

BULLETIN *exklusiv*

Verstärken mit Carbonbeton

CARBOREfit[®]



Foto: CARBOCON GMBH





Foto: CARBOCON GmbH

CARBOrefit® – Verstärken mit Carbonbeton

Erweiterung der Zulassung und neue Möglichkeiten für die bauaufsichtliche Zulassung

1 Ressourcensparend, schlank und wirtschaftlich: Verstärken mit Carbonbeton

Das Bauwesen steht vor seiner größten Herausforderung: Der Ressourcenverbrauch und damit einhergehend die CO₂-Emission haben in der Baubranche Größenordnungen erreicht, die nicht mehr im Einklang mit der Umwelt stehen und die nächsten Generationen belasten. Zusätzlich hat sich in den letzten Jahren der bedenkliche Trend bei allen am Bau beteiligten Partnern eingeschlichen, dass anstelle des Erhalts von zum Teil denk- und ehrwürdigen Baukonstruktionen der Abriss und Ersatzneubau bevorzugt wird. Die Aspekte der Umwelt und der Baugeschichte spielen hierbei keine Rolle, obwohl dies die essenziellen Herausforderungen unserer Zeit sind. Wie kann diese Ressourcenverschwendung und Zerstörung hiesiger Baugeschichte unterbunden werden? Mit neuartigen und innovativen Werkstoffen – wie dem Hochleistungsverbundwerkstoff *Carbonbeton*, insbesondere im Bereich der Sanierung und Verstärkung von bestehenden Bauwerken.

Carbonbeton ist ein Verbundwerkstoff, bestehend aus einer Feinbetonmatrix und einer Carbonbewehrung, die lastorientiert im Betonquerschnitt angeordnet wird. Die Carbonbewehrung ist im Vergleich zu Betonstahl korrosionsresistent und besitzt eine bis zu sechsfach höhere Festigkeit. Somit können sehr schlanke Verstärkungsschichten (i. d. R. 10–20 mm) realisiert werden, wie in Bild 1a ersichtlich wird. Infolgedessen können in Verbindung mit speziell entwickelten Feinbetonen bei einer Verstärkung mit Carbonbeton

bis zu 85 % an Ressourcen im Vergleich zu einer konventionellen Spritzbetonverstärkung eingespart werden [1].

Der prinzipielle Aufbau sowie der Auftrag der Carbonbetonverstärkung am Bestand sind an die etablierten Verfahrensschritte beim Spritzbeton angelehnt. Die erste Lage Feinbeton, die sich im Bereich von 3 mm bis 5 mm bewegt, wird an die bereits vorbereitete und ausreichend aufgeraute Altbetonoberfläche mittels Spritz- oder Laminierverfahren aufgebracht. Anschließend werden die leichten Carbongitter in den frischen Beton eingearbeitet und die nächste Schicht Feinbeton aufgetragen. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis die statisch erforderliche Lagenanzahl erreicht ist. Nach dem Einarbeiten der letzten Lage Carbongitter wird die Abschlussschicht aufgebracht und die Verstärkung entsprechend nachbehandelt. Im Gegensatz zum konventionellen Spritzbeton kann bei einer Verstärkung mit Carbonbeton auf die Verdübelung der Verbundfuge verzichtet werden, wodurch eine bestandsschonende, effizientere und wirtschaftlichere Maßnahme möglich ist. Der prinzipielle Aufbau einer mit Carbonbeton verstärkten Bestandskonstruktion aus Stahlbeton ist in Bild 1b dargestellt.

Durch die hohe Zugfestigkeit der Carbongitter kann der Bestand im Hochbau i. d. R. mit einer einzigen, ca. 6–10 mm dünnen Lage Carbonbeton verstärkt werden. Die Ästhetik und das Erscheinungsbild sehr schlanker Bestandsbauteile können somit erhalten und bewahrt werden. Vor allem im Bereich denkmalgeschützter

