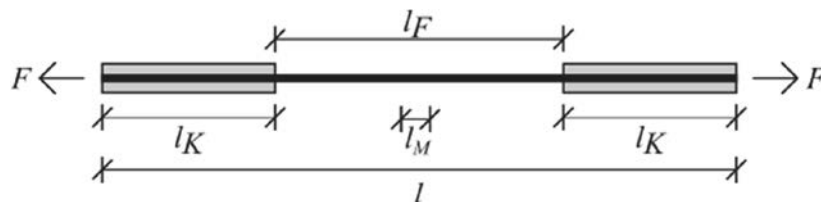


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Prüfkörpers zur Bestimmung der Zugfestigkeit von Stäben [16].

### Versuchsdurchführung

Die Zugprüfung der Bewehrungsstäbe erfolgte nach standardisierten Prüfverfahren. Pro Versuchsserie wurden fünf Proben mit gültigem Versagen geprüft, wobei der Stab mit einer Dehnrage von 1,5 % pro Minute weggesteuert belastet wurde. Die Prüfung galt als beendet, wenn ein Bruch des Stabes vorlag oder die Prüfkraft um mehr als 10 % abfiel. Während des gesamten Versuchsablaufs wurden sowohl die Prüfkraft als auch die Verformung des Stabes kontinuierlich im Messfenster aufgezeichnet. Der Versuch wurde nur als gültig gewertet, wenn ein Faserabbruch in der freien Länge auftrat.

### Messgrößen und Dokumentation

Für jeden geprüften Stab wurden folgende charakteristische Werte ermittelt und in Abbildung 16 zusammengefasst:

- Bruchkraft ( $F_{m,u}$ ) als maximale aufnehmbare Zugkraft
- Kraft bei 10 % der Bruchkraft ( $F_{m,10\%}$ ) zur Bestimmung des Anfangsbereichs
- Kraft bei 60 % der Bruchkraft ( $F_{m,60\%}$ ) für die Steifigkeitsberechnung

Aus diesen Messwerten wurden die Bruchspannung ( $\sigma_{m,u}$ ), die Spannungen bei 10 % und 60 % der Bruchkraft sowie der E-Modul des Stabes berechnet. Die Bruchdehnung ( $\epsilon_{m,u}$ ) wurde als Verhältnis der Bruchspannung zum E-Modul bestimmt.

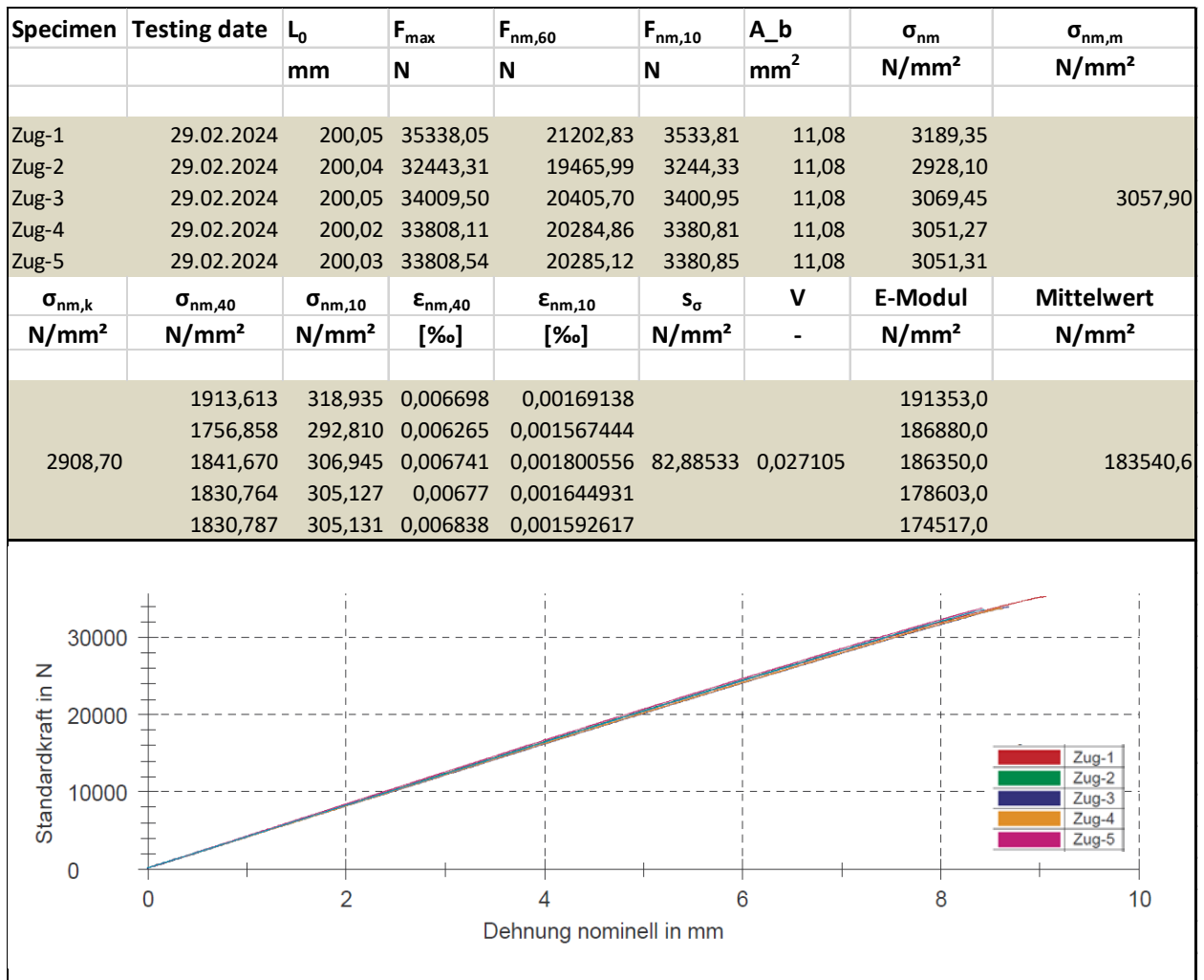


Abbildung 16: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse – Bestimmung der Zugfestigkeit FFS.

### Ergebnis

Der aus den Stabzugversuchen abgeleitete Wert für den E-Modul beträgt 183.540 MPa. Aufgrund der speziellen Herstellungsweise des Stabes durch Flechten, ist dieser Wert plausibel. Da beinahe keine Faser im Faserquerschnitt in der Stablängsrichtung gestreckt ist, sinkt aufgrund der Anisotropie der Carbonfasern die Steifigkeit. Hinzu kommt vermutlich eine gewisse (nicht ermittelte) erhöhte Querkontraktion, die einen zusätzlichen Steifigkeitsverlust verursacht. Somit liegt die Steifigkeit der Formflechtstäbe etwa 12 % unterhalb der Steifigkeit der Gitterbewehrung.

## Bestimmung der Zugfestigkeit im Beton (Dehnkörperversuch)

Zur Bestimmung der Zugfestigkeit des Bewehrungsstabs im Beton wurden Dehnkörperversuche nach [16] durchgeführt. Die Ergebnisse sind in standardisierten Auswerteprotokollen zusammengestellt.

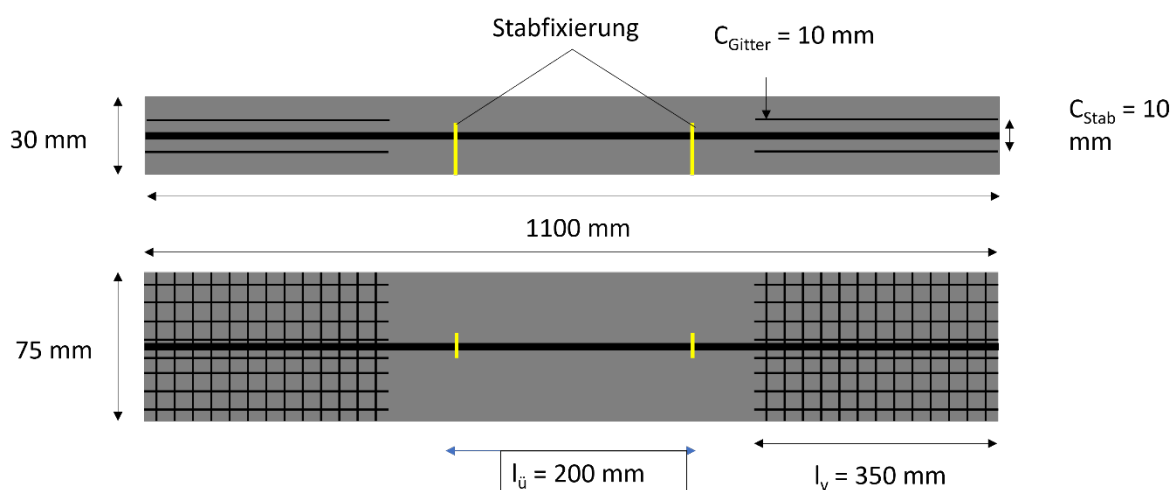


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Prüfkörper zur Bestimmung des Lastniveaus für die Dauerstandzugversuche.

Zur Bestimmung der Kurzzeiteigenschaften von Stäben im Beton gibt es in [16] keine konkrete Prüfempfehlung. Die Dehnkörperversuche an den Stäben wurden lediglich durchgeführt um das Lastniveau für die Dauerstandversuche zu bestimmen. Die Geometrischen Abmessungen sind in Abbildung 17 dargestellt.

		PK1	PK3	PK4	PK5	Zusammenfassung	
F	kN	30,320969	29,867325	28,295479	30,634079	Mittelwert	2224,28
$\Delta F_{70-40\%}$	kN	9,0962907	8,9601975	8,4886437	9,1902237	Standardabweichung	67,80
L(F)	mm					Variationskoeffizient	0,030
$\Delta L_{70-40\%}$	mm	2,497844	2,235113	1,536249	2,294442	5-%-Quantil	2151,6
$\epsilon_{70-40\%}$		0,00795575	0,00711015	0,00502932	0,00726003	95-%-Quantil	2306,7
E-Modul	N/mm <sup>2</sup>	86224,3364	95035,4086	127284,567	95462,8324		
$\sigma_{nm}$	N/mm <sup>2</sup>	2286,59777	2252,38708	2133,84932	2310,21036		
Messlänge	mm	313,9671	314,3552	305,4586	316,0375		
$\varnothing_{stab}$	mm	4,11	4,11	4,11	4,11		
$A_{stab}$	mm <sup>2</sup>	13,2602985	13,2602985	13,2602985	13,2602985		

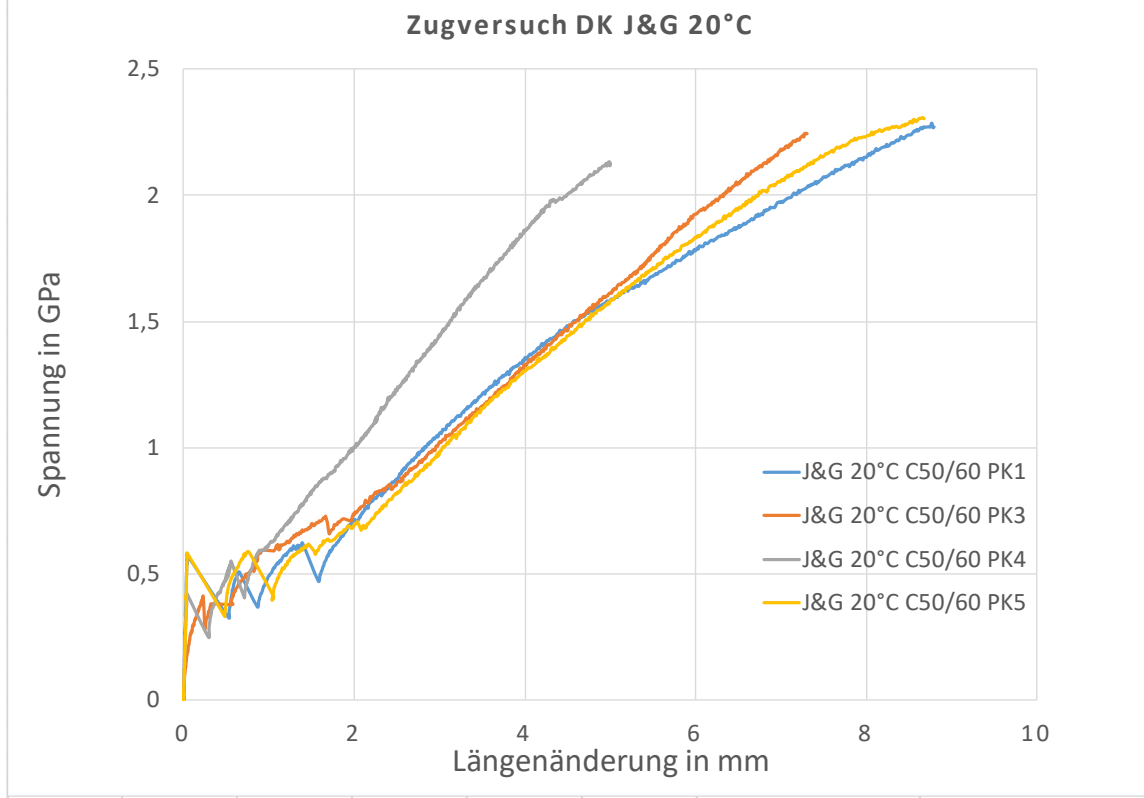


Abbildung 18: Auswerteprotokoll Zugfestigkeit Dehnkörper J&G FFS 20°C.

		PK1	PK3	PK5	PK6	Zusammenfassung	
F	kN	28,806648	27,75238	27,68	28,461609	Mittelwert	2117,57
$\Delta F_{70-40\%}$	kN	8,6419944	8,325714	8,304	8,5384827	Standardabweichung	35,87
L(F)	mm					Variationskoeffizient	0,017
$\Delta L_{70-40\%}$	mm	2,117718	1,497545	2,384156	2,015475	5%-Quantil	2088,3
$\epsilon_{70-40\%}$		0,00694334	0,00498119	0,00802746	0,00678611	95%-Quantil	2168,5
E-Modul	N/mm <sup>2</sup>	93862,5592	126047,742	78010,9956	94886,9389		
$\sigma_{nm}$	N/mm <sup>2</sup>	2172,39816	2092,89255	2087,43416	2146,3777		
Messlänge	mm	305	300,64	297	297		
$\varnothing_{stab}$	mm	4,11	4,11	4,11	4,11		
$A_{stab}$	mm <sup>2</sup>	13,2602985	13,2602985	13,2602985	13,2602985		

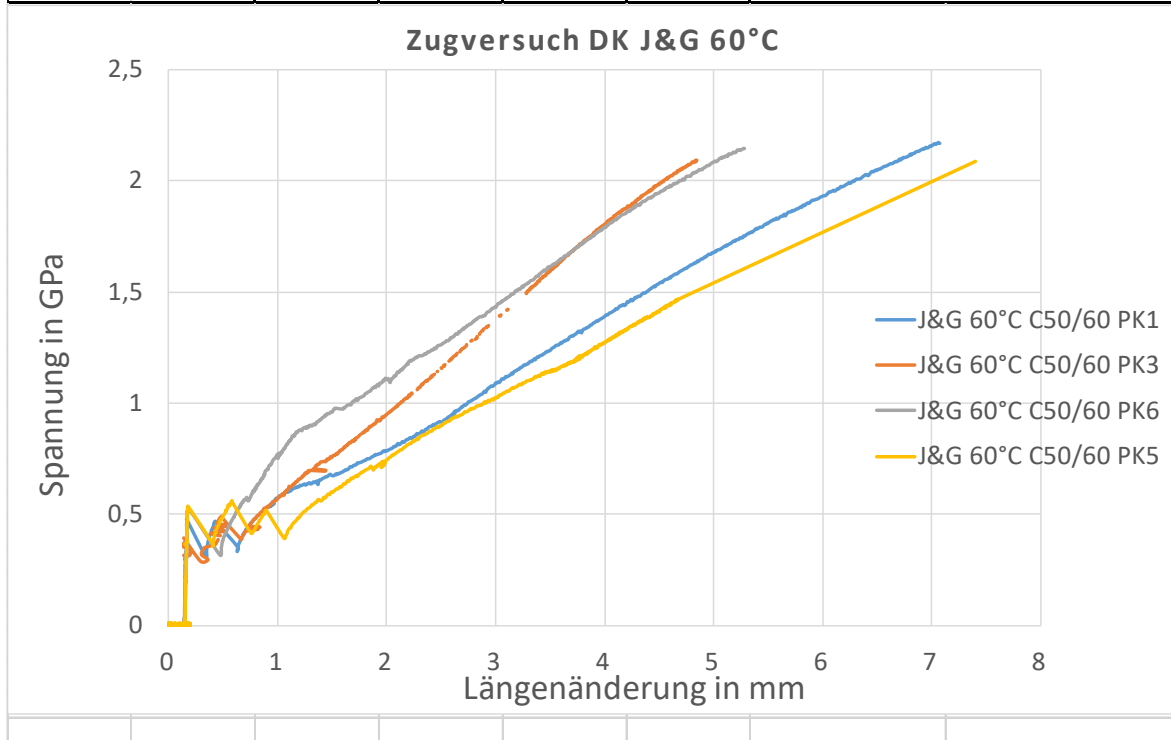


Abbildung 19: Auswerteprotokoll Zugfestigkeit Dehnkörper J&G FFS 60°C.

Anhand der ermittelten Werte aus den Dehnkörperversuchen in Abbildung 18 und Abbildung 19 ist zu sehen, dass sowohl die Zugfestigkeit, als auch der E-Modul um 5 % bzw. 3 %, bei einer Erhöhung der Prüftemperatur von 20 °C auf 60 °C, abnehmen. Diese geringfügige Abnahme liegt im Bereich der Materialstreuung.

## Bestimmung der Verbundfestigkeit im Beton (Formflechtstab)

Das Prüfverfahren zur Ermittlung der Kurzzeit-Verbundfestigkeit von nichtmetallischen Bewehrungsstäben erfolgt an einzelnen einbetonierten Stäben mit definierter Verbundlänge analog zur schematischen Abbildung 20 nach [16]. Die Prüfkörpergeometrie orientiert sich dabei am Stabdurchmesser  $\varnothing_{nm}$ , wobei die Würfelbreite das 10-fache des Stabdurchmessers (mindestens 150 mm), die verbundfreie Vorlänge das 5-fache des Stabdurchmessers und die Verbundlänge ebenfalls das 5-fache des Stabdurchmessers beträgt. Während der Betonage muss der Bewehrungsstab horizontal gelagert werden.

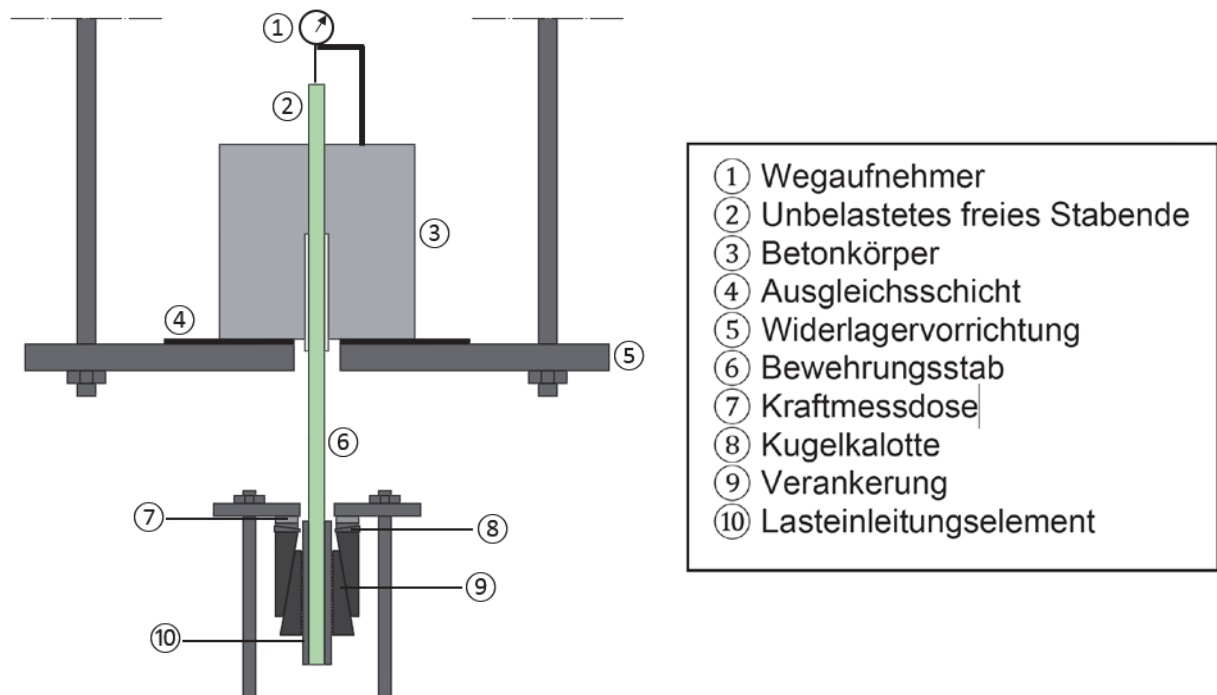


Abbildung 20: Schematische Abbildung des Pull-Out Versuchs nach [16].

Die Versuchsdurchführung beginnt frühestens 14 Tage nach der Probekörperherstellung und umfasst fünf gültige Versuche pro Betonfestigkeit. Die Prüfung erfolgt weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,2 bis 1 mm/min, wobei kontinuierlich die Prüfkraft  $F_p$  und die Relativverschiebung (Schlupf) am unbelasteten Stabende gemessen werden. Die Betondruckfestigkeit zum Prüfzeitpunkt muss dokumentiert werden.

Aus den Messdaten wird die Verbundspannung nach der folgenden Formel berechnet:

$$\tau_b = F_p / (\varnothing_{nm} \cdot l_b \cdot \pi)$$

Als zentrale Kennwerte sind zu ermitteln:

- $\tau_{b,max}$  Verbundspannung bei maximaler Kraft
- $\tau_{b,0,5}$  Verbundspannung bei 0,5 mm Schlupf
- $\tau_{b,0,15}$  Verbundspannung bei 0,15 mm Schlupf
- $s_{max}$  Schlupf bei maximaler Kraft

Zusätzlich wird die vollständige Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung dokumentiert. Die statistische Auswertung erfolgt unter Annahme einer Normalverteilung, wobei aus  $\tau_{b,max}$  der charakteristische Wert der Kurzzeit-Verbundfestigkeit  $f_{bk,RILEM}$  und aus  $\tau_{b,0,15}$  der charakteristische Wert der mittleren Verbundspannung  $\tau_{b,m,k,RILEM}$  als 5%-Quantile ermittelt werden.

Ein Versuch gilt nur dann als gültig, wenn ein Scherversagen zwischen Beton und Bewehrungsstab durch Abscheren der Betonkonsolen oder der Staboberfläche auftritt. Versuche mit Spaltbruch im Betonprobekörper oder Zugversagen der Bewehrung gelten als ungültig.

Die Ergebnisse sind in standardisierten Auswerteprotokollen in Abbildung 21 und Abbildung 22 zusammengestellt.

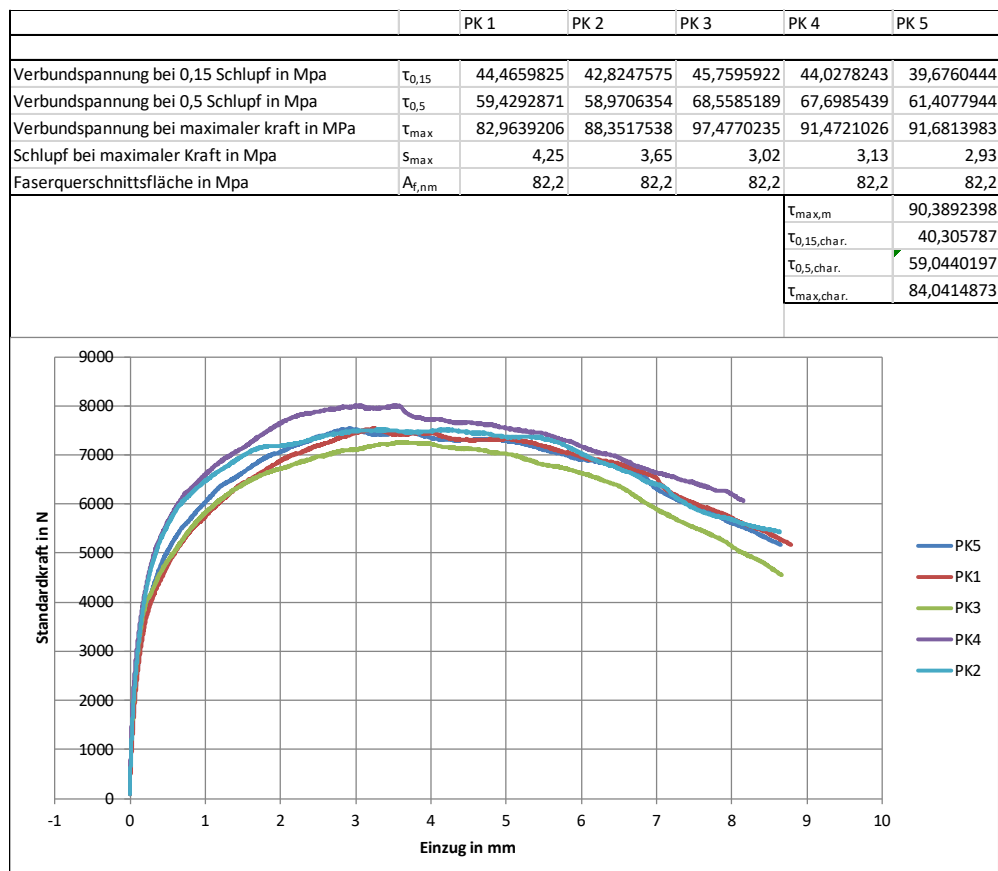


Abbildung 21: Darstellung der Verbundkraft-Schlupfbeziehung des FFS bei 20°C.

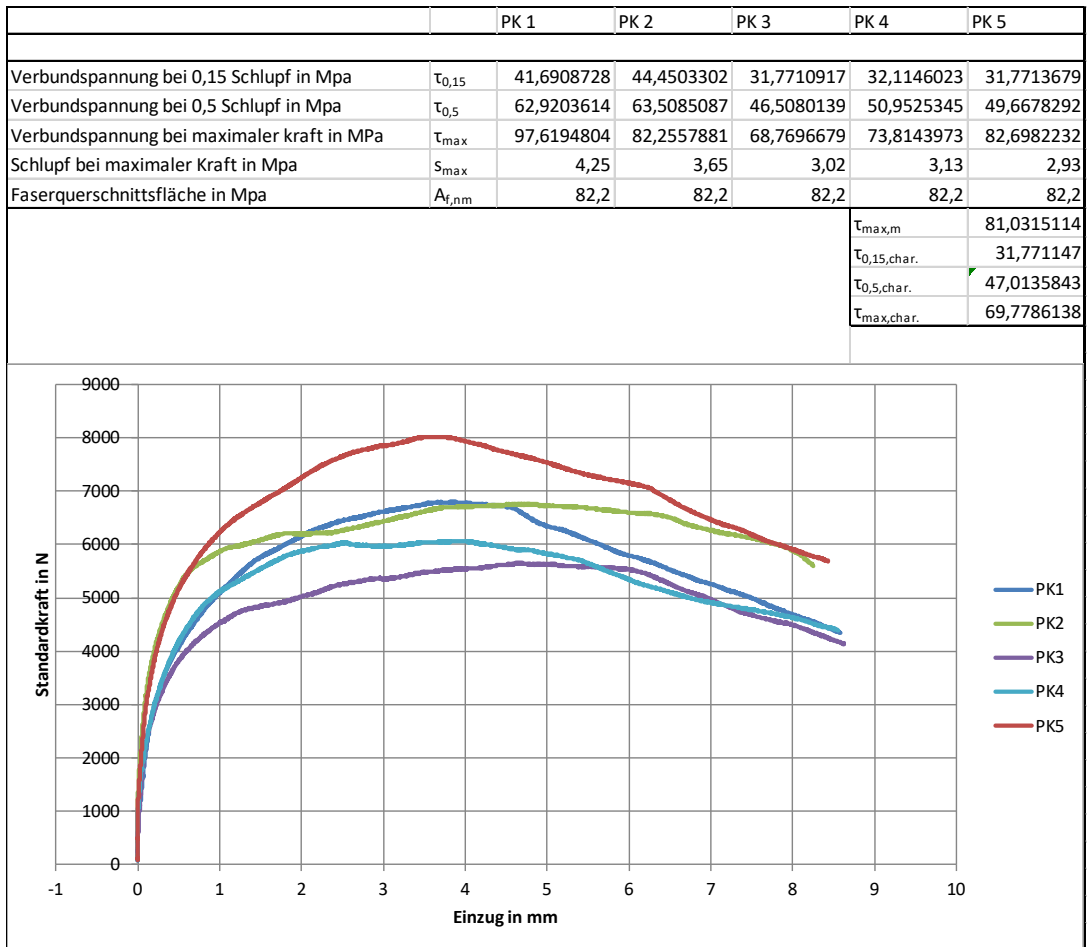


Abbildung 22: Darstellung der Verbundkraft-Schlupfbeziehung des FFS bei 60°C.

Die Verbundlänge wurde gemäß [16] sowie entsprechend der Vorgabe des Fünffachen des Stabdurchmessers auf 20 mm festgelegt. Auf dieser Basis ergeben sich die in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellten Verbundkraft-Schlupf-Beziehungen. Für den in der Bemessung maßgeblichen Schlupf-wert von 0,15 mm reduziert sich die charakteristische Verbundspannung bei einer Temperaturerhö-hung von 20 °C auf 60 °C um etwa 23 %.

## C NACHWEIS DER DAUERHAFTIGKEIT BEI 60°C (J&G FORMFLECHT-STAB)

### Bestimmung der Dauerzugfestigkeit

Abweichend vom Richtlinienvorschlag [16], der einen nur partiell eingebetteten Stab wie in Abbildung 23 im mittleren Prüfbereich vorsieht, wurden im vorliegenden Versuchsprogramm vollständig einbetonierte Prüfkörper verwendet.

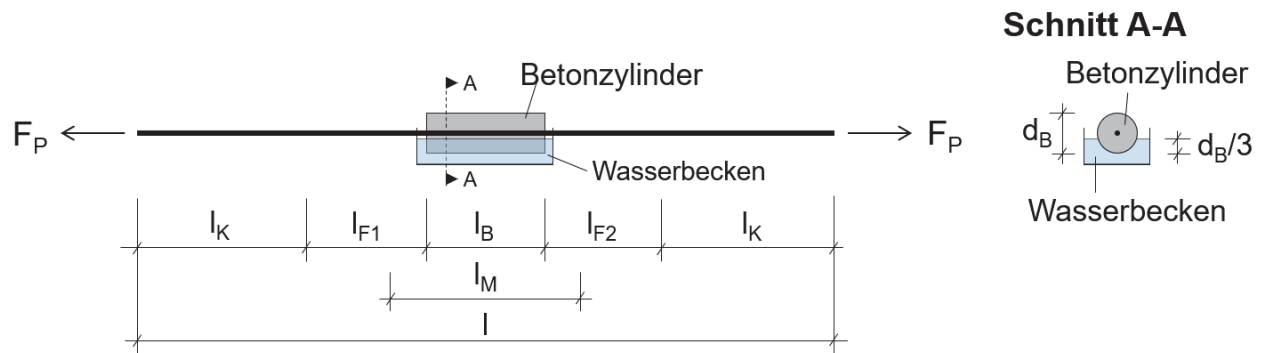


Abbildung 23: Schematische Darstellung des Dauerstandversuchs zur Ermittlung der Dauerzugfestigkeit gemäß [16]

Die Prüfkörper entsprechen in ihrer Geometrie und Lagerung jenen, wie sie zur Bestimmung der Dauerzugfestigkeit von Gitterbewehrungen (sog. Dehnkörper) eingesetzt werden und sind in Abbildung 24 dargestellt. Die korrespondierenden Kurzzeitversuche zur Festlegung des Lastniveaus wurden ebenfalls an baugleichen Prüfkörpern durchgeführt, um konsistente Randbedingungen zu gewährleisten.

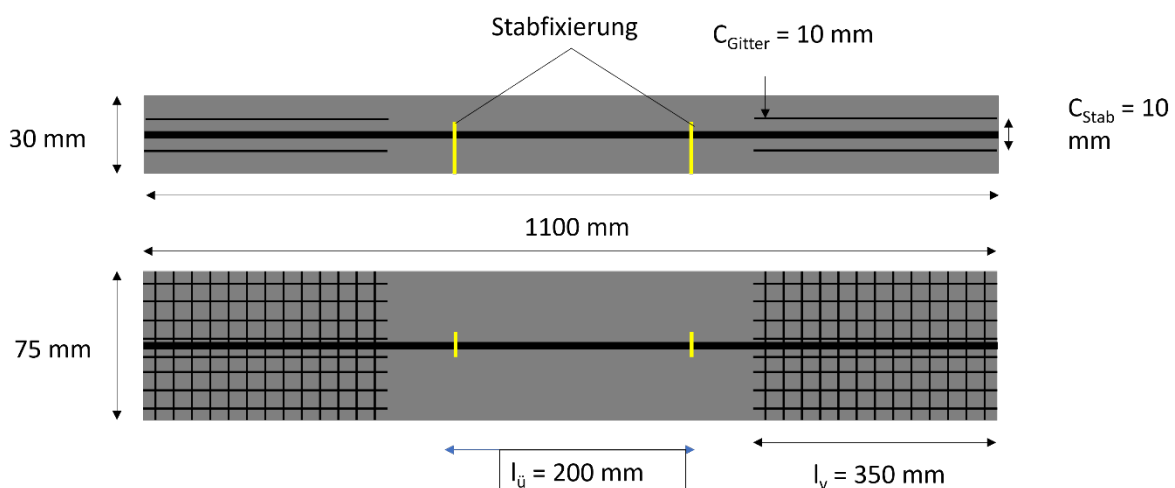


Abbildung 24: Schematische Darstellung der für die Dauerstandversuche verwendeten Prüfkörper.

Der folgende Überblick in Tabelle 7 zeigt den Prüfumfang der durchgeführten Dauerstandversuche:

Tabelle 7: Übersicht des Prüfprogramms zur Bestimmung der Langzeitzugfestigkeit des FFS.

Serienbezeichnung	Versuchsdauer in h	Anzahl Prüfkörper je Serie	Lastniveau in kN	Temperatur in °C
100 h J&G-DK-Zug	100	3	15	60
1000 h J&G-DK-Zug	1000	3	15	60
8800 h J&G-DK-Zug	(8800+)	3	15	60

Für jede Prüfserie wurden jeweils drei Prüfkörper untersucht. Das Lastniveau betrug einheitlich 15 kN, die Versuchstemperatur konstant 60 °C.

Die Dauerzugversuche wurden in speziell zur Bestimmung der Langzeitfestigkeit konstruierten Prüfeinrichtungen im Wasserbad bei 60°C durchgeführt. Als Grundlage der Versuche dienten die Kurzzeitversuche anhand dieser das Lastniveau für das Zeitstanddiagramm ermittelt wurde. Für die regressive Extrapolation der Festigkeit nach 100 Jahren wurde ein konservativer Wert von 65 % festgelegt und davon ausgegangen, dass keine kritische Materialschädigung stattfindet. Somit konnte im Zeitstanddiagramm in Abbildung 25 anhand der vereinfachten Zeit-Temperatur-Verschiebung nach [16] um insgesamt 2,1 Dekaden extrapoliert werden.

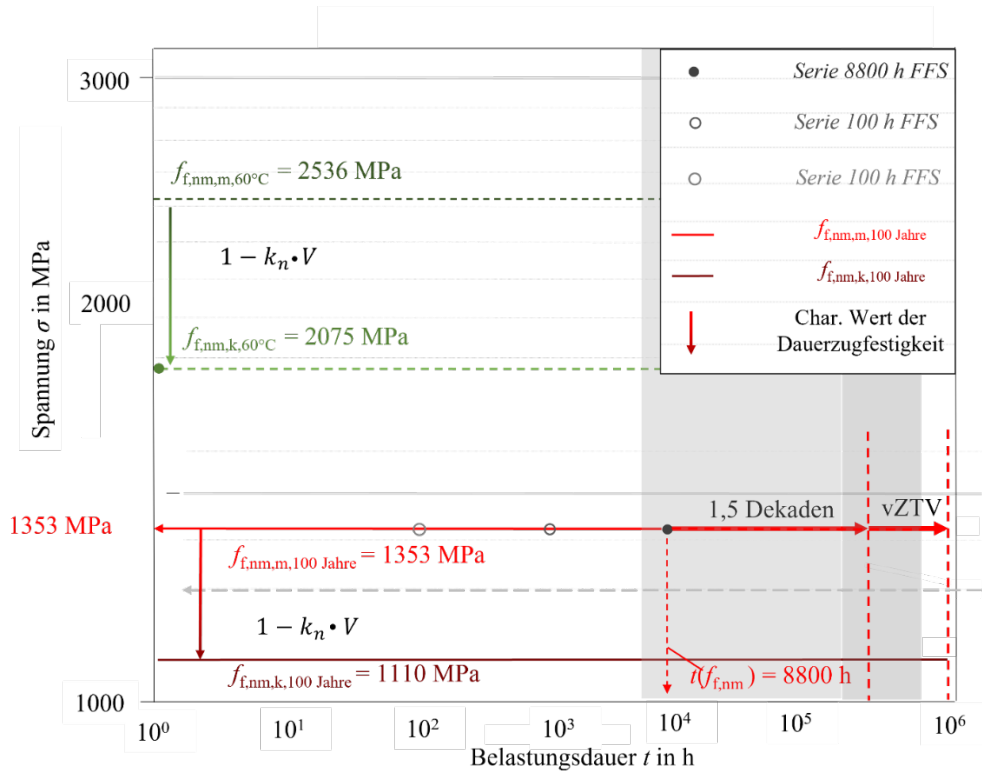


Abbildung 25: Zeitstanddiagramm der Zugfestigkeit FFS.

Bei einer Versuchsdauer von 8800 h konnte somit die Dauerhaftigkeit der Zugfestigkeit der FFS mit 53 % der charakteristischen Kurzzeitfestigkeit bei 60°C nach 100 Jahren festgelegt werden.

Die in Abbildung 26 dargestellten Ergebnisse der Dauerzugprüfung zeigen einen kontinuierlichen Anstieg der Verformungen über die gesamte Versuchsdauer von 8000 Stunden. Entgegen den ursprünglichen Erwartungen, dass die Verformungszunahme nach einer bestimmten Zeit abklingen würde, weist der Verformungsverlauf eine konstante Steigung auf.

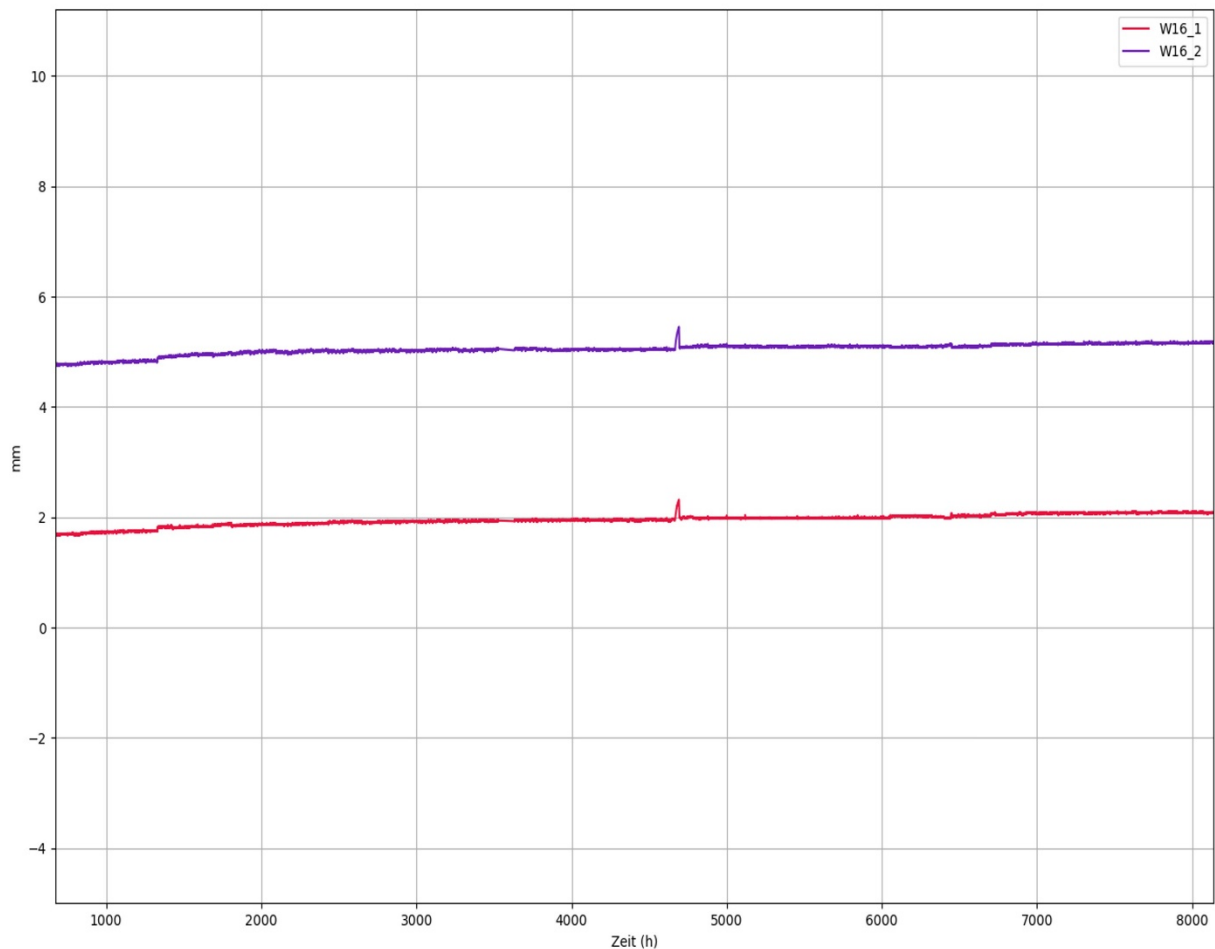


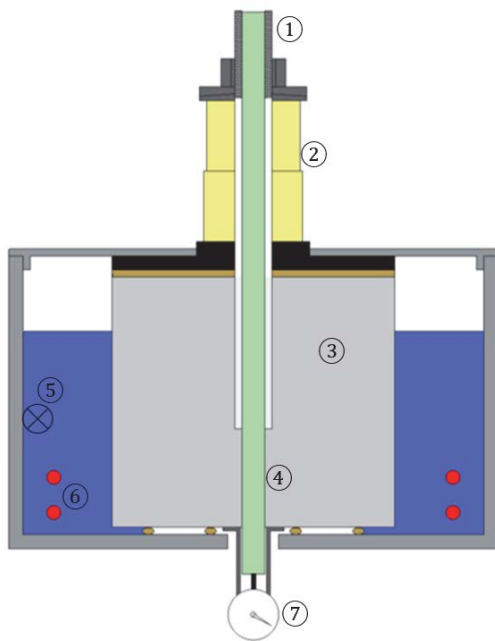
Abbildung 26: Verformungs-Zeit-Kurve des FFS PK 1 der Serie 8800 h.

Aufgrund dieses unerwarteten Verhaltens wurde entschieden, die Prüfkörper über die geplante Versuchsdauer hinaus unter Belastung zu belassen. Die Proben verbleiben daher weiterhin in den Prüfständen und stehen zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch unter kontinuierlicher Dauerlast. Das Verformungsverhalten wird in regelmäßigen Abständen überwacht und dokumentiert, um die langfristige Entwicklung der Materialeigenschaften weiter zu verfolgen und ein umfassendes Verständnis des Kriechverhaltens zu erlangen.

Diese verlängerte Versuchsführung ermöglicht es, wertvolle Erkenntnisse über das Langzeitverhalten der FFS zu gewinnen und die Dauerhaftigkeit des Materials unter realistischen Belastungsbedingungen zu bewerten.

### Bestimmung der Dauerverbundfestigkeit

Das Prüfverfahren zur Ermittlung der zeitabhängigen Verbundfestigkeit von nichtmetallischen Bewehrungsstäben unter Dauerlast erfolgte analog zur Kurzzeit-Verbundprüfung an einzelnen einbetonierten Stäben mit definierter Verbundlänge. Die Prüfkörpergeometrie entsprach dabei den Vorgaben aus Abschnitt 2.5 in [16], wobei ausschließlich Beton der Festigkeitsklasse C50/60 verwendet wurde.



- ① Lasteinleitungselement
- ② Hydraulikzylinder
- ③ Probekörper
- ④ Verbundbereich
- ⑤ Temperatursensor
- ⑥ Wasser mit Temperierung
- ⑦ Wegaufnehmer

Abbildung 27: Schematischer Aufbau des Verbunddauerstandversuchs nach [16].

Die Versuchsdurchführung umfasste Prüfungen bei 60°C. Die Probekörper wurden in temperiertem Wasser geprüft, wobei die Wassertemperatur über die gesamte Versuchsdauer mit  $\pm 2$  K konstant gehalten wurde. Die Dauerbelastung wurde so gewählt, dass das Verbundversagen innerhalb vorgegebener Zeitintervalle (10-100 h, 100-1.000 h, 1.000-4.400 h) erfolgte und musste im Mittel  $\pm 2\%$  aufrechterhalten werden.

Als zentrale Messgrößen wurden die Prüfdauer, die Prüfkraft und die Relativverschiebung am unbelasteten Stabende kontinuierlich aufgezeichnet. Die Auswertung erfolgte über die Darstellung von Kriechkurven. Für jedes Zeitintervall mussten mindestens drei gültige Prüfergebnisse vorliegen, um eine Regressionsanalyse durchführen zu können.

Die charakteristische Langzeit-Verbundfestigkeit  $f_{bk,RILEM,100a}$  wurde für eine Nutzungsdauer von 100 Jahren und eine Bemessungstemperatur von 40°C ermittelt.

In Abbildung 28 ist repräsentativ der Verlauf einer Kraft-Kriechkurve dargestellt. Aufgrund eines charakteristischen, kritischen Materialversagens, das sich durch progressiv zunehmende Kraft-Kriechkurven manifestierte, konnte die ursprünglich vorgesehene vereinfachte Zeit-Temperatur-Verschiebung (vZTV) nach [16] nicht wie geplant durchgeführt werden.

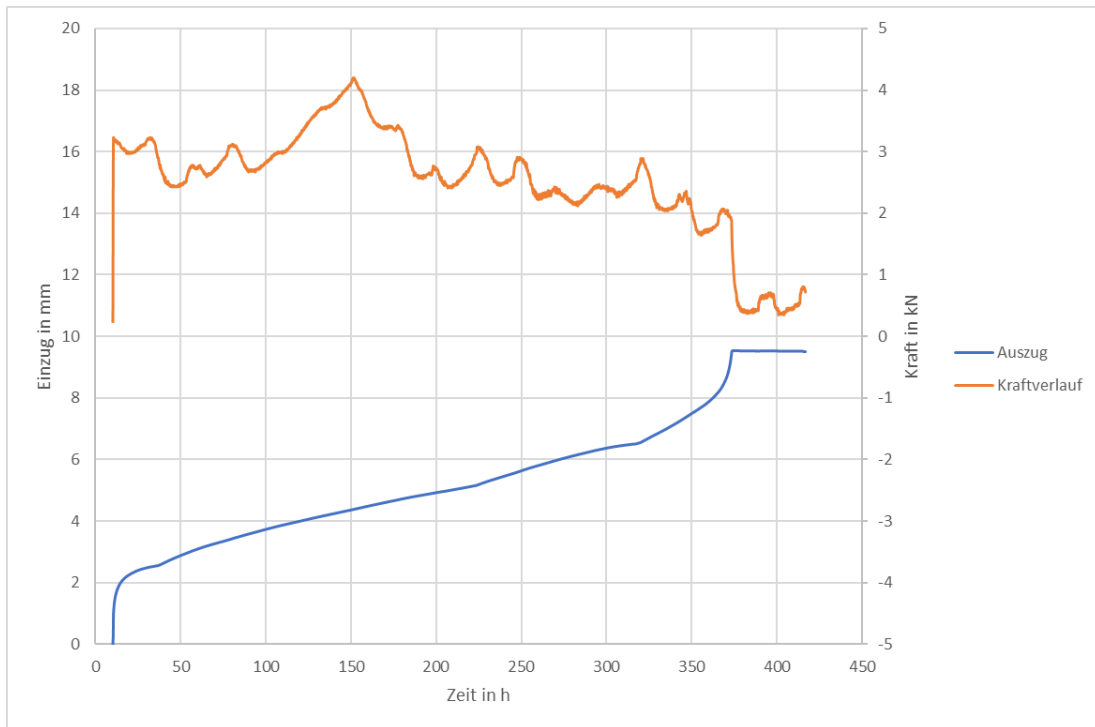


Abbildung 28: Zeit-Kriechkurve mit progressivem Charakter.

Die initial geplante Regressionsanalyse basierend auf den Kurzzeitversuchen bei 60 °C erwies sich als unbrauchbar. Die in der Richtlinie empfohlene Bemessungsgrundlage, eine angenommene Restfestigkeit von 80 % nach 100 Jahren, führte zu unrealistisch hohen Lastwerten im Versuch. Dies hatte zur Folge, dass erste Prüfkörper bereits nach wenigen Stunden versagten. Das Lastniveau wurde entsprechend Tabelle 8 angepasst.

Tabelle 8: Tabellarische Zusammenfassung der Lastniveaus für die Bestimmung der Dauerverbundfestigkeit des FFS.

Bestimmung der Lastniveaus (Dauerverbund FFS)				
Messwerte Versuche bei Temperatur in °C	60	Messwerte Kurzzeitversuche 60°		
Mittlere maximale Verbundkraft: $F_m$ in kN	6660		8020	
Variationskoeffizient berechnet: $\nu$	0,05246523		6760	
Anzahl der Einzelkurzzeitversuche: n	5		5650	
Quantillenfaktor: $k_n$	1,8		6070	
	0,1		6800	
<b><math>F_{5\%}</math>-Quantil (<math>\nu</math> aus RilI) in kN</b>	<b>5461,2</b>			
	%	Last in N		% Last in N
Abminderungsfaktor 4400 h:	87,213313	4762,89345	Prüfkörper versagte nach wenigen Minuten	Iterative Anpassung des Lastniveaus auf 60 % des
Abminderungsfaktor 1000 h	89,346218	4879,37566		
Abminderungsfaktor 100h	92,7649929	5066,08179		
Abminderungsfaktor 10h	96,314585	5259,93212		
				60 3276,72

Infolgedessen mussten die finalen Dauerstandversuche bei einem deutlich reduzierten Lastniveau von 3,2 kN durchgeführt werden. Die Ermittlung des Beiwerts  $a_{nmb}$  zur Berücksichtigung von Langzeiteffekten war unter den gegebenen Umständen daher nicht möglich. Gemäß [16] ist daher ein vollständiger Temperaturshift durchzuführen, der bei allen durchgeführten Zeitintervallen verschiedene Temperaturstufen fordert, um eine lineare Abhängigkeit der ertragbaren Last bei der vorgesehenen Zeitdauer von der Temperatur nachweisen zu können.

## D ZEITABHÄNGIGES VERHALTEN AUF BAUTEILEBENE

Es sollte Formbewehrung an ausgewählten Bauteilen unter Dauerlast untersucht werden. Die von der inforbeton GmbH hergestellten Hohlkörperträger wurden für 180 Tage in einem 3-Punktbiegeversuch belastet. Die Abmessungen der Probekörper waren  $0,27 \cdot 0,5 \cdot 2 \text{ m}^3$  und es wurden zwei verschiedene Bewehrungen untersucht. Ein Probekörper enthielt die von Johne & Groß GmbH umgeformte HTC 21/21-80 Gitterbewehrung und der andere Probekörper besaß die 3D-Bewehrung, die in Zusammenarbeit mit dem Institut für Textilmaschinen und textile Hochleistungswerkstofftechnik hergestellt wurde. Die maximale Tragfähigkeit der Träger wurde vorab untersucht und so wurde das Langzeitverhalten bei zwei verschiedenen Laststufen untersucht. Nach 28 Tagen Aushärten des Betons wurden die Träger mit 30% der maximal aufnehmbaren Kraft (für die 3D-Bewehrung betrug die erwartete Kraft 70 kN) für 28 Tage belastet, bevor als nächsten Schritt eine Belastung bis 70% der maximal aufnehmbaren Kraft für 124 Tage aufgebracht wurden. Ein Schema des Lastaufbringungs ist in Abbildung 29 zu sehen. Die Untersuchung erfolgte für die Träger übereinandergestapelt, wie in Abbildung 30 zu sehen ist. Die Verformung über die Zeit wurde mit zwei induktiven Wegaufnehmern an jedem Rand in Bauteilmitte und 15 cm zur linken und rechten Seite aufgezeichnet. Es wurden 4 Dehnmessstreifen je Träger – zwei am Obergurt und einer an jedem Steg – angebracht. Die Dehnung auf der Bewehrung wurde mit faseroptischen Sensoren gemessen. Bei der Aufbringung von 70% der maximalen Kraft versagten diese leider, sodass keine Daten zur Verfügung stehen. Die Probekörper wurden im Rahmen eines Folgeprojektes in einem Computertomografen, bei den gleichen Lastniveaus untersucht und anschließend bis zum Bruch getestet.

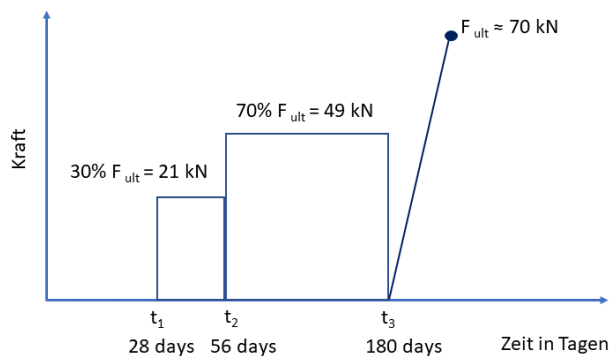


Abbildung 29: Laststufen zur Aufbringung der Last über 180 Tage.

Abbildung 30: 3-Punktbiegeversuch mit Dauerlast, oben Träger mit umgeformter Bewehrung, unten Träger mit 3D-Bewehrung.

Das in Abbildung 31 dargestellte Diagramm zeigt die Aufzeichnung der Kraft und Verschiebung mit der Zeit für den Träger mit umgeformter Gitterbewehrung.

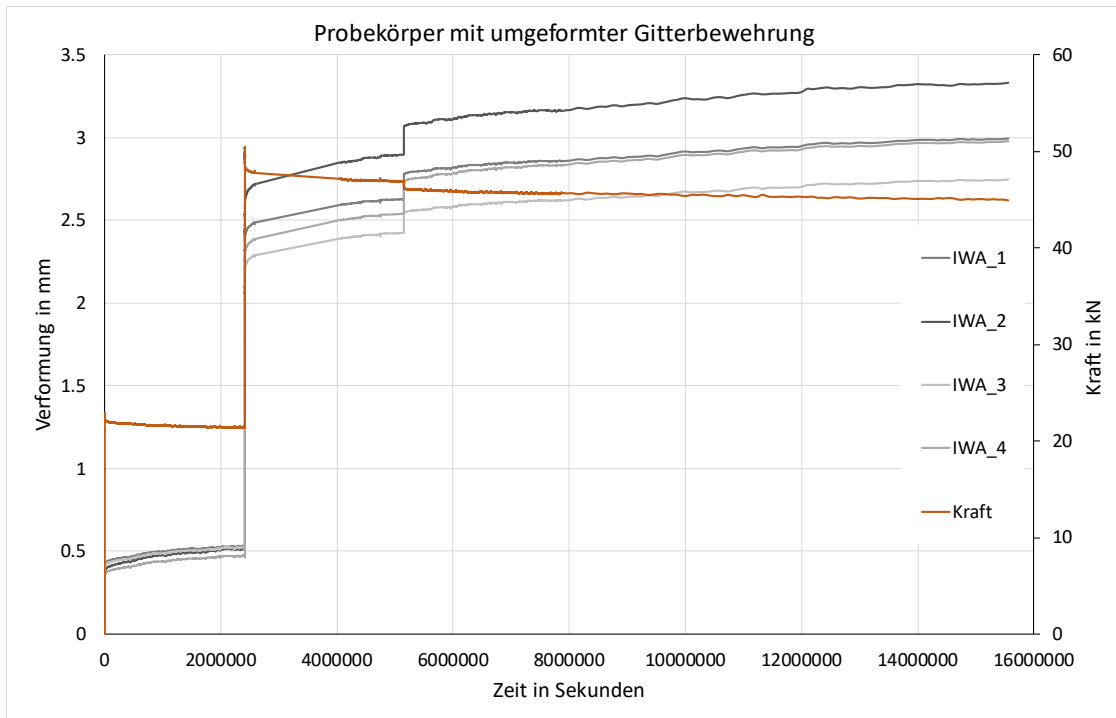


Abbildung 31: Entwicklung der Verformung und Kraft des Trägers mit umgeformter Gitterbewehrung über die Zeit von 180 Tagen.

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 32 eine kleinere Verformung bei beiden Laststufen.

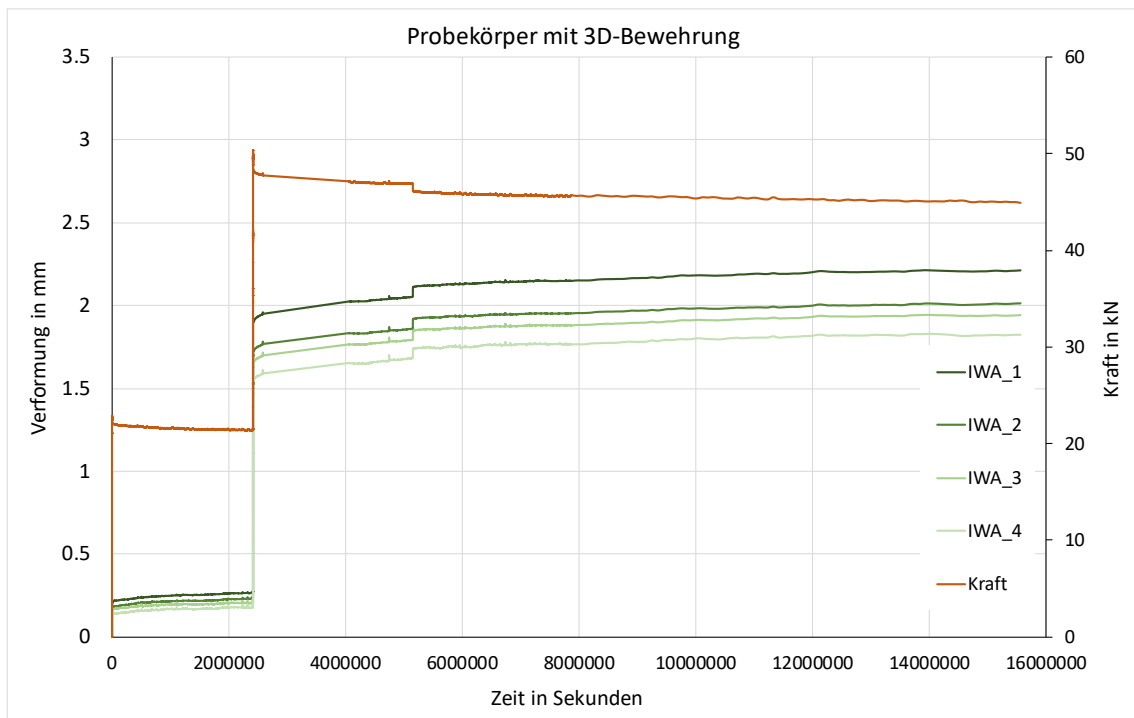


Abbildung 32: Entwicklung der Verformung und Kraft des Trägers mit 3D-Bewehrung über die Zeit von 180 Tagen.

## E EIGENSCHAFTEN DER VERWENDETEN BETONE

Es wurden zwei Betonsorten ausgewählt, die sowohl dem aktuellen Stand der Technik entsprechen als auch unterschiedliche Anwendungsbereiche abdecken: C30/37 für den Ortbetonbau und C50/60 für den Einsatz in Fertigteilwerken.

Dabei wurde gezielt auf den Einsatz extrem hochfester Betone verzichtet, um den Zementgehalt und damit den ökologischen Fußabdruck zu reduzieren. Gleichzeitig wurde darauf geachtet, dass die gewählten Mischungen gängig, normgerecht und in der Praxis breit anwendbar sind. Die Entwicklung der Mischungen erfolgte in enger Kooperation mit dem Projektpartner informbeton GmbH und wurde im Otto-Mohr-Laboratorium hinsichtlich ihrer Verarbeitung und Eignung getestet. Das Größtkorn wurde gemäß den Empfehlungen der [16] sowie in Abstimmung mit der Geometrie der Bewehrungselemente auf 8 mm limitiert, um eine problemlose Betonage zu gewährleisten.

Tabelle 9: Ermittlung der Druck und Biegezugfestigkeit der C50/60-Mischung.

Betonsorte: C50/60                      Prüfmaschine: ZD 100/1000  
 Prüfkörper: Prisma 160x40x40mm      Lagerung: Klimakammer  
 PK-Bearbeitung: -

Prüfkörper			P 1	P 2	P 3
Länge	L	mm	159,5	159,8	159,7
Breite	d <sub>1</sub>	mm	40,1	40,8	40,5
Dicke	d <sub>2</sub>	mm	39,7	39,9	40,0
Masse	m	kg	0,586	0,597	0,593
Fläche	A	mm <sup>2</sup>	1600,0	1600,0	1600,0
<b>Dichte</b>	<b>ρ</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	<b>2310</b>	<b>2290</b>	<b>2290</b>
<b>Ermittlung der Biegezugfestigkeit mit mittigem Lasteintrag</b>					
Abstand Auflagerrollen	l	mm	100	100	100
Bruchlast	F <sub>f</sub>	kN	3,15	3,12	2,29
<b>Biegezugfestigkeit</b>	<b>R<sub>f</sub></b>	<b>MPa</b>	<b>7,49</b>	<b>7,20</b>	<b>5,31</b>
<b>Mittelwert</b>	<b>R<sub>f</sub></b>	<b>MPa</b>	<b>6,7</b>		
<b>Ermittlung der Druckfestigkeit</b>					
Prüfkörper (Prismahälfte)			P 1 a	P 2 a	P 3 a
Bruchlast	F <sub>c</sub>	kN	123,54	125,53	125,79
<b>Druckfestigkeit</b>	<b>R<sub>c</sub></b>	<b>MPa</b>	<b>77,21</b>	<b>78,46</b>	<b>78,62</b>
Prüfkörper (Prismahälfte)			P 1 b	P 2 b	P 3 b
Bruchlast	F <sub>c</sub>	kN	123,89	122,74	121,94
<b>Druckfestigkeit</b>	<b>R<sub>c</sub></b>	<b>MPa</b>	<b>77,43</b>	<b>76,71</b>	<b>76,21</b>
<b>Mittelwert</b>	<b>R<sub>c</sub></b>	<b>MPa</b>	<b>77,4</b>		

75,76020995

0,949975548

0,012266982

Bemerkung:

Mittelwert aller Betondruckfestigkeiten		65,3	N/mm <sup>2</sup>						
Standardabweichung aller Betondruckfestigkeiten		11,6	N/mm <sup>2</sup>						
Nr.	Versuchstyp	Versuchsdatum	Betonalter bei Prüfung	Druckfestigkeitsklasse	erzielte Druckfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	Biegezugfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	E-Modul N/mm <sup>2</sup>	Datum Betonage	Lagerung
1	Eignungsprüfung Würfel C50/60	27.03.2023	28 d	C50/60	45,9	-	-	27.02.2023	Wasserlagerung
2	Dehnkörper C50/60	20.07.2023	28 d	C50/60	77,4	6,7	-	23.06.2023	3d in Schalung, 7d Wasserbad, 18d Klimakammer
3	Übergreifung 250 mm, 15 mm	10.11.2023	28 d	C50/60	68	6,96	-	13.10.2023	3d in Schalung, 7d Wasserbad, 18d Klimakammer
4	Übergreifung 250 mm, 25 mm	17.11.2023	28 d	C50/60	55,55	5,82	-	20.10.2023	3d in Schalung, 7d Wasserbad, 18d Klimakammer
5	Übergreifung 100 mm	21.11.2023	28 d	C50/60	70,13	7,23	-	24.10.2023	3d in Schalung, 7d Wasserbad, 18d Klimakammer
6	Übergreifung 300 + 400 mm	06.12.2023	29 d	C50/60	55,11	6,79	-	07.11.2023	3d in Schalung, 7d Wasserbad, 18d Klimakammer
7	Übergreifung 500 mm	08.12.2023	28 d	C50/60	76,19	7,34	-	10.11.2023	3d in Schalung, 7d Wasserbad, 18d Klimakammer
8	Hollow core beam Concrete	14.05-08.07.2024	28 d	C50/60	73,74	-	38922	5.04-10.06.2024	3d in Schalung, 7d Wasserbad, 18d Klimakammer

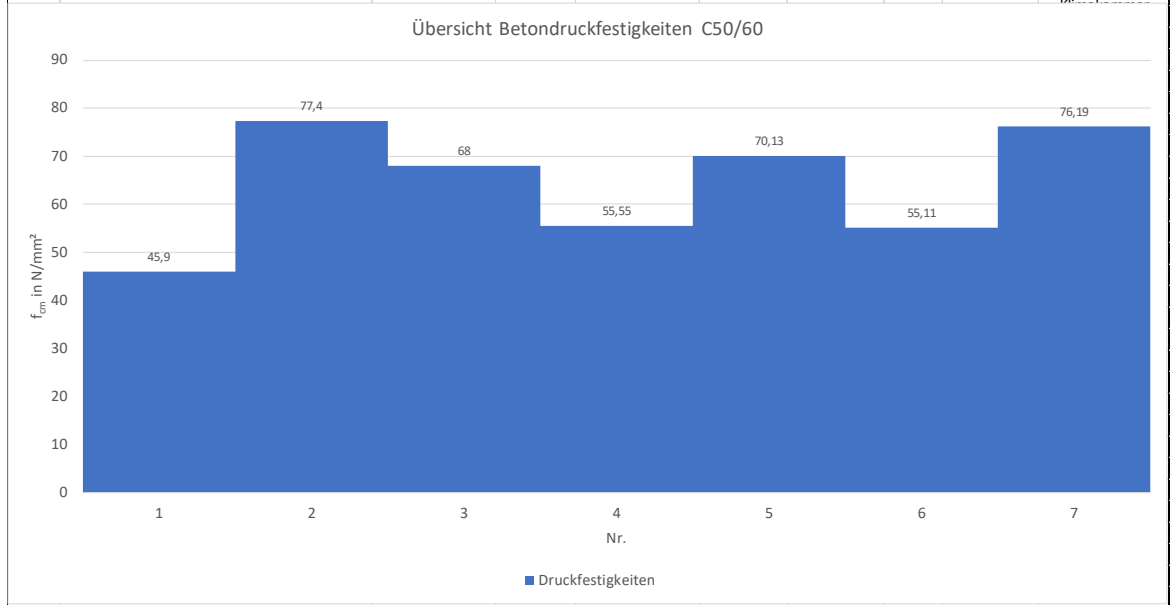


Abbildung 33: Übersicht der Betondruckfestigkeit verschiedener Betonchargen, C50/60.

RUBIN-ISC - Übersicht Betondruckfestigkeiten C30/37									
Mittelwert aller Betondruckfestigkeiten		30,6	N/mm <sup>2</sup>						
Standardabweichung aller Betondruckfestigkeiten		#DIV/0!	N/mm <sup>2</sup>						
Nr.	Versuchstyp	Versuchsdatum	Betonalter bei Prüfung	Druckfestigkeitsklasse	erzielte Druckfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	Biegezugfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	E-Modul N/mm <sup>2</sup>	Datum Betonage	Lagerung
1	Eignungsprüfung Würfel C30/37	27.03.2023	28 d	C30/37	30,6	-	-	27.02.2023	Wasserlagerung

Abbildung 34: Übersicht der Betondruckfestigkeit verschiedener Betonchargen, C30/37.

# F DATENBLÄTTER

## Tenax<sup>®</sup> FILAMENT YARN

Markenname	Produktionsstandort	Faserfamilie & Zug-eigenschaften	Präparations-eigenschaften	Filamentanzahl	Garnfeinheit (ohne Präparation)	Zusatz-Information	Zugfestigkeit [MPa]	Zug-E-Modul [GPa]	Bruchdehnung [%]	Filament-durchmesser [µm]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Präparation	Präparations-gehalt [%]
Tenax <sup>™</sup> -J	HTA40	E15	1K	67tex	15S		4100	240	1,7	7,0	1,77	EP	2,5
Tenax <sup>™</sup> -E	HTA40	E13	3K	200tex			4100	240	1,7	7,0	1,77	EP	1,3
Tenax <sup>™</sup> -E	HTA40	E13	3K	200tex	15Z		4100	240	1,7	7,0	1,77	EP	1,3
Tenax <sup>™</sup> -J/E	HTA40	E13	6K	400tex			4100	240	1,7	7,0	1,77	EP	1,3
Tenax <sup>™</sup> -E	HTA40	E13	6K	400tex	10Z		4100	240	1,7	7,0	1,77	EP	1,3
Tenax <sup>™</sup> -J	HTS40	E13	3K	200tex			4400	240	1,8	7,0	1,77	EP	1,3
Tenax <sup>™</sup> -J	HTS40	E13	6K	400tex			4400	240	1,8	7,0	1,77	EP	1,3
Tenax <sup>™</sup> -E	HTS40	F13	12K	800tex			4400	240	1,8	7,0	1,77	PU	1,0
Tenax <sup>™</sup> -E	HTS40	F13	12K	800tex	10Z		4400	240	1,8	7,0	1,77	PU	1,0
Tenax <sup>™</sup> -E	HTS40	F13	24K	1600tex			4400	240	1,8	7,0	1,77	PU	1,0
Tenax <sup>™</sup> -E	HTS40	F13	24K	1600tex	5Z		4400	240	1,8	7,0	1,77	PU	1,0
Tenax <sup>™</sup> -E	HTS45	E23	3K	200tex			4500	245	1,8	7,0	1,76	EP	1,2
Tenax <sup>™</sup> -E	HTS45	E23	3K	200tex	15Z		4500	245	1,8	7,0	1,76	EP	1,2
Tenax <sup>™</sup> -E	HTS45	E23	12K	800tex			4500	240	1,9	7,0	1,77	EP	1,3
Tenax <sup>™</sup> -E	HTS45	E23	12K	800tex	10Z		4500	240	1,9	7,0	1,77	EP	1,3
Tenax <sup>™</sup> -E	HTS45	P12	12K	800tex			4500	240	1,9	7,0	1,77	TP	0,5
Tenax <sup>™</sup> -E	STS40	E23	24K	1600tex			4300	250	1,7	7,0	1,78	EP	1,3
Tenax <sup>™</sup> -E	STS40	F11	24K	1600tex			4300	240	1,8	7,0	1,78	PU	0,17
Tenax <sup>™</sup> -J/E	STS40	F13	24K	1600tex			4300	240	1,8	7,0	1,78	PU	1,0
Tenax <sup>™</sup> -J/E	STS40	F13	48K	3200tex			4300	250	1,7	7,0	1,77	PU	1,0
Tenax <sup>™</sup> -E	STS40	E23	48K	3200tex			4300	250	1,7	7,0	1,78	EP	1,0
Tenax <sup>™</sup> -J	UTS50	F13	12K	800tex			5100	245	2,1	7,0	1,78	PU	1,0
Tenax <sup>™</sup> -J	UTS50	F22	12K	800tex	S		5100	245	2,1	7,0	1,78	PU	0,8
Tenax <sup>™</sup> -J	UTS50	F24	24K	1600tex	DCP		5100	245	2,1	7,0	1,78	PU	2,0
Tenax <sup>™</sup> -E	UTS50	F24	24K	1600tex	D		5100	245	2,1	7,0	1,78	PU	2,0
Tenax <sup>™</sup> -E	ITS50	F23	24K	1600tex	D		5100	265	1,9	7,0	1,80	PU	1,0
Tenax <sup>™</sup> -E	ITS55	E23	24K	1600tex			5100	280	1,8	7,0	1,75	EP	1,2
Tenax <sup>™</sup> -J	IMS60	E13	24K	830tex			5800	290	2,0	5,0	1,79	EP	1,3
Tenax <sup>™</sup> -E	IMS65	E23	24K	830tex			6000	290	2,1	5,0	1,78	EP	1,3
Tenax <sup>™</sup> -E	IMS65	P12	24K	830tex			6000	290	2,1	5,0	1,78	TP	0,8
Tenax <sup>™</sup> -E	IMS6L	E23	24K	830tex			5900	280	2,1	5,0	1,80	EP	1,3
Tenax <sup>™</sup> -J	UMS40	F23	24K	800tex	S		4700	390	1,2	4,9	1,79	PU	1,0
Tenax <sup>™</sup> -J	UMS45	F22	12K	385tex			4600	425	1,1	4,7	1,83	PU	0,8
Tenax <sup>™</sup> -J	HTS40	A23	12K	1420tex	MC		2900	230	1,3	7,5*	2,70	PU	1,3

\*inkl. 0,25 µm Nickel

- Zur optimalen Typenauswahl steht Ihnen unser Verkauf gerne zur Verfügung. Die angegebenen Werte sind Richtwerte. Für die Auslegung von Bauteilen fordern Sie bitte über unseren Verkauf eine Spezifikation an.
- Die Ausfuhr oder Verbringung von Kohlenstofffasern kann genehmigungspflichtig sein, abhängig von den Eigenschaften, der Endbestimmung und der Endverwendung.

TEIJIN LIMITED  
TEIJIN CARBON EUROPE GMBH  
TEIJIN CARBON AMERICA, INC.

customer@teijin.co.jp  
sales@teijincarbon.com  
info@teijincarbon.us

www.teijincarbon.com

Version 1.3  
2021-10-15  
Page 1/2

Abbildung 35: Datenblatt Fasereigenschaften Teijin Tenax Filament Yarn.

**Art. 285750**  
**HTC 21/21-80**



- Material, längs: Carbon 48K-umwirkt / Dichte: 1,78 g/cm<sup>3</sup>
- Material, quer: Carbon 48K / Dichte: 1,78 g/cm<sup>3</sup>
- Bindefaden: PES 167 dtex
- Gewicht: ca. 255 g/m<sup>2</sup> nicht beschichtet  
ca. 295 g/m<sup>2</sup> beschichtet

- Anzahl Fäden pro Meter  
längs: 39  
quer: 39
- Bewehrungsquerschnitt pro Meter  
längs: 71 mm<sup>2</sup>  
quer: 71 mm<sup>2</sup>

■ Prüfwerte in Anlehnung an DIN EN ISO 3341 (Mittelwert)

- Zugfestigkeit  
längs: 2976 N / mm<sup>2</sup> / 211 kN/m  
quer: 3054 N / mm<sup>2</sup> / 216 kN/m
- Dehnung  
längs: 1,71 %  
quer: 1,47 %

- Beschichtung: Acrylate / Einsatzbereich bis 80 Grad Celsius

- Gitteröffnung:  
längs: 22 mm  
quer: 22 mm

- Arbeitsbreite: 300 cm
- Arbeitslänge: nach Wunsch



Abbildung 36: Datenblatt HTC 21/21-80, Hitexbau GmbH.

## TECHNICAL DATASHEET

# ZOLTEK™ PX35 CONTINUOUS TOW

### DESCRIPTION

ZOLTEK PX35 continuous carbon fiber is manufactured from polyacrylonitrile (PAN) precursor. The consistency in yield and mechanical properties that are provided by large filament count strands gives the user the ability to design and manufacture composite materials with greater confidence and allows for efficient and fast buildup of carbon fiber reinforced composite structures.

ZOLTEK PX35 50K fibers are available with a variety of sizing formats for different composite processing methods and for compatibility with a wide range of standard resin systems. ZOLTEK quality focuses on spool to spool consistency yielding low coefficients of variation.

### APPLICATIONS

Wind energy, automotive, petroleum production, aviation, marine, industrial, other transportation, medical (including X-ray), sports and recreation, etc.

### RECOMMENDED USE

Any article or component benefiting from the unique properties of carbon fiber composites.



MATERIAL OVERVIEW	SI	US
Tensile Strength	4,137 MPa	600 ksi
Tensile Modulus	242 GPa	35 msi
Elongation	1.7%	1.7%
Electrical Resistivity	0.00155 ohm-cm	0.00061 ohm-in
Density	1.81 g/cc	0.065 lb/in <sup>3</sup>
Fiber Diameter	7.2 microns	0.283 mils
Carbon Content	95%	95%
Yield	267 m/kg	397 ft/lb
Textile Units	267 m/kg	33700 denier
Spool Weight	5.5 kg, 11 kg	12 lb, 24 lb
Spool Length	1,500 m, 3,000 m	1,640 yd, 3,280 yd

*The properties listed in this datasheet do not constitute any warranty or guarantee of values. This information should only be used for the purposes of material selection. Please contact us for more details.*



ZOLTEK Corporation  
3101 McKelvey Road | Bridgeton, MO 63044  
P: 314-291-5110 | www.zoltek.com

Abbildung 37: Datenblatt Fasereigenschaften Zoltek PX35.



# PRÜFBERICHT

## BRANDVERSUCH ZUR ERMITTLUNG DES FEUERWIDERSTANDES EINER CARBONBETONDECKE

<b>Aktenzeichen</b>	7.3/24010548
<b>Ausfertigung</b>	1 von 2
<b>Auftraggeber</b>	Technische Universität Dresden Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Massivbau 01219 Dresden
<b>Auftrag vom</b>	26.08.2024
<b>Zeichen</b>	Nazaib Ur Rehman
<b>Inhalt des Auftrages</b>	Ermittlung des Feuerwiderstandes einer Carbonbetondecke
<b>Prüfgegenstand</b>	Carbonbetondecke (Platte 1) mit den Maßen 5 m x 1 m x 0,27 m (L x B x H) mit dem reaktiven Brandschutzsystem (HENSOTHERM® 820 KS) auf der brandbeanspruchten Bauteilseite
<b>Prüfgrundlage</b>	Prüfung in Anlehnung an DIN EN 1363-1:2020-05 sowie DIN EN 1365-2:2015-02
<b>Prüfdatum</b>	12.12.2024
<b>Prüfort</b>	BAM Unter den Eichen 87 Haus 24 (Große Brandhalle)

Dieser Prüfbericht besteht aus Seite 1 bis 20.

Dieser Prüfbericht darf nur in vollem Wortlaut und ohne Zusätze veröffentlicht werden. Für veränderte Wiedergabe und für Auszüge ist vorher die widerrufliche, schriftliche Einwilligung der BAM einzuholen. Der Inhalt des Prüfberichts bezieht sich ausschließlich auf die untersuchten Gegenstände/Materialien.

## Allgemeines

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Fachbereich 7.3 Brandingenieurwesen, wurde von der Technischen Universität Dresden (TU Dresden), Institut für Massivbau, beauftragt, eine Feuerwiderstandsprüfung durchzuführen. Prüfgegenstand ist eine von der TU Dresden entwickelte Deckenplatte aus Carbonbeton. In Vorbereitung dieser Prüfung wurde die BAM mit Versuchen zur Beurteilung des Abplatzverhaltens des verwendeten Carbonbetons durch die TU Dresden beauftragt. Die Ergebnisse sind im Prüfbericht BAM 7.3/24008950 dokumentiert. Die gewonnenen Erkenntnisse führten zu dem Schluss, dass der verwendete Beton bei einer Brandbeanspruchung nach Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) abplatzt. Zur Vermeidung von Betonabplatzungen wurde die brandbeanspruchte Betonoberfläche der Carbonbetondecke durch die TU Dresden mit dem reaktiven Brandschutzsystem HENSOTHERM® 820 KS beschichtet. Diese Schutzmaßnahme hatte sich durch Vorabversuche an kleinen Prüfkörpern als geeignet herausgestellt.

## Abkürzungen

BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BRT	Brandraumthermoelement
DEP	Deckenprüfstand
MW	Mittelwert
PK	Probekörper
PKT	Probekörperthermoelement
TE	Thermoelement
RBS	Reaktives Brandschutzsystem

## Quellen

- [1] N. Ur Rehman *et al.*, *DEVELOPMENT OF CARBON-REINFORCED HOLLOW CORE SLAB*. 2023. doi: 10.5281/zenodo.8116760.

## Probekörperbeschreibung

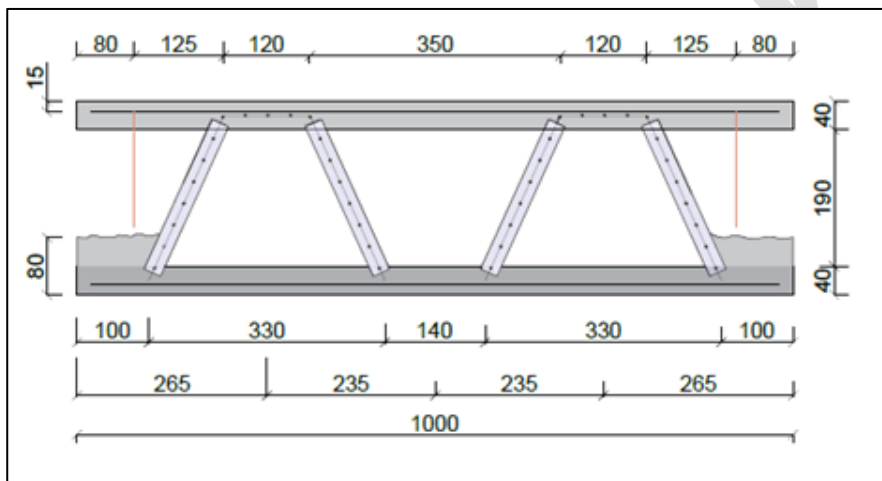
Bei dem zu prüfenden Probekörper handelt es sich um eine Carbonbetondecke. Die Maße des Bauteils betragen 5 m x 1 m x 0,27 m (Länge x Breite x Höhe). Der Bauteiltyp wurde von der TU Dresden entwickelt. Nachfolgende Informationen zur Carbonbetondecke basieren auf Angaben der TU Dresden. Der Deckenquerschnitt besteht aus einer dünnen Platte auf der Ober- und Unterseite, welche durch vier schräg gestellte, dünne Stege miteinander verbunden sind. Sowohl die beiden Plattenbereiche als auch die Stege enthalten eine Carbonbewehrung. Die Bewehrung besteht aus Carbonfasern, welche in einer Tränkungsmatrix aus Acrylat eingebettet sind. Für die obere Platte wurde das Textilgelege „SITGrid 0053“ und für die untere Platte „SITGrid E0125 muster“ verwendet. Die Betondeckung beträgt jeweils 15 mm. Zur Bewehrung der Stege wurde ein von der TU Dresden entwickelter Netzgitterträger eingesetzt. Die Herstellung des Netzgitterträgers und der Carbonbetondecke sind in [1] beschrieben. Die beiden Bauteilenden wurden über eine Länge von 300 mm vollflächig mit Beton ausgegossen. In diesen Bereichen sind auf der Deckenoberseite jeweils insgesamt vier Kranösen vorhanden, d.h. je zwei an jedem Bauteilende. Der Probekörper wurde vom Auftraggeber mit „Platte 1“ bezeichnet. Bei der Herstellung der Carbonbetondecke wurde an den Längsseiten der unteren Platte (offener Bereich) die Plattendicke auf 80 mm erhöht. Der Querschnitt der Carbonbetondecke mit der eingesetzten Bewehrung ist in Abbildung 1 dargestellt.

Beim Herstellungsprozess der Carbondecke wurden durch den Auftraggeber Mantelthermoelemente vom Typ K mit einem Durchmesser von 1,5 mm im Probekörper platziert. Diese wurden jeweils an den Stirnseiten der Carbondecke herausgeführt. Die Position der Thermoelemente ist in Abbildung 9 dargestellt.

Aufgrund der Abplatzneigung des verwendeten Betons wurde vom Auftraggeber das reaktive Brandschutzsystem HENSOTHERM® 820 KS auf der brandbeanspruchten Bauteilseite, d.h. unterer Plattenbereich, aufgebracht.

Detailangaben zum Probekörper sowie die von der TU Dresden angegebene Betonrezeptur sind der Tabelle 1 zu entnehmen. Der Probekörper mit Bemaßung ist in Abbildung 3 und eine Ansicht des Probekörpers mit Brandschutzsystem ist in Abbildung 2 dargestellt.

Durch die BAM wurden im Vorfeld des Brandversuches auf der nicht beflamten Oberfläche der Carbonbetondecke mehrere Thermoelemente entsprechend der Vorgaben nach DIN EN 1363-1:2020-5 appliziert. Die Positionen im Grundriss entsprechen den Temperaturmessstellen im Deckenquerschnitt. Zudem wurden in den oberen Plattenbereich vier Bohrungen eingebracht, um einerseits eine Absturzsicherung des Probekörpers im Versagensfall anzubringen und andererseits an diese Konstruktion Brandraumelemente anzuschließen. Diese Bohrungen wurden mit dem Auftraggeber abgestimmt.



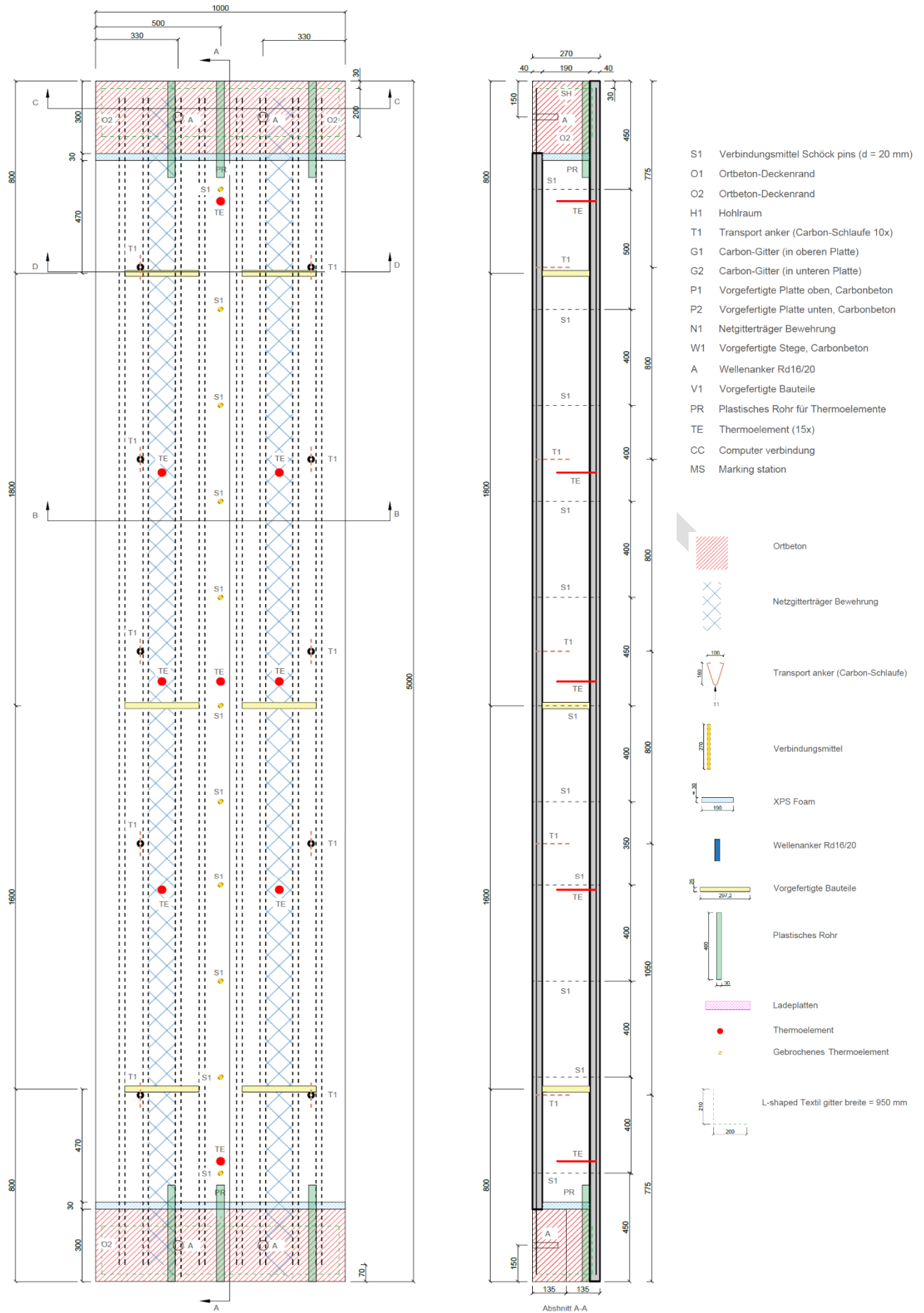
**Abbildung 1:** Querschnitt der Carbonbetondecke (Quelle TU Dresden) Angaben in mm



**Abbildung 2:** Probekörper mit Brandschutzbeschichtung (Quelle: TU Dresden)

**Tabelle 1:** Wesentliche Informationen zum Probekörper

<b>Carbonbetondecke</b>	
Produktbezeichnung	Platte 1
Hersteller	Betonwerk Oschatz GmbH in Zusammenarbeit mit TU Dresden
Abmessungen	L x B x H = 5000 mm x 1000 mm x 270 mm
Material	Carbonbeton
Betonage	16.08.2024 im Betonwerk Oschatz
Betondurckfestigkeit (Mittelwert)	$f_{c,cube} = 79,2 \text{ N/mm}^2$ (nach 39 Tagen) $f_{c,cube} = 80,7 \text{ N/mm}^2$ (nach 115 Tagen)
Angestrebte Festigkeitsklasse	C50/60
Carbonbewehrung	Textilgelege mit Netzgitterträger
Betondeckung	15 mm (obere und untere Platte)
Gewicht des Probekörpers	≈1500 kg
<b>Betonrezeptur der TU Dresden</b>	
W/Z Wert	0,36
Zement CEMII A-S 52,5R	461,25 kg/m <sup>3</sup>
Wasser	165,30 kg/m <sup>3</sup>
Kalksteinmehl	41,25 kg/m <sup>3</sup>
Gesteinskörnung Sand 0-1	325 kg/m <sup>3</sup>
Gesteinskörnung Sand 0-2	412,5 kg/m <sup>3</sup>
Gesteinskörnung Kies 2-8	987,5 kg/m <sup>3</sup>
Fließmittel Powerflow	5,25 kg/m <sup>3</sup>
<b>Brandschutzbeschichtung</b>	
Produktbezeichnung	HENSOTHERM® 820 KS (intumeszierender Anstrich) BETON-CARBONSPERRE (Grundierung)
Hersteller	Rudolf Hensel GmbH
Beschichtungsauftrag	KW 46, Beginn am 13.11.2024
Schichtdicke (Mittelwert)	0,75 mm (Grundierung + intumeszierender Anstrich)
Zulassung	Z-19.11-2196
<b>Konditionierung</b>	
Zeitraum 1	111 Tage Werkshalle Oschatz Hallenklima beheizt
Lieferung PK	05.12.2024
Zeitraum 2	7 Tage Prüfhalle BAM Hallenklima beheizt
Konditionierungszeit	118 Tage gesamt



**Abbildung 3: Drauf- und Seitenansicht des Probekörpers (Quelle: TU Dresden)**

## Prüfaufbau

Für die Durchführung der Brandprüfung wurde, der in der Großen Brandhalle des Fachbereiches 7.3 Brandingenieurwesen befindliche, Deckenprüfstand verwendet (siehe Abbildung 4). Dieser Prüfstand ermöglicht die Beflammung von horizontalen raumabschließenden Bauteilen. Der Prüfstand besteht im Wesentlichen aus der Brandkammer (4 m x 4,12 m x 1,5 m) für die thermische Belastung und einem hydraulischen Belastungssystem für die gleichzeitige mechanische Belastung des Probekörpers. Die Beflammung wird durch 8 Ölgebläsebrenner (je 460 kW) und die mechanische Belastung durch 4 servohydraulische Zylinder (je 1000 kN) realisiert. Dieses Prüfgerät erfüllt die Anforderungen der Norm DIN EN 1363-1:2020-5.

Aufgrund der Bauteilbreite von 1 m konnte der Prüfaufbau mit einer Halbkammer (Südkammer) des Brandraumes realisiert werden. Hierzu wurde eine Trennwand in den Deckenprüfstand eingebaut. Das statische System für die mechanische Belastung des Probekörpers entspricht einem Vierpunktbiegeversuch. Die Auflagerung der Carbonbetondecke erfolgte auf der Ost- und Westseite des Deckenprüfstandes auf Rollenlager. Der Probekörper wurde mittels eines Hallenkrans unter Nutzung der im Probekörper befindlichen Kranösen mittig auf der Südkammer auf den Auflagern positioniert. Die Hohlräume an den Längsseiten der Deckenplatte (siehe Abbildung 2) wurden mit Hochtemperaturdämmstoff und darin eingebetteten Vermiculiteformstücken verschlossen (siehe Abbildung 5). Den Brandraumabschluss neben dem Probekörper bildet beidseitig jeweils eine Ytong-Deckenplatte, welche auf einen am Ofenrand befindliche Hochtemperaturdämmstoff aufgelegt wurde. Zwischen Probekörper und Ytong-Platten wurde ebenfalls Hochtemperaturdämmstoff als Fugenverschluss verwendet. Als Brandraumthermoelemente wurden 4 Plattenthermoelemente symmetrisch nach DIN EN 1363-1:2020-5 im Brandraum angeordnet. Diese wurden mit Hilfe von Durchgangsbohrungen in den Ytongplatten positioniert.

Bei der Konfiguration des Vierpunktbiegeversuches wurden die Positionen der Auflager sowie der Lasteinleitungsbereiche von den vorausgegangenen Versuchen des Auftraggebers (TU Dresden) zur Bestimmung der Bruchlast im Kaltfall übernommen. Damit ist eine Vergleichbarkeit von Kalt- und Brandversuchen gegeben.

Die Verformungsmesseinrichtung, bestehend aus 4 Temposonics, wurde an einer zum Prüfstand gehörigen Haltevorrichtung montiert und war konstruktiv von der Belastungseinrichtung entkoppelt. Die Sensoren wurden paarweise in der Mitte des Probekörpers und an den Enden des Lastverteilerträgers montiert. Details zum Prüfaufbau sind in den Abbildungen 6 und 7 zeichnerisch dargestellt. Abbildung 8 zeigt eine Ansicht des kompletten Prüfaufbaues mit dem Probekörper vor der Brandprüfung.

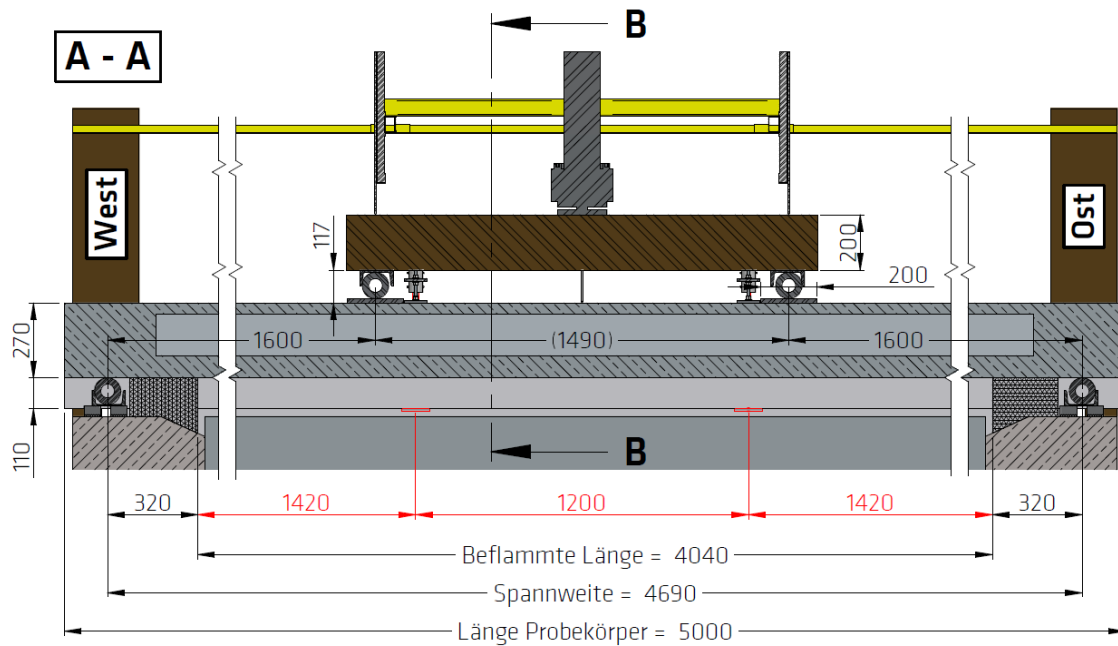
Detailangaben zu den Positionen der Wegaufnehmer für Verformungen und aller Thermoelemente innerhalb und außerhalb des Probekörpers sind in Abbildung 9 zusammengefasst.



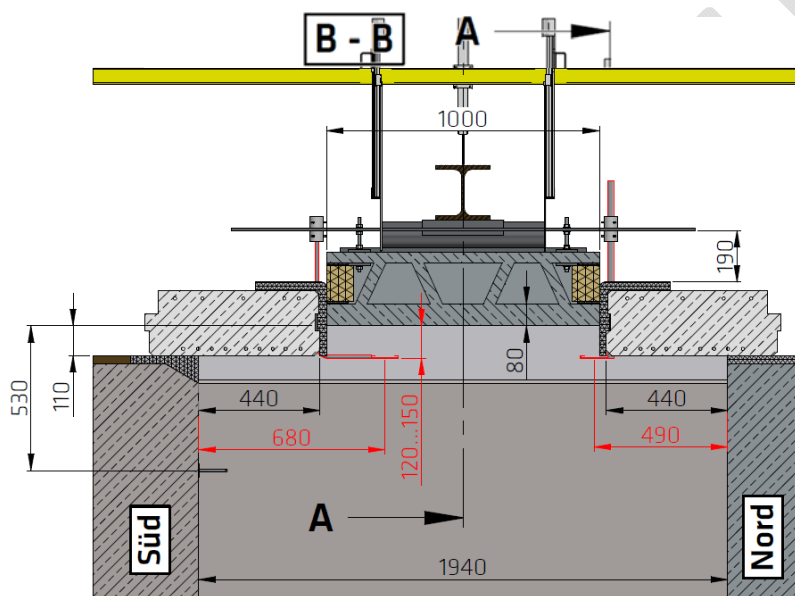
**Abbildung 4:** Ansicht Deckenprüfstand (DEP) komplett mit Ytong-Platten verschlossen



**Abbildung 5:** Ansicht Nord-Ost-Seite Probekörper (PK noch nicht auf Auflager positioniert)



**Abbildung 6:** Prüfaufbau (Seitenansicht)



Bauteile der Lasteinleitung:

HEB 200 L = 1700 mm  
 U-Profil UNP 120 x 55 L = 300 mm  
 Stahlblech 15 mm 200 x 900 mm  
 Stahlrohr  $\varnothing$  95 x 22 L = 600 mm

Bauteile Auflager:

Stahlrohr  $\varnothing$  95 x 22 L = 1000  
 U-Profil UNP 120 x 55 L = 1000 mm

**Abbildung 7:** Prüfaufbau (Schnittdarstellung B-B), Querschnitt untere Platte im inneren Bereich 40 mm statt 80 mm dick (siehe Abbildung 1)



**Abbildung 8:** Prüfaufbau mit Probekörper vor der Brandprüfung

## Brandprüfung

Der Probekörper wurde am 12.12.2024 in Anlehnung an DIN EN 1365-2:2015-02 und DIN EN 1363-1:2020-05 in dem in Abbildung 4 abgebildeten Prüfstand getestet. Die Randbedingungen entsprachen dabei im Wesentlichen den Normforderungen. Es gab Abweichungen zum Prüfverfahren bzw. den Prüfbedingungen bei der Ermittlung des Temperaturverhaltens auf der unbeflammten Probekörperseite. In Abbildung 8 ist der komplette Versuchsaufbau vor dem Brandversuch abgebildet. Die Beflammung des Probekörpers erfolgte einseitig von unten nach der in DIN EN 1363-1:2020-05, Abschnitt 5.1, vorgegebenen Solltemperaturkurve. Die Erwärmung des Brandraumes erfolgte durch vier horizontal angeordnete Heizölbrenner unter Verwendung von Heizöl. Die Messung und Steuerung der Brandraumtemperatur erfolgte gemäß DIN EN 1363-1:2020-05. Art und Typ der Brandraumthermoelemente und Prüfkörperthermoelemente entsprechen den Vorgaben nach DIN EN 1363-1:2020-05.

Während der Brandprüfung wurde der Probekörper mit einer konstanten mechanischen Prüflast beansprucht. Die Prüflast von 60 kN, wurde vom Auftraggeber vorgegeben und in Stufen von 10 kN vor Beginn der Brandbeanspruchung aufgebracht. Die mechanische Belastung wurde über die gesamte Prüfdauer bis zum Versagen des Probekörpers kraftgeregelt konstant gehalten.

Die während der Prüfung beobachteten Veränderungen innerhalb und außerhalb des Prüfofens wurden protokolliert und sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Druckverhältnisse auf der brandzugewandten Seite wurden während der Prüfung entsprechend DIN EN 1363-1:2020-05, Abschnitt 5.2, eingestellt und überwacht. Die Umgebungstemperatur in der Prüfhalle wurde zu Beginn und während der Prüfung entsprechend DIN EN 1363-1:2020-05, Abschnitt 5.6, gemessen und aufgezeichnet. Sie betrug zu Beginn der Prüfung 22 °C.

Das Bauteilversagen ereignete sich nach 28 Minuten. Zu diesem Zeitpunkt war die Deckenplatte nicht mehr in der Lage die Prüflast aufzunehmen, weshalb die mechanische Belastung vom Probekörper entfernt wurde. Die Beflammung wurde noch bis zur 35. Minute fortgesetzt und der Brandversuch dann beendet. In Abbildung 10 ist der Probekörper von der nicht beflamten Seite und in Abbildung 11 von der beflamten Seite nach 20 Minuten Prüfzeit dargestellt. Abbildung 12 zeigt den Prüfkörper nach Ende des Brandversuchs im noch eingebauten Zustand. Nach der Entfernung der seitlichen Wärmedämmung, konnte eine Rissbildung vorwiegend im mittleren Bereich des Probekörpers festgestellt werden. In diesem Bereich liegt eine kontante Momentenbeanspruchung aus der aufgetragenen Prüflast vor. Die Risse durchziehen den Probekörper vertikal und sind mit einer Breite von ca. 2 mm am stärksten in der unteren Platte des Probekörpers ausgeprägt. An der nicht beflamten Oberfläche der Carbonbetondecke sind lediglich Haarrisse zu erkennen. Betonabplatzungen sind im Brandversuch nicht aufgetreten. Das auf der Plattenunterseite applizierte reaktive Brandschutzsystem ist aufgeschäumt und verascht (weiß).

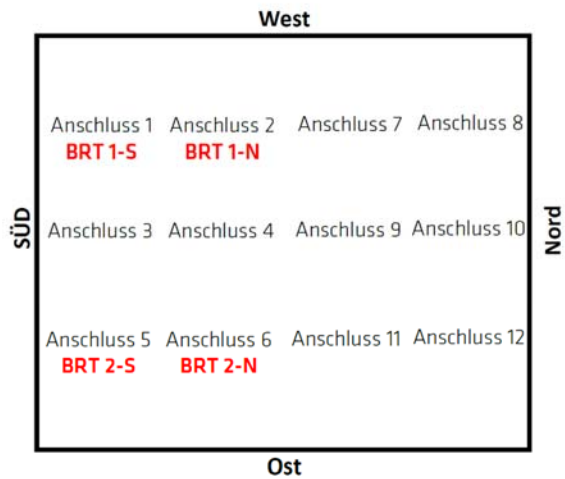
Versuchsdatum: PK 1 = 12.12.2024

Last: PK 1 = 60 kN max. Durchbiegung (Geschwindigkeit): ca. 215 mm (9,6 mm/min)

Anschluss	BRT		Bemerkung
1	1-S	1966*	Lanze gebogen, horiz.
2	1-N	1141*	Lanze gerade, horiz.
3	-	-	-
4	-	-	-
5	2-S	1144*	Lanze gerade, horiz.
6	2-N	1967*	Lanze gebogen, horiz.
7	-	-	-
8	-	-	-
9	-	-	-
10	-	-	-
11	-	-	-
12	-	-	-

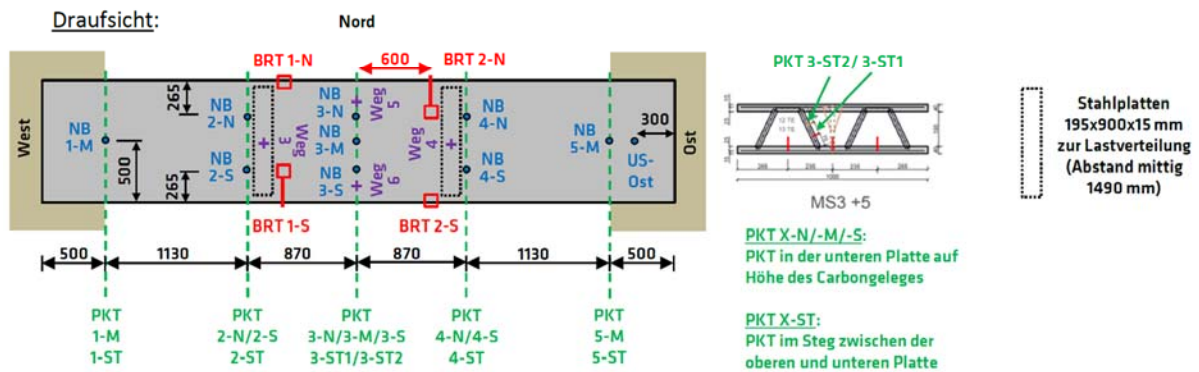
\* Nummer des DAkKS-Kalibrierzertifikats  
# PKT bei PK1 nicht vorhanden/defekt

Ansicht in Brennersteuerung (DEP von oben):



Kanal	Bez. BAM (TU D)	Bemerkung
65	R1	Raumtemperatur 1
66	R2	Raumtemperatur 2
67	-	-
68	PKT 1-ST (15 TE)	Innen-Thermoelemente, Austritt aus dem Probekörper auf der Westseite
69	PKT 2-ST (14 TE)	
70	PKT 1-M (9 TE)	
71	PKT 2-S (8 TE)	
72	PKT 2-N (7 TE)	
73	PKT 3-S (6 TE)	Innen-Thermoelemente, Austritt aus dem Probekörper auf der Ostseite
74	PKT 3-M (5 TE)	
75	PKT 3-N (4 TE)	
#76	PKT 4-S (3 TE)	
77	PKT 4-N (2 TE)	
78	PKT 5-M (1 TE)	Nicht beflamte Seite, Bündel Ausgleichsleitungen auf der Westseite
79	-	
80	-	
81	NB 1-M	
82	NB 2-S	
83	NB 2-N	
84	NB 3-S	
85	NB 3-M	
86	NB 3-N	
87	NB 4-S	
88	NB 4-N	
89	NB 5-M	Nicht befl. Seite, Bündel Ausgleichsl. auf Ostseite
90	US-Ost	
91	-	-
92	PKT 3-ST1 (13 TE)	Innen-Thermoelemente, Austritt aus dem Probekörper auf der Ostseite
#93	PKT 3-ST2 (12 TE)	
94	PKT 4-ST (11 TE)	
95	PKT 5-ST (10 TE)	
96	-	-

Vom PKT-Anschlusskasten bis DEP sind jeweils 8 Ausgleichsleitungen zu einem Strang gebündelt



Hinweis: Die untere Platte des Probekörpers ist an den Längsseiten 80 mm dick.

Abbildung 9: Kanalbelegung und Positionierung der Thermoelemente und Wegmessung

**Tabelle 2:** Beobachtungen während der Prüfung

Prüfzeit [min]	Beobachtungen nicht beflamnte Seite	Beobachtungen beflamnte Seite
0	-	Beflammungsstart
1	-	alle Brenner gezündet, gutes Flammenbild; Reaktion des reaktiven Brandschutzsystems (RBS) setzt ein (Blasenbildung)
5	Zunahme der Durchbiegung sichtbar	RBS vollflächig verfärbt (grau/schwarz)
10	Verlangsamung der Zunahme der Durchbiegung	Punktuellder Beginn der Veraschung des RBS
12	-	Beginn netzförmiger Rissbildung im RBS
20	-	Fortschreiten der Veraschung des RBS, bereits vorhandenes Rissnetz prägt sich weiter aus
25	Bruchgeräusche wahrnehmbar, keine Risse an der oberen Platte des Probekörpers	-
27	-	Kleinere Risse im RBS verschließen sich wieder
28	verstärkte Bruchgeräusche	
28	Schlagartige Erhöhung der Durchbiegung, Versagen, Umschalten in Wegregelung	Keine Veränderung an der Oberfläche des RBS, kein Abfallen des RBS, kein Abplatzen des Betons
28	Beginn Rauchaustritt an den seitlichen Plattenrändern	-
35	Beflammungsende, Brenner aus	



**Abbildung 10:** Probekörper nach 20 min Prüfzeit (nicht beflamnte Seite, Blick aus Nord-Ost)



**Abbildung 11:** Probekörper nach 20 min Prüfzeit (beflammte Seite, Blick aus Süd-Ost)



**Abbildung 12:** Probekörper nach Prüfungsende im eingebauten Zustand (Blick aus Nord-Ost)

### **Prüfresultate**

Die Prüflast von 60 kN wurde vor Beginn der Brandprüfung in 10 kN Schritten über eine Zeit von 12 Minuten aufgebracht. Dabei erreichte die Durchbiegung in der Plattenmitte einen Wert von 42,7 mm, siehe Abbildung 13. Das zusätzliche Gewicht aus der Lasteinleitungsstruktur blieb dabei unberücksichtigt. Den Verlauf der Durchbiegungsmessungen während der Brandprüfung und die konstant geregelte Prüfkraft sind in Abbildung 14 dargestellt. Das Versagen des Probekörpers und das Erreichen der Tragfähigkeit ereignete sich nach der 28. Minute. Der Raumabschluss und die Wärmedämmung blieben gewahrt. Das Erreichen der Tragfähigkeit im Brandfall ist durch die Überschreitung der zulässigen Durchbiegungsgeschwindigkeit nach DIN EN 1363-1: 2020-05, Abschnitt 11, gekennzeichnet. Die Prüflast konnte nach der 28. Minute nicht mehr aufgenommen werden. Die maximal zulässige Durchbiegung wurde nicht erreicht, da aus Gründen des Schutzes des Personals und der Prüftechnik beim Versagen in Wegregelung umgeschaltet wurde, um damit den kompletten Bruch der Deckenplatte und dessen Herabfallen in den Prüfstand zu verhindern.

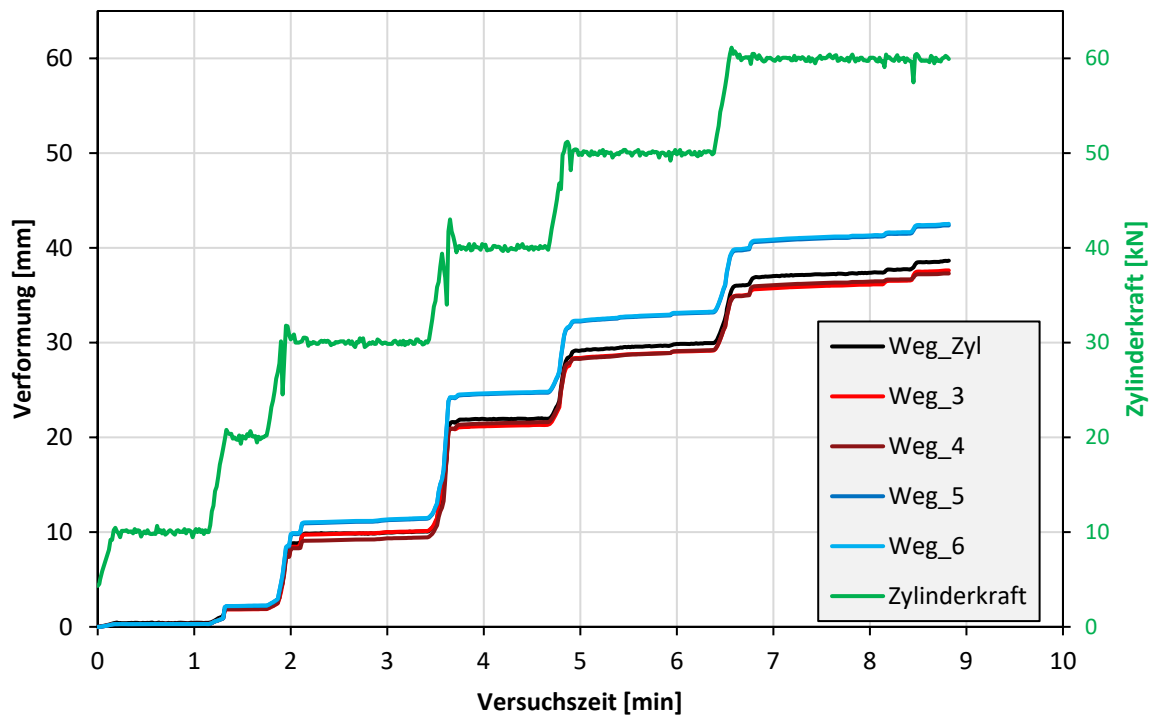


Abbildung 13: Darstellung des zeitlichen Verlaufes der Lastaufbringung

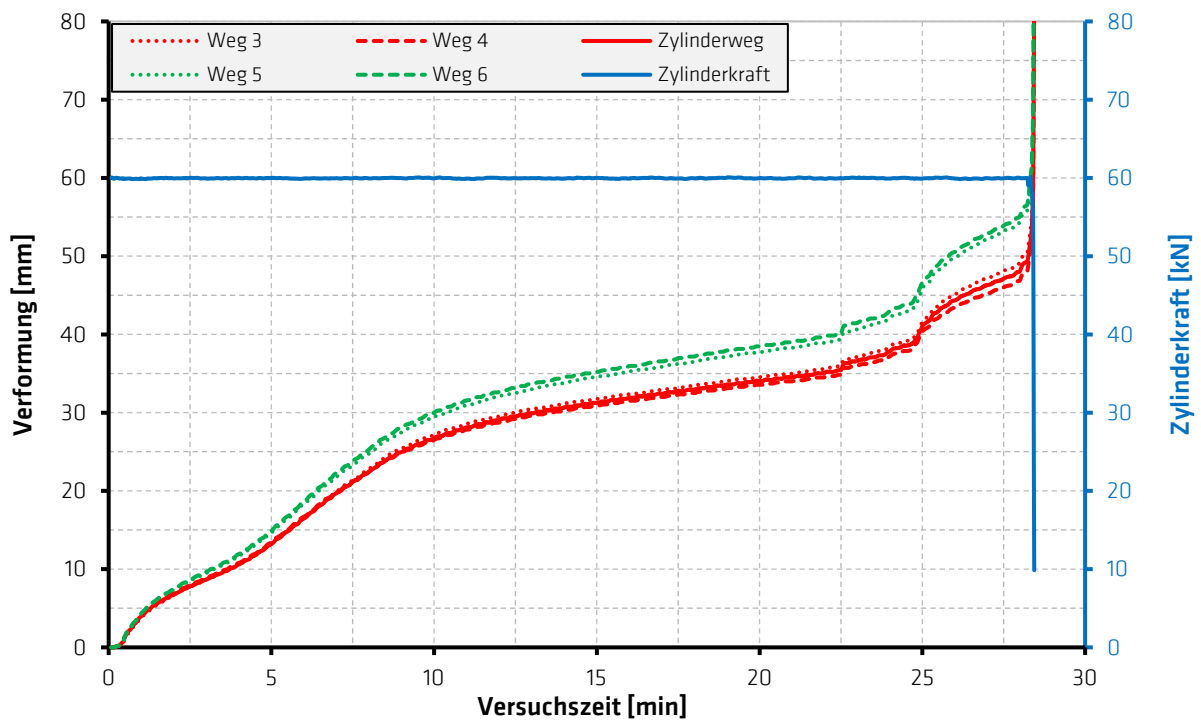


Abbildung 14: Darstellung des zeitlichen Verlaufes der Prüfkraft und Verformung

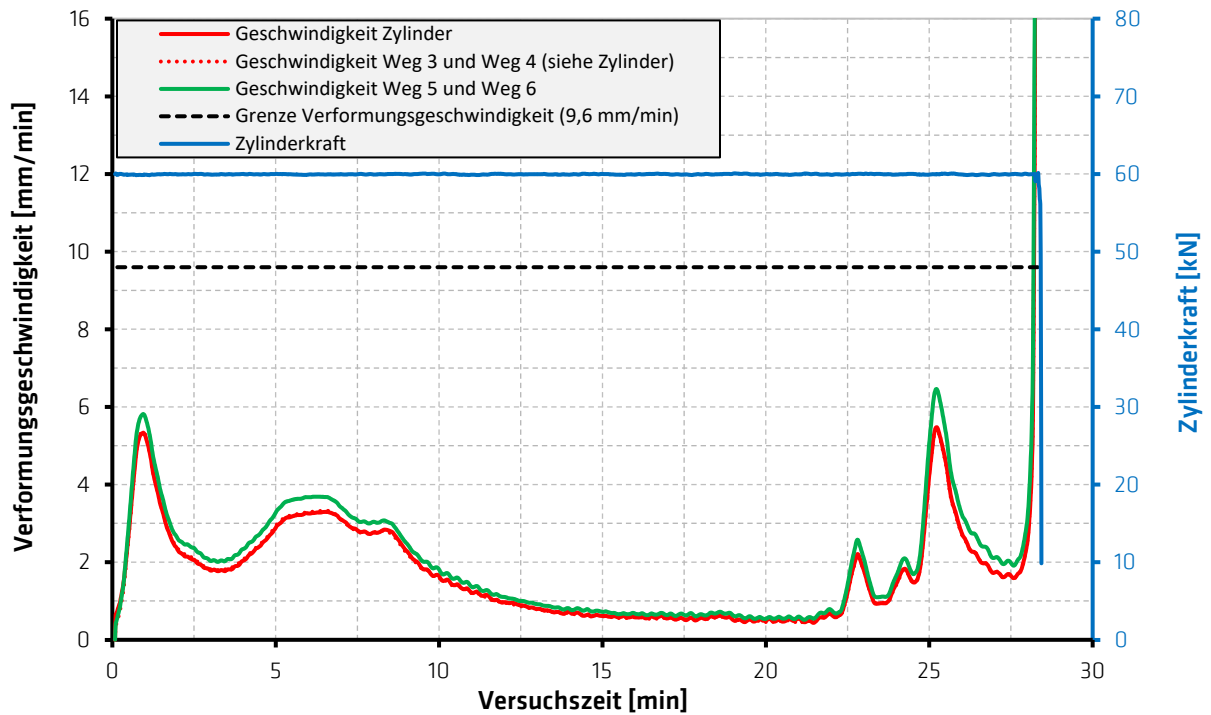


Abbildung 15: Darstellung des zeitlichen Verlaufes der Verformungsgeschwindigkeit

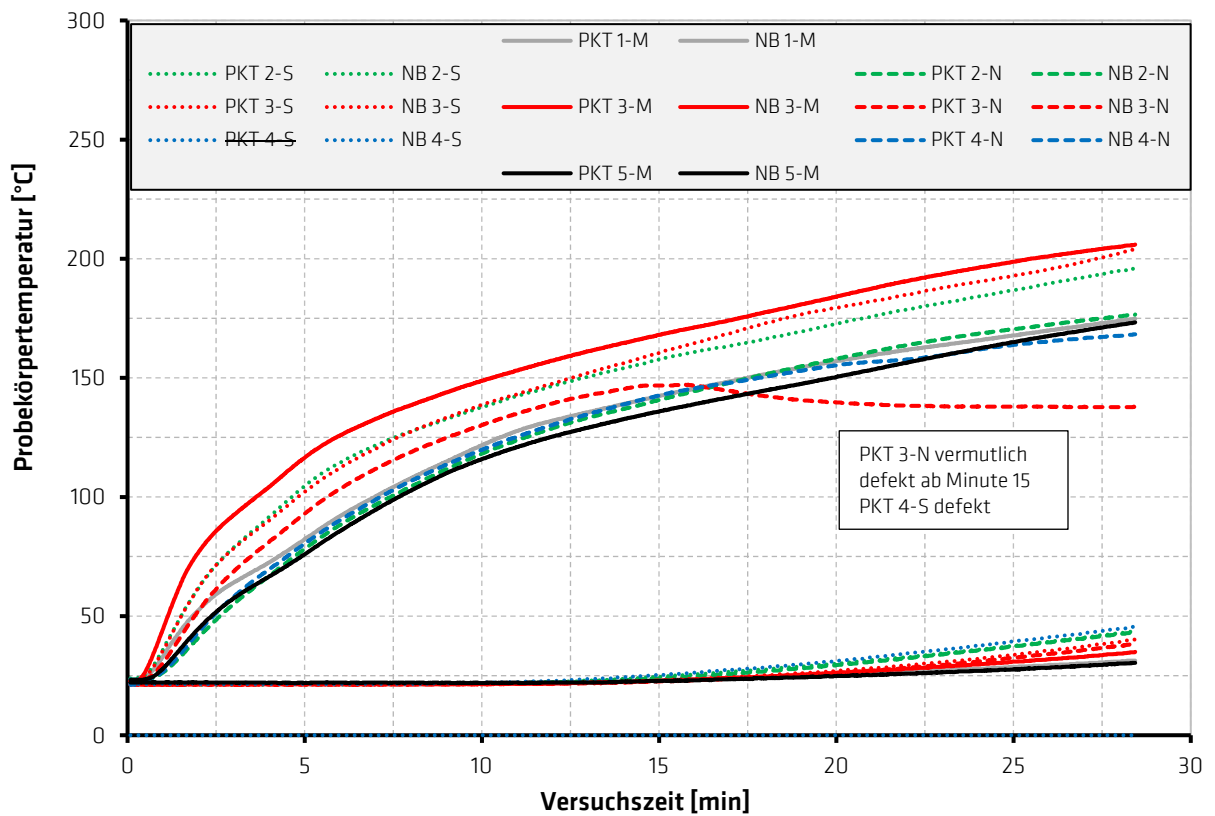
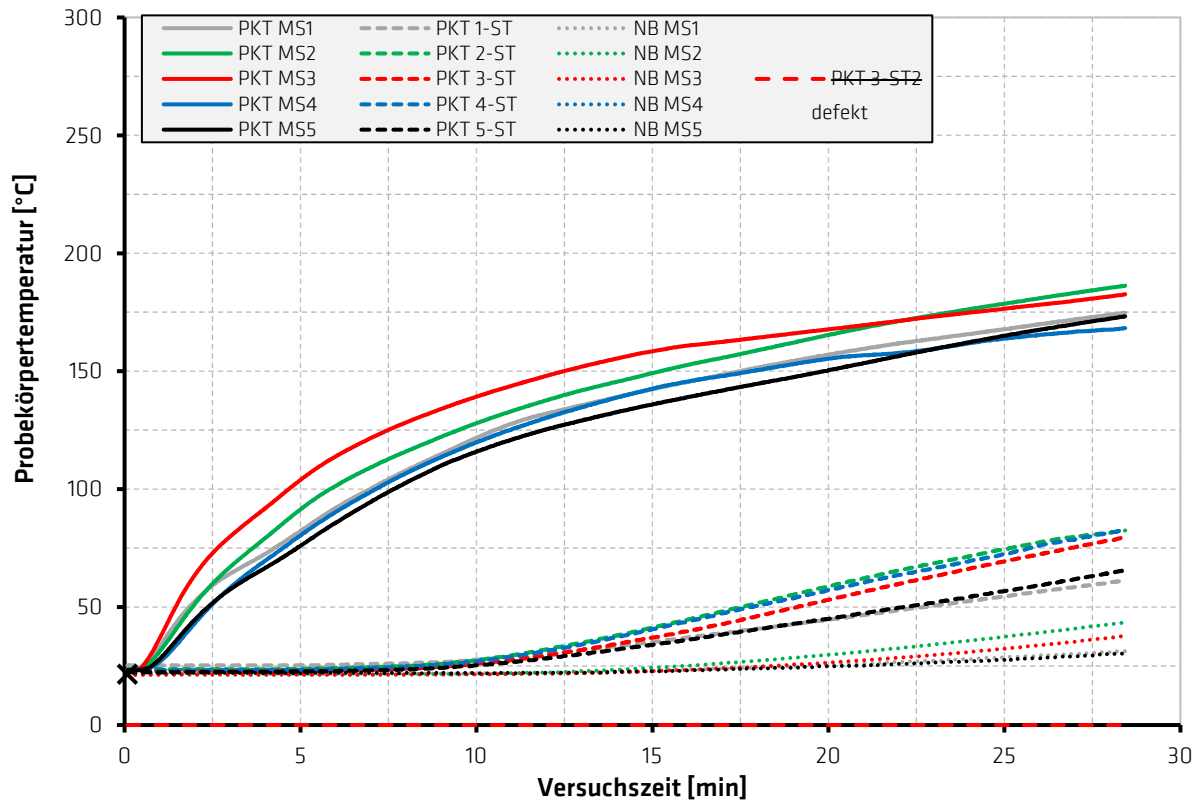
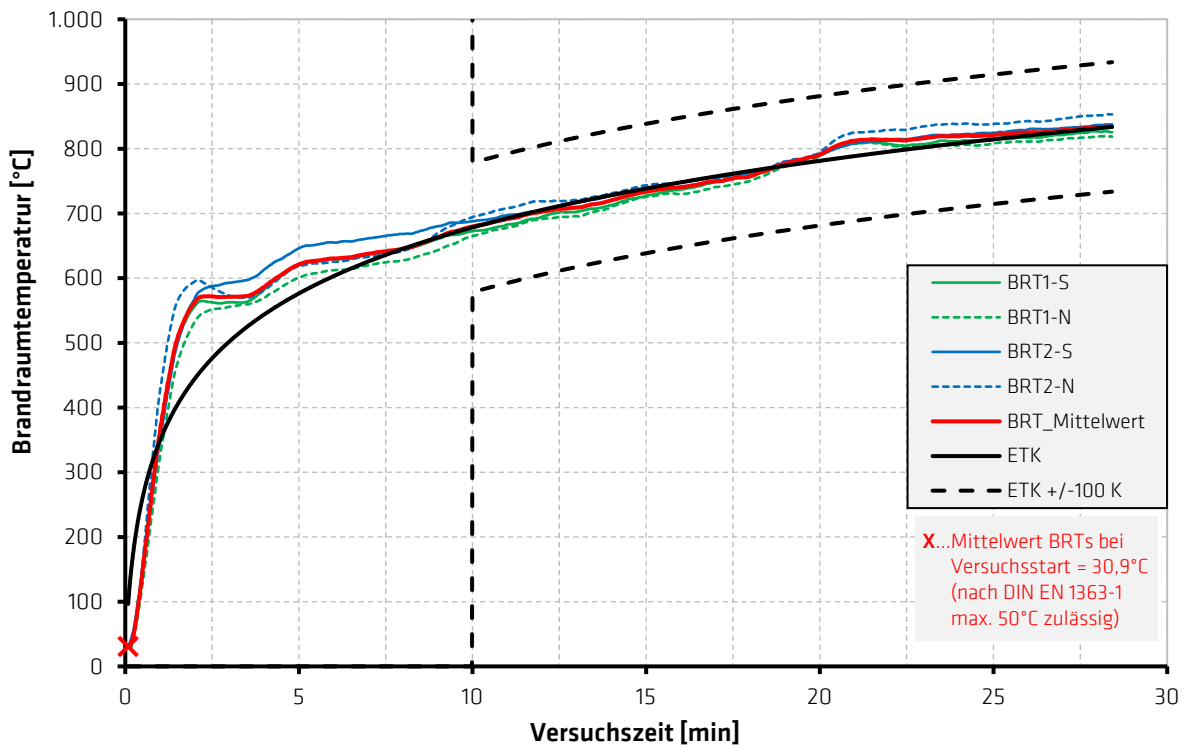


Abbildung 16: Temperaturverlauf der inneren PK-Elemente und der unbeflammten Seite des PK



**Abbildung 17:** Temperaturverlauf der Messtellen-Mittelwertgruppen im Inneren der unteren Platte der Carboneckplatte (PKT MS), in den Stegen (PKT ST) und auf der nicht beflamten Seite (NB MS)



**Abbildung 18:** Temperaturverlauf der Brandraumraumtemperaturen (BRT)

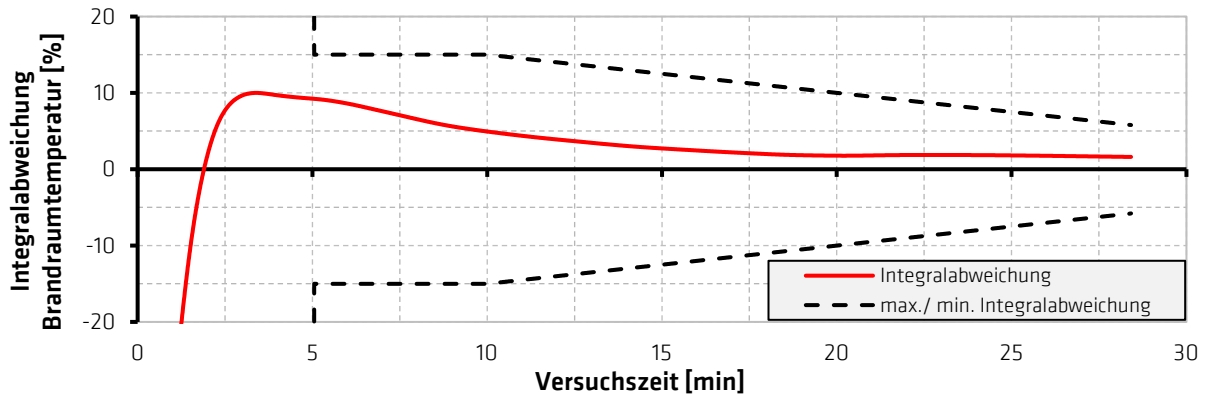


Abbildung 19: Darstellung des integralen Verlaufes des Energieeintrages im Brandraum

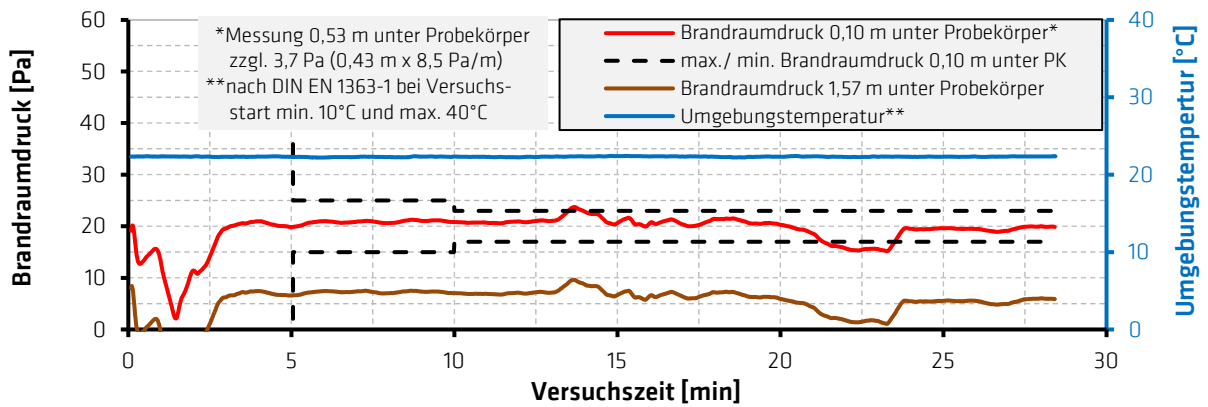


Abbildung 20: Darstellung des zeitlichen Verlaufes des gemessenen Brandraumdruckes



Abbildung 21: Ansicht des Probekörpers mit seitlicher Wärmedämmung nach Brandprüfung (Blick aus Richtung Nord)



**Abbildung 22:** Ansicht des Probekörpers ohne seitlicher Wärmedämmung nach der Brandprüfung (Blick aus Richtung Nord-West)



**Abbildung 23:** Detailansicht in Feldmitte nach der Brandprüfung (Blick aus Richtung Nord)



**Abbildung 24:** Ansicht der beflamten Seite des Probekörpers nach der Brandprüfung (Blick aus Richtung Nord-West)

**Tabelle 3:** Darstellung der Prüfbedingungen

Normforderung		Messungen vor der Prüfung	Vergleich der Anforderungen mit den Prüfbedingungen
Anfangstemperatur Umgebung	25°C ± 15°C	22°C	erfüllt
Anfangstemperatur Innen-Thermoelemente	25°C ± 15°C	23°C	erfüllt
Differenz zwischen Umgebung und Innen Thermoelementen	max. 5°C	1°C	erfüllt
Anfangstemperatur Ofen-Thermoelemente	30°C ± 20°C	31°C	erfüllt
Distanz Ofen-Thermoelemente zum Prüfkörper	100 mm ± 50 mm	100 mm ± 50 mm	erfüllt

Die von der TU Dresden entwickelte Carbonbetondecke wurde durch das Aufbringen des reaktiven Brandschutzsystems wirkungsvoll vor Betonabplatzungen geschützt. Das Versagen des Probekörpers und das Erreichen des Tragfähigkeitskriteriums nach DIN EN 1363-1:2020-05 trat in der **28. Minute** auf. Hierbei sind die gewählten Prüfrandbedingungen und der Aufbau des Probekörpers zu beachten. Ein Versagen hinsichtlich der Raumabschlusskriterien sowie ein Versagen der Wärmedämmung wurde bis zum Beflammungsende nach 35 Minuten nicht festgestellt. Die wichtigsten durch Messung ermittelten Kenngrößen sind in Tabelle 4 zusammengefasst. In Tabelle 5 sind die erzielten Leistungsparameter dokumentiert.

**Tabelle 4:** Wichtige gemessene Größen

Prüftechnisch ermittelte Größen	gemessene Werte
Prüfkraft	60 kN
max. Durchbiegung nach Lastaufbringung	42,7 mm
max. Durchbiegung während Beflammung	101,7 mm
max. Temperaturerhöhung eines Einzelwertes auf nicht beflammter Seite	25 K
max. Erhöhung des Temperaturmittelwertes auf nichtbeflammter Seite	18 K
max. Temperatur eines Einzelwertes im Inneren des Probekörpers	206 °C
max. Temperatur im Inneren des Probekörpers als Mittelwert über alle Messstellen	139 °C

**Tabelle 5:** Prüfergebnisse (Kurzform)

Normkriterium	Prüfergebnis
Tragfähigkeit R	28 Minuten
Raumabschluss E	28 Minuten
Wärmedämmung I	28 Minuten

### Besondere Hinweise

Dieser Prüfbericht beschreibt ausführlich das Verfahren der baulichen Ausführung, die Prüfbedingungen und die Ergebnisse, die mit dem hier beschriebenen Bauteil erzielt wurden, nachdem dieses in Anlehnung an das in DIN EN 1362-1 und DIN EN 1363-1 dargestellten Verfahren geprüft wurde. Jede wesentliche Abweichung hinsichtlich Größe, konstruktiver Einzelheiten, Belastungen, Spannungszustände, Randbedingungen außer den Abweichungen, die im betreffenden Prüfverfahren für den direkten Anwendungsbereich zulässig sind, ist nicht durch diesen Prüfbericht abgedeckt.

Aufgrund der Eigenart von Feuerwiderstandsprüfungen und der daraus folgenden Schwierigkeiten bei der Quantifizierung der Unsicherheit bei der Messung der Feuerwiderstandsdauer ist es nicht möglich, einen festgelegten Genauigkeitsgrad des Ergebnisses anzugeben.

Die Gültigkeit des Prüfberichtes ist zeitlich nicht begrenzt.

**Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)**  
**12200 Berlin**

2025-02-28

Fachbereich 7.3 Brandingenieurwesen

Im Auftrag

Im Auftrag

Im Auftrag

---

Dr.-Ing. Sascha Hothan  
Fachbereichsleiter

---

Dr.-Ing. Dustin Häßler  
Sachbearbeiter

---

Dipl.-Ing (FH) Kai-Uwe Ziener  
Sachbearbeiter

Verteiler: 1. Ausfertigung: Technische Universität Dresden  
2. Ausfertigung: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

# Prüfbericht – Untersuchung der Medienbeständigkeit von Carbonbewehrungen mit thermoplastischer Matrix

**Author:** Berk Gündogdu

**Last modified:** 25.06.2025

## Inhalt

<b>Abkürzungen und Symbole</b> .....	2
<b>1. Einleitung</b> .....	3
<b>2. Prüfprogramm</b> .....	4
<b>Materialien</b> .....	4
.....	5
<b>3. Prüfverfahren und Versuchsdurchführung</b> .....	6
<b>4. Auswertung der Ergebnisse</b> .....	7
<b>5. Zusammenfassung</b> .....	11
<b>6. Literaturverzeichnis</b> .....	12
<b>7. Anhang</b> .....	13
1. Chemische Exposition (Benennung: PKx-Y-Z).....	13
2. Transport-/Lagerungsversuch (Benennung: Z-Yx-PKx).....	14

## Abkürzungen und Symbole

SE – Säureexposition

R – Schalöl / Trennmittel

H – Hydrauliköl

D – Diesel

PK – Prüfkörper

M – Matte (bezieht sich auf die Gitterbewehrung vom Typ HTC)

FFS – Formflechtstab (geflochtener Carbonstab)

TJ – Teijin (Faserhersteller)

ZT – Zoltek (Faserhersteller)

# 1. Einleitung

Dieser Bericht bewertet die chemische Beständigkeit und die mechanischen Eigenschaften – insbesondere die Zugfestigkeit – von Carbonbewehrungen in Form von textilen Bewehrungen und Stäben nach Exposition gegenüber chemisch aggressiven Medien oder transportspezifischen Beanspruchungen.

Untersucht wurden zwei Versuchsreihen:

1. **Chemikalienexposition:** In diesem Versuch wurden die Bewehrungen über einen Zeitraum von 14 Tagen in potenziell schädlichen, baustellentypischen Chemikalien gelagert. Dabei handelte es sich um Hydrauliköl (H), Diesel (D), Säureexposition (SE) und Trennmittel/Öl (R) (siehe Abbildung 1). Die Proben bestanden aus Carbonfaser-Gitterbewehrung (Länge 400 mm) der HitexBau GmbH sowie aus Stabbewehrungen der Firma Johne & Groß GmbH. Die Ergebnisse wurden jeweils graphisch dargestellt und mit den Werten der Referenzproben verglichen, um die Auswirkungen der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Materialeigenschaften zu bewerten.

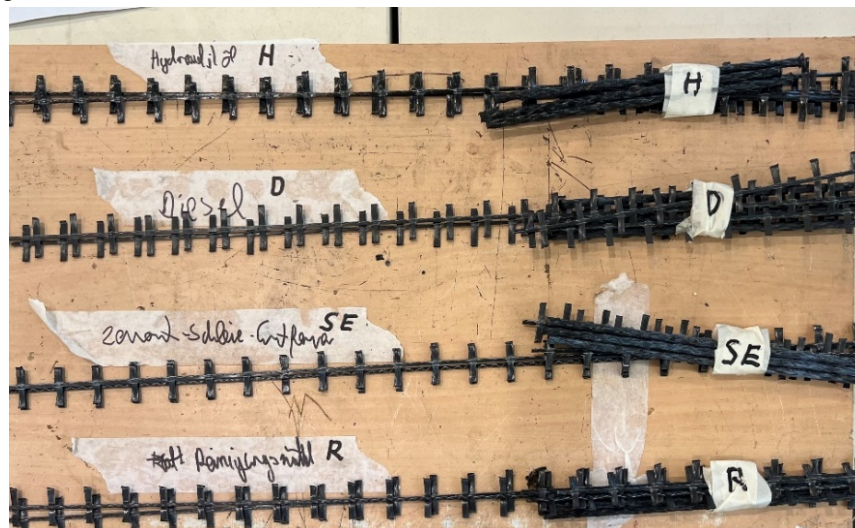


Abbildung 1: Prüfkörper nach abgeschlossener Exposition, in Vorbereitung für die Zugprüfung (Berk Gündogdu, TUD IMB)

2. **Transport-/Lagerungsversuche:** Textile Bewehrungen in Gitterform werden häufig zur Platzersparnis und zur Reduktion der Logistikkosten, wie in Abbildung 2 zu sehen, in gerolltem Zustand transportiert. Das Aufrollen kann jedoch zu bleibenden Verformungen oder mikroskopischen Schädigungen innerhalb der Textilstruktur führen. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurden verschiedene Lagerungs- und Handhabungsszenarien untersucht. Dabei kamen Proben zum Einsatz, die entweder flach gelagert oder aufgerollt transportiert wurden. Dies ermöglicht eine Bewertung des Transporteinflusses.



Abbildung 2: Aufgerollte Gitterbewehrung für den Transport und die Lagerung (Johne und Groß GmbH)

## 2. Prüfprogramm

### Materialien

Im Rahmen der chemischen Expositionsversuche wurden zwei Arten karbonfaserbasierter, nichtmetallischer Bewehrungssysteme untersucht wie in zu sehen:

- HTC 21/21-80 (M): Eine Gitterbewehrung der Firma Hitexbau, bestehend aus Kett- und Schussfäden. Für die Zugversuche wurden ausschließlich Kettfäden entnommen und einzeln geprüft. In diesem Bewehrungssystem kamen zwei verschiedene Fasertypen von zwei unterschiedlichen Herstellern zum Einsatz: Teijin Carbon Europe GmbH und Zoltek GmbH. Als Imprägniermatrix dient der thermoplastisch umformbare Kunststoff Tecosit CC1000. In der chemischen Expositionsreihe wurde ausschließlich das HTC-Material mit Fasern von Teijin geprüft.
- Formflechtstab (FFS): Ein geflochtener Carbonstab der Firma Johne & Groß, ausgelegt für den Einsatz als linear beanspruchte Zugbewehrung. Auch hier wurde Tecosit CC1000 als Matrixsystem verwendet.

Im zweiten Teil des Versuchsprogramms wurden unterschiedliche Lagerungs- und Transportbedingungen für das HTC-Material betrachtet. Das HTC-Material mit Zoltek-Fasern wurde sowohl als Rollenware als auch als Mattenware bezogen. Von der Mattenware wurden zusätzlich zwei unterschiedliche Chargen untersucht. Das HTC-Material mit Teijin-Fasern war ausschließlich als Mattenware verfügbar; auch hier wurden zwei verschiedene Chargen geprüft.

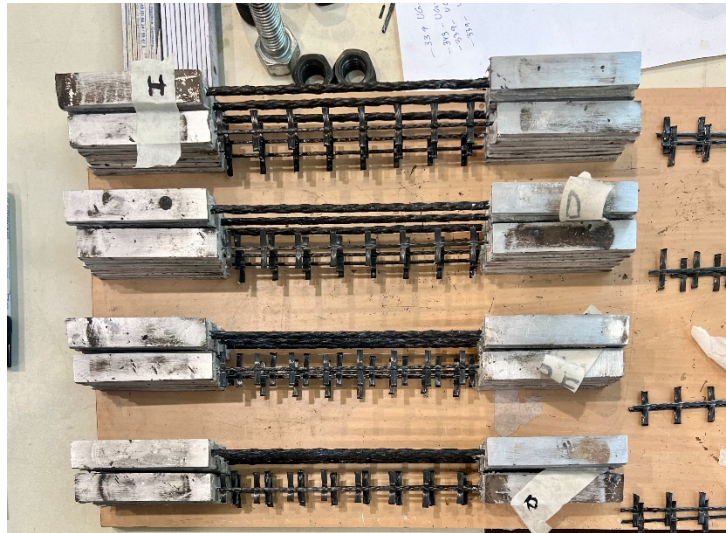


Abbildung 3: FFS- und HTC-Proben im direkten Vergleich ( Berk Gündogdu, TUD IMB)

### Expositionsprotokoll und Probenvorbereitung

Die Bewehrungsproben wurden über einen Zeitraum von 14 Tagen bei Raumtemperatur den oben genannten Flüssigkeiten ausgesetzt, um potenzielle Kontaminationsszenarien auf der Baustelle und im Fertigteilwerk zu simulieren. Jede Serie umfasste drei Prüfkörper je Bewehrungstyp (HTC und FFS). Die Proben wurden nach dem folgenden Benennungsschema gekennzeichnet: PKx-Y-Z, wobei:

PKx – Probennummer innerhalb der jeweiligen Serie

Y – Expositionsbedingung (D, H, R, SE)

Z – Bewehrungstyp (M für Gitterbewehrung/HTC, FFS für Stabbewehrung)

Die Proben wurden nach der Exposition auf die vorgesehene Prüflänge von 400 mm zugeschnitten. Der Querschnitt der HTC-Probe betrug  $1,82 \text{ mm}^2$ , der des FFS  $11,08 \text{ mm}^2$ .

Im zweiten Teil des Versuchsprogramms wurde der Einfluss von Lagerungs- und Transportbedingungen auf das mechanische Verhalten der Bewehrung untersucht. Für das HTC-Material mit Zoltek-Fasern wurden eine gerollt gelagerte Probe sowie zwei flach gelagerte Mattenproben getestet. Für das HTC-Material mit Teijin-Fasern wurden zwei flach gelagerte Mattenproben geprüft. Ziel war es, zu untersuchen, ob die Lagerung in aufgewickelter Zustand (Rollenform) die Zugfestigkeit gegenüber flach gelagerten Proben beeinflusst.

Die Benennung der Proben erfolgte in diesem Versuchsteil leicht abgewandelt nach dem Schema Z-Yx-PKx, wobei:

Z – Faserlieferant (TJ für Teijin, ZT für Zoltek)

Yx – Bewehrungstyp und Nummerierung der Mattenprobe

PKx – Probennummer innerhalb des jeweiligen Typs bzw. der jeweiligen Lage

### 3. Prüfverfahren und Versuchsdurchführung

Nach Abschluss der Expositionszeit wurden alle Proben im Otto-Mohr-Labor in einem uniaxialen Zugversuch geprüft (siehe Abbildung 4). Die Versuche erfolgten unter folgenden Prüfbedingungen:

Prüfmaschine: Zwick 250

Prüfgeschwindigkeit: 3 mm/min

Datenaufzeichnung: 5 Hz

Messgrößen: Kraft und Dehnung

Gemäß den Anforderungen der DAfStb-Richtlinie für nichtmetallische Bewehrungen [1] gelten Zugversuche nur dann als gültig, wenn der Bruch außerhalb der Einspannzone erfolgt. Zur Gewährleistung einer ordnungsgemäßen Krafteinleitung und zur Vermeidung von Schädigungen an der Klemmstelle wurden an allen Proben Aluminium-Endplatten (100 × 20 mm) aufgeklebt. Diese Konfiguration ermöglicht eine zuverlässige Krafteinleitung in die Probe und erfüllt die Richtlinienvorgaben für einen gültigen Versuch.

Die Einspannlänge muss ausreichend dimensioniert sein, um ein Durchrutschen zu verhindern, und ist gemäß [1] zu dokumentieren. In dieser Versuchsreihe wurde die Einspannlänge für alle Bewehrungstypen auf 100 mm festgelegt wie in Abbildung 4 zu sehen.

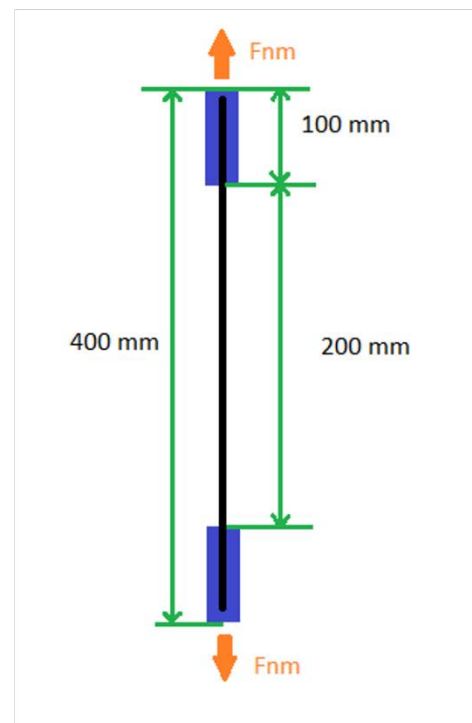


Abbildung 4: Prüfeinrichtung und Probekörperdimensionen für die Zugprüfung nach [1]

## 4. Auswertung der Ergebnisse

### Einordnung der Prüfergebnisse

Zur Bewertung des mechanischen Verhaltens der geprüften Bewehrungen wurden zentrale Kennwerte aus den Zugversuchen ausgewertet. Dazu zählen die maximale Kraft, die Bruchdehnung, die Zugfestigkeit sowie das Elastizitätsmodul. Die Ergebnisse der chemischen Expositionsversuche sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 im Anhang dargestellt und wurden entsprechend in zwei Gruppen unterteilt: Carbonfaser-Gitterbewehrung und Carbonfaser-Stabbewehrung. Zusätzlich sind auch die Referenzproben (ohne Exposition) sowie die Proben der Transport und Lagerungsversuche in der Übersicht enthalten.

Bei den HTC-Proben sind in den Fällen TJ-M1-PK3, TJ-M2-PK1 und TJ-M2-PK5 auffällig geringe Ergebnisse zu beobachten. Eine mögliche Ursache hierfür könnte ein Fehler während der Versuchsdurchführung, wie etwa eine unbeabsichtigte Vorschädigung beim Handling der Proben sein. Daher wurden diese Prüfkörper aus der statistischen Betrachtung ausgeschlossen.

### Auswertung der Parameter

Die mechanischen Kennwerte der einzelnen Proben wurden auf Basis der Rohdaten der Zugversuche und gemäß der DAfStb-Richtlinie für nichtmetallische Bewehrungen [1] ausgewertet. Die Tabelle (FFS) fasst die Kennwerte der geflochtenen Carbonstäbe zusammen, die Tabelle (HTC) entsprechend jene der Gitterbewehrung (M). Der Elastizitätsmodul wurde gemäß der Richtlinie aus der Steigung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm zwischen 10 % und 60 % der Maximalspannung bestimmt:

$$E_{f, nm} = \frac{\sigma_{f, nm, 60} - \sigma_{f, nm, 10}}{\varepsilon_{f, nm, 60} - \varepsilon_{f, nm, 10}}$$

Die Spannung und Dehnung berechnen sich wie folgt:

$$\sigma_{f, nm, 10} = F_{nm, 10} / A_{f, nm}$$

$$\sigma_{f, nm, 60} = \frac{F_{nm, 60}}{A_{f, nm}}$$

$$\varepsilon_{f, nm, 10} = \frac{L_{nm, 10} - L_0}{L_0}$$

$$\varepsilon_{f, nm, 60} = \frac{L_{nm, 60} - L_0}{L_0}$$

### Spannungs-Dehnungs-Diagramme

Zur Bewertung des mechanischen Verhaltens der nichtmetallischen Bewehrung unter verschiedenen Expositionsbedingungen wurden für jede einzelne Probe, entsprechend der Abbildung 5 und Abbildung 6, Spannungs-Dehnungs-Diagramme erstellt und deren Mittelwertkurve anschließend gruppenweise nach Expositionstyp zusammengefasst.

Die so gewonnenen Kurven stellen den mittleren Spannungsverlauf je Expositionsgruppe dar und liefern ein deutlich klareres Bild des allgemeinen Werkstoffverhaltens als die Darstellung einzelner Probenkurven.

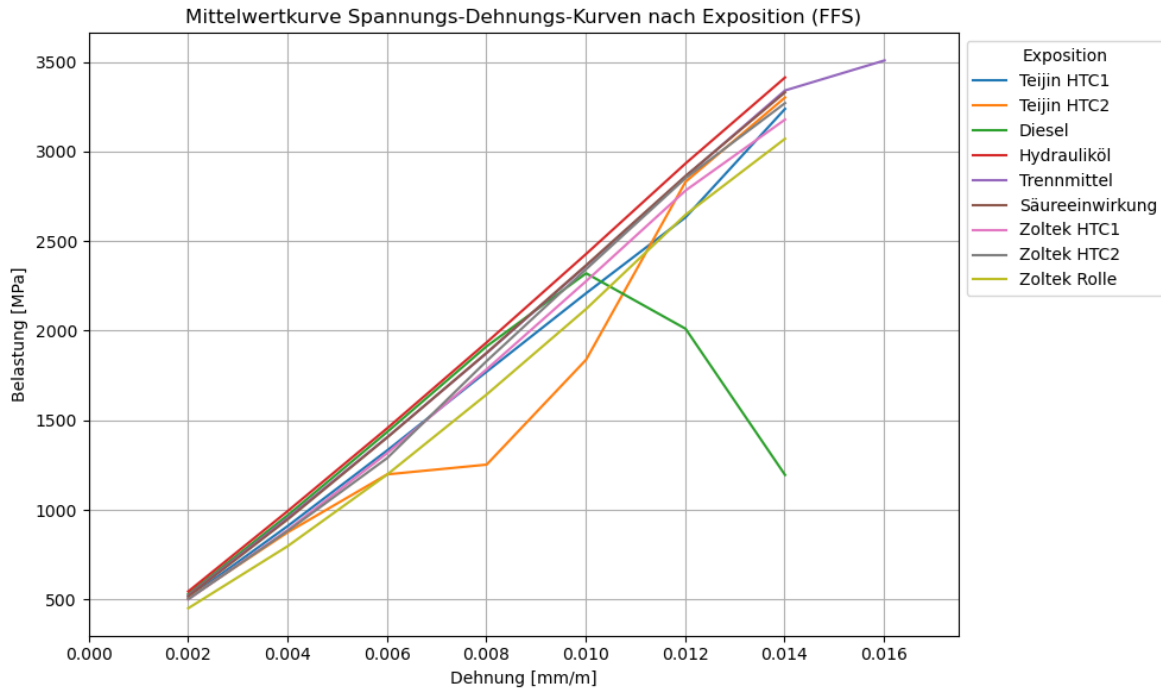


Abbildung 5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der HTC 21/21-80 Proben

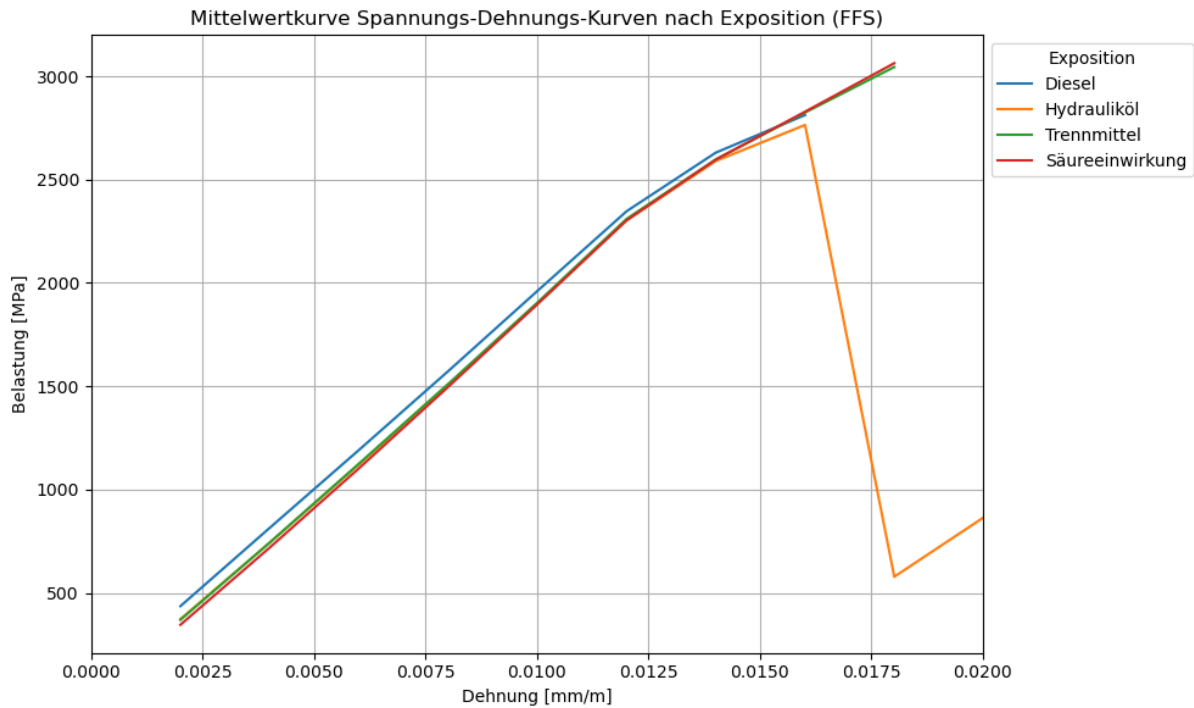


Abbildung 6: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der FFS Proben

Für die Auswertung der HTC-Proben in wurden die nicht behandelten Teijin-Mattenproben als Referenz herangezogen. Sowohl in der Ergebnistabelle als auch im Diagramm zeigt sich jedoch, dass diese unbehandelten Proben im Vergleich zu den chemisch exponierten oder gerollt gelagerten Bewehrungen eine hohe Streuung und deutlich niedrigere Zugfestigkeiten aufweisen. Aufgrund dieser Inkonstanz ist eine detaillierte Analyse der mechanischen Eigenschaften nur eingeschränkt möglich.

Eine deutliche Ausnahme stellt jedoch die Diesel-Exposition (grüne Kurve) in Abbildung 5 dar: Zwar ist hier ein klarer Rückgang der Bruchspannung zu erkennen, jedoch deuten verschiedene Hinweise darauf hin, dass andere Einflussfaktoren im Rahmen der Versuchsdurchführung – etwa Randbedingungen oder Handhabung – einen größeren Einfluss auf die Ergebnisse dieser Serie gehabt haben könnten.

### **Bewertung der Zugfestigkeitsergebnisse der HTC-Proben**

Die dargestellten Ergebnisse zeigen die Zugfestigkeiten verschiedener HTC-Proben, unterteilt nach chemischer Exposition, Faserherkunft und Lagerungsform. Auffällig ist, dass die Serien „Diesel“, „Teijin HTC1/2“ sowie „Zoltek HTC2“ in ihrer Zugfestigkeit auf einem vergleichbaren Niveau liegen. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund relevant, dass bei den Formflechtstäben (FFS) mit identischem Matrixmaterial (Tecosit CC1000) keine signifikante Beeinträchtigung durch Diesel festgestellt wurde.

Daraus lässt sich ableiten, dass die geringfügig abweichenden Festigkeiten der Diesel-exponierten HTC-Proben eher auf materialbedingte Streuung zurückzuführen sind und nicht auf eine tatsächliche Schädigung durch die chemische Einwirkung.

Ein weiterer Indikator dafür, dass keine Bewehrungsschädigung durch Diesel vorliegt, ist die Beobachtung, dass die Steifigkeit der Diesel-Serie nahezu identisch mit den anderen Serien ist, was bei tatsächlicher Schädigung nicht zu erwarten wäre. Zusätzlich zeigt Abbildung 7, dass bei den nicht exponierten Teijin-Proben eine hohe Schwankung auftritt. Werden vereinzelte Ausreißer entfernt, steigt der Mittelwert zwar leicht an, bleibt aber dennoch im unteren Bereich des Gesamtvergleichs – insbesondere im Vergleich zu den chemisch exponierten Proben. Bemerkenswert ist dabei, dass die Diesel-exponierten Proben im Vergleich die niedrigste maximale Kraft aufweisen, was die These stützt, dass Diesel unter den eingesetzten Medien die potenziell schädlichste Wirkung entfaltet haben könnte.

Im Kontext des Lagerungseinflusses zeigt sich, dass bei den HTC2-Proben – trotz flacher Lagerung – eine deutliche Streuung mit zwei auffällig schwachen Einzelwerten vorliegt. Dies führt zu Unsicherheiten in der Bewertung und erschwert eine belastbare Interpretation. Die schlechteren Mittelwerte der Serien Teijin HTC1/2 sowie Zoltek HTC2 (und in geringerem Maß auch Zoltek Rolle) könnten dabei weniger auf Exposition oder Lagerung zurückzuführen sein, sondern eher auf versteckte Vorschädigungen, Herstellungsfehler, Oberflächenmängel oder Messunsicherheiten.

Da die reinen Maximal- oder Mittelwerte unter diesen Bedingungen nicht zuverlässig das tatsächliche Materialverhalten repräsentieren, wurde zusätzlich der charakteristische Spannungswert (5%-Quantil) gemäß DAfStb-Richtlinie ausgewertet. Dieser wird dort als um 18 % reduzierter Mittelwert definiert. Die daraus berechneten charakteristischen Spannungen zeigen, dass insbesondere die Proben Teijin HTC1, Teijin HTC2 und Zoltek HTC2 die niedrigsten charakteristischen Werte im gesamten Vergleichsfeld aufweisen. Die Zoltek-Proben aus Rollenlagerung zeigten hingegen keine signifikant schlechtere Festigkeit, was auf eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Rollverformung hinweisen könnte.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass:

- Diesel bei chemisch exponierten Proben die größte Reduktion der Zugfestigkeit bewirkt,
- die Referenzproben (Teijin HTC1 und HTC2) ebenfalls relativ niedrige Werte aufweisen, was auf Chargen- oder Handhabungseinflüsse hindeutet,
- und dass der Unterschied zwischen Rollen- und Mattenlagerung bei Zoltek keine wesentlichen Festigkeitsunterschiede verursacht hat.

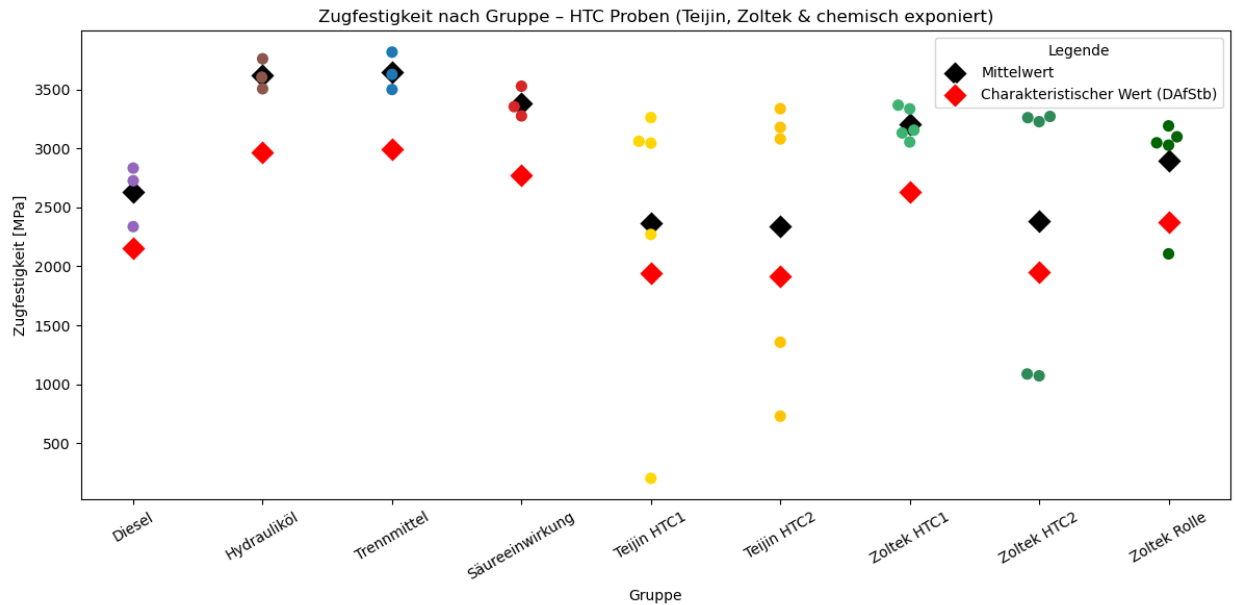


Abbildung 7: Darstellung der Bruchspannungen der verschiedenen Serien HTC 21/21-80

### Bewertung der chemischen Exposition auf die Zugfestigkeit der FFS-Proben

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der Zugfestigkeit von Formflechtstäben (FFS), die über 14 Tage verschiedenen chemischen Medien (Diesel, Hydrauliköl, Trennmittel, Säure) ausgesetzt wurden. Dargestellt sind sowohl Einzelwerte als auch der Mittelwert und der charakteristische Spannungswert gemäß DAfStb (definiert als 18 % unter dem Mittelwert).

Zum Vergleich dient die unbehandelte Referenzserie, deren Mittelwert bei etwa 3050 MPa liegt (nicht in der Abbildung dargestellt). Im Vergleich dazu liegen auch die Mittelwerte der chemisch exponierten Gruppen (zwischen ca. 2750 und 3150 MPa) innerhalb des typischen Bereichs der Materialstreuung, wie sie für faserverstärkte Kunststoffe üblich ist.

Daraus lässt sich ableiten, dass kein signifikanter negativer Einfluss der getesteten Medien auf die Zugfestigkeit der FFS-Proben festgestellt werden kann. Auch wenn insbesondere bei der Hydrauliköl-Exposition der

Mittelwert und der charakteristische Wert leicht reduziert erscheinen, bewegen sich diese Werte noch im Rahmen der zu erwartenden statistischen Schwankungen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine gute Reproduzierbarkeit der Prüfreihe sowie eine weitgehend konstante mechanische Leistungsfähigkeit der Formflechtstäbe unter den gewählten Expositionsbedingungen. Eine systematische oder relevante Beeinträchtigung der Zugfestigkeit durch Diesel, Hydrauliköl, Trennmittel oder Säure kann auf Basis der vorliegenden Versuchsreihe nicht bestätigt werden.

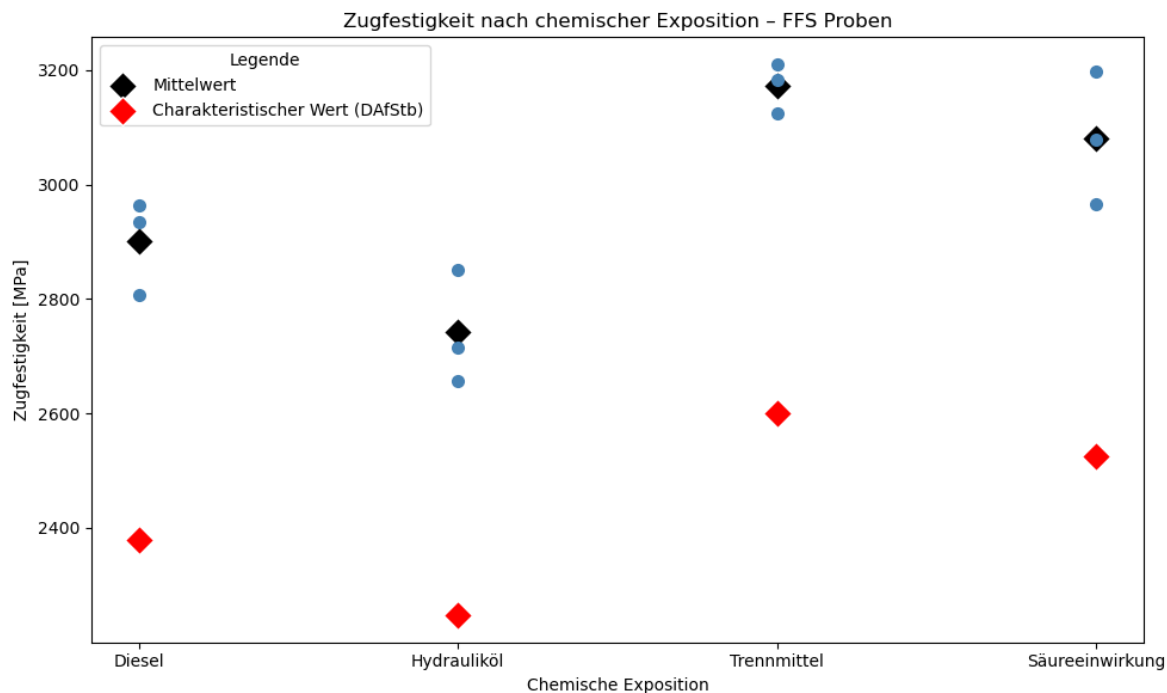


Abbildung 8: Darstellung der Bruchspannungen der verschiedenen Serien J&G FFS

## 5. Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Textilbewehrungen des Typs HTC 21/21-80 sowie Formflechtstäbe (FFS) verschiedenen chemischen Medien (Diesel, Hydrauliköl, Trennmittel, Säurelösung) über einen Zeitraum von 14 Tagen ausgesetzt. Anschließend wurden die mechanischen Eigenschaften durch Zugversuche bewertet

Die Ergebnisse zeigen, dass die Mittelwerte der Zugfestigkeit – sowohl bei den chemisch exponierten als auch bei den unbehandelten Referenzserien – im Bereich der typischen Materialstreuung liegen. Auch Serien mit leicht reduzierten Einzelwerten, etwa bei Diesel- oder Hydrauliköl-Exposition, weisen keine systematische oder signifikante Abweichung vom Referenzniveau auf. Unterschiede zwischen den Gruppen lassen sich in erster Linie auf chargenbedingte Schwankungen, Unterschiede in der Lagerung oder Probenhandhabung zurückführen.

Insbesondere bei den HTC-Textilien zeigte sich eine größere Streuung, was vor allem bei einzelnen Serien (z. B. HTC2) durch mögliche Vorschädigungen oder Handhabungseinflüsse erklärbar ist. Die FFS-Stäbe zeigten hingegen eine vergleichsweise konstante Performance. Auch der Einfluss der Lagerungsform (gerollt vs. flach) erwies sich nicht als klar festigkeitsmindernd.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass keines der getesteten Medien einen nachweislich negativen Einfluss auf die Zugfestigkeit der untersuchten Bewehrungssysteme hatte. Die Ergebnisse deuten auf eine hohe chemische Beständigkeit sowohl der textilen als auch der stabförmigen Verstärkungselemente unter den gewählten Expositionsbedingungen hin.

## 6. Literaturlverzeichnis

[1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. (2018). Richtlinie für den Entwurf von Textilbetonbauteilen (1st ed.). Beuth Verlag.

[2] Basumatary, A., Ghanem, M. A., Doherty, C. M., Ladewig, B. P., & Duke, M. C. (2022). Recent advances of polymeric membranes in tackling plasticization and aging for practical industrial CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> applications—A review. *Membranes*, 12(5), 457. <https://doi.org/10.3390/membranes12050457>

## 7. Anhang

### 1. Chemische Exposition (Benennung: PKx-Y-Z)

Tabelle 1: Prüfparameter Medienbeständigkeit HTC 21/21-80

Proben-ID	Exposition	Bewehrungstyp	Faserhersteller	Länge [mm]	Querschnitt [mm <sup>2</sup> ]
PK1-D-M	Diesel (D)	HTC-Gitter (M)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	1.82
PK2-D-M	Diesel (D)	HTC-Gitter (M)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	1.82
PK3-D-M	Diesel (D)	HTC-Gitter (M)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	1.82
PK1-H-M	Hydrauliköl (H)	HTC-Gitter (M)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	1.82
PK2-H-M	Hydrauliköl (H)	HTC-Gitter (M)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	1.82
PK3-H-M	Hydrauliköl (H)	HTC-Gitter (M)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	1.82
PK1-R-M	Trennmittel/Öl (R)	HTC-Gitter (M)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	1.82
PK2-R-M	Trennmittel/Öl (R)	HTC-Gitter (M)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	1.82
PK3-R-M	Trennmittel/Öl (R)	HTC-Gitter (M)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	1.82

Tabelle 2: Prüfparameter Medienbeständigkeit Formflechtstab

Proben-ID	Exposition	Bewehrungstyp	Faserhersteller	Länge [mm]	Querschnitt [mm <sup>2</sup> ]
PK1-SE-FFS	Säureexposition (SE)	Formflechtstab (FFS)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	11.08
PK2-SE-FFS	Säureexposition (SE)	Formflechtstab (FFS)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	11.08
PK3-SE-FFS	Säureexposition (SE)	Formflechtstab (FFS)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	11.08
PK1-D-FFS	Diesel (D)	Formflechtstab (FFS)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	11.08
PK2-D-FFS	Diesel (D)	Formflechtstab (FFS)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	11.08
PK3-D-FFS	Diesel (D)	Formflechtstab (FFS)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	11.08
PK1-H-FFS	Hydrauliköl (H)	Formflechtstab (FFS)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	11.08

PK2-H-FFS	Hydrauliköl (H)	Formflechtstab (FFS)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	11.08
PK3-H-FFS	Hydrauliköl (H)	Formflechtstab (FFS)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	11.08
PK1-R-FFS	Trennmittel/Öl (R)	Formflechtstab (FFS)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	11.08
PK2-R-FFS	Trennmittel/Öl (R)	Formflechtstab (FFS)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	11.08
PK3-R-FFS	Trennmittel/Öl (R)	Formflechtstab (FFS)	Teijin Carbon Europe GmbH	400	11.08

## 2. Transport-/Lagerungsversuch (Benennung: Z-Yx-PKx)

Tabelle 3: Prüfparameter Chargenprüfung HTC 21/21-80

Proben-ID	Faserhersteller	Lagerungsform	Charge	Bewehrungstyp	Anmerkung
ZT-Rolle-PK1	Zoltek GmbH	Rolle	Charge 1	HTC-Gitter	Gerollt geliefert
ZT-Matte1-PK1	Zoltek GmbH	Flach (Matte 1)	Charge 1	HTC-Gitter	Flach gelagert, Charge 1
ZT-Matte2-PK1	Zoltek GmbH	Flach (Matte 2)	Charge 2	HTC-Gitter	Flach gelagert, Charge 2
TJ-Matte1-PK1	Teijin Carbon Europe GmbH	Flach (Matte 1)	Charge 1	HTC-Gitter	Flach gelagert, Charge 1
TJ-Matte2-PK1	Teijin Carbon Europe GmbH	Flach (Matte 2)	Charge 2	HTC-Gitter	Flach gelagert, Charge 2

Tabelle 4: Zusammenfassung der Faserstrangzugversuche

Specimen (HTC)	L0 (mm)	dL Break (mm)	Strain at Break (mm/m)	Max Force (N)	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
PK1-D-M	100.0364	1.443725	0.014432	4961.49	2726.09	99.94
PK1-H-M	100.0308	1.415949	0.014155	6843.27	3760.04	237.32
PK1-R-M	100.027	1.576972	0.015765	6602.03	3627.49	230.28
PK1-SE-M	100.0346	1.411879	0.014114	6104.54	3354.14	225.90
PK2-D-M	100.0264	1.375365	0.01375	5156.11	2833.03	109.65
PK2-H-M	100.0408	1.58706	0.015864	6559.22	3603.97	231.14
PK2-R-M	100.0198	1.726396	0.017261	6946.20	3816.591	227.85
PK2-SE-M	100.0411	1.505221	0.015046	6420.24	3527.60	234.57
PK3-D-M	100.029	1.323234	0.013229	4253.35	2337.00	217.50
PK3-H-M	100.0215	1.522722	0.015224	6381.03	3506.06	226.83
PK3-R-M	100.0388	1.609925	0.016093	6369.14	3499.53	221.17
PK3-SE-M	100.0305	1.413675	0.014132	5961.89	3275.76	215.80
TJ-M1-PK1	400.0408	5.296021	0.013239	5540.59	3044.28	214.16
TJ-M1-PK2	400.0401	4.836579	0.01209	4132.97	2270.86	201.57
TJ-M1-PK3	400.0613	0.794165	0.001985	369.21	202.86	51.10
TJ-M1-PK4	400.0269	5.661481	0.014153	5936.59	3261.86	217.26
TJ-M1-PK5	400.0176	5.484879	0.013712	5570.28	3060.60	205.54
TJ-M2-PK1	400.0283	4.063706	0.010159	2468.79	1356.48	67.75
TJ-M2-PK2	400.0429	5.433791	0.013583	5785.31	3178.74	221.73
TJ-M2-PK3	400.0328	5.676202	0.014189	6072.93	3336.77	227.39
TJ-M2-PK4	400.0335	5.417841	0.013543	5606.39	3080.44	212.20
TJ-M2-PK5	400.0379	3.309177	0.008272	1327.93	729.63	44.10
ZT-M1-PK1	400.0381	5.705034	0.014261	6379.87	3366.69	220.82
ZT-M1-PK2	400.0327	5.559548	0.013898	6320.61	3335.42	227.36
ZT-M1-PK3	400.0178	5.720038	0.014299	5933.73	3131.26	198.33
ZT-M1-PK4	400.0425	5.613359	0.014032	5978.65	3154.96	206.83
ZT-M1-PK5	400.0356	5.166767	0.012916	5788.50	3054.62	216.43
ZT-M2-PK1	400.0256	2.428389	0.006071	2031.43	1071.99	185.62
ZT-M2-PK2	400.0331	5.607944	0.014019	6198.67	3271.07	217.07
ZT-M2-PK3	400.0385	5.4057	0.013513	6114.70	3226.76	219.81
ZT-M2-PK4	400.0398	2.327289	0.005818	2060.91	1087.55	176.02
ZT-M2-PK5	400.0662	5.497792	0.013742	6179.07	3260.72	220.01
ZT-R1-PK1	400.0271	5.719327	0.014297	6046.96	3191.01	202.94
ZT-R1-PK2	400.0448	5.579309	0.013947	5871.65	3098.49	204.45
ZT-R1-PK3	400.0302	4.753513	0.011883	3991.20	2106.18	175.48
ZT-R1-PK4	400.0393	5.520449	0.0138	5775.25	3047.63	203.53
ZT-R1-PK5	400.0345	5.683493	0.014208	5737.06	3027.47	196.66

Tabelle 5: Zusammenfassung der Stabzuversuche

Specimen (FFS)	L0 (mm)	dL Break (mm)	Strain at Break (mm/m)	Max Force (N)	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
PK1-D-FFS	100.0396	1.707092	0.017064	32524.9	2935.46	188.05
PK1-H-FFS	100.0378	4.061937	0.040604	31601.77	2852.14	36.45
PK1-R-FFS	100.0418	1.944626	0.019438	35271.08	3183.31	189.64
PK1-SE-FFS	100.0481	1.936309	0.019354	35436.59	3198.24	194.31
PK2-D-FFS	100.005	1.466741	0.014667	31103.5	2807.17	225.53
PK2-H-FFS	100.0383	1.47366	0.014731	29447.31	2657.70	185.74
PK2-R-FFS	100.0603	1.99615	0.019949	35562.74	3209.63	193.74
PK2-SE-FFS	100.052	1.772454	0.017715	32859.67	2965.67	189.83
PK3-D-FFS	100.0474	1.745291	0.017445	32843.1	2964.17	187.76
PK3-H-FFS	100.0377	1.481613	0.014811	30083.11	2715.08	192.31
PK3-R-FFS	100.0159	1.866603	0.018663	34614.26	3124.03	190.9
PK3-SE-FFS	100.0184	1.799105	0.017988	34113.19	3078.81	195.38

# Prüfbericht

## Festigkeitswerte für CFK-Formgitter

Prüfeinrichtung: Institut für Massivbau, TU Dresden

Die experimentellen Daten sind noch unveröffentlicht.  
Erstveröffentlichungsrecht ist der Prüfeinrichtung vorbehalten.

Autor: Dr.-Ing. Tilo Senckpiel-Peters  
Tel.: 01511 6159851  
E-Mail: [t.senckpiel-peters@johne-gross-gmbh.de](mailto:t.senckpiel-peters@johne-gross-gmbh.de)

Firma:  **JOHNE & GROß**

Johne & Groß GmbH  
Kamenzer Str. 18  
01936 Schwepnitz

## Inhalt

1	Einleitung .....	3
2	Prüfgegenstand und Proben.....	3
2.1	Beschreibung der CFK-Bewehrungen .....	3
2.2	Anzahl und Art der Proben .....	4
2.3	Vorbereitungsverfahren der Proben .....	5
3	Prüfmethoden.....	5
3.1	CFK-Formgitterbewehrung .....	5
3.2	Gerade Garne mit 10 mm Verankerungslänge .....	6
4	Prüfbedingungen .....	6
5	Ergebnisse .....	6
5.1	CFK-Formgitterbewehrung .....	6
5.2	Gerade Garne mit 10 mm Verankerungslänge .....	7
6	Analyse und Diskussion .....	7
6.1	CFK-Formgitterbewehrung .....	7
6.2	Gerade Garne mit 10 mm Verankerungslänge .....	10
6.3	Festigkeit von CFK-Formgittern abzüglich Vorverankerung.....	11
7	Anhänge.....	14
7.1	Bilder der Probekörper mit 0 mm Biegerollendurchmesser.....	14
7.2	Bilder der Probekörper mit 10 mm Biegerollendurchmesser.....	18
7.3	Bilder der Probekörper mit 20 mm Biegerollendurchmesser.....	23
7.4	Bilder der Probekörper mit 30 mm Biegerollendurchmesser.....	31
7.5	Bilder des Versuchsaufbaus und der Probekörper mit geraden Garnen und 10mm Verankerungslänge.....	44
7.6	Ergebnisse Zugversuche an CFK-Formgitterbewehrung .....	50
7.7	Ergebnisse an geraden Garnen mit 10 mm Verankerungslänge.....	59
7.8	Literatur.....	60
8	Autoren und Prüfer .....	60

## 1 Einleitung

Der vorliegende Prüfbericht dokumentiert die Materialversuche an CFK-Bewehrungen (Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe) bzw. CFK-Formgitterbewehrungen, die hinsichtlich ihrer Zugfestigkeit (und Verbundfestigkeit) zum Beton mit verschiedenen Geometrien untersucht wurden. Ziel der Untersuchungen war es, die Abminderungsfaktoren für verschiedene Biegerollendurchmesser in Abhängigkeit der Restfestigkeit im umgeformten Bereich zu ermitteln.

CFK-Bewehrungen und CFK-Formbewehrungen gewinnen im Bauwesen zunehmend an Bedeutung, da sie im Vergleich zu herkömmlichen Stahlbewehrungen zahlreiche Vorteile bieten. Dazu zählen eine höhere Korrosionsbeständigkeit, ein geringeres Gewicht und eine größere Zugfestigkeit. Allerdings müssen für den sicheren Einsatz von CFK-Bewehrungen und CFK-Formbewehrungen in baulichen Anwendungen die mechanischen Eigenschaften unter den im Einsatz zu erwartenden Bedingungen umfassend charakterisiert werden.

Die vorliegenden Materialversuche konzentrieren sich auf die Untersuchung der Abhängigkeit zwischen der durch die Umformung abgeminderten Festigkeit von CFK-Bewehrungsgittern im Bereich der Umformung und dem Biegerollendurchmesser, welcher bei der Umformung angewendet wurde.

Durch diese umfassenden Untersuchungen sollen belastbare Daten gewonnen werden, die zur Optimierung des Einsatzes von CFK-Formbewehrungen im Bauwesen beitragen. Die Ergebnisse bieten eine Grundlage für die Entwicklung von Bemessungsrichtlinien und die Verbesserung der Sicherheit und Langlebigkeit von Bauwerken, die mit CFK-Formbewehrungen bewehrt sind.

## 2 Prüfgegenstand und Proben

### 2.1 Beschreibung der CFK-Bewehrungen

Die Materialzusammensetzung der Gitter orientiert sich eng an den Materialien aus der CARBOrefit-Zulassung, siehe [1]. Hier werden Gitter von drei verschiedenen Herstellern (HITEXBAU GmbH, Wilhelm Kneitz Solutions in Textile GmbH, Solidian GmbH) und unterschiedlichen Geometrien verwendet.

Im Rahmen der vorliegenden Prüfungen ist das Gitter **HTC 21/21-80** der HITEXBAU GmbH mit den Eigenschaften nach Tabelle 1 und Tabelle 2 verwendet worden. Nach [1] wird das Textil als „**Typ 3 – Sonderausführung**“ bezeichnet. Nach der [2] wird es mit **Q71 C s22 F160** tituliert.

Tabelle 1: Materialeigenschaften Gitter

Variable	Wert	Einheit
E	206667	[N/mm <sup>2</sup> ]
f <sub>k</sub>	2250	[N/mm <sup>2</sup> ]
l <sub>bd</sub>	500	[mm]
t <sub>d</sub>	4,7	[N/mm]
ε <sub>max</sub>	10,89	[‰]
A <sub>nm</sub>	1,82	[mm <sup>2</sup> ]

Tabelle 2: Geometrieigenschaften Gitter

Variable	Wert	Einheit
$n_{\text{Kett}}$	26	[1/m]
$n_{\text{Schuss}}$	26	[1/m]
$A_{\text{Kett}}$	48	[mm <sup>2</sup> /m]
$A_{\text{Schuss}}$	48	[mm <sup>2</sup> /m]

Der Unterschied zu [1] besteht in der Verwendung eines Normalbetons anstelle eines Feinbetonmörtels TF 10 von Pagel.

Im Fall der durchgeführten Versuche wird ein C50/60 nach Tabelle 3 verwendet.

Tabelle 3: Betoneigenschaften

Variable	Wert	Einheit
$f_{\text{ck}}$	50	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{\text{ck,cube}}$	60	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{\text{cd}}$	28,3	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{\text{cm}}$	58	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{\text{ctm}}$	4,1	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{\text{ctk}, 0,05}$	2,9	[N/mm <sup>2</sup> ]
$E_{\text{cm}}$	37000	[N/mm <sup>2</sup> ]

## 2.2 Anzahl und Art der Proben

Anzahl und Art der Proben sind in Tabelle 4 dargestellt.

Es wurden 5 Biegerollendurchmesser untersucht: 0 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm und 50 mm. Die Untersuchung erfolgte für jeden Biegerollendurchmesser jeweils an Kettfäden und an Schussfäden.

Um den Einfluss der Vorverankerungslänge von 10 mm zu bewerten, sind zusätzlich Zugversuche an geraden (nicht umgeformten) Fasersträngen (ebenfalls an Kett- und Schussfäden) mit nur 10 mm Verankerungslänge durchgeführt worden.

Die Probenanzahl je Serie variierte zwischen 3 und 5 Prüfkörpern.

Tabelle 4: Anzahl und Art der Proben

Bezeichnung	Anz. [-]	Biegerollendurchmesser [mm]	Giterrichtung
D0-K-L	4	0	Kettr.
D0-S-L	4	0	Schussr.
D10-K-L	4	10	Kettr.
D10-S-L	4	10	Schussr.
D20-K-L	4	20	Kettr.
D20-S-L	4	20	Schussr.
D30-K-L	4	30	Kettr.
D30-S-L	4	30	Schussr.
D50-K-L	3	50	Kettr.
D50-S-L	3	50	Schussr.
G10-K	5	-	Kettr.
G10-S	5	-	Schussr.

### 2.3 Vorbereitungsverfahren der Proben

Die Probekörper für die Zugversuche sind nach den Empfehlungen für Prüfverfahren der in Teil 4 der DAfStb-Richtlinie Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung [2] hergestellt worden.

## 3 Prüfmethoden

### 3.1 CFK-Formgitterbewehrung

Der Versuchsaufbau orientiert sich an den Prüfverfahren zur Bestimmung der Kurzzeit-Zugfestigkeit von umgeformten nichtmetallischen Bewehrungsstäben aus der DAfStb-Richtlinie für nichtmetallisch bewehrte Betonbauteile [2] Teil 4 Abschnitt 2.3.

Der auf die filigrane Faserstranggeometrie angepasste Versuchsaufbau ist auf Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt.

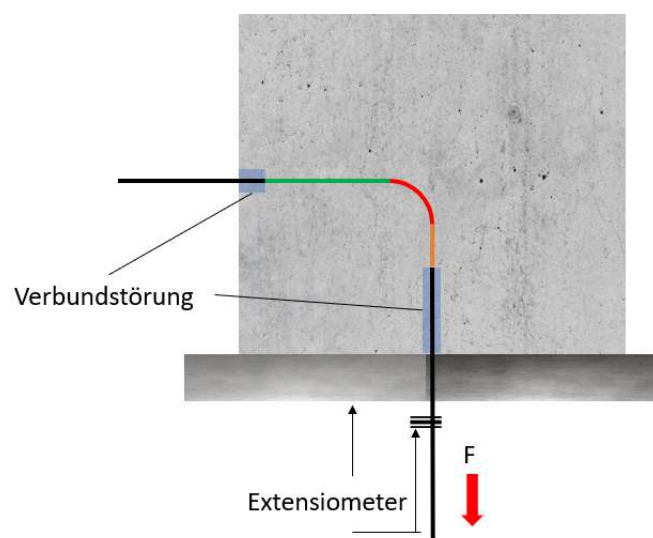


Abbildung 1: Schematischer Versuchsaufbau 2D-Darstellung

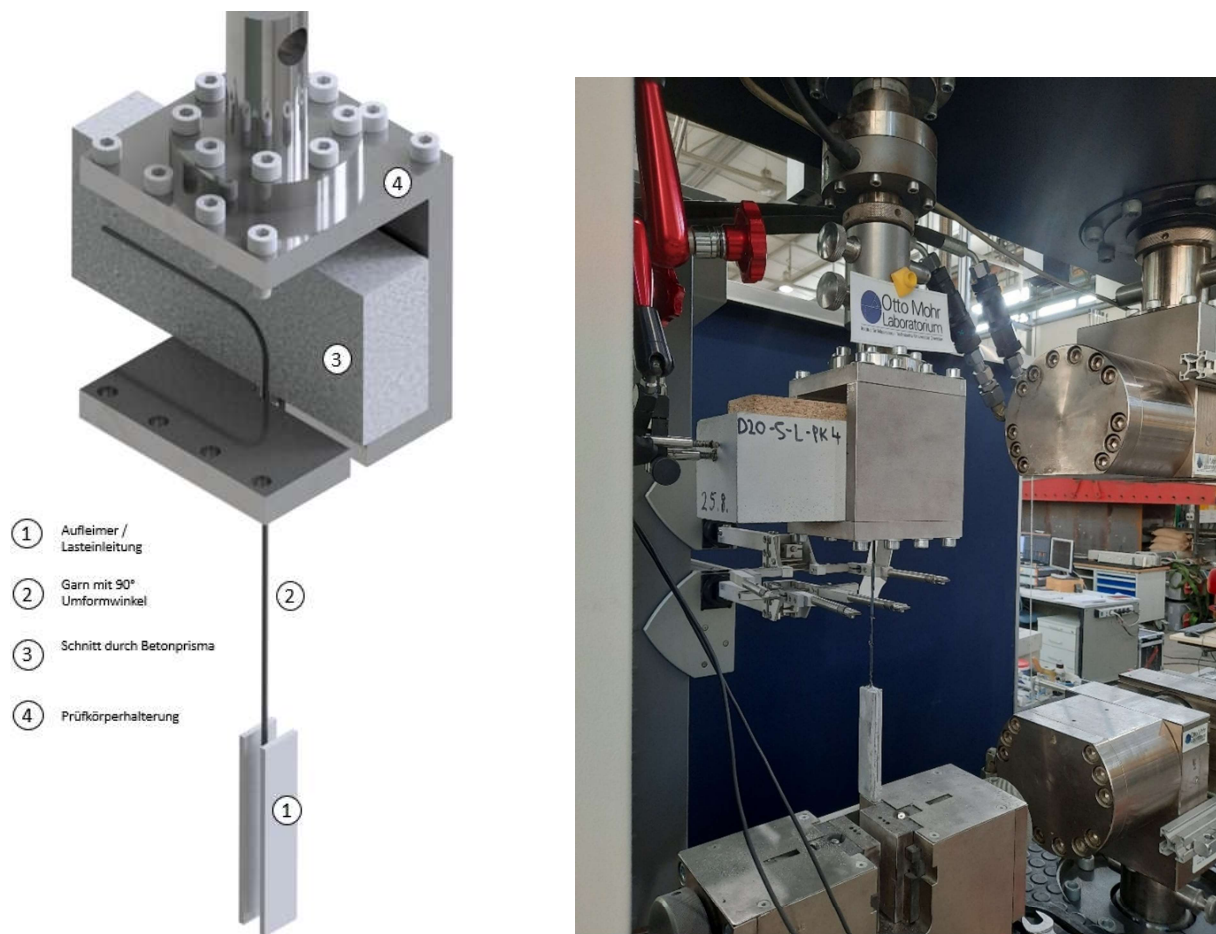


Abbildung 2: Versuchsaufbau 3D-Darstellung (links) und im Labor (rechts)

### 3.2 Gerade Garne mit 10 mm Verankerungslänge

Der Versuchsaufbau orientiert sich am SPO, siehe [2] Teil 4 Abschnitt 3.5.

## 4 Prüfbedingungen

Die Prüfungen sind trocken und bei einer konstanten Raumtemperatur von 23°C durchgeführt worden.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 CFK-Formgitterbewehrung

Die Ergebnisse der Zugfestigkeitswerte im Umformbereich in Abhängigkeit vom Biegerollendurchmesser im Betonverbund sind visuell zusammengefasst in Abbildung 3 dargestellt.

Im Anhang Abschnitt 7.7 (siehe Seite 50) sind die Versuchsergebnisse im Einzelnen von Tabelle 9 bis Tabelle 18 (S. 52) aufgeführt.

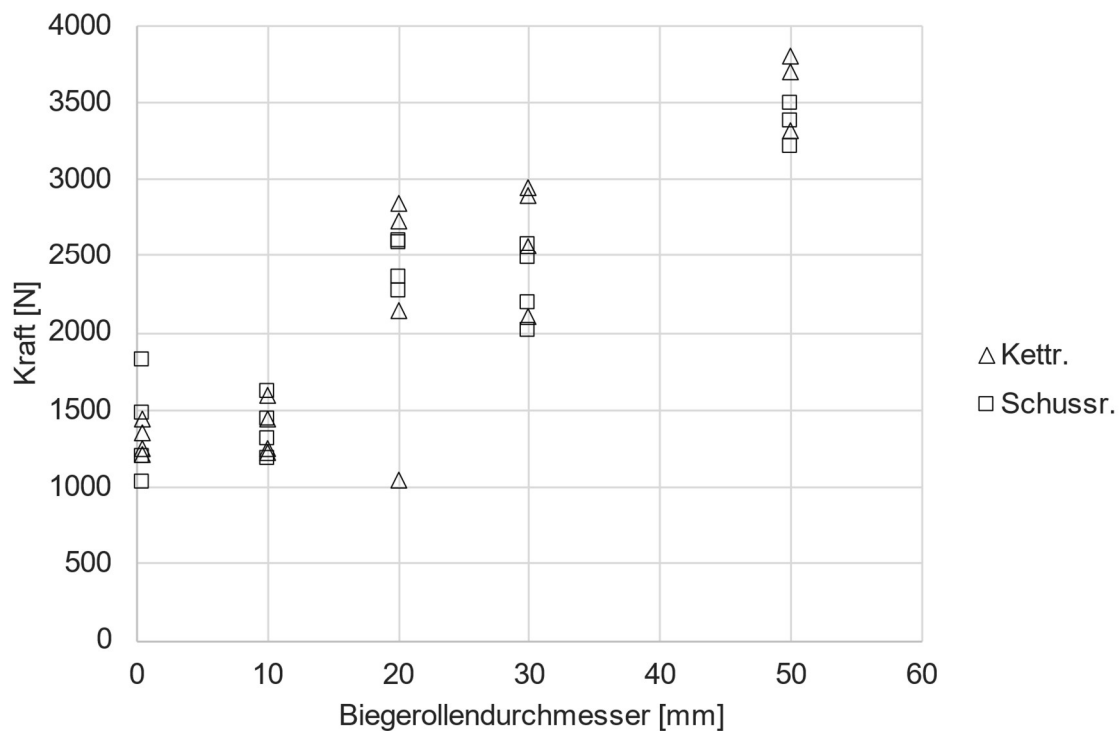


Abbildung 3: Kraft in Abhängigkeit des Biegerollendurchmessers für Kett- und Schussrichtung; Einzelwerte der Versuchsergebnisse

## 5.2 Gerade Garne mit 10 mm Verankerungslänge

Die Ergebnisse aus den Zugversuchen an geraden Garnen mit 10 mm Verankerungslänge im Betonverbund sind im Anhang Abschnitt 7.8 (siehe Seite 59) auf der Abbildung 84 dargestellt.

# 6 Analyse und Diskussion

## 6.1 CFK-Formgitterbewehrung

Die Ergebnisse der Zugfestigkeitswerte im Umformbereich in Abhängigkeit vom Biegerollendurchmesser werden in der Abbildung 4 noch einmal dargestellt. An dieser Stelle wird jedoch das Ergebnis des Versuchs am Prüfkörper D20-K-L-PK2 mit einem Kreuz gekennzeichnet und als ungültig für die Versuchsauswertung markiert. Wie in Tabelle 13 (S. 50) beschrieben, wies das Garn vor Versuchsbeginn eine Vorschädigung auf und versagte an selber Stelle vorzeitig bei deutlich geringerer Last als alle anderen Prüfkörper mit Formgittern mit 20 mm Biegerollendurchmesser. Auf der Abbildung 30 ist das Garn nach dem Prüfversuch dargestellt.

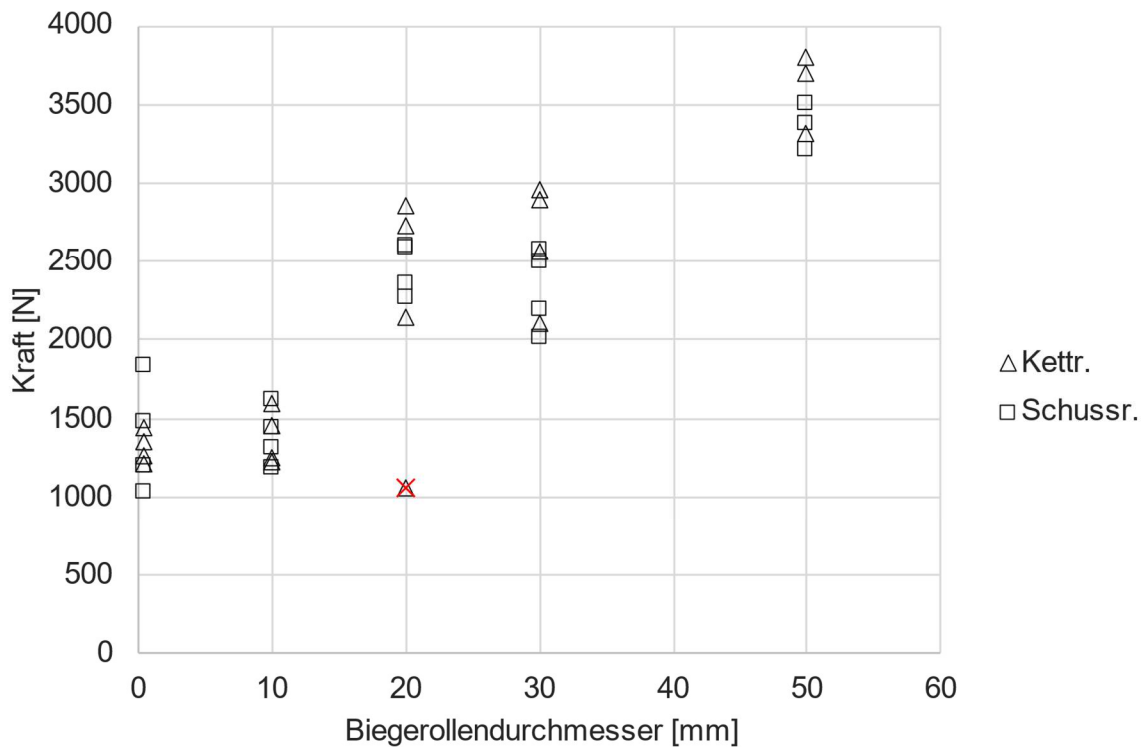


Abbildung 4: Kraft in Abhängigkeit des Biegerollendurchmessers für Kett- und Schussrichtung mit Kennzeichnung des nicht gewerteten Prüfversuchs

Auf der Abbildung 5 sind die Mittelwerte der Versuche und deren Standardabweichung getrennt für Kett- und Schussrichtung dargestellt.

Ein klar erkennbarer Unterschied zwischen den Prüfergebnissen der Kettfäden und den Ergebnissen der Schussfäden lässt sich vom Autor nicht feststellen.

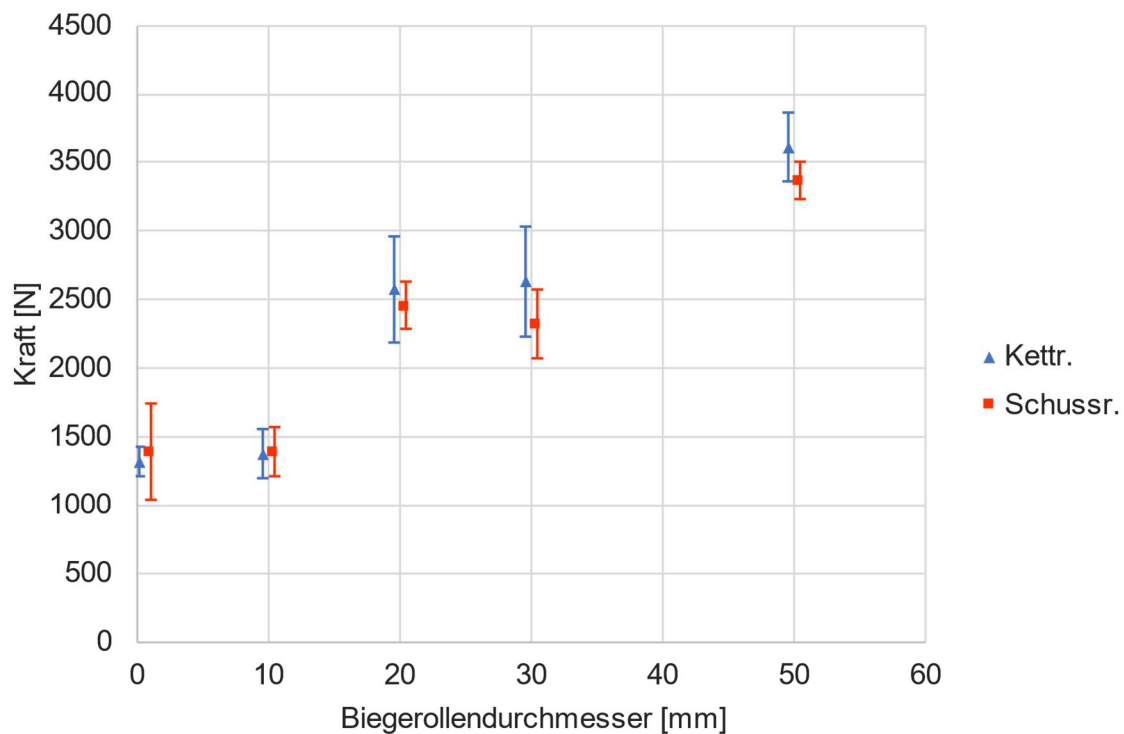


Abbildung 5: Kraft in Abhängigkeit des Biegerollendurchmessers für Kett- und Schussrichtung; Mittelwerte und Standardabweichung

Auf Grundlage der Feststellung der minimalen Ergebnisunterschiede zwischen den getesteten umgeformten Gitterrichtungen wird nachfolgend die Mittelwertbildung aus beiden umgeformten Gitterrichtungen je Biegerollendurchmesser ausgeführt. Die daraus resultierenden Mittelwerte und charakteristischen Werte dieser Rechnung sind in Tabelle 5 aufgelistet und in Abbildung 6 dargestellt.

Tabelle 5: Mittelwerte und char. Werte der zusammengefassten Kett- und Schussrichtung in Abhängigkeit des Biegerollendurchmessers

Biegerollendurchmesser [mm]	MW Kettr.&Schussr. [N]	Char. Kettr.&Schussr. [N]
0	1356	934
10	1390	1099
20	2510	2062
30	2479	1871
50	3489	3087

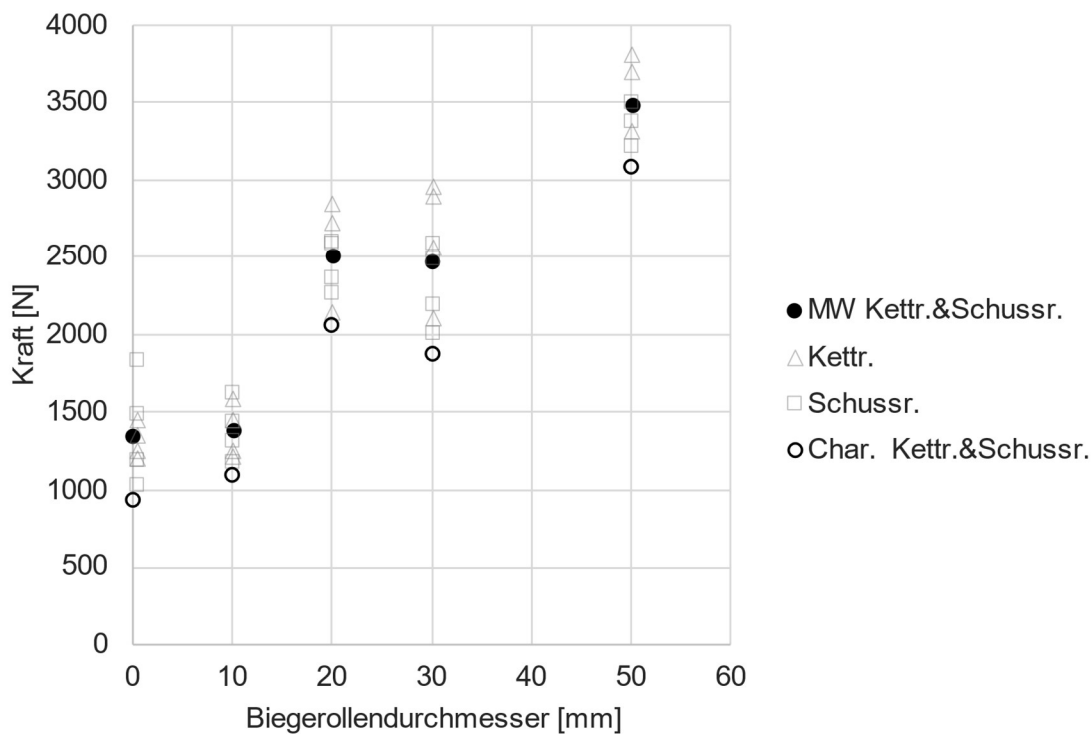


Abbildung 6: Einzelwerte, Mittelwerte und char. Werte der zusammengefassten Ergebnisse für Kett- und Schussrichtung in Abhängigkeit des Biegerollendurchmessers

## 6.2 Gerade Garne mit 10 mm Verankerungslänge

Um den Einfluss und die Auswirkungen der 10 mm Vorverankerungslänge auf die Zugfestigkeiten im Umformbereich der CFK-Formgitter zu ermitteln bzw. herauszurechnen, sind die Auszugsversuche durchgeführt worden, welche eine 10 mm Gesamtverankerungslänge haben.

Aufgrund der kleinen Einbindelängen von weniger als einer Gittermaschenweite und der wahrscheinlich verbundverstärkenden Wirkung der nicht vollkommen funktionstüchtigen Verbundstörung auf den ersten 20 mm der Versuchskonfiguration schwanken (vgl. Abbildung 71 (S. 44) und Abbildung 72 (S. 45)) die gewonnenen Werte sehr stark. Für die weitere

Versuchsauswertung werden die 95 %-Quantil-Kurven der Versuche ermittelt. Diese sind auf der Abbildung 7 dargestellt.

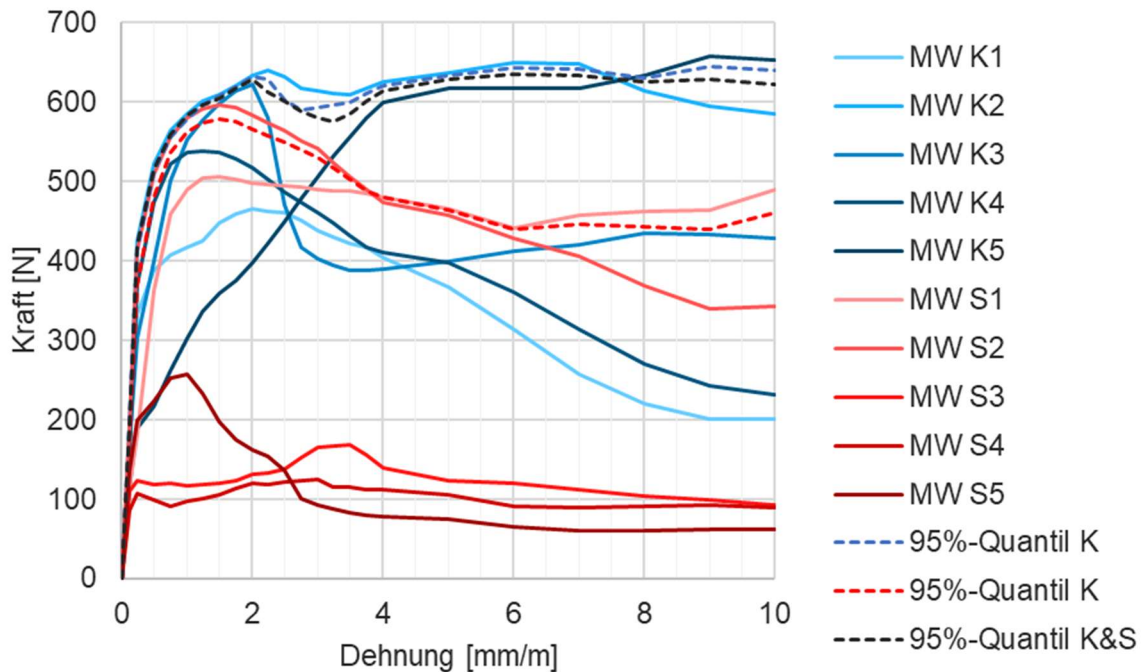


Abbildung 7: Kraft-Dehnungskurven der Garne mit 10 mm Verankerungslänge und 95 %-Quantil

Die 95 %-Quantil-Kurve aus den Werten aller Ergebnisse (Ketr. und Schussrichtung) ist ebenfalls dargestellt. Diese weist ab einem Dehnungsweg von 2 mm eine mittlere **Auszugskraft von 610 N** auf. Dieser Wert wird im Weiteren für die finale Berechnung der CFK-Formgitterfestigkeiten verwendet.

### 6.3 Festigkeit von CFK-Formgittern abzüglich Vorverankerung

Zieht man die konservativ abgeschätzte Auszugskraft von 610 N (siehe Abschnitt 6.2) von den Werten der maximalen Formgitterkräfte aus der Tabelle 5 (s. Abschnitt 6.1, S. 9) ab, erhält man die Werte aus Tabelle 7.

Tabelle 6: Mittelwerte und char. Werte der zusammengefassten Kett- und Schussrichtung in Abhängigkeit des Biegerollendurchmessers abzgl. der ermittelten Vorverankerungskraft

Biegerollendurchmesser [mm]	MW Ketr.&Schussr. abzgl. Vorverank. [N]	Char. Ketr.&Schussr. abzgl. Vorverank. [N]
0	1356	324
10	1390	489
20	2510	1452
30	2479	1261
50	3489	2477

Die Abbildung 8 stellt die verschiedenen Kräfte mit und ohne Vorverankerungskräfte grafisch dar.

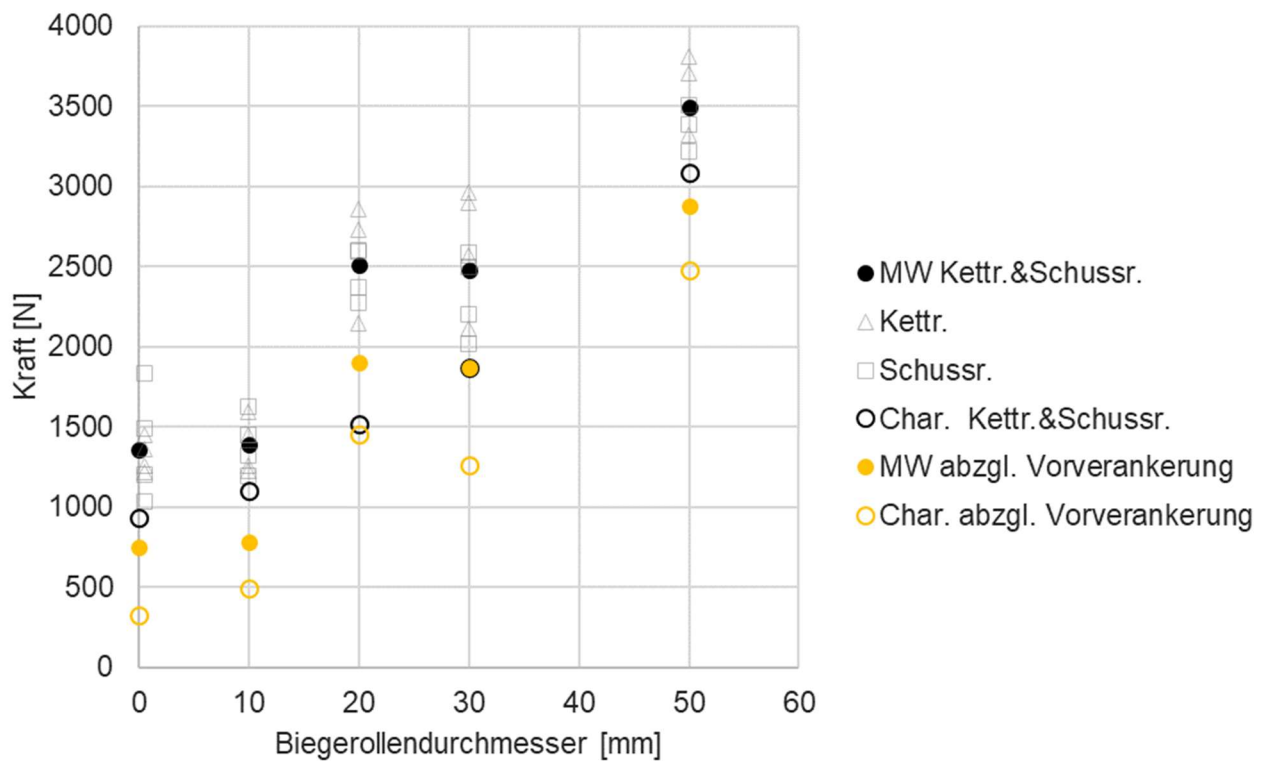


Abbildung 8: Kraft in Abhängigkeit des Biegerollendurchmessers; Mittelwerte und charakteristische Werte abzgl. Vorverankerung

Bezogen auf den Garnquerschnitt von 1,81 mm<sup>2</sup> ergeben sich die Festigkeitswerte der Formgitter, siehe Tabelle 7 und Abbildung 9.

Tabelle 7: Mittelwerte und charakteristische Festigkeitswerte abzgl. Vorverankerungskraft der zusammengefassten Kett- und Schussrichtung in Abhängigkeit des Biegerollendurchmessers

Biegerollendurchmesser [mm]	MW Kettr.&Schussr. abzgl. Vorverank. [N/mm <sup>2</sup> ]	Char. Kettr.&Schussr. abzgl. Vorverank. [N/mm <sup>2</sup> ]
0	412	179
10	431	270
20	1050	802
30	1033	697
50	1591	1369

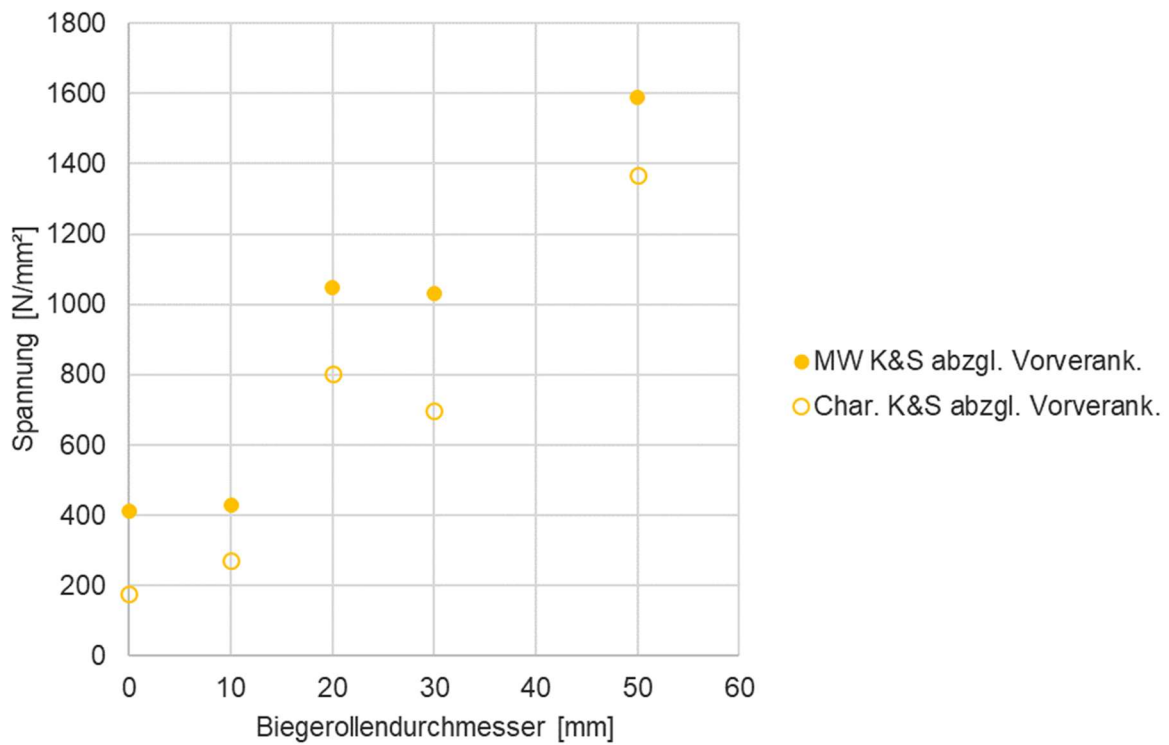


Abbildung 9: Festigkeit in Abhängigkeit des Biegerollendurchmessers; Mittelwerte und charakteristische Werte abzgl. Vorverankerung

Bezogen auf die char. Festigkeitswerte von 2250 N/mm<sup>2</sup> aus [1] ergeben sich die Abminderungsbeiwerte aus Tabelle 8.

Tabelle 8: Abminderungsbeiwerte

Biegerollendurchmesser [mm]	Char. Kettr.&Schussr. [N/mm <sup>2</sup> ]	$\alpha_{D,min}$ [-]
0	179	8%
10	270	12%
20	802	36%
30	697	31%
50	1369	61%

## 7 Anhänge

### 7.1 Bilder der Probekörper mit 0 mm Biegerollendurchmesser



Abbildung 10: D0-K-L-PK1 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Foto: TUD IMB

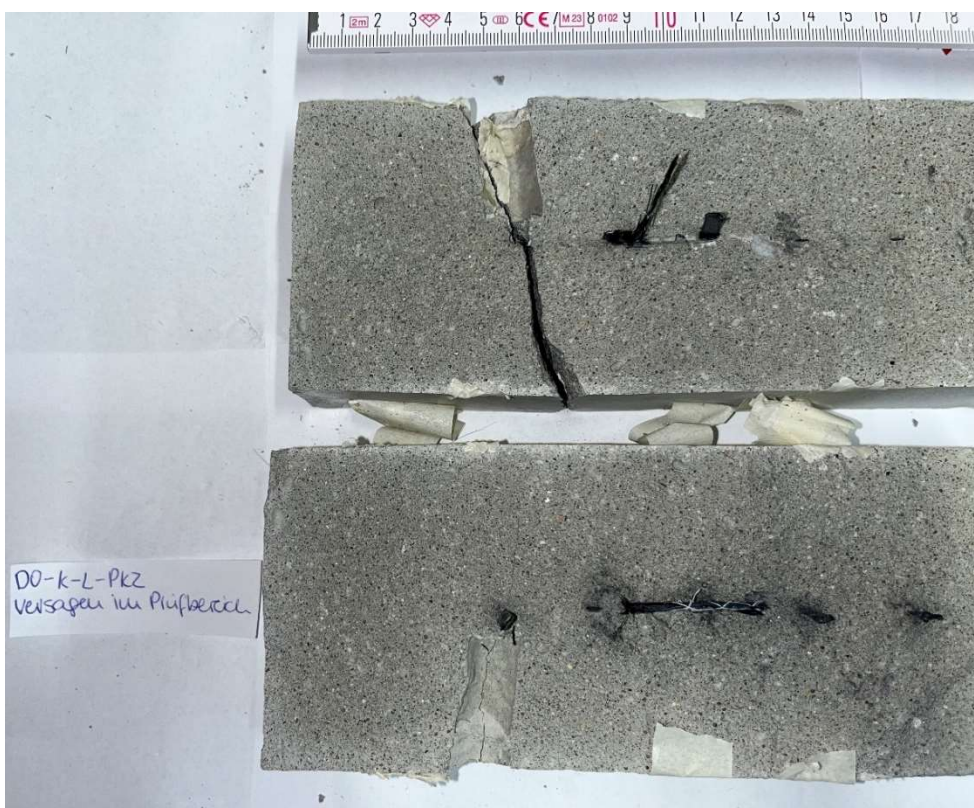


Abbildung 11: D0-K-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Foto: TUD IMB



Abbildung 12: D0-K-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Foto: TUD IMB



Abbildung 13: D0-K-L-PK4 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Foto: TUD IMB

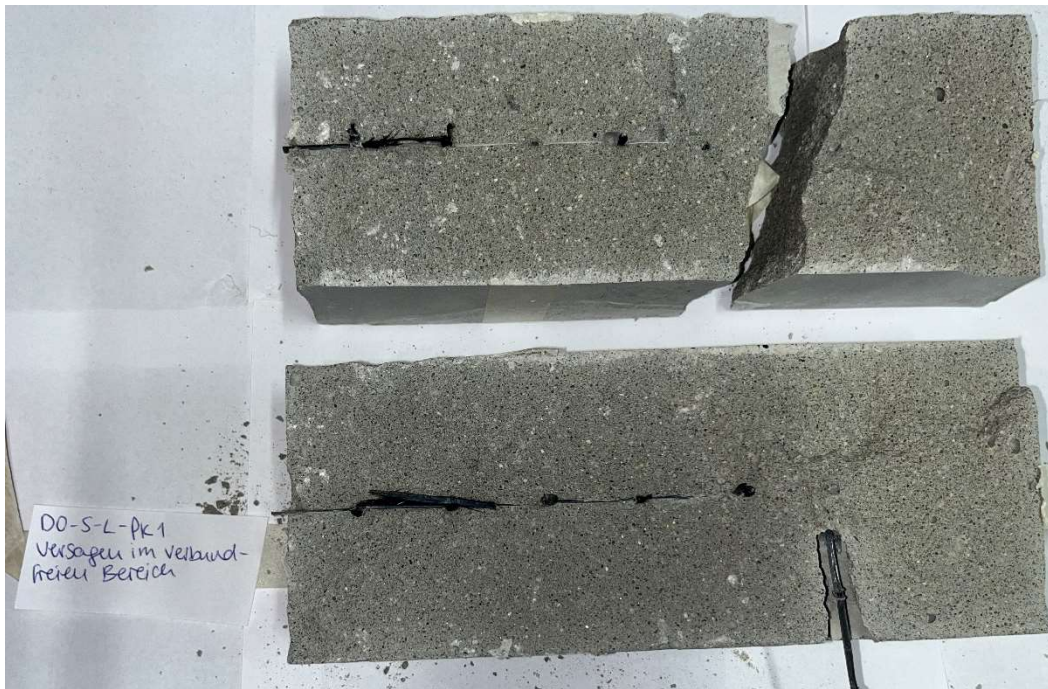


Abbildung 14: D0-S-L-PK1 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Foto: TUD IMB

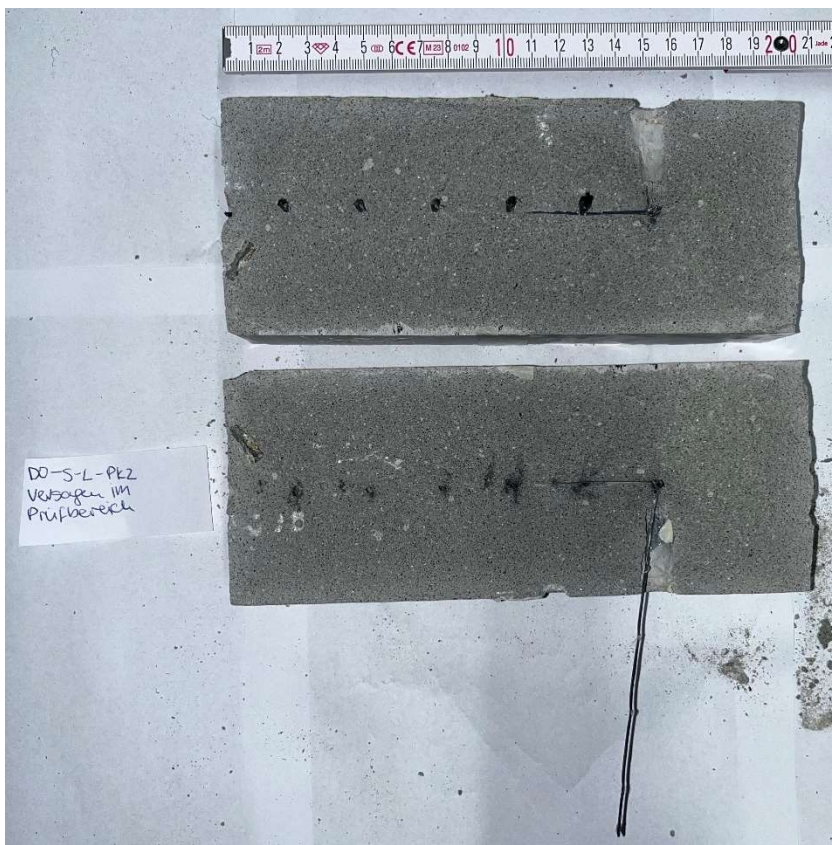


Abbildung 15: D0-S-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Foto: TUD IMB



Abbildung 16: D0-S-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Foto: TUD IMB

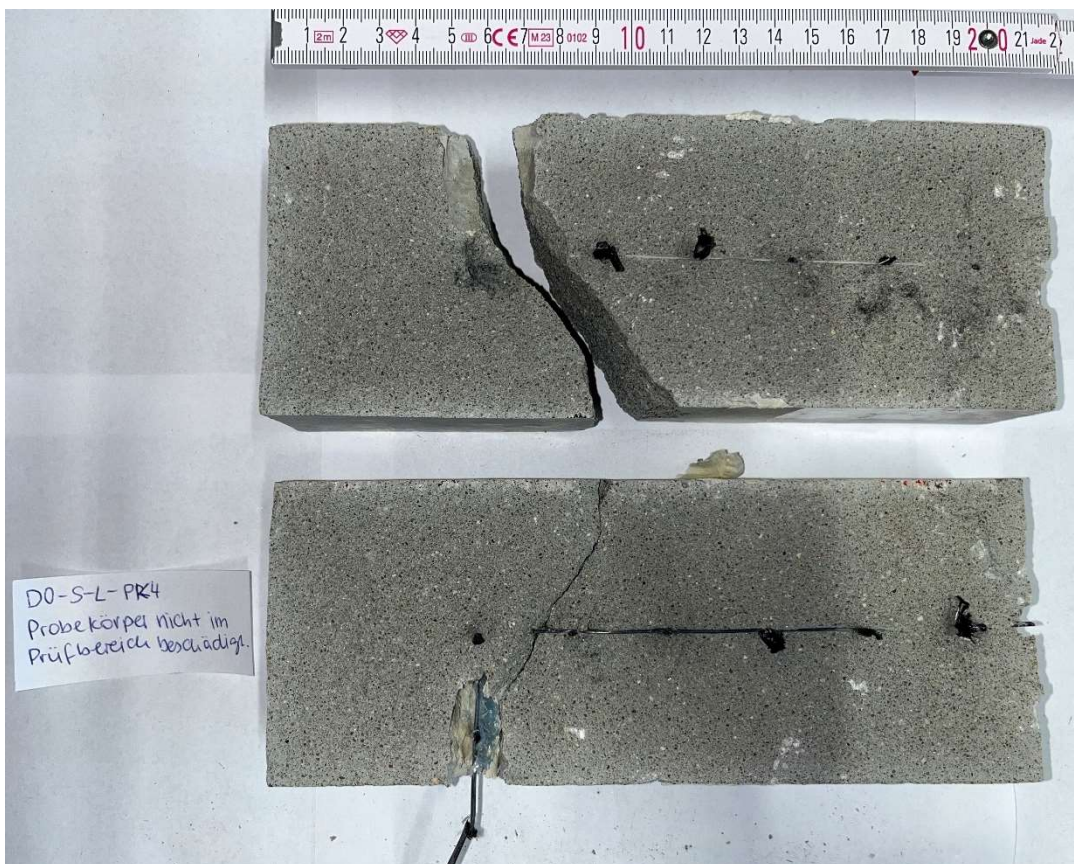


Abbildung 17: D0-S-L-PK4 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

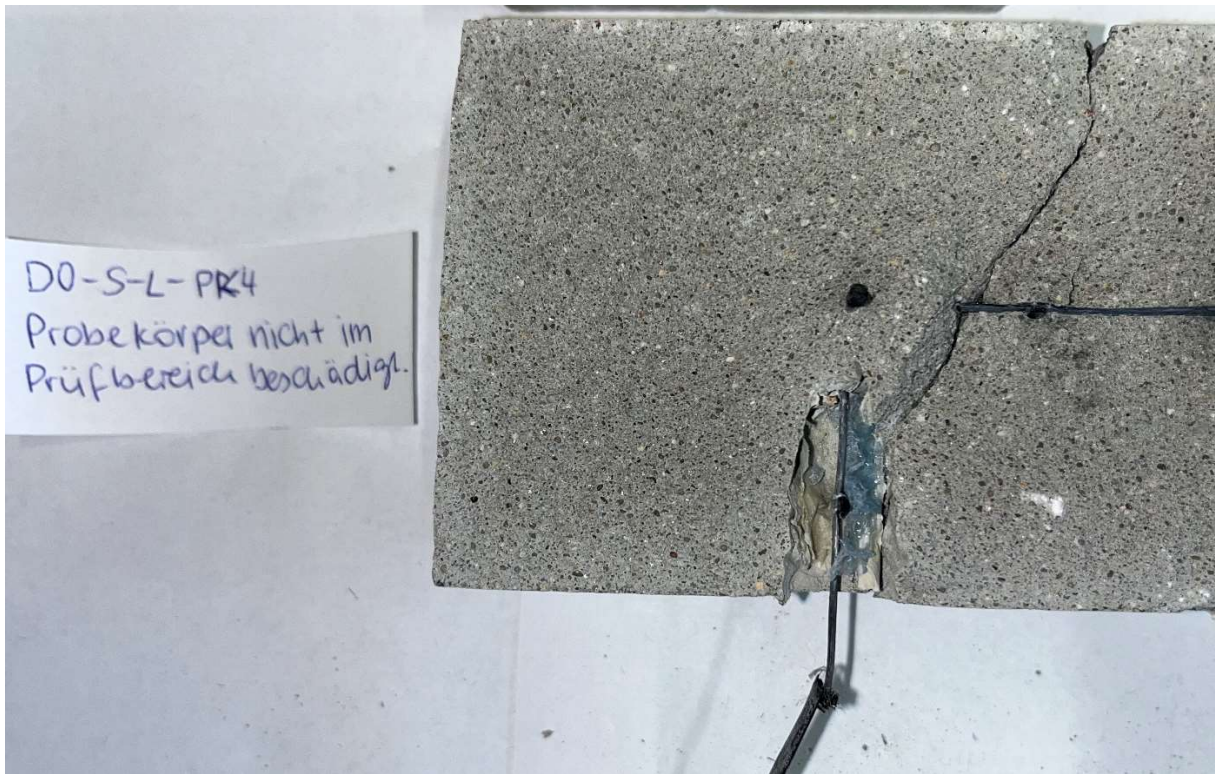


Abbildung 18: D0-S-L-PK4 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB

## 7.2 Bilder der Probekörper mit 10 mm Biegerollendurchmesser



Abbildung 19: D10-K-L-PK1 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Foto: TUD IMB



Abbildung 20: D10-K-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Foto: TUD IMB



Abbildung 21: D10-K-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Foto: TUD IMB

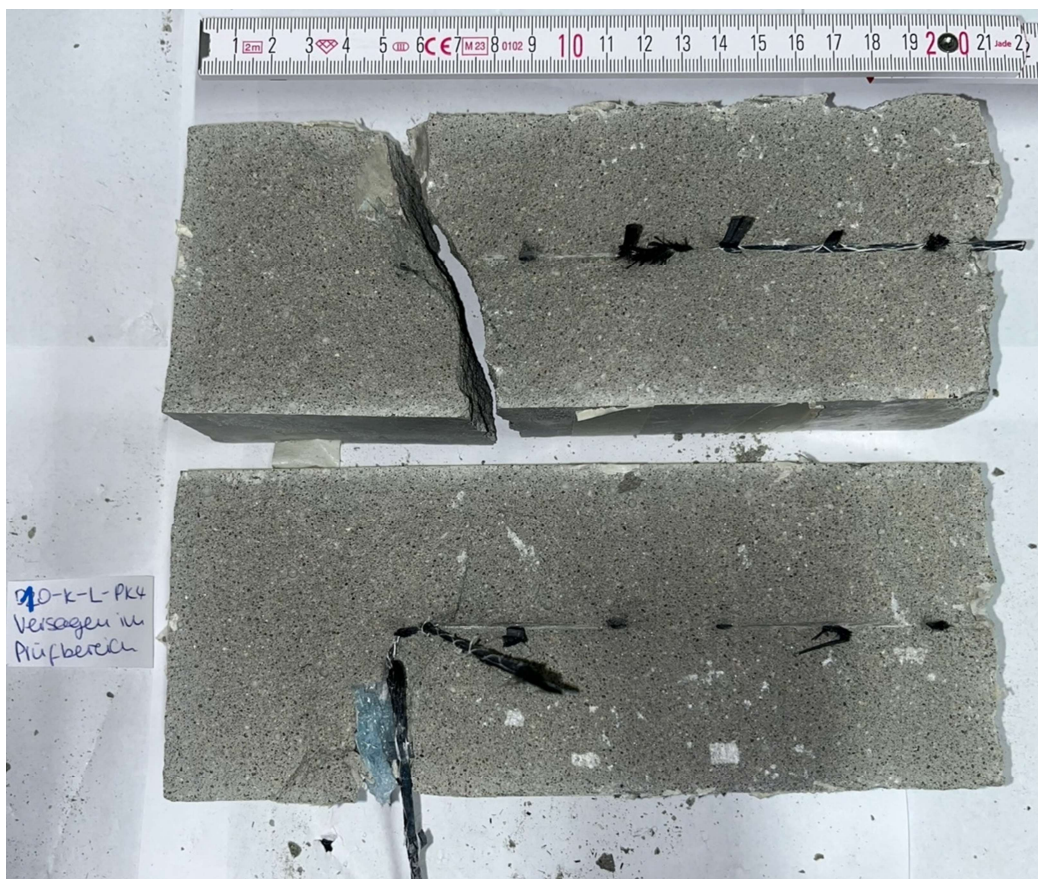


Abbildung 22: D10-K-L-PK4 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Foto: TUD IMB



Abbildung 23: D10-S-L-PK1 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Foto: TUD IMB



Abbildung 24: D10-S-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

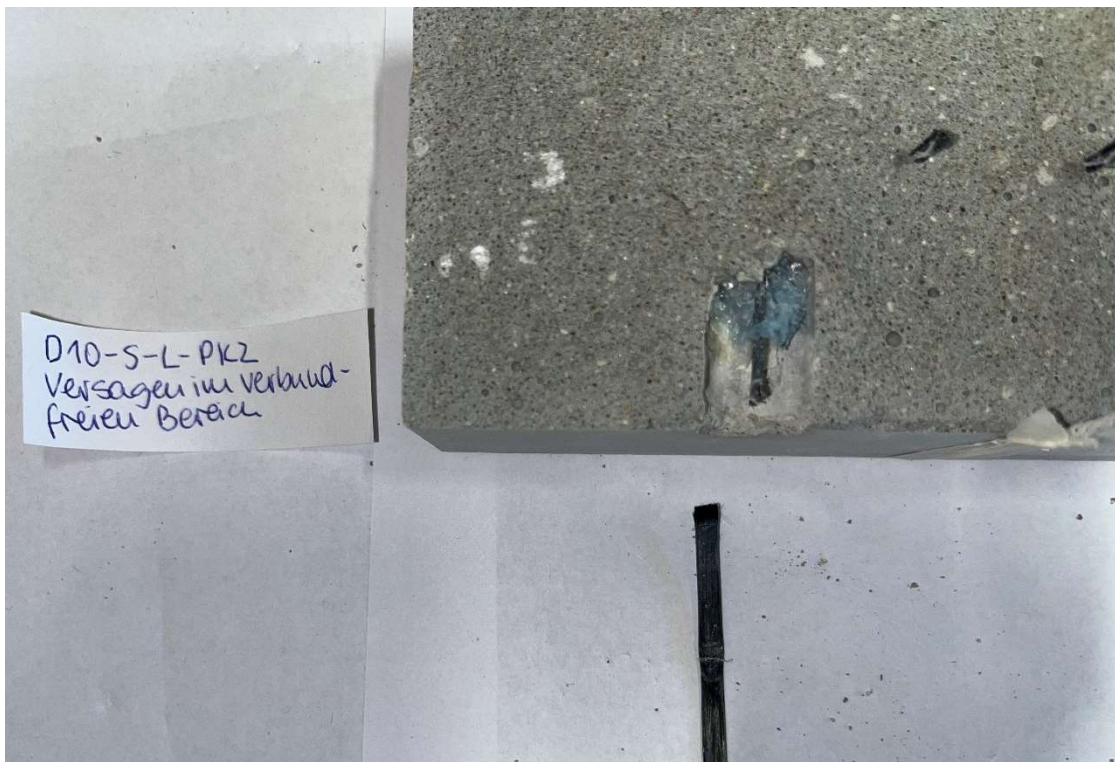


Abbildung 25: D10-S-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 26: D10-S-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Foto: TUD IMB



Abbildung 27: D10-S-L-PK4 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Foto: TUD IMB

7.3 Bilder der Probekörper mit 20 mm Biegerollendurchmesser



Abbildung 28: D20-K-L-PK1 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

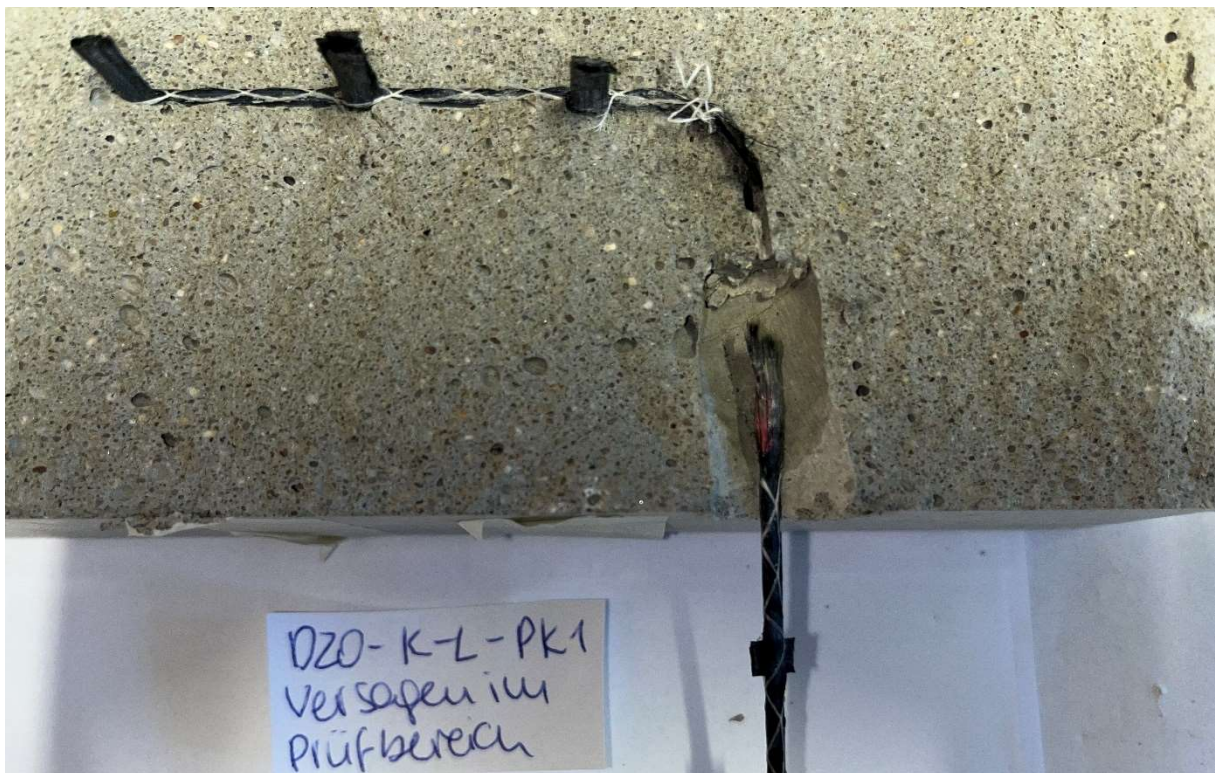


Abbildung 29: D20-K-L-PK1 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 30: D20-K-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 31: D20-K-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 32: D20-K-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 33: D20-K-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 34: D20-K-L-PK4 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

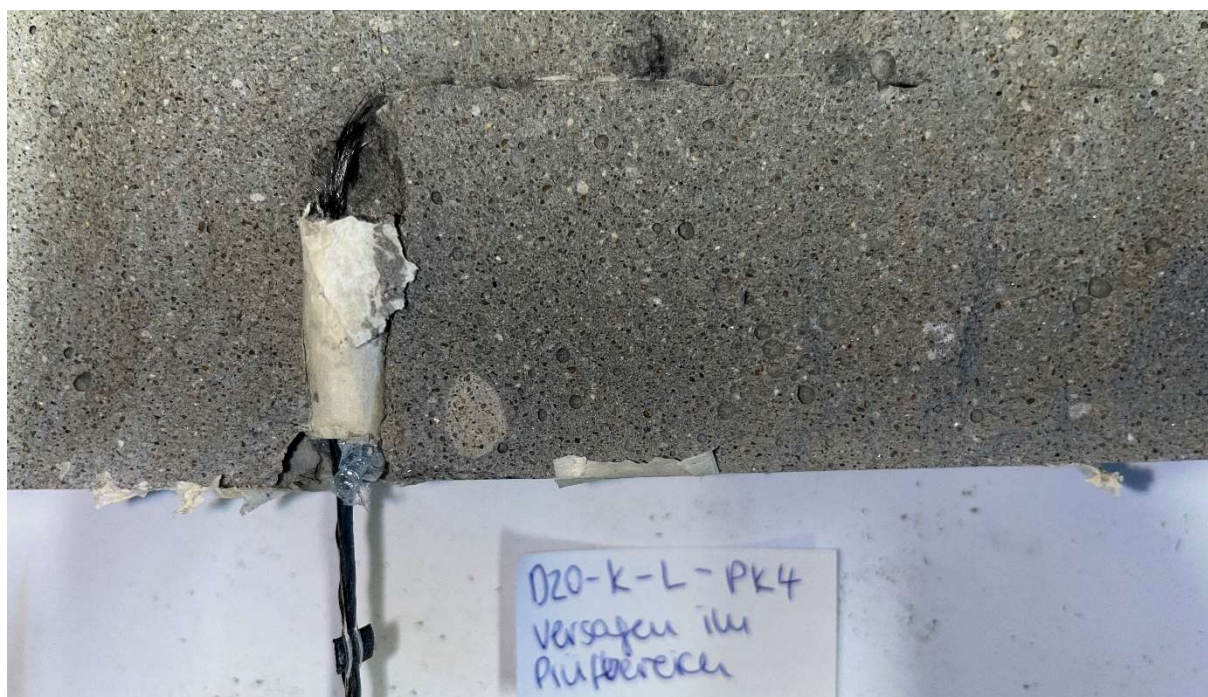


Abbildung 35: D20-K-L-PK4 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB

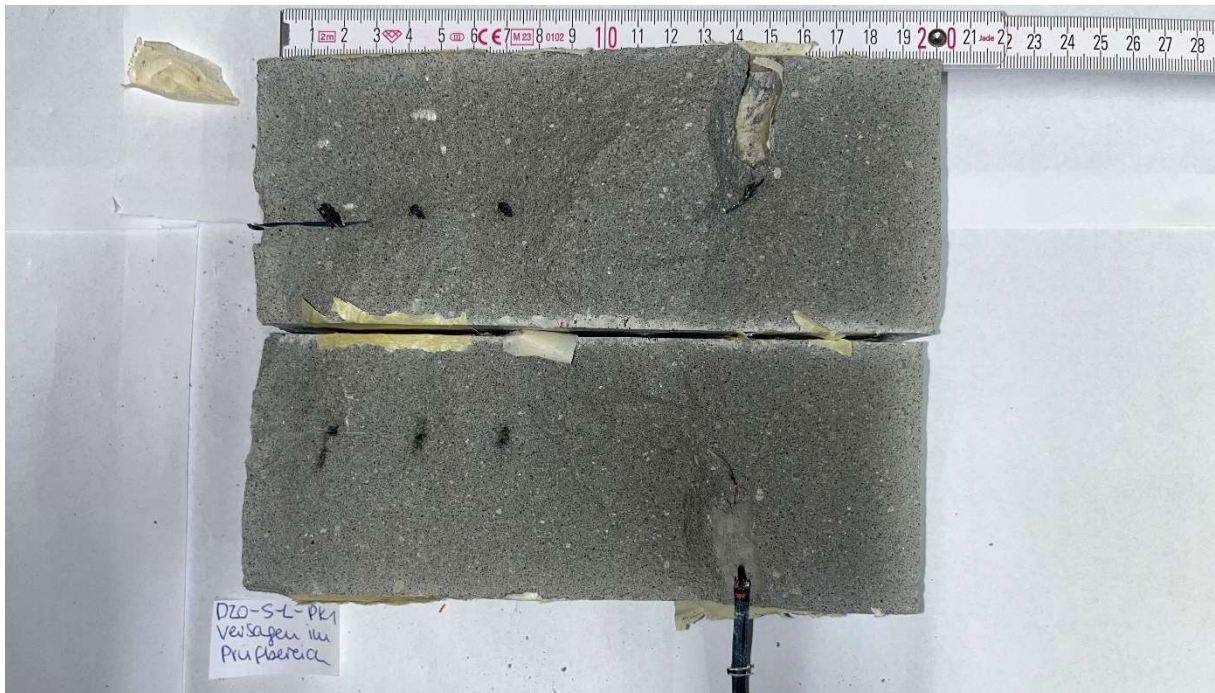


Abbildung 36: D20-S-L-PK1 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

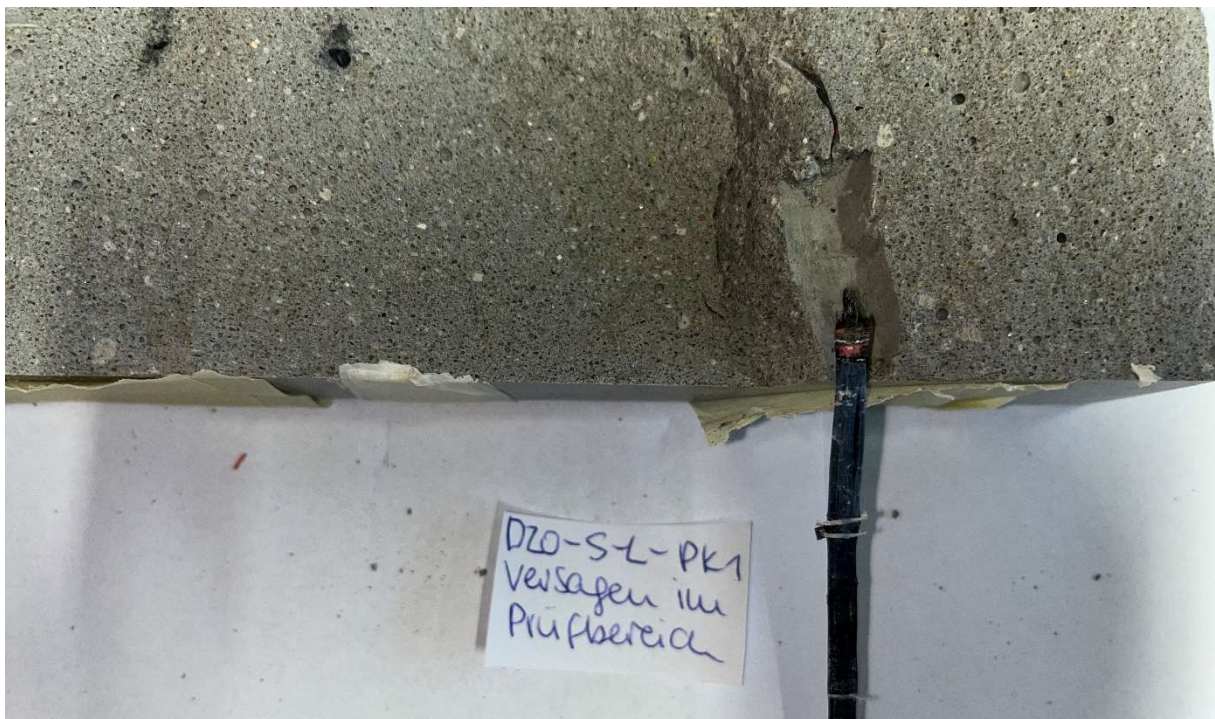


Abbildung 37: D20-S-L-PK1 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 38: D20-S-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 39: D20-S-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB

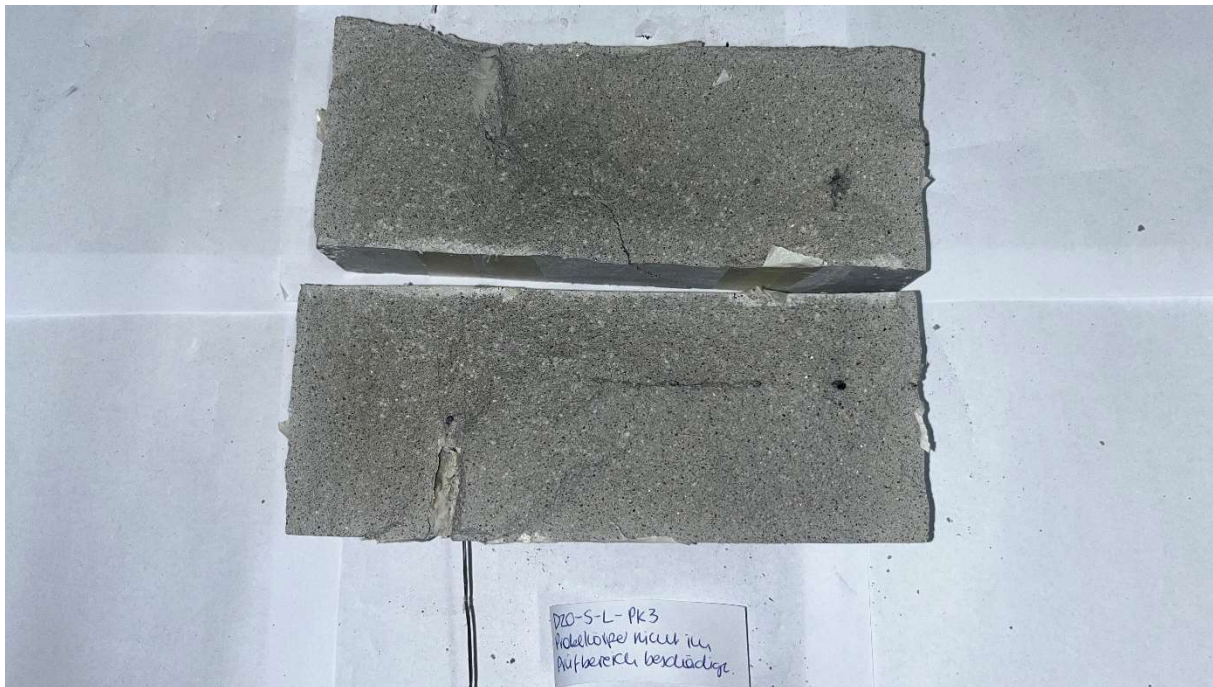


Abbildung 40: D20-S-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

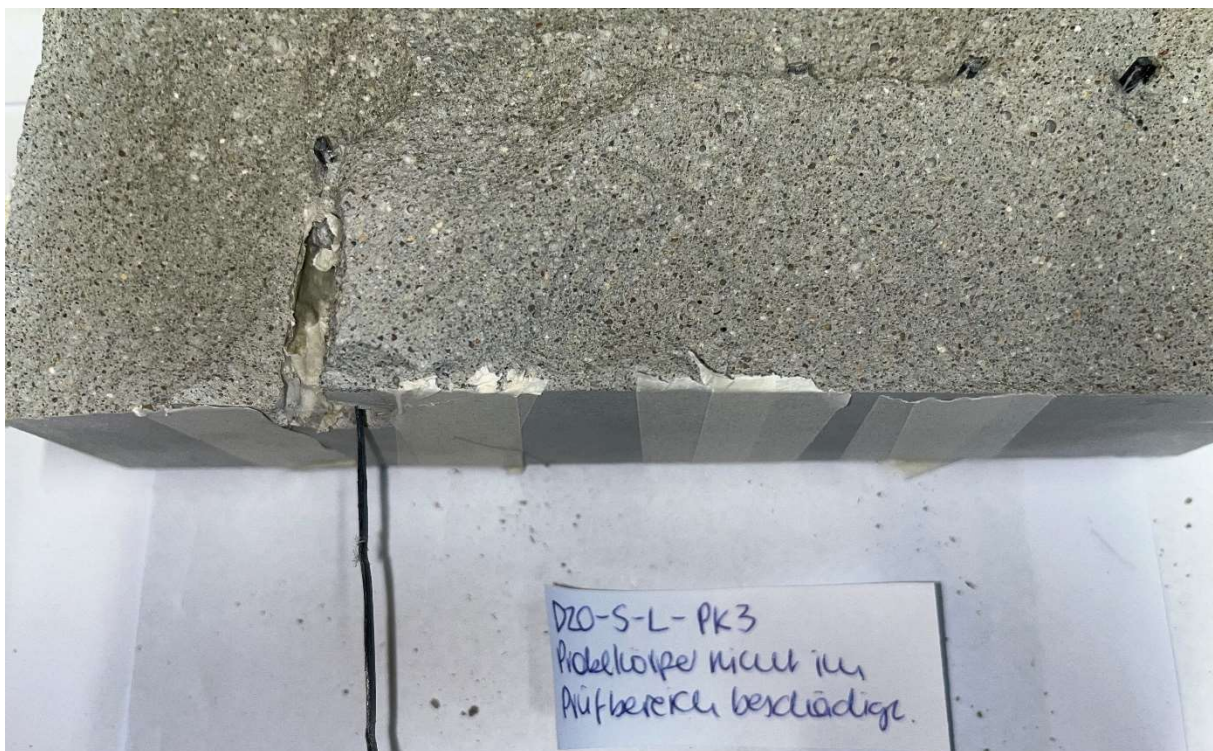


Abbildung 41: D20-S-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 42: D20-S-L-PK4 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 43: D20-S-L-PK4 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB

7.4 Bilder der Probekörper mit 30 mm Biegerollendurchmesser



Abbildung 44: D30-K-L-PK1 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

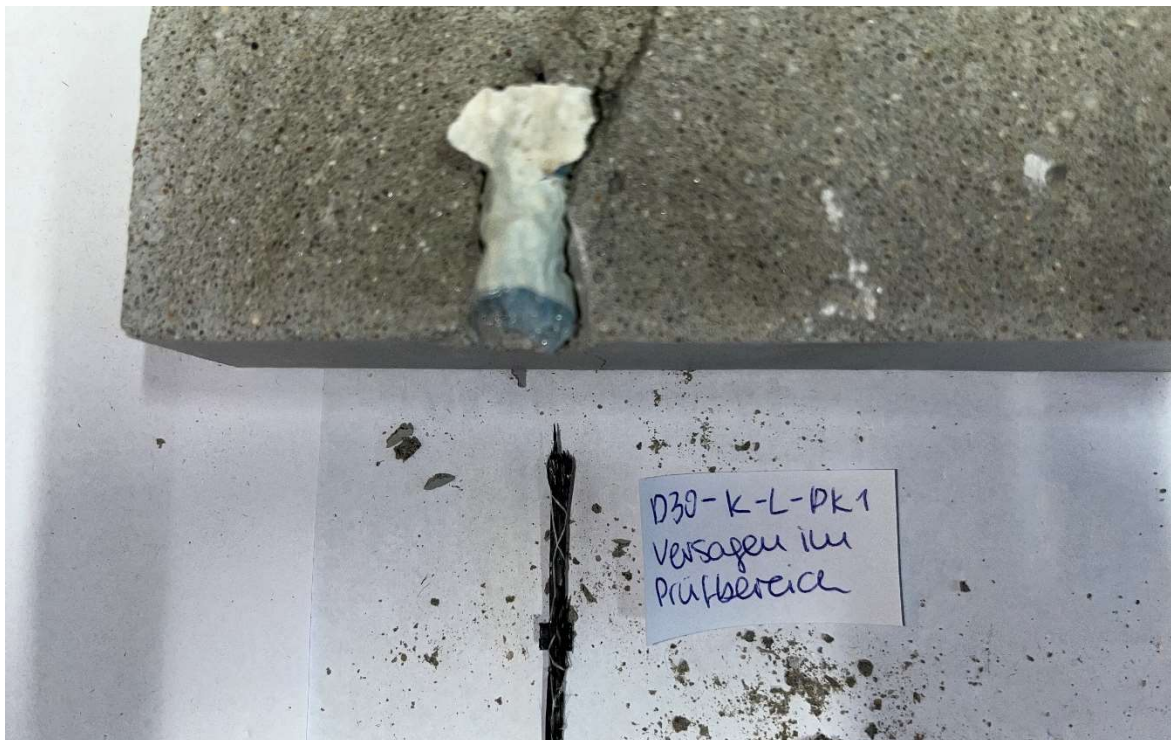


Abbildung 45: D30-K-L-PK1 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 46: D30-K-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

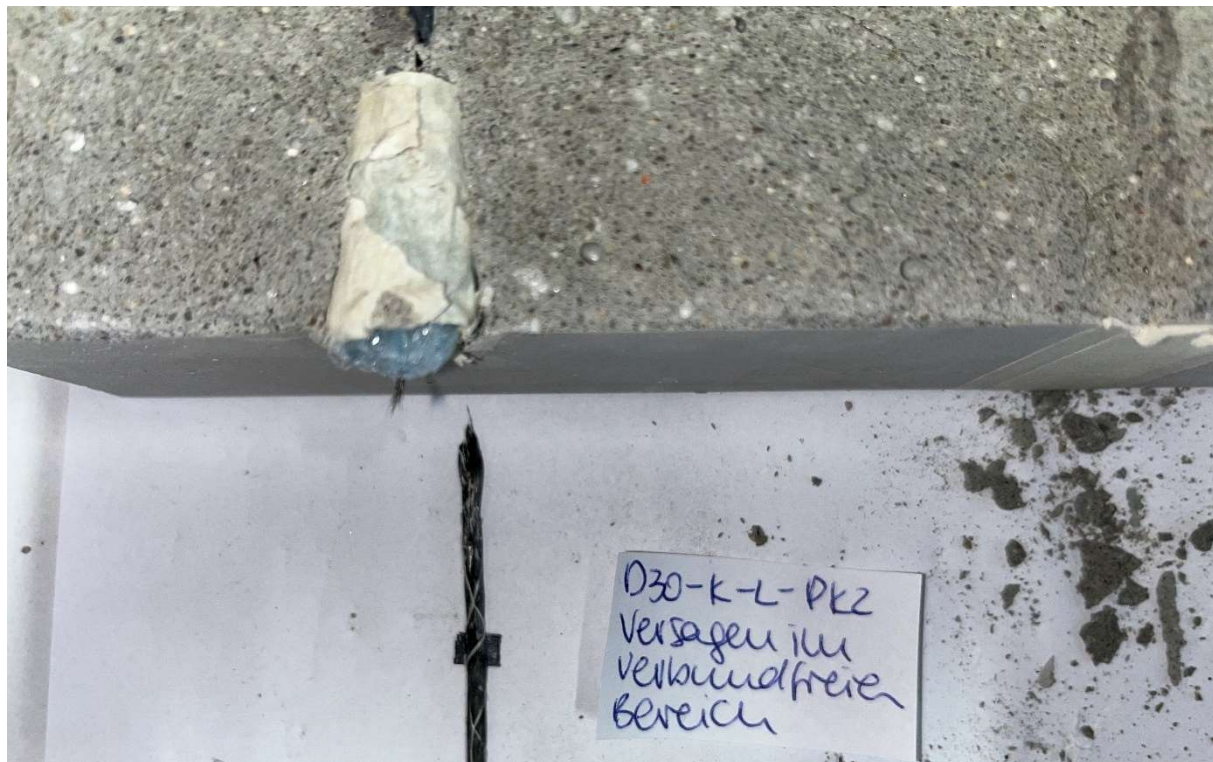


Abbildung 47: D30-K-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB

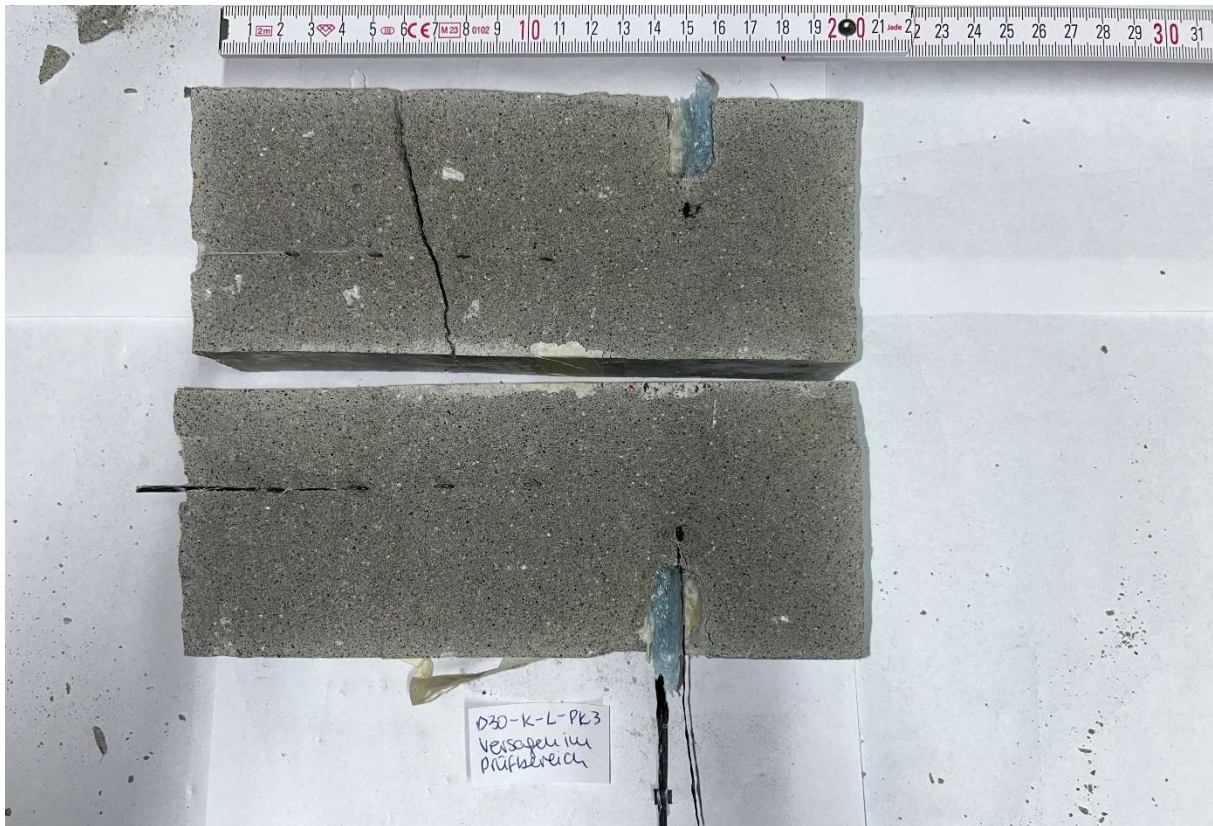


Abbildung 48: D30-K-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

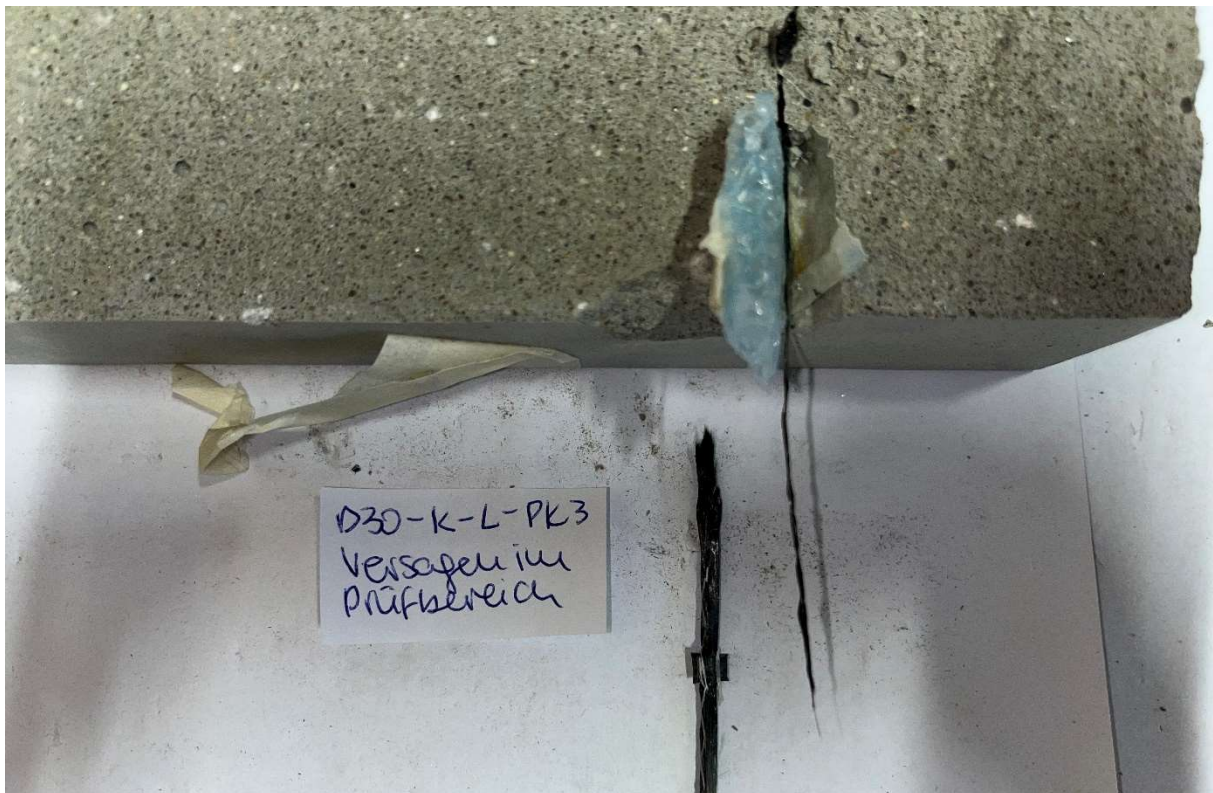


Abbildung 49: D30-K-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 50: D30-K-L-PK4 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 51: D30-K-L-PK4 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 52: D30-S-L-PK1 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 53: D30-S-L-PK1 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 54: D30-S-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

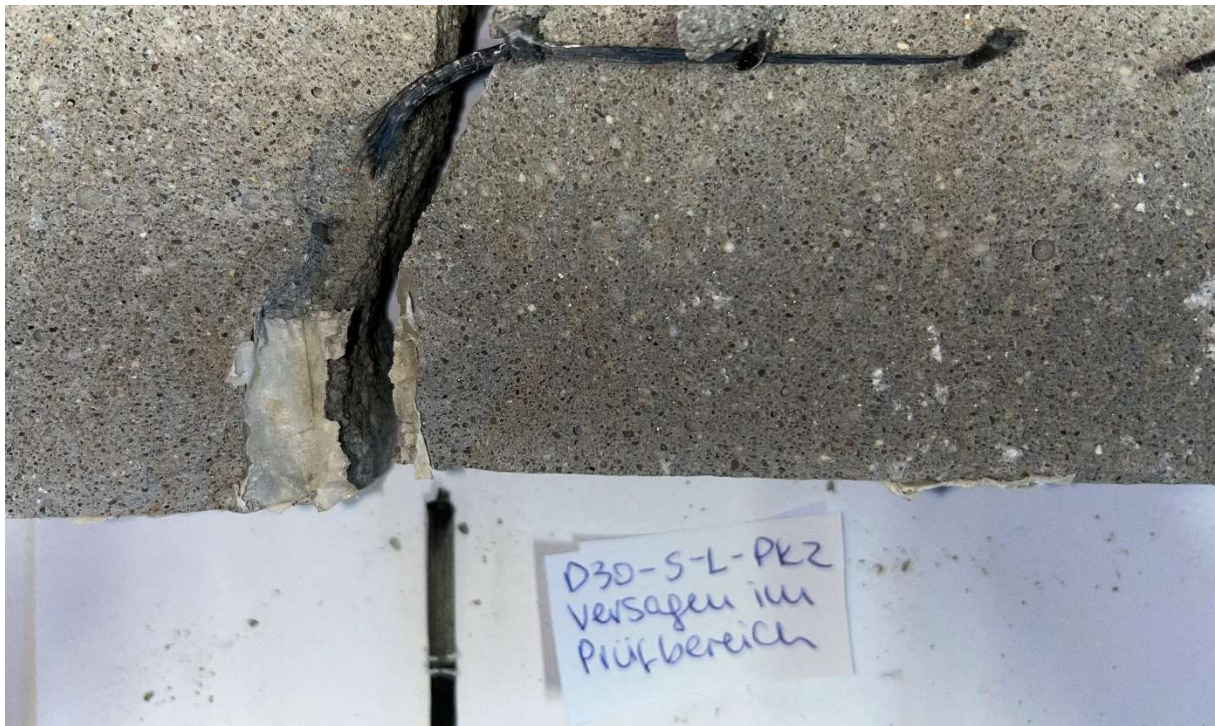


Abbildung 55: D30-S-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 56: D30-S-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

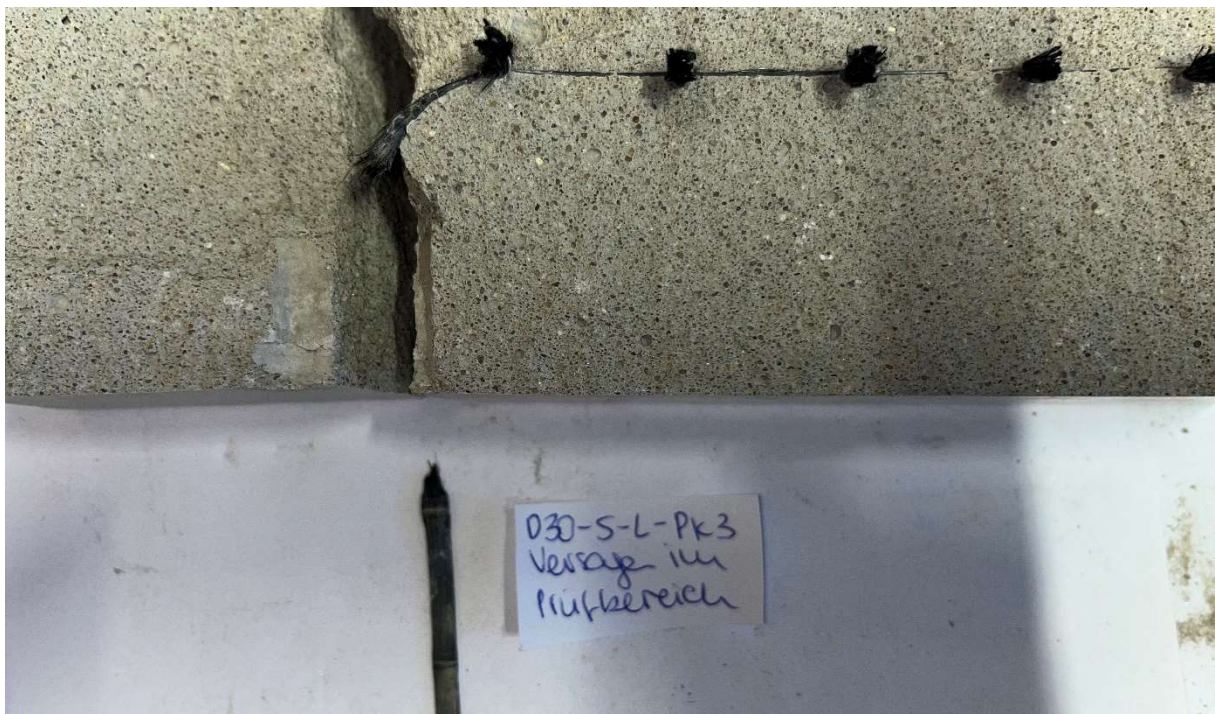


Abbildung 57: D30-S-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 58: D30-S-L-PK4 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

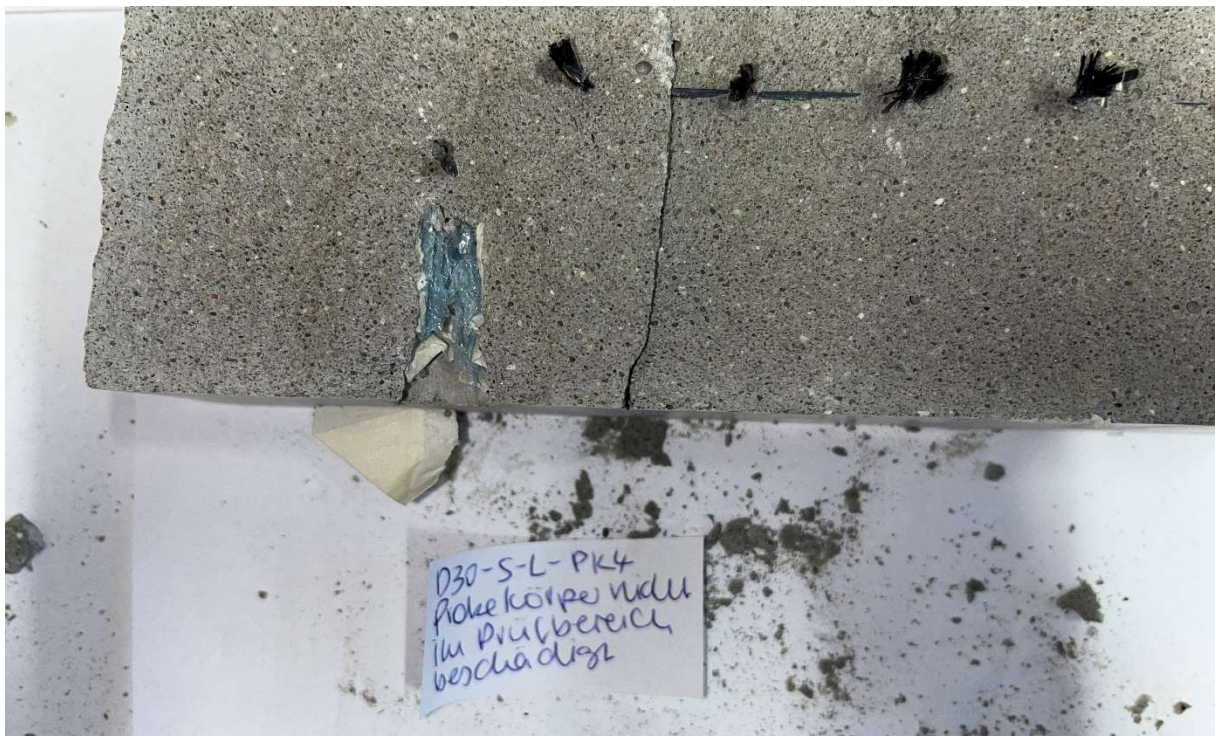


Abbildung 59: D30-S-L-PK4 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB

7.5 Bilder der Probekörper mit 50 mm Biegerollendurchmesser

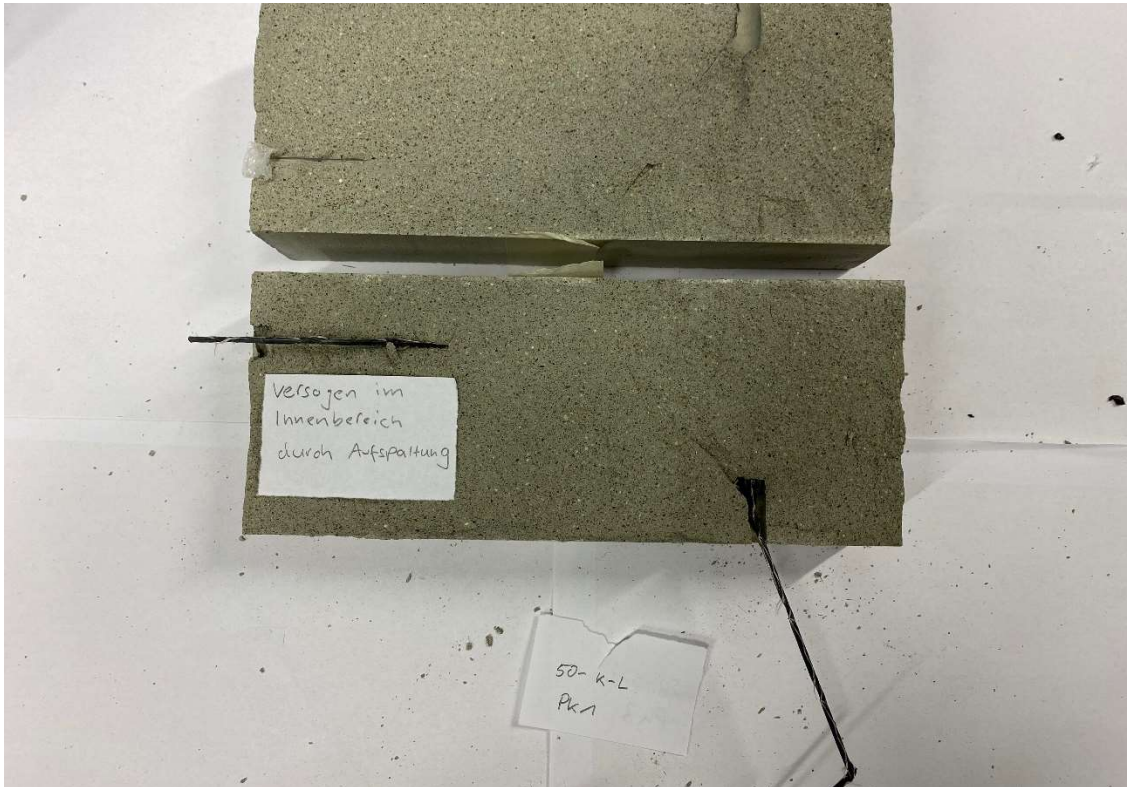


Abbildung 60: D50-K-L-PK1 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

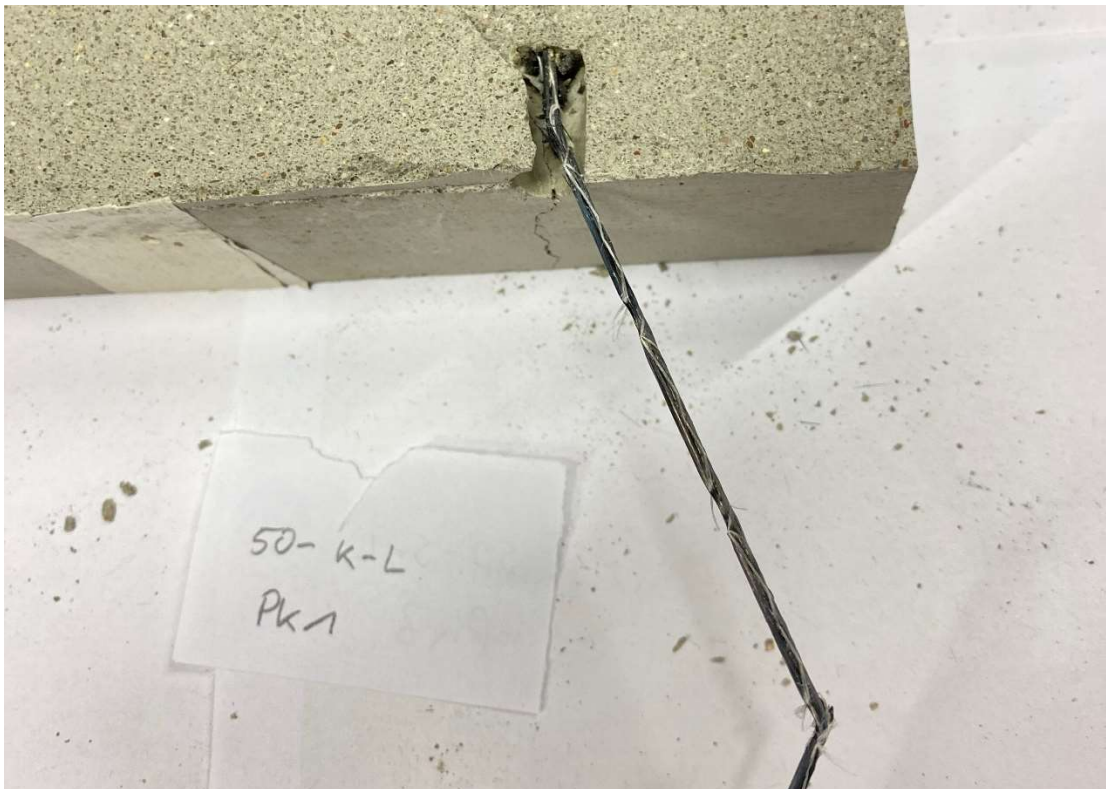


Abbildung 61: D50-K-L-PK1 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 62: D50-K-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

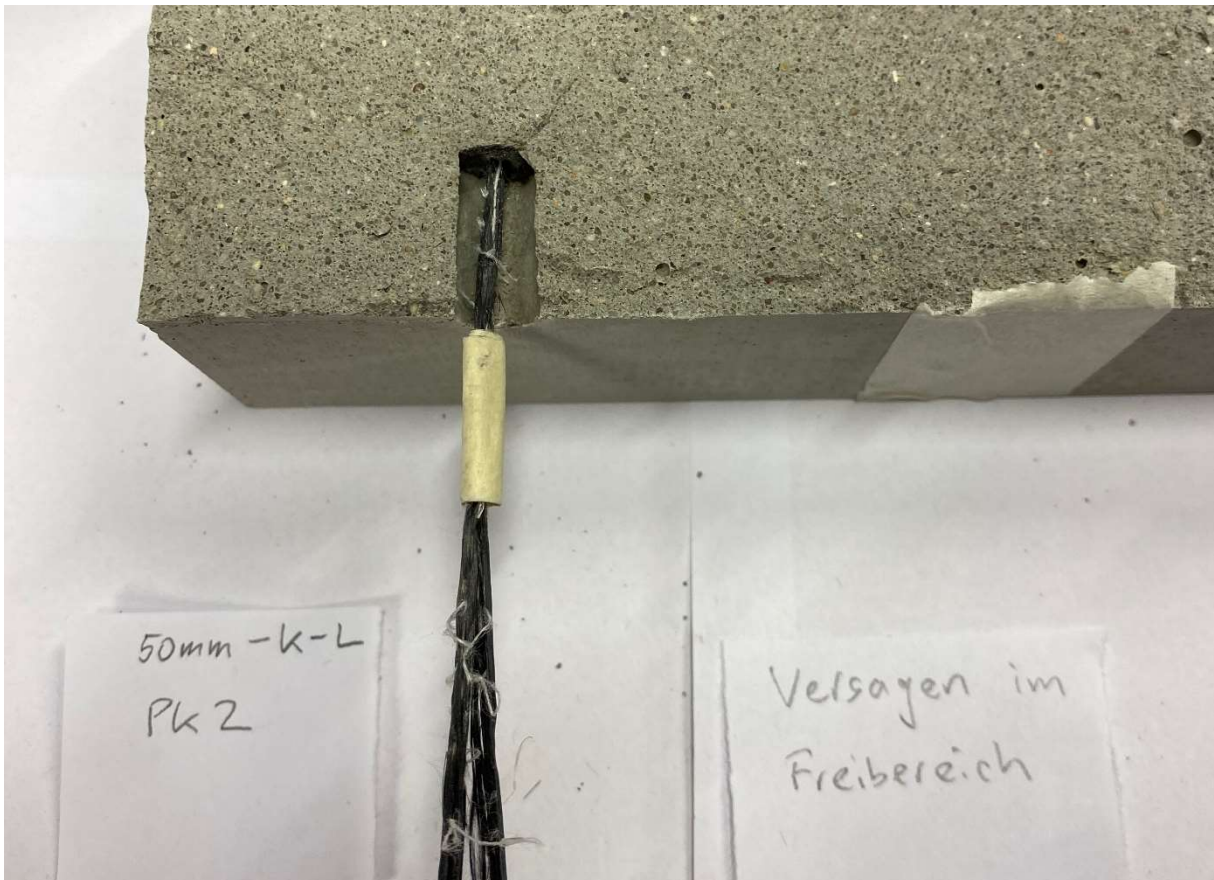


Abbildung 63: D50-K-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB

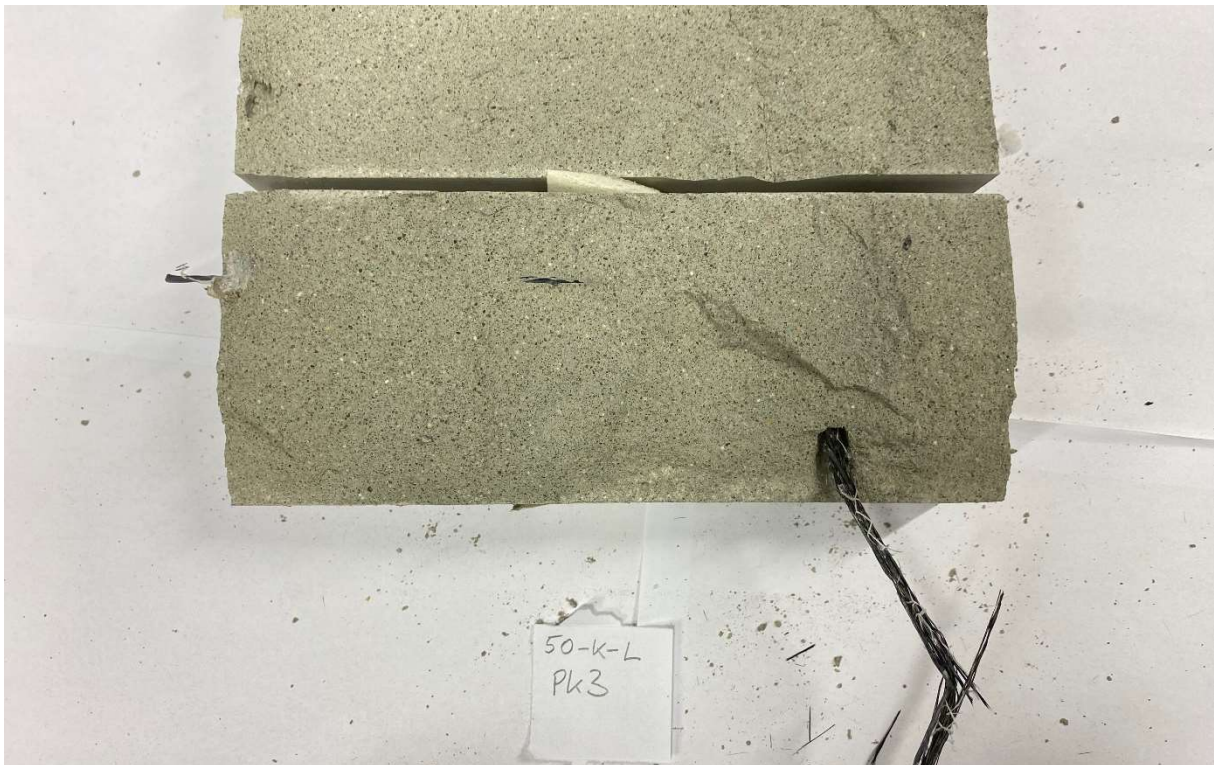


Abbildung 64: D50-K-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

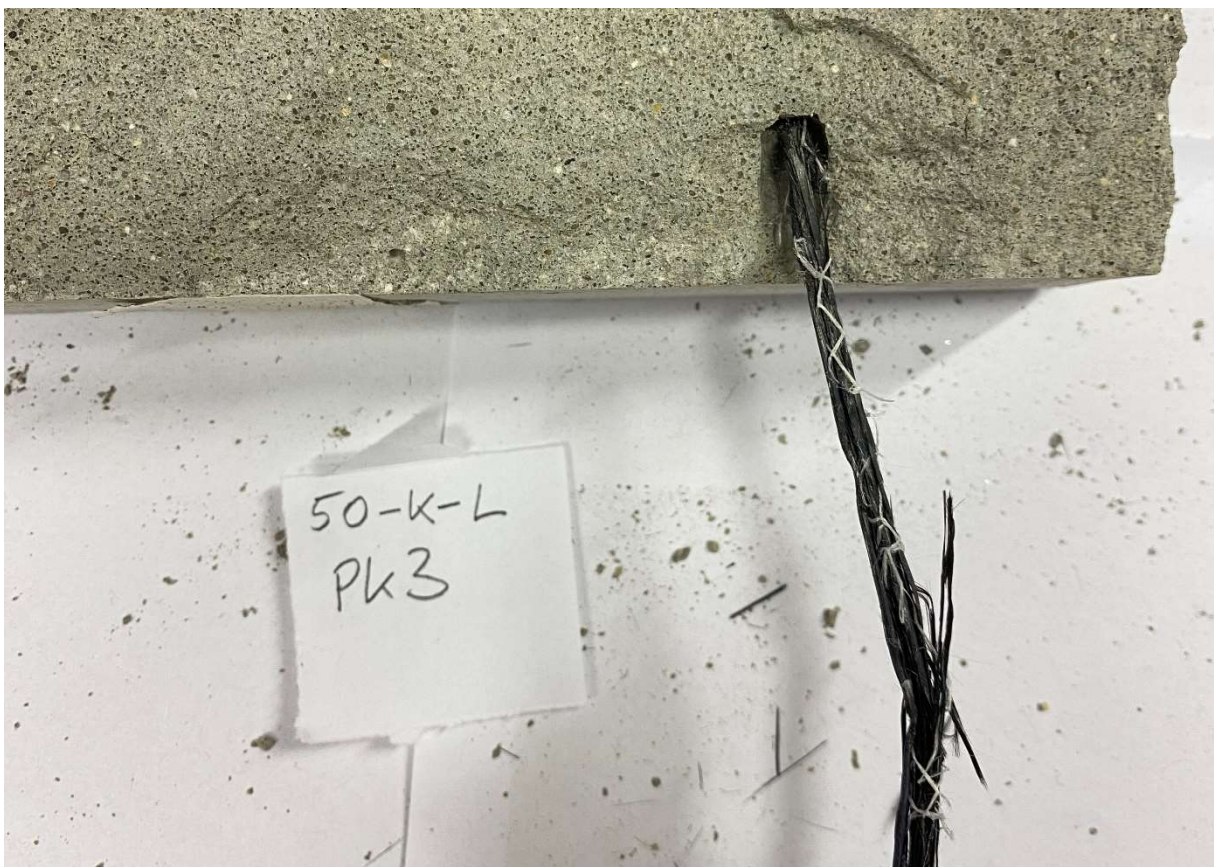


Abbildung 65: D50-K-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 66: D50-S-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB



Abbildung 67: D50-S-L-PK2 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB

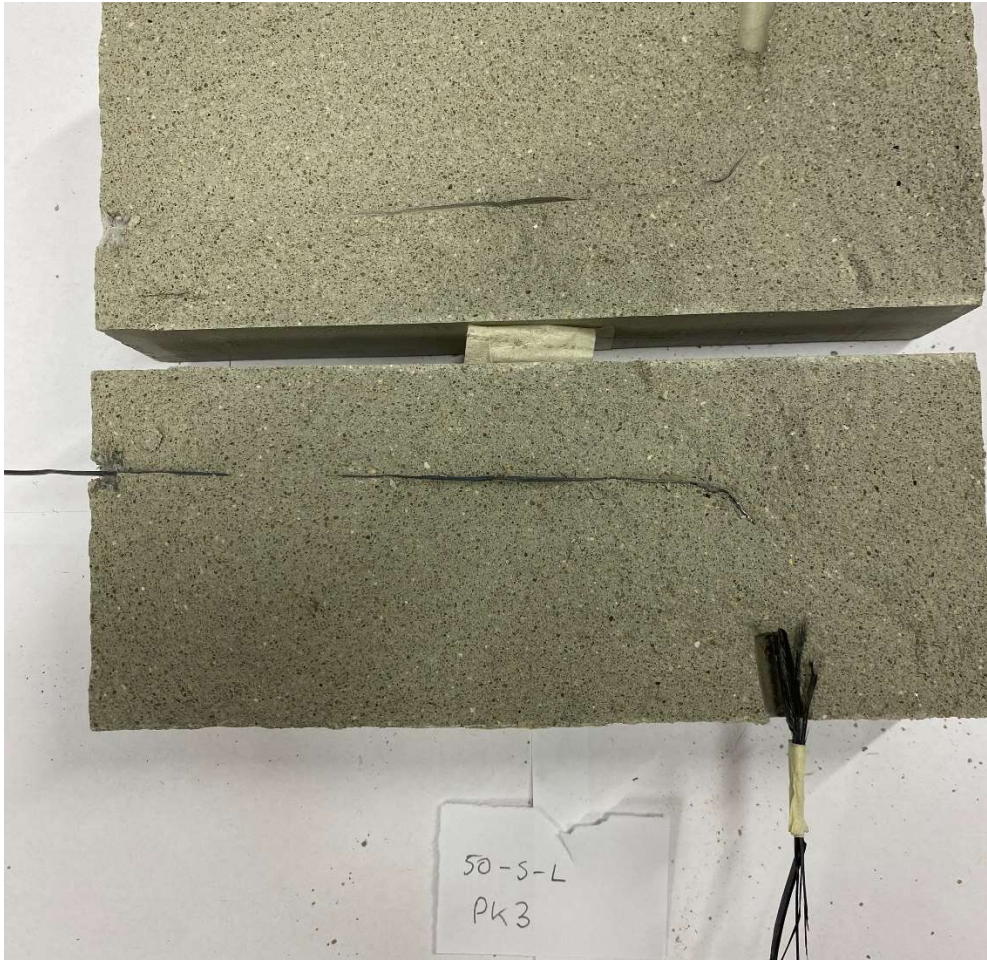


Abbildung 68: D50-S-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 1/2; Foto: TUD IMB

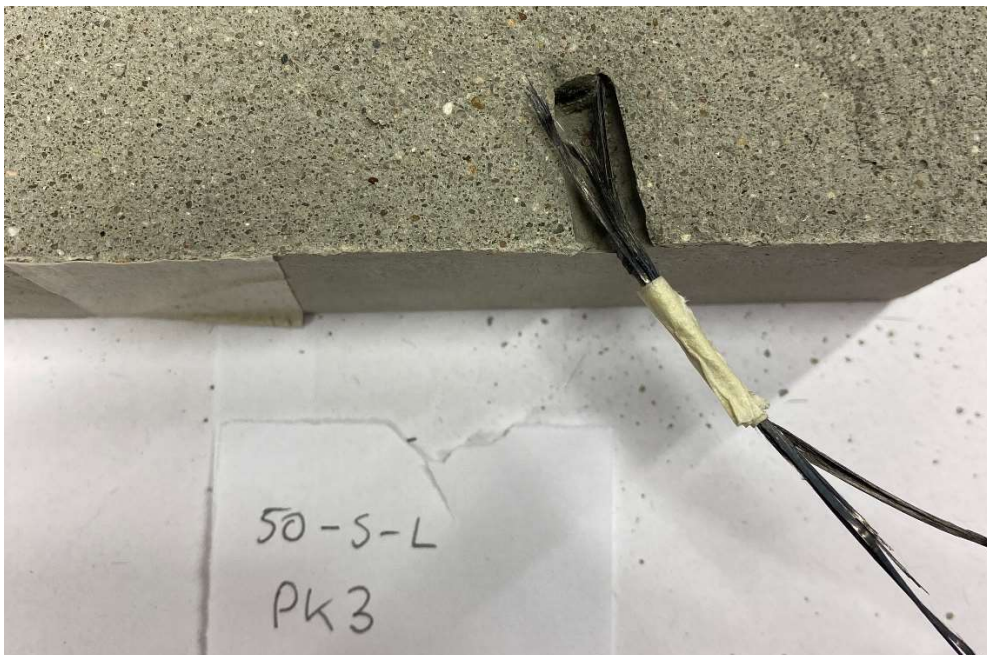


Abbildung 69: D50-S-L-PK3 aufgesägt nach Versuchsdurchführung; Bild 2/2; Foto: TUD IMB

