

Lebenszyklusbezogene Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Bauteilen aus Carbonbeton

J. Otto, A. Jahn, R. Wiel

ZUSAMMENFASSUNG Carbonbeton als Materialsurrogat für Stahlbeton muss sich bewähren. Es stellt sich unter anderem die Frage, wie nachhaltig diese Baustoffkombination ist. Neben der ökologischen Perspektive lässt sich diese Frage auch aus ökonomischer Sicht beantworten. Dazu muss die Wirtschaftlichkeit während des gesamten Lebenszyklus betrachtet werden. Gegenstand dieser Veröffentlichung ist der monetäre Vergleich des Aufwandes für die Herstellung, Nutzung sowie abschließende Verwertung eines Bauteils aus Carbonbeton mit einem vergleichbaren Bauteil aus Stahlbeton. Im Ergebnis ist festzustellen, dass die Herstellkosten der Bauteile aus Carbonbeton derzeit mindestens 30 % über denen aus Stahlbeton liegen. Auch zukünftige Preisentwicklungen werden Bauteile aus Carbonbeton vermutlich nicht kostengünstiger als Bauteile aus Stahlbeton realisieren lassen. Die Vorteilhaftigkeit ergibt sich aber, wenn nach dem Abriss der Bauteile Erlöse aus recyklierten Carbonfasern generiert werden können oder die Herstellkosten ins Verhältnis zur Nutzungsdauer der Bauteile gesetzt werden. Infolge der längeren Haltbarkeit von Carbonbeton ergibt sich bereits ein Kostenvorteil pro Nutzungsjahr, wenn die Bauteile circa 30 Jahre länger nutzbar sind.

STICHWÖRTER

Berechnung, Betonbau, Nachhaltigkeit, Lebenszyklus

Life-cycle-cost-efficiency of components made of carbon concrete

ABSTRACT Carbon concrete as a material substitute for reinforced concrete must prove itself. The question arises as to how sustainable this building material combination is. In addition to the ecological perspective, this question can also be answered from an economic point of view. For this purpose, the economic efficiency during the entire life cycle must be considered. The subject of this publication is the monetary comparison of the costs for the production, use and final recycling of a component made of carbon concrete with a comparable component made of reinforced concrete. The result is that the manufacturing costs of components made of carbon concrete are currently at least 30 % higher than those of reinforced concrete. Future price developments will probably not make carbon concrete components more cost-effective than reinforced concrete components. However, it will be more advantageous if, after the demolition of the components, revenues can be generated from recycled carbon fibres or if the manufacturing costs are put in relation to the useful life of the components. As a result of the longer durability of carbon concrete, there is already a cost advantage per year of use if the components can be used for around 30 years longer.

1 Ausgangslage

Klimawandel, nachhaltiges Bauen, schwankende Materialpreise, ökologische Anforderungen und natürliche Ressourcenknappheit führen derzeit zu einem Wandel im gesellschaftlichen Anspruchsdenken. Da der Bedarf an Bauwerken und Infrastruktur auch zukünftig unverändert hoch sein wird, kann Nachhaltigkeit im Bausektor nur durch Erhalt der vorhandenen Bausubstanz oder Alternativen zu konventionellen Bauarten erreicht werden. Die klassische Stahlbetonweise bewährt sich seit Jahrzehnten, bringt jedoch signifikante Nachteile durch ein hohes Global Warming Potential (GWP, quantifiziert als kg CO₂-Äquivalent), einen hohen Verbrauch an Energie und natürlichen Ressourcen sowie eine begrenzte Lebensdauer infolge Korrosion der Bewehrung mit sich. Zurückzuführen sind diese Nachteile unter anderem auf die hohe, statisch oft nicht erforderliche Betonüberdeckung des Betonstahls sowie massigen Bauteilformen. [1] Bei Bauteilen aus Carbonbeton wird die Stahlbewehrung durch stab- oder mattenförmige Carbonbewehrung ersetzt. Da die Carbonbewehrung nicht vor Korrosion zu schützen ist und im Vergleich zu Betonstahl eine höhere Zugfestigkeit aufweist, können Bauteile aus Carbonbeton deutlich schlanker ausgebildet werden. [2–4]

Dies führt zur Materialreduzierung von bis zu 50 % [5], was sich wiederum spürbar auf die Nachhaltigkeit dieser Betonkonstruktionen auswirkt. Untersuchungen an ausgewählten Beispielen zeigen, dass der CO₂-Ausstoß von Bauteilen aus Carbonbeton um circa 26 % gegenüber Stahlbetonbauteilen gesenkt werden konnte. [6] Weiterhin versprechen Bauteile aus Carbonbeton infolge der ausbleibenden Korrosion der Bewehrung eine deutlich längere Haltbarkeit. [7]

Nachhaltigkeit beinhaltet jedoch nicht nur die ökologische Dimension, sondern ebenfalls die ökonomische und soziale Dimension. Die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit müssen dabei im Kontext des gesamten Lebenszyklus, von der Rohstoffgewinnung, der Herstellung der Baustoffe und des Bauwerkes, der Nutzung bis zur Verwertung der rückgebauten Bauteile betrachtet werden. Für die Untersuchung der ökonomischen Dimension über den Lebenszyklus wird üblicherweise das Instrument der Lebenszykluskostenrechnung (engl.: Life Cycle Cost Analysis, LCCA) herangezogen. Eine ausschließliche Bewertung der Herstellungsphase (Modul A1 bis A5 nach DIN 15804) [8] führt zu einer unzureichenden Betrachtung, da diese die Aspekte der längeren Nutzungsdauer, der geringeren Instandhaltungskosten (Modul B) und die ggf. geringeren Kosten aus Rückbau und Wiederverwen-

dung / Deponierung des dabei gewonnenen Materials (Module C und D) außer Acht lässt. Die Kosten in der Herstellungsphase von Bauteilen aus Carbonbeton liegen derzeit über den Kosten von vergleichbaren Stahlbetonbauteilen. Beispielhafte Untersuchungen beziffern diese Mehrkosten auf den Faktor 1,3 bis 1,9. [5] Begründet wird dies mit höheren Materialpreisen für die Carbonbewehrung und den teilweise höheren Lohnkosten beim Schalen, Bewehren und Betonieren. Eine Studie zum Wissenstransfer von Carbonbeton zeigte in diesem Zusammenhang, dass die reinen Herstellungskosten als ein Hindernis zur Etablierung des Carbonbetons angesehen werden, die Lebenszykluskosten jedoch nicht als signifikantes Hindernis eingeschätzt werden. [9] Daher gilt es zu untersuchen, inwieweit die ökonomischen Vorteile der Carbonbetonbauweise insbesondere durch die längere Lebensdauer quantifizierbar sind und zumindest die bauteilbezogene Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zugunsten des Carbonbetons positiv beeinflussen.

2 Bewertungsmodell der bauteilbezogenen LCCA

Um vorgenannte Umfrageergebnisse [9] zu validieren und zu konkretisieren, wurden im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten LCCA für ausgewählte Bauteile aus Carbonbeton durchgeführt und mit äquivalenten Bauteilen aus Stahlbeton verglichen. Die Aussagekraft der Lebenszykluskostenbetrachtung ist dabei vor allem von der Methodik und der Qualität der gewählten Ausgangsparameter abhängig. Beides wird in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert.

2.1 Grundlagen und methodisches Vorgehen

Die Methodik der hier gegenständlichen Analyse besteht aus fünf grundlegenden Schritten: [10]

1. Erstellung eines Bewertungsmodells für die zeitliche und quantitative Definition,
2. Recherche und Festlegung von Zeit-, Mengen- und Kostenansätzen,
3. Analyse und Auswahl der Referenzbauteile,
4. Aufstellen des Bewertungsmodells mit bauteilbezogenen Kostenansätzen,
5. Analyse und Auswertung der Ergebnisse, Vergleich und Szenarienbetrachtung.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgt in der durchgeführten Analyse auf der Grundlage eines Lebenszyklusmodells, welches basierend auf den Lebenszyklusphasen nach DIN 15804 aufgebaut ist. In der vorliegenden Untersuchung wurde anstelle der Herstellungsphase der gesamte Lebenszyklus der Referenzbauteile analysiert. Andere Veröffentlichungen fokussieren sich lediglich auf die Herstellungsphase (Module A1–A5). [10, 11, 5] Da die Vorgaben nach DIN 15804 für Bauwerksanalysen konzipiert sind, fanden im Rahmen dieser Untersuchung Anpassungen für eine bauteilorientierte Lebenszykluskostenbetrachtung der in Abschnitt 1 genannten Phasen statt. Die Nutzungsphase wird lediglich qualitativ bewertet. Es erfolgt keine Umlage von fiktiven Gebäudenutzungskosten auf die Referenzbauteile, da Massivbauteile üblicherweise keine Instandhaltung erfordern. Lediglich der Aufwand einer später erforderlichen mehr- oder weniger einfach umsetzbaren Verstärkung der Bauteile könnte bewertet werden (Abschnitt 2). Die Einordnung der Nutzungsphase erfolgt in die-

ser vorliegenden Analyse daher ausschließlich über die Betrachtung der angegebenen Nutzungsdauern (Abschnitt 4), nicht jedoch der Kosten dieser Phase. Im Rahmen der hier zugrundeliegenden Untersuchungen wurden mehrere vergleichbare Wandkonstruktionen aus Stahl- und Carbonbeton untersucht (Doppelwände, Thermowände). Die konkreten Ergebnisse für Doppelwände sind in Abschnitt 3 näher dargestellt.

2.2 Umfang des bauteilorientierten Bewertungsmodells

Für die Ergebnisdiskussion ist der beschriebene Umfang der Analyse signifikant und ermöglicht einen Vergleich mit Ergebnissen von Studien differenter Herkunft. Der Lebenszyklus umfasst die Bereitstellung der Baustoffe (Modul A1, A2 nach DIN 15804), die Herstellung der Bauelemente (A3) sowie den Einbau der Elemente in das Bauwerk (A4, A5). Die Bewertung der Nutzungsphase (B) wurde in Abschnitt 2.1 erläutert. Der Lebenszyklus endet mit dem vollständigen Rückbau bzw. dem Abbruch der Bauteile (C1, C2), wobei die Einzelkomponenten getrennt, sortiert und entsorgt werden (C3, C4). In der in Abschnitt 3.3 durchgeführten Szenarienbetrachtung können auch Verwertungserlöse zum Ende des Lebenszyklus quantifiziert werden (D). Die Gesamtheit des Untersuchungsspektrums beschreibt demnach den vollständigen Lebenszyklus der Referenzbauteile. Unberücksichtigt bleiben Instandhaltungs- und Umbaukosten.

Vorteile aus Reduzierung der Massen von Bauteilen aus Carbonbeton wurden ausschließlich bauteilbezogen betrachtet, eine bauwerksbezogene Bewertung, zum Beispiel durch geringer dimensionierte Gründungkörper, wurde nicht betrachtet. Gleiches gilt für die Erhöhung der nutzbaren Raumflächen durch dünnere Wandkonstruktionen aus Carbonbeton.

2.3 Kostenansätze

Für die monetäre Bewertung der in Abschnitt 2.2 genannten Leistungen ist die Bewertung der bauteilbezogenen Mengen sowie der zugehörigen Kostenansätze erforderlich. Die Quellen der Kostenansätze variieren von eigenen Erfahrungswerten, spezifischen Herstellerangaben, unternehmensbezogenen Kennwerten, Literaturangaben bis hin zu sinnvoll festgelegten Annahmen. Zeitpunkt der Kostenermittlung war das Jahr 2022, das Kosten-niveau entspricht marktüblichen Werten ohne krisenbedingte Preiszuschläge. Unterstützt wurde die Zusammenstellung dabei von Arbeiten im Rahmen aktueller Forschungsarbeiten im Forschungsprojekt RUBIN-ISC. [12] Nachfolgend wird auf einzelne Kostenansätze näher eingegangen. An dieser Stelle ist anzumerken, dass es sich bei den Angaben um Kalkulationsansätze handelt, die im Sinne der Baupreiskalkulation unterschiedliche Kostenbestandteile (EKT, BGK, AGK, WuG) beinhalten. Sie dienen lediglich zum Vergleich der Referenzbauteile in dieser Analyse, da die Komplexität der verschiedenen Kostenansatzquellen eine Ermittlung der reinen Selbstkosten über den Lebenszyklus erschwert.

a) Kosten in der Herstellungs- und Bauphase (A1–A5)

Auf Grund der Exklusivität der Referenzbauteile wird bei den Herstellkosten der Bauteile (A1–A3) auf die Angaben der jeweiligen Hersteller zurückgegriffen. Die zur Verfügung stehenden Werte setzen sich aus kalkulatorisch zu berücksichtigenden Kos-

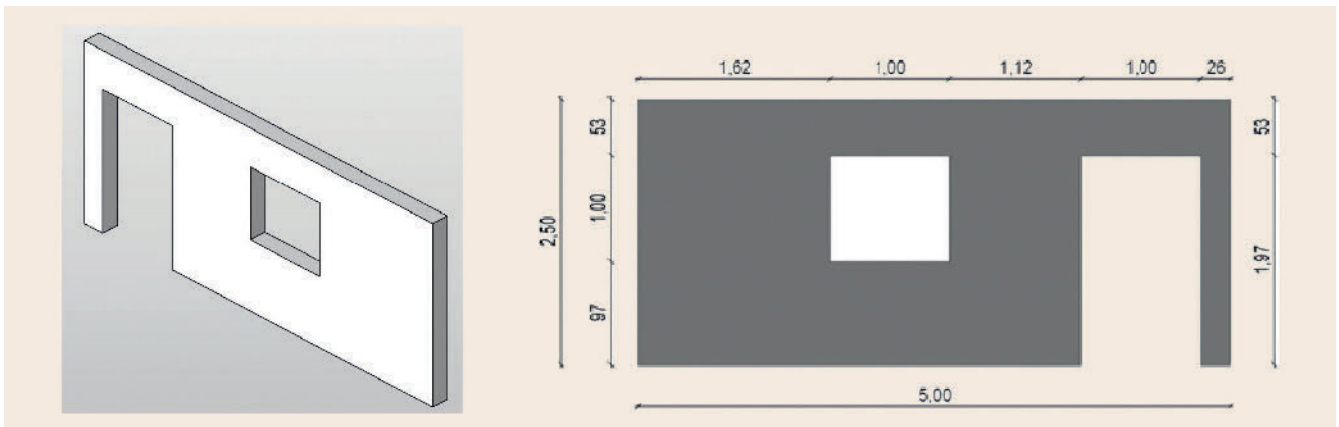


Bild 1. Isometrie und Ansicht des Referenzbauteils *Grafik: Eigene Darstellung*
 Fig. 1. Isometry and view of the reference element *Source: Own illustration*

ten des Herstellers (Fertigteilwerk) zusammen. Die Herstellkosten (der Baustelle) bestehen aus den Liefer-, Montage- und Komplettierungskosten. Für die Referenzbauteile aus Stahlbeton ist die Datenlage durch langjährige Erfahrung der Hersteller gesichert. Die Kosten in der Bauphase (A4–A5) werden gleichermaßen aus Erfahrungswerten etablierter Bauunternehmen abgeleitet. Es handelt sich dabei um wirtschaftlich qualifizierte Ansätze mit mittlerem Kostenniveau. Neben den Bereitstellungskosten für Baustoffe und Bauteile wurde der Transport (A2, A4) sowie der Einbau in das Bauwerk (A5) berücksichtigt.

b) Kosten in der Nutzungsphase (B)

Aus der bauteilorientierten Betrachtung der Lebenszykluskosten lässt sich lediglich eine qualitative Betrachtung der Nutzungsphase über die Nutzungsdauer der Bauteile ableiten. Die Bauteilkonstruktion an sich verursacht während derer Nutzung (B1) keine laufenden Kosten. Allein im Rahmen von bauteilspezifischen Instandhaltungs- und Umnutzungsszenarien (B2 bis B5) entstehen Kosten, die jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht sinnvoll ermittelt werden können und daher unberücksichtigt bleiben. Die Kosten in der Nutzungsphase werden daher sowohl für Stahlbeton- als auch für Carbonbetonbauteile mit „0,00 €“ angesetzt. Ausschließlich die Dauer der Nutzung dieser Bauteile variiert zwischen den beiden Konstruktionsformen (Abschnitt 4).

c) Kosten in der Rückbau- und Entsorgungsphase (C)

Die Kosten in der Rückbau- und Entsorgungsphase setzen sich aus den Abbruch-, Sortierungs- / Separations- und Transportkosten (C1–C3) sowie den Deponiekosten (C4) zusammen. Der bauelementbezogene Rückbau mit anschließender Wiederverwendung der Bauteile wird nicht betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass die Bauteile nicht als Ganzes wiederverwendet werden können. Die Bauteile werden vollständig rückgebaut und gebrochen. Potenziale der Wiederverwendung des gebrochenen Materials (D) werden in nachfolgendem Abschnitt behandelt. Die Betrachtung der Entsorgungskosten für die Carbonbetonbauteile wird in der folgenden Szenarienanalyse in prozentualen Bezug zu den Entsorgungskosten von Stahlbetonbauteilen bewertet. Für diese Annahmen wird auf experimentelle Untersuchungen zurückgegriffen. [13]

d) Erlöse und Vorteile (D)

Erlöse und Vorteile entstehen durch die Rückgewinnung von Baustoffen aus den abgebrochenen Bauelementen. Unter Beachtung aktueller Marktpreise sind hier Verwertungserlöse ausschließlich bei Betonstahl möglich, da derzeit noch keine wirtschaftliche und praxistaugliche Alternative zur Aufbereitung von Carbonbetonbauteilen besteht. Die Erlöse sind stark von dem aktuellen Stahlpreis abhängig, sodass die Aktualität der beschriebenen Werte in der Nachdiskussion stets zu überprüfen ist. Die Verwertung der Carbonfasern und die Betrachtung des möglichen Betonrecyclings [13] erfolgt unter Beachtung verschiedener Separationsgrade in der Szenarienanalyse in Abschnitt 3.3.

3 Bauteilbezogene LCC-Bewertung

3.1 Referenzbauteil

Im Rahmen dieser Analyse soll ein Doppelwandelement ($L \times H = 5,00 \text{ m} \times 2,50 \text{ m}$), das in einem modularen Bausystem implementiert ist, betrachtet werden. Dazu wird eine Fertigteilkonstruktion aus Stahlbeton mit einer Konstruktion aus Carbonbeton verglichen. Hinzuweisen ist insbesondere auf die variierende Bauteildicke infolge der unterschiedlichen Bewehrungsarten (15 cm bzw. 21 cm). In der **Bild 1** ist die Geometrie des Referenzbauteils als Isometrie sowie als Ansicht dargestellt.

3.1.1 Doppelwand Carbonbeton (CB)

Als Material für die Innen- und Außenschalen sowie deren Verbindung wird CB verwendet. Der detaillierte Querschnitt sowie die Materialangaben sind der **Bild 2** zu entnehmen. Nennenswert ist in diesem Zusammenhang die Breite der Innen- und Außenschale von lediglich 3 cm. Möglich ist dies durch die sehr geringe Betondeckung und die hohe Zugfestigkeit der Carbonbewehrung. Auf Grund dieser Geometrie müssen spezielle Transportanker zum Heben der Elemente im Fertigteilwerk sowie auf der Baustelle verwendet werden.

3.1.2 Doppelwand Stahlbeton (SB)

Für das Material des alternativen Referenzbauteils der Doppelwand wird für die Herstellung der Innen- und Außenschalen SB

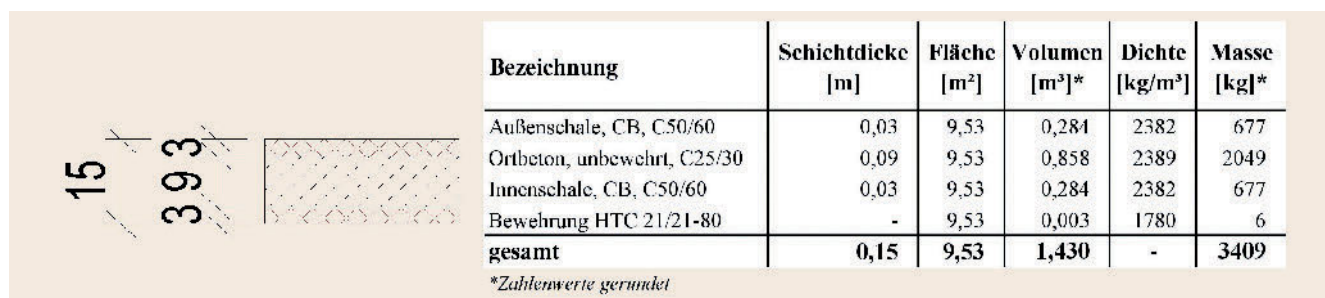


Bild 2. Querschnitt, Aufbau und Mengenermittlung Doppelwand aus Carbonbeton Grafik: Eigene Darstellung

Fig. 2. Cross-section, structure and quantity calculation of double wall made of carbon concrete Source: Own illustration

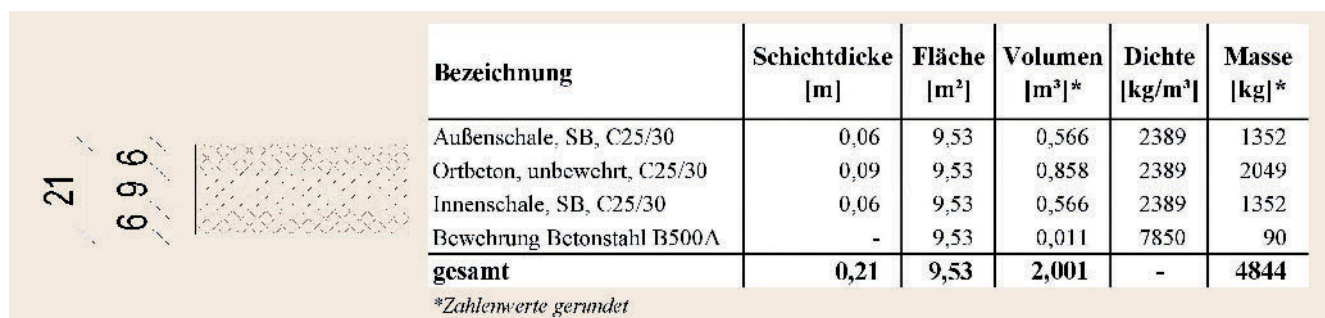


Bild 3. Querschnitt, Aufbau und Mengenermittlung Doppelwand aus Stahlbeton Grafik: Eigene Darstellung

Fig. 3. Cross-section, structure and quantity calculation of double wall made of reinforced concrete Source: Own illustration

Bild 4. Auszug aus der LCC-Berechnung A1–A3 Referenzbauteil CB Grafik: Eigene Darstellung
Fig. 4. Extract from the LCC calculation A1 – A3 Reference component CB Source: Own illustration

Phase	Phasenbeschreibung	Menge*	Einheitskosten	Gesamtkosten
A1 - A3	Herstellungsphase			1.703,07 €
A1	Rohstoffbereitstellung			814,87 €
A1.1	Innenschale CB, C50/60	0,284 m³	130,00 €/m³	36,96 €
A1.2	Ortbetonkern, unbewehrt, C25/30	0,858 m³	100,00 €/m³	85,77 €
A1.3	Außenschale CB, C50/60	0,284 m³	130,00 €/m³	36,96 €
A1.4	Bewehrung, HTC 21/21-80	19,060 m²	22,90 €/m²	436,47 €
A1.5	Abstandhalter, Transportanker, etc.	9,530 m²	22,95 €/m²	218,71 €
A2	Rohstoffanlieferung zum Fertigteilwerk	in A1 inkludiert		0,00 €
A3	Herstellung Fertigteil			888,20 €
A3.1	Doppelwand als Halbfertigteil (Lohn- und Fertigungsgemeinkosten, AGK)	9,530 m²	93,20 €/m²	888,20 €

*Zahlenwerte gerundet

verwendet. Die detaillierten Materialangaben sowie der Querschnittsaufbau sind der **Bild 3** zu entnehmen. Die konstruktiv erforderlichen Bauteildicken der Schalen ergeben den maßgeblichen Massenunterschied von circa 1,4 t zum Referenzbauteil aus CB (4,8 t zu 3,4 t). Einbauteile (Abstandhalter, Transportanker, etc.) bleiben in der Gesamtmasse der Bauteilkonstruktionen unberücksichtigt. Unter Berücksichtigung überschlägiger Kostenansätze führen sie jedoch zur Erhöhung der Herstellkosten der Fertigteile (**Bild 4**).

3.2 LCC-Berechnung

Die folgende LCC-Berechnung basiert auf den in Abschnitt 2 und Abschnitt 3.1 genannten Annahmen. In einem nächsten Schritt wurden nunmehr alle Module nach DIN 15804 hinsichtlich des Leistungsumfanges bestimmt und monetär bewertet. In **Bild 4** findet sich dazu auszugsweise die Zusammenstellung der Ergebnisse für das Fertigteil aus CB der Module A1 bis A3.

Weiterführend wurden für das Fertigteil aus CB die Module A4 und A5 sowie die Module C und D bewertet. In gleicher Art

und Weise erfolgt die Bewertung der erwarteten Kosten für das Fertigteil aus SB. Eine Zusammenstellung aller Ergebnisse zeigt **Bild 5**.

Der Berechnung in **Bild 5** ist zu entnehmen, dass in der Herstellungsphase das Bauteil aus CB mit 1 905,84 € circa 28 % höhere Kosten verursacht als das Bauteil aus SB. Hintergrund hierfür sind die höheren Materialkosten für das Carbonegelege sowie die Mehraufwendungen bei der Herstellung der Fertigteile. Im Gegensatz dazu führt das geringere Volumen der Fertigteile aus CB zu geringeren Transportkosten auf die Baustelle. Die Aussagen decken sich annähernd mit den Aussagen in [5].

Das Modul B führt zu keinen Kosten (Abschnitt 2.3). Im Modul C führt das Bauteil aus CB zu circa 29 % höheren Kosten. Trotz deutlich geringerer Abbruchkosten führen die circa 9-fach höheren Kosten für die Deponierung der gesamten Carbonbetonmatrix (circa 210,00 €/t) zu diesen Ergebnissen. Die angegebenen 29,53 €/Fertigteil (SB, = 6,10 €/t) resultieren hauptsächlich aus der Verwertung des gebrochenen Materials. Im Modul D wird das Bauteil aus CB mit 0,00 € bewertet. Das Bauteil aus SB führt zu Erlösen infolge der Wiederverwendung

des Betonstahls in Höhe von 17,77 €/Fertigteil (200,00 €/t Betonstahl).

Im Ergebnis der LCC-Berechnung führt das Bauteil aus SB zu Kosten in Höhe von 1 934,23 €, das Bauteil aus CB zu 2 509,22 €. Dies entspricht Mehrkosten von 30 %.

Da vorgenannten Kostenansätzen sehr spezifische Randbedingungen zugrunde liegen, ist für die Verallgemeinerung der Ergebnisse die Analyse der Auswirkungen variierender Randbedingungen erforderlich. Dies erfolgt im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse (Abschnitt 3.3).

3.3 Szenarienanalyse

Basierend auf den zeitlich, regional und projektspezifischen Besonderheiten, vor allem auch in Bezug auf geopolitische Ereignisse und die Ressourcenknappheit, werden im Rahmen der folgenden Analyse verschiedene Szenarien für die Variation der Kostenansätze betrachtet. Im Einzelnen werden dazu die Auswirkungen folgender vier Parameter auf die monetäre Vorteilhaftigkeit der Bauweisen berücksichtigt:

- (1) Preis Frischbeton,
- (2) Preis Carbonbewehrung,
- (3) Separationsgrad (beim Recycling von) Carbonbeton und
- (4) Verkaufserlös rCF (rezyklierte Carbonfaser).

Die Veränderung der Materialpreise ((1) Frischbeton: – 100 % bis + 200 % und (2) Carbonbewehrung: – 100 % bis + 100 %) wirkt sich direkt auf die Herstellkosten der Bauteile aus. Es ist infolge der hohen Nachfrage insbesondere davon auszugehen, dass der Preis für Carbonbewehrung zukünftig signifikant sinken wird. [5], [14] Der Preis für Frischbeton wird im Vergleich dazu moderat steigen. Das Recycling von CB wird über den Separationsgrad der Bewehrungsstruktur (3) im Bezug zur bewehrten Betonmatrix beschrieben (0 % bis + 100 %). Bei einer ideellen sortenreinen Trennung können 100 % Separationsgrad erreicht werden. Weitere Informationen zur diesbezüglichen Bewertung unterschiedlicher Separationsverfahren finden sich beispielsweise in. [13] Der Verkaufserlös der rCF wird in drei prozentualen Absolutbeträgen zum Neupreis der Carbonbewehrung (4) angegeben (+ 5 %, + 20 %, + 35 %) und reduziert die LCC-Gesamtkosten von Bauteilen aus CB. Orientiert man sich an dem Verhältnis des Preises von neuem Betonstahl zu Stahlschrott, erscheint der Wert in Höhe von 20 % realistisch. Aktuelle Forschungsarbeiten am Institut für Baubetriebswesen der TU Dresden fokussieren das Recycling und die Wiederaufarbeitung von Carbonfasern. [14]

Die Szenarienanalyse unterscheidet weiterhin in zwei multiple Szenarien für die zukünftige Entwicklung: Zum einen das „Best-Case-Szenario“, zum anderen ein „realistisches Szenario“. Die zu Grunde liegenden Annahmen für das Jahr 2022 (Basiswerte), der Untersuchungsbereich dieser Annahmen sowie die Randbedingungen beider Zukunftsszenarien sind in **Bild 6** zusammengefasst.

Nachfolgend wird auf die wichtigsten Ergebnisse der Szenarienanalyse für das hier gegenständliche Bauteil eingegangen.

a) Herstellkosten (A1 bis A3)

Da der Anteil der Materialkosten für Carbonbewehrung (A1) an den gesamten Herstellkosten des Fertigteils (A1 bis A3) nur einen Anteil von circa (436,47 €/1 703,07 € =) 25 % hat, wird

Phase	Bauteil CB	Bauteil SB	CB/SB
	[C/St]	[C/St]	[%]
A1	814,87	479,36	+70
A2	0,00	0,00	
A3	888,20	667,10	+33
A4	127,77	262,52	-51
A5	75,00	75,00	0
A1 - A5	1.905,84	1.483,98	+28
B	0,00	0,00	
C1	58,09	112,60	-48
C2	248,73	292,36	-15
C3	0,00	33,53	
C4	296,56	29,53	+904
C1 - C4	603,38	468,02	+29
D	0,00	-17,77	
A - D	2.509,22	1.934,23	+30

Bild 5. LCC-Berechnung Gesamtkostenvergleich Bauteil CB und SB (Module A–D) Grafik: Eigene Darstellung

Fig. 5. LCC calculation total cost comparison component CB and SB (modules A–D) Source: Own illustration

auch eine signifikante Reduktion des Preises für Carbonbewehrung kaum zu einer monetären Vorteilhaftigkeit des Bauteils führen.

Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang weiterhin, dass infolge des im Vergleich zum SB aufwändigeren Bauverfahrens der Aufwand an erforderlichen Lohnstunden pro m³ CB deutlich höher ist. Dies wirkt sich signifikant auf den Anteil an Lohnkosten aus. Gleiches gilt für den gerätespezifischen Aufwand im Fertigteilwerk.

b) Rückbau- und Verwertungskosten (C1 bis C4, D)

Die monetären Vorteile der CB-Bauweise liegen derzeit im Modul C, da sich durch das geringere Volumen im Vergleich zum SB auch die rückzubauenden Mengen reduzieren. Weiterhin bestehen große Potenziale, wenn CB sortenrein in seine Bestandteile (Carbonbewehrung, Betonbruch) zerlegt werden kann. Im Vergleich zu vorgenannter Betrachtung (Abschnitt 3.2) entsteht bereits ab einem Separationsgrad der Carbonbewehrung von 60 % im Modul C eine Kostengleichheit zum SB. Dieser Wert scheint unter Beachtung aktueller Erkenntnisse [13] realistisch.

Ein weiteres Potenzial des CB liegt darüber hinaus in den Erlösen des Moduls D. Begründet wird dies mit den erwarteten Einnahmen bei Rückführung der rCF in den Rohstoffkreislauf. Am hier gegenständlichen Beispiel egalisieren sich die Erlöse von SB und CB bereits bei einem Separationsgrad des CB von circa 20 % (Annahme Separationsgrad SB = 99 %). Geht man von einem Separationsgrad in Höhe von 60 % aus, liegen die Erlöse für rCF im Modul D bei nahezu dem Dreifachen der Erlöse des rückgewonnenen Bewehrungsstahls.

c) LCC-Betrachtung (A bis D)

Die Ergebnisse der LCC-Betrachtung zeigen, dass die Vorteilhaftigkeit von CB gegeben sein wird, wenn sich mehrere der vorgenannten Parameter zugunsten dieser Bauweise ändern. In diesem Kontext wurde die zukünftige Entwicklung der Parameter

Parameter	Preis Frischbeton	Preis Carbonbewehrung	Separationsgrad Carbonbeton	Verwertungserlös rCF
Annahmen (2022)	100,00 €/m ³	22,90 €/m ²	0 %	0 €/m ²
Untersuchungsbereich	-100 % bis +200 %	-100 % bis +100 %	0 % bis +100 %	-5 %, +20 %, +35 %
Szenario Best-Case	+50 %	-40 %	+80 %	-20 %
Szenario Realistisch	+20 %	-20 %	+40 %	+20 %

Alle prozentualen Angaben beziehen sich auf die Kennwerte im Jahr 2022.

Bild 6. Szenarienanalyse der LCCA Grafik: Eigene Darstellung
Fig. 6. LCCA scenario analysis Source: Own illustration

Phase	Bauteil CB	Bauteil SB	CB/SB
	[€/St]	[€/St]	[%]
A1	759,51	519,16	+46
A2	0,00	0,00	
A3	888,20	667,10	+33
A4	127,77	262,52	-51
A5	75,00	75,00	0
A1 - A5	1.850,48	1.523,78	+21
B	0,00	0,00	
C1	58,09	112,60	-48
C2	248,73	292,36	-15
C3	32,64	33,53	-3
C4	186,11	29,53	+530
C1 - C4	525,57	468,02	+12
D	-27,81	-17,77	+56
A - D	2.348,24	1.974,03	+19

Bild 7. LCCA „Szenario realistisch“ Grafik: Eigene Darstellung
Fig. 7. LCCA „Szenario realistic“ Source: Own illustration

realistisch abgeschätzt („Szenario realistisch“): der Preis für Frischbeton wurde um 20 % erhöht, für Carbonbewehrung um 20 % reduziert. Weiterhin wurde ein Separationsgrad beim CB von 40 % sowie ein Verwertungserlös für rCF von 20 % des Neupreises von Carbonbewehrung angesetzt (Bild 6). Die Ergebnisse der LCC-Berechnung sind in Bild 7 zusammengefasst.

Es ist in dieser Abbildung zu erkennen, dass beim „Szenario realistisch“ die Gesamtkosten des CB-Fertigteils (A–D) über den Lebenszyklus 19 % (Szenario aus heutiger Sicht: 30 %, Bild 5) höher ausfallen als beim SB-Fertigteil. Diese Gesamtkosten setzen sich dabei aus den um 21 % höheren Kosten (A1–A5, Szenario aus heutiger Sicht: 28 %) und den um 12 % höheren Kosten (C1–C4, Szenario aus heutiger Sicht: 29 %) zusammen. Mit dieser Betrachtung kann festgestellt werden, dass der Preis für die Carbonbewehrung im Modul A1, der Separationsgrad des CB im Modul C3–C4 sowie die Wiederverwertung der rCF im Modul D die signifikanten Faktoren für die Wirtschaftlichkeit des CB-Bauteils sind. Die Betrachtung des „Szenario Best-Case“ (Bild 6) führte mit 7 % zu einem nahezu vergleichbaren Ergebnis der LCCA. Die ermittelten Gesamtkosten berücksichtigen dabei die Nutzungsphase der Bauteile (Modul B) mit „0,00 €“ (Abschnitt 2.3). In dem folgenden Abschnitt 4 wird dazu untersucht, bei welcher tatsächlichen Nutzungsdauer sich die Verwendung der Bauteile aus CB unter Beachtung der vorgenannten Ergebnisse wirtschaftlich darstellt.

4 Einfluss der Nutzungsdauer (Modul B) auf die LCCA

Bezugnehmend auf die in Abschnitt 2.3 genannten Grundsätze wird unter Beachtung der durchgehend höheren, in Abschnitt 3.2 ermittelten Lebenszykluskosten für das CB-Fertigteil (Module A, C, D) die Nutzungsdauer ermittelt, bei der die LCC gleichverteilt auf die Nutzungsjahre identisch zu dem SB-Fertigteil sind.

Aktuell (2022) ist für das Wandbauteil aus CB mit 30 % Mehrkosten zu rechnen (Bild 5). Geht man beispielsweise von 80 Jahren tatsächlicher Nutzungsdauer des SB-Fertigteils aus, muss das CB-Fertigteil ($80 \cdot 1,30 =$) 104 Jahre, also um 30 % länger, genutzt werden, um den gleichen LCC-pro-Nutzungsjahr-Wert zu erreichen. Geht man von einer Nutzungsdauer des SB-Fertigteils von 100 Jahren aus, erhöht sich dieser Wert auf 130 Jahre. Für die beiden Szenarien „realistisch“ und „Best-Case“ ergibt sich eine erforderliche längere Nutzungsdauer von 19 % beziehungsweise 7 %. Bei einer Nutzungsdauer des SB-Fertigteils von 80 Jahren folgt eine Nutzungsdauer des CB-Fertigteils von 95 beziehungsweise 86 Jahren. Da für CB Nutzungsdauern von bis zu 200 Jahren prognostiziert werden [16, 17], sind vorgenannte Nutzungsdauern durchaus erreichbar. Die grundsätzliche Aussage bleibt auch erhalten, wenn für SB Nutzungsdauern von mehr als 80 (100) Jahren angenommen werden.

Unter Beachtung der zu erreichenden längeren Nutzungsdauer von Bauteilen aus CB von maximal circa 30 Jahren, ergibt sich bereits unter heutigen Bedingungen eine monetäre Vorteilhaftigkeit. Diese Aussage verstärkt sich unter Berücksichtigung zukünftig zu erwartender Entwicklungen („Szenario realistisch“ und „Szenario Best-Case“).

5 Fazit

Die vorliegende Untersuchung hat neue Erkenntnisse in Bezug auf die lebenszyklusbezogene Wirtschaftlichkeit von Bauteilen aus CB hervorgebracht. Als Fazit lassen sich die Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

- Die Herstellkosten von Carbonbetonbauteilen sind derzeit höher als bei äquivalenten Stahlbetonbauteilen zu bewerten [5].
- Auch bei zukünftig sinkenden Preisen für Bewehrung aus Carbon werden CB-Bauteile trotz des gegebenenfalls geringeren Volumens kaum kostengünstiger herzustellen sein.
- Unter Beachtung der zeitlich gleichmäßig über die Lebensdauer des Bauteils verteilten Lebenszykluskosten [€/Nutzungsjahr] egalisieren sich die Mehrkosten der CB-Bauweise unter Beachtung des aktuellen Preisniveaus bereits ab einer verlän-

gerten Nutzungsdauer der Bauteile aus CB von circa 30 Jahren.

- Die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit von CB steigt unter Beachtung verlängerter Nutzungsdauern weiterhin signifikant, wenn rCF zukünftig erlöswirksam in den Rohstoffkreislauf rückgeführt werden können und der Preis für Bewehrung aus Carbon sinkt. Erforderlich sind dazu wirksame Separationsverfahren für rCF sowie Technologien zu deren Wiederverwendung bei der Herstellung neuer Bewehrung aus Carbon.
- Weitere zukünftige Potenziale liegen in automatisierten Fertigungsverfahren von Betonbauteilen, da dadurch die Herstellungskosten weiter reduziert werden können. [18, 19]
- Die in [9] empirisch ermittelten Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit von CB konnten für den hier gegenständlichen Fall verifiziert werden.

Weiterhin gilt es, die Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse zu bewerten, da lediglich ein spezifisches Fertigteil mit einem bestimmten Bewehrungsgrad untersucht wurde. Aussagen zu Bauteilen mit anderen geometrischen Eigenschaften (z. B. auch Decken, Stützen, Binder usw.) oder Bauteilen, die vollständig in Ortbeton gefertigt werden, sind derzeit in Ermangelung von Praxisprojekten kaum möglich. Unabhängig davon spiegelt das hier gegenständliche Fertigteil ein häufig eingesetztes Bauteil im Betonbau wider. Andere übliche Bauteile haben nur bedingt signifikant abweichende geometrischen und konstruktive Verhältnisse (Bewehrungsgehalt, Flächen-/Volumenverhältnis usw.). Insofern sind die hier vorliegenden Ergebnisse weitestgehend auch auf andere Bauteile übertragbar.

Da die Etablierung des Recyclingprozesses von CB in der Zukunft einer der wichtigsten Faktoren auch zur monetären Vorteilhaftigkeit sein wird, müssen wirtschaftliche Separationsverfahren entwickelt werden. [13] Nur durch die Wiedereinbringung der rCF als Rohstoff in den Materialkreislauf für Bewehrung kann ein wirtschaftliches Szenario, besonders auch unter Berücksichtigung von Materialknappheit und ressourceneffizientem Bauen, dargestellt werden. Aktuelle Forschungsarbeiten am Institut für Baubetriebswesen der TU Dresden untersuchen diesen Themenkomplex. [15]

Der Artikel ist im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojekts RUBIN-ISC-Industriestandard Carbonbeton entstanden.

Literatur

- [1] Appl, J.; Bauermeister, U.; Borgstädt, A. et al.: Betonbauteile 2023 – Hintergründe, Auslegungen, Neue Tendenzen im Betonbau. Beuth Verlag, Bauwerk, Berlin, 2023.
- [2] Henn, G.: Der Carbonbeton und die Architektur. In: Beton- und Stahlbetonbau 118 (2022), Heft 2, S. 11–12. doi.org/10.1002/best.202200020.
- [3] Lieboldt, M.: Einführung zum Carbonbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau 118 (2022), Heft 2, S. 7–10. doi.org/10.1002/best.202100100.
- [4] Böhl, F.: In Zukunft ohne Stahl? – Jahrzehntelange Forschung in Dresden, Aachen und Leipzig hat dazu beigetragen, dass mit Carbonbeton ein Meilenstein in der Baustoffherstellung gelungen ist. In: Baumeister 120 (2023), Heft 4, S. 46–49.
- [5] Otto, J.; Adam, R.: Carbonbeton und Stahlbeton im wirtschaftlichen Vergleich. In: Bauingenieur 94 (2019), Heft 06, S. 246–252. doi.org/10.37544/0005-6650-2019-06-80.
- [6] Seifert, W.; Lieboldt, M.: Ressourcenverbrauch im globalen Stahlbetonbau und Potenziale der Carbonbetonbauweise – Globale Herausforderungen des Bauwesens. In: Beton- und Stahlbetonbau 115 (2020), Heft 6, S. 469–478. doi.org/10.1002/best.201900094.
- [7] Hauke, B.; Lemaitre, C.; Röder, A. (Hrsg.): Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz – Konstruktive Lösungen für das Planen und Bauen: aktueller Stand der Technik. Institut Bauen und Umwelt; Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2021.
- [8] DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie. Deutsche Fassung, Ausgabe März 2022.
- [9] Otto, J.; Wiel, R.; Kortmann, J. et al.: Wissenstransfer als Grundlage für Innovationen im Bauwesen – Eine fallspezifische Betrachtung am Beispiel von Carbonbeton. In: Bauingenieur 97 (2022), Heft 10, S. 307–315. doi.org/10.37544/0005-6650-2022-10-45.
- [10] Gámez-García, D.C.; Gómez-Soberón, J.M.; Corral-Higuera, R. et al.: A Cradle to Handover Life Cycle Assessment of External Walls: Choice of Materials and Prognosis of Elements. In: Sustainability Vol. 10 (2018), Iss. 8, 2748. doi.org/10.3390/su10082748.
- [11] Valencia-Barba, Y. E.; Gómez-Soberón, J. M.: LCA Analysis of Three Types of Interior Partition Walls Used in Buildings. In: Galván, R. S.; Seaman, C., Martins, M. G. (eds.): The Economy, Sustainable Development, and Energy International Conference, Edinburgh, 2018, 2(22), 1595. doi.org/10.3390/proceedings2221595.
- [12] Carbocon GmbH: ISC – Industriestandard Carbonbeton. Carbocon GmbH, 2023, https://isc-projekt.de [Zugriff am: 30.03.2023].
- [13] Kortmann, J.: Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton. Technische Universität Dresden, Baubetriebswesen und Bauverfahrenstechnik, Dissertation, 2020.
- [14] McKinsey: Kosten eines Aluminium- oder Carbonteils im Vergleich zu einem Stahlteil im Jahr 2010 und Prognose für das Jahr 2030, 2012, https://de.statista.com/statistik/daten/studie/221687/umfrage/vergleicher-kosten-von-carbon-aluminium-und-stahl [Zugriff am: 30.03.2023].
- [15] Institut für Baubetriebswesen: WIR-B2 – Die Recyclingfaser als vielfältiger Rohstoff. 2023, tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/ibb/das-institut/news/neues-forschungsprojekt-wir-b2-die-recyclingfaser-als-vielfaeltiger-rohstoff [Zugriff am: 30.03.2023].
- [16] Curbach, M.; Hegger, J.; Schluditz, F. et al. (Hrsg.): Handbuch Carbonbeton – Einsatz nichtmetallischer Bewehrung. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2023.
- [17] C3: FAQ Carbonbeton. C3. 2023, www.bauen-neu-denken.de/faq/#:~:text=der%20Aush%C3%A4rtungsprozess%20weiter-,Wie%20ist%20die%20Dauerhaftigkeit%20von%20Carbonbeton%3F,von%20200%20Jahren%20und%20mehr [Zugriff am: 03.02.2023].
- [18] Mechtcherine, V.; Taubert, M.; Müller, S. et al.: 3D-gedruckte monolithische Stahlbetonwände im CONPrint3D-reinforced Verfahren. In: Beton- und Stahlbetonbau 117 (2022), Heft 4, S. 235–244. doi.org/10.1002/best.202200001.
- [19] Neef, T.; Müller, S.; Mechtcherine, V.: 3D-Druck mit Carbonbeton: Technologie und die ersten Untersuchungsergebnisse. In: Beton- und Stahlbetonbau 115 (2020), Heft 12, S. 943–951. doi.org/10.1002/best.202000069.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Otto

Foto: TU Dresden, M. Kretschmar

Dipl.-Ing. Alexander Jahn

Dipl.-Ing. Romy Wiel

TU Dresden, Institut für Baubetriebswesen
01062 Dresden
www.tu-dresden.de/biwbib

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)