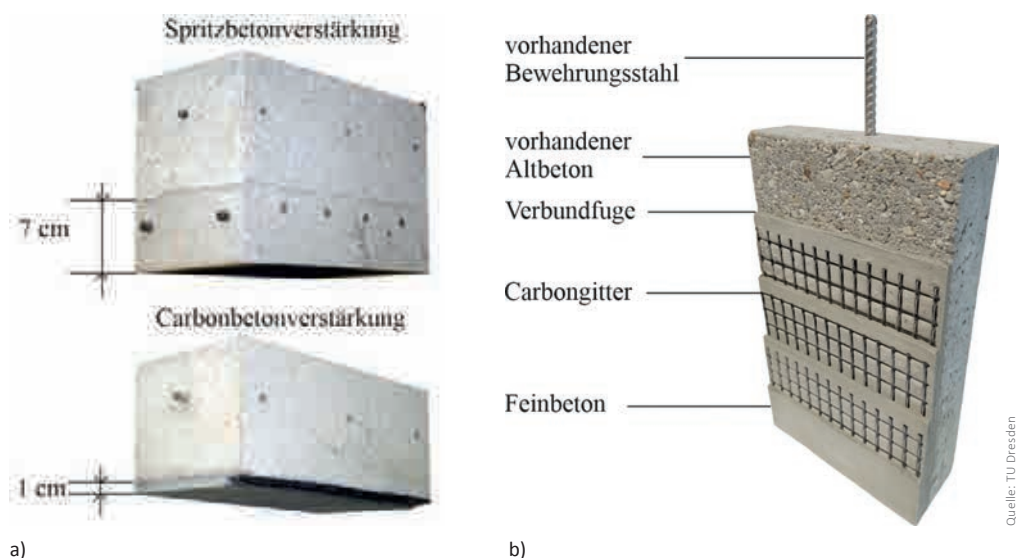


Bild 1 a) Vergleich zwischen einer Spritzbeton- und einer Carbonbetonverstärkung bei gleicher Tragfähigkeit,
 b) beispielhafter Aufbau einer Carbonbetonverstärkung
 a) Comparison between shotcrete and carbon concrete reinforcement with the same load capacity,
 b) typical design of carbon reinforced concrete strengthening

Bauwerke bietet das gegenüber einer konventionellen Verstärkung einen sehr großen Vorteil. Bei der Verwendung einer konventionellen Spritzbetonverstärkung können Bauteile oftmals nicht denkmalgerecht verstärkt oder saniert werden, wodurch der Abriss droht. Für eine Vielzahl an Baudenkmalen eröffnen sich durch die Verwendung einer Carbonbetonverstärkung neue Möglichkeiten und deren Bestand für nachfolgende Generationen wird gesichert.

Während bei einer konventionellen Spritzbetonverstärkung Aufbaudicken von mehreren Zentimetern und die Verdübelung mit der Bestandskonstruktion dazu führen, dass das Bauteileigengewicht massiv ansteigt, die Kontur drastisch verändert und durch die Verdübelung der Bestand zusätzlich geschädigt wird, können diese Probleme einfach und elegant durch die Verstärkung mit Carbonbeton umgangen werden. Die Reduktion des zusätzlichen Eigengewichts durch die Verwendung des Verbundwerkstoffs anstelle einer konventionellen Spritzbetonverstärkung hat dabei nicht nur auf das zu verstärkende Bauteil selbst, sondern auch auf angrenzende Bauteile positive Auswirkungen. Ein weiterer Vorteil im Bereich der Sanierung ergibt sich aus dem sehr guten Verbundverhalten der Carbongitter, wodurch minimale Rissbreiten im Beton erzielt werden. Der Werkstoff eignet sich somit ideal für die Wiederherstellung und Erhöhung der Dauerhaftigkeit. Die Lebensdauer von Bauteilen und Bauwerken wird folglich deutlich hochgesetzt. Zusätzlich kann Carbonbeton im Bereich der Sanierung auch als Abdichtung mit herangezogen werden, wodurch sich vielfache Anwendungspotenziale ergeben.

Des Weiteren führt der Werkstoff Carbonbeton im Vergleich zu konventionellen Maßnahmen zu einer umwelt- und ressourcenschonenden Verstärkung oder Sanierung, wodurch Bestandskonstruktionen erhalten und die CO₂-Emission drastisch gesenkt werden kann [1]. Dass dies in der Praxis auch möglich ist, zeigt Abschn. 4.2.

Nicht nur gegenüber konventionellen Spritzbetonverstärkungen, sondern auch gegenüber weiteren, etablierten Maßnahmen setzt sich Carbonbeton durch. Ausführlicher wird dies z. B. in Abschn. 4.2 oder in [1–5] gezeigt. Auch für den Lastfall Brand können die Nachweise bei Verstärkungsmaßnahmen mit Carbonbeton rechnerisch belegt werden, was eine Grundvoraussetzung für den Einsatz des Werkstoffs ist. Aus den genannten Gründen bietet Carbonbeton Planern, Architekten, Bauherren und ausführenden Unternehmen eine neue und leistungsstarke Alternative. Insbesondere die Bereiche Hochbau (Decken und Unterzüge), Denkmalschutz und Brückenbau besitzen ein enormes Potenzial.

Der breiten Anwendung stand Carbonbeton jedoch bisher das Fehlen einer bauaufsichtlichen Grundlage entgegen. Durch die Erteilung der neuen und erweiterten Zulassung mit der Bezeichnung CARBOrefit®-Verfahren zur Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit Carbonbeton im November 2021 durch das DIBt [6] steht nun ein geregeltes Produkt zur Verfügung, das einen sicheren, wirtschaftlichen und ressourcensparenden Einsatz ermöglicht.