7.6 Bilder des Versuchsaufbaus und der Probekörper mit geraden Garnen und 10mm Verankerungslänge

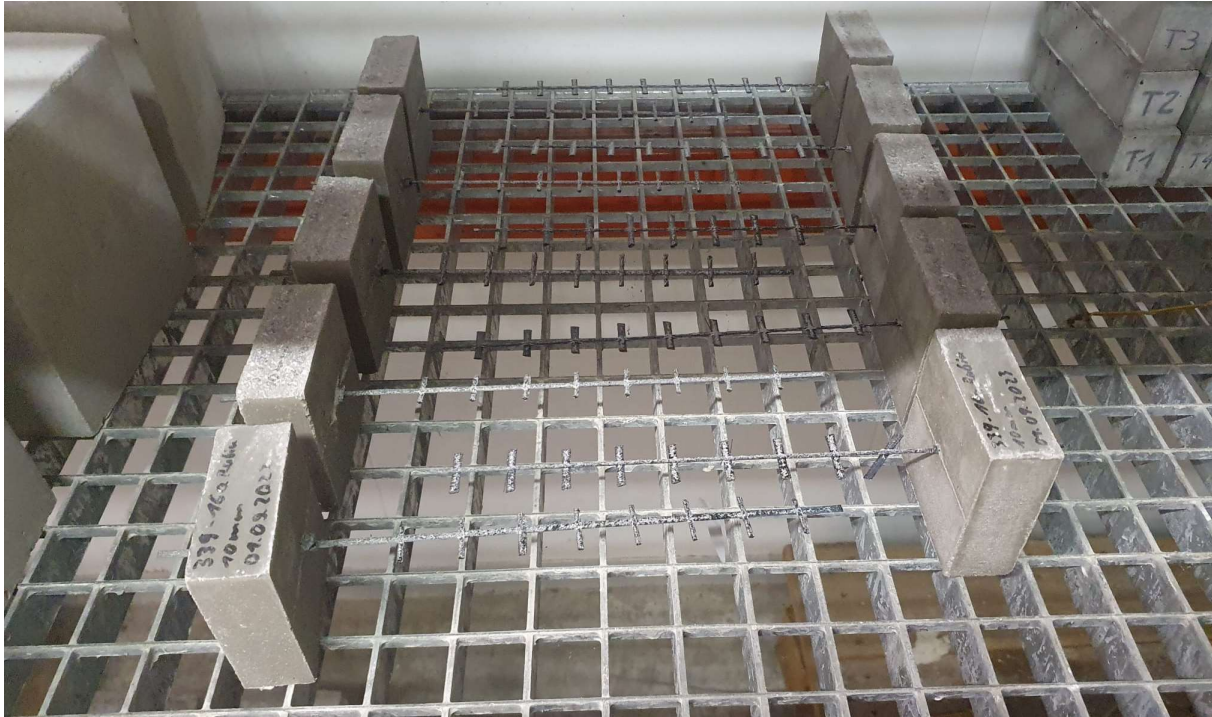


Abbildung 70: PK in Klimakammer (Foto: TUD IMB, Berk Guendogdu)



Abbildung 71: PK vor Prüfung (Foto: TUD IMB, Berk Guendogdu)

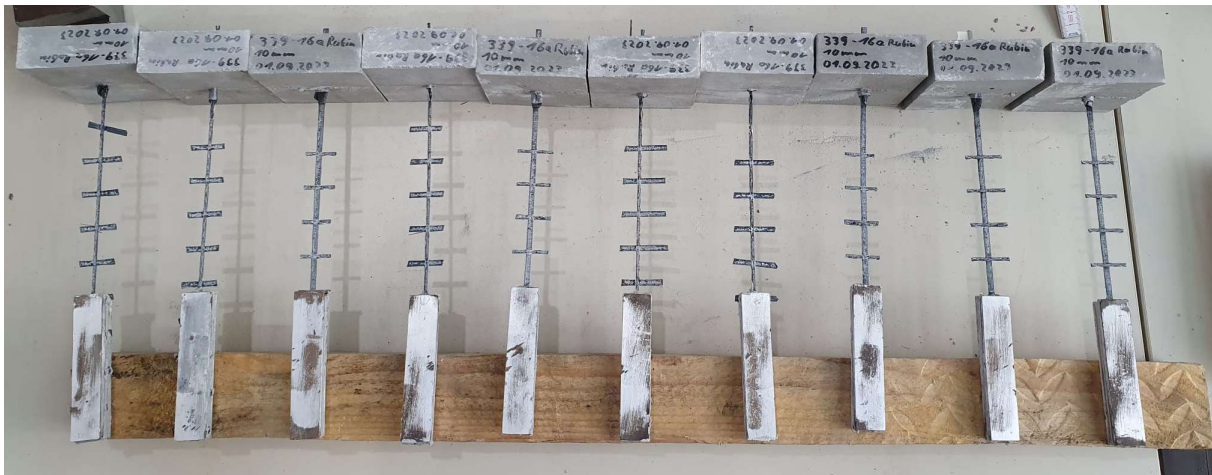


Abbildung 72: PK nach Prüfung; Bild 1/2 (Foto: TUD IMB, Berk Guendogdu)



Abbildung 73: PK nach Prüfung; Bild 2/2 (Foto: TUD IMB, Berk Guendogdu)



Abbildung 74: Versuchsaufbau (Foto: TUD IMB, Berk Guendogdu)



Abbildung 75: PK eingebaut; Bild 1/3 (Foto: TUD IMB, Berk Guendogdu)



Abbildung 76: PK eingebaut; Bild 2/3 (Foto: TUD IMB, Berk Guendogdu)



Abbildung 77: PK eingebaut; Bild 3/3 (Foto: TUD IMB, Berk Guendogdu)

## 7.7 Ergebnisse Zugversuche an CFK-Formgitterbewehrung

Tabelle 9: Ergebnisse der Zugversuche mit < 10 mm Biegerollendurchmesser in Kettrichtung

PK-Bezeichnung	Prüfdatum	Prüfkraft	Versagensart
D0-K-L-PK1	05.09.2022	1260,9	Garnbruch im Prüfbereich
D0-K-L-PK2	05.09.2022	1214,4	Garnbruch im Prüfbereich
D0-K-L-PK3	06.09.2022	1361,4	Garnbruch im Prüfbereich
D0-K-L-PK4	06.09.2022	1451,1	Garnbruch im Prüfbereich

Tabelle 10: Ergebnisse der Zugversuche mit < 10 mm Biegerollendurchmesser in Schussrichtung

PK-Bezeichnung	Prüfdatum	Prüfkraft	Versagensart
D0-S-L-PK1	05.09.2022	1202,8	Garnbruch im Verbundfreien Bereich
D0-S-L-PK2	05.09.2022	1834,6	Garnbruch im Prüfbereich
D0-S-L-PK3	06.09.2022	1488,5	Garnbruch im Prüfbereich
D0-S-L-PK4	06.09.2022	1034,5	Garnbruch ausserhalb des Prüfbereichs

Tabelle 11: Ergebnisse der Zugversuche mit 10 mm Biegerollendurchmesser in Kettrichtung

PK-Bezeichnung	Prüfdatum	Prüfkraft	Versagensart
D10-K-L-PK1	05.09.2022	1596,9	Garnbruch im Verbundfreienbereich + Prüfbereich
D10-K-L-PK2	05.09.2022	1227,2	Versagen nicht eindeutig ident. (Garnbruch)
D10-K-L-PK3	06.09.2022	1260,1	Garnbruch im Prüfbereich
D10-K-L-PK4	06.09.2022	1451,7	Garnbruch im Prüfbereich

Tabelle 12: Ergebnisse der Zugversuche mit 10 mm Biegerollendurchmesser in Schussrichtung

PK-Bezeichnung	Prüfdatum	Prüfkraft	Versagensart
D10-S-L-PK1	05.09.2022	1318,3	Garnbruch außerhalb des Prüfbereiches
D10-S-L-PK2	05.09.2022	1445,5	Garnbruch im Prüfbereich
D10-S-L-PK3	06.09.2022	1190,1	Garn vorgeschädigt, Garnbruch im Prüfbereich
D10-S-L-PK4	06.09.2022	1628,1	Garnbruch im Prüfbereich

Tabelle 13: Ergebnisse der Zugversuche mit 20 mm Biegerollendurchmesser in Kettrichtung

PK-Bezeichnung	Prüfdatum	Prüfkraft	Versagensart
D20-K-L-PK1	05.09.2022	2146,0	Garnbruch im Prüfbereich
D20-K-L-PK2	05.09.2022	1056,8	Garn vorgeschädigt, Versagen an geschädigter Stelle
D20-K-L-PK3	05.09.2022	2853,9	Garnbruch im Prüfbereich
D20-K-L-PK4	05.09.2022	2728,3	Garnbruch im Prüfbereich

Tabelle 14: Ergebnisse der Zugversuche mit 20 mm Biegerollendurchmesser in Schussrichtung

PK-Bezeichnung	Prüfdatum	Prüfkraft	Versagensart
D20-S-L-PK1	05.09.2022	2367,2	Garnbruch im Prüfbereich
D20-S-L-PK2	05.09.2022	2595,6	Garnbruch im Prüfbereich
D20-S-L-PK3	05.09.2022	2603,0	Garnbruch kurz über Lasteinleitung Garnbruch oberhalb Lasteinleitung an Knotenpunkt; Versagen im Prüfbereich; nicht eindeutig identifiziert
D20-S-L-PK4	08.09.2022	2274,2	

Tabelle 15: Ergebnisse der Zugversuche mit 30 mm Biegerollendurchmesser in Kettrichtung

PK-Bezeichnung	Prüfdatum	Prüfkraft	Versagensart
D30-K-L-PK1	06.09.2022	2110,7	Multiple Garnversagen Garnversagen oberhalb Lasteinleitung + Prüfbereich
D30-K-L-PK2	06.09.2022	2956,8	Garnbruch im freien Bereich + Prüfbereich, unzureichende Garntränkung im Prüfbereich
D30-K-L-PK3	06.09.2022	2899,4	Garnversagen oberhalb Lasteinleitung + Prüfbereich
D30-K-L-PK4	06.09.2022	2567,4	

Tabelle 16: Ergebnisse der Zugversuche mit 30 mm Biegerollendurchmesser in Schussrichtung

PK-Bezeichnung	Prüfdatum	Prüfkraft	Versagensart
D30-S-L-PK1	06.09.2022	2198,2	Garnbruch oberhalb Lasteinleitung an Knotenpunkt
D30-S-L-PK2	06.09.2022	2584,8	Garnbruch oberhalb Lasteinleitung an Knotenpunkt
D30-S-L-PK3	06.09.2022	2498,0	Garnbruch oberhalb Lasteinleitung am Knotenpunkt + Prüfbereich, unzureichende Garntränkung im Prüfbereich
D30-S-L-PK4	06.09.2022	2015,8	Garnbruch oberhalb Lasteinleitung am Knotenpunkt + Prüfbereich, unzureichende Garntränkung im Prüfbereich

Tabelle 17: Ergebnisse der Zugversuche mit 50 mm Biegerollendurchmesser in Kettrichtung

PK-Bezeichnung	Prüfdatum	Prüfkraft	Versagensart
D50-K-L-PK1	17.08.2022	3321,5	Auszug aus PB, Garnversagen knapp über LE
D50-K-L-PK2	17.08.2022	3806,1	Auszug aus PB, Garnversagen im freien Bereich
D50-K-L-PK3	17.08.2022	3701,9	Garnversagen im freien Bereich

*Tabelle 18: Ergebnisse der Zugversuche mit 50 mm Biegerollendurchmesser in Schussrichtung*

<b>PK-Bezeichnung</b>	<b>Prüfdatum</b>	<b>Prüfkraft</b>	<b>Versagensart</b>
D50-S-L-PK1	17.08.2022	3219,7	Auszug aus PB, Garnversagen im freien Bereich
D50-S-L-PK2	17.08.2022	3504,5	Auszug aus PB, Garnspalten im freien Bereich
D50-S-L-PK3	17.08.2022	3381,9	Garnauszug aus PB, Garnversagen im freien Bereich

### Faserauszugsprüfung

OML-Projektnummer : 2022_I339-19	Serienbezeichnung : YPO-
Projektname : RUBIN ISC	Werkstoff : Gelege: HTC21
Auftraggeber : Gündogdu	Lagerung : Klimakammer
Herstelldatum : 21./22.08.2023	Prüfnorm : Auszug
Prüfdatum : 05.09.2022	Prüfgeschwindigkeit : 1 mm/min
Prüfalter : 14d	Prüfer : G. Berger

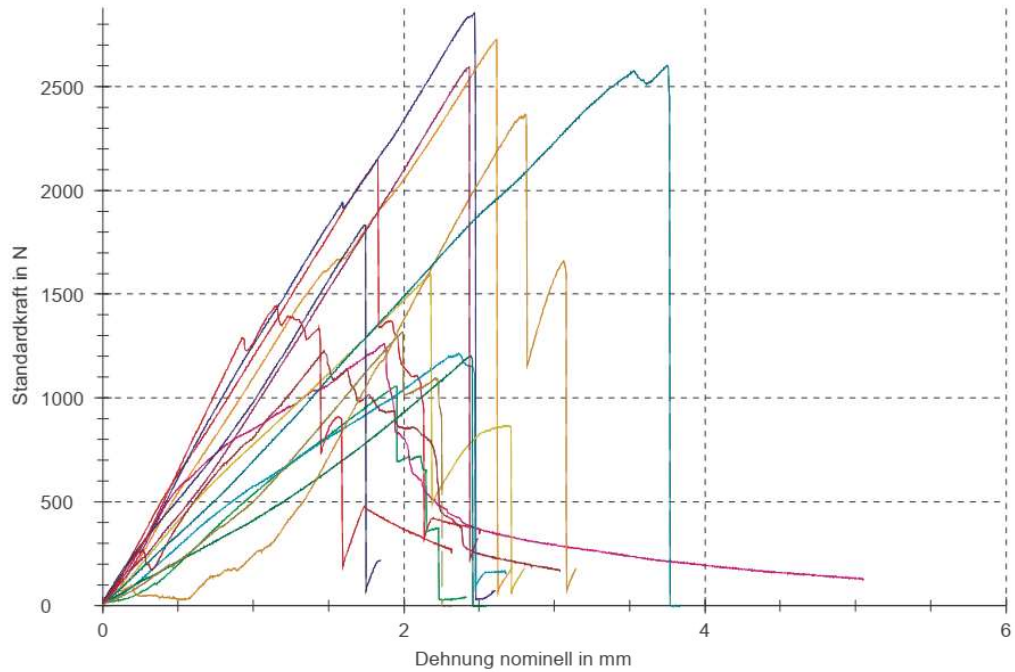
#### Prüfergebnisse:

Legende	Probe	Prüfdatum	F <sub>max</sub> N	Raumtemp. °C
	D20-K-L-PK1	05.09.2022	2150	23,7
	D20-K-L-PK2	05.09.2022	1060	23,7
	D20-K-L-PK3	05.09.2022	2850	23,7
	D20-K-L-PK4	05.09.2022	2730	23,7
	D0-K-L-PK1	05.09.2022	1260	23,7
	D0-K-L-PK2	05.09.2022	1210	23,7
	D10-K-L-PK1	05.09.2022	1600	23,7
	D10-K-L-PK2	05.09.2022	1230	23,7
	D0-S-L-PK1	05.09.2022	1200	23,7
	D0-S-L-PK2	05.09.2022	1830	23,7
	D20-S-L-PK1	05.09.2022	2370	23,7
	D20-S-L-PK2	05.09.2022	2600	23,7
	D20-S-L-PK3	05.09.2022	2600	23,7
	D10-S-L-PK1	05.09.2022	1320	23,7
	D10-S-L-PK2	05.09.2022	1450	23,7

Legende	Bemerkung Probe
	Garnbruch im Prüfbereich
	Garn vorgeschädigt, Versagen an geschädigte
	Garnbruch im Prüfbereich
	Garnbruch im Prüfbereich
	Garnbruch im Prüfbereich
	Garnbruch im Prüfbereich
	Garnbruch im Prüfbereich
	Versagen nicht eindeutig ident. (Garnbruch), IWA von Ga abgerutscht
	Garnbruch im Prüfbereich
	Garnbruch im Prüfbereich
	Garnbruch im Prüfbereich
	Garnbruch im Prüfbereich
	Garnbruch knapp über Lasteinleitung
	Garnbruch außerhalb des Prüfbereiches
	Garnbruch im Prüfbereich

**Faserauszugsprüfung**

**Seriengrafik:**



### Faserauszugsprüfung



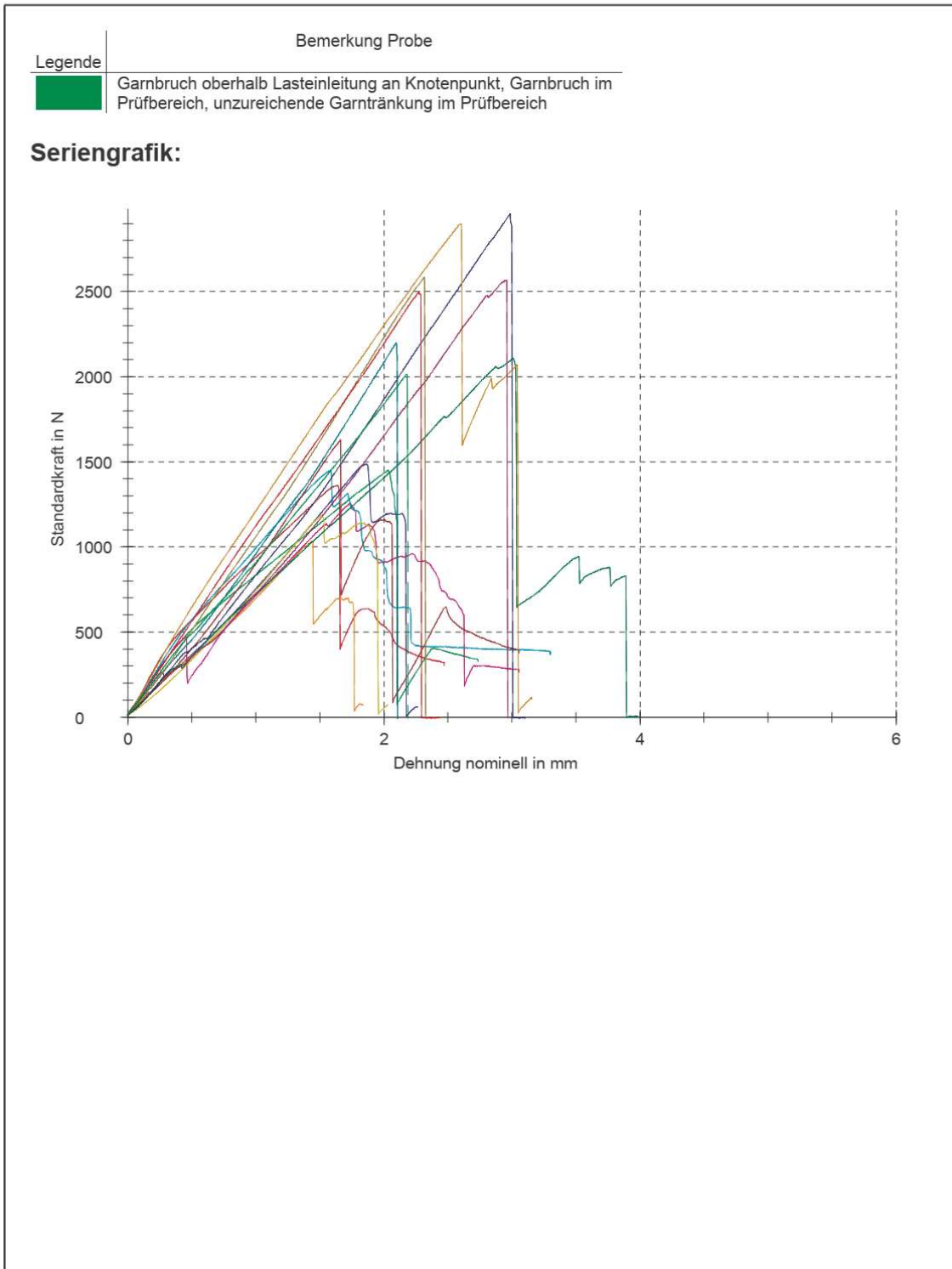
OML-Projektnummer : 2022\_I339-19      Serienbezeichnung : YPO-  
 Projektname : RUBIN ISC      Werkstoff : Gelege: HTC21  
 Auftraggeber : Gündocdu      Lagerung : Klimakammer  
 Herstellungsdatum : 23./24.08.2023      Prüfnorm : Auszug  
 Prüfdatum : 06.09.2022      Prüfgeschwindigkeit : 1 mm/min  
 Prüfmittel : 14d / 13d      Prüfer : G. Berger

#### Prüfergebnisse:

Legende	Probe	Prüfdatum	F <sub>max</sub> N	Raumtemp. °C
	D0-K-L-PK3	06.09.2022	1360	23,7
	D0-K-L-PK4	06.09.2022	1450	23,7
	D0-S-L-PK3	06.09.2022	1490	23,7
	D0-S-L-PK4	06.09.2022	1030	23,7
	D10-K-L-PK3	06.09.2022	1260	23,7
	D10-K-L-PK4	06.09.2022	1450	23,7
	D10-S-L-PK3	06.09.2022	1190	23,7
	D10-S-L-PK4	06.09.2022	1630	23,7
	D30-K-L-PK1	06.09.2022	2110	23,7
	D30-K-L-PK2	06.09.2022	2960	23,7
	D30-K-L-PK3	06.09.2022	2900	23,7
	D30-K-L-PK4	06.09.2022	2570	23,7
	D30-S-L-PK1	06.09.2022	2200	23,7
	D30-S-L-PK2	06.09.2022	2580	23,7
	D30-S-L-PK3	06.09.2022	2500	23,7
	D30-S-L-PK4	06.09.2022	2020	23,7

Legende	Bemerkung Probe
	Garnbruch im Prüfbereich
	Garnbruch im Prüfbereich
	Garnbruch im Prüfbereich
	Garnbruch im Prüfbereich
	Garnbruch im Prüfbereich, 15,7cm freier l
	Garnbruch im Prüfbereich, 15,5cm freier l
	Garn vorgeschädigt, Garnbruch im nicht möglich
	IWA-Messung ungenau
	Multiples Garnversagen
	Garnversagen oberhalb Lasteinleitung, sowie im Prüft
	Garnbruch im freien Bereich, sowie im Prüft Garntränkung im Prüfbereich
	IWA abgerutscht, Garnversagen Prüfbereich
	Garnbruch oberhalb Lasteinleitung an Knotenpunkt
	Garnbruch oberhalb Lasteinleitung an Knotenpunkt
	Garnbruch oberhalb Lasteinleitung am Knotenpunkt, Garnbruch im Prüfbereich, unzureichende Garntränkung im Prüfbereich

**Faserauszugsprüfung**



2023-08-23&24\_YPO\_PO.zs2













**Seite 2/2**













Abbildung 81: Seriengrafik mit Maschinenweg-Kraft-Diagramm der Formgitterversuche mit 0 mm, 10 mm und 30 mm Biegerollendurchmesser; Seite 2/2; Foto: TUD IMB

### Faserauszugsprüfung

OML-Projektnummer : 2022_I339-19	Serienbezeichnung : YPO-
Projektname : RUBIN ISC	Werkstoff : Gelege: HTC21
Auftraggeber : Gündocdu	Lagerung : Klimakammer
Herstelldatum : 03.08.2023	Prüfnorm : Auszug
Prüfdatum : 17.08.2022	Prüfgeschwindigkeit : 1 mm/min
Prüfalter : 14d	Prüfer : G. Berger

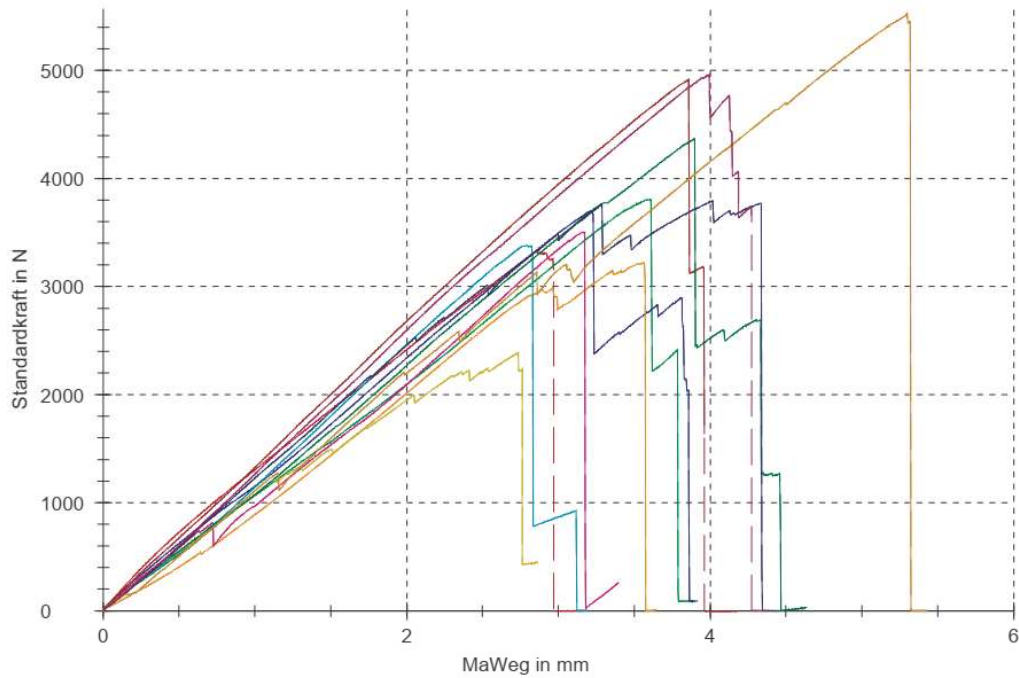
#### Prüfergebnisse:

Legende	Probe	Prüfdatum	F <sub>max</sub> N	Raumtemp. °C
	YPO-50-Kett-Lang-1	17.08.2022	3320	23,7
	YPO-50-Kett-Lang-2	17.08.2022	3810	23,7
	YPO-50-Kett-Lang-3	17.08.2022	3700	23,7
	YPO-50-Schuss-Lang-1	17.08.2022	3220	23,7
	YPO-50-Schuss-Lang-2	17.08.2022	3500	23,7
	YPO-50-Schuss-Lang-3	17.08.2022	3380	23,7
	YPO-160mm-G-K-1	17.08.2022	2390	23,7
	YPO-160mm-G-K-2	17.08.2022	4920	23,7
	YPO-160mm-G-K-3	17.08.2022	4370	23,7
	YPO-160mm-G-S-1	17.08.2022	3800	23,7
	YPO-160mm-G-S-2	17.08.2022	5520	23,7
	YPO-160mm-G-S-3	17.08.2022	4960	23,7

Legende	Bemerkung Probe
	Auszug aus PB; Garnversagen knapp über LE
	Auszug aus PB; Garnversagen im freien Bereich
	Garnversagen im freien Bereich
	Auszug aus PB; Garnversagen im freien Bereich
	Auszug aus PB; Garnspalten im freien Bereich
	Garnauszug aus PB; Garnversagen im freien Bereich
	Garn vorbeschädigt; Garnversagen im freien Bereich an geschädigter Stelle; Fasern weisen mangelhafte Tränkung auf
	Garnversagen im freien Bereich; mangelhafte Tränkung
	Auszug aus PB; Garnversagen knapp über LE
	Garn vorbeschädigt; Garnversagen im freien Bereich; Auszug aus PB
	Garnversagen im freien Bereich; Auszug aus PB
	Garnversagen im freien Bereich; Auszug aus PB

**Faserauszugsprüfung**

**Seriengrafik:**



7.8 Ergebnisse an geraden Garnen mit 10 mm Verankerungslänge

**Faserauszugsprüfung**

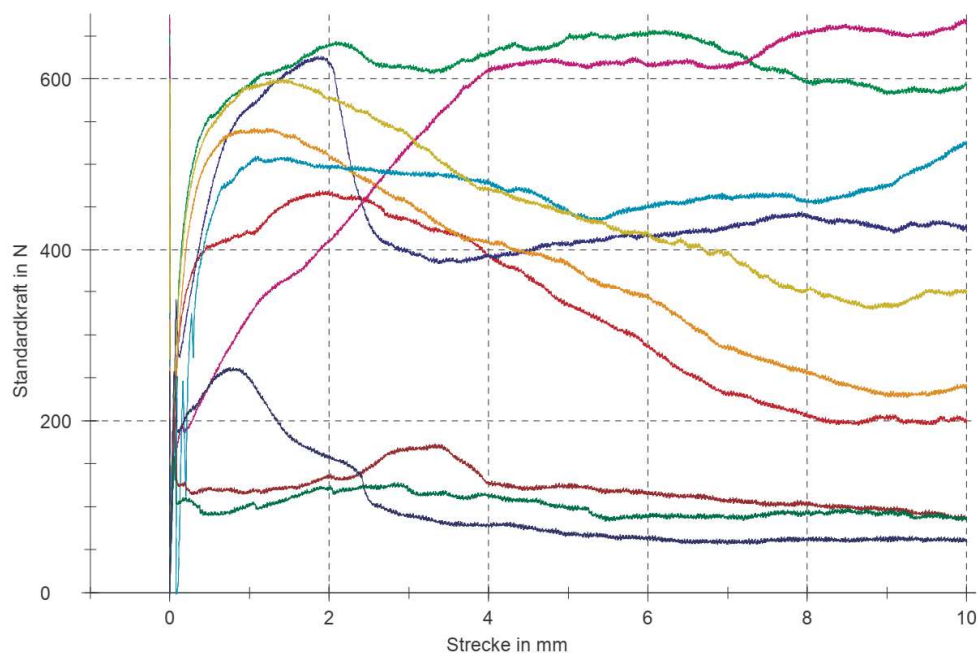


OML-Projektnummer : 2022\_I339-16a      Serienbezeichnung : YPO-  
 Projektname : RUBIN ISC              Werkstoff : Gelege: HTC21  
 Auftraggeber : Gündogdu              Lagerung : Klimakammer  
 Herstelldatum : 01.09.2023          Prüfnorm : Auszug  
 Prüfdatum : 15.09.2023              Prüfgeschwindigkeit : 1 mm/min  
 Prüfmittel : 14d                          Prüfer : G. Berger

**Prüfergebnisse:**

Legende	Probe	Prüfdatum	F <sub>max</sub> N	Raumtemp. °C	Bemerkung Probe
<span style="color:red">■</span>	G10-PK01	15.09.2023	469	23,7	
<span style="color:green">■</span>	G10-PK02	15.09.2023	657	23,7	
<span style="color:blue">■</span>	G10-PK03	15.09.2023	627	23,7	
<span style="color:orange">■</span>	G10-PK04	15.09.2023	542	23,7	
<span style="color:magenta">■</span>	G10-PK05	15.09.2023	670	23,7	
<span style="color:cyan">■</span>	G10-PK06	15.09.2023	527	23,7	
<span style="color:yellow">■</span>	G10-PK07	15.09.2023	600	23,7	
<span style="color:darkred">■</span>	G10-PK08	15.09.2023	219	23,7	
<span style="color:darkgreen">■</span>	G10-PK09	15.09.2023	158	23,7	
<span style="color:darkblue">■</span>	G10-PK10	15.09.2023	262	23,7	

**Seriengrafik:**



---

## 7.9 Literatur

- [1] „abZ Z-31.10-182: CARBOrefit - Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonbeton.pdf“. 23. Dezember 2022.
- [2] DAfStb, „DAfStb-Richtlinie ‚Betonbauteile mit Nichtmetallischer Bewehrung‘“. Weißdruck, 2024.

## 8 Autoren und Prüfer

### **Verantwortlicher der durchgeführten Prüfungen:**

---

Dipl. -Ing. Berk Gündogdu

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

### **Kontaktinformationen der Prüfeinrichtung:**

Technische Universität Dresden  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Institut für Massivbau  
D - 01062 Dresden

Tel.: +49 351 463 39419  
E-Mail: berk.guendogdu1@tu-dresden.de

### **Autor des Prüfberichts:**

---

Dr.-Ing. Tilo Senckpiel Peters  
Johne & Groß GmbH

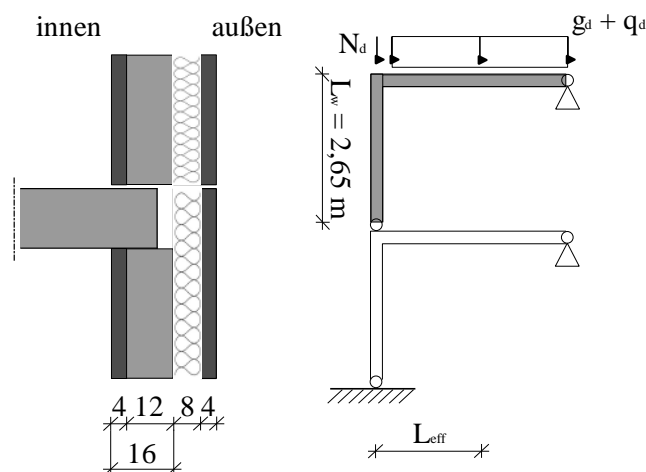
## Berechnungsbeispiel Carbonbetonwand mit Normalkraftbeanspruchung

Nachfolgend wird anhand eines Beispiels die Berechnung einer Wand aus Carbonbeton unter Normalkraftbeanspruchung gezeigt. Die Wand wird als unbewehrte Wand bemessen, enthält jedoch die notwendige Mindestbewehrung gemäß [1].

### 1. Geometrie



Abbildung 1: Carbonbeton-Wandkonstruktion wie im Masterelement Hochbau verbaut, s. [2].



Wandhöhe	$L_w$	= 2,65 m	(Geschosshöhe)
Wandbreite	$b_w$	= 100,0 cm	(betrachteter Wandabschnitt)
Wanddicke	$h_w$	= 16,0 cm	

## 2. Baustoffkennwerte

→ Beton C25/30

Char. Druckfestigkeit	$f_{ck}$	= 25 N/mm <sup>2</sup>
Bemessungsfestigkeit	$f_{cd}$	= $\alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,85 \cdot \frac{25}{1,5} = 14,17$ N/mm <sup>2</sup>
Bemessungsfestigkeit unbewehrter Beton	$f_{cd,pl}$	= $\alpha_{cc,pl} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,7 \cdot \frac{25}{1,5} = 11,67$ N/mm <sup>2</sup>
Betonzugfestigkeit	$f_{ctm}$	= 2,60 N/mm <sup>2</sup>

→ Carbongitter

Bemessungszugfestigkeit	$f_{tm,d}$	1600,0 N/mm <sup>2</sup>
-------------------------	------------	--------------------------

## 3. Einwirkungen auf die Wand

Charakteristische Werte für lotrechte Nutzlasten entsprechend [3].

Die Wichte des Carbonbetons wird mit 24 kN/m<sup>3</sup> angesetzt.

Vertikal char. aus EG	$N_{Gk}$	= 45,0 kN
Vertikal design aus EG	$N_{Gd}$	= $\gamma_G \cdot N_{Gk} = 1,35 \cdot 45,0 = 60,75$ kN
Vertikal char. aus Nutzlast	$N_{Qk}$	= 10,0 kN
Vertikal design aus Nutzlast	$N_{Qd}$	= $\gamma_Q \cdot N_{Gk} = 1,5 \cdot 10,0 = 15,00$ kN
Min. resultierende Normalkraft	$N_{min,d}$	= $N_{Gk} = 45,00$ kN
Max. resultierende Normalkraft	$N_{max,d}$	= $N_{Gd} + N_{Qd} = 75,75$ kN

## 4. Maßgebende Schnittgrößen

		Wandkopf	Wandmitte	Wandfuß	
Deckenanschluss + N	$M_1$	-0,85	-0,43	0,00	kNm
Sandwichkonstruktion Wand	$M_2$	0,24	0,24	0,24	kNm
Summe	$M_{max}$	-0,61	-0,19	0,24	kNm
	$M_{Mitte}$	-	-0,19	-	kNm

## 5. Rechnerische Wandausmittungen

Anzahl Geschosse/ vertikale Bauteile	$m$	$= 1$	
Grundwert der Schiefstellung	$\theta_0$	$= 1/200 = 0,005$	
Höhenbeiwert	$\alpha_h$	$= \frac{2}{\sqrt{L_w}} = \frac{2}{2,65} = 1,23 < \underline{1,0}$	
Abminderungsbeiwert Geschosse	$\alpha_m$	$= \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{1}\right)} = 1,0$	
Schiefstellung	$\theta_i$	$= \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = 0,005 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,005$	
Knicklängenbeiwert	$\beta$	$= 1,0$	
Lastausmitte Theorie I. Ordnung	$e_0$	$= \frac{M_{Mitte}}{N_{Ed}}$	
Zus. ungewollte Lastausmitte	$e_i$	$\approx \theta_i \cdot \frac{L_0}{2} = \theta_i \cdot \beta \cdot \frac{L_w}{2}$	
		Für $N_{min,d}$	Für $N_{max,d}$
Lastausmitte Theorie I. Ordnung	$e_0$	0,3 cm	0,4 cm
Zus. ungewollte Lastausmitte	$e_i$	0,7 cm	0,7 cm
Gesamtausmitte	$e_{tot}$	0,9 cm	1,1 cm

## 6. Bauteilbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) für max. $N_{Ed}$

Wirksamkeitsfaktor	$\eta$	$= 1,0$ (für Betonfestigkeitsklasse < C35/45)
Bezogene Ausmitte	$e / h_w$	$= 0,9 / 16,0 = 0,06$
Beiwert Lastexzentrizität	$k$	$= 1 - 2 \cdot \frac{e}{h_w} = 1 - 2 \cdot 0,06 = 0,88$
Normalkraftwiderstand	$N_{Rd}$	$= \eta \cdot f_{cd,pl} \cdot b_w \cdot h_w \cdot k = 1,0 \cdot 100 \cdot 16 \cdot 0,88 = 1654 \text{ kN}$

Nachweis:  $\eta = \frac{N_{max,d}}{N_{Rd}} = \frac{75,75}{1654} = 0,05 < 1,0 \quad \checkmark$

Überprüfung, ob eine Berechnung gemäß Theorie II. Ordnung notwendig ist!

Abgrenzungskriterium  $\frac{L_w}{h_w} = \frac{265}{16,0} = 16,6 < 2,5$

→ Es ist ein Nachweis gem. Theorie II. Ordnung erforderlich!

Knicklängenbeiwert	$\beta$	$= 1,0$
Flächenträgheitsradius	$i$	$= \left(\frac{I}{A}\right)^{0,5} = 0,289 \cdot h_w = 0,289 \cdot 16,0 = 4,62 \text{ cm}$
Ersatzlänge	$l_0$	$= \beta \cdot L_w = 1,0 \cdot 2,65 = 2,65 \text{ m}$
Eff. Schlankheit	$\lambda_{\text{eff}}$	$= \frac{l_0}{i} = \frac{265}{4,62} = 57,3$
Beiwert Lastausmitte	$\Phi$	$= 1,14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{\text{tot}}}{h}\right) - 0,02 \cdot \frac{l_0}{h_w}$ $= 1,14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{0,9}{16}\right) - 0,02 \cdot \frac{265}{16} = 0,68$
Normalkraftwiderstand	$N_{Rd,\lambda}$	$= f_{cd,pl} \cdot b_w \cdot h_w \cdot \Phi = 1,17 \cdot 100 \cdot 16 \cdot 0,68 = 1266,7 \text{ kN}$
Nachweis:	$\eta$	$= \frac{N_{\text{max},d}}{N_{Rd,\lambda}} = \frac{75,75}{1267} = 0,06 < 1,0 \quad \checkmark$

Die Nachweise für die maximale Normalkraftbelastung  $N_{\text{max},d}$  sind deutlich eingehalten. Dennoch muss eine Mindestbewehrung für die Bauteile angeordnet werden.

## 7. Mindestbewehrung

Erf. Mindestbewehrung gem. [1]	$A_{\text{nm,min,erf.}}$	$= 0,15 \cdot \frac{N_{\text{max},d}}{f_{\text{nm},d}} = 0,15 \cdot \frac{75,75}{1600} = 0,07 \text{ cm}^2$
Gewählte Mindestbewehrung	$A_{\text{nm,min,vorh.}}$	$= 0,73 \text{ cm}^2$

Als Mindestbewehrung wird das biaxiale Carbongitter HTC21/21-80 mit einem Achsabstand in Kett- und Schussrichtung von  $a = b = 25 \text{ mm}$  gewählt. Bei einem Faserstrangquerschnitt von  $A_{f,\text{nm,Kett}} = A_{f,\text{nm,Schuss}} = 1,82 \text{ mm}^2$  ergibt sich eine Bewehrungsquerschnittsfläche von  $a_{f,\text{nm}} = 73 \text{ mm}^2/\text{m}$  je Meter Wandabschnitt.

## References

- [1] Deutsches Institut für Normung; DIN EN 1992-1-1:2011-01, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010, DIN EN 1992-1-1, DIN EN 1992-1-1, Berlin, Jan. 2011.
- [2] ISC-Bündnis, Ed., ISC Anlagen zu den Arbeitspapieren: Anlagen zu den Arbeitspapieren des Forschungsvorhabens RUBIN-ISC (Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation - Industriestandard Carbonbeton): Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB), eingereicht 2025.
- [3] DIN EN 1991-1-1:2010-12, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau; Deutsche Fassung EN 1991-1-1:2002 + AC:2009, DIN EN 1991-1-1, DIN EN 1991-1-1, Berlin, Dec. 2010.