

Schlussbericht

zum IGF-Vorhaben 22942 BR

Thema

Entwicklung praxisgerechter Transportbetone für carbonbewehrte Ortbetonbauteile

Berichtszeitraum

01.05.2023 bis 31.08.2025

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. - FTB
Reinhardstraße 14
10117 Berlin

Forschungseinrichtung(en)

1 Bauhaus-Universität Weimar, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde
Dr.-Ing. Matthias Müller und Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig

2 Technische Universität Dresden, Institut für Massivbau
Dipl.-Ing. Jenny Pech und Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Förderhinweise und Danksagung

Das IGF-Vorhaben (22942 BR) der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. – FTB wurde über das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), DLR-Projektträger (DLR-PT) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Wir danken den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel und den nachfolgend aufgeführten Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) für die fachliche Unterstützung und die Bereitstellung des Versuchsmaterials:

- Emsland Transportbeton GmbH & Co. KG
- Heidelberger Beton GmbH
- Holcim (Deutschland) GmbH
- Johne & Groß GmbH
- peterbeton Rudolf Peter GmbH & Co. KG
- SCHWENK Zement KG

Besonderer Dank gilt der Holcim (Deutschland) GmbH und der SCHWENK Zement KG, welche die Durchführung der Praxisversuche in Ihren Betonwerken ermöglichten sowie der BFU Betonförderunion GmbH & Co. KG in der Unterstützung dieser Praxisversuche.

Unser Dank gilt darüber hinaus allen weiteren Partnern, die uns in der Forschungsarbeit zu dieser Thematik hilfreich zur Seite gestanden haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Projektbeschreibung.....	4
1.1	Projekthintergrund.....	4
1.2	Ziele.....	4
1.3	Projektstruktur.....	6
2	Stand der Forschung und Entwicklung	7
2.1	Einleitung.....	7
3	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	13
3.1	Arbeitspaket 1: Detailkonzeption zur Praxisstudie	13
3.2	Arbeitspaket 2: Eignungsnachweis für die Umsetzung im Transportbetonwerk.....	54
3.3	Arbeitspaket 3: Validierung an einem Demonstratorbauteil.....	75
4	Verwendung der Zuwendung	84
4.1	Forschungsstelle 1.....	84
4.2	Forschungsstelle 2.....	84
5	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	84
6	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten.....	85
7	Wissenstransfer in die Wirtschaft.....	86
7.1	Durchgeführte Transfermaßnahmen	86
7.2	Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit.....	86
8	Literaturverzeichnis	87

1 Projektbeschreibung

1.1 Projekthintergrund

Neubauteile aus Carbonbeton wurden bisher überwiegend in Fertigteilwerken und Forschungslaboren hergestellt, die eine hohe Fertigungsgenauigkeit und dadurch konstante Bauteilqualität gewährleisten können. Für die Herstellung mit Ortbeton verändert sich das Anforderungsprofil. Es werden Mischungszusammensetzungen benötigt, die dem Beton eine problemlose Pumpfähigkeit und eine deutlich erhöhte Verarbeitungsdauer ermöglichen. Gleichzeitig ergibt sich aus der zumeist feingliedrigen Carbongitterbewehrung die Notwendigkeit, besonders einfach einzubringende und zu verarbeitende Betone einzusetzen. Bisher kamen dafür vor allem speziell entwickelte Betonzusammensetzungen zum Einsatz. Es galt daher im Rahmen des Forschungsprojektes zu klären, inwieweit auch mit Transportbeton eine ausreichende Qualität des Verbundwerkstoffs Carbonbeton hinsichtlich Festigkeit, Verbundverhalten und Lagesicherheit der Bewehrung, sichergestellt werden kann.

Gleichzeitig lag innerhalb des Forschungsprojektes der Fokus auf dem Potential zur Ressourcenschonung der Bauweise Carbonbeton. Die Carbonbewehrung ist nicht nur leistungsfähiger als herkömmliche Stahlbewehrung, sondern auch korrosionsunempfindlich. Daher kann auf ein hohes alkalisches Milieu verzichtet und die Betondeckung reduziert werden. Bauteile können somit schlanker ausgeführt werden. Weiterhin wird damit der Weg zu neuen CO₂-reduzierten Betonen mit klinkereffizienten Zementen und alternativen Bindemitteln eröffnet. Die Carbonbetonbauweise trägt so zur Lösung der gewaltigen Herausforderungen der Bauindustrie im Hinblick auf eine drastische Reduktion der Treibhausgasemissionen bei [1].

Mit der Entwicklung von robusteren Carbonbewehrungen mit größeren Querschnitten sowie Gitteröffnungsweiten und den zunehmenden Erfahrungen im Umgang mit Carbonbeton rücken die Anwendungen mit Ortbeton in Neubau und Bestand verstärkt in den Fokus. Beispielsweise wurde eine Kappe der inzwischen rückgebauten Carolabrücke in Dresden [2] sowie wesentliche Teile des ersten Gebäudes aus Carbonbeton – dem CUBE – in Ortbetonbauweise mit Carbonbewehrung hergestellt [3]. Inzwischen handelt es sich bei den realisierten Projekten nicht mehr nur um Sonderapplikationen mit speziellen Betonzusammensetzungen. Im Jahr 2021 entstand bspw. ein Brückenüberbau aus Ortbeton in Verbindung mit Carbonbewehrung [4] mit Ortbeton nach DIN EN 206 und DIN 1045-2. Als Basis für eine breitere Einführung der carbonbewehrten Ortbetonbauweise mit klinkerreduzierten Bindemitteln besitzen die Anwendungen noch weiteres Entwicklungspotenzial.

1.2 Ziele

Die Zielstellung der durchgeführten Untersuchungen war die Adaption von Betonzusammensetzungen für Carbonbetonanwendungen im Transportbetonbereich. Insbesondere kamen klinkereffiziente Zemente zum Einsatz, um dem übergeordneten Ziel der CO₂-Neutralität der Betonbauweise Rechnung zu tragen. Unter Praxisbedingungen wurden vorwiegend die Mischbarkeit, die Transport- bzw. Verarbeitungszeiten sowie das Verbundverhalten zur Carbonbewehrung anhand einer Auswahl von Betonzusammensetzungen bewertet. Ein Einsatz von Kurzfasern war nicht vorgesehen, da hier beim späteren Rückbau der Bauteile/Bauwerke das Recycling der Materialien nicht sichergestellt werden kann.

Folgende Parameter sind wesentlich für die Nutzung von Carbonbeton im Transportbetonbereich und waren Gegenstand der Untersuchungen:

Carbonbetonanwendungen erfordern oft einen **hohen Leimgehalt** bei niedrigen Wasserzementwerten, um auch eine hinreichende Umhüllung bzw. Einbettung von feingliedrigen Bewehrungsgittertypen zu ermöglichen. Die **Mischtechnik** muss somit für feinkörnige und leimreiche Mischungen geeignet sein. Mischenergie und Partikelauflösung sind durch ein geeignetes Mischregime zu gewährleisten. Die eingesetzten Bindemittel müssen eine **längere Verarbeitungszeit** ermöglichen und die erforderlichen Zusatzmittel darauf abgestimmt sein. Um die beabsichtigten Betoneigenschaften zielsicher zu gewährleisten, muss der **Mischungsentwurf** gegenüber möglichen Schwankungen der Ausgangsstoffe, wie bspw. Feuchtegehalt der Gesteinskörnung und Partikelabstufung, hinreichend **robust** sein.

In der Praxis treten beim Transport im Fahrmischer unterschiedliche Anfahrts- und Wartezeiten auf. Der Frischbeton muss eine möglichst lange Verarbeitungszeit bei gleichbleibenden Eigenschaften ermöglichen. Das **Pumpen** und **Fördern** des Frischbetons ist i. A. durch die leimreiche Zusammensetzung unproblematisch. Auf eine umfangreiche Betrachtung wurde daher verzichtet und stattdessen auf andere Forschungsvorhaben zur Beurteilung der Pumpbarkeit und Pumpstabilität verwiesen (siehe AiF-Projekt Nr. 20947 [5]).

Da insbesondere beim Carbonbeton die Qualität des Einbringens des Frischbetons aufgrund der Filamentstruktur der Bewehrung und der dichten Bewehrungsanordnung (Gitterweiten) einen großen Einfluss hat, waren die mechanischen Festbetoneigenschaften, vor allem der **Verbund mit der Bewehrung** auch bei längeren Verarbeitungszeiten, nachzuweisen.

Umfang der Arbeiten

- Prüfung der Anwendbarkeit selbst-/leichtverdichtender und pumpfähiger Transportbetonzusammensetzungen mit 8 mm Größtkorn (vorwiegend Rundkorn) mit drei klinkerreduzierten Zementen
- Untersuchung der Druckfestigkeitsklasse C50/60,
- Bewertung der Frischbetoneigenschaften über längere Verarbeitungszeiträume,
- Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen, insbesondere der Temperatur,
- Verbundverhalten zur Carbonbewehrung unter Variation der Imprägnierung und der Bewehrungsgeometrie,
- Dauerhaftigkeit gegenüber Frostangriff,
- Qualität des Einbringens bei dicht bewehrten Bauteilen, einschließlich deren Optik,
- Aufarbeitung und Veröffentlichung der Ergebnisse für die Transportbetonbranche zur Darstellung des aktuell technisch Machbaren und des gegebenenfalls noch erforderlichen Entwicklungsbedarfs in Form eines Sachstandberichts,
- Bewertung der Nachhaltigkeit der Betonzusammensetzungen,
- Einbringen der Erkenntnisse in Regelwerke zu Carbonbeton.

Hinweis: Die im Rahmen des Projekts gewonnenen Ergebnisse ersetzen keine Zulassungsversuche.

1.3 Projektstruktur

Aufbauend auf der Entwicklung von Mischungsentwürfen mit drei verschiedenen CO₂-reduzierten Bindemitteln und zwei typischen Carbonbewehrungskonfigurationen (Variation der Imprägnierung und Geometrie) wurde zunächst die Eignung im Labor (AP 1) und später im Transportbetonwerk untersucht (AP 2). Dabei wurde eine hochfeste Betondruckfestigkeit angestrebt, um der filigranen Carbonbetonbauweise gerecht zu werden. Im Projekt wurde der gesamte Prozess von der Herstellung des Betons über Transport und Einbau bis hin zu den Festbetoneigenschaften unter Berücksichtigung verschiedener Einflüsse (Verarbeitungstemperatur, Herstellung im Transportbetonwerk) betrachtet. An einem Demonstrator wurden abschließend die gesammelten Erkenntnisse validiert (AP 3).



Abbildung 1: Schematische Übersicht des Arbeitsprogramms

Zwischen den Projektpartnern Bauhaus-Universität Weimar (BUW) mit dem F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde und Technische Universität Dresden (TUD) mit dem Institut für Massivbau ergab sich die folgende Aufteilung der Schwerpunkte:

Forschungseinrichtung 1 (BUW):

- Projektkoordination
- betontechnologische Konzeption (Mischungsentwurf)
- Beschaffung und Charakterisierung der Ausgangsstoffe für die Betone
- Beurteilung der Frisch- und Festbetoneigenschaften
- Beurteilung der Dauerhaftigkeit der Betone
- Validierung am Demonstrator

Forschungseinrichtung 2 (TUD):

- Beschaffung und Charakterisierung der Bewehrungen
- Beurteilung des Einbringens des Betons in Bezug auf bewehrte Bauteile
- Laboruntersuchungen am Verbundmaterial Carbonbeton
- Validierung am Demonstrator

2 Stand der Forschung und Entwicklung

2.1 Einleitung

Beton ist ein vielseitiger Baustoff, der in nahezu jede beliebige Form gebracht werden kann. Er kann hohe Druckkräfte aufnehmen, ist wasserundurchlässig und kann in einem großen Temperaturbereich dauerhaft eingesetzt werden. Da Beton jedoch so gut wie keine Zugkräfte aufnehmen kann, war die Anwendung von Beton bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts fast ausschließlich auf Bauteile beschränkt, in deren Querschnitt planmäßig keine Zugkräfte auftraten. Mit dem Stahlbeton (früher Eisenbeton), bei dem zur Aufnahme von Zugkräften Stäbe und Gitter aus Stahl in den Beton eingelegt werden, wurde diese Anwendungsgrenze überschritten. Heute ist Beton das meistverwendete Baumaterial weltweit.

Damit stahlbewehrte Bauteile dauerhaft sind, muss die Stahlbewehrung im Beton vor Korrosion geschützt werden. Im Allgemeinen wird dies in Abhängigkeit der Exposition durch geeignete Betonzusammensetzungen sowie durch eine hinreichende Betonüberdeckung und Begrenzung der Rissbreiten erreicht. Die meisten Korrosionsschäden an der Bewehrung entstehen infolge Carbonatisierung der Betonüberdeckung, durch Eindringen von Tausalzen oder auch Meerwasser, die eine chloridinduzierte Stahlkorrosion hervorrufen, oder durch Fehler in der Ausführung (z. B. Betoniervorgang, Bewehrungsdetails), aber auch durch dauerhafte Überlastung von Bauwerken. Die Folgen sind teils massive Bauwerksschäden, die durch Abplatzen der Betondeckungen und einen Querschnittsverlust der Bewehrung gekennzeichnet sind. Hieraus resultiert ein starker Anstieg der Instandhaltungsaufwendungen. Eine Maßnahme diesem Effekt entgegenzuwirken liegt in der erhöhten Betondeckung, um somit das schützende alkalische Milieu der Bewehrung länger aufrecht zu halten.

2.1.1 Carbonbewehrung

Alternativ dazu besteht auch die Möglichkeit der Verwendung von nichtrostenden Bewehrungsmaterialien. Dabei sind Edelstähle ebenso Gegenstand der Betrachtungen wie auch Endlosfasern aus Basalt, alkaliresistentem Glas und Carbon. Weltweit werden Forschung und Entwicklung hierzu seit Mitte der 1990er Jahre deutlich vorangebracht. In Deutschland liegt der Forschungsschwerpunkt vor allem auf Bewehrungen aus Glas- und Carbonfasern. Damit bewehrte Betone ergeben leistungsfähige Verbundwerkstoffe, bekannt als Textil- und Carbonbeton (Abbildung 2). In diesem Forschungsprojekt liegt der Fokus auf der Carbonbetonbauweise mit mattenartiger Bewehrung, weshalb sich die weiteren Ausführungen auf diese konzentrieren.

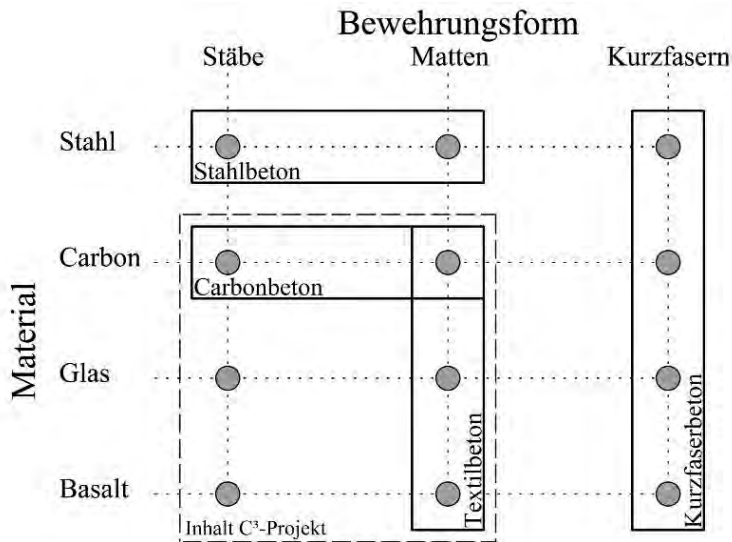


Abbildung 2: Definition der Begriffe Stahlbeton, Carbonbeton, Textilbeton und Kurzfaserbeton (Grafik: Frank Schladitz, [6])

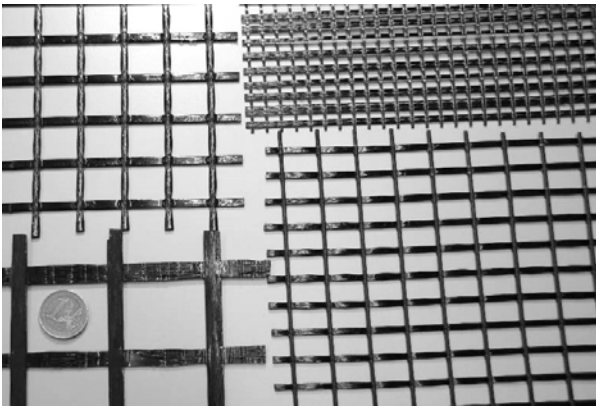
Erste Tests zu endlosfaserbasierten Bewehrungen in Beton sind aus den 1960er Jahren bekannt. Erwähnt werden diese u. a. in [7]. Wirklich umfangreiche Grundlagenuntersuchungen mit textilen Bewehrungen aus nichtrostendem Material findet seit den 1990er, ausgehend von Deutschland, mittlerweile aber weltweit statt. In Deutschland wurde die Grundlagenforschung auf dem Gebiet nichtmetallischer Bewehrungen vorrangig durch zwei von 1999 bis 2011 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Sonderforschungsbereiche (SFB) in Aachen und Dresden vorangetrieben, [8; 9]. Der Schwerpunkt lag anfänglich auf Grundlagenforschung an Textilbeton mit einer Bewehrung aus alkaliresistentem Glas. Carbonbewehrung rückte erst ab der Halbzeit der beiden SFB immer mehr in den Fokus. Seither erfolgte kontinuierlich die Weiterentwicklung von Textilbeton zunächst in zahlreichen kleineren Forschungsprojekten und in Forschungsverbünden, die sowohl von der DFG, vor allem aber auch immer mehr vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) unterstützt wurden. Von 2014 bis 2022 lief das Großforschungsprojekt C³ – Carbon Concrete Composite (C³-Projekt, [10]), welches sich vorrangig der Weiterentwicklung und Markteinführung von Carbonbeton widmete. Standards und Leitfäden für das Bauen mit Carbonbeton im Neubau wurden im Rahmen des Forschungsprojekts Industriestandard Carbonbeton (ISC) im Förderzeitraum 2022 bis 2024 geschaffen.

Verglichen mit Bewehrungsstahl ist Carbon viermal leichter (Dichte 1,8 g/cm³ statt 7,8 g/cm³) und bis sechsmal tragfähiger (3.000 N/mm² statt 500 N/mm²). Die Carbonfaser ist damit mehr als 20-mal leistungsfähiger als Bewehrungsstahl. Carbonfaserbewehrung besteht im Wesentlichen aus Carbonfilamenten (Carbonendlosfasern) und einer Tränkung [11]. Die Basis für Carbonfilamente ist das kohlenstoffhaltige Ausgangsmaterial (Präkursor) Polyacrylnitril (PAN), welches durch eine thermische Pyrolyse unter Inertgas carbonisiert und in einer weiteren Temperaturstufe durch Graphitisierung in eine Carbonfaser überführt wird. Aktuell wird Erdöl als Rohstoff verwendet. Die alternative Verwendung von Lignin als Grundstoff, bisher noch ein Abfallprodukt bei der Papierherstellung, ist bereits möglich [12; 13].

Ein Carbonsgarn (Roving) besteht aus bis zu 50.000 einzelnen Carbonfilamenten, jedes dünner als ein menschliches Haar. Damit sich alle Filamente eines Garns am Lastabtrag beteiligen, müssen diese miteinander verbunden werden. Anderenfalls würden sich nur die jeweils außenliegenden Filamente eines Filamentbündels mit dem Beton verbinden und am Lastabtrag beteiligen. Die inneren Filamente würden unbelastet und damit

ungenutzt bleiben. Dieser erforderliche innere Verbund wird mit Hilfe von Beschichtungen/Tränkungen sichergestellt, die gleichzeitig den Verbund zwischen dem Carbonfaserstrang und dem umgebenden Beton verbessern. Je nach gewünschter Steifigkeit der Bewehrung kommen dafür beispielsweise Polymere auf Basis von Acrylaten, Styrol-Butadien oder epoxidharzbasierte Formulierungen zur Anwendung, welche während der Verarbeitung der Garne ein- und aufgebracht werden.

Die Carbonbewehrung wird – wie auch die Stahlbewehrung – in flächiger/mattenartiger und stabförmiger Form angeboten. Die flächigen/mattenartigen Bewehrungsgitter entstehen in einem textilen Herstellungsprozess. Daraus abgeleitet wird diese Bewehrung auch oft als textile Bewehrung bezeichnet. Diese Textilien gibt es als Platten- und Rollenware mit einer Breite von bis zu 3,5 m. Die Garnabstände sind variierbar und betragen üblicherweise ca. 10 bis 50 mm (Abbildung 3a). Für stabförmige Bewehrungen werden mehrere Carbongarne im Strangziehverfahren (Pultrusion) zu einem Stab verbunden. Die Oberflächenprofilierung der Stäbe erfolgt aktuell meist durch Umwinden, Fräsen oder Besanden (Abbildung 3b).



a) Textile Bewehrung



b) Stabförmige Bewehrung

Abbildung 3: Auswahl verschiedener Bewehrungen aus Carbon-Endlosfasern (Fotos: Sandra Kranich, TUD [6])

Momentan wird Carbonbewehrung in Form von geraden Stäben sowie Gittern mit massentauglichen Herstellungsverfahren produziert. Geformte Bewehrungen aus nichtmetallischen Fasern sind in Deutschland bisher weniger weit verbreitet. Im Rahmen Projekts Industriestandard Carbonbeton (ISC) wurden Standards für die Formbewehrung entwickelt, um den Planern die Auswahl der richtigen Bewehrung zu ermöglichen.

Neben schlaff bewehrtem Carbonbeton rückt auch die Anwendung von Carbonfaserlitzen in Deutschland zunehmend in den Vordergrund [14–16]. Beispielsweise wurde in Dresden im Rahmen eines Pilotprojekts erstmals ein Dachtragwerk aus vorgespanntem und vorgefertigtem Carbonbeton unter realen Bau- und Nutzungsbedingungen umgesetzt [17].

2.1.2 Carbonbeton

Der Kompositwerkstoff aus Carbonbewehrung und Beton wird kurz als Carbonbeton bezeichnet. Die nicht-rostende Bewehrung ermöglicht es, die Betondeckung zur Sicherstellung des Verbunds auf ein Minimum – bei kleinen Rovingquerschnitten in der Größenordnung von wenigen Millimetern – zu reduzieren. Je nach Anwendung sind gegenüber Stahlbeton bis zu 80 % Materialeinsparung möglich. Fassadenplatten, die mit Stahlbeton in einer Stärke von 7–8 cm ausgeführt werden, sind mit Carbonbeton nur noch 2–3 cm dick. Schichten zur Verstärkung von Bauwerken sind aus Stahlbeton ebenfalls ca. 7 cm stark (Verstärken mit Spritzbeton), leitungsäquivalente Verstärkungsschichten aus Carbonbeton hingegen nur 1–2 cm [18; 19].

Neben der hohen Tragfähigkeit, die besonders schlanke Bauteile ermöglicht, liegen die Vorteile des Carbonbetons vor allem in der Dauerhaftigkeit der nichtmetallischen Bewehrungselemente. Ein weiterer Vorteil ist der problemlose Einsatz ressourcenschonender Bindemittelsysteme mit stark reduziertem Klinkeranteil (und damit einhergehend zumeist mit einem geringeren Passivierungspotential für den Bewehrungsstahl), so dass eine deutliche Reduzierung des mit der Beton- bzw. Bauteilherstellung verbundenen CO₂-Ausstoßes möglich wird [19–21].

Der verwendete Beton variiert von ultrahochfestem Spezialbeton über hochfesten Feinbeton bis hin zu handelsüblichem Normalbeton. Abhängig vom Herstellverfahren (Spritzen, Gieß- oder Laminierverfahren) und der Verwendung (Verstärkung oder Neubau, Exposition) wird die Betonzusammensetzung gewählt. Die bisherigen Entwicklungen konzentrierten sich auf den Bereich der Verstärkung und Instandsetzung sowie auf die Herstellung von Fertigteilen. Eine besondere Bedeutung kommt der vollständigen Einbettung der feingliedrigen Bewehrungselemente zu. Bei der Verstärkung sind u. a. eine gute Spritzfähigkeit und Haftung des Frischbetons am Untergrund maßgebend. Betrachtet man die Herstellung von Neubauteilen, so werden beim Gießverfahren im Fertigteilwerk in der Regel ein gutes Fließ- und Schwindverhalten sowie kurze Erhärnungszeiten (Ausschalzeiten) gefordert. Bei Ortbetonanwendungen sind hingegen eine längere Verarbeitungsdauer und meist auch eine gute Pumpfähigkeit von Bedeutung. Ebenso sollen die Betone auch eine entsprechende Robustheit gegenüber Eigenschaftsschwankungen der Ausgangsstoffe aufweisen.

2.1.3 Praxisanwendungen Carbonbeton

In Deutschland lag der Schwerpunkt der Anwendungen bisher auf den mattenartigen/textilen Bewehrungen aus AR-Glas und Carbon. Die üblichen Maschenweiten dieser Strukturen sind etwa um den Faktor 10 kleiner als beim klassischen Stahlbeton. Die Matten werden bevorzugt für Sanierungen bzw. Verstärkungen bestehender Bauwerke (z. B. Biegebauteile in Gebäuden, Silos und Brücken) sowie für Fertigteile (v. a. Fassadenplatten, aber auch Brücken und Bahnsteigsysteme) eingesetzt. Auf diese Anwendungsgebiete zielten primär auch die bisher entwickelten Herstellungsprozesse und Materialien (Bewehrungselemente, Tränkungen, Hochleistungsmörtel und -betone) ab. Die in Neubauten anfängliche Beschränkung auf Fertigteile war der genaueren Arbeitsweise und den konstanteren Umgebungsbedingungen geschuldet, die in einem Fertigteilwerk herrschen. So konnte eine reproduzierbare hohe Qualität der Bauteile sichergestellt werden.

Im Rahmen des C³-Projektes wurden klinkerreduzierte Bindemittelsysteme und Betonzusammensetzungen für Fertigteilanwendungen mit Carbonbewehrungen entwickelt. Die angewendeten Kompositzemente und Bindemittelcompounds befinden sich jedoch außerhalb der aktuellen Zementnorm. Eignungstests entsprechend der Anforderungen der Transportbetonindustrie standen in den vergangenen Jahren nicht im Fokus der Forschung und Entwicklung [21]. Zum Ortbetoneinsatz mit Carbonbewehrung liegen bislang nur wenige Erfahrungen vor. Repräsentative Fallbeispiele aus Deutschland seien im Folgenden kurz vorgestellt.

Brückenkappe (2020/2021). Bei der Sanierung der Carolabrücke in Dresden wurde die Erweiterung des stromaufwärts liegenden Geh- und Radweges durch die Verbreiterung der Kappe realisiert [2]. Hierfür wurden Stahlbeton-Halffertigteile mit einer Ortbetonergänzung (zur Anwendung kam ein praxisüblicher C25/30 LP) und einer darin eingebetteten, nichtmetallischen Bewehrung zur Rissbreitenbegrenzung kombiniert, s. Abbildung 4a. Auf Grundlage von Einbautests wurden zwei nichtmetallische Bewehrungskonzepte aus sich kreuzenden Stäben – einmal aus Carbon- und einmal aus Basaltfasern – für die Ausführung ausgewählt.



a) Kappenverbreiterung der Carolabrücke (Foto: Stefan Gröschel, TUD)



b) Neubau einer Straßenbrücke im Zuge der S111 (Fotos: cbing [4])

Abbildung 4: Beispiele für Carbonbetonbauwerke in Deutschland

Straßenbrücke (2021). Eine Carbonbetonbrücke in Ortbetonbauweise befindet sich auf der Staatsstraße S111 bei Wurschen [4]. Mit dem Ziel, den Korrosionsschutz zu verbessern und eine gesteigerte Ermüdungsfestigkeit zu erzielen, wurden der Brückenüberbau sowie die Randkappen der Brücke in Carbonbetonbauweise hergestellt, s. Abbildung 4b. Sowohl Gitterbewehrung als auch Carbonstäbe wurden in Kombination mit einem Ortbeton der Druckfestigkeitsklasse C50/60 im Überbau und einem C30/37 LP bei den Kappen verwendet. Auch bei dieser Brücke wurden Standardbindemittel eingesetzt. Die Eignung der Materialkombinationen bezüglich Einbaus und Materialeigenschaften wurde im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall abgesichert.

Gebäude (2021/2022). Mit dem CUBE wurde das erste Carbonbetongebäude Deutschlands errichtet, siehe Abbildung 5. Bei diesem Bauwerk wurden verschiedene Fertigungsmethoden anwendungsbezogen kombiniert. Halbfertigteilwände mit einer Ortbetonergänzung aus selbstverdichtendem Transportbeton der Druckfestigkeitsklasse C45/55 und eine Gitterbewehrung der solidian GmbH kamen bei der BOX zum Einsatz [3]. Der hierfür verwendete Beton verfügt über ein 8-mm-Größtkorn und einen hohen Mehlkornanteil (ca. 700 kg/m³). Die geschwungenen TWIST-Bauteile der Wetterschale wurden komplett im Spritzbetonverfahren gefertigt [22].



Abbildung 5: CUBE (oben: Herstellung der BOX mit Transportbeton, Foto: Maximilian Krämer, C3; unten: CUBE nach Fertigstellung, Foto: Stefan Gröschel, TUD)

Auffallend bei den Praxisprojekten mit Transportbetoneinsatz ist die überwiegende Anwendung epoxidharzgetränkter, nichtmetallischer Gitter sowie von Transportbetonen mit herkömmlichen, portlandzementklinkerreichen Bindemitteln. Erkenntnisse mit Textilien mit anderen Tränkungen und vor allem zu neuartigen, nachhaltigen Betonzusammensetzungen mit alternativen, klinkerarmen Bindemitteln liegen bei der Ortbetonbauweise kaum vor. In der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) für nichtmetallische Bewehrungen [23] wird die generelle Eignung von Carbonbewehrung mit Normbetonen nach DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-2 sichergestellt. Voraussetzung dafür ist eine Maschenweite der Gitterbewehrung, die mindestens dem dreifachen Größtkorndurchmesser entspricht. Diese Annahme sollte für die noch nicht ausführlich untersuchten nichtmetallischen Gitter mit Suspensionstränkungen und stark klinkerreduzierten Betone vertiefend untersucht werden.

3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

3.1 Arbeitspaket 1: Detailkonzeption zur Praxisstudie

3.1.1 Mischungsentwürfe und Referenzwertbestimmung im Labor (BUW)

In Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PbA) wurden relevante Parameter für die Betonrezepturen festgelegt. Es sollten vorrangig klinkereffiziente Zemente zum Einsatz kommen. Durch den Einsatz der Carbonbewehrung entfielen die dauerhaftigkeitsrelevanten Anforderungen, die mit einer Schädigung infolge Betonstahlkorrosion im Zusammenhang stehen. Dies betraf die Expositionen Carbonatisierung (XC) und Chlorideindringen (XD, XS). Als maßgebende Dauerhaftigkeitseigenschaft für Außenbauteile war insbesondere der Widerstand gegen Frost- und ggf. Frost-Tausalz-Angriff relevant. Da die Verwendung von Luftporenbetonen nicht vorgesehen werden sollte, wurden als maßgebende Expositionsklassen in Bezug auf Frost demnach nur XF1-3 herangezogen. Mögliche Einschränkungen aus DIN 1045-2 bzgl. der Zementauswahl für diese Expositionsklassen wurden nicht berücksichtigt.

Für die Untersuchungen wurden drei Zemente ausgewählt, die sich durch einen geringen Klinkergehalt auszeichnen. Jeder Zement wurde dabei von einem anderen Werk/Hersteller bezogen, welcher auch im PbA vertreten ist. Die spätere Herstellung im Betonwerk sollte entsprechend ebenfalls bei Mitgliedern des PbA unter Verwendung dieser Zemente erfolgen. Weiterhin wurden PCE-basierte Fließmittel, ebenfalls von drei verschiedenen Herstellern, ausgewählt (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Ausgangsstoffe für die Betone

Bezeichnung	Ausgangsstoff	Werk, Hersteller
CEM III/A 42,5 N	Zement	Dortmund, Holcim
CEM III/B 42,5 N-LH/SR (na)	Zement	Bernburg, Schwenk
CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	Zement	Lengfurt, Heidelberg Materials
Kalksteinmehl	Füller	Bernburg, Schwenk
MC-PowerFlow evo 503	Fließmittel	Bottrop, MC Bauchemie
MasterCo ₂ re 3240	Fließmittel	Stäsfurt, MBS
Sika Viscocrete 1095	Fließmittel	Leimen, Sika
Sika Viscoflow 26	Fließmittel	Leimen, Sika
Feine Gesteinskörnung 0/2	Gesteinskörnung	Starkenber
Grobe Gesteinskörnung 2/8	Gesteinskörnung	Starkenber

Weiterhin wurde festgelegt, eine einheitliche Gesteinskörnung für alle Betone zu verwenden, unabhängig von den in den Transportbetonwerken verfügbaren Materialien. Dies hatte vorwiegend pragmatische Gründe, da die Transportbetonwerke für die späteren Versuche noch nicht festgelegt waren. Weiterhin wurde davon ausgegangen, dass die späteren Frisch- und Festbetoneigenschaften in erster Linie von den Zementen und Zusatzmitteln beeinflusst werden und nur in zweiter Linie von der Gesteinskörnung. Zur Gewährleistung eines ausreichenden Leimgehaltes wurde zudem ein Kalksteinmehl eingesetzt (vgl. Tabelle 1).

Die wesentlichen Kennwerte der Zemente und des Kalksteinmehls wurden ermittelt. Die Zemente (vgl. Tabelle 2) weisen ähnliche 28 Tage Druckfestigkeiten auf. Die Druckfestigkeit im jungen Alter hängt stark vom Klinkergehalt ab, so dass mit abnehmendem Klinkergehalt – vom CEM II/C-M zum CEM III/B – die 2 Tage Druckfestigkeit geringer ausfällt. Der CEM III/B weist im Vergleich zu den anderen Zementen eine erhöhte Mahlfeinheit auf, um den geringeren Klinkergehalt zu kompensieren. Dies ist die maßgebliche Ursache für den vergleichsweise hohen Wasseranspruch des CEM III/B. Das Kalksteinmehl hat eine Dichte von 2,75 g/cm³ und eine spezifische Oberfläche von 5830 cm²/g (BLAINE). Abbildung 1 zeigt die Partikelgrößenverteilung des Zementes und des Kalksteinmehls.

Tabelle 2: Eigenschaften und normative Zusammensetzung der Zemente

Eigenschaften / Zusammensetzung		CEM III/A 42,5 N	CEM III/B 42,5 N	CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N
Klinkergehalt gemäß DIN EN 197-1 bzw. 197-5	[M.-%]	35-65	20-34	50-64
Druckfestigkeit 2d	[MPa]	18,6	11,7	22,6
Druckfestigkeit 7d	[MPa]	35,2	34,4	36,5
Druckfestigkeit 28d	[MPa]	53,2	51,2	51,7
Biegezugfestigkeit 2d	[MPa]	4,3	2,9	4,8
Biegezugfestigkeit 7d	[MPa]	7,1	7,8	6,8
Biegezugfestigkeit 28d	[MPa]	8,8	9,2	8,7
Wasseranspruch	[%]	28,0	34,0	30,0
Erstarrungsbeginn	[min]	130	135	190
Spez. Oberfläche (BLAINE)	[cm ² /g]	4240	5580	3900
Dichte	[g/cm ³]	3,00	2,95	3,02

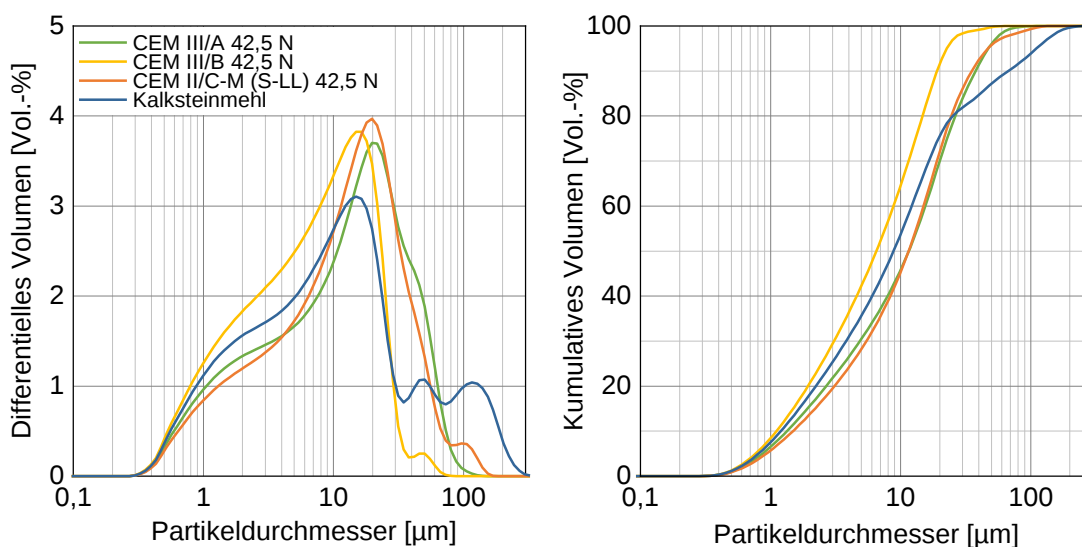


Abbildung 6: Partikelgrößenverteilung Zemente und Kalksteinmehl

Wesentliche Charakteristiken der Gesteinskörnungen werden in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3: Eigenschaften der Gesteinskörnung

Gesteins- körnungen	Siebmaschenweite in mm								Fein- anteil	Roh- dichte*	Wasser- aufnahme
	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0			
	Siebdurchgang [V.-%]								[M.-%]	[g/cm³]	[M.-%]
Feine Gk 0/2	3	15	46	77	95	100	100	100	1,7	2,65	0,3
Grobe Gk 2/8	0	0	1	1	1	15	90	100	0,3	2,60	1,1

*wassergesättigt, oberflächentrocken

Es wurden drei Betonrezepturen erstellt, je eine Rezeptur pro Zement. Jedem Zement wurde dabei ein Fließmittel – bzw. Fließmittelhersteller zugeordnet. Für eine gute Verarbeitbarkeit in Verbindung mit der Carbonbewehrung wurde eine Ausbreitmaßklasse F6 gewählt, bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 8 mm. Abbildung 7 zeigt die verwendete Sieblinie für alle Rezepturen. Der Anteil der feinen Gesteinskörnung 0/2 beträgt darin 46 Vol.-%, der Anteil der groben Gesteinskörnung 2/8 beträgt 54 Vol.-%.

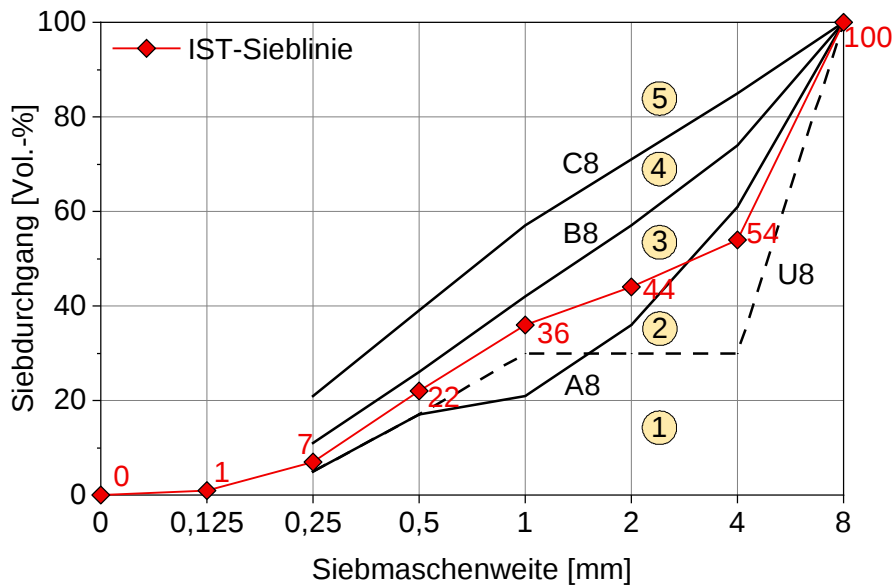


Abbildung 7: Sieblinie

Für die Betondruckfestigkeit wurde die Druckfestigkeitsklasse C50/60 angestrebt. Da klinkereffiziente Zemente mit langsamer Festigkeitsentwicklung und hohem Nacherhärtungspotential verwendet wurden, wurde ein Nachweisalter von 90 Tagen festgelegt. Tabelle 4 zeigt die Betonrezepturen.

Tabelle 4: Betonrezepturen (20 °C)

Bestandteil	Rezepturen – Zugabe in kg/m ³		
	1	2	3
CEM III/A 42,5 N	430		
CEM III/B 42,5 N-LH/SR (na)		430	
CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N			430
Kalksteinmehl	35	35	35
Wassergehalt	181	181	181
Feine Gesteinskörnung 0/2	795	792	794
Grobe Gesteinskörnung 2/8	916	912	915
MC-PowerFlow evo 503	4,6		
MasterCo ₂ re 3240		4,8	
Sika Viscocrete 1095			3,7
Wasserzementwert [-]	0,42	0,42	0,42
Luftgehalt [Vol.-%]	1,5	1,5	1,5

*Wassergehalt der Fließmittel wurde grundsätzlich von der Wasserzugabe abgezogen

Mit den Rezepturen wurden Prüfungen bei drei verschiedenen Zieltemperaturen des Frischbetons durchgeführt:

- 20 °C: Standardtemperatur Laborprüfungen
- 30 °C: Betonieren bei hohen Temperaturen
- 10 °C: Betonieren bei tiefen Temperaturen

Die Frischbetonprüfungen sowie die Herstellung der Festbetonprobekörper erfolgten grundsätzlich zu zwei Zeitpunkten – 5 min nach Mischende sowie 90 min nach Mischende. Die Prüfungen und die zu Grunde liegenden Prüfnormen sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Prüfverfahren

Gegenstand der Prüfung	Prüfung	Normative Grundlage
Frischbeton	Ausbreitmaß	DIN EN 12350-5
	Rohdichte	DIN EN 12350-6
	Luftporengehalt	DIN EN 12350-7
	Auslauftrichterversuch	DIN EN 12350-9
	Blutneigung (DBV-Eimerverfahren)	DBV-Merkblatt Frischbetonprüfung
Festbeton	Druckfestigkeit	DIN EN 12390-3
	Rohdichte	DIN EN 12390-7
	Frostwiderstand; Abwitterung	DIN CEN/TS 12390-9
	Frostwiderstand; Innere Schädigung	DIN-Fachbericht CEN/TR 15177

3.1.2 Ergebnisse der Prüfungen bei 20 °C

Frischbeton

Abbildung 8 zeigt die Verarbeitbarkeit der Betone über die ersten 90 min nach Mischende. Über den Zeitraum bis 90 min zeigte sich ein unterschiedlicher Konsistenzlauf für die einzelnen Betone, mit einem Nachverflüssigen der Rezeptur mit CEM III/B und einem Ansteifen der beiden anderen Rezepturen. Im Ergebnis wurde daher die Zielkonsistenzklasse F6 nicht über den gesamten Prüfzeitraum eingehalten. Dennoch waren alle Rezepturen auch nach 90 min gut verarbeitbar und zeigten augenscheinlich keine Entmischungserscheinungen.

Für die CEM II/C-M (S-LL)-Rezeptur erfolgte zusätzlich eine Wiederholungsmischung mit angepasster Fließmitteldosierung, um eine bessere Annäherung an die Zielkonsistenz zu erreichen und dabei die Verarbeitungsfähigkeit über den Zeitraum von 90 min nachzuweisen. Die Festbetonprüfungen erfolgten mit der ursprünglichen Rezeptur.

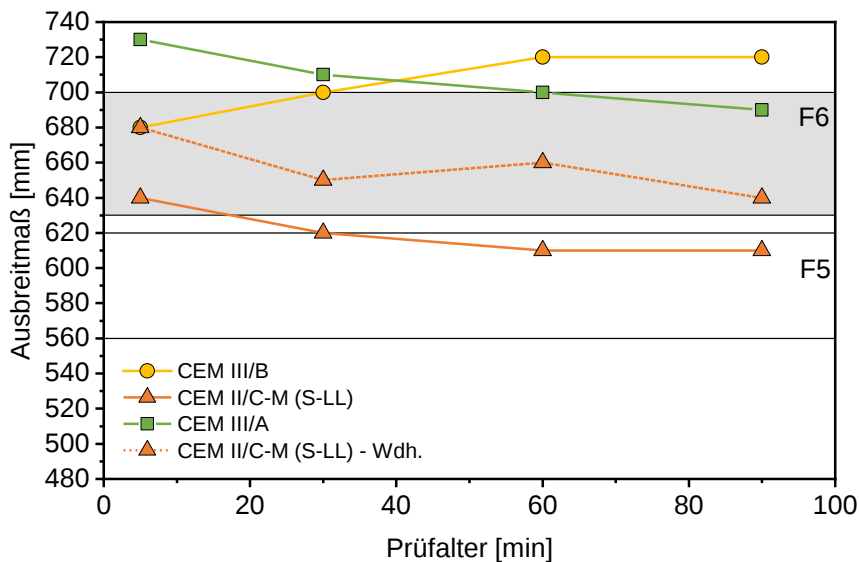


Abbildung 8: Ausbreitmaß bei 20 °C bis 90 min nach Mischende

Tabelle 6 zeigt die weiteren Frischbetonkennwerte für die drei Betone.

Tabelle 6: Frischbetoneigenschaften bei 20 °C

Eigenschaft		Rezepturen		
		CEM III/A	CEM III/B	CEM II/C-M (S-LL)
Frischbetontemperatur (5 min)	[°C]	22,0	22,7	22,0
Luftgehalt 5 min	[Vol.-%]	0,9	0,9	1,7
Luftgehalt 90 min	[Vol.-%]	2,4	0,9	1,9
Rohdichte 5 min	[kg/m³]	2340	2360	2350
Rohdichte 90 min	[kg/m³]	2310	2370	2340
Trichterauslaufzeit 5 min	[s]	8,0	7,0	7,0
Trichterauslaufzeit 90 min	[s]	12,0	11,0	10,5
Bluten	[M.-%]	0,0	0,0	0,0

Die zum Ansteifen neigenden Betone mit CEM III/A und CEM II/C-M (S-LL) zeigen eine geringfügige Erhöhung des Luftgehaltes über die Zeit und eine Verringerung der Rohdichte. Die Trichterauslaufzeit liegt bei allen Betonen im Bereich der Größenordnung für selbstverdichtende Betone (ca. 5 – 20 s). Kein Beton zeigt eine Blutneigung. Insgesamt sind die Frischbetoneigenschaften aller Betone unauffällig, so dass die Rezepturen als geeignet für die nachfolgenden Festbetonuntersuchungen bewertet wurden.

Festbeton

Abbildung 9 zeigt den Druckfestigkeitsverlauf ($f_{c,cube}$) bis zum Prüfalter von 91 Tagen für alle Rezepturen bei Probekörperherstellung zum Zeitpunkt 5 min nach Mischende. Die geplante Zielfestigkeit von 69 MPa (Vorhaltemaß: 9 MPa) wurde von allen Rezepturen vor dem geplanten Nachweisalter von 91 Tagen erreicht.

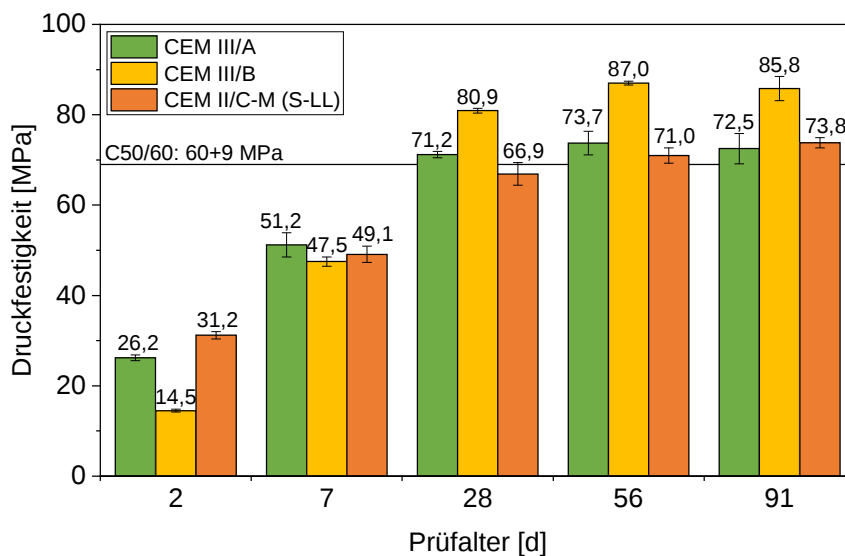


Abbildung 9: Druckfestigkeitsverlauf bei Probekörperherstellung 5 min nach Mischende

Der Einfluss des Herstellzeitpunktes (5 min vs. 90 min) der Probekörper auf die Druckfestigkeit der Betone wird in Abbildung 10 gezeigt.

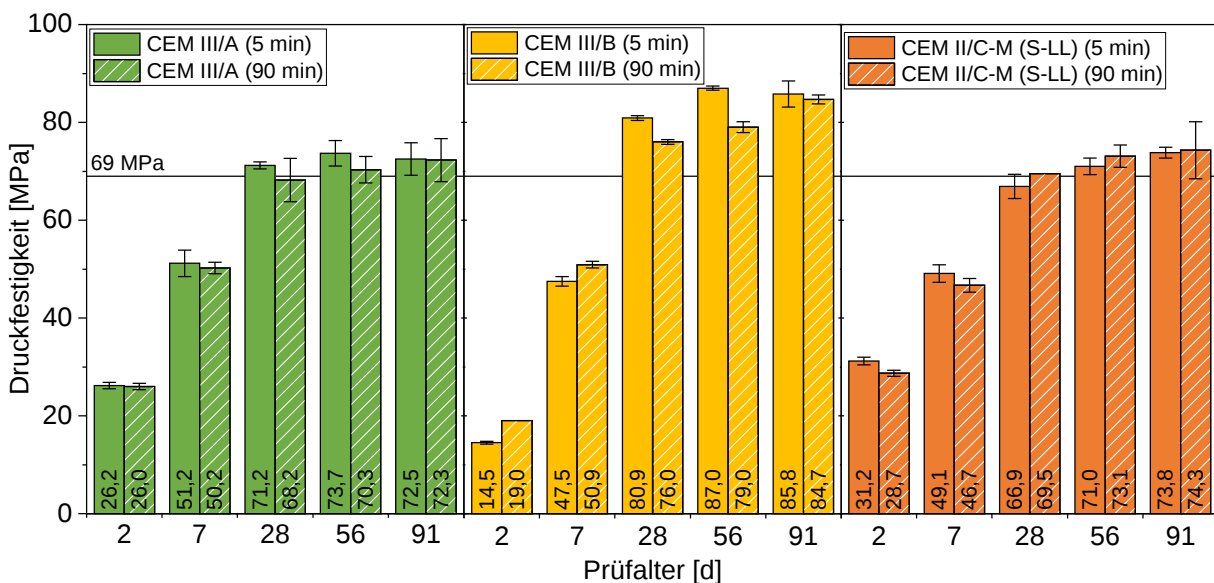


Abbildung 10: Einfluss der Herstellungszeitpunktes auf die Druckfestigkeit

Überwiegend verursachte die Herstellung der Probekörper zum späteren Zeitpunkt eine geringfügige Verringerung (i.d.R. < 5%, max. 10 %) der Druckfestigkeit. Teilweise trat auch eine Erhöhung der Druckfestigkeit auf. In jedem Fall wurde die geplante Mindestdruckfestigkeit von 69 MPa nach 91 Tagen erreicht, unabhängig von Herstellzeitpunkt.

Die Sedimentationsstabilität wurde anhand von Zylindern (h = 30 cm) bewertet, die entlang ihrer Längsachse aufgesägt wurden. Die Sägeflächen wurden visuell auf Sedimentationserscheinungen untersucht. Bei keiner Rezeptur war eine Sedimentationsneigung festzustellen, unabhängig vom Herstellzeitpunkt. Abbildung 11 zeigt exemplarisch die Sägeflächen der verschiedenen Betone.

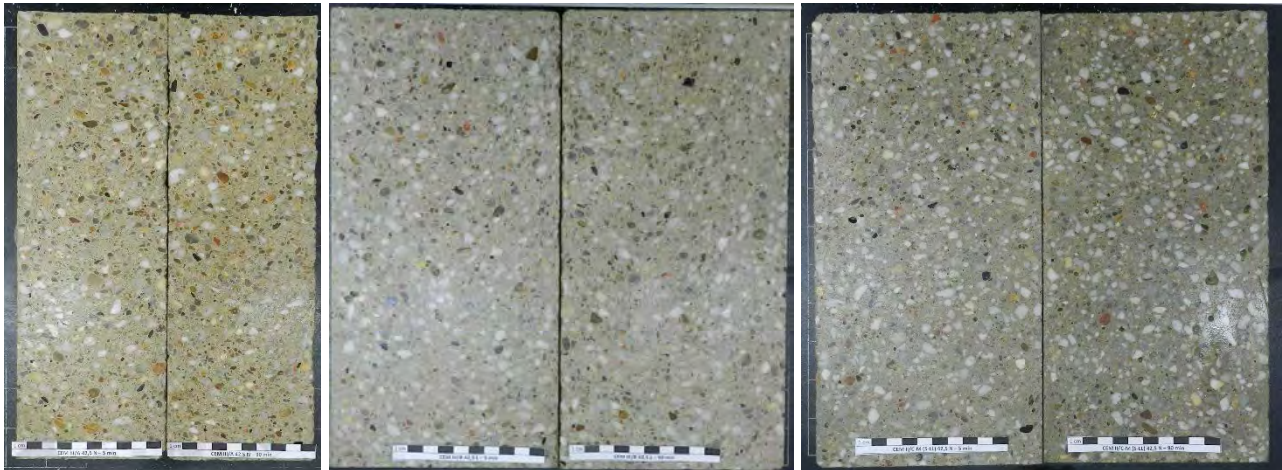


Abbildung 11: Sedimentationsstabilität CEM III/A (li), CEM III/B (m) und CEM II/C-M (S-LL) (re); jeweils linke Seite = Herstellzeitpunkt 5 min; jeweils rechte Seite = Herstellzeitpunkt 90 min

Ergänzend wurde ebenfalls eine Bestimmung des dynamischen E-Moduls bei Herstellung nach 5 min und 90 min vorgenommen (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Frisch- und Festbetoneigenschaften bei 20 °C

Eigenschaft		Rezepturen		
		CEM III/A	CEM III/B	CEM II/C-M (S-LL)
Dyn. E-Modul – 5 min	[N/mm ²]	43100	44300	43900
Dyn. E-Modul – 90 min	[N/mm ²]	43400	44800	43900

Eine Bewertung der Dauerhaftigkeit der Betone erfolgte ausschließlich anhand des Frostwiderstandes, da im System Carbonbeton der Widerstand gegen Carbonatisierung und gegen das Eindringen von Chloriden nur eine untergeordnete Bedeutung besitzt. Der Frostwiderstand wird anhand zweier Kriterien bestimmt – anhand der inneren Schädigung und anhand der Abwitterungen. Gemäß BAW-Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ gilt ein Beton als frostbeständig im Sinne der Expositionsklasse XF3, wenn der relative dynamische E-Modul bis zum 28ten Frost-Tau-Wechsel im Mittel 75 % nicht unterschreitet (innere Schädigung) und wenn die Abwitterungen 1,000 kg/m² nicht überschreiten. Die Prüfung erfolgte an Proben, die 5 min nach Mischende hergestellt wurden.

Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse der Frostprüfung. Die Betone auf Basis des CEM III/B und des CEM II/C-M (S-LL) können als frostbeständig eingestuft werden. Der Beton auf Basis des CEM III/A ist aufgrund einer zu starken inneren Schädigung nicht frostbeständig. Für eine sichere Anwendung im Bereich der

Expositionsklasse XF3 ist in diesem Fall der Einsatz künstlicher Luftporen zu empfehlen. Die Abwitterungsin-
tensität ist bei allen Rezepturen gering und unterschreitet das Prüfkriterium deutlich.

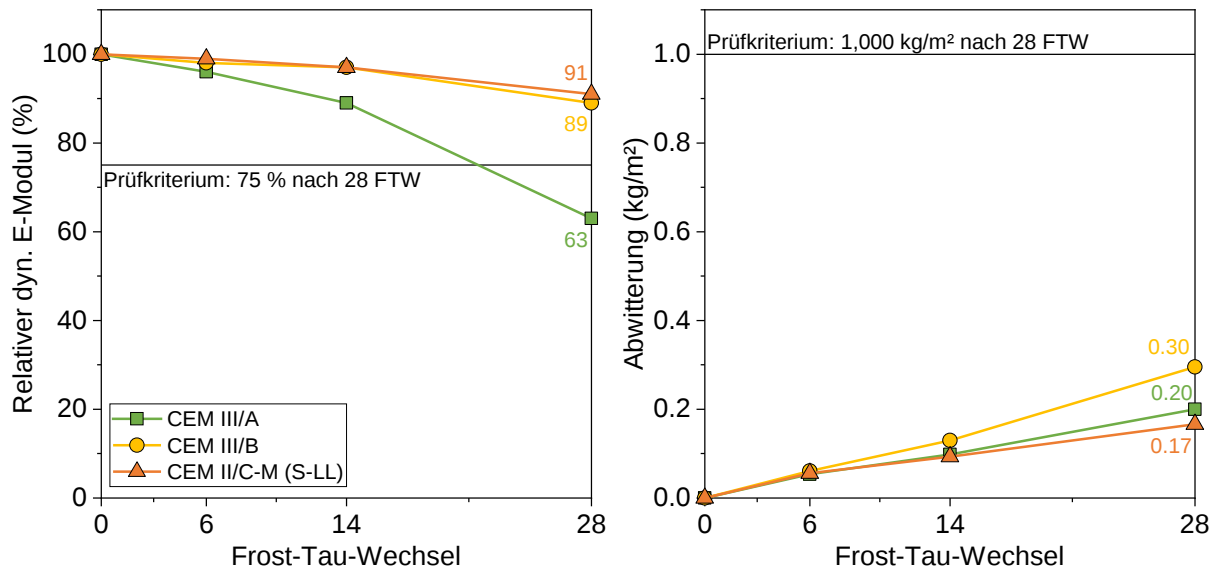


Abbildung 12: Frostwiderstand der Betone – innere Schädigung (links) und Abwitterungen (rechts)

3.1.3 Robustheit der Betone – Prüfung bei verringerter Frischbetontemperatur

Die Prüfung der Robustheit der Betone gegenüber kühlen Temperaturbedingungen wurde durch Vorkühlen der Betonausgangsstoffe bei 5 °C realisiert. Es wurde eine Frischbetontemperatur von ca. 14 °C erreicht. Die Herstellung der Betone und die Lagerung der Probekörper erfolgte bei 20 °C. Die Rezepturen sowie ausgewählte Frisch und Festbetonergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt.

Überwiegend wurde aufgrund der geringeren Frischbetontemperaturen eine höhere Fließmitteldosierung erforderlich, um die angestrebte Konsistenz zu erreichen. Die Druckfestigkeit der Betone nach 28 Tagen wurde tendenziell negativ beeinflusst. Die unterschiedlichen Herstellzeitpunkte nach 5 bzw. 90 min hatten nur einen geringen Einfluss mit Ausnahme der Rezeptur mit CEM III/B, bei der sich eine deutliche Erhöhung der Druckfestigkeit nach 90 min ergab. Dies ist gegebenenfalls auf eine bessere Verdichtung infolge der Nachverflüssigung zurückzuführen.

Tabelle 8: Rezepturen und Betoneigenschaften bei verringerten Frischbetontemperaturen; Änderung gegenüber 20 °C in ()

Mischungsbestandteile / Betoneigenschaften		Rezepturen		
		CEM III/A	CEM III/B	CEM II/C-M (S-LL)
Zement	[kg/m ³]	430	430	430
Kalksteinmehl	[kg/m ³]	35	35	35
Wassergehalt	[kg/m ³]	181	181	181
Feine Gesteinskörnung 0/2	[kg/m ³]	790	787	792
Grobe Gesteinskörnung 2/8	[kg/m ³]	910	907	912
Fließmittel	[kg/m ³]	6,0 (+0,4)	7,1 (+1,5)	4,4 (+0,7)
Temperatur 5 min	[°C]	13,4 (-8,6)	14,6 (-8,1)	13,0 (-9,0)
Ausbreitmaß 5 min	[mm]	710	660	700
Ausbreitmaß 60 min	[mm]	700	740	720
Ausbreitmaß 90 min	[mm]	700	740	710
28d Druckfestigkeit 5 min	[MPa]	69,0 (-2,2)	76,6 (-4,3)	62,1 (-4,8)
28d Druckfestigkeit 90 min	[MPa]	67,4 (-0,8)	83,2 (+7,2)	64,8 (-4,7)

3.1.4 Robustheit der Betone – Prüfung bei erhöhter Frischbetontemperatur

Die Prüfung der Robustheit der Betone gegenüber erhöhten Temperaturbedingungen wurde durch Vorwärmen der Betonausgangsstoffe bei 30 °C realisiert. Es wurde eine Frischbetontemperatur von ca. 31-33 °C erreicht. Die Herstellung der Betone und die Lagerung der Probekörper erfolgte bei 20 °C. Die Rezepturen sowie ausgewählte Frisch und Festbetonergebnisse sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Rezepturen und Betoneigenschaften bei erhöhten Frischbetontemperaturen; Änderung gegenüber 20 °C in ()

Mischungsbestandteile / Betoneigenschaften		Rezepturen		
		CEM III/A	CEM III/B	CEM II/C-M (S-LL)
Zement	[kg/m ³]	430	430	430
Kalksteinmehl	[kg/m ³]	35	35	35
Wassergehalt	[kg/m ³]	181	181	181
Feine Gesteinskörnung 0/2	[kg/m ³]	790	787	792
Grobe Gesteinskörnung 2/8	[kg/m ³]	910	907	912
Fließmittel	[kg/m ³]	6,0 (+0,4)	5,6 (-)	4,0 (+0,3)*
Temperatur 5 min	[°C]	32,0 (+10,0)	31,7 (+9,0)	32,7 (+8,7)
Ausbreitmaß 5 min	[mm]	700	680	670
Ausbreitmaß 60 min	[mm]	680	680	680
Ausbreitmaß 90 min	[mm]	660	650	660
28d Druckfestigkeit 5 min	[MPa]	71,3 (+0,1)	74,8 (-6,1)	65,1 (-1,8)
28d Druckfestigkeit 90 min	[MPa]	71,1 (+2,9)	75,9 (-0,1)	63,4 (-6,1)

*zusätzlich wurde ebenfalls ein Konsistenzhalter (Viscoflow 26) mit einer Dosierung von 2,2 kg/m³ eingesetzt

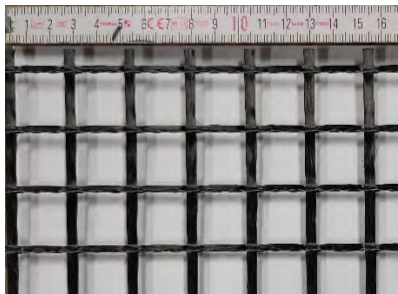
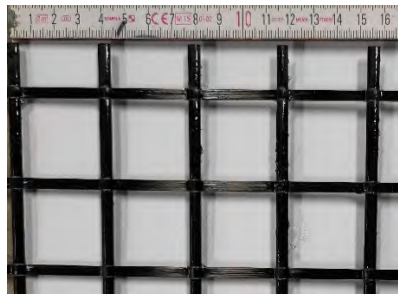
Zum Erreichen der Zielkonsistenz F6 waren geringfügig höhere Fließmitteldosierungen notwendig als bei 20 °C-Frischbetontemperatur. Bei der CEM II/C-M-Rezeptur wurde zusätzlich ein Konsistenzhalter eingesetzt. Das Ansteifen war bei den erhöhten Temperaturen erwartungsgemäß etwas stärker ausgeprägt. Tendenziell wurden bei erhöhten Temperaturen die Festigkeitseigenschaften ebenfalls negativ beeinflusst, wobei die Auswirkungen geringer ausgeprägt sind, als bei den verringerten Frischbetontemperaturen.

Generell lässt sich zusammenfassen, dass die frischbetontemperaturbedingten Änderungen der Betoneigenschaften mit üblichen betontechnologischen Maßnahmen (z.B. Rezepturanpassungen) beherrschbar sind.

3.1.5 Referenzkennwerte Kurzzeit- und Langzeitverbundtragverhaltens von Carbonbeton-Prüfkörpern (TUD)

Für die Untersuchungen im Projekt wurden zwei Typen von Carbonbewehrungen in Gitterform ausgewählt, deren Materialeigenschaften die auf dem Markt verfügbare Produktbandbreite repräsentiert. Dabei wurde auf Unterschiede hinsichtlich der Tränkung und der Geometrie sowie auf eine vorhandene Erfahrungsbasis geachtet. Die Datenblätter der Hersteller sind dem Anhang zu entnehmen, die wichtigsten Eigenschaften der beiden Produkte sind in Tabelle 10 zusammengefasst:

Tabelle 10: Eigenschaften der gewählten Carbonbewehrung

	Textil 1	Textil 2
Herstellerbezeichnung	HTC 21/21-80	solidian GRID Q95-CCE-38
Hersteller	Hitexbau GmbH	solidian GmbH
Gitteröffnung (lichte Weite)	22 mm	36 mm
Achsabstand Strang	24 mm	38 mm
Bewehrungsquerschnitt	71 mm ² /m	95,3 mm ² /m
Faserstrangquerschnittsfläche	1,82 mm ²	3,62 mm ²
Mittlere Kurzzeitzugfestigkeit $f_{f,mm,m}$ bezogen auf Faserstrangquerschnitt	2.976 N/mm ²	≥ 3.550 N/mm ²
E-Modul $E_{f,mm}$	206.667 N/mm ²	246.000 N/mm ²
Tränkung	Acrylate	Epoxidharz
Bild		

Die Größe der Gitteröffnung von Textil 1 liegt mit nur 22 mm knapp unterhalb der Empfehlung in [23]. Pauschal empfohlen wird der 3-fache Größtkorndurchmesser (8 mm), also 24 mm als lichter Strangabstand. Mit der Aufnahme von Textil 1 in das Untersuchungsprogramm soll dieser Grenzwert näher untersucht werden.

In AP 1 erfolgten alle Betonagen und Untersuchungen im Labor des Instituts für Massivbau der TUD bei einer Normaltemperatur von 20°C. Die Herstellung aller Probekörper erfolgte ca. 5 min nach dem Anmischen des Betons. Abweichend vom gewählten Nachweisalter von 91 Tagen wurden alle Probekörper bereits nach 28 Tagen geprüft.

Die Kurzzeituntersuchungen am Verbundmaterial unter Laborbedingungen dienten in AP 1 der allgemeinen Charakterisierung der sechs Materialkombinationen (2 Carbongitter x 3 Betone) sowie als Referenz für die Praxisversuche in AP 2. Alle Untersuchungen am Carbonbeton orientierten sich an den Empfehlungen vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) zur Standardisierung von Prüfmethoden für Carbonbeton [23]. Neben den Untersuchungen am Verbundmaterial wurde an der TUD das Kriechverhalten der drei Betonrezepturen untersucht. Die einzelnen Versuche werden in den nachfolgenden Kapiteln detailliert vorgestellt.

Betonage TUD

Für die Betonagen der Probekörper wurde der Beton entsprechend der von der Forschungseinrichtung 1 erstellten Rezepturen angemischt. Das Mischen erfolgte in Gleichlaufmischern. Für kleinere Mischvolumen (12–30 Liter) kam ein „Zyklus ZK 50 HE“ zum Einsatz, für größere Mischvolumen (30–100 Liter) ein „Pe-mat/Zyklus ZK 150 HE“.

Unmittelbar nach jedem Mischvorgang wurde das Ausbreitmaß bestimmt. Sofern die angestrebte Ausbreitmaßklasse F6 nicht erreicht wurde, wurde zusätzlich Fließmittel hinzugegeben und das Ausbreitmaß neu bestimmt. Um den ungünstigen Fall, also Betonagen mit steiferen Konsistenzen, ebenfalls zu berücksichtigen, wurden für die Probenherstellung bereits Mischungen mit einer Ausbreitmaßklasse F5 akzeptiert.

Mit jeder Betonage der Verbundprobekörper wurden mindestens drei Begleitprobekörper hergestellt. Die prismenförmigen Begleitprobekörpern mit den Kantenlänge von 40 mm x 40 mm x 160 mm wurden nach 24 h ausgeschalt, bis zum 7. Tag im Wasserbad und anschließend bis zur Prüfung nach 28 Tagen in der Klimakammer (20 °C, 65 % Luftfeuchte) gelagert.

An den Prismen wurden nach 28 Tagen die Biegezug- und Druckfestigkeit nach DIN EN 196-1 bestimmt. Obwohl der Anwendungsbereich der Norm auf Zementmörtel und damit auf ein maximales Größtkorn von 4 mm beschränkt ist, hat sich dieses Verfahren auch für die Prüfung von Carbonbeton etabliert [18]. Die Anwendung des Verfahrens wird auf Grundlage des geringen Größtkorndurchmessers und der schlanken Bauweise in Dickenrichtung gerechtfertigt. Die Ergebnisse dienen zur Qualitätssicherung der einzelnen Betonierchargen als auch zur Bestimmung der Festigkeiten des Verbundwerkstoffs Carbonbeton.

Der Vergleich der Prismenfestigkeiten lässt annehmen, dass die Mischungen unabhängig von der Betonage zu einer Grundgesamtheit gehören, sodass die Druckfestigkeiten ohne Korrekturfaktoren wie folgt zusammengefasst werden:

Tabelle 11: Druckfestigkeit bestimmt an Prismen

Beton	$f_{c,m}$ in N/mm ²	V_x	min $f_{c,i}$ in N/mm ²	max $f_{c,i}$ in N/mm ²
CEM III/A	74,7	0,07	66,1	82,2
CEM II/C-M	70,9	0,04	63,4	77,9
CEM III/B	75,5	0,05	70,0	82,2

Darüber hinaus wurde für die Kriechversuche die Druckfestigkeit an Zylindern mit einem Durchmesser $d = 100 \text{ mm}$ und einer Probekörperlänge $l = 300 \text{ mm}$ bestimmt (Tabelle 12). Eine Einordnung in Druckfestigkeitsklassen wurde nicht durchgeführt, da nach Norm nur eine Umrechnung von Würfeln von $f_{c,dry(150 \text{ mm})} = 0,97 \times f_{c,dry(100 \text{ mm})}$ vorgesehen ist.

Tabelle 12: Zylinderdruckfestigkeiten

Beton	Prüfung	Alter in d	Druckfestigkeit $f_{c,cyl,100\text{mm}}$ in N/mm^2			$f_{ck,cyl,100\text{mm}}$ in N/mm^2
			1	2	MW	
CEM II/C-M	25.09.2024	28	50,5	50,1	50,3	50,2
	12.03.2025	28	52,9	52,2	52,5	52,2
CEM III/A	25.09.2024	28	62,3	61,4	61,8	61,4
	12.03.2025	28	63,6	61,9	62,7	62,0
CEM III/B	25.09.2024	28	58,2	59,0	58,6	58,3

Herstellung der Verbundprobekörper

Die Herstellung aller Verbundprobekörper erfolgte im Gießverfahren, liegend in Holzschalungen (siehe Abbildung 13). Um das Aufschwimmen der Textile zu verhindern und die Lage des Textils bei der Herstellung sicherzustellen, wurden die Gitter an den Längsseiten der Schalung mit Stahlleisten eingespannt (siehe Abbildung 13). Die Maße der Stahlleisten wurden so gewählt, dass die Betondeckung mindestens 12 mm entspricht (1,5-fache des Größtkorndurchmessers). Die Höhe des Klemmsystems entspricht gleichzeitig der Probekörperdicke.



Abbildung 13: Herstellung der Verbundkörper

Im Labor als auch im Werksversuch mit CEM III/B am 13.08.2024 erfolgte die Betonage durch manuelles Einbringen und Verdichten ohne Zuhilfenahme eines Rüttlers. Im Werksversuch mit CEM III/A am 04.03.2025 wurden die Schalungen hingegen mit einem Plattenrüttler verdichtet.

Die Prüfkörper wurden einen Tag nach der Betonage aus den ausgeschalteten Platten gesägt und zugeschnitten. Nach dem Zuschnitt wurden die Probekörper sieben Tage im Wasserbad, anschließend bis zur Prüfung im Normklima gelagert. Die Prüfung erfolgte nach 28 Tagen.

Die Qualität des Einbringens des Frischbetons in die Maschenstruktur der Carbonfaserbewehrung hing maßgeblich von der Konsistenz des Frischbetons und des Carbonbewehrungstyps ab. Bei der Betonage von Verbundkörpern, welche mit dem grobmaschigem Textil 2 bewehrt wurden, spielte die Steifigkeit des Frischbetons eine untergeordnete Rolle. Bei der Herstellung der Verbundprobekörper mit dem engmaschigerem Textil 1 verlängerte sich die Verarbeitungszeit bei steiferen Betonmischungen (F5) im Vergleich zu Betonagen mit fließfähigeren Mischungen (F6), da der Beton das textile Gelege weniger gut durchdrang. Durch die schlechtere Durchdringung, die geringere Textilsteifigkeit und das Gewicht des eingebrachten Betons verformte sich das Textil 1 teilweise, siehe nachfolgender Absatz. Bei fließfähigeren Mischungen gab es weniger Durchdringungsprobleme während der Betonage.

Die Klemmung der Textile erwies sich zunächst als ausreichend, um die Lagesicherung der Textile zu gewährleisten. Bei einer Betoncharge mit steiferer Konsistenz wurde an den späteren Schnittflächen der Probekörper in Plattenmitte eine deutliche Verformung des Textils 1 in Richtung Schalungsunterseite festgestellt. Die Betondeckung wurde bei diesen Probekörpern über ein vertretbares Maß ($12 \text{ mm} \pm 1,5 \text{ mm}$ nach [23]) hinaus unterschritten, teilweise kam es unter dem Textil zu einer Lunkerbildung (Abbildung 14 links). Auch wenn anhand der Prüfergebnisse dieser Probekörper kein signifikanter Zusammenhang zwischen Versagen und Betondeckung bzw. Textillage festgestellt werden konnte (nach [23] ist die Prüfung solcher Probekörper eigentlich nicht zulässig), wurde die Betondeckung in den nachfolgenden Betonagen zusätzlich mit Abstandshalter aus Kunststoff sichergestellt (Abbildung 14 rechts). Die Abstandshalter wurden in der Schalung so angeordnet, dass sie keine Schwachstelle für den Versuch bildeten (bspw. an den Probekörperenden oder außerhalb der Probekörper).

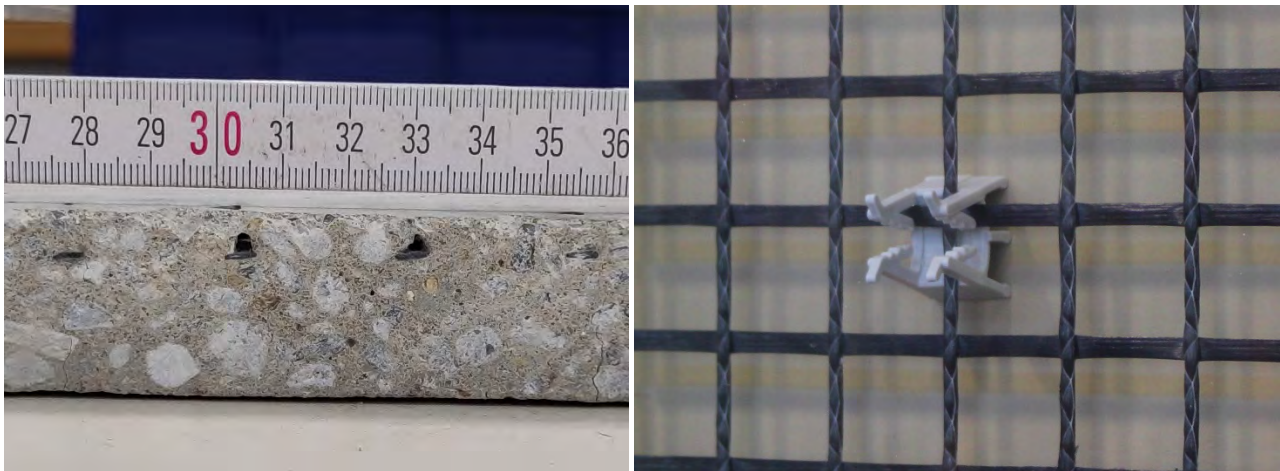


Abbildung 14: links: außermittige Textillage durch fehlende Lagesicherung und steife Konsistenz; rechts: Kunststoffabstandshalter

Basierend auf den Beobachtungen während der Betonage im Gießverfahren und der Lunkerbildung kann ein Zusammenhang zwischen der Fließfähigkeit F und der Gitterweite s_l hergestellt werden. Zur Berücksichtigung des Einflusses wird für $3 \cdot d_g \leq s_l < 4,5 \cdot d_g$ eine Mindestkonsistenzklasse von F6 empfohlen, mit $s_l \geq 4,5 \cdot d_g$ können auch steifere Konsistenzen eingesetzt werden. Die Mindestgittergröße des 3-fachen Größtkorndurchmessers in [23] ist unbedingt einzuhalten. Weiterführende Untersuchungen unter Berücksichtigung der Verdichtungsenergie werden empfohlen.

Vergleichbarkeit der Ergebnisse

Vorrangig dienen die Versuche zum Vergleich der Materialkombinationen untereinander. Gleichzeitig sollen die Versuchsergebnisse die Angaben der Textilhersteller bestätigen. Seit 2024 ist das Textil 2 (solidian) als

Carbon-Bewehrungsgitter beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) in Form einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) inklusive einer allgemeinen Bauartgenehmigung (aBG) zugelassen [24]. Das Gitter kann auf Basis der abZ/aBG und der DAfStb-Richtlinie [23] als ein- oder mehrlagige Zugbewehrung für Betonbauteile verwendet werden. Das Datenblatt und die abZ unterscheiden sich in den angegebenen Werten jedoch marginal. Das Textil 1 (HTC) ist bisher nur im Rahmen der Verstärkung von Stahlbetonbauteilen zugelassen [25], daher wurden die Werte aus der abZ nur orientierend hinzugezogen.

Die Angaben aus den abZ wurden für die Auswertung der Kurzzeitzugfestigkeit herangezogen. Ein Vergleich mit den in den abZ angegebenen Mindestübergreifungslängen für die Auswertung der Kurzzeitübergreifungsversuche ist allerdings nicht zulässig, da in diesen Bemessungswert sowohl Ergebnisse unter erhöhter Temperatur als auch Ergebnisse aus Dauerstandsversuchen einfließen.

Gleichzeitig ist ein Vergleich der Versuchsergebnisse mit Ergebnissen aus anderen Carbonbeton-Projekten naheliegend. Daher wurden bereits abgeschlossene sowie aktuell laufende Projekte des Instituts für Massivbau auf eine Vergleichbarkeit für dieses Projekt untersucht. Bei bereits abgeschlossenen Projekten wurde auch auf den Bezugszeitpunkt der Bewehrung geachtet, um grundlegende Unterschiede der Textileigenschaften auszuschließen. Eine erste Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse wurde angenommen, wenn das gleiche Gitter verwendet wurde und die Probekörpergeometrien, die Betonfestigkeit und/oder das Größtkorn ähnlich zum Projekt waren. Für das Textil 1 wurden Versuchsergebnisse des Projekts RUBIN-ISC [26] herangezogen, bei denen ein C50/60, mit einem Größtkorn von 8 mm und einer Probekörperdicke von 25 mm verwendet wurden und welches in diesem Bericht als „Ref_HTC21“ bezeichnet wird. Für das Textil 2 werden Vorversuche des DFG-Projekts „Überführung von singulären Fugenverformungen in Betonflächen in plurale Risse“ als „Ref_solidian“ (C30/37, 8 mm Größtkorn, Probekörper $d \approx 28$ mm) hinzugezogen.

Verbundwerkstoff Carbonbeton – Dehnkörperversuche

Allgemeine Beschreibung der Versuche

Das Last-Verformungs-Verhalten von carbonbewehrtem Beton unter einaxialer Zugbeanspruchung ähnelt dem von Stahlbeton. Der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie von Carbonbetonbauteilen unter einaxialer Zugbeanspruchung ist in Abbildung 15 dargestellt.

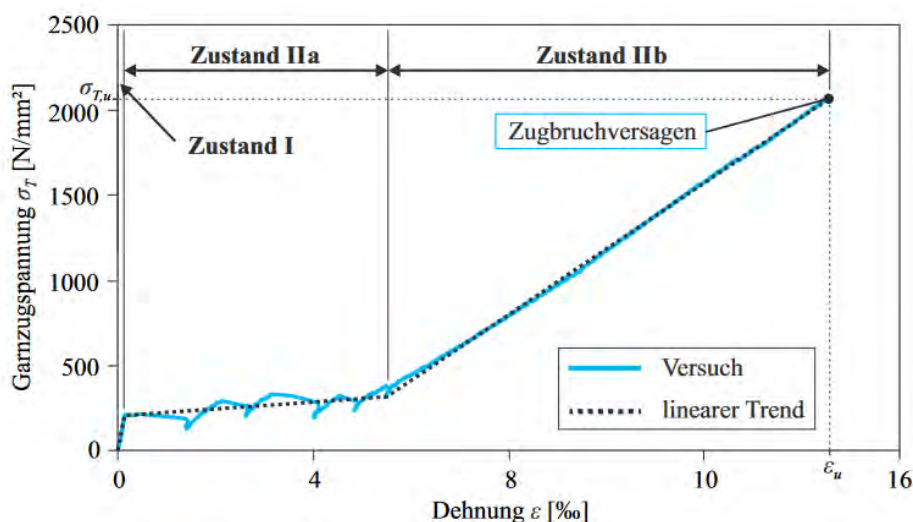


Abbildung 15: Textilbetontypische Spannungs-Dehnungs-Linie [27]

Die drei textilbetontypischen Abschnitte der Spannungs-Dehnungs-Linie werden nachfolgend unter Verwendung der in [18] und [27] beschriebenen Zusammenhänge kurz erläutert:

Der carbonbewehrte Zugprobekörper befindet sich im umgerissenen Zustand (Zustand I); die Bewehrung beteiligt sich lediglich über das Verhältnis der unterschiedlichen Dehnsteifigkeiten anteilig am Lastabtrag. Der lineare Anstieg entspricht annähernd dem Elastizitätsmodul der Betonmatrix.

Mit der Überschreitung der Betonzugfestigkeit, geht der Werkstoff mit der Bildung des ersten Risses in den Zustand II a über, bei dem die Kraft im Riss allein durch die Carbonbewehrung aufgenommen wird. Bei steigender Belastung bilden sich weitere Risse, wenn die Kräfte wieder in den Beton eingeleitet werden können und die Zugfestigkeit des Betons erreicht wird. Der Rissabstand und die Rissbreiten werden vor allem von der Bewehrung und deren Verbundeigenschaften zur Betonmatrix sowie vom Bewehrungsgrad bestimmt. Die theoretische Spannungs-Dehnungs-Linie verläuft während der Rissbildung mit sehr geringem Anstieg.

Nach Erreichen des abgeschlossenen Rissbildes (Zustand II b) bilden sich keine weiteren Risse und die Gitter werden bei Belastungssteigerung bis zum Erreichen ihrer Zugfestigkeit gedehnt. In diesem Bereich verläuft die Spannungs-Dehnungs-Linie der Dehnkörper nahezu parallel zur Spannungs-Dehnungs-Linie des reinen Gitters.

Ein plastischer Verformungsbereich (Zustand III) tritt bei carbonbewehrtem Beton nicht auf, da das verwendete Material (Carbon) keine plastische Kapazität aufweist und spröde versagt.

Probekörper, Versuchsaufbau und -durchführung

Die Ermittlung des einaxialen Zugtragverhaltens des Verbundwerkstoffes Carbonbeton erfolgte anhand des Dehnkörperversuchs nach [23]. Die Versuche dienen vorrangig zur Kontrolle und zur Bestimmung einer Referenzfestigkeit für die Übergreifungsversuche. Je Betonrezeptur und Bewehrungsgitter wurde eine Versuchsserie mit sechs Dehnkörpern geprüft. Dazu wurden jeweils drei Probekörper aus den betonierten Platten in Längsrichtung gesägt. Die Abmessungen der Probekörper entsprechen:

Tabelle 13: Maße der Probekörper für Dehnkörperversuch

Textil	Maße (Länge x Breite x Höhe) in mm ³
Textil 1 (HTC21/21-80)	980 x 100 x 25
Textil 2 (solidian Q95)	980 x 114 x 28

Die Dehnkörper enthielten eine mittige Bewehrungslage mit jeweils drei (Textil 2) bzw. vier (Textil 1) Fasersträngen in Kettrichtung. Die Maße der Probekörper und der Versuchsaufbau sind exemplarisch in Abbildung 16 dargestellt.

Die Länge des Messbereichs wurde zunächst auf 200 mm festgelegt. Im Verlauf der ersten Versuche mit zwei Probekörperserien des Textil 1 wurde festgestellt, dass sich innerhalb des Messbereichs weniger als fünf Risse ausbildeten. Die Empfehlungen nach [23] sehen jedoch mindestens fünf Risse innerhalb des Messbereichs vor. Um einen größeren Materialbereich zu erfassen, wurde die Länge des Messbereichs für die ausstehenden Versuche auf 400 mm erhöht.

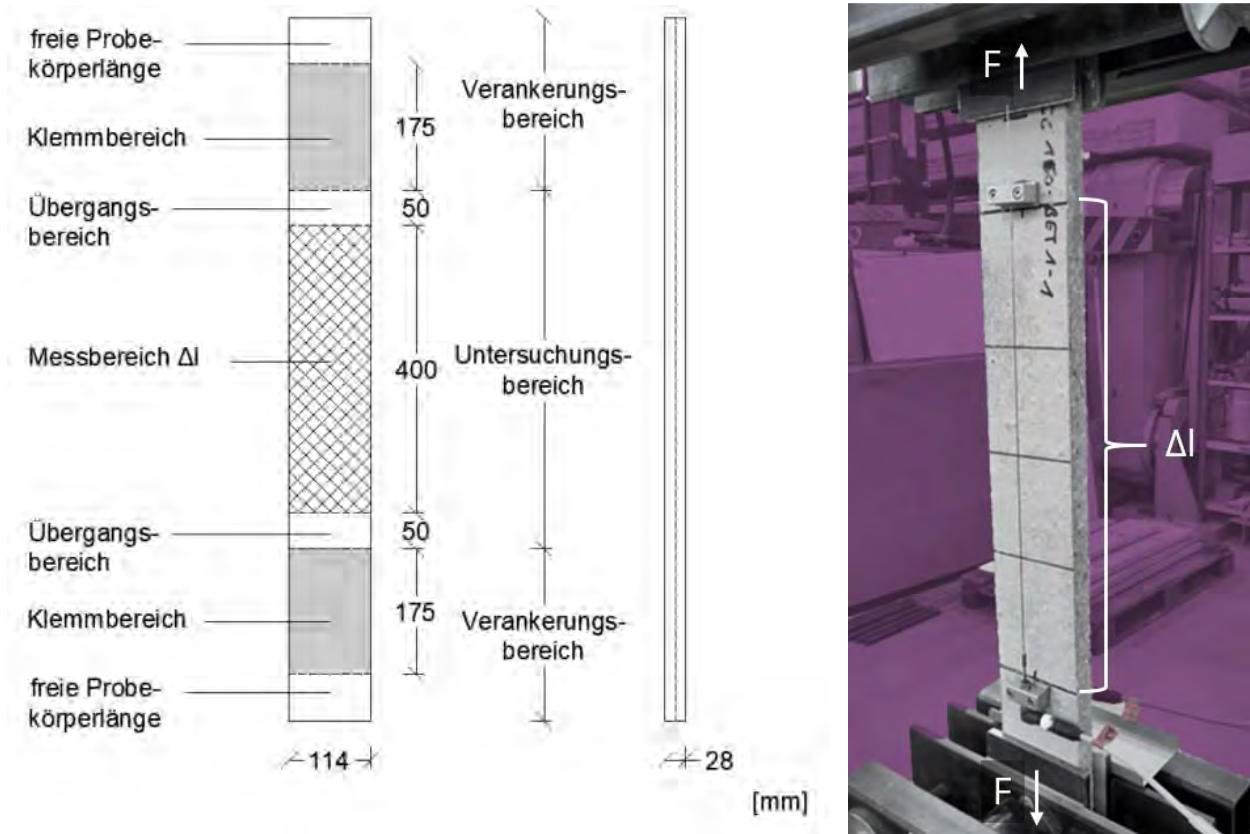


Abbildung 16: Versuchsaufbau Dehnkörperversuch für Textil 2

Die Dehnkörperversuche wurden in einer servohydraulischen Prüfmaschine mit einer Lastkapazität von 100 kN durchgeführt. Dazu wurden die Probekörper im Versuchsstand an beiden Enden durch eine Klemmvorrichtung auf einer Länge von 175 mm gehalten, welche gelenkig mit der Prüfmaschine verbunden ist. Der Anpressdruck der Klemmbacken wurde so gewählt, dass sowohl ein Rutschen der Probe aufgrund eines zu geringen Anpressdruckes als auch eine Überschreitung der Betondruckfestigkeit des Dehnkörpers bei zu hohem Anpressdruck vermieden wurde.

Die Belastung erfolgte verformungsgesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von ca. 1 mm/min. Während der Versuche wurde die Maschinenkraft F mittels Kraftmessdose, der Maschinenweg s und die Längenänderung des Messbereichs Δl mit induktiven Wegaufnehmern (IWA) auf Probekörpervorder- und -rückseite gemessen.

V Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse werden nachfolgend für die beiden Textilie getrennt aufgeführt.

Textil 1 (HTC21/21-80)

In der Tabelle 14 sind die Versuchsergebnisse der drei Rezepturen sowie die Werte aus dem Datenblatt des Herstellers, die abZ (orientierend) [25] und des Referenzversuchs Ref_HTC21 zusammengefasst. Das Versagen aller Dehnkörper erfolgte durch Reißen der Faserstränge der Carbongitter bei Erreichen der Bruchdehnung der Bewehrung.

Tabelle 14: Vergleich der am Textil 1 experimentell bestimmten Kurzzeitzugfestigkeiten und Bruchdehnungen

Versuch	Bruchspannung $f_{t,nm}$ in N/mm ²		Bruchdehnung $\epsilon_{nm,uk}$ in %	
	mittlere	char.	Mittlere	5%-Quantil
CEM III/A	2.704	2.218	9,9	8,2
CEM II/C-M	2.665	2.185	10,9	9,7
CEM III/B	2.474	2.029	9,0	6,6
Datenblatt	2.976	¹⁾	17,1	¹⁾
abZ (orientierend)	¹⁾	2.250	¹⁾	11,0
Ref_HTC21	2.700	2.214	12,3	10,6

¹⁾ keine Angaben

Zwischen den Versuchsserien sind bei der Anzahl von Versuchen keine Abweichungen erkennbar, die außerhalb der erwartbaren Streuungen liegen. Die etwas geringeren Festigkeitswerte der Versuchsserie mit CEM III/B sind auf ein vorzeitiges Versagen eines Probekörpers (DK1) bei 2.030 N/mm² zurückzuführen. Die Ursache für das frühe Versagen konnte nicht ermittelt werden; die Ergebnisse des Probekörpers wurden nicht von der Auswertung ausgeschlossen.

Die mittleren Bruchspannungen der Versuchsserien liegen zwischen 2.470 bis 2.700 N/mm². Damit liegen die Werte zwar unterhalb der vom Hersteller angegebenen mittleren Festigkeit von 2.976 N/mm², aber im Erfahrungsbereich des Instituts (Ref_HTC21). Höhere charakteristische Werte könnten erzielt werden, indem in einer Versuchsserie mehr Probekörper getestet werden.

In Abbildung 17 sind die Spannungs-Dehnungs-Linien der Mittelwerte der drei Versuchsserien dargestellt, die einzelnen Prüfergebnisse können dem Anhang entnommen werden.

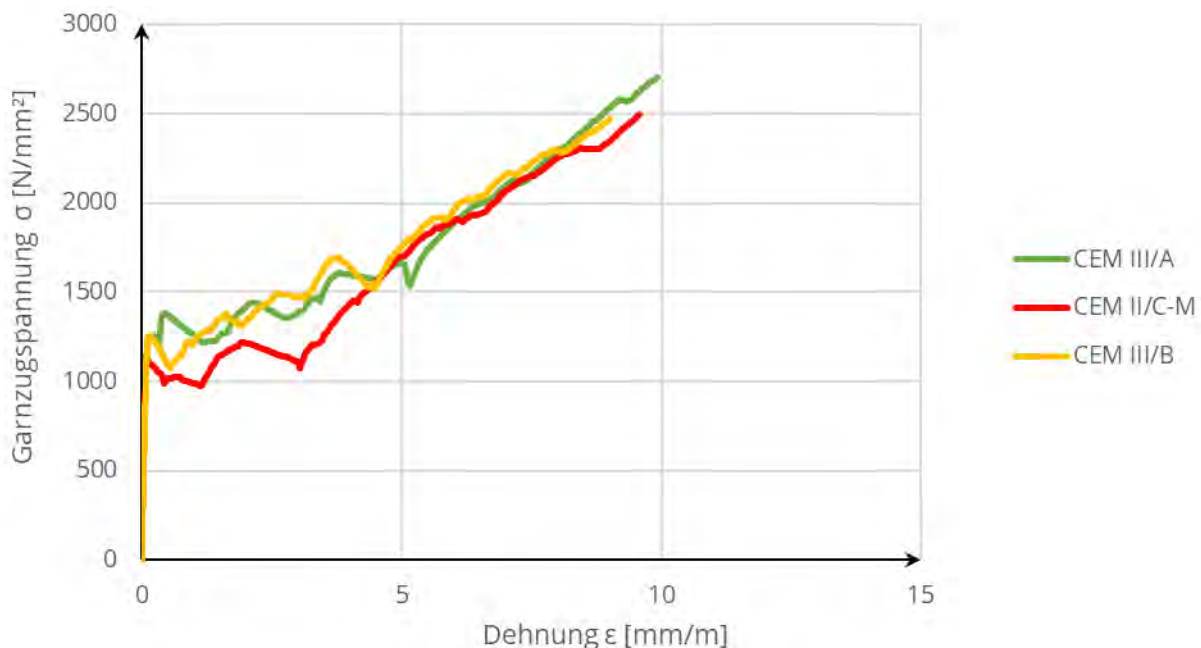


Abbildung 17: Spannungs-Dehnungs-Linien der Mittelwerte der Versuchsserien des Textils 1

Die zuvor beschriebenen, textilbetontypischen Abschnitte IIa und IIb sind für diese Materialkombinationen nicht klar voneinander abgrenzbar. Die Spannungs-Dehnungs-Linien der einzelnen Versuche zeigen darüber

hinaus einen ausgeprägten Verlauf der Rissbildung. Diese Verläufe können auf den geringen Bewehrungsgrad und die hohe Betonzugfestigkeit zurückgeführt werden. Auch die vergleichsweise geringe Bruchspannung kann auf diese Weise begründet werden. Ein höherer Bewehrungsgrad ist mit diesem Textil aufgrund der vom maximalen Größtkorn abhängigen Mindestbetondeckungen jedoch nicht möglich. Die aus Abschnitt IIb bestimmten E-Module werden stark durch die Versuchsdurchführung beeinflusst, liegen aber im Erfahrungsbereich des Instituts. Unterschiede zwischen den untersuchten Rezepturen können aufgrund der hohen Streuung innerhalb der einzelnen Serien infolge der Versuchsdurchführung nicht klar identifiziert werden.

Textil 2 (solidian GRID Q95)

In der Tabelle 15 sind die Versuchsergebnisse der drei Rezepturen sowie die Werte aus dem Datenblatt des Herstellers, die abZ [24] und des Referenzversuchs Ref_solidian zusammengefasst. Maßgeblich konnte bei den Probekörpern ein kombiniertes Versagen durch Textiltriss (Riss) und Aufspalten in der Textilebene (Spalten) beobachtet werden.

Tabelle 15: Vergleich der am Textil 2 experimentell bestimmten Kurzzeitzugfestigkeiten und Bruchdehnungen

Versuch	Bruchspannung $f_{f,nm,k}$ in N/mm ²		Bruchdehnung $\epsilon_{nm,uk}$ in ‰	
	mittlere	char.	Mittlere	5%-Quantil
CEM III/A	3.688	3.035	14,6	13,4
CEM II/C-M	3.630	3.077	14,5	12,7
CEM III/B	3.758	3.093	14,2	13,2
Datenblatt	3.550	2.800	¹⁾	12,6
abZ	¹⁾	2.917	¹⁾	12,4
Ref_solidian	3.639	2.984	14,5	13,1

¹⁾ keine Angaben

Sowohl die mittleren als auch die charakteristischen Werte der Bruchspannung liegen im Bereich der instituteigenen Erfahrungswerte und der Angaben der Hersteller.

In Abbildung 18 sind die Spannungs-Dehnungs-Linien der Mittelwerte der drei Versuchsserien dargestellt, die einzelnen Prüfergebnisse können dem Anhang entnommen werden.

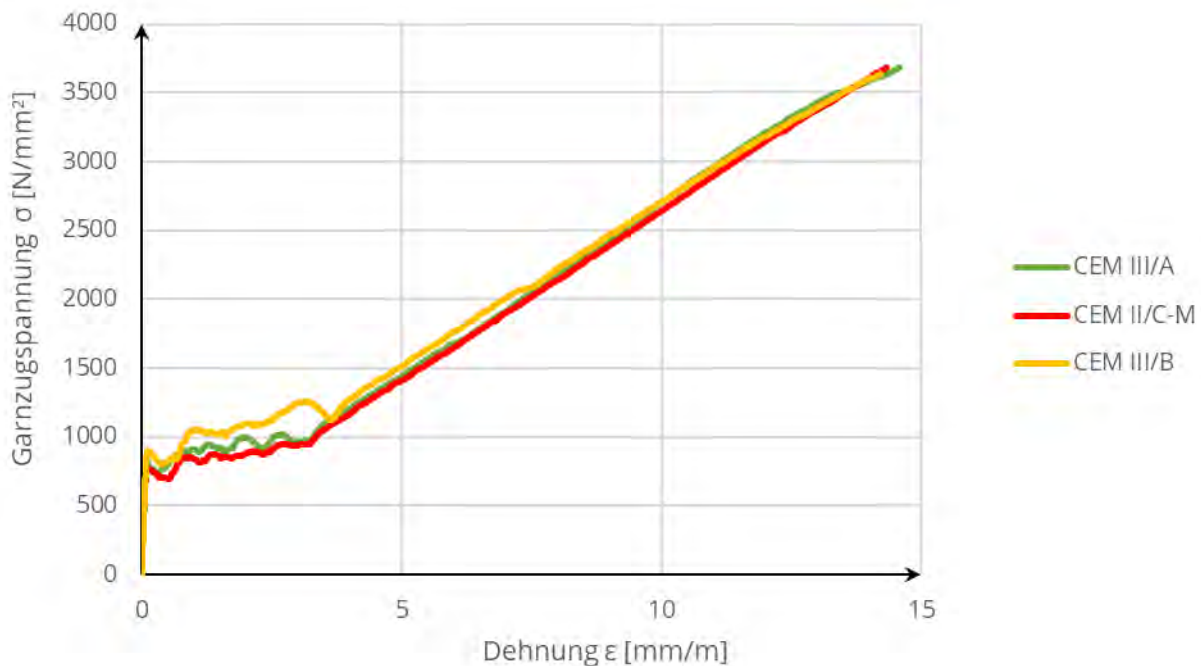


Abbildung 18: Spannungs-Dehnungs-Linien der Mittelwerte der Versuchsserien des Textils 2

Die textilbetontypischen Abschnitte IIa und IIb sind klar voneinander abgrenzbar, ab einer Dehnung von ca. 3,5‰ ist die Rissbildung vollständig abgeschlossen. Die aus Abschnitt IIb bestimmten E-Module stimmen mit den Angaben des Herstellers überein. Signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Rezepturen konnten nicht identifiziert werden.

Verbundwerkstoff Carbonbeton – Einseitiger Textilauszugversuch (SPO)

Allgemeine Beschreibung der Versuche

Im einseitigen Textilauszugversuch (*engl.*: single-sided pull-out, *kurz*: SPO) wird das Verbundverhalten eines einzelnen Faserstrangs, der einseitig aus der Betonmatrix ausgezogen wird, untersucht. Die Kraftübertragung an den Kontaktflächen zwischen Beton und Bewehrung gewährleistet neben dem statischen Zusammenwirken des Verbundbaustoffes die Verankerung sowie einen kontinuierlichen Aufbau der Bewehrungskräfte.

Die Verbundwirkung zwischen Carbonbewehrung und Betonmatrix beruht analog zum Stahlbeton auf drei grundlegenden Mechanismen: Haftung, Reibung und Verzahnung. Der Haftverbund ist dadurch gekennzeichnet, dass während der Kraftübertragung keine lokale Verschiebung (Schlupf) zwischen Bewehrung und Beton stattfindet; während der Reibverbund erst mit dem Einsetzen des Schlupfes und bestimmt durch die Rauigkeit zwischen Faserstrang und Betonmatrix wirkt. Die mechanische Verzahnung (auch Formschluss genannt) zwischen Beton und Faserstrang entsteht durch die herstellungsbedingte ungleichmäßige, meist bauchige Form der Faserstränge. Die chemische Zusammensetzung bzw. die Steifigkeit der Tränkung beeinflusst dabei maßgeblich den Querverformungswiderstand. Je größer der Querverformungswiderstand der Faserstränge, desto größer sind die lokalen Verbundspannungen aus Formschluss. Die anteilig wirkenden Verbundmechanismen aber auch die Versagensmechanismen des Verbundes unterscheiden sich in Abhängigkeit von den Textileigenschaften. Bei Textilien mit „weichen“ Tränkungen (z.B. Acrylate, wie Textil 1) dominieren Haft- und Reibverbund, das Verbundversagen tritt daher durch Textilauszug auf. Demgegenüber dominiert bei Bewehrungsmaterialien mit „steifen“ (z.B. Epoxidharz, wie Textil 2) Tränkungen häufiger der Mechanismus des Formschlusses und der Verbund versagt durch Aufspalten der Betonmatrix [28].

Die Beschreibung der Verbundtragwirkung erfolgt im SPO-Versuch anhand des Zusammenhanges zwischen der in der Grenzfläche von Bewehrung und Beton wirkenden Schub- oder Verbundspannung τ und der zugehörigen lokalen Verschiebung (Schlupf) s des Bewehrungselementes (siehe auch Abbildung 19). Aus der Beziehung zwischen der im Versuch ermittelten Auszugskraft und Rissöffnung kann numerisch die lokale Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung (VSB) abgeleitet werden. Die in den Textilauszugsversuchen ermittelten Kurvenverläufe können meist mit den folgenden Verbundbereichen beschrieben werden (siehe Abbildung 19): a) Aktivierung des Haftverbundes, b) Zerstörung des Haftverbundes und c) Reibbereich.

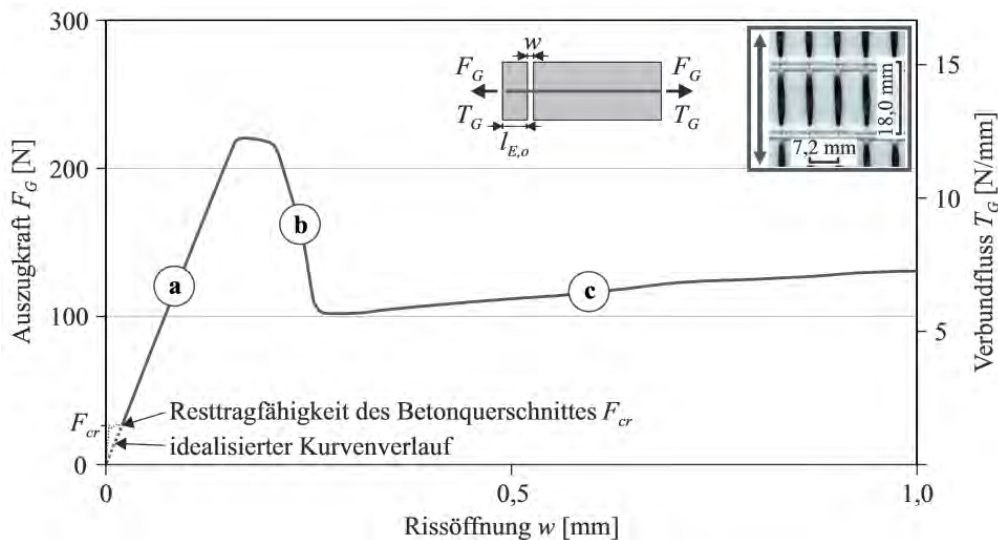


Abbildung 19: Exemplarisches Ergebnis der Textilauszugsversuche aus [27]

Probekörper, Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau mit kurzer Einbindelänge (SPOb) erwies sich in der Vergangenheit für Textilie mit steifer Tränkung aufgrund des zu erwartenden Aufspaltens der Betonmatrix als ungeeignet. Daher wurde in diesem Projekt nur das Textil 1 (HTC) geprüft. Der Versuch diente als Vorversuch für die später durchgeführten, umfangreicheren Übergreifungsversuche. Neben dem Vergleich des Verbundverhaltens der drei Rezepturen wurde anhand des Versuchs numerisch eine Verankerungslänge abgeleitet. Da die tatsächliche Bruchspannung der Fasern weit über den im SPOb-Versuch erzielten Spannungen liegt, dient die numerische Herleitung der Verankerungslänge lediglich als grober Schätzwert für die Wahl der Übergreifungslängen im Übergreifungsversuch.

Je Betonrezeptur wurde eine Versuchsserie mit sechs SPO-Probekörpern geprüft. Alle sechs Probekörper konnten aus einer Platte gewonnen werden und hatten folgende Abmessungen der Probekörper:

Tabelle 16: Maße der Probekörper für SPO-Versuch

Textil	Maße (Länge x Breite x Höhe) in mm ³
Textil 1 (HTC21/21-80)	380 x 72 x 25

Die Probekörper enthielten eine mittige Bewehrungslage mit jeweils drei Fasersträngen. Der mittlere Faserstrang wurde vor der Betonage durchtrennt. Der Anfang der Einbindelänge wurde durch einen Sollriss vorgegeben, der mit Hilfe eines beidseitigen Sägeschnittes nach der Betonage begrenzt wurde und die

Sollrissstelle definiert. Dadurch war die Bewehrung an einem Probenende auf großer Länge vollständig verankert; an dem gegenüberliegenden Probenende wurde durch die kurze Einbindelänge ein Ausziehen des Faserstrangs und somit ein Verankerungsversagen erzwungen. Die Einbindelänge betrug in diesen Versuchen ca. 24 mm (einfacher Achsabstand des Textils).

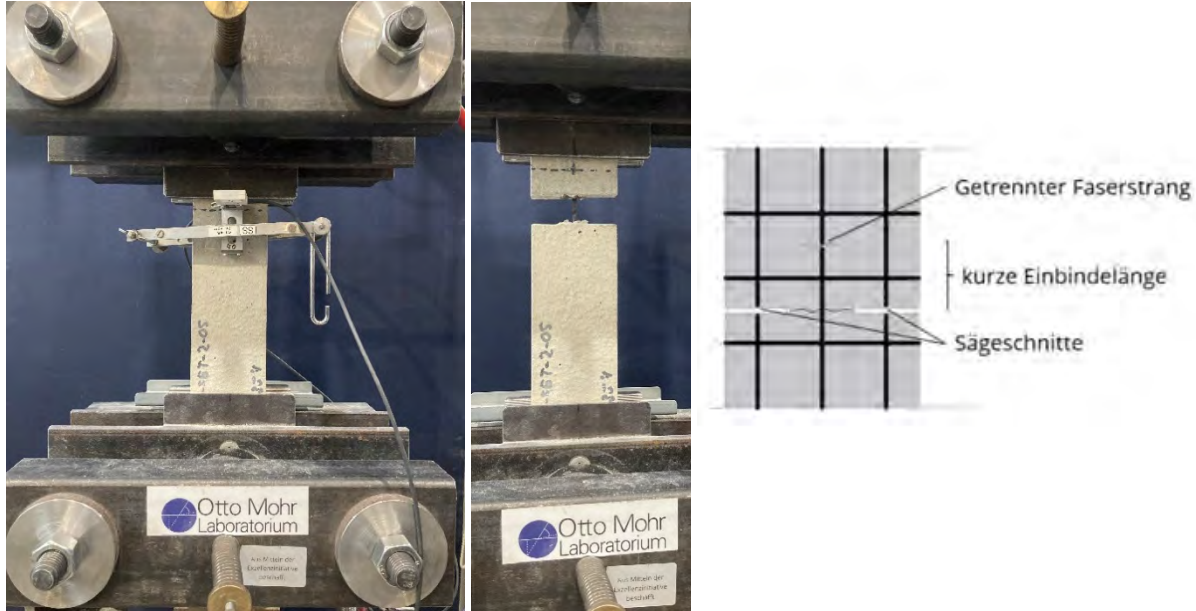


Abbildung 20: Versuchsaufbau SPO-Versuche

Die Vorrichtung zur Lasteinleitung entsprach dem Aufbau des einaxialen Zugversuchs am Dehnkörper. Der Versuch wurde mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min weggesteuert bis zu einer Rissöffnung von 5 mm gefahren. Während des Versuchs wurde die Rissöffnung beidseitig mittels Wegaufnehmer gemessen.

V Versuchsergebnisse

Der Faserstrang eines Probekörpers der Prüfsreihe CEM II/C-M versagte während des Auszugs auf Textilriss, bei den übrigen Probekörpern aller Versuchsserien wurde der mittlere Faserstrang vollständig ausgezogen.



Abbildung 21: Querschnitt am Betonsteg eines geprüften SPO-Probekörpers (Auszug des Faserstrangs)

In den folgenden Abbildungen sind von allen Prüfsreihen die Kraft-Verformungsdiagramme dargestellt.

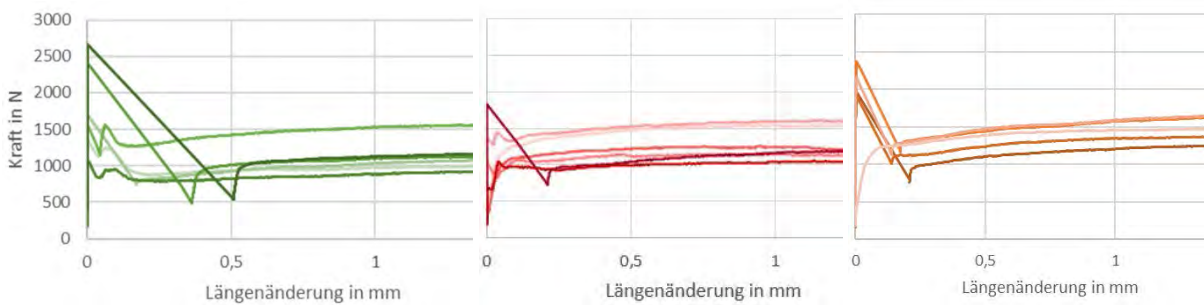


Abbildung 22: Kraft-Verformungs-Beziehung der Materialkombination Textil 1 mit links: CEM III/A, mitte: CEM II/C-M; rechts: CEM III/B

Nach Abbildung 22 können ab einer Längsverformung von 0,5 mm bzw. mit der Aktivierung des Reibverbundes keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei verschiedenen Betonrezepturen identifiziert werden.

Mutmaßlich wegen der hohen Betonzugfestigkeit und der bei einigen Probekörpern großen Betonstegquerschnittsfläche übersteigt die Resttragfähigkeit des Betonquerschnittes F_{cr} bei der Mehrzahl der Probekörper die zu erwartenden Verbundkräfte. Basierend auf den Kraft-Verformungsdiagrammen reißt der Beton an der Sollbruch schlagartig mit einer großen Rissweite auf (sprunghafter Kraftabfall in Abbildung 22 bzw. Abbildung 23 links), sodass die typischen Verbundmechanismen bei kleiner Rissweite in diesen Versuchen nicht ausreichend repräsentiert werden und die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung numerisch nicht hergeleitet werden kann.

Bei insgesamt drei Probekörpern aller Prüferien ist die Erstrissbildung nicht zu erkennen, der weitere Verlauf des Kraft-Verformungsverhaltens lässt zudem annehmen, dass keine Aktivierung des Haftverbundes stattfand (siehe Abbildung 23 rechts). Möglicherweise kam es bei der Herstellung der Sollbruchstelle durch die Sägearbeiten bereits zu einem optisch nicht erkennbaren Erstriss und dadurch zu einer Störung des Verbundes.

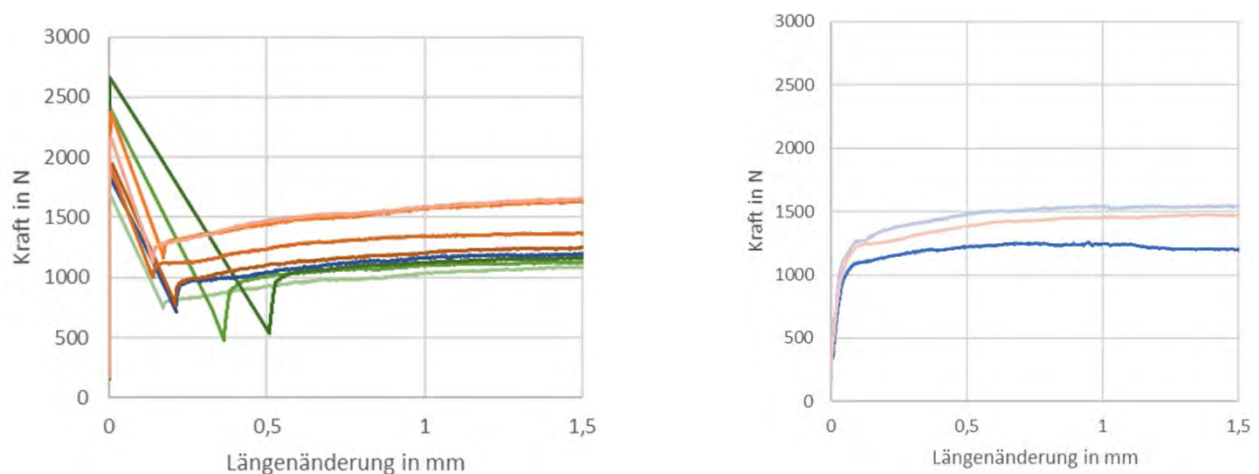


Abbildung 23: links: hohe Erstrisskraft kombiniert mit schlagartiger Rissöffnung, rechts: Betonriss nicht erkennbar

Um die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung und die daraus abgeleitete notwendige Verankerungslänge für die Materialkombinationen dennoch abschätzen zu können, wurden die Probekörper mit den oben genannten Versagensverhaltensmustern aus der Auswertung ausgeschlossen und die verbleibenden Probekörper aller Prüferien zusammengefasst. Dabei wurde basierend auf Abbildung 22 die Annahme getroffen, dass das Verbundverhalten unabhängig von den jeweiligen Betonrezepturen ist. Da alle Probekörper mit CEM

III/B diese Versagensmuster aufwiesen, konnte kein Probekörper in dieser Auswertung berücksichtigt werden.

In der folgenden Abbildung sind von den ausgewählten Probekörpern die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung dargestellt, die indirekt aus den Messdaten ermittelt wurde.

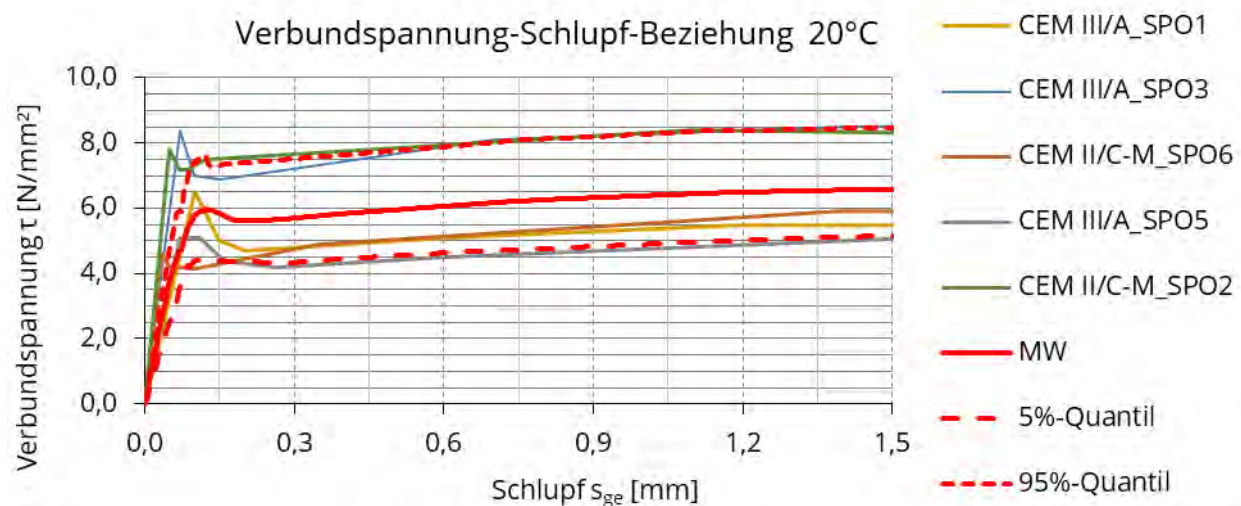


Abbildung 24: Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung für Textil 1 (alle Betonrezepturen)

Die mittlere Verankerungslänge konnte für das Textil für alle Betonrezepturen numerisch zu $l_{ver} = 130$ mm geschätzt werden, die charakteristische (95%-Fraktile) Verankerungslänge zu $l_{ver} = 162$ mm. Diese geschätzte Verankerungslänge wird zur Vorauswahl der zu prüfenden Übergreifungslängen im Übergreifungsversuch am Dehnkörper herangezogen.

Verbundwerkstoff Carbonbeton - Übergreifungsversuch am Dehnkörper

Allgemeine Beschreibung der Versuche

Verbundversuche nach Art des Textilauszugs (SPO) liefern in der Regel nur einen Minimalwert für die benötigten Verankerungs- und Übergreifungslängen und bedürfen im Fall von Spaltrissen, einer Verifizierung durch Übergreifungsversuche. In der Theorie ist die Übergreifungslänge immer größer als die Endverankerungslänge (ca. Faktor 1,1). Damit ist der Übergreifungsversuch ein auf der sicheren Seite liegender Endverankerungsversuch. Hinsichtlich Probekörpergeometrie und Aufbau der Prüfeinrichtung kann der Übergreifungsversuch mit dem Zugversuch am Dehnkörper verglichen werden. Im Übergreifungsversuch wird die Länge des Übergreifungsstoßes in der freien Länge des Probekörpers experimentell variiert und die gewählte Länge hinsichtlich der vollständigen Verankerung bzw. Lastübertragung überprüft. Die Verankerungslängen werden solange vergrößert, bis ein Reißen im Textil stattfindet. Ist das nicht der Fall muss die zulässige Bruchlast der Bewehrung reduziert werden. Der Versuchskörper enthält also kein durchgehendes Gitter, sondern zwei separate Gitterabschnitte, die auf einer gewählten Länge direkt aufeinander liegen, sodass eine Kraftübertragung über den Übergreifungsstoß stattfindet. Während ein Faserauszug aus dem Beton oder ein Spaltversagen für eine zu kurz gewählte Länge spricht, wurde die Kraft über die Verankerungs- bzw. Übergreifungslänge vollständig verankert, wenn es zum Reißen der Faserstränge im Versuch kommt (siehe Abbildung 25). Durch Variation der Übergreifungslänge lässt sich ein Faserstrangspannungs-Übergreifungslängen-Diagramm erstellen (siehe Abbildung 26). Mit Hilfe des Diagramms können für verschiedene Übergreifungs- und Endverankerungslängen die übertragbaren Kräfte bzw. Spannungen abgelesen werden.

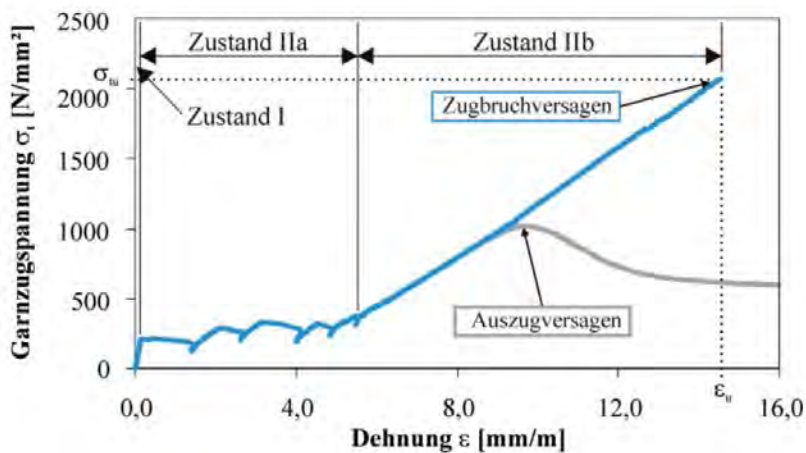


Abbildung 25: Textilbetontypische Spannungs-Dehnungs-Linie und Bruchspannungen für Zugbruch- und für Auszugversagen aus [29]

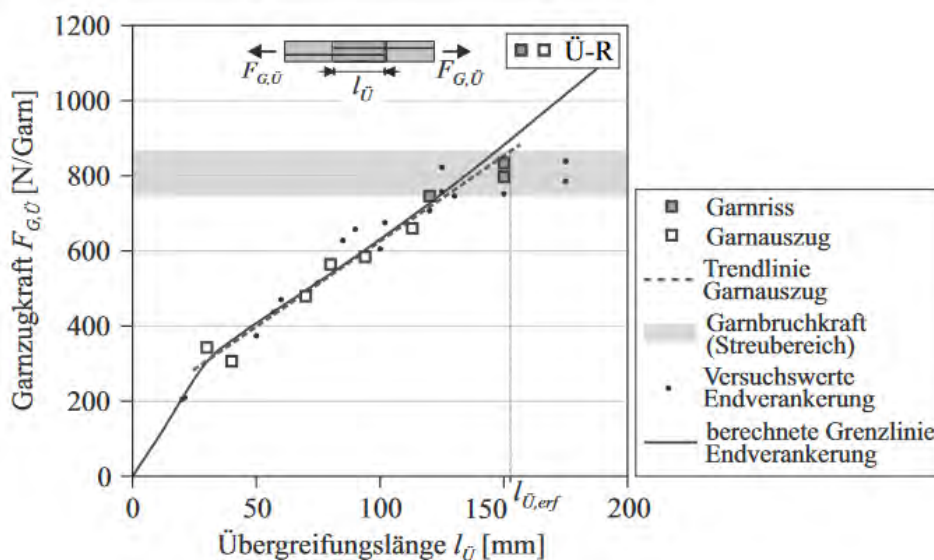


Abbildung 26: Beispiel eines Faserstrangspannungs-Übergreifungslängen-Diagramms aus [29]

Probekörper, Versuchsaufbau und -durchführung

Die Abmessungen der Probekörper für die Übergreifungsversuche entsprechen den Abmessungen der Probekörper der Dehnkörperversuche:

Tabelle 17: Maße der Probekörper für Übergreifungsversuch am Dehnkörper

Textil	Maße (Länge x Breite x Höhe) in mm ³
Textil 1 (HTC21/21-80)	980 x 100 x 25
Textil 2 (solidian Q95)	980 x 114 x 28

Der Übergreifungsstoß wurde als einlagiger Stoß mit unterschiedlichen Übergreifungslängen ausgeführt. Die Textilien wurden dazu auf die jeweilige Länge gekürzt, maschendeckend, mit Schuss/Kette – Schuss/Kette (abweichend von [23] mit Schuss/Kette – Kette/Schuss), angeordnet und in die Schalung eingeklemmt (Abbildung 27).

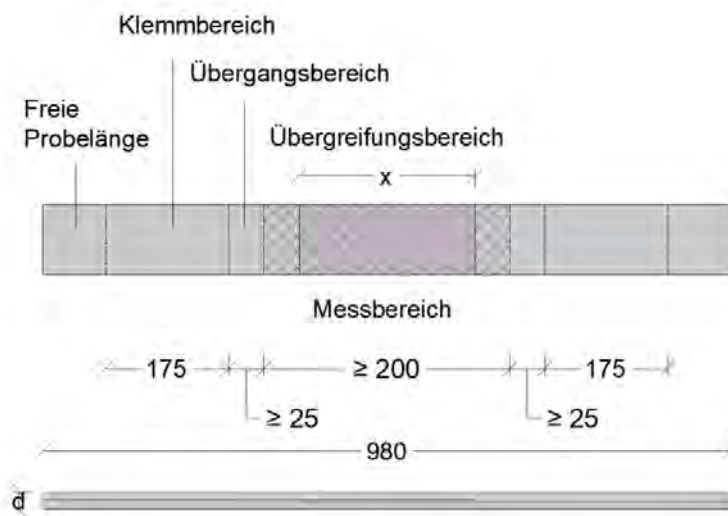


Abbildung 27: links: Probekörperaufbau für den Übergreifungsversuch; rechts: Textil 1 mit Übergreifungslänge von 200 mm

Der Versuch wurde analog zum Dehnkörperversuch durchgeführt. Die Verformungen wurden jeweils auf Probekörpervorder- und Rückseite mit einem induktiven Wegaufnehmer aufgezeichnet.

Versagensmodi

Bei Probekörpern, die mit Textil 1 bewehrt waren, traten die folgenden, als gültig bewerteten Versagensmodi auf:

- Auszug
- Auszug in Kombination mit Aufspalten
- Kombination Auszug und Faserstrangzugversagen einzelner Faserstränge
- Rissversagen aller Faserstränge



Abbildung 28: Versagensmodi für Textil 1 (links: Auszugversagen; rechts: Textilriss)

Bei Probekörpern, die mit Textil 2 bewehrt waren, traten die folgenden, als gültig bewerteten Versagensmodi auf:

- Kombination Auszug/Spaltversagen
- Kombination Auszug/Spaltversagen und Faserstrangzugversagen einzelner Faserstränge
- Rissversagen aller Faserstränge

Vereinzelt trat bei diesen Probekörpern ein minimaler Faserstrangauszug aus dem geklemmten Verankerungsbereich auf. Die Ergebnisse dieser Probekörper wurden dennoch in der Auswertung akzeptiert.



Abbildung 29: Versagensmodi für Textil 2 (links: Auszug/Spaltversagen; rechts: Textilriss)

Versuchsergebnisse

Laborversuche mit CEM II/C-M

Aufgrund der etwas niedriger ausfallenden Frisch- und Festbetonwerte wurde die Rezeptur CEM II/C-M ausgewählt, um an dieser Rezeptur stellvertretend für alle Rezepturen fünf verschiedene Übergreifungslängen zu testen. Bei diesen Versuchen sollte die jeweils kritische Übergreifungslänge identifiziert werden, bei der die Verbundbeanspruchung im Beton besonders hoch ist, ein Faserstrangzugversagen jedoch gerade noch nicht eintritt. Diese kritische Übergreifungslänge ist nicht zu verwechseln mit der Mindestübergreifungslänge, welche für die Bemessung herangezogen wird und neben den Kurzzeitverbundeigenschaften auch Temperatur- und Dauerstandeffekte berücksichtigt. Potentielle Unterschiede zwischen den Betonrezepturen hinsichtlich ihrer Verbundeigenschaften können mit dieser Übergreifungslänge am ehesten identifiziert werden.

Folgende Übergreifungslängen wurden auf Basis der vorangegangenen SPO-Versuche sowie der Referenzversuche getestet:

Tabelle 18: Getestete Übergreifungslängen mit der Rezeptur CEM II/C-M

Textil	ÜG 1 in mm	ÜG 2 in mm	ÜG 3 in mm	ÜG 4 in mm	ÜG 5 in mm
Textil 1 (HTC21/21-80)	100	150	200	250	300
Textil 2 (solidian Q95)	114	190	250	300	350

Nachfolgend werden die Ergebnisse für beide Textilie getrennt aufgeführt. Die einzelnen Versuchsergebnisse sind in Form von Faserstrangspannungs-Übergreifungslängen-Diagrammen und Tabellen dargestellt. Als Referenzfestigkeit sind die an Dehnkörpern ermittelten mittlere Kurzzeitzugfestigkeit (blaue Linie) und die charakteristische Kurzzeitzugfestigkeit (gestrichelte blaue Linie) angegeben. Die unterschiedlichen Versagensmodi sind durch Symbole gekennzeichnet.

Versuchsergebnisse für Textil 1

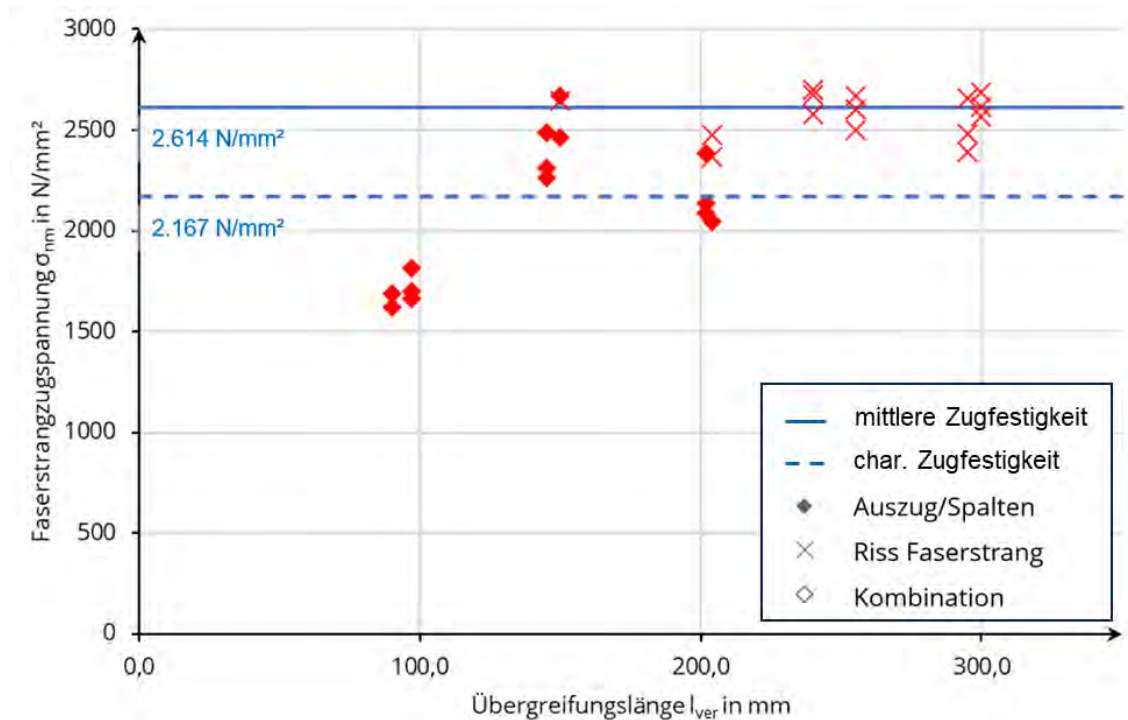


Abbildung 30: Versagensspannungen bei unterschiedlichen Übergreifungslängen in Kettrichtung für Textil 1 und CEM II/C-M

Tabelle 19: Versagensspannungen bei unterschiedlichen Übergreifungslängen in Kettrichtung für Textil 1 und CEM II/C-M

PK	ÜG 100 mm		ÜG 150 mm		ÜG 200 mm		ÜG 250 mm		ÜG 300 mm	
	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung
	mm	N/mm²	mm	N/mm²	mm	N/mm²	mm	N/mm²	mm	N/mm²
ÜV-1	97	1812,81	145	2487,12	202	2134,19	255	2498,41	295	2658,21
ÜV-2	97	1697,78	145	2309,17	202	2089,73	255	2672,07	295	2388,44
ÜV-3	97	1661,36	145	2263,67	202	2386,70	255	2601,11	295	2480,12
ÜV-4	90	1687,12	150	2642,68	204	2043,29	240	2676,08	300	2688,05
ÜV-5	90	1623,36	150	2462,39	204	2476,37	240	2697,23	300	2568,52
ÜV-6	-	-	150	2669,00	204	2367,11	240	2577,21	300	2612,48
MW		1696,49		2433,01		2226,06		2628,98		2556,67
char. Wert		1391,12		2034,74		1851,39		2156,55		2111,79

Zunächst steigt die Faserstrangzugspannung über die Übergreifungslänge von 100 mm bis 150 mm an. Bei einer Übergreifungslänge von 150 mm wird die charakteristische Zugfestigkeit bei allen Versuchen mit dem Textil 1 erreicht, bei einem Versuchskörper trat als Versagensform bereits ein Texilirissversagen auf. Bei einer Verankerungslänge von 200 mm tritt bei mehreren Versuchskörpern jedoch immer noch ein Spaltversagen auf, bei dem die Maximalspannung teilweise unterhalb der charakteristischen Zugfestigkeit der Referenzversuche liegt. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass die Verbundfestigkeiten der Probekörper die mit der

Übergreifungslänge 150 mm hergestellt wurden, höher waren, als die Probekörper die mit der Übergreifungslänge 200 mm bspw. infolge der in Abschnitt „Betonage TUD“ beschriebenen Durchdringungsprobleme. Da die Probekörper an den gleichen Tagen hergestellt wurden, scheinen die Abweichungen zufälliger Natur zu sein (siehe Tabelle 20 und Abschnitt „Einflussparameter“).

Tabelle 20: Ergebnisse der Übergreifungsversuche für Übergreifungslängen 150 mm und 200 mm in Abhängigkeit der Betonage

Betonage	Proben-Nr.	$f_{f,nm,k}$ in N/mm ²	
		$l_{ÜG} = 150$ mm	$l_{ÜG} = 200$ mm
29.07.2024	ÜG 1	2.487	2.134
	ÜG 2	2.309	2.090
	ÜG 3	2.264	2.387
01.08.2024	ÜG 4	2.643	2.043
	ÜG 5	2.462	2.476
	ÜG 6	2.669	2.367

Für diese Materialkombination wurde die Übergreifungslänge $l_0 = 150$ mm als kritische Übergreifungslänge definiert, da hier der erste Übergang zwischen Auszug- und Textiltrissversagen beobachtet werden konnte. Diese Übergreifungslänge wird für die weiteren Versuche mit Textil 1 in Kombination mit den beiden anderen Rezepturen herangezogen, um die Annahme zu prüfen, dass sich die Verbundeigenschaften der drei Rezepturen maximal geringfügig unterscheiden. Ab einer Übergreifungslänge von 250 mm liegen alle Ergebnisse im Streubereich der Referenzversuche und das Faserstrangzugversagen ist maßgebend.

Darüber werden die Ergebnisse mit den Ergebnissen aus dem Referenzversuch Ref_HTC21 verglichen (Abbildung 31).

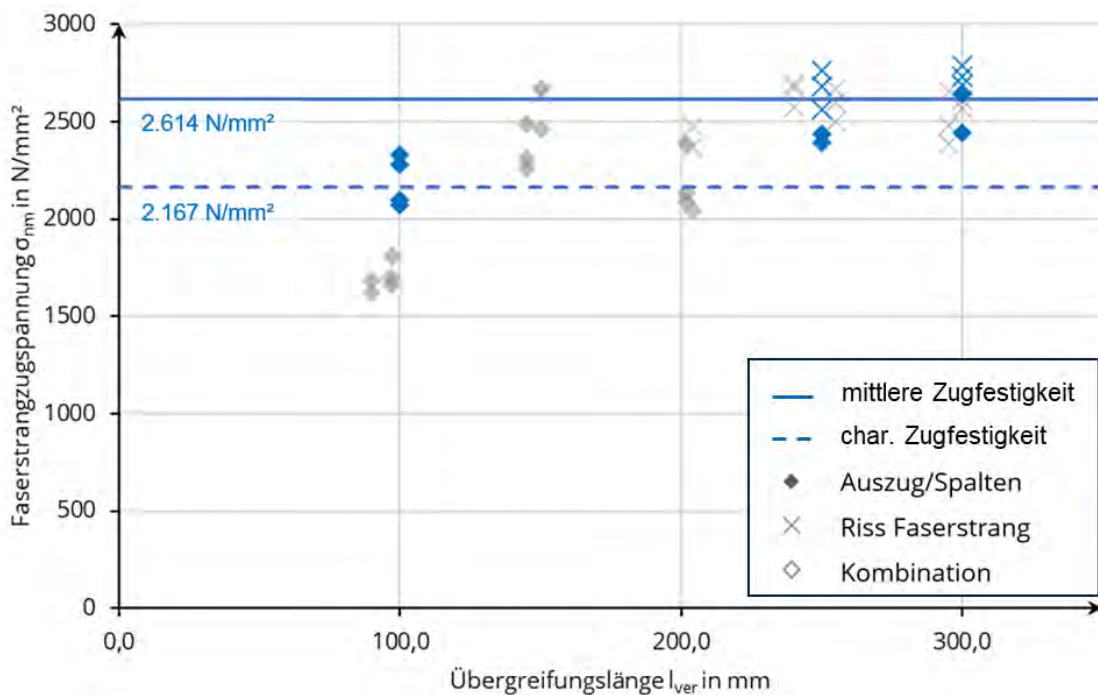


Abbildung 31: Vergleich Textil 1 und CEM II/C-M (grau) mit Ref_HTC21 (blau)

Die maximalen aufnehmbaren Spannungen sind in Ref_HTC21 bei einer Übergreifungslänge von 100 mm höher, als bei der untersuchten Materialkombination. Für die Übergreifungslängen 150 mm und 200 mm liegen keine Referenzdaten vor. Die Werte bei den Übergreifungslängen 200 mm und 250 mm stimmen überein, wobei im Referenzversuch auf mit diesen Längen noch vereinzelt ein Spaltversagen auftritt, was bei der untersuchten Materialkombination nicht der Fall ist.

Auf Grundlage der Ergebnisse wird geschlussfolgert, dass es im Rahmen der erwartbaren Streuungen keine relevanten Unterschiede zwischen der CEM II/C-M -Rezeptur und herkömmlichen Betonen hinsichtlich des Verbundverhaltens mit Textil 1 gibt. Bezüglich des Verbundes können die Betone als gleichwertig angesehen werden.

Versuchsergebnisse für Textil 2

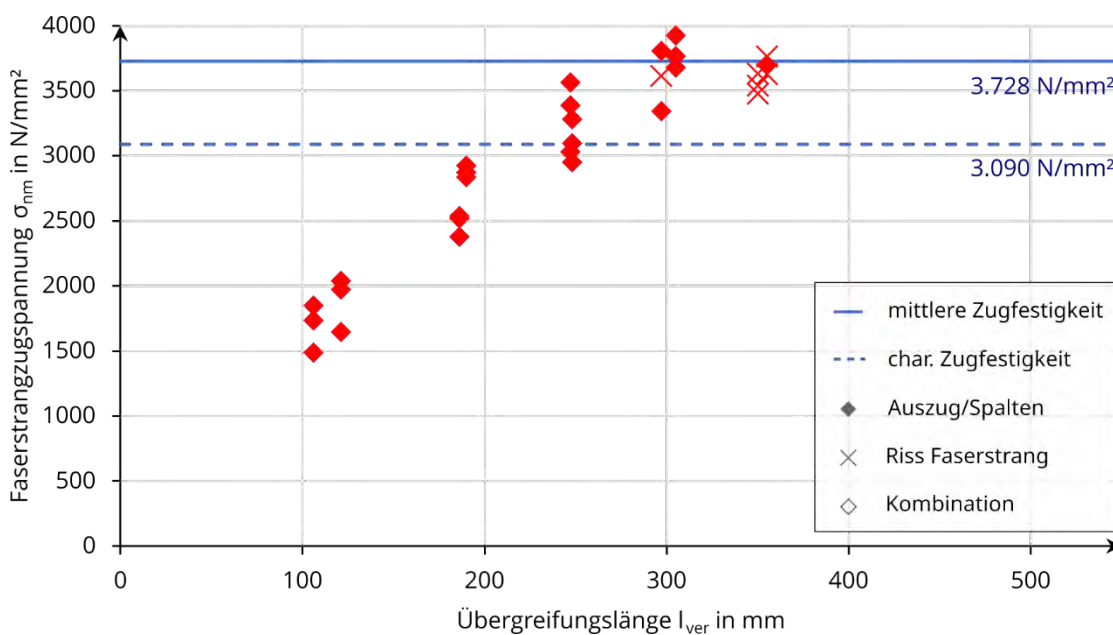


Abbildung 32: Versagensspannungen bei unterschiedlichen Übergreifungslängen in Kettrichtung für Textil 2 und CEM II/C-M

Tabelle 21: Versagensspannungen bei unterschiedlichen Übergreifungslängen in Kettrichtung für Textil 2 und CEM II/C-M

PK	ÜG 114 mm		ÜG 190 mm		ÜG 250 mm		ÜG 300 mm		ÜG 350 mm	
	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung
	mm	N/mm²	mm	N/mm²	mm	N/mm²	mm	N/mm²	mm	N/mm²
ÜV-1	106	1852,40	186	2539,88	248	3281,37	297	3342,59	350	3634,53
ÜV-2	106	1735,18	186	2520,88	248	2952,28	297	3616,97	350	3476,97
ÜV-3	106	1488,40	186	2378,91	248	3099,34	297	3809,14	350	3541,76
ÜV-4	121	1974,15	190	2874,75	247	3032,79	305	3679,65	355	3629,63
ÜV-5	121	1645,67	190	2837,47	247	3387,47	305	3766,21	355	3764,35
ÜV-6	121	2038,67	190	2927,38	247	3564,89	305	3927,89	355	3701,38
MW		1789,08		2679,88		3219,69		3690,41		3624,77
char. Wert		1422,53		2205,54		2649,80		3037,21		2983,19

Die Faserstrangzugspannung nimmt über die Übergreifungslängen von 114 mm bis 300 mm kontinuierlich zu. Das erste Faserstrangzugversagen wurde bei 300 mm beobachtet, wobei die charakteristische Zugfestigkeit bereits einer Übergreifungslänge von 250 mm teilweise überschritten wird. Bei der Übergreifungslänge von 350 mm wurde überwiegend ein Faserrissversagen festgestellt.

Für diese Materialkombination wurde die Übergreifungslänge $l_0 = 250$ mm als kritische Übergreifungslänge definiert, da hier aufgrund der maximalen Spannungen auch bereits mit einem Textilrissversagen gerechnet werden kann. Diese Übergreifungslänge wird für die weiteren Versuche mit Textil 2 in Kombination mit den beiden anderen Rezepturen herangezogen, um die Annahme zu prüfen, dass sich die Verbundeigenschaften der drei Rezepturen maximal geringfügig unterscheiden.

Darüber hinaus lassen sich die Ergebnisse mit den Ergebnissen aus dem Referenzversuch Ref_solidian vergleichen (Abbildung 33).

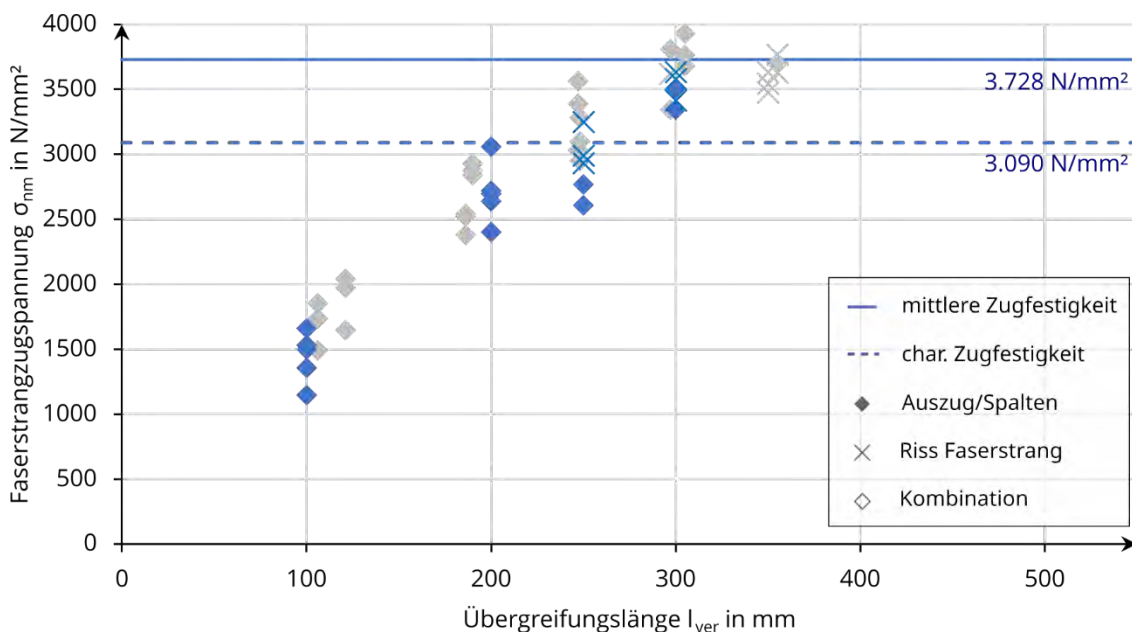


Abbildung 33: Vergleich Textil 2 und CEM II/C-M (grau) mit Ref_solidian (blau)

Die maximalen aufnehmbaren Spannungen von Ref_solidian decken sich mit den eigenen Versuchsergebnisse, mit dem Unterschied, dass in Ref_solidian bereits bei einer Übergreifungslänge von 250 mm mehrheitlich ein Textilrissversagen auftritt.

Auf Grundlage der Ergebnisse wird geschlossen, dass es im Rahmen der erwartbaren Streuungen keine relevanten Unterschiede zwischen der CEM II/C-M -Rezeptur und herkömmlichen Betonen hinsichtlich des Verbundverhaltens mit Textil 2 gibt. Bezüglich Verbund können die Betone als gleichwertig angesehen werden.

Laborversuche mit CEM II/C-M, CEM III/B und CEM III/A

Potentielle Unterschiede zwischen den Betonrezepturen hinsichtlich ihrer Verbundeigenschaften werden anhand der zuvor bestimmten kritischen Übergreifungslängen getestet. Die Ergebnisse werden wieder in Form von Faserstrangspannungs-Übergreifungslängen-Diagrammen und Tabellen dargestellt. Um festzustellen, ob es signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Versagensspannungen der drei Rezepturen gibt, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ durchgeführt. Die Voraussetzung der Varianzhomogenität wurde vorher mit dem Levene-Test ($\alpha = 0,05$) geprüft.