2 Die neue und erweiterte Zulassung für das Verstärken von Bauteilen aus Stahlbeton mit Carbonbeton

2.1 Neufassung der Zulassung

Im Jahr 2014 konnte nach umfangreichen theoretischen und experimentellen Vorarbeiten die erste allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) für das Verstärken von Stahlbetonbauteilen mit Textilbeton (TUDALIT) durch die TU Dresden Aktiengesellschaft (TUDAG) beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) erwirkt werden [7]. Ein wesentlicher Meilenstein für das Bauen und Verstärken mit Carbonbeton war erreicht. Durch diese Zulassung durfte Carbonbeton, zwar in begrenztem Maße, aber baurecht-

lich und standardisiert in der Praxis angewendet werden. Somit konnten in der Praxis wertvolle Erfahrungen im Umgang mit Carbonbeton gewonnen und bestehende Bauwerke verstärkt werden.

Carbonbeton, und insbesondere die Eigenschaften der Materialien, hat sich seit 2014 wesentlich weiterentwickelt. So weisen Carbongitter aktueller Generationen fast doppelt so hohe Zugfestigkeiten (im Mittel bis zu ~ 3.500 N/mm²) wie ältere Gitter auf. Ebenfalls konnten das Verbundverhalten zwischen Carbongitter und Beton sowie die Temperaturstabilität der Gitter drastisch verbessert werden. Dies spiegelt sich positiv in den Bemessungskennwerten wider. Jedoch fehlte bis jetzt die normative Grundlage, um die verbesserten Carbongitter im Bereich der Verstärkung einzusetzen – bis jetzt! Seit November 2021 sind die neuen und wesentlich leistungsfähigeren Carbongitter Teil der überarbeiteten und erweiterten Zulassung für das Verstärken von Stahlbetonbauteilen mit Carbonbeton. Zur Erreichung dieses Meilensteins wurde die damalige Zulassung vom TUDALIT bzw. von der TUDAG an ein neu zusammengestelltes und starkes Konsortium übergeben (Abschn. 3) und in CARBOrefit® umbenannt. Durch die Neufassung der Zulassung, deren Gegenstand jetzt das Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonbeton ist, kann ein deutlich breiteres Anwendungsgebiet abgedeckt und durch die höhere Leistungsfähigkeit der neuen Gitter wirtschaftlichere Lösungen angeboten werden. Besonders hervorzuheben sind an dieser Stelle die deutlich höheren Bemessungswerte und deutlich besseren Abminderungsfaktoren der Carbongitter der Typen 2 und 3 (Abschn. 2.3.2), welche für die Planung angesetzt werden können. Die höhere Zugfestigkeit, die Flexibilität und die Korrosionsbeständigkeit der Carbonfasern im Vergleich zu konventioneller Stahlbewehrung (mit der Zulassung dürfen dreimal höhere Bemessungsfestigkeiten als konventioneller Betonstahl angesetzt werden) ermöglichen damit ein deutlich wirtschaftlicheres, langlebigeres sowie nachhaltigeres Bauen und bieten beste Voraussetzungen bei der Verstärkung bestehender Stahlbetonbauteile mithilfe von Carbonbeton.

2.2 Anwendungsbereich der neuen Zulassung

Durch die neue und erweiterte CARBOrefit®-Zulassung werden allen Beteiligten mehr Möglichkeiten beim Einsatz von Carbonbeton im Bereich der Sanierung und Verstärkung geboten. Im Vergleich zur vorherigen Zulassung sind jetzt drei verschiedene Carbongittertypen mit verschiedenen Eigenschaften geregelt. Somit kann der Planer z. B. auf die speziellen Gegebenheiten des Bestandsbauwerks eingehen und einen Gittertyp auswählen, welcher für das entsprechende Projekt die wirtschaftlichste und effizienteste Lösung darstellt. Die genaue Unterscheidung der verschiedenen Typen ist in Abschn. 2.3.2 beschrieben.

Zum aktuellen Zeitpunkt umfasst der Anwendungsbereich der CARBOrefit®-Zulassung [6] die einachsige Biegeverstärkung der Zugzone von Stahlbetonbauteilen, welche rechnerisch keine Querkraftbewehrung benötigen. Zur Verstärkung der Biegezugzone können mehrere Lagen Carbonbeton verwendet werden. Die Lagenanzahl richtet sich hierbei primär nach dem vorliegenden Tragfähigkeitsdefizit und dem verwendeten Carbongittertyp. Des

Weiteren dürfen aktuell nur Innenbauteile unter vorwiegend ruhender Belastung bis zu einer Maximaltemperatur von 40 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % verstärkt werden. Die zu verstärkenden Bauteile müssen dabei mindestens eine Haftzugfestigkeit von 1,0 N/mm² (char. Wert) aufweisen und die Eigenschaften des Altbetons müssen im Bereich eines Betons der Festigkeitsklasse < C50/60 liegen.

2.3 Materialien

2.3.1 Feinbeton

In der neuen Zulassung für die Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit Carbonbeton findet der TF10 CARBOrefit® Feinbeton Anwendung. Der als Trockenmörtel hergestellte Feinbeton besteht aus Zement, Silikatstaub, Flugasche sowie einem Quarzsand mit Größtkorn von 1 mm und weist die in Tab. 1 aufgeführten Materialeigenschaften auf.

Tab. 1 Kenndaten CARBOrefit® