

Eine wirtschaftliche Bewertung von Carbon- und Stahlbetonbauteilen

R. Adam

DOI: <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201805141020-0>

Dipl.-Ing. Romy Adam
Institut für Baubetriebswesen
TU Dresden
romy.adam@tu-dresden.de

Inhalt

1	Einleitung	2
2	Wirtschaftlicher Vergleich von Carbon- und Stahlbeton	2
2.1	Szenarientwicklung für einen direkten Bauteilvergleich von Stahl- und Carbonbeton	2
2.2	Beschreibung des Bauteils und verwendete Materialien	4
2.3	Ergebnisse des monetären Bauteilvergleichs	4
2.4	Auswertung der Ergebnisse und Einsparpotentiale von Carbonbetonbauteilen	6
3	Qualitative Hinweise für Carbon- und Stahlbetonbauteile	7
3.1	Anwendungshinweise für die Herstellung von Carbonbetonbauteilen im Gießverfahren	7
3.2	Qualitative Bewertungskriterien für Carbonbetonbauteile	8
4	Zusammenfassung	8

1 Einleitung

Im Rahmen der Forschungsinitiative "Zwanzig20 – C³ Carbon Concrete Composite" trägt das Verbundvorhaben „C³-V1.1 – Entwicklung von Herstell- und Verarbeitungsprozessen von Carbonbeton" zur Reduzierung von Markteintrittsbarrieren bei, indem die Herstellungsprozesse von Carbonbeton in wirtschaftlicher und technischer Hinsicht untersucht werden. Das Forschungsprogramm C³ befasst sich allumfassend mit technologischen, marktorientierten und wertschöpfungsorientierten Themen zu Carbonbeton, um den Baustoff zu einer breiten Anwendung in der Praxis zu führen.¹

Ziel des Verbundvorhabens C³-V1.1 ist die Untersuchung von Carbonbeton im Hinblick auf Einbringverfahren des Feinbetons, unterschiedliche Schalungs- und Bewehrungstechniken und Nachbehandlungsmethoden. Dabei soll nicht nur die Umsetzbarkeit der Herstellung von Carbonbeton betrachtet werden, sondern darüber hinaus Aussagen zur Optimierung der Herstellungsprozesse und der Wirtschaftlichkeit von Bauteilen aus Carbonbeton gemacht werden.

Das Teilvorhaben des Instituts für Baubetriebswesen betrachtet schwerpunktmäßig die monetäre und nicht monetäre Beurteilung der Vor- und Nachteile von Carbonbeton. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeit werden insbesondere Herstellkosten von Bauteilen aus Carbonbeton mit Bauteilen aus Stahlbeton verglichen, sowie Montage- und Transportkosten einbezogen. Die qualitative Beurteilung von Carbonbeton befasst sich unter anderem mit der Arbeitssicherheit und den Herstellungsbedingungen der Bauteile. Bei der Auswertung der gewonnenen Erkenntnisse sollen Einsparpotentiale herausgearbeitet und Anwendungshinweise gegeben werden.

2 Wirtschaftlicher Vergleich von Carbon- und Stahlbeton

Für den monetären Vergleich der beiden Bauarten, Carbonbeton und Stahlbeton, werden, bezüglich ihrer Tragfähigkeit, äquivalente Bauteile aus Carbon- und Stahlbeton gegenübergestellt. Die Basis für den Vergleich stellt somit nicht die Außengeometrie, sondern die Leistungsfähigkeit der Bauteile dar. Dies entspricht der Idee von Carbonbeton, dass schlanker und ressourceneffizienter gebaut werden kann als mit Bauteilen aus Stahlbeton.

2.1 Szenarienentwicklung für einen direkten Bauteilvergleich von Stahl- und Carbonbeton

Die monetäre Untersuchung von Carbonbeton und Stahlbeton soll zeigen welche Bauart im direkten Vergleich wirtschaftlicher ist. Dezidierte Aussagen zu den monetären Stärken und Schwächen von Carbonbeton können dabei jedoch nur getroffen werden, wenn konkrete Randbedingungen vorliegen und eine Vergleichsbasis geschaffen wird. Die erste und wichtigste Vergleichsebene ist die bereits beschriebene Äquivalenz in der Tragfähigkeit der Bauteile. Daher können sich die zu vergleichenden Bauteile mitunter in der äußeren Geometrie

¹ Vgl. C³ - Carbon Concrete Composite e. V., <https://www.bauen-neu-denken.de/konzepte/>, Stand 21.02.2015, [zuletzt geprüft am 08.05.2018]

unterscheiden. Die Wahl des Bauteils für den wirtschaftlichen Vergleich, fällt auf ein Neubauteil welches im Fertigteilwerk hergestellt wird. Grund dafür ist die Ausrichtung im Forschungsprojekt C³-V1.1, das sich durch die beteiligten Praxispartner insbesondere mit Carbonbetonbauteilen als Fertig- oder Halbfertigteile befasst. Die Doppel-T-Träger, die in Abbildung 1 und 2 dargestellt sind, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „C³-B2-Bindemittel und Betone“ in einem Fertigteilwerk hergestellt. Die Herstellung der Doppel-T-Träger erfolgte händisch im Werk ohne den Einsatz einer halbautomatisierten Umlaufanlage.

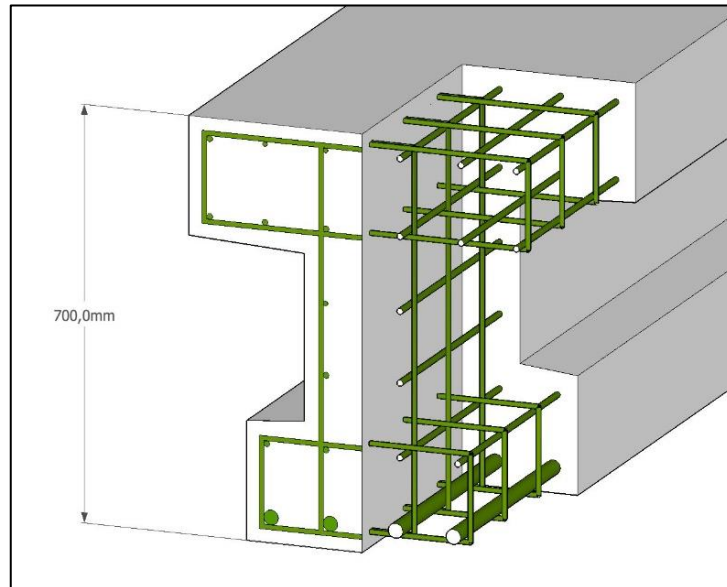


Abbildung 1: Doppel-T-Träger aus Stahlbeton²

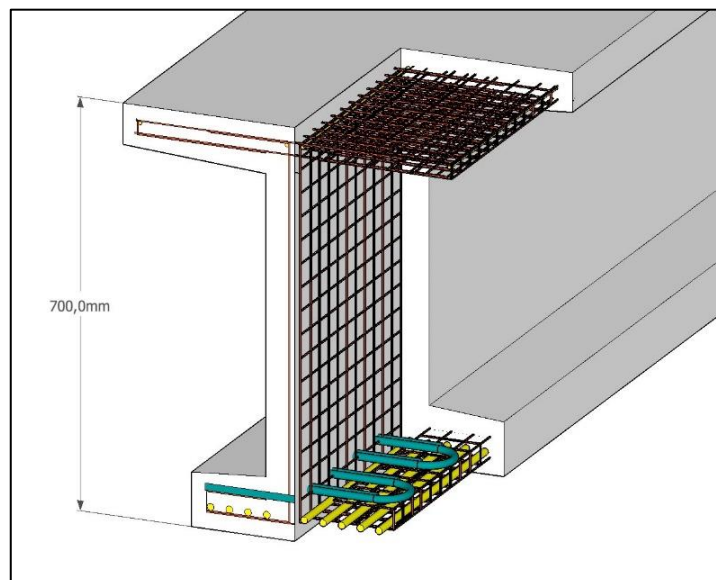


Abbildung 2: Doppel-T-Träger aus Carbonbeton³

² Eigene Darstellung
³ Eigene Darstellung

Für den wirtschaftlichen Vergleich wird ein konkretes Szenario hinsichtlich Stückzahl, Fahrtstrecke zur Baustelle und Montagebedingungen entworfen, so dass eine möglichst realistische monetäre Einschätzung erfolgen kann.

Die Doppel-T-Träger werden zu einer Stückzahl von 20 im Fertigteilwerk hergestellt und anschließend mit einem 40 t LKW mit einer Nutzlast von 20 t auf die Baustelle transportiert. Die Baustelle befindet sich in dem Szenario 200 km entfernt vom Fertigteilwerk. Für den Einbau der Träger vor Ort werden Montagekräne gewählt, die die Last des jeweiligen Trägers über eine Auslegerlänge von 28 m heben müssen.

2.2 Beschreibung des Bauteils und verwendete Materialien

Beide Doppel-T-Träger weisen eine Höhe von 70 cm und eine Breite von 60 cm auf.⁴ Sie unterscheiden sich jedoch in der Stärke der Gurte und des Steges. Diese unterscheidet sich durch die geringere Betondeckung, die beim Carbonbetonträger realisiert werden kann, deutlich voneinander. Beide Träger sind 6 m lang. Der Carbonbetonträger hat ein Gewicht von 1,92 t und ist somit halb so schwer wie der äquivalente Träger aus Stahlbeton, der 3,9 t wiegt. Die zur Herstellung eingesetzten Materialien für die Doppel-T-Träger sind aus dem Forschungsprojekt C³-B2⁵ übernommen.

Für den Stahlbetonträger wurde ein C 30/37 Beton verwendet. Der Stahlbewehrungskorb aus Stab- und Bügelbewehrung wird im Werk händisch gefertigt. Der Beton für den Carbonbetonträger ist ein normalfester Feinbeton, mit der Bezeichnung C3 - B2 – NF – 1 – 150 - 8⁶ und einem Größtkorn von 8 mm, der im Rahmen des Projektes C³-B2 entwickelt worden ist. Der entwickelte Beton stellte die Basis für die Zusammensetzung im Fertigteilwerk dar. Der Bewehrungskorb aus Carbon setzt sich aus Bewehrungsmatten GRID Q95/95-CCE-38⁷ aus Carbon von Solidian, Glasfaserstäben Rebar 12 mm und 6 mm von Solidian⁸ und Kunststoffkonsolen von Schöck zusammen.

Für die Kalkulation der Einzelkosten der Teilleistungen (EKT) werden die Kosten für die Betone grundlegend anhand ihrer Rezeptur und Einwaage berechnet. Die Aufwandswerte zur Ermittlung der Vorgangsdauern bei der Herstellung des Carbonbetonträgers werden bei den Versuchen im Rahmen des Forschungsprojektes V1.1 abgeschätzt.⁹

2.3 Ergebnisse des monetären Bauteilvergleichs

Die Ergebnisse des monetären Bauteilvergleichs des Doppel-T-Trägers in Carbon- und Stahlbetonbauweise sind in €/Stk angegeben. In Tabelle 1 sind die kalkulierten EKTs für den

⁴ Vgl. Schneider/Butler/Mechtcherine: Carbon Concrete Composites C 3 - Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft, in: Beton- und Stahlbetonbau (2017), S.792

⁵ Vgl. C³ - Carbon Concrete Composite e. V., <https://www.bauen-neu-denken.de/vorhaben/b2-bindemittel-und-betone/>, Stand 03.11.2016, [zuletzt geprüft am 08.05.2018]

⁶ Vgl. Schneider/Butler/Mechtcherine: Carbon Concrete Composites C 3 - Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft, in: Beton- und Stahlbetonbau (2017), S.791

⁷ Vgl. Solidian, <https://www.solidian.com/>, Stand 08.05.2018

⁸ Ebd.

⁹ Aufwandswerte für das Bewehren und Betonieren mit Textilbeton liegen bisher noch nicht vor, so dass im Rahmen von V1.1 Aufwandswerte bei den durchgeführten Versuchen und Bauteilherstellung aufgenommen wurden, um eine Einschätzung für die Kalkulation vornehmen zu können.

Carbon- und Stahlbetonträger insgesamt und unterteilt in Herstellungs-, Transport- und Montagekosten dargestellt. Die Herstellungskosten sind des Weiteren in Stoff- und Lohnkosten gegliedert, damit der Einfluss von Baustoffen und Einbauprozessen auf die Kosten aufgezeigt werden kann.

Tabelle 1: Kostenvergleich Carbon- und Stahlbeton für Doppel-T-Träger¹⁰

	Stahlbetonkosten EKT [€/Stk.]	Carbonbetonkosten EKT [€/Stk.]	Carbonbeton/ Stahlbeton
Herstellung	988,00 €	2.289,00 €	2,3
Stoffkosten gesamt	448,00 €	1.546,00 €	3,4
Beton	104,00 €	69,00 €	0,7
Bewehrung	94,00 €	1.214,00 €	13,0
Schalung	239,00 €	253,00 €	1,0
Hilfsmittel	10,00 €	10,00 €	1,0
Lohnkosten gesamt	541,00 €	743,00 €	1,4
Einschalen	237,00 €	237,00 €	1,0
Bewehren	120,00 €	360,00 €	3,0
Beton herstellen	15,00 €	15,00 €	1,0
Betonieren	95,00 €	57,00 €	0,6
Ausschalen	59,00 €	59,00 €	1,0
Nachbehandeln	15,00 €	15,00 €	1,0
Transport	210,00 €	105,00 €	0,5
Transportkosten	203,00 €	102,00 €	0,5
Mautkosten	6,00 €	3,00 €	0,5
Montage	160,00 €	125,00 €	0,8
Lohnkosten	60,00 €	60,00 €	1,0
Gerätekosten	90,00 €	55,00 €	0,6
Materialkosten	10,00 €	10,00 €	1,0
Gesamtkosten	1.359,00 €	2.519,00 €	1,9

Die letzte Spalte in Tabelle 1 zeigt das Verhältnis der Stückkosten zwischen Carbon- und Stahlbeton. Betrachtet man die Komponenten Herstellungs-, Transport- und Montagekosten in Summe, stellt sich heraus, dass der Träger aus Carbonbeton um das 1,85-fach höhere Kosten verursacht als der äquivalente Träger aus Stahlbeton. Das Ergebnis ergibt sich unter den spezifischen Randbedingungen des gewählten Szenarios.

Die reinen Herstellungskosten, zusammengesetzt aus Stoff- und Lohnkosten, sind sogar um das 2,3-fach höher. Ausschlaggebend für die höheren Kosten sind die außerordentlich hohen Bewehrungskosten (13-fach höher), die maßgeblich durch den hohen Carbonpreis der Gelege und Stäbe hervorgerufen werden. Die niedrigeren Betonkosten pro Bauteil sind auf das geringere Betonvolumen des Carbonbetonträgers zurück zu führen. Die höheren Lohnkosten, welche beim Carbonbetonträger 1,4-fach höher sind, kommen durch den erhöhten Zeitaufwand beim Vorgang des Bewehrens zustande. Das Flechten des aufwendigen Bewehrungskorbes, das Anbringen der einzelnen Abstandhalter und der unbekannt Umgang

¹⁰ Eigene Darstellung

mit dem Baustoff Carbon sorgen für die 3-fach höheren Kosten beim Vorgang Bewehren. Die geringen Kosten bei der Betonage kommen durch das geringere Betonvolumen zustande. Allerdings ist das Betonieren des Carbonträgers durch die geringen Maschenweiten des Bewehrungskorbes komplizierter, so dass trotz des halben Volumens ein Faktor von 0,6 ermittelt wurde. Die Kosten von Schalung und Hilfsmittel sowie das Ein- und Ausschalen, Nachbehandeln und Herstellen des Betons unterscheiden sich bei den Trägern nicht voneinander und sind nur der Vollständigkeit halber mit aufgeführt.

Die Transportkosten der jeweils 20 Träger werden auf ein Bauteil umgerechnet und als Stückkosten in Tabelle 1 aufgeführt. Das um die Hälfte geringere Gewicht des Carbonbetonträgers führt dazu, dass doppelt so viele Träger von einem LKW transportiert werden können und somit die Stückkosten um die Hälfte sinken.

Die Montagekosten unterscheiden sich ausschließlich bei den Gerätekosten, die aufgrund unterschiedlicher Geräteauswahl zustande kommt. Der Gewichtsvorteil des Carbonbetonträgers führt zur Auswahl eines kleineren Montagekrans und resultiert in geringeren Kosten für die Gerätemiete.

2.4 Auswertung der Ergebnisse und Einsparpotentiale von Carbonbetonbauteilen

Im direkten Vergleich ist das Bauteil aus Carbonbeton unter momentanen Bedingungen in der Herstellung kostenintensiver als das Stahlbetonbauteil. Grund dafür sind in erster Linie die hohen Stoffkosten des Bewehrungskorbes aus Carbon.

Nachfolgend sind noch einmal die Ursachen für die höheren Herstellungskosten des Carbonbetonträgers aufgeführt:

- 13-fach höhere Stoffkosten der Bewehrung,
- 1,4-fach höhere Lohnkosten für äquivalentes Bauteil,
- jedoch nur 0,7-fach geringere Betonkosten.

Auf Grund der ermittelten Ursachen für die höheren Herstellungskosten ergeben sich Optimierungspotenziale:

- Die Kosten für die Carbonbewehrung müssen drastisch sinken damit die Herstellung von Carbonbeton wirtschaftlicher wird. Eine größere Auswahl von Herstellern für Carbonbewehrung auf dem Markt würde der momentanen Monopolstellung einzelner Hersteller entgegenwirken.
- Die Dimensionierung der Bauteile muss weiter optimiert werden, so dass Vorteile durch den geringeren Betoneinsatz größeren Einfluss haben. Außerdem sollten die Stoffkosten des Feinbetons durch Optimierung der Betonzusammenstellung gesenkt werden.
- Die Lohnkosten können durch Einarbeitungseffekte und effizientere Herstellung gesenkt werden. Mehraufwand bei der Herstellung wird insbesondere durch Anbringen punktförmiger Abstandhalter hervorgerufen. Wenn keine erhöhten Oberflächenqualitäten erforderlich sind, sollten lineare Abstandhalter eingesetzt werden. Formstücke aus Carbongelege würden die Herstellungszeit des Bewehrungskorbes weiter herabsetzen. Jedoch sind die Stoffkosten der Formstücke momentan noch so hoch, dass

die Kosteneinsparung der geringeren Herstellungszeit für die Gesamtkosten keine Auswirkung hätte.

Betrachtet man nur die Herstellungskosten äquivalenter Bauteile aus Carbon- und Stahlbeton, ergeben sich zusammengefasst die größten Einsparpotentiale bei den reinen Stoffkosten der Carbonbewehrung. Diese sind hauptsächlich für die 2,3-fach höheren Herstellungskosten verantwortlich. Die höheren Lohnkosten auf Grund des erhöhten Herstellungsaufwandes sind anteilig deutlich niedriger.

Einsparpotenziale gegenüber herkömmlichen Bauarten sind somit zum momentanen Zeitpunkt nicht bezüglich der Herstellung der Bauteile zu sehen, jedoch beim Transport und der Montage von Fertigteilen. Das geringere Gewicht des Carbonbetonteils ist dabei der entscheidende Faktor. Für das Vergleichsszenario des Doppel-T-Trägers können folgende Einsparpotenziale ausgemacht werden:

- 0,5-fach geringere Transportkosten pro Bauteil
- 0,8-fach geringere Montagekosten pro Bauteil

Wichtig sind immer die konkreten Randbedingungen eines Auftrages, wie die Stückzahl der Fertigteilenelemente, die Montagbedingungen auf der Baustelle oder die Auswahl der Geräte. Das geringere Gewicht hat insbesondere großen Einfluss auf die Transportkosten, da pro LKW deutlich mehr Fertigteile transportiert werden können. Dieser Effekt ist jedoch nur ab einer bestimmten Anzahl von Elementen zu erkennen. Welche Anzahl notwendig ist hängt dabei von dem individuellen Bauteil ab.

3 Qualitative Hinweise für Carbon- und Stahlbetonbauteile

Bei der Herstellung von Carbonbetonbauteilen können aufgrund der besonderen Eigenschaften der Materialien neue Schwierigkeiten auftreten, die im Rahmen der konventionellen Stahlbetonbauweise unbekannt sind. Auch über den Herstellungsprozess hinaus weisen Bauteile aus Carbonbeton Vor- und Nachteile gegenüber Stahlbetonbauteilen auf.

3.1 Anwendungshinweise für die Herstellung von Carbonbetonbauteilen im Gießverfahren

Während der Herstellung des Doppel-T-Trägers aus Carbonbeton sowie bei anderen Neubauteilen im Rahmen des Forschungsprojektes C³-V1.1 konnten erste Erkenntnisse zur Qualitätssicherung während des Herstellungsprozesses gewonnen werden:

- Carbongelege müssen aufgrund der geringen Dichte beim Gießverfahren gegen Aufschwimmen gesichert werden,
- bei geringen Maschenweiten ist ein Arbeitsschritt für die Schaffung von Aussparungen für Einbauteile oder Innenrüttler vorzusehen,
- Rezepturen der im C³-Projekt entwickelten Betone erwiesen sich hinsichtlich ihrer Konsistenz als störanfällig und feuchtesensibel. Gründe hierfür können falsche Anteilverhältnisse, unterschiedliche Mischertypen und Chargengrößen sein.

Generell ist festzuhalten, dass es bei hochbewehrten und komplexen Bauteilen zu Problemen mit der Verteilung und Verdichtung des Betons kommen kann. Bei weniger komplexen

Bauteilen aus Carbonbeton, z. B. plattenartigen Bauteilen, erweist sich das Einbringen des Betons als weniger problematisch.

3.2 Qualitative Bewertungskriterien für Carbonbetonbauteile

Nicht nur monetäre Kriterien können bei der Bewertung von Carbonbetonbauteilen entscheidend sein. Qualitative Kriterien sowie Vor- und Nachteile, die zum Beispiel aus der Materialzusammensetzung hervor gehen, können ebenfalls großen Einfluss auf eine Bewertung des Carbonbetonbauteils haben.

Neben dem offensichtlichen Vorteil des Carbonbetons, nämlich der nicht vorhandenen Korrosion der Bewehrung, sind auch andere wichtige Vorteile bei der Herstellung, der Montage und der Nutzungsphase zu nennen. Allerdings sind auch Nachteile und noch zu lösende Herausforderungen bezüglich des Carbonbetons aufzuzählen. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sollen einige Vor- und Nachteile von Carbonbetonbauteilen im Vergleich zu denen aus Stahlbeton genannt werden. Diese wurden bisher nicht quantifiziert, sondern werden lediglich genannt, um auf einen noch bestehenden Forschungsbedarf hinzuweisen.

Die wichtigsten Vorteile von Carbonbetonbauteilen bestehen während des Herstellprozesses bei der körperlichen Belastung der Arbeiter. Durch das geringe Gewicht der Bewehrung verringert sich die körperliche Belastung der Arbeiter deutlich. Zusätzlich sind keine Hebezeuge notwendig. Außerdem sind Bewehrungsmatten deutlich einfacher zu modifizieren, durch einfaches Heraustrennen von Gelegeteilen für Aussparungen. Insgesamt ist die Herstellung eines Carbonbetonbauteils häufig jedoch komplexer als die eines Stahlbetonbauteils. Gründe dafür sind unter anderem die problematische Einhaltung der Lagestabilität der Bewehrung und die Störanfälligkeit der Betonrezepturen. Die Herstellprozesse für Carbonbetonbauteilen müssen daher hinsichtlich des Umgangs mit Carbon noch weiterentwickelt werden.

Das geringere Gewicht von äquivalenten Bauteilen aus Carbonbeton führt außerdem zu weiteren Vorteilen. Carbonbetonbauteile sind in Bezug auf den Beton deutlich ressourceneffizienter. Bei dem Vergleich der Doppel-T-Träger ist eine Betoneinsparung von 50 % zu verzeichnen. Die vorgesehene Lebensdauer von Carbonbetonbauteilen soll die Lebensdauer von Stahlbetonbauteilen durch die Korrosionsbeständigkeit deutlich übertreffen. Die Dauerhaftigkeit von Carbonbetonbauteilen ist jedoch in der Praxis noch zu testen.

Auch andere Fragen im Zusammenhang mit der Gebrauchstauglichkeit, dem Rückbau und Recycling oder dem Brandverhalten von Carbonbetonbauteilen sind derzeit noch nicht vollständig geklärt und Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben.

4 Zusammenfassung

Die wirtschaftliche und qualitative Bewertung von Carbonbetonbauteilen ist Bestandteil des Verbundvorhabens C³-V1.1 „Entwicklung von Herstell- und Verarbeitungsprozessen von Carbonbeton“. Die monetäre Bewertung beruht auf dem Vergleich äquivalenter Bauteile aus Carbon- und Stahlbeton. Die Äquivalenz besteht dabei in der Tragfähigkeit beider Bauteile. Anhand eines entwickelten Auftragsszenarios für zwei im Fertigteilwerk hergestellte Doppel-T-Träger werden jeweils Herstell-, Transport- und Montagekosten ermittelt und miteinander verglichen. Der Vergleich der Gesamtkosten zeigt unter den zu Grunde gelegten Randbe-

dingungen, dass der Carbonbetonträger um das 1,9-fach höhere Kosten verursacht. Grund dafür sind die deutlich höheren Herstellkosten pro Stück. Insbesondere der hohe Carbonpreis ist für die hohen Stoffkosten des Carbonträgers verantwortlich. Die Transport- und Montagekosten sind für den Carbonbetonträger geringer als für den Stahlbetonträger. Dies begründet sich in dem geringeren Gewicht des Carbonbetonträgers. Der Vergleich der beiden Bauteile zeigt über die monetären Schwächen des Carbonbetonträgers hinaus jedoch auch qualitative Stärken. Die Betoneinsparung um 50 % zeigt deutlich, dass eine ressourcenschonendere Bauweise mit Carbonbeton möglich ist.

Literaturverzeichnis

C³ - Carbon Concrete Composite e. V. (2015)

<https://www.bauen-neu-denken.de/konzepte/>, Stand 21.02.2015, [zuletzt geprüft am 08.05.2018]

C³ - Carbon Concrete Composite e. V. (2016)

<https://www.bauen-neu-denken.de/vorhaben/b2-bindemittel-und-betone/>, Stand 03.11.2016, [zuletzt geprüft am 08.05.2018]

Schneider, K./Butler, M./Mechtcherine, V. (2017)

Carbon Concrete Composites C 3 - Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft, in: Beton- und Stahlbetonbau 112 (12), S. 784-794, 2017

Solidian (2018)

<https://www.solidian.com/produkte/>, Stand 08.05.2018