Versuchsergebnisse für Textil 1 mit Übergreifungslänge 150 mm

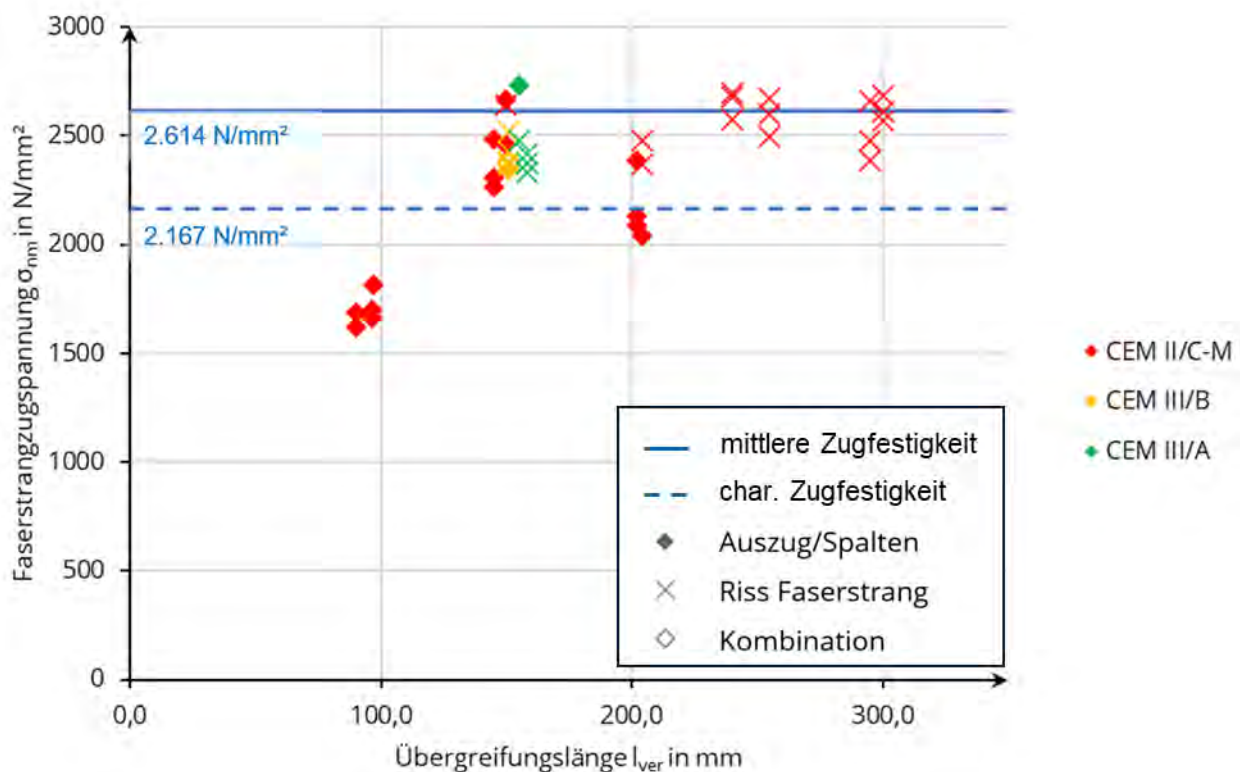


Abbildung 34: Versagensspann. in Kettrichtung bei Übergreifungslänge 150 mm für Textil 1 und CEM II/C-M, CEM III/B und CEM III/A

Tabelle 22: Versagensspannung in Kettrichtung bei Übergreifungslänge 150 mm für Textil 1 und CEM II/C-M, CEM III/B und CEM III/A

PK	ÜG 150 mm (CEM II/C-M)		ÜG 150 mm (CEM III/B)		ÜG 150 mm (CEM III/A)	
	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung
	mm	N/mm ²	mm	N/mm ²	mm	N/mm ²
ÜV-1	145	2487,12	151	2542,25	155	2734,56
ÜV-2	145	2309,17	151	2521,04	155	2501,13
ÜV-3	145	2263,67	151	2346,13	155	2477,46
ÜV-4	150	2642,68	151	2379,27	158	2376,70
ÜV-5	150	2462,39	151	2370,05	158	2333,68
ÜV-6	150	2669,00	151	2428,46	158	2418,51
MW		2472,34		2431,20		2473,67
char. Wert		2027,32		2000,88		2035,83

Im Vergleich zur Rezeptur CEM II/C-M trat bei den Materialkombinationen mit CEM III/A und CEM III/B mehrheitlich ein Textilrissversagen ein. Aus dem Diagramm kann abgelesen werden, dass es zwischen den Rezepturen nur geringfügige Unterschiede hinsichtlich der Versagensspannungen gibt. Diese Feststellung soll nachfolgend statistisch geprüft werden. Auf Grundlage des Levene-Tests (p -Wert: $0,43 > 0,05$) kann für die Versagensspannungen der Übergreifungsversuche mit den drei Rezepturen von einer homogenen Varianz ausgegangen werden. Die Ergebnisse der ANOVA-Berechnung können Abbildung 35 entnommen werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
ÜG 150 mm (CEM II/C-M)	6	14834,0	2472,3	27635,5
ÜG 150 mm (CEM III/B)	6	14842,0	2473,7	20174,3
ÜG 150 mm (CEM III/A)	6	14587,2	2431,2	6817,0

ANOVA

Streuungsursache	Quadratsummen (SS)	Freiheitsgrade (df)	Mittlere		P-Wert	kritischer F-Wert
			Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)		
Unterschiede zwischen den Gruppen	6996,897	2,000	3498,449	0,192	0,827	3,682
Innerhalb der Gruppen	273134,335	15,000	18208,956			
Gesamt	280131,232	17,000				

Abbildung 35: Ergebnisse ANOVA für Vergleich zwischen CEM II/C-M, CEM III/A und CEM III/B in Kombination mit Textil 1

Da $F < F_{\text{krit}}$ und p -Wert $> 0,05$ kann angenommen werden, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Rezepturen in Hinblick auf die mit Textil 1 untersuchte Übergreifungslänge von 150 mm gibt.

Versuchsergebnisse für Textil 2 mit Übergreifungslänge 250 mm

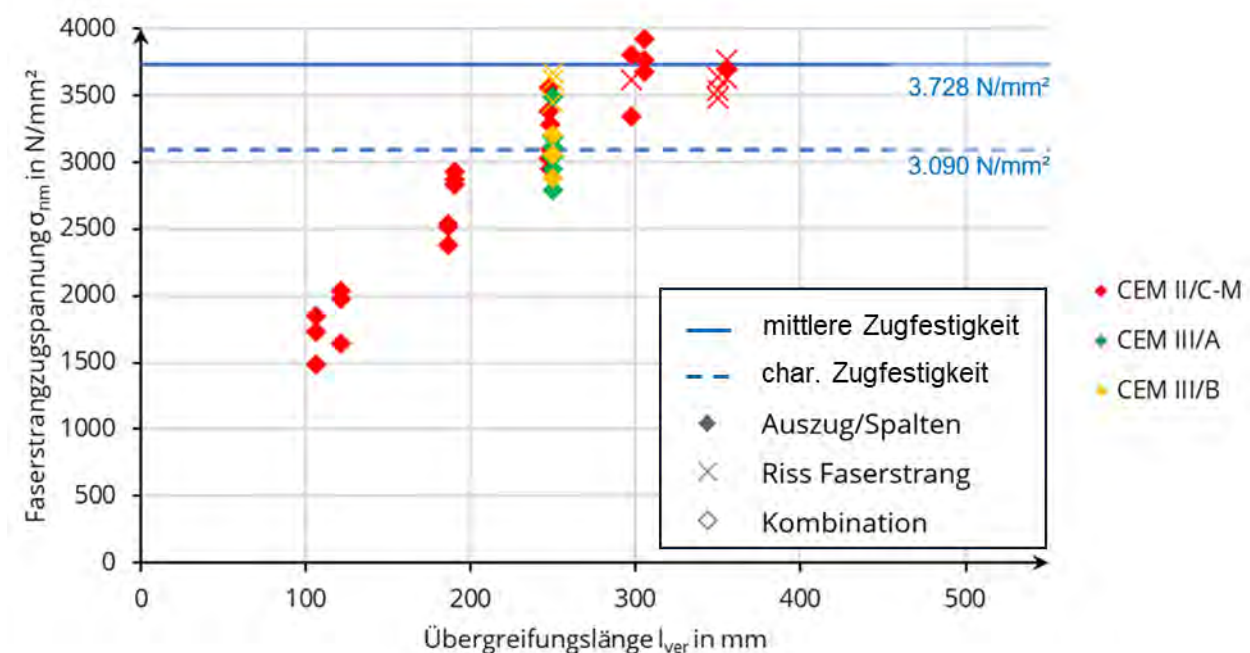


Abbildung 36: Versagensspannungen in Kettrichtung bei Übergreifungslänge 250 mm für Textil 2 und CEM II/C-M, CEM III/B und CEM III/A

Tabelle 23: Versagensspannungen in Kettrichtung bei Übergreifungslänge 150 mm für Textil 1 und CEM II/C-M, CEM III/B und CEM III/A

PK	ÜG 250 mm (CEM II/C-M)		ÜG 250 mm (CEM III/B)		ÜG 250 mm (CEM III/A)	
	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung
	mm	N/mm ²	mm	N/mm ²	mm	N/mm ²
ÜV-1	248	3281,37	250	3054,20	250	2955,24
ÜV-2	248	2952,28	250	2884,51	250	3119,10
ÜV-3	248	3099,34	250	3209,66	250	2797,10
ÜV-4	247	3032,79	250	3615,76	250	3120,07
ÜV-5	247	3387,47	250	3670,53	250	3486,97
ÜV-6	247	3564,89	250	3451,48	250	3044,01
MW		3219,69		3314,36		3087,08
char. Wert		2649,80		2717,77		2531,41

Im Vergleich zur Rezeptur CEM II/C-M trat bei den Materialkombinationen mit CEM III/A und CEM III/B bereits teilweise ein Textilrissversagen ein. Auf Grundlage des Levene-Tests (p -Wert: $0,35 > 0,05$) kann für die Versagensspannungen der Übergreifungsversuche mit den drei Rezepturen von einer homogenen Varianz ausgegangen werden. Die Ergebnisse der ANOVA-Berechnung können Abbildung 37 entnommen werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
ÜG 250 mm (CEM II/C-M)	6	19318,1	3219,7	54408,3
ÜG 250 mm (CEM III/B)	6	19886,1	3314,4	99983,5
ÜG 250 mm (CEM III/A)	6	18522,5	3087,1	53070,2

ANOVA

Streuungsursache	Quadratsummen (SS)	Freiheitsgrade (df)	Mittlere			
			Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)	P-Wert	kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	156401,347	2,000	78200,673	1,131	0,349	3,682
Innerhalb der Gruppen	1037309,536	15,000	69153,969			
Gesamt	1193710,883	17,000				

Abbildung 37: Ergebnisse ANOVA für Vergleich zwischen CEM II/C-M, CEM III/A und CEM III/B in Kombination mit Textil 2

Da $F < F_{\text{krit}}$ und p -Wert $> 0,05$ kann angenommen werden, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Rezepturen in Hinblick auf die mit Textil 2 untersuchte Übergreifungslänge von 250 mm gibt.

Fazit für Übergreifungsversuche mit unter Laborbedingungen hergestellten Probekörpern

Folgende Schlussfolgerungen werden aus den Ergebnissen der Übergreifungsversuche mit unter Laborbedingungen hergestellten Probekörpern gezogen:

1. Basierend auf den mit jeweils fünf Übergreifungslängen durchgeführten Versuchen mit Textil 1 und Textil 2 in Kombination mit der Rezeptur CEM II/C-M ließ sich für jedes Textil eine kritische Übergreifungslänge identifizieren (Textil 1: 150 mm; Textil 2: 250 mm).

2. Aus dem Vergleich der Ergebnisse der Probekörper aller Rezepturen unter Prüfung der kritischen Überreifungslänge lässt sich schlussfolgern, dass sich die Rezepturen nicht signifikant hinsichtlich ihres Verbundverhaltens unterscheiden.
3. Das Verbundverhalten der Materialkombinationen Textil 1 und Textil 2 in Kombination mit der Rezeptur CEM II/C-M verhält sich vergleichbar mit Referenzversuchen mit den gleichen Textilien und ähnlichen Rezepturen.

Aus den Schlussfolgerungen 2 und 3 lässt sich außerdem annehmen, dass sich das Verbundverhalten der drei Rezepturen mit dem Verbundverhalten konventioneller Rezepturen vergleichen lässt.

Kriechversuche

Allgemeine Beschreibung der Versuche

Unter dem Kriechen von Beton versteht man die zeitabhängige Zunahme der Verformungen unter Last. Kriechverformungen können in Abhängigkeit der Belastungsdauer die sofortigen linear-elastischen Dehnungen über ein Vielfaches übersteigen. Detaillierte Kenntnisse über das Kriechverhalten sind daher eine wichtige Grundlage für die Vorhersage der zu erwartenden Bauteilverformungen – sowohl bei der Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit als auch im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen. Ziel der Kriechuntersuchungen in diesem Projekt war, zu beurteilen, ob die entwickelten Betone weniger bzw. maximal vergleichbar stark kriechen, wie die für die Carbonbetonweise üblicherweise eingesetzten Betone.

Probekörper, Versuchsaufbau und -durchführung

Die Kriechversuche wurden nach DIN EN 12390-17 [30] als Einstufenversuche in hydraulisch gesteuerten Kriechständen in einer Klimakammer bei 20 °C und 65 % RH durchgeführt. Die Belastung der Kriechproben erfolgte 28 Tage nach Probekörperherstellung und dauerte 3 Monate. Für den Vergleich wurde neben den drei Projektrezepturen der Beton aus Ref_HTC21 geprüft (Rezeptur in Tabelle 24). Des Weiteren können für die Auswertung die Ergebnisse der Kriechversuche des C³-Forschungsvorhabens herangezogen werden [31].

Tabelle 24: Rezeptur Ref_HTC21 aus [26]

Ausgangsstoff	Zugabe	
Zement CEM /II A-S 52,5R	461	kg/m ³
Wasser	165	kg/m ³
Kalksteinmehl	41	kg/m ³
GK Sand 0/1	325	kg/m ³
GK Sand 0/2	413	kg/m ³
GK Kies 2/8	988	kg/m ³
Fließmittel Powerflow	5,25	kg/m ³
W/Z-Wert	0,36	

Aufgrund einer ungleichmäßigen Lasteinleitung mussten die Versuche mit CEM III/A und CEM II/C-M wiederholt werden, sodass die Versuche in zwei Prüfserien durchgeführt wurden (siehe Tabelle 25).

Tabelle 25: Übersicht hergestellte Probekörper für Kriechversuche

Herstellung	CEM III/A	CEM II/C-M	CEM III/B	Ref_HTC21
29.08.2024	3 x Kriechproben 3 x Begleitproben	3 x Kriechproben 3 x Begleitproben	3 x Kriechproben 3 x Begleitproben	-
12.02.2025	3 x Kriechproben 3 x Begleitproben	3 x Kriechproben 3 x Begleitproben	-	3 x Kriechproben 3 x Begleitproben

Je Rezeptur wurden 3 x Kriechprobekörper sowie 3 x Begleitproben (2 x Probekörper für Druckfestigkeit und E-Modul, 1 x Probekörper für Schwindmessung) hergestellt. Bei den Probekörpern handelt es sich um Betonzylinder mit einem Verhältnis $h/d \approx 3$ ($\varnothing 100$; $h = 300$ mm). Die Zylinder wurden in Kunststoffrohren betoniert, siehe Abbildung 38 links. Die Entformung erfolgte 24 h nach der Betonage. Nach dem Entformen wurden die Probekörper bis zum 7. Tag im Wasserbad und anschließend bis zur Belastung in der Klimakammer bei 65 % RH gelagert. Die Zylinder der zweiten Prüfsreihe wurden mit einer Höhe von $h = 350$ mm hergestellt und nach dem Entformen von beiden Seiten auf die entsprechende Länge gesägt, um Inhomogenitäten im Einfüll- und Bodenbereich im Probekörper zu vermeiden. Die Stirnseiten aller Probekörper wurden planparallel geschliffen.

Im Gegensatz zu massigen Stahlbetonbauteilen, in deren Kern kein Feuchteaustausch stattfindet, sind Carbonbetonbauteile i. d. R. so schlank, dass mit einem Feuchteaustausch mit der Umgebungsluft zu rechnen ist. Die Kriechuntersuchungen erfolgten daher an unversiegelten Proben mit dem Ziel das Gesamtkriechen (Trocknungskriechen + Grundkriechen) zu messen.

Zur Bestimmung der Prüflasthöhe wurde für jede Rezeptur die mittlere Betondruckfestigkeit f_{cm} und der Tangentenmodul E_c indirekt über den Sekantenmodul an zwei Probekörpern bestimmt, siehe Tabelle 26.

Tabelle 26: An Begleitproben bestimmter Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit

Rezeptur	CEM III/A		CEM II/C-M		CEM III/B	Referenzrezeptur
Serie	Serie 1	Serie 2	Serie 1	Serie 2	Serie 1	Serie 2
E_{cm} in N/mm ²	43.200	38.200	43.500	44.400	44.200	40.600
E_c in N/mm ² ¹⁾	45.400 ¹⁾	40.100 ¹⁾	45.700 ¹⁾	48.400 ¹⁾	46.400 ¹⁾	42.800 ¹⁾
f_{cm} in N/mm ²	67,2	68,2	54,7	57,1	63,7	61,1

¹⁾ Berechnet mit Faktor 1,05 nach DIN EN 1992-1-1

In den hydraulisch gesteuerten Kriechständen können bis zu drei Proben gleichzeitig belastet werden, sodass in einem Stand jeweils Probekörper mit einer Rezeptur belastet wurden. Kriechen ist bis zu einem Lastniveau von ca. 30 % der mittleren Druckfestigkeit linear, also proportional zur Belastung. Nach DIN EN 1992-1-1 werden die Gebrauchsspannungen auf dieses Niveau begrenzt, um übermäßiges Kriechen zu vermeiden. Bei allen Kriechversuchen wurden daher Lastniveaus von ca. 30 % der mittleren Druckfestigkeit gewählt (siehe Tabelle 26).

Tabelle 27: Durchschnittliche Kriechspannungen und Lastniveaus während Belastung

Rezeptur	CEM III/A		CEM II/C-M		CEM III/B	Referenz- rezeptur
Serie	Serie 1	Serie 2	Serie 1	Serie 2	Serie 1	Serie 2
σ in N/mm ²	20,1	20,8	17,5	17,2	20,8	18,3
Lastniveau	0,30	0,30	0,32	0,30	0,33	0,30

Der Kraftabfall innerhalb der Kriechstände infolge der sich einstellenden Betonstauchung wurde mit einem Blasenspeicher mit Öl-Stickstoffgemisch kompensiert, sodass das Ziellastniveau über die Versuchsdauer hinweg aufrechterhalten werden konnte.

Die Gesamtverformung $\varepsilon_c(t)$ jedes Probekörpers wurde über den Mittelwert der Messung der Längenänderung mit drei Dehnungsmessstreifen (DMS) im Abstand von 120 Grad bestimmt (Abbildung 38 mitte, rechts). Die DMS der zweiten Versuchsserie wurden zusätzlich abgedeckt, um einen möglichen Fehlereinfluss durch Luftfeuchtigkeit zu minimieren.

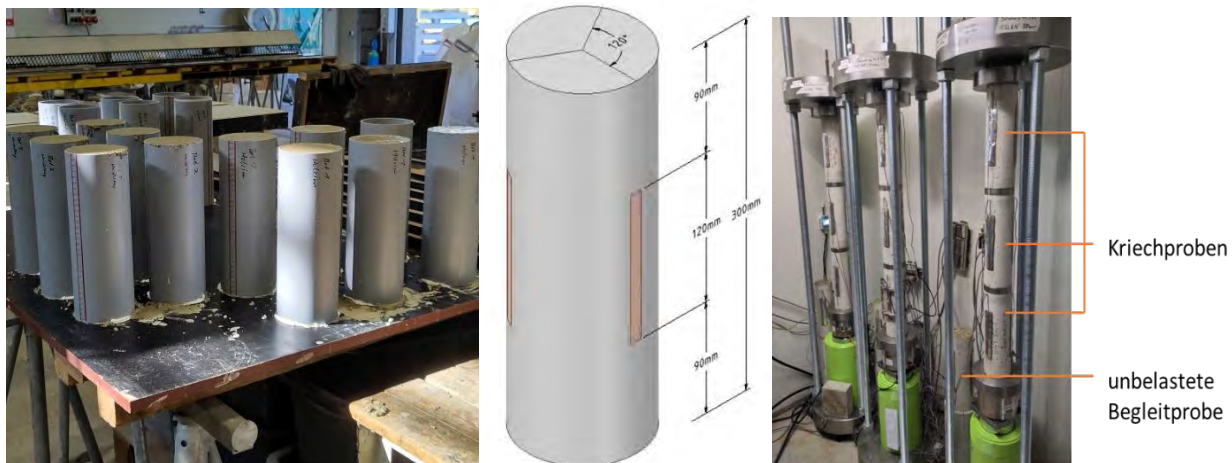


Abbildung 38: links: Herstellung der Probekörper; mitte: Messkonzept (Grafik: Peter Betz, TUD); rechts: Kriechstände

Die im Kriechversuch gemessenen Gesamtverformungen $\varepsilon_c(t)$ setzen sich unter Annahme konstanter klimatischen Umgebungsbedingungen ab dem Zeitpunkt der Lastaufbringung t_0 neben der Kriechverformung $\varepsilon_{cc}(t, t_0)$ aus einer sofortigen linear elastischen Verformung $\varepsilon_{ci}(t_0)$, einer plastischen Setzverformung $\varepsilon_{cip}(t_0)$ und einer Schwindverformung $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ zusammen:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{cs}(t, t_0) + \varepsilon_{ci}(t_0) + \varepsilon_{cip}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t, t_0) \quad (1)$$

Um die Kriechdehnung zu ermitteln, müssen folglich die anderen Verformungsanteile bestimmt und abgezogen werden. Die sofortige linear elastische Verformung wurde in allen Versuchen als die Verformung definiert, die im Zeitraum der Lastaufbringung bis zum Erreichen der endgültigen Kriechlast (ca. 10 Sekunden) gemessen wurde. Dadurch werden Kriechverformungen, die bereits während der Lastaufbringung auftreten, vernachlässigt. Die linear elastischen Dehnungen sind in Tabelle 28 angegeben.

Die plastische Setzverformung wird in diesem Versuchskonzept nicht von der sofortigen linear elastischen Verformung separiert. Eine direkte Bestimmung der plastischen Setzdehnung ist während der Kriechversuche auch nicht möglich, sondern setzt eine indirekte Bestimmung in einem Parallelversuch voraus [32]. Ein solcher Parallelversuch wurde für die Versuchsserie 2 durchgeführt, vgl. Abbildung 39. Die so bestimmte Setzdehnung beträgt für die drei Betone ca. 30 $\mu\text{m}/\text{m}$.

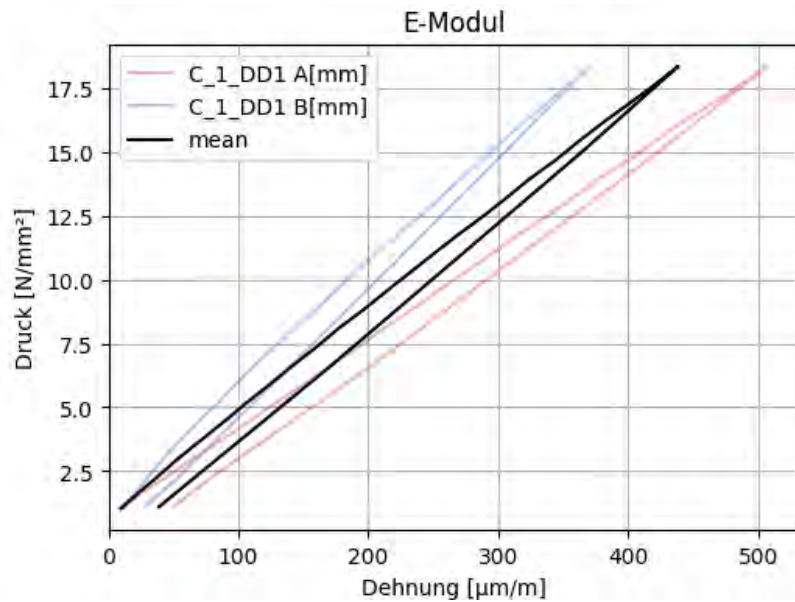


Abbildung 39: Parallelversuch zur Bestimmung der E-Moduln E_{cm} und E_c

Tabelle 28: Lineare elastische Dehnung und plastische Setzdehnung (bestimmt am Begleitkörper)

Rezeptur	CEM III/A		CEM II/C-M		CEM III/B	Referenz-rezeptur
Serie	Serie 1	Serie 2	Serie 1	Serie 2	Serie 1	Serie 2
$\varepsilon_{ci}(t_0)$ in $\mu\text{m}/\text{m}$	534	524	461	459	515	521
$\varepsilon_{cip}(t_0)$ in $\mu\text{m}/\text{m}$	-	30	-	32	-	30

Die Schwindverformungen wurden während der Kriechversuche parallel an unbelasteten Probekörpern aus der gleichen Grundgesamtheit gemessen, die neben den Kriechständen gelagert standen. Die Stirnflächen der Begleitproben wurden mit Epoxidharz abgedichtet, um den verhinderten Feuchteaustausch an den Stirnflächen der Kriechproben nachzuempfinden. In Abbildung 40 und Abbildung 41 sind die Schwindverformungen der unbelasteten Begleitproben der beiden Prüfserien dargestellt. Die Abweichungen vom Koordinatenursprung resultieren aus den großen Messschwankungen und der hier gewählten Darstellungsform.

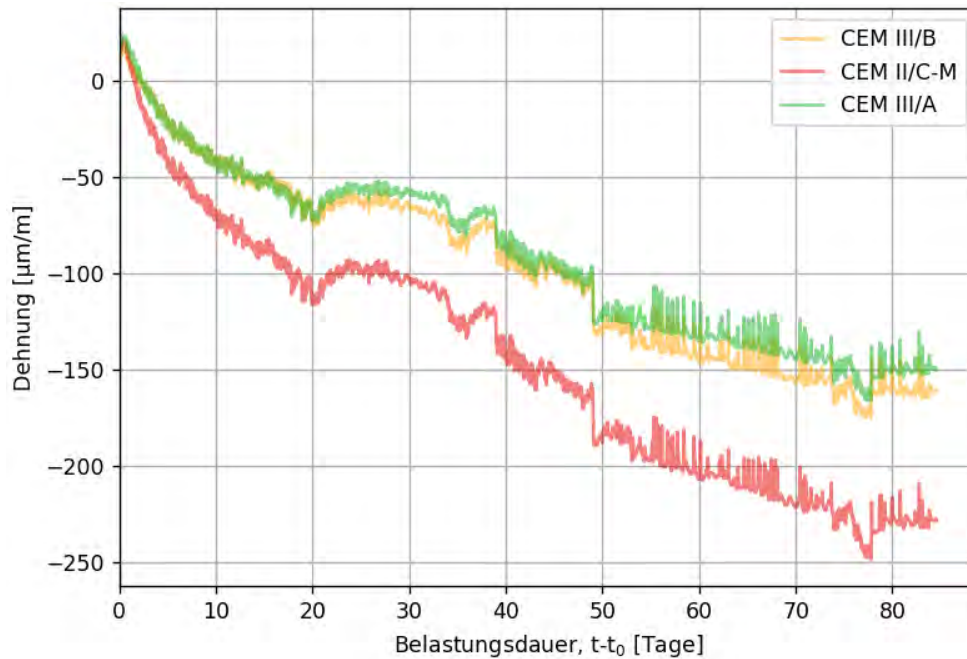


Abbildung 40: Dehnungen der unbelasteten Probekörper (Serie 1)

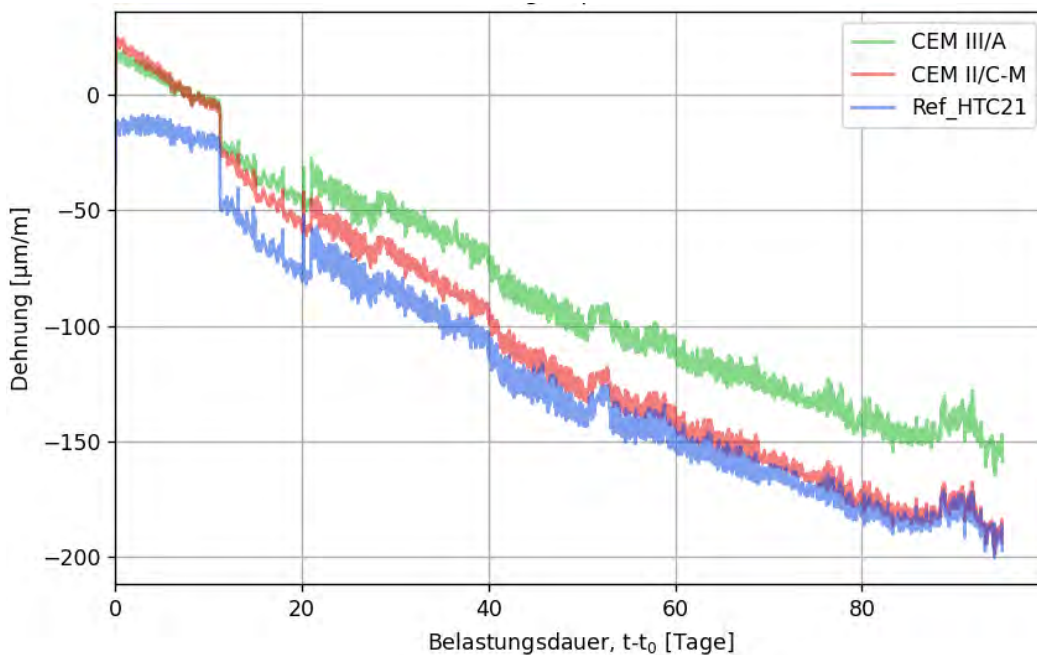


Abbildung 41: Dehnungen der unbelasteten Probekörper (Serie 2)

Nach der Entlastung wurden die Proben auf ihre Restfestigkeit geprüft (Tabelle 29).

Tabelle 29: Druckfestigkeit nach 28 Tagen und Restdruckfestigkeit nach Entlastung

Rezeptur	CEM III/A		CEM II/C-M		CEM III/B	Referenz-rezeptur
Serie	Serie 1	Serie 2	Serie 1	Serie 2	Serie 1	Serie 2
$f_{cm,28d}$ in N/mm ²	67,2	68,2	54,7	57,1	63,7	61,1
$f_{cm,Rest}$ in N/mm ²	Nicht best.	73,7	63,2	62,7	70,7	65,3

Versuchsergebnisse

Die Kriechdehnungen der beiden Versuchsserien sind in Abbildung 42 und Abbildung 43 dargestellt. Die Prüfergebnisse von CEM III/A und CEM II/C-M der Serie 1 sind aufgrund der ungleichmäßigen Lasteinleitung ungültig und werden nur zu Vergleichszwecken dargestellt.

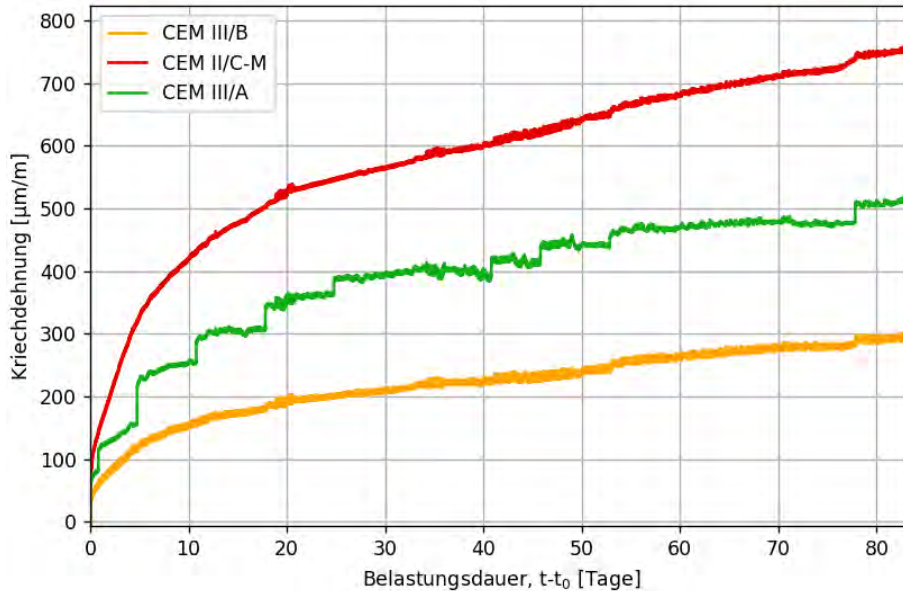


Abbildung 42: Kriechdehnungen (Serie 1)

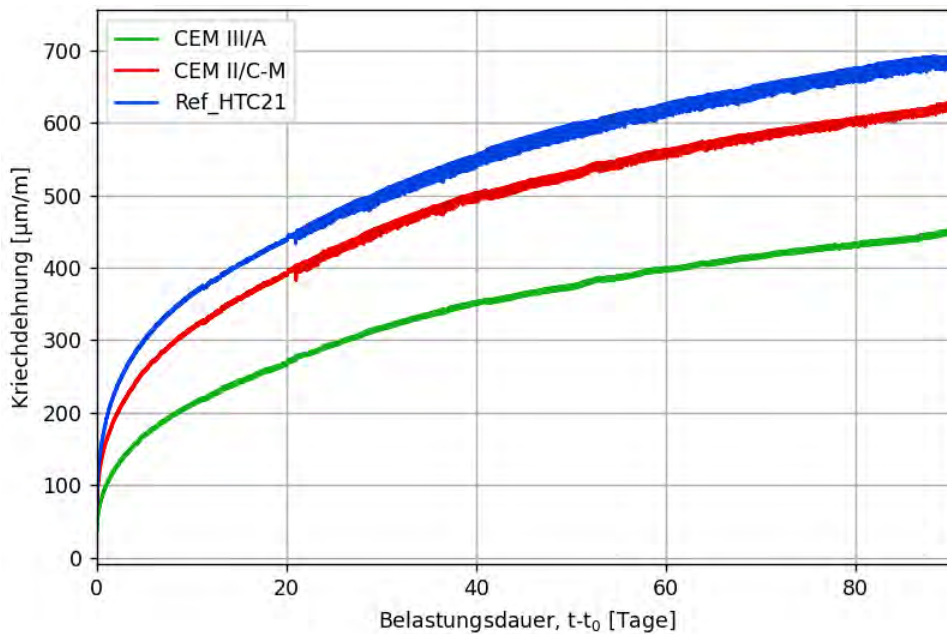


Abbildung 43: Kriechdehnungen (Serie 2)

Auswertung

Für die Kriechkurven wurden Vergleichsrechnungen mit dem Modellansatz aus dem Model Code 2010 zur Prognose der Kriechverformungen [33] hinzugezogen. Aufgrund ähnlicher Druckfestigkeiten und der fehlenden Möglichkeit im Kriechmodell zwischen unterschiedlichen Zementarten zu unterscheiden, dient die

Prognose für alle Rezepturen. In Tabelle 30 sind die für die Berechnungen gewählten Material- und Umweltparameter angegeben.

Tabelle 30: Gewählte Parameter für Kriechmodell nach Model Code 2010

Rezeptur	Parameter für Model Code 2010
f_{cm} in N/mm ²	58
E_c in N/mm ²	45.360
σ in N/mm ²	19
RH in %	65
Zementklasse	42,5 N
T in °C	18,5

In Abbildung 44 und Tabelle 31 sind die Ergebnisse der (gültigen) Kriechversuche dargestellt, zusammengefasst und den prognostizierten Werten nach dem Kriechmodell des Model Codes 2010 gegenübergestellt.

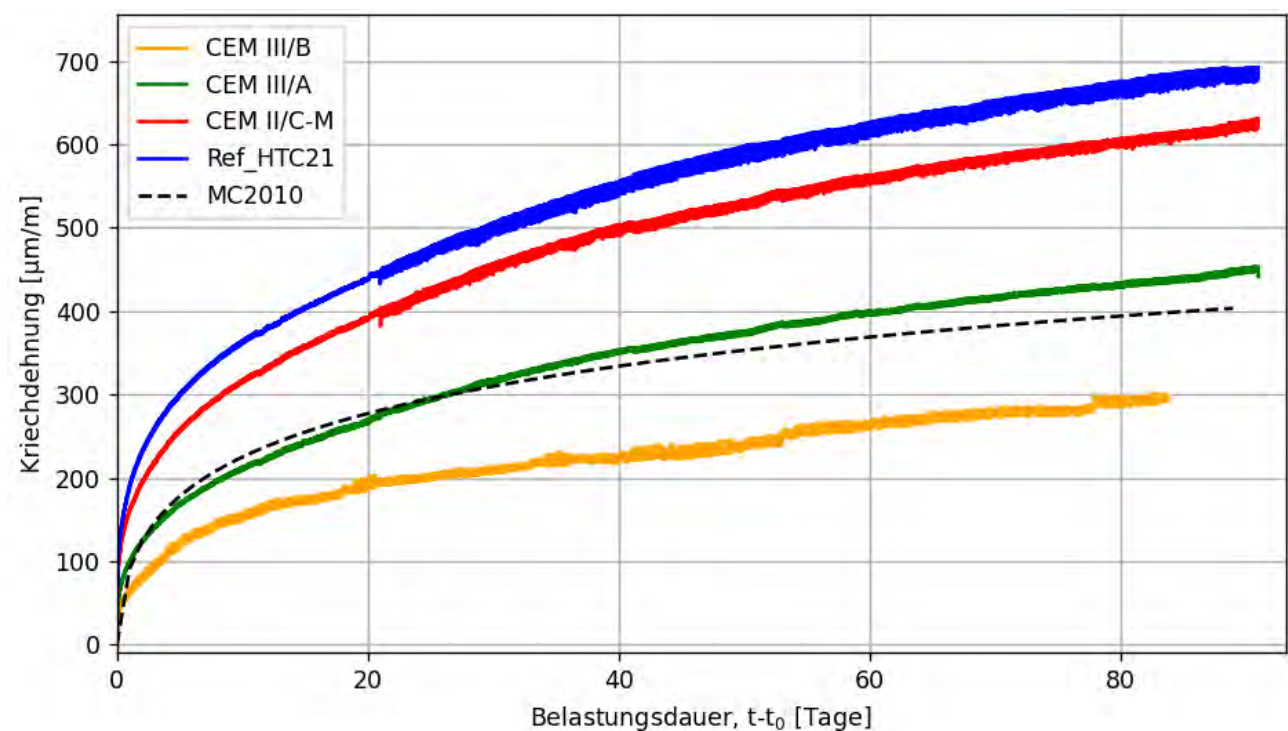


Abbildung 44: Kriechverformungen der Rezepturen im Vergleich mit Model Code 2010

Tabelle 31: Kriechverformungen

Rezeptur	Kriechverformung in $\mu\text{m}/\text{m}$ nach X Tagen Belastungsdauer				
	1	7	28	56	84
CEM III/A	101	186	308	389	439
CEM II/C-M	161	283	444	550	605
CEM III/B	69	134	204	254	293
Ref_HTC21	187	327	495	611	670
MC 2010	91	200	304	363	398
C3-B2-NF-1 ¹⁾	60	310	403	501	530
C3-B2-NF-3 ²⁾	100	190	290	360	460

¹⁾ $f_{cm} = 70,9 \text{ N/mm}^2$; ²⁾ $f_{cm} = 46,9 \text{ N/mm}^2$

Von den drei entwickelten Rezepturen kriecht die Rezeptur CEM III/B am wenigsten, wohingegen die Rezeptur CEM II/C-M am stärksten kriecht. Das Kriechmodell des Model Code 2010 bildet das Kriechverhalten der Rezeptur CEM III/A für den untersuchten Zeitraum am besten ab. Verglichen mit der Referenzrezeptur von Ref_HTC21 ist das Kriechverhalten aller drei Rezepturen geringer ausgeprägt. Die Rezepturen des C³-Forschungsvorhabens wurden mit dem Ziel entwickelt, dass diese eine möglichst geringe Kriechneigung haben. Das Kriechverhalten dieser Rezepturen ist von der Höhe vergleichbar dem Kriechverhalten der entwickelten Rezepturen.

Aufgrund der vergleichbaren Mischungszusammensetzungen sind die Unterschiede zwischen den drei entwickelten Rezepturen auf die unterschiedlichen Zementarten zurückzuführen. Eine mögliche Ursache für die höhere Kriechneigung des CEM II/C-M könnte in einer langsameren Festigkeitsentwicklung des Betons liegen.

3.2 Arbeitspaket 2: Eignungsnachweis für die Umsetzung im Transportbetonwerk

3.2.1 Herstellung Transportbeton, Bestimmung Frischbetoneigenschaften

Im Rahmen des Projektes waren mehrere Praxisversuche in Transportbetonwerken vorgesehen, wobei die Versuche in verschiedenen Werken unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen durchgeführt werden sollten.

Um die Auswirkungen von Unterschieden zwischen der Frischbetonherstellung im Labor und im Transportbetonwerk bzw. die Auswirkung von verschiedenen Verarbeitungszeiten auf die Verbundeigenschaften zu untersuchen, wurden im Transportbetonwerk Probekörper mit einlagigem Übergreifungsstoß hergestellt. Die Probekörpergeometrien und der Versuchsaufbau sind dabei identisch zu den Übergreifungsversuchen im Labor. Folgende Verbundprobekörper wurden hergestellt:

Tabelle 32: Übersicht über im Werk hergestellte Verbundprobekörper

	Textil 1 (HTC21)	Textil 2 (solidian Q95)
Herstellung direkt nach dem Mischvorgang (t_0)	6 Probekörper Übergreifungslänge 150 mm	6 Probekörper Übergreifungslänge 250 mm
Herstellung nach ca. 90 min im Betonmischer (t_1)	6 Probekörper Übergreifungslänge 150 mm	6 Probekörper Übergreifungslänge 250 mm

Werkversuche bei sommerlichen Bedingungen

Am 13.08.2024 erfolgte ein erster Praxisversuch unter sommerlichen Bedingungen im Werk Dresden Hafen der SCHWENK Beton Dresden GmbH & Co. KG.

Für die Untersuchungen wurde die Betonrezeptur CEM III/B verwendet, welche angepasst wurde, um die lokal im Werk verfügbaren Gesteinskörnungen zu berücksichtigen. Tabelle 33 zeigt die geplante Rezeptur für den Praxisversuch. Nach der ersten Probemischung wurde der Wassergehalt um 7 kg/m^3 erhöht. Die Betonherstellung erfolgte in Chargen von 1 m^3 .

Tabelle 33: Betonrezeptur – Praxisversuch – Werk Hafen

Bestandteil	Zugabe in kg/m^3	Anmerkungen
CEM III/B 42,5 N-LH/SR (na)	430	
Kalksteinmehl	35	
Wassergehalt	180	Nachträglich um 7 kg/m^3 erhöht.
Feine Gesteinskörnung 0/2	815	Lokale Gesteinskörnung
Grobe Gesteinskörnung 2/8	896	Lokale Gesteinskörnung
MasterCo ₂ re 3240*	4,8	
Wasserzementwert [-]	0,42	
Zielluftgehalt [Vol.-%]	1,5	

*Wassergehalt der Fließmittel wurde grundsätzlich von der Wasserzugabe abgezogen

Wie die folgenden Abbildungen vermitteln, herrschten die für den Praxisversuch angestrebten sommerlichen Witterungsbedingungen vor, bei Lufttemperaturen von über 30°C .



Abbildung 45: Praxisversuch – Werk Hafen

Es wurden Frischbetonprüfungen analog zu den Laboruntersuchungen durchgeführt und Probekörper für Festbetonprüfungen sowie Verbundprobekörper mit Carbongittern hergestellt. Dabei erfolgten alle Untersuchungen 5 min sowie 90 min nach Mischende.



Abbildung 46: Praxisversuch – Werk Hafen; Betonprüfungen

Bei den Betonprüfungen 5 min nach Mischende erfüllte der Beton alle angestrebten Zielgrößen in den Frischbeton- und Festbetoneigenschaften.

Tabelle 34: Betoneigenschaften; Praxisversuch – Werk Hafen

Betoneigenschaften Praxisversuch – Werk Hafen		Rezeptur CEM III/B	
		5 min nach Mischende	90 min nach Mischende
Lufttemperatur	[°C]	32,8	33,1
Betontemperatur	[°C]	28,1	31,7
Ausbreitmaß	[mm]	690	550
Trichterauslaufzeit	[s]	6,0	7,0
Luftgehalt	[Vol.-%]	1,8	5,0
Frischbetonrohddichte	[kg/m³]	2340	2260
2d Druckfestigkeit $f_{c,cube}$	[MPa]	20,8	17,8
7d Druckfestigkeit $f_{c,cube}$	[MPa]	51,6	43,3
28d Druckfestigkeit $f_{c,cube}$	[MPa]	69,1	59,2
56d Druckfestigkeit $f_{c,cube}$	[MPa]	72,0	57,6
91d Druckfestigkeit $f_{c,cube}$	[MPa]	73,8	64,9
Dynamischer E-Modul	[N/mm²]	40700	38200

Für die Prüfungen 90 min nach Mischende wurde der restliche Beton der Charge im Fahrmischer belassen. Bis zur Entnahme nach 90 min wurde der Fahrmischer bei langsam drehender Trommel im Schatten platziert. Unmittelbar vor der Prüfung wurde der Beton kurz intensiv aufgemischt.

Im Zeitraum bis 90 min zeigte der Beton ein deutliches Ansteifen. Das Ausbreitmaß ging von 690 auf 550 mm zurück und der Luftgehalt stieg von 1,8 auf 5,0 Vol.% an. Weiterhin überschritt die Frischbetontemperatur die Grenze von +30 °C, so dass ein Betoneinbau im Sinne der DIN 1045-3 nur zulässig wäre, wenn durch geeignete Maßnahmen sichergestellt wäre, dass keine nachteiligen Folgen zu erwarten sind.

Zusätzlich zu den in Tabelle 34 aufgeführten Untersuchungen wurde auch der Frostwiderstand des Betons im CIF-Test bestimmt. Die Probekörperherstellung erfolgte zum Entnahmezeitpunkt nach 90 min. Mit einem dynamischen Rest-E-Modul von 99 % und einer Abwitterungssumme von 0,144 kg/m² weist der Beton einen hohen Frostwiderstand auf. Im Vergleich zur Laborprüfung bei 20 °C wurde eine bessere Leistungsfähigkeit erreicht, welche mutmaßlich auf den (ungewollt) erhöhten Frischbetonluftgehalt zurückzuführen ist.

Die nicht-optimalen Frischbetoneigenschaften nach 90 min spiegeln sich auch in den Festbetoneigenschaften wider. Das Druckfestigkeitsniveau liegt etwa 15% unterhalb der Druckfestigkeiten bei Herstellung nach 5 min. Überwiegend verantwortlich dafür ist der stark erhöhte Frischluftgehalt. Die Zieldruckfestigkeitsklasse C50/60 bei einem Prüfalter von 91 Tagen wird knapp eingehalten. Sedimentationserscheinungen (Prüfung am Festbeton) wurden an den Betonen zu keinem Herstellzeitpunkt festgestellt.

Abschließend wurde im Rahmen des Praxisversuches auch ein Pumpversuch durchgeführt, um die Pumpfähigkeit als ein maßgebliches Kriterium für die Praxistauglichkeit unter Beweis zu stellen. Der Versuch erfolgte an einer frisch hergestellten Betoncharge. Der Beton wies eine problemlose Pumpfähigkeit auf.



Abbildung 47: Pumpversuch beim Praxisversuch – Werk Hafen (Quelle: Schwenk / Sven Mellwitz)

Die Herstellung der Verbundprobekörper war 5 min nach Mischende (t_0) problemlos möglich. Der Beton durchdrang die Textile selbstständig und ließ sich leicht manuell verdichten. Wie zuvor im Labor mit steiferen Mischungen beobachtet, durchdrang der deutlich angesteifte Frischbeton zum späteren Prüfzeitpunkt t_1 das feinmaschige Textil 1 kaum noch selbstständig. Die Probekörperherstellung mit dem grobmaschigen Textil 2 hingegen ergab keine Probleme.



Abbildung 48: Herstellung der Probekörper im Transportwerk Schwenk - Dresden Hafen mit CEM III/B

Nach dem Einbringen des Betons verblieben die Probekörper mit Folie abgedeckt ca. 24 h in einem abgeschlossenen Container im Transportbetonwerk. Im Anschluss an den Transport nach Dresden wurden die Platten ausgeschalt, lagerten 7 Tage im Wasserbad und bis zur Prüfung in der Klimakammer bei 65 % RH und 20 °C.

Fazit zum Praxisversuch unter sommerlichen Bedingungen

Der Praxisversuch hat unter Beweis gestellt, dass die Carbonbetonrezeptur mit CEM III/B sich robust gegenüber extremen, heißen Witterungsbedingungen verhält. Die Herstellung des Betons im Transportbetonwerk

und das Erreichen der angestrebten Frisch- und Festbetoneigenschaften war problemlos möglich. Für den hier ebenfalls geprüften Extremfall einer Verarbeitung erst 90 min nach Mischende in Verbindung mit einer Frischbetontemperatur von über 30 °C sind jedoch weiterführende Maßnahmen erforderlich, um die notwendige Betonqualität zu gewährleisten.

Werkversuche bei kühler Witterung

Am 04.03.2025 erfolgte ein Praxisversuch unter kühlen Witterungsbedingungen im Werk Sprockhövel der Holcim Deutschland GmbH.

Für die Untersuchungen wurde die Betonrezeptur CEM III/A verwendet. Diese wurde angepasst, um die lokal im Werk verfügbaren Gesteinskörnungen zu berücksichtigen. Durch eine Umstellung im Herstellungsprozess des Zementes traten auch Änderungen in den Zementeigenschaften auf, die sich auf die Vergleichbarkeit mit den Laborversuchen auswirken. In diesem Zusammenhang musste auch das Fließmittel in der Betonrezeptur ausgetauscht werden. Zudem erfolgte auch eine Anpassung des Wassergehaltes zur Aussteuerung der Konsisteneigenschaften im Zusammenspiel mit dem neuen Fließmittel. Tabelle 35 zeigt die Rezeptur für den Praxisversuch.

Tabelle 35: Betonrezeptur – Praxisversuch – Werk Sprockhövel

Bestandteil	Zugabe in kg/m ³	Anmerkungen
CEM III/A 42,5 N	430	
Kalksteinmehl	35	
Wassergehalt	168	
Feine Gesteinskörnung 0/2	837	Lokale Gesteinskörnung
Grobe Gesteinskörnung 2/8	820	Lokale Gesteinskörnung
MasterGleniumSky 697	4,0	
Wasserzementwert [-]	0,40	
Zielluftgehalt [Vol.-%]	1,5	

Es wurden Frischbetonprüfungen analog zu den Laboruntersuchungen durchgeführt und Probekörper für Festbetonprüfungen sowie Verbundprobekörper mit Carbongittern hergestellt. Dabei erfolgten alle Untersuchungen 5 min sowie 90 min nach Mischende.



Abbildung 49: Praxisversuch – Werk Sprockhövel; Betonprüfungen



Abbildung 50: Praxisversuch – Werk Sprockhövel; Betonprüfungen

Die folgenden Abbildungen geben weitere Impressionen zum Praxisversuch.



Abbildung 51: Praxisversuch – Werk Sprockhövel

Bei den Betonprüfungen 5 min nach Mischende (vgl. Tabelle 36) erfüllte der Beton die angestrebten Zielgrößen in den Frischbetoneigenschaften mit Ausnahme der Trichterauslaufzeit, da die Umstellung auf ein alternatives Fließmittel zu einer Erhöhung der Viskosität führte. Dennoch war der Beton für die Probekörperherstellung problemlos verarbeitbar. Für die Prüfung 90 min nach Mischende wurde der restliche Beton der Charge im Fahrmischer bei langsam drehender Trommel belassen. Unmittelbar vor der Prüfung wurde der Beton kurz intensiv aufgemischt.

Bei den Frischbetoneigenschaften war bis 90 min ein Anstieg des Ausbreitmaßes – also eine Nachverflüssigung – festzustellen, so dass die Zielausbreitmaßklasse F6 geringfügig überschritten wurde. Trotz alledem trat auch ein Anstieg der Trichterauslaufzeit auf. Auch nach 90 min war die Herstellung der Probekörper

problemlos möglich, ohne dass Sedimentationserscheinungen (Prüfung am Festbeton) festzustellen waren. Bei den Festbetoneigenschaften war auffällig, dass das Festigkeitsniveau ab dem Alter von 7 Tagen gegenüber den Laborversuchen deutlich (+10 bis 18 MPa) erhöht war. Dies ist mutmaßlich auf den abgesenkten Wassergehalt sowie ggf. auf die veränderten Zementeigenschaften zurückzuführen.

Tabelle 36: Betoneigenschaften; Praxisversuch – Werk Sprockhövel

Betoneigenschaften Praxisversuch – Werk Sprockhövel		Rezeptur CEM III/A	
		5 min nach Mischende	90 min nach Mischende
Lufttemperatur	[°C]	10,4	11,4
Betontemperatur	[°C]	12,0	14,0
Ausbreitmaß	[mm]	660	710
Trichterauslaufzeit	[s]	43	69
Luftgehalt	[Vol.-%]	1,8	1,8
Frischbetonrohddichte	[kg/m³]	2360	2330
2d Druckfestigkeit $f_{c,cube}$	[MPa]	21,2	26,2
7d Druckfestigkeit $f_{c,cube}$	[MPa]	62,0	62,3
28d Druckfestigkeit $f_{c,cube}$	[MPa]	86,0	84,3
56d Druckfestigkeit $f_{c,cube}$	[MPa]	89,6	89,6
91d Druckfestigkeit $f_{c,cube}$	[MPa]	90,6	88,5
Dynamischer E-Modul	[N/mm²]	43600	43200

Zusätzlich zu den in Tabelle 36 aufgeführten Untersuchungen wurde auch der Frostwiderstand des Betons im CIF-Test bestimmt. Die Probekörperherstellung erfolgte zum Entnahmezeitpunkt nach 90 min. Mit einem dynamischen Rest-E-Modul von 96 % und einer Abwitterungssumme von 0,087 kg/m² weist der Beton einen hohen Frostwiderstand auf.

Die Herstellung der Verbundprobekörper war unabhängig vom Herstellzeitpunkt problemlos möglich. Der Beton durchdrang die Textile selbstständig und ließ sich leicht auf dem Rütteltisch verdichten.



Abbildung 52: Befüllung und Verdichten auf dem Rütteltisch

Nach dem Einbringen des Betons verblieben die Probekörper mit Folie abgedeckt ca. 24 h im Außenbereich des Transportbetonwerks (Nachts $T_{\min} = 1\text{ °C}$). Im Anschluss an den Transport nach Dresden wurden die Platten ausgeschalt, lagerten 7 Tage im Wasserbad und bis zur Prüfung in der Klimakammer bei 65 % RH und 20 °C.



Abbildung 53: Lagerung nach der Betonage

Fazit zum Praxisversuch bei kühler Witterung

Bei kühlen Witterungsbedingungen zeigte sich ein stabiles Materialverhalten - sogar bei kurzfristigen Rezepturumstellungen (Zementeigenschaften, Fließmittel). Die Herstellung von Verbundprobekörpern war problemlos möglich.

3.2.2 Bestimmung der carbonbetonspezifischen Verbundkennwerte

Die Ergebnisse werden wieder in Form von Faserstrangspannungs-Übergreifungslängen-Diagrammen und Tabellen dargestellt, um die maximal erreichbaren Versagensspannungen der mit den Übergreifungslängen $l_{ÜG} = 150$ mm (Textil 1) und $l_{ÜG} = 250$ mm (Textil 2) und unter den verschiedenen Verarbeitungsbedingungen (Laborherstellung, Werksherstellung t_0 und Werksherstellung t_1) hergestellten Probekörpern zu vergleichen. Um festzustellen, ob es signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Versagensspannungen der drei Verarbeitungsgruppen gibt, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ durchgeführt. Eine Voraussetzung für die ANOVA-Berechnung, die Varianzhomogenität, wurde vorher mit dem Levene-Test ($\alpha = 0,05$) geprüft. Falls diese Voraussetzung nicht erfüllt war, wurde stattdessen die Welch ANOVA berechnet.

Werkversuche mit CEM III/B bei sommerlichen Bedingungen

Versuchsergebnisse für Textil 1

Die Ergebnisse der Probekörper, die direkt nach dem Mischvorgang (Zeitpunkt t_0) hergestellt wurden, sind im Vergleich mit den Laborergebnissen in Abbildung 54 dargestellt. Abbildung 55 zeigt zusätzlich die Ergebnisse der Werksherstellung zum Zeitpunkt t_1 (nach 90 min).

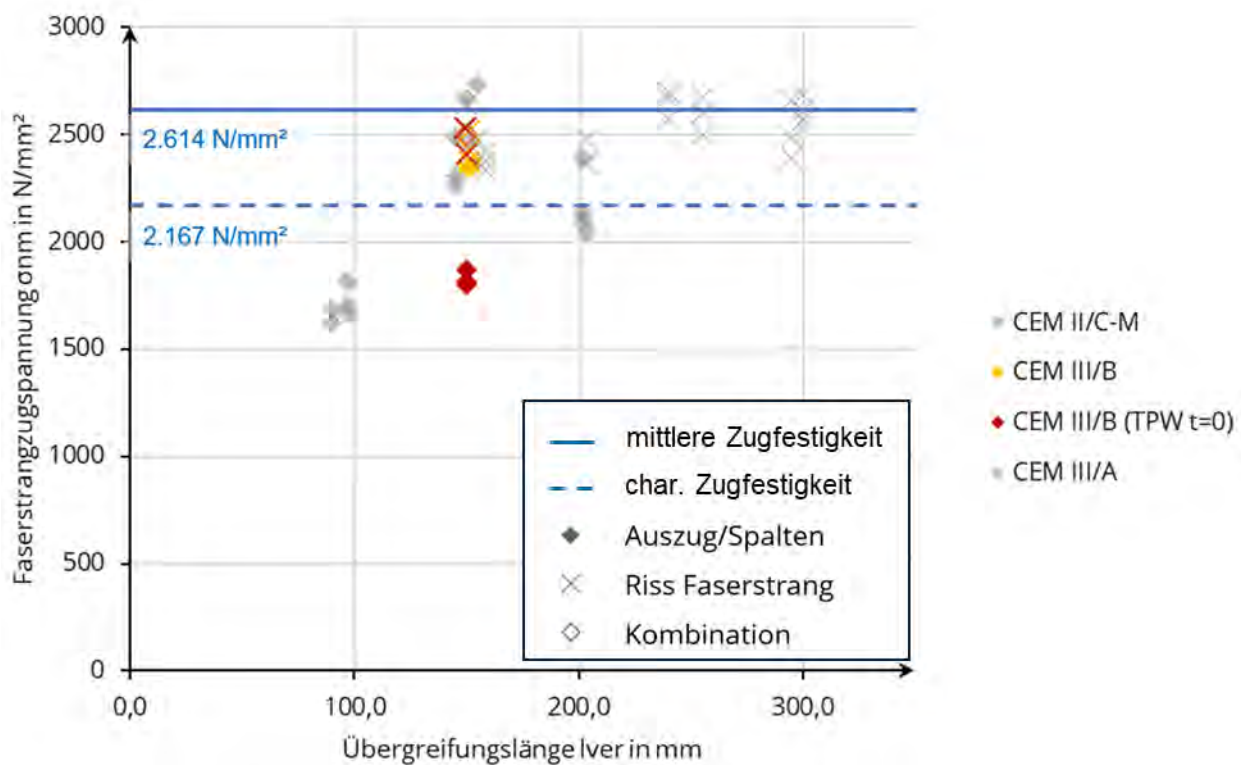


Abbildung 54: Ergebnisse ÜG-Versuche CEM III/B mit Textil 1, Vergleich Herstellung im Labor und im Transportbetonwerk zum Zeitpunkt t_0

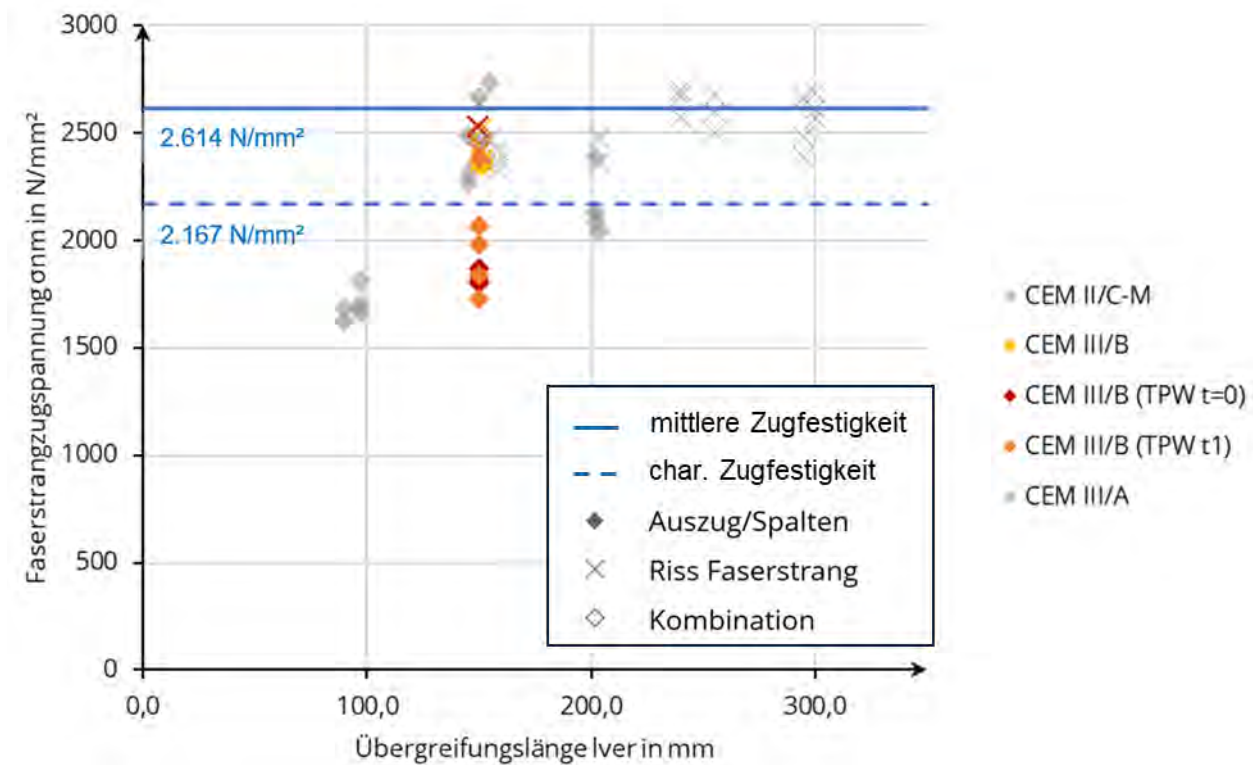


Abbildung 55: Ergebnisse ÜG-Versuche CEM III/B mit Textil 1, Vergleich Herstellung im Labor und im Transportbetonwerk zum Zeitpunkt t0 und t1

Tabelle 37: Versagensspannungen in Kettrichtung bei Übergreifungslänge 150 mm für Textil 1 und Werksversuche mit CEM III/B

PK	CEM III/B (Labor)		CEM III/B (Werk t ₀)		CEM III/B (Werk t ₁)	
	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung
	mm	N/mm²	mm	N/mm²	mm	N/mm²
ÜV-1	151	2542,25	150	2405,84	150	1730,01
ÜV-2	151	2521,04	150	2528,67	150	1836,86
ÜV-3	151	2346,13	150	2500,93	150	2384,47
ÜV-4	151	2379,27	150	1872,02	150	2069,49
ÜV-5	151	2370,05	150	1812,37	150	1979,59
ÜV-6	151	2428,46	150	1798,86	150	2405,08
MW		2431,20		2153,11		2067,58
char. Wert		1993,58		1516,65		1573,72

Im Vergleich zu den im Labor hergestellten Probekörpern zeigen die Versuchsergebnisse der im Werk hergestellten Probekörper stark streuende Verbundeigenschaften. Während ein Teil der Probekörper ein Textilrissversagen bzw. ein mit Auszug kombiniertes Textilrissversagen mit maximalen Spannungen im Bereich der Versuchsergebnisse der Laborversuche aufwies, versagten die restlichen Probekörper mit einem Aufspalten des Übergreifungsbereichs mit Spannungen weit unterhalb der Laborergebnisse. Während bei den Probekörpern die zum Zeitpunkt t₀ hergestellt wurden, eine Korrelation zwischen Höhe der Versagensspannung bzw. Versagensmodi sowie der ursprünglich betonierten Platte (Platte 1: ÜV-1, ÜV-2, ÜV-3; Platte 2: ÜV-4, ÜV-5, ÜV-6) bestehen könnte, ist eine solche Korrelation bei den zum Zeitpunkt t₁ nicht ersichtlich. Der Einfluss der etwas geringeren Probenkörperdicken wurde durch eine Gegenüberstellung der anderen

Probekörper untersucht, ein direkter Zusammenhang konnte jedoch nicht festgestellt werden. Eine detaillierte Auswertung der messbaren Einflussgrößen ist dem Abschnitt „Einflussparameter“ zu entnehmen. Eine mögliche Ursache, die jedoch im Nachhinein nicht qualitativ nachvollzogen werden kann, sind lokale Verbundstörungen im Übergreifungsbereich, hervorgerufen durch eine ungenügende Durchdringung der Betonmatrix in die Gitterbewehrung durch die geringe Maschenweite des Textil 1.

Wie bereits im Diagramm ersichtlich und durch den Levene-Test bewiesen ($p\text{-Wert: } 0,0006 < 0,05$), kann zwischen den Gruppen „Herstellung Labor“, „Herstellung Werk t_0 “ und „Herstellung Werk t_1 “ keine homogene Varianz angenommen werden. Die Welch ANOVA bestätigt mit $p\text{-Wert} = 0,04 < 0,05$, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen gibt.

Versuchsergebnisse für Textil 2

Die Ergebnisse der Probekörper, die direkt nach dem Mischvorgang (Zeitpunkt t_0) hergestellt wurden, sind im Vergleich mit den Laborergebnissen in Abbildung 56 dargestellt. Abbildung 57 zeigt zusätzlich die Ergebnisse der Werksherstellung zum Zeitpunkt t_1 (nach 90 min).

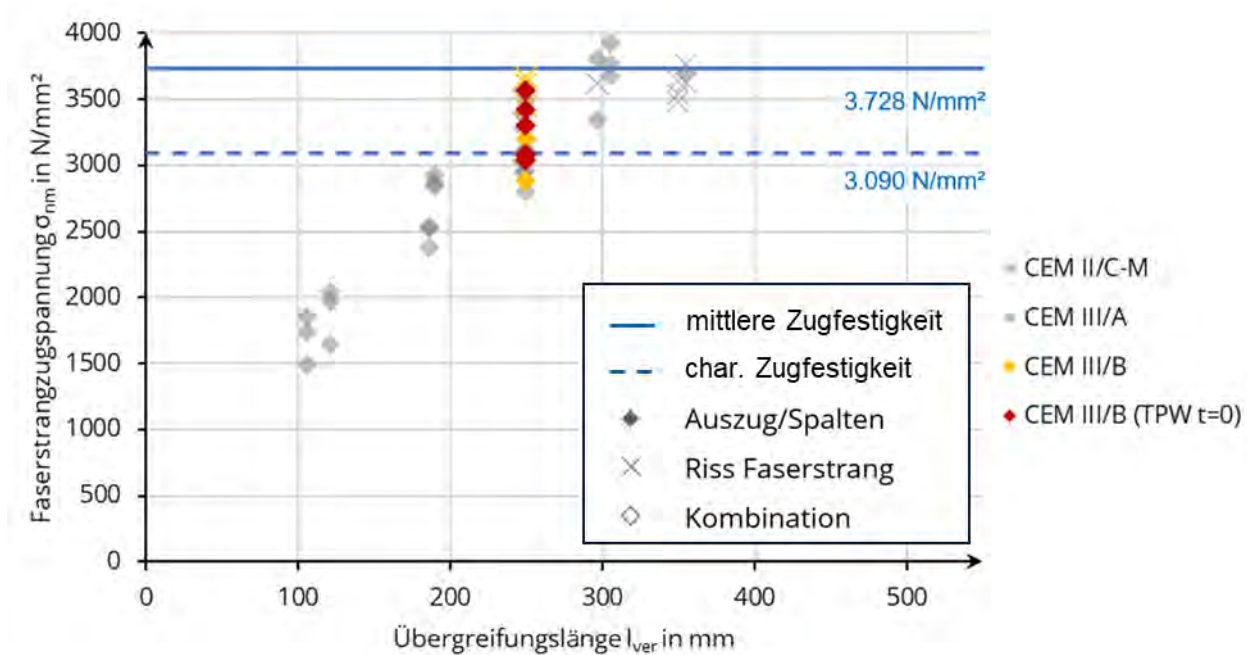


Abbildung 56: Ergebnisse ÜG-Versuche CEM III/B mit Textil 2, Vergleich Herstellung im Labor und im Transportbetonwerk zum Zeitpunkt t_0

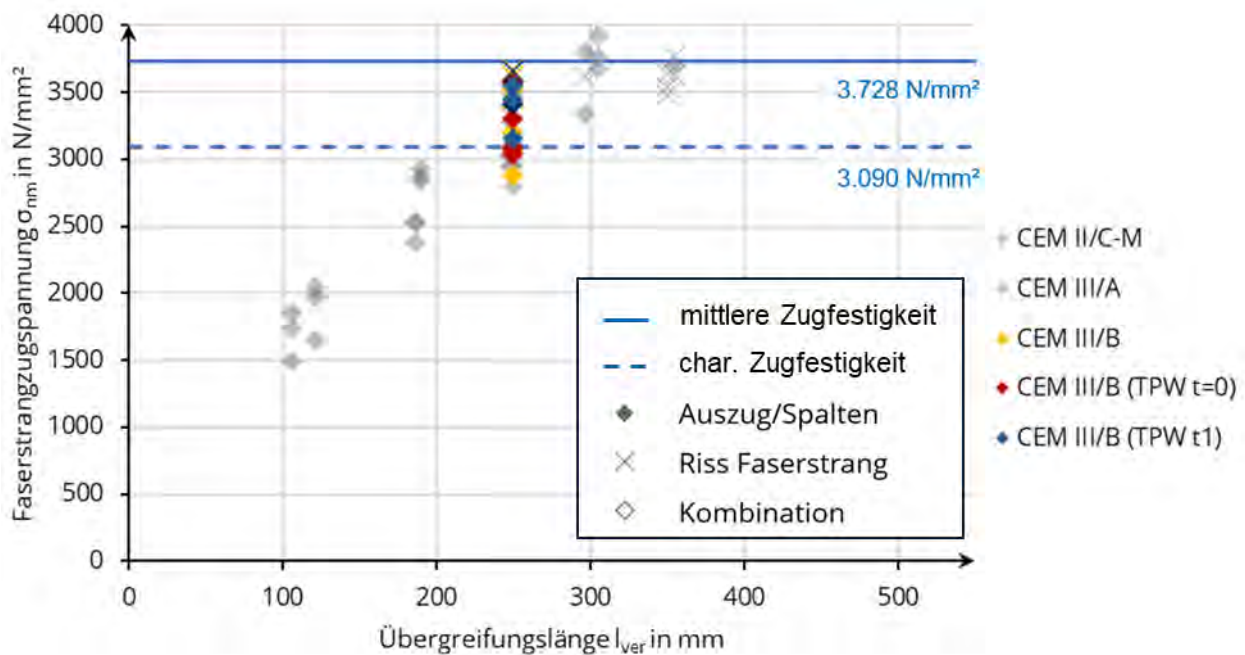


Abbildung 57: Ergebnisse ÜG-Versuche CEM III/B mit Textil 2, Vergleich Herstellung im Labor und im Transportbetonwerk zum Zeitpunkt t_1

Tabelle 38: Versagensspannungen in Kettrichtung bei Übergreifungslänge 250 mm für Textil 2 und Werksversuche mit CEM III/B

PK	CEM III/B (Labor)		CEM III/B (Werk t_0)		CEM III/B (Werk t_1)	
	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung
	mm	N/mm ²	mm	N/mm ²	mm	N/mm ²
ÜV-1	250	3054,20	250	3037,08	250	3152,81
ÜV-2	250	2884,51	250	3567,19	250	3603,68
ÜV-3	250	3209,66	250	3420,09	250	3406,93
ÜV-4	250	3615,76	250	3302,97	250	3454,11
ÜV-5	250	3670,53	250	3089,34	250	3657,50
ÜV-6	250	3451,48	250	3072,11	250	3549,96
MW		3314,36		3248,13		3470,83
char. Wert		2727,72		2673,21		2856,49

Der Vergleich der Versuchsergebnisse der im Labor und im Werk hergestellten Probekörper lässt annehmen, dass die Herstellung im Werk (unabhängig vom Herstellzeitpunkt) keinen signifikanten Einfluss auf die Verbundeigenschaften hat.

Auf Grundlage des Levene-Tests (p -Wert: $0,13 > 0,05$) kann für die Versagensspannungen der Übergreifungsversuche mit der Probekörperherstellung im Labor sowie im Werk zu unterschiedlichen Verarbeitungszeiten von einer homogenen Varianz ausgegangen werden. Die Ergebnisse der ANOVA-Berechnung können Abbildung 58 entnommen werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
CEM III/B (Labor)	6	19886,14	3314,36	99983,45
CEM III/B (Werk t0)	6	19488,78	3248,13	47023,27
CEM III/B (Werk t1)	6	20824,99	3470,83	32851,17

ANOVA

Streuungsursache	Quadratsummen (SS)	Freiheitsgrade (df)	Mittlere		P-Wert	kritischer F-Wert
			Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)		
zwischen den Gruppen	156932,859	2	78466,429	1,309	0,299	3,682
Innerhalb der	899289,476	15	59952,632			
Gesamt	1056222,335	17				

Abbildung 58: Ergebnisse ANOVA für Vergleich zwischen im Labor und im Werk hergestellten Probekörper (CEM III/B, Textil 2)

Da $F < F_{\text{krit}}$ und $p\text{-Wert} > 0,05$ kann angenommen werden, dass es für die mit Textil 2 untersuchte Übergreifungslänge von 250 mm keine signifikanten Unterschiede zwischen der Herstellung im Labor und im Werk zu unterschiedlichen Verarbeitungszeiten gibt.

Werkversuche mit CEM III/A

Versuchsergebnisse für Textil 1

Die Ergebnisse der Probekörper, die direkt nach dem Mischvorgang (Zeitpunkt t_0) hergestellt wurden, sind im Vergleich mit den Laborergebnissen in Abbildung 59 dargestellt. Abbildung 60 zeigt zusätzlich die Ergebnisse der Werksherstellung zum Zeitpunkt t_1 (nach 90 min).

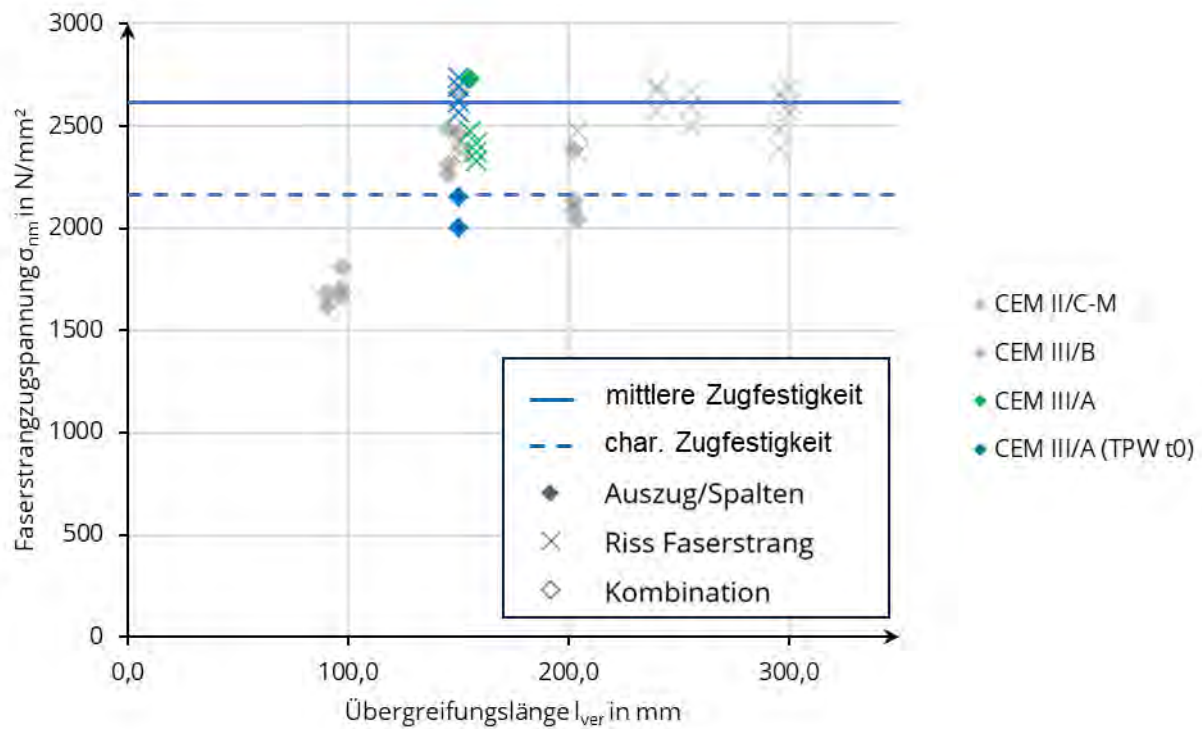


Abbildung 59: Ergebnisse ÜG-Versuche CEM III/A mit Textil 1, Vergleich Herstellung im Labor und im Transportbetonwerk zum Zeitpunkt t0

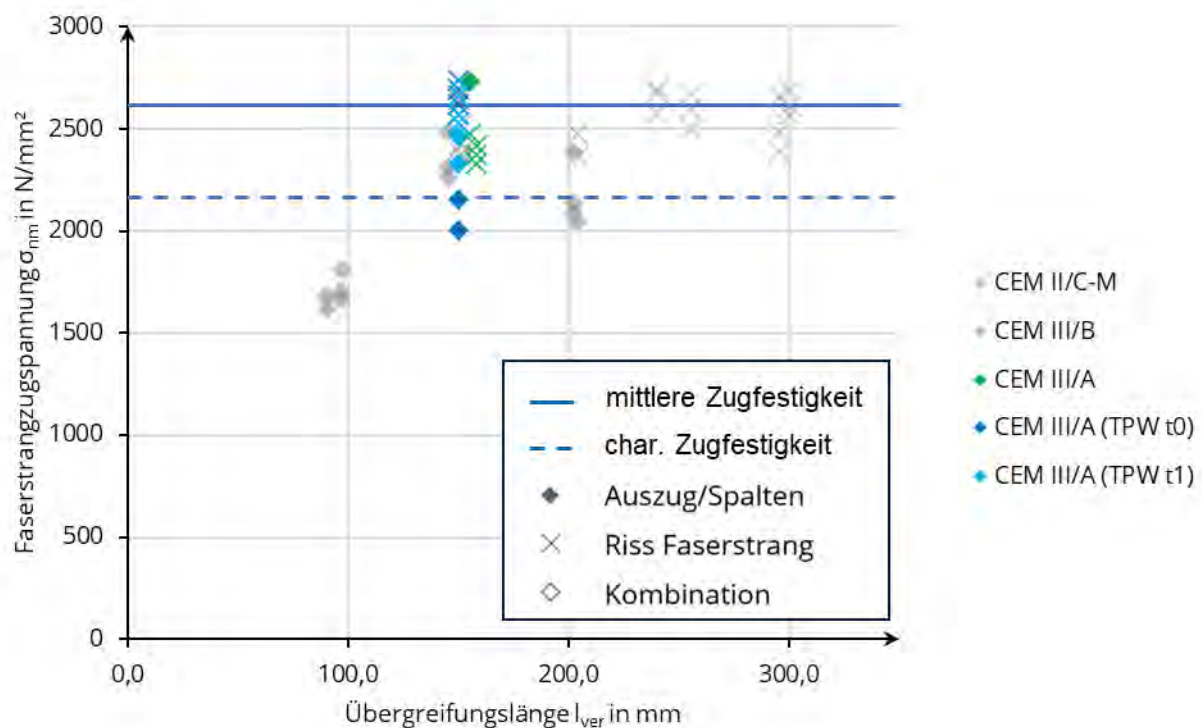


Abbildung 60: Ergebnisse ÜG-Versuche CEM III/A mit Textil 1, Vergleich Herstellung im Labor und im Transportbetonwerk zum Zeitpunkt t1

Tabelle 39: Versagensspannungen in Kettrichtung bei Übergreifungslänge 150 mm für Textil 1 und Werksversuche mit CEM III/A

PK	CEM III/A (Labor)		CEM III/A (Werk t ₀)		CEM III/A (Werk t ₁)	
	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung
	mm	N/mm ²	mm	N/mm ²	mm	N/mm ²
ÜV-1	155	2734,56	150	2003,71	150	2705,19
ÜV-2	155	2501,13	150	2621,76	150	2666,22
ÜV-3	155	2477,46	150	2153,42	150	2575,56
ÜV-4	158	2376,70	150	2692,97	150	2329,34
ÜV-5	158	2333,68	150	2570,32	150	2467,16
ÜV-6	158	2418,51	150	2739,33	150	2534,27
MW		2473,67		2463,58		2546,29
char. Wert		2035,83		1919,33		2095,60

Wie bereits im Diagramm ersichtlich und durch den Levene-Test bewiesen (p-Wert: 0,02 < 0,05), kann zwischen den Gruppen „Herstellung Labor“, „Herstellung Werk t₀“ und „Herstellung Werk t₁“ keine homogene Varianz angenommen werden. Da p-Wert = 0,66 > 0,05, kann angenommen werden, dass es für die mit Textil 1 untersuchte Übergreifungslänge von 150 mm keine signifikanten Unterschiede zwischen der Herstellung im Labor und im Werk zu unterschiedlichen Verarbeitungszeiten gibt.

Versuchsergebnisse für Textil 2

Die Ergebnisse der Probekörper, die direkt nach dem Mischvorgang (Zeitpunkt t₀) hergestellt wurden, sind im Vergleich mit den Laborergebnissen in Abbildung 61 dargestellt. Abbildung 62 zeigt zusätzlich die Ergebnisse der Werksherstellung zum Zeitpunkt t₁ (nach 90 min).

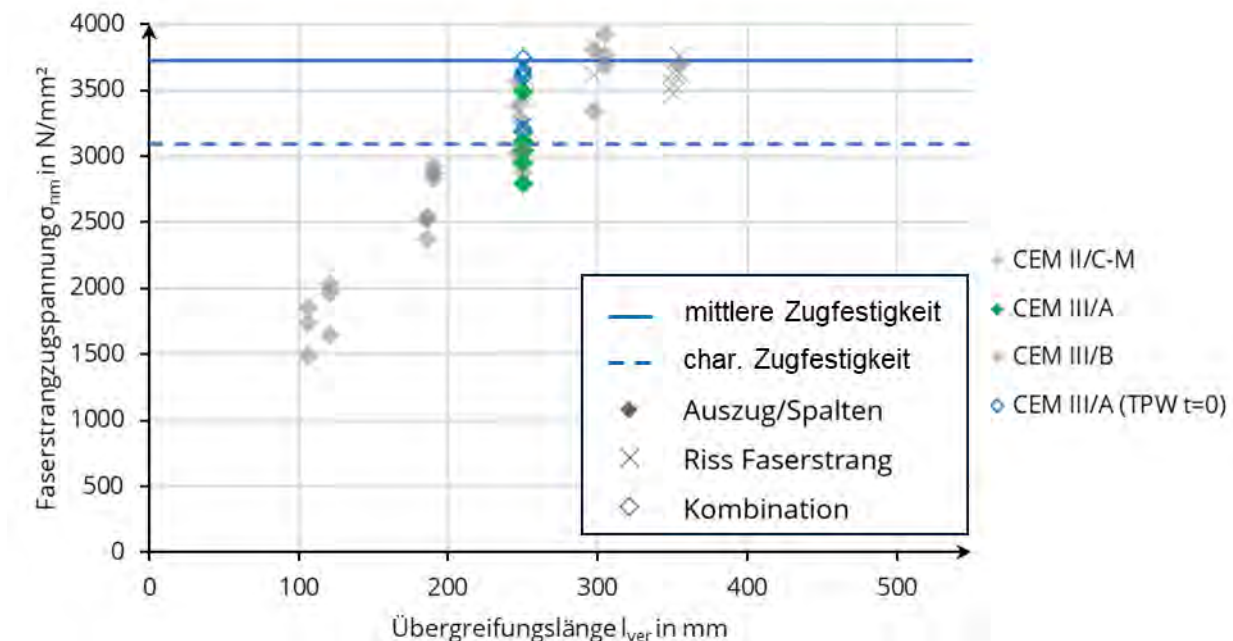


Abbildung 61: Ergebnisse ÜG-Versuche CEM III/A mit Textil 2, Vergleich Herstellung im Labor und im Transportbetonwerk zum Zeitpunkt t₀

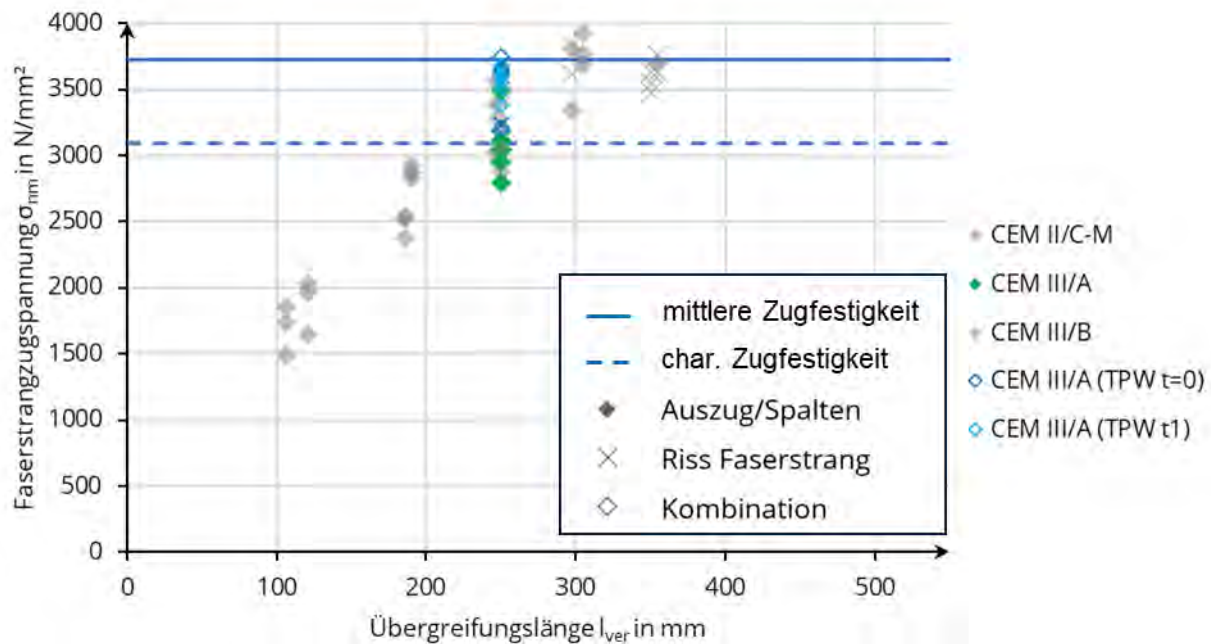


Abbildung 62: Ergebnisse ÜG-Versuche CEM III/A mit Textil 2, Vergleich Herstellung im Labor und im Transportbetonwerk zum Zeitpunkt t1

Tabelle 40: Versagensspannungen in Kettrichtung bei Übergreifungslänge 250 mm für Textil 2 und Werksversuche mit CEM III/A

PK	CEM III/A (Labor)		CEM III/A (Werk t ₀)		CEM III/A (Werk t ₁)	
	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung	ÜG	max. Spannung
	mm	N/mm ²	mm	N/mm ²	mm	N/mm ²
ÜV-1	250	2955,24	250	3237,34	250	3585,54
ÜV-2	250	3119,10	250	3651,99	250	3505,23
ÜV-3	250	2797,10	250	3750,67	250	3678,16
ÜV-4	250	3120,07	250	3209,65	250	3545,84
ÜV-5	250	3486,97	250	3599,56	250	3616,23
ÜV-6	250	3044,01	250	3633,16	250	3381,97
MW		3087,08		3513,73		3552,16
char. Wert		2531,41		2891,80		2923,43

Der Vergleich der Versuchsergebnisse der im Labor und im Werk hergestellten Probekörper lässt annehmen, dass die Herstellung im Werk keinen negativen Einfluss auf die Verbundeigenschaften hat. Die Versuchsergebnisse der Probekörper die im Werk hergestellt wurden liegen sogar über den Laborergebnissen, unabhängig vom Herstellzeitpunkt.

Auf Grundlage des Levene-Tests (p -Wert: $0,19 > 0,05$) kann für die Versagensspannungen der Übergreifungsversuche mit der Probekörperherstellung im Labor sowie im Werk zu unterschiedlichen Verarbeitungszeiten von einer homogenen Varianz ausgegangen werden. Die Ergebnisse der ANOVA-Berechnung können Abbildung 63 entnommen werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
CEM III/A (Labor)	6	18522,49	3087,081667	53070,169
CEM III/A (Werk t0)	6	21082,37	3513,728333	53148,557
CEM III/A (Werk t1)	6	21312,97	3552,161667	10460,439

ANOVA

Streuungsursache	Quadratsumme n (SS)	Freiheitsgrad e (df)	Mittlere		P-Wert	kritischer F-Wert
			Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)		
Unterschiede zwischen den Gruppen	799607,8114	2	399803,906	10,280	0,002	3,682
Innerhalb der Gruppen	583395,8197	15	38893,055			
Gesamt	1383003,631	17				

Abbildung 63: Ergebnisse ANOVA für Vergleich zwischen im Labor und im Werk hergestellten Probekörper (CEM III/A, Textil 2)

Da $F > F_{\text{krit}}$ und $p\text{-Wert} < 0,05$ kann angenommen werden, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen der Herstellung im Labor und im Werk zu unterschiedlichen Verarbeitungszeiten gibt. Dies ist auf die unterschiedlichen Mittelwerte zurückzuführen: die Mittelwerte der Werksversuche sind bei dieser Materialkombination deutlich höher als der Mittelwert der Laborversuche. Folglich ist der Unterschied nicht negativ zu werten.

Einflussparameter auf Verbundverhalten

Aufgrund der teilweise starken Streuungen innerhalb sowie zwischen den Versuchsserien wurden für die kritische Übergreifungslängen nachfolgend verschiedene potentielle und aus der Literatur bekannte Einflussparameter auf das Verbundverhalten von Carbonbeton untersucht. So führen beispielsweise große Betondeckungen zu höheren Verbundwiderständen und hohe Betonzugfestigkeiten zu einer Verminderung der Delaminationsneigung des Textilbetons [27]. Die Variation der Parameter war in diesem Projekt zufälliger Natur und resultierte aus unterschiedlichen Betonagen und leicht variablen Probekörperdicken infolge des Gußverfahrens.

Einfluss der mittleren Probekörperdicke

Die Dicke der Probekörper wurde an beiden Längsseiten an jeweils fünf Punkten gemessen und gemittelt. Nach Abbildung 64 und Abbildung 65 besteht für die Textil 1 und 2 keine sichtbare Korrelation zwischen der mittleren Probekörperdicke und der maximalen Faserstrangzugspannung.

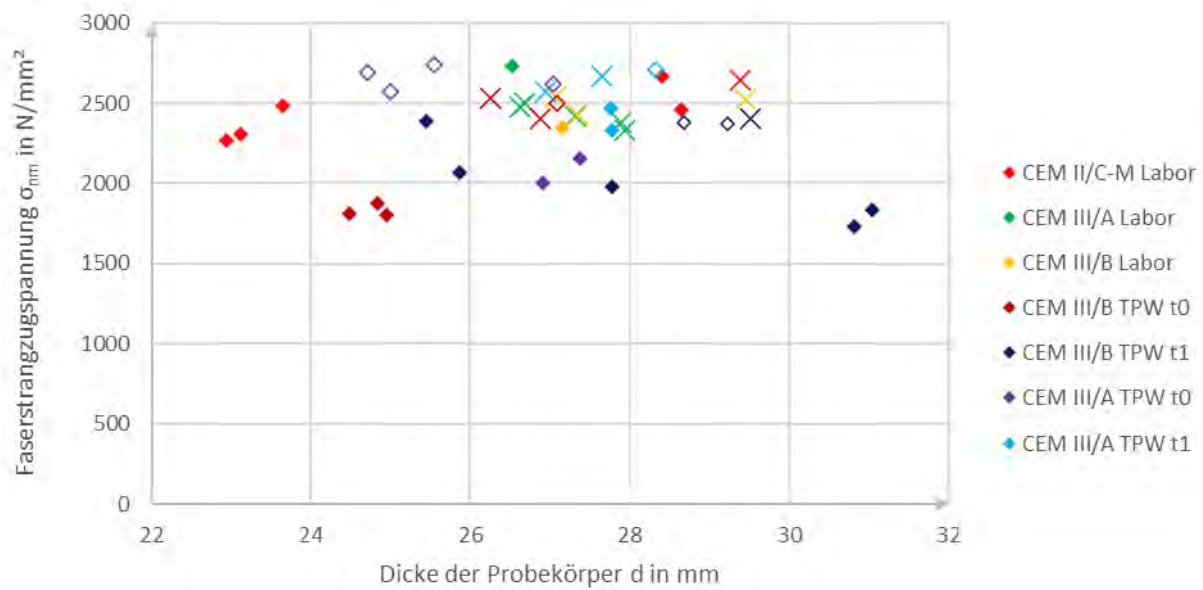


Abbildung 64: Einfluss der Probekörperdicke (Textil 1 – HTC21/21)

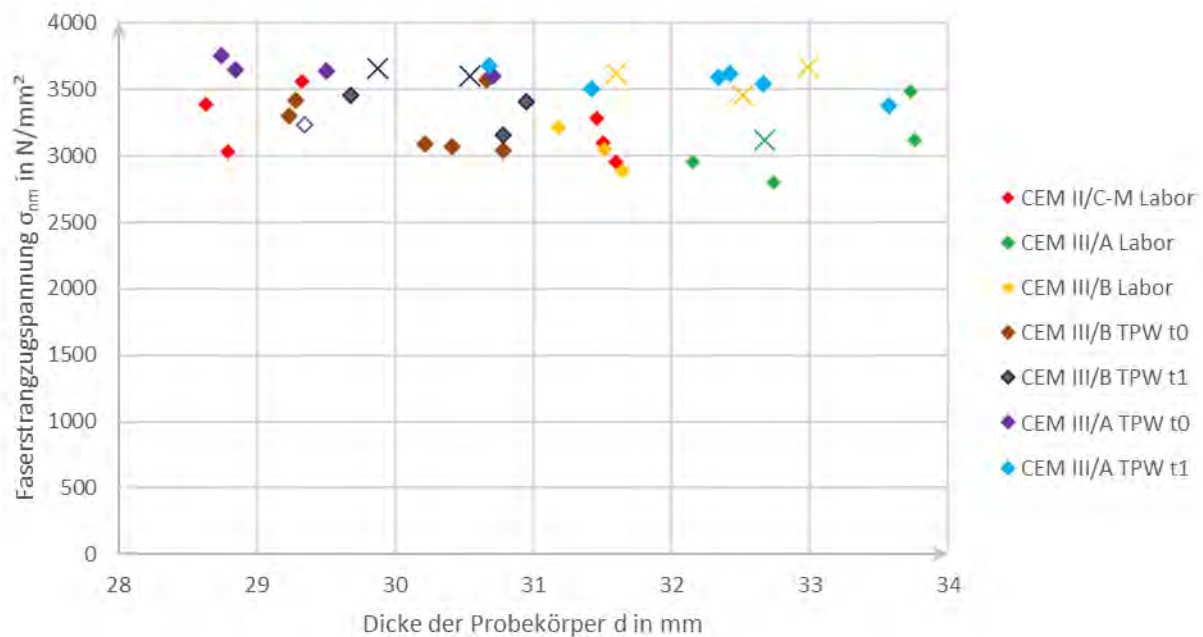


Abbildung 65: Einfluss der Probekörperdicke (Textil 2 – solidian Q95)

Einfluss der Biegezugfestigkeit

Nach Abbildung 66 ist für das Textil 1 eine leichte Korrelation zwischen zunehmender Biegezugfestigkeit und zunehmender Faserstrangzugspannung zu erkennen. Die Bestimmung der Biegezugfestigkeit an Prismen ist

i. d. R. großen Streuungen unterworfen, daher zeigt der hier dargestellte Einfluss maximal eine Tendenz auf. Nach Abbildung 67 ist für das Textil 2 keine solche Korrelation zu erkennen.

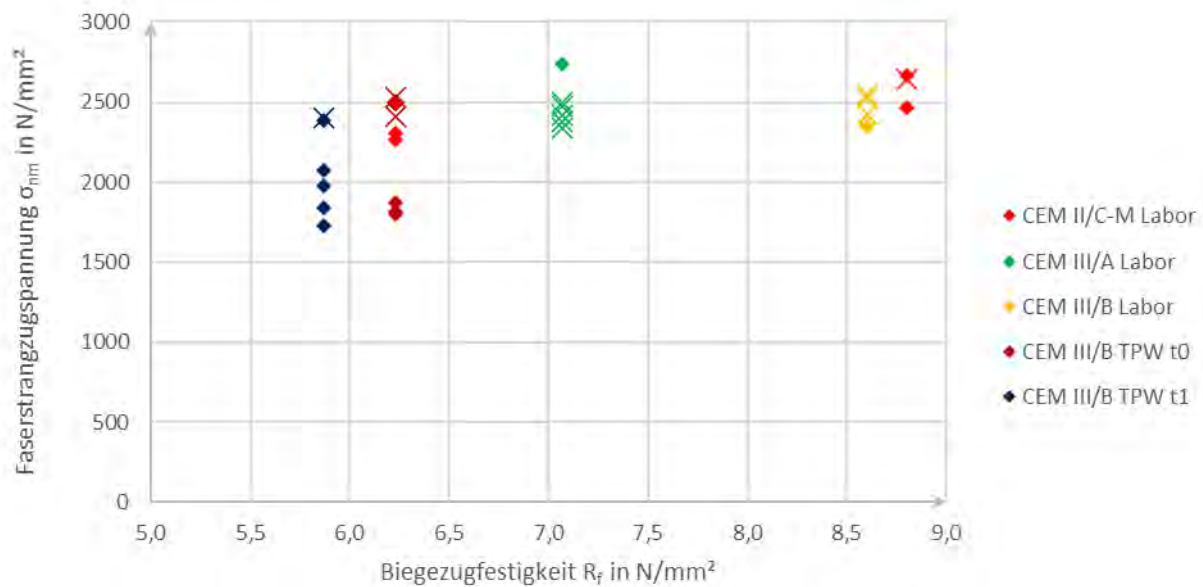


Abbildung 66: Einfluss Biegezugfestigkeit (Textil 1 – HTC21/21)

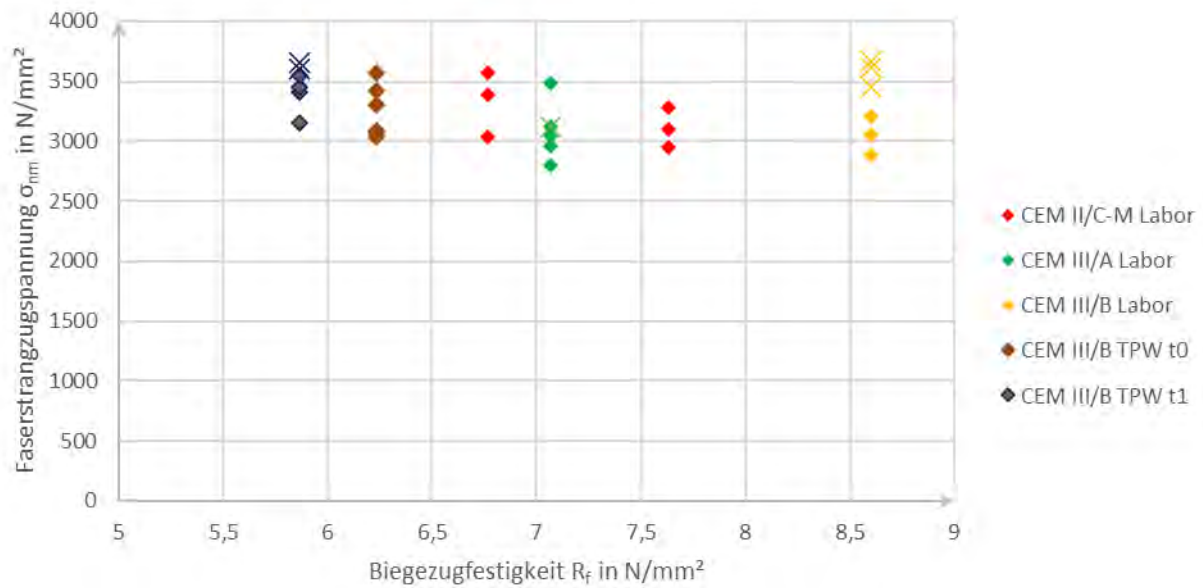


Abbildung 67: Einfluss Biegezugfestigkeit (Textil 2 – solidian Q95)

Einfluss der Druckfestigkeit

Nach Abbildung 68 ist für das Textil 1 eine sehr leichte Korrelation zwischen zunehmender Druckfestigkeit und zunehmender Faserstrangzugspannung zu erkennen. Nach Abbildung 69 ist für das Textil 2 keine solche Korrelation zu erkennen.

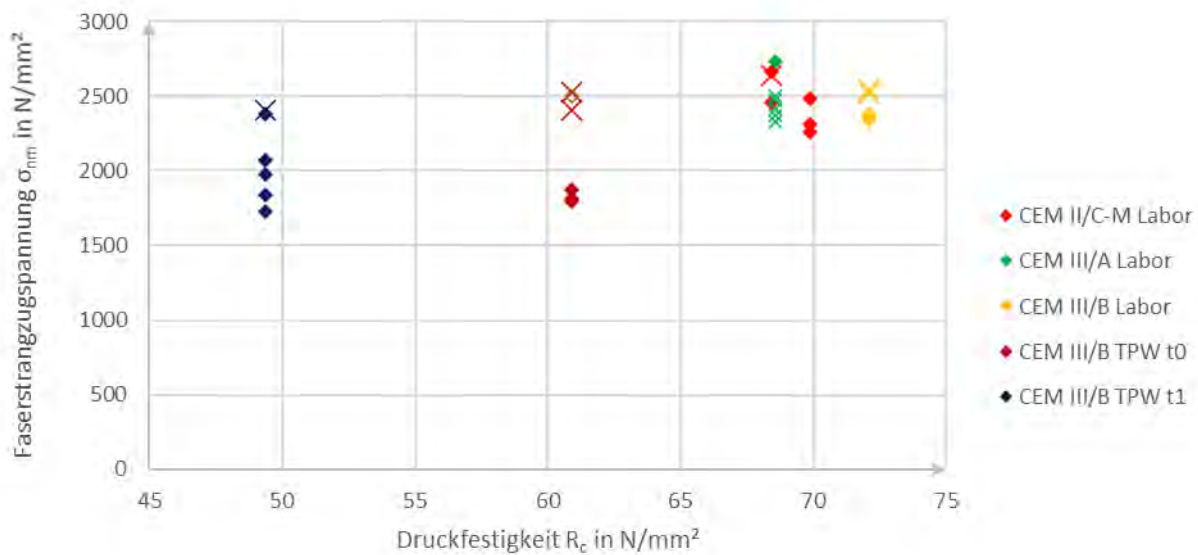


Abbildung 68: Einfluss Druckfestigkeit (Textil 1 – HTC21/21)

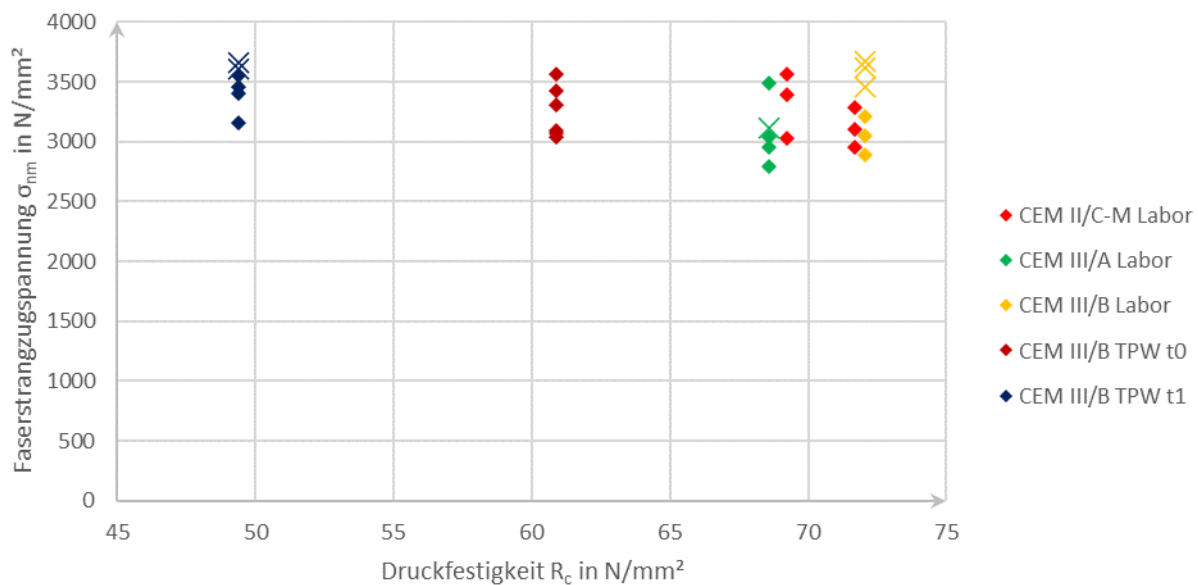


Abbildung 69: Einfluss Druckfestigkeit (Textil 2 – solidian Q95)

Einfluss der minimalen Betondeckung

Für das Textil 1 wurden für die Werksversuche mit CEM III/B die minimalen am Probekörper gemessenen Betondeckungen den maximalen Faserstrangzugspannungen gegenübergestellt. Aus Abbildung 70 wird ersichtlich, dass es keinen offensichtlichen Zusammenhang zwischen der minimalen Betondeckung und den Ausreißen gibt.

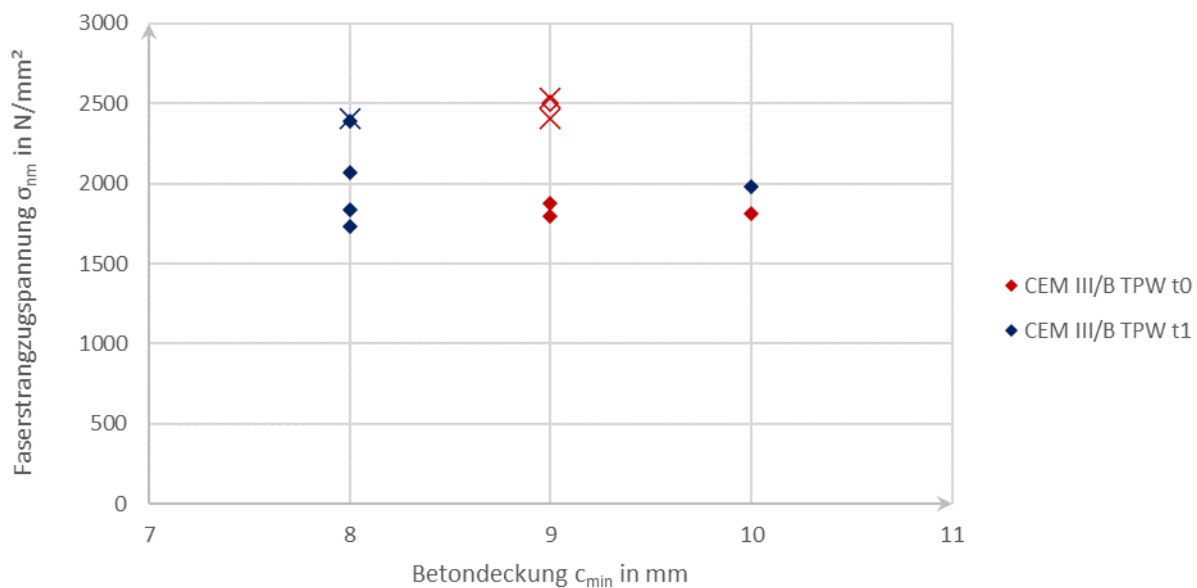


Abbildung 70: Einfluss minimale Betondeckung (Textil 1 – HTC21/21)

Fazit

Eine eindeutig belegbare Ursache für die Streuungen innerhalb und außerhalb der Versuchsserien konnte anhand der untersuchten Parameter nicht identifiziert werden. Wie im Abschnitt „Betonage“ schon beschrieben, ist eine schlechtere Durchdringung des feinmaschigen Textils 1 infolge steiferer Mischungen eine plausible Erklärung für das plötzliche Aufspalten im Übergreifungsbereich in Verbindung mit niedrigen Versagensspannungen. Ein weiterer potentieller Einfluss auf die Verbundeigenschaften stellt die Art der Verdichtung dar. Während die Verdichtung der Verbundprobekörper für die Laborversuche und den Werksversuch mit CEM III/B manuell erfolgte, wurden die Probekörper im Werksversuch mit CEM III/A auf einem Rütteltisch verdichtet. Insbesondere die Durchdringung des Betons durch Textil 1 könnte über eine intensivere Verdichtung verbessert werden. Da die Art der Verdichtung jedoch nicht im Fokus der Untersuchungen stand, ist der Einfluss anhand der Versuchsdaten schwierig zu bewerten.

Fazit für Übergreifungsversuche mit in Transportbetonwerken hergestellten Probekörpern

Folgende Schlussfolgerungen werden aus den Ergebnissen der Übergreifungsversuche mit in Transportbetonwerken hergestellten Probekörpern gezogen:

1. Das Verbundverhalten zwischen den Transportbetonrezepturen und der grobmaschigen Carbonbewehrung (Textil 2) wird weder durch die Herstellung im Werk, durch längere Verarbeitungszeiten noch durch erhöhte sommerliche bzw. gemäßigte Umgebungstemperaturen während der Herstellung signifikant beeinflusst.
2. Das Verbundverhalten zwischen den Transportbetonrezepturen und der engmaschigen Carbonbewehrung (Textil 1) ist infolge der Werksbetonage starken Streuungen unterlegen und reagiert offenbar empfindlich auf äußere, bisher nicht näher untersuchte Einflüsse. Die aufgestellte Empfehlung die Betonkonsistenz in Abhängigkeit der Gittergröße zu wählen wurde durch die Werksversuche bestätigt.

3.3 Arbeitspaket 3: Validierung an einem Demonstratorbauteil

Die abschließende Validierung an einem Demonstratorbauteil erfolgte mit zwei verschiedenen Zielstellungen. Zum einen sollte die Betonage filigraner Carbonbetonstrukturen anspruchsvollen Geometrien erprobt werden. Zum anderen sollte unter praxisnahen Herstellbedingungen ein großformatiges Carbonbetonbauteil betoniert werden.

Im ersten Schritt wurde dafür im Rahmen eines Vorversuches ein Bauteil im Labor gefertigt. Im zweiten Schritt erfolgte die Betonage eines Wandbauteils im Transportbetonwerk.

3.3.1 Vorversuch– Herstellung im Labor

Im Vorversuch wurde ein Bauteil mit vertikalen und horizontalen Flächen inklusive Aussparungen betoniert. Dafür wurde ein Fahrradständer mit einer Stärke von 30 mm konzipiert. Die Aussparungen für die Räder wurden mit expandieren Polystyrol hergestellt. Der Schalungsbau erfolgte durch die informbeton GmbH. Für die Betonage wurde die Rezeptur CEM II/C-M sowie eine Formbewehrung aus Textil 2 (HTC21/21) verwendet. Da bei den bisherigen Versuchen nur Verbundkörper in liegender Form hergestellt wurden, war die Betonage der vertikalen Fläche und die Durchdringung der Carbonfaserbewehrung von besonderem Interesse. Daher wurde die Schalfläche in vertikaler Richtung mit Acrylglas konzipiert, um den Betonageprozess visuell beurteilen zu können. Die einlagige, L-förmige Bewehrung wurde mittels Abstandshalter mittig im Probekörper angeordnet ($c = 12 \text{ mm}$). Eine zusätzliche Sicherung gegen das Aufschwimmen der Bewehrung war nicht notwendig. Die Schalung inkl. der eingebrachten Bewehrung ist in Abbildung 71 zu sehen.



Abbildung 71: Schalung mit Acrylglas und eingebrachter Bewehrung

Das Einfüllen des Betons erfolgte über die obere offene Seite und die Verdichtung erfolgte sowohl manuell als auch mit einem Flaschenrüttler der von außen an die Schalung gehalten wurde.

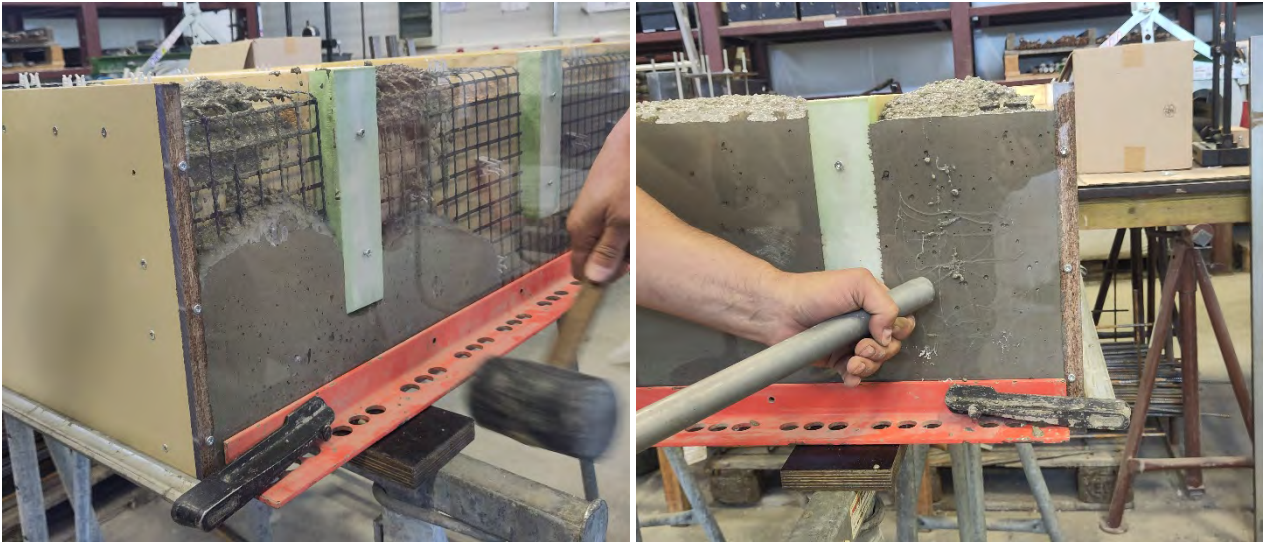


Abbildung 72: Verdichtungsmethoden (links: manuelle Verdichtung, rechts: Flaschenrüttler) während der Betonage



Abbildung 73: Betonage

Die Probekörperherstellung verlief problemlos, das Textil wurde gleichmäßig durchdrungen, ohne dass die Lagesicherheit gefährdet wurde. Nach dem Ausschalen wurde die Qualität visuell geprüft. Bis auf wenige Lufteinschlüsse unterhalb der horizontalen Aussparungsflächen konnten keine Mängel festgestellt werden.



Abbildung 74: Ausgeschalter Fahrradständer

3.3.2 Demonstrator – Herstellung im Werk

Mit der Betonage eines Demonstrators im Transportbetonwerk sollte abschließend aufgezeigt werden, dass Carbonbetonbauteile unter praxisnahen Bedingungen in Ortbetonbauweise hergestellt werden können. Kritisch ist in diesem Zusammenhang insbesondere die Betonage von vertikalen Bauteilen, bei denen eine Durchdringung von Carbongittern mit dem Beton schwieriger zu erreichen ist als bei horizontalen Bauteilen.

Die Betonage erfolgte in Analogie zum sommerlichen Praxisversuch wieder im Werk Dresden Hafen der SCHWENK Beton Dresden GmbH & Co. KG am 14.08.2025 unter Verwendung der Rezeptur aus Tabelle 33. Die Witterungsbedingungen bildeten wieder den sommerlichen Extremfall ab, mit Lufttemperaturen bis 33 °C. Der Frischbeton wies folgenden Eigenschaften auf:

- Frischbetontemperatur 28 °C
- Ausbreitmaß 650 mm
- Luftgehalt 1,2 Vol.-%

Für den Demonstratorversuch wurde ein Wandbauteil mit den Abmessungen 1,50 x 1,00 x 0,08 m³ konzipiert, welches eine doppelte Carbongitterlage (Textil HTC21/21) enthielt. Der Schalungsbau erfolgte durch die Holcim (Deutschland) GmbH. Das Befüllen der Schalung sollte durch eine Pumpenöffnung in 50 cm Höhe erfolgen. Der Beton sollte durch seine leichtverdichtenden Eigenschaften in der Lage sein, die Schalung ohne übermäßigen Verdichtungsaufwand von außen vollständig zu befüllen und die Carbongitter vollständig zu umhüllen. Der Pumpenanschluss sowie der Pumpvorgang wurde durch die BFU Betonförderunion GmbH & Co. KG realisiert. Eine Verdichtung des Betons erfolgte mittels Innenrüttler, vorwiegend um eine gute Verteilung des Betons zu erreichen, da die engmaschigen Abstandshalter zwischen den beiden Carbongittern die horizontale Ausbreitung des Betons erschwerten (vgl. Abbildung 76, rechts). Zwischen den Abstandshaltern wurde eine problemlose Durchdringung der Carbongitter auch ohne zusätzliche Verdichtungsenergie erreicht.

Die folgenden Abbildungen zeigen Impressionen von der Betonage des Demonstratorbauteils.



Abbildung 75: Betonmischanlage Werk Dresden Hafen (links), Probenahme Beton (rechts)



Abbildung 76: Schalung für Carbonbetonwand mit Pumpenanschluss (links), aufsteigender Beton in Schalung (rechts)



Abbildung 77: Verdichtungsvorgang (links), Betonpumpe (rechts)

Im Alter von 6 Tagen wurde das Demonstratorbauteil ausgeschalt und es wurden Bohrkern entnommen (Abbildung 79). Die Bohrkern wurden per Sägeschnitt halbiert und die Lage der Carbongitter im Bohrkern wurde vermessen (Abbildung 80). Weiterhin erfolgten lichtmikroskopische Untersuchungen, um die Einbindung der Carbongitter im Beton zu beurteilen.



Abbildung 78: Ausgeschalte Carbonbetonwand



Abbildung 79: Bohrkernentnahme

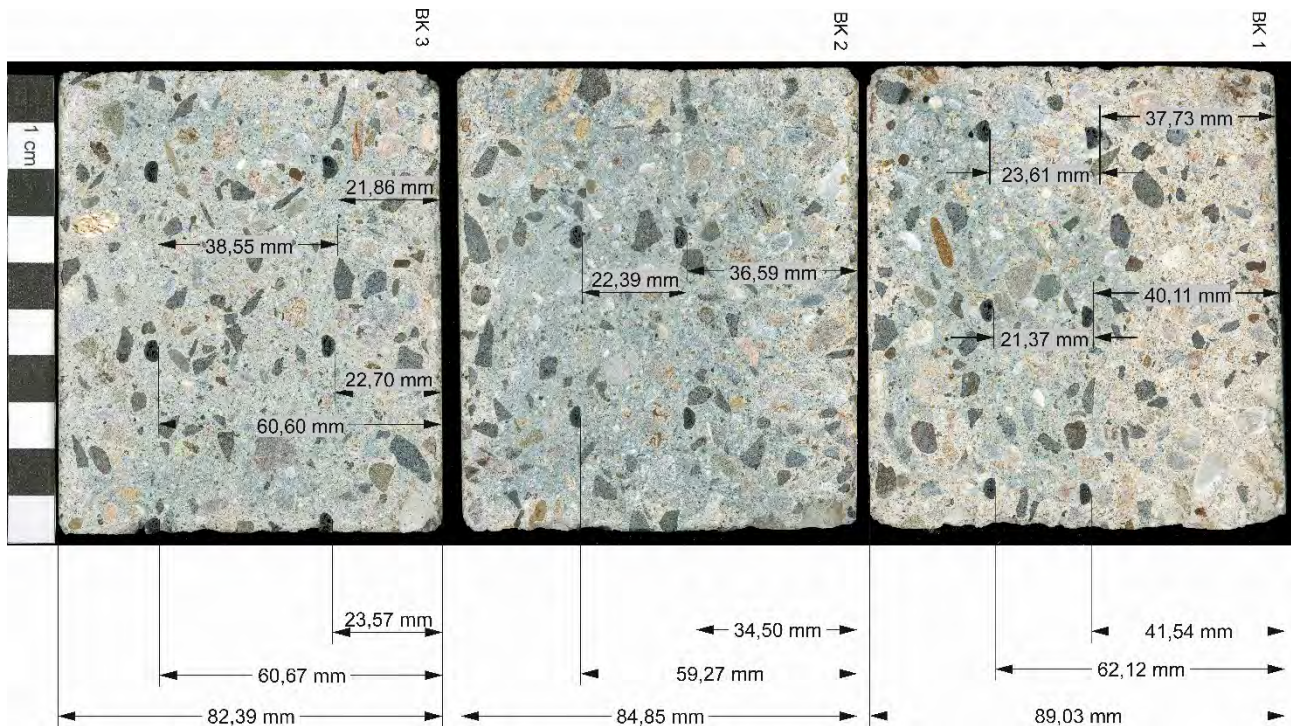


Abbildung 80: Lage der Carbongitter in den Bohrkernproben (Bohrkernoberseite rechts)

In den Bohrkernen Nr. 1 und 2 aus dem unteren sowie mittleren Bereich des Demonstrators beträgt der Abstand der beiden Carbongitter ca. 22 mm. Im Bohrkern Nr. 3 aus dem oberen Bereich des Demonstrators beträgt der Abstand der Gitter ca. 39 mm. Im Zuge der Verdichtung trat hier eine Aufweitung des Gitterabstandes auf.

Die folgenden Abbildungen zeigen Detailaufnahmen der Einbettung der Carbongitter im Beton. Daraus wird deutlich, dass eine vollständige Umhüllung der Carbonstränge erreicht wurde.

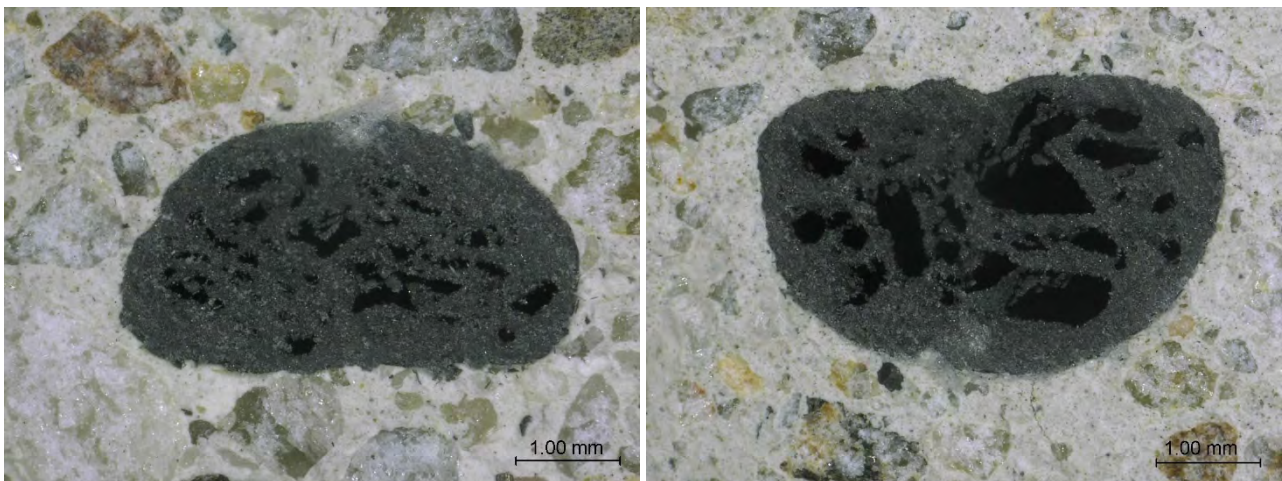


Abbildung 81: Umhüllung der Rovings in den Bohrkernproben

Zusätzlich zum Wanddemonstrator wurde eine kleine Carbonbetonskulptur in Form eines Schmetterlings betoniert, der die Projektidee auf den Transportbeton-Tagen 2025 des BTB repräsentieren sollte.



Abbildung 82: Schalung und Betonage des Carbonbetonschmetterlings



Abbildung 83: Carbonbetonschmetterling (Foto: BTB/Maximilian Wozny)

3.3.3 Bewertung der Nachhaltigkeit

Betonrezepturen

Auf Basis der verwendeten Mischungszusammensetzung erfolgt eine vergleichende Abschätzung des ökologischen Fußabdruckes (CO₂-Bilanz). In Tabelle 41 sind die Gesamtwerte des Globales Erwärmungspotenzial (GWP) für die im Projekt verwendeten Ausgangsstoffe sowie für Referenzprodukte als Nettowerte (exkl. CO₂-Äq. Aus der Verbrennung von abfallbasierten Brennstoffen) für die Herstellung (Module A1-A3) angegeben.

Tabelle 41: Materialdatensätze Beton für Globales Erwärmungspotenzial (GWP) nach DIN EN 15804+A2 (Nettowerte, Module A1-A3)

Bestandteil	GWP-total in kg CO ₂ -Äq./kg	Datengrundlage
Zement (Durchschnitt)	0,553	representative dataset [34]
CEM III/B 42,5 N-LH/SR (na)	0,250	specific dataset [35]
CEM III/A 42,5 N (na)	0,434	specific dataset [36]
CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	0,487	Annahmen aus [37]
Kalksteinmehl	0,0165	average dataset [38]
Wasser	0,0001204	Trinkwasser, generic dataset [39]
Gesteinskörnung	0,002739	generic dataset [40]
MasterCo ₂ re 3240	0,689	Muster-EPD [41]
Fließmittel (Durchschnitt)	1,23	Muster-EPD [42]

Sofern möglich wurden für die Ausgangsstoffe spezifische Datensätze verwendet, ansonsten wurden Durchschnitts- oder Literaturwerte angenommen. Anhand der Daten und der jeweiligen Mischungszusammensetzungen wurden für die entwickelten Rezepturen die GWPs berechnet. Bei der Berechnung von GWP_{exkl} wurden die Umwelteinwirkungen infolge des Rohstofftransports und der Betonherstellung vernachlässigt, da diese stark werkspezifisch sind. Um dennoch einen Vergleich mit anderen Betonen herstellen zu können, wurden aus der Literatur Werte für diese Umwelteinwirkungen herangezogen, um GWP_{inkl} zu berechnen. Nach Stengel et al. [37] kann für die Betonherstellung (A3) im Mittel ein GWP von 5,78 kg CO₂-Äq./m³ angenommen werden. Für den Rohstofftransport in die Transportbetonwerke (A2) kann nach Schack et al. [43] im Mittel ein GWP von 0,0897 kg CO₂-Äq./(t·km) sowie folgende Transportdistanzen angesetzt werden: Zement = 91 km, Gesteinskörnung = 69 km, Zusatzstoffe = 130 km.

Tabelle 42: GWP (Module A1-A3) der entwickelten Betonrezepturen

Rezeptur	CEM III/A	CEM III/B	CEM II/C-M (S-LL)
GWP _{exkl} in kg CO ₂ -Äq./m ³	199	117	219
GWP _{inkl} in kg CO ₂ -Äq./m ³	219	137	240

Verglichen mit dem GWP eines Durchschnittsbetons der Druckfestigkeitsklasse C50/60 mit 275 kg CO₂-Äq./m³ sind die GWP_{inkl} der entwickelten Rezepturen deutlich niedriger [44].

Carbonbeton

In Tabelle 41 sind die Gesamtwerte des Globales Erwärmungspotenzial (GWP) für die im Projekt verwendete Carbonfaserbewehrung (Textil 2) sowie für Bewehrungsstahl als Referenz als Nettowerte (exkl. CO₂-Äq. Aus der Verbrennung von abfallbasierten Brennstoffen) für die Herstellung (Module A1-A3) angegeben.

Tabelle 43: Materialdatensätze Bewehrung für Globales Erwärmungspotenzial (GWP) nach DIN EN 15804+A2 (Nettowerte, Module A1-A3)

Bestandteil	GWP-total in kg CO ₂ -Äq./kg	Dichte in g/cm ³	Datengrundlage
Bewehrungsstahl (Referenz)	0,6422	7,8	generic dataset [45]
solidian GRID Q95	23,6	1,28	specific dataset [46]

Bezogen auf die Funktionseinheit Kilogramm ist das GWP der Carbonfaserbewehrung um ein Vielfaches größer als das GWP des Bewehrungsstahls. Vor dem Hintergrund, dass Carbonbewehrung im Vergleich zu Bewehrungsstahl viermal leichter (Dichte 1,3 g/cm³ statt 7,8 g/cm³) und fünf- bis sechsmal tragfähiger (Zugfestigkeit 3000 N/mm² statt 500 N/mm²) ist, ist der mengenbasierte Vergleich der Bewehrungsmaterialien jedoch unpassend. Die Umweltwirkungen der Carbonbeton- im Vergleich zur Stahlbetonbauweise hängen stark von dem individuellen Projekt ab. Aufgrund der hohen Zugfestigkeit und der Korrosionsbeständigkeit der Bewehrung können Carbonbetonbauteile aber wesentlich schlanker ausgeführt werden, besitzen eine hohe Dauerhaftigkeit und damit eine bis zu doppelt so hohe Lebensdauer [47]. Da eine Passivierung der Bewehrung nicht nötig ist, können zudem geringere Klinkerfaktoren im Beton realisiert werden.

4 Verwendung der Zuwendung

4.1 Forschungsstelle 1

- Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans): Der Einsatz von wissenschaftlich-technischem Personal belief sich im Berichtszeitpunkt auf 13,30 Personenmonate.
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans): Im Berichtszeitraum wurden keine Ausgaben für Geräte getätigt.
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans): Im Berichtszeitraum wurden keine Ausgaben für Leistungen Dritter getätigt.

Tabelle 44 Mittelverwendung der Forschungsstelle 1

Zeitraum	Personalmittel		Geräte	Leistungen Dritter
	Mitarbeiter	Personenmonate	€	€
1	2	3	4	5
05/2023 bis 08/2025	HPA A	13,30	0,00	0,00
Summe		13,30	0,00	0,00

4.2 Forschungsstelle 2

- Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans): Der Einsatz von wissenschaftlich-technischem Personal belief sich im Berichtszeitpunkt auf 18,05 Personenmonate.
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans): Im Berichtszeitraum wurden keine Ausgaben für Geräte getätigt.
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans): Im Berichtszeitraum wurden keine Ausgaben für Leistungen Dritter getätigt.

Tabelle 45 Mittelverwendung der Forschungsstelle 2

Zeitraum	Personalmittel		Geräte	Leistungen Dritter
	Mitarbeiter	Personenmonate	€	€
1	2	3	4	5
05/2023 bis 08/2025	HPA A	18,05	0,00	0,00
Summe		18,05	0,00	0,00

5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die für das Projekt geplanten Arbeiten wurden wie im Arbeitsprogramm vorgesehen durchgeführt. Die Arbeiten umfassten im ersten Schritt die Festlegung der Anwendungsfälle, das Erstellen der Mischungsentwürfe für die Betone und die Materialorganisation. In Laborversuchen wurden die Mischungsentwürfe geprüft und umfangreiche Frisch- und Festbetonprüfungen an den Betonen durchgeführt. Dies umfasste ebenfalls die Bestimmung der Verbundeigenschaften im Kompositbaustoff Carbonbeton.

Ausgehend von dieser Basis erfolgten Praxisversuche in unterschiedlichen Transportbetonwerken bei heißer sowie bei kühler Witterung zur Prüfung der Eignung der Transportbetonrezepturen unter praxisnahen Randbedingungen. Die Praxisversuche beinhalteten ebenfalls umfangreiche Untersuchungen an den Betonen sowie am Verbundsystem.

Als Projektabschluss erfolgte die Betonage mehrerer Demonstratoren unter Laborbedingungen sowie unter Praxisbedingungen im Transportbetonwerk. Die Eignung der Transportbetonzusammensetzungen für großformatige sowie auch für filigrane Geometrien konnte so nachgewiesen werden.

Weiterhin erfolgten Maßnahmen zum Ergebnistransfer in Form von schriftlichen Beiträgen, Präsentationen auf Tagungen und regelmäßigen Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses.

Alle Arbeiten waren zum Erreichen des geplanten Ergebnisstandes innerhalb des Berichtszeitraumes notwendig und angemessen.

6 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Die Bauindustrie und die Baustoffindustrie stehen unter einem hohen gesellschaftlichen Druck ihre CO₂-Emissionen zu reduzieren. Mit den zunehmenden Kosten für CO₂-lastige Baustoffe und Bauteile/-werke rücken CO₂-reduzierte Lösungen auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten stärker in den Fokus der ausführenden Betriebe. Die Carbonbetonbauweise ist hier ein äußerst vielversprechender Ansatz, um die CO₂-Last im Bauwesen zu reduzieren und gleichzeitig ästhetisch anspruchsvolle Bauwerke zu errichten. Wesentliche Vorteile ergeben sich daraus, dass die Carbonbewehrung im Vergleich zur herkömmlichen Stahlbewehrung nicht vor Korrosion (Schadensursache Nr. 1 bei Stahlbetonbauwerken) geschützt werden muss, so dass deutliche geringere Bauteilquerschnitte möglich sind, wie auch eine stärkere Absenkung des Klinkerfaktors im Zement bzw. Beton.

Bisher werden Neubauteile aus Carbonbeton überwiegend in Fertigteilwerken und Forschungslaboren hergestellt. Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsthemas bieten nun auch die Grundlage, den Carbonbeton viel stärker auch als Ortbetonbauweise unter Nutzung von Transportbeton zu realisieren, woraus sich eine wesentliche Erweiterung des Anwendungsgebietes ergibt.

Eine maßgebende Hemmschwelle für eine breite Anwendung im Ortbeton stellt das anspruchsvollere Anforderungsprofil der Bauteilfertigung auf der Baustelle dar, wo aufgrund von Einflüssen aus Klima, Transport und Einbauprozessen deutlich robustere Betonmischungen Einsatz finden müssen. Die Ergebnisse des Projekts haben aufgezeigt, dass unter diesen anspruchsvolleren Bedingungen Carbonbeton erfolgreich realisiert werden kann, aber auch wo sinnvolle Anwendungsgrenzen (z.B. Einbaukonsistenzen) liegen. Das Projekt unterstützt damit Betriebe der Baustoff- und Bauindustrie, insbesondere auch die kleinen und mittelständischen Unternehmen, innovative, CO₂-reduzierte, nachhaltige Betonbauwerke umzusetzen und damit ihre Wettbewerbsfähigkeit im nationalen wie internationalen Umfeld zu steigern.

7 Wissenstransfer in die Wirtschaft

7.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Im Rahmen der Projektbearbeitung erfolgten bereits verschiedene Transfermaßnahmen. Von der Grundstruktur war das Projekt so angelegt, dass es in enger Zusammenarbeit der Forschungseinrichtungen mit Unternehmen aus der Transportbetonindustrie erfolgte. Ein enger Austausch erfolgte über den Projektbegleitenden Ausschuss, in dem neben der Forschungsgemeinschaft Transportbeton mehrere Unternehmensvertreter aus dem Transportbetonbereich mitwirkten. In regelmäßigen Sitzungen erfolgten Vorstellungen des aktuellen Projektstandes, der vorliegenden Ergebnisse sowie die Planung des weiteren Projektfortschrittes.

Die Transportbetonunternehmen waren nicht nur über den Projektbegleitenden Ausschuss in die Steuerung des Projekts mit eingebunden, sondern wirkten auch als Praxispartner in den geplanten Praxis- und Demonstratorversuchen mit. Hier wurden im intensiven Austausch Betonrezepturen angepasst bzw. optimiert, um im Transportbetonwerk unter Verwendung der lokal verfügbaren Ausgangsstoffe realisiert werden zu können.

Weiterhin wurden das Projekt und dessen Ergebnisse auf den BTB-Transportbetontagen 2024 in Hamburg sowie 2025 in Mainz vorgestellt. Zusätzlich wurde auch in der BTB-Mitgliederzeitschrift TB-iNFO über das Projekt informiert. Zudem wird die Forschungsgemeinschaft Transportbeton interessierten Mitgliedsfirmen den vorliegenden Bericht zur Verfügung stellen. In der folgenden Tabelle sind die Maßnahmen zum Ergebnistransfer dargestellt:

Tabelle 46 Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraumen
Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses	Technisch-wissenschaftliche Begleitung des Forschungsprojektes	Online	20.07.2023
		Online	29.08.2023
		Dresden	21.06.2024
		Online	17.06.2025
Einbeziehung von Transportbetonwerken	Erfahrungsaustausch und Mitwirkung bei FuE-Arbeiten	Bilaterale Abstimmungen / Praxisversuche	13.08.2024
			19.02.2025
			04.03.2025
			14.08.2025
Ergebnisvorstellung auf Fachkonferenzen	Projektvorstellung und Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Transportbetontage	10./11.09.2024
			10./11.09.2025
Veröffentlichungen	Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	TB-iNFO	2023

7.2 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Nach Projektabschluss sind Veröffentlichungen in den Zeitschriften „beton“ sowie „Beton- und Stahlbetonbau“ geplant. In „beton“ soll ein Überblick über das Projekt gegeben werden, mit starkem Fokus auf die Praxisversuche. Der Beitrag in „Beton- und Stahlbetonbau“ wird detailliertere Ergebnisse zu Untersuchungen am Verbundsystem Carbon-Beton in den Vordergrund stellen. Weiterhin ist ein Beitrag zum erfolgreichen Projektabschluss in der BTB-Mitgliederzeitschrift TB-iNFO Ausgabe 102 (März 2026) geplant.

Die Forschungsergebnisse werden zudem auch Eingang in der universitären Forschung finden und auf diesem Wege als Wissen an die zukünftigen Bauingenieurinnen und -ingenieure weitergegeben. Insbesondere wird aber angestrebt, die praktische Umsetzung der Ergebnisse mit Transportbetonherstellern voranzutreiben, um die Relevanz der Carbonbetonbauweise weiter zu steigern. Weiterhin wird angestrebt, die Projektergebnisse im Regelwerk zum Carbonbeton zu berücksichtigen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Verein Deutscher Zementwerke, V. D. (2020) *Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien*.
- [2] Michler, H.; Burgard, S.; Kalbe, H.; Curbach, M. (2021) *Nichtmetallische Bewehrung im Großbrückenbau - Kapfenverbreiterung Carolabrücke Dresden* in: Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium - Ergänzungsband 2021, S. 63–76.
- [3] Frenzel, M.; Scheerer, S.; Schmidt, A. (2023) *Übersicht über die im CUBE verwendeten Materialien* in: Beton- und Stahlbetonbau 118, S2, S. 25–36. <https://doi.org/10.1002/best.202200125>
- [4] Lorenz, E.; Peter, A.; May, S.; Bösch, T. (2023) *Planung und Neubau einer Straßenbrücke aus Carbonbeton – Carbonbeton „The Next Step“* in: Beton- und Stahlbetonbau 118, H. 9, S. 705–712. <https://doi.org/10.1002/best.202300037>
- [5] *Sichere Betonförderung – Pumpbarkeit und Pumpstabilität – Schlussbericht vom 01.03.2023 zu IGF-Vorhaben Nr. 20947 BG*.
- [6] Schladitz, F.; Curbach, M. (2017) *Carbon Concrete Composite* in: Holschemacher, K. [Hrsg.] *Neue Herausforderungen im Betonbau*. Leipzig, S. 121–138.
- [7] Nanni, A. (2014) *Reinforced concrete with FRP bars – Mechanics and design*. s.l.: s.n.
- [8] Curbach, M.; Ortlepp, R. (2011) *Sonderforschungsbereich 528: Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung - Abschlussbericht*.
- [9] Hegger, J.; Will, N. (2012) *Sonderforschungsbereich 532: Textilbewehrter Beton - Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie. Abschlussbericht*.
- [10] Kranich, S.; Schladitz, F. (2023) *C 3 – Carbon Concrete Composite – Vom größten Bauforschungsprojekt zum bedeutendsten Verband für Carbonbetonbau* in: Beton- und Stahlbetonbau 118, S2, S. 4–6. <https://doi.org/10.1002/best.202200120>
- [11] Younes, A.; Seidel, A.; Rittner, S.; Cherif, C.; Thyroff, R. (2015) *Innovative textile Bewehrungen für hochbelastbare Betonbauteile* in: Beton- und Stahlbetonbau 110, S1, S. 16–21. <https://doi.org/10.1002/best.201400101>
- [12] Clauss, M. *Strukturelle Untersuchungen an Lignin-basierten Carbonfasern* [Dissertation].
- [13] Steudle, L. M. (2015) *Neue Präkursoren für Lignin-basierte Carbonfasern* [Dissertation]. Universität Stuttgart.
- [14] Schlaich, M.; Apitz, A.; Jesse, F. (2020) *Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton* in: Beton- und Stahlbetonbau 115, H. 9, S. 684–696. <https://doi.org/10.1002/best.202000018>
- [15] Bielak, J.; Will, N.; Claßen, M.; Schaarschmidt, D.; Flederer, H. (2025) *CFK-Vorspannung für Modulbrücken* in: Beton- und Stahlbetonbau 120, H. 6, S. 410–425. <https://doi.org/10.1002/best.202400092>
- [16] Osman-Letelier, J. P.; Hückler, A.; Schlaich, M. (2021) *Dünnwandige Fertigteile aus vorgespanntem Carbonbeton* in: Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 10, S. 786–797. <https://doi.org/10.1002/best.202100019>
- [17] Schumann, A.; Wagner, J.; Deutscher, M. (2025) *Ultraschlanke vorgespannte Carbonbetonbinder – Pilotanwendung in einer Schulsporthalle Teil 1* in: Beton- und Stahlbetonbau 120, H. 9, S. 727–734. <https://doi.org/10.1002/best.202500035>
- [18] Curbach, M.; Hegger, J.; Schladitz, F.; Tietze, M.; Lieboldt, M. (2023) *Handbuch Carbonbeton – Einsatz nichtmetallischer Bewehrung*. Berlin: Ernst & Sohn.
- [19] Seifert, W.; Lieboldt, M. (2020) *Ressourcenverbrauch im globalen Stahlbetonbau und Potenziale der Carbonbetonbauweise* in: Beton- und Stahlbetonbau 115, H. 6, S. 469–478. <https://doi.org/10.1002/best.201900094>

- [20] Kortmann, J.; Seifert, W.; Lieboldt, M.; Kopf, F.; Jehle, P.; Curbach, M. (2021) *Carbonbeton – ein Beitrag zur Ressourceneffizienz im Betonbau* in: *Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz (NAREKS) - Konstruktive Lösungen für das Planen und Bauen - Aktueller Stand der Technik*. Berlin, S. 168–176.
- [21] Schneider, K.; Butler, M.; Mechtcherine, V. (2017) *Carbon Concrete Composites C 3 – Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 112, H. 12, S. 784–794.
<https://doi.org/10.1002/best.201700058>
- [22] Jesse, F. (2023) *Herstellung und Errichtung – TWIST* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 118, S2, S. 109–119.
<https://doi.org/10.1002/best.202200096>
- [23] *DAfStb-Richtlinie - Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung*.
- [24] DIBt (2024) *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung – Carbon-Bewehrungsgitter solidian GRID zur Bewehrung von Betonbauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung*. Z-1.6-308.
- [25] DIBt (2023) *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung – CARBOrefit® - Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonbeton*. Z-31.10-182.
- [26] Marx, S.; Michler, H.; Sandmann, D.; Gündogdu, B.; Zierul, L.; Ur Rehman, N. (2025) *RUBIN-ISC - Regionale Unternehmerische Bündnisse für Innovation - Industriestandard Carbonbeton; Teilvorhaben III-a - Erarbeitung von Werkzeugen für die Planung und Dimensionierung von Carbonbetonbauteilen*. Hannover : Technische Informationsbibliothek.
- [27] Enrico Lorenz (2014) *Endverankerung und Übergreifung textiler Bewehrungen in Betonmatrices* [Dissertation]. Technische Universität Dresden.
- [28] Schütze, E.; Curbach, M. (2019) *Zur experimentellen Charakterisierung des Verbundverhaltens von Carbonbeton mit Spalten als maßgeblichem Versagensmechanismus* in: *Bauingenieur*.
- [29] Lorenz, E.; Schütze, E.; Schladitz, F.; Curbach, M. (2013) *Textilbeton – Grundlegende Untersuchungen im Überblick* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 108, H. 10, S. 711–722. <https://doi.org/10.1002/best.201300041>
- [30] DIN EN 12390-17:2019-12 *Prüfung von Festbeton - Teil 17: Bestimmung des Kriechens von Beton unter Druckspannung*.
- [31] Graubner, C.-A.; Ramge, P.; Proske, T. (2016) *Zwanzig20 - Projekt - Carbon Concrete Composite C³; Basisvorhaben B2 - Nachhaltige Bindemittel und Betone; TP15: Umweltfreundliche Bindemittel und C³-Betone, Kriechen, Schwinden, Ökobilanzierung : Abschlussbericht F_15-1-2016 : Berichtszeitraum: 01.03.2015 bis 31.08.2016*.
- [32] Müller, H. S.; Acosta Urrea, F.; Kvitsel, V. (2021) *Modelle zur Vorhersage des Schwindens und Kriechens von Beton – Teil 2a: Kriechen – Grundlagen und Analyse des Kriechmodells in DIN EN 1992-1-1:2011* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 116, H. 9, S. 660–676. <https://doi.org/10.1002/best.202100050>
- [33] fib (2013) *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Wiley.
- [34] IBU (2022) *Zement – Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804+A2*. EPD-VDZ-20210336-1AG1-DE.
- [35] EPD Norway (2025) *SCHWENK Zement GmbH & Co. KG, CEM III/B 42,5 L-LH/SR (na) – Bernburg - 0840-CPR-3040-340595-19 – Environmental product declaration as per ISO 14025 and EN 15804+A2*. NEPD-10112-10112-2.
- [36] IBU (2022) *Holcim Duo 4 N-NA, Werk Dortmund, Siloware - Hochofenzement CEM III/A 42,5 N (na) – Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804+A2*. IBU-CEI-HOL-2203120-DE2022000030-1SUG001-DE.
- [37] Stengel, T.; Kustermann, A. (2024) *Ökobilanzierung von Beton mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung im Vergleich zu Normalbeton* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 119, H. 10, S. 712–721.
<https://doi.org/10.1002/best.202400043>
- [38] IBU (2025) *Kalksteinmehl – Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804+A2*. EPD-BDK-20240500-1AH1-DE.
- [39] Sphera Solutions GmbH (2023) *Ökobaadat - Trinkwasser*.
- [40] Sphera Solutions GmbH (2023) *Ökobaadat - Sand 0/2*.
- [41] IBU (2024) *Concrete admixtures – Plasticizers and Superplasticizers for CO₂ optimized concrete, group B – Environmental product declaration as per ISO 14025 and EN 15804+A2*. EPD-DBE-20230566-1BG2-EN.

- [42] IBU (2021) *Concrete admixtures – Retarders – Environmental product declaration as per ISO 14025 and EN 15804+A2*. EPD-EFC-20210195-IBG1-EN.
- [43] Schack, T.; Deiters, M.; Neubaur, K.; Oberhoff, T.; Klemm-Albert, K.; Haist, M. (2023) *Roadmap zur klimaaoptimierten Transportbetonherstellung – Quantifizierte Betrachtung von Handlungsoptionen zur Steigerung der Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 118, H. 3, S. 148–166.
<https://doi.org/10.1002/best.202200108>
- [44] IBU (2023) *Beton der Druckfestigkeitsklasse C50/60 – Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804+A2*. EPD-IZB-20230424-IBA1-DE.
- [45] Sphera Solutions GmbH (2023) *Ökobaudat - Bewehrungsstahl*.
- [46] ift Rosenheim (2022) *Bewehrungs- und Befestigungssysteme solidian GRID und solidian REBAR – Umweltproduktdeklaration (EPD) nach DIN EN ISO 14025:2011 und der DIN EN 15804:2012+A2:2019*. EPD-SGR-65.0.
- [47] Michael Haist; Konrad Bergmeister; Manfred Curbach; Patrick Forman; Georgios Gaganelis; Jesko Gerlach; Peter Mark; Jack Moffatt; Christoph Müller; Harald S. Müller; Jochen Reiners; Christoph Scope; Matthias Tietze; Klaus Voit (2022) *Nachhaltig konstruieren und bauen mit Beton* in: *BetonKalender 2022*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 421–531. <https://doi.org/10.1002/9783433610879.ch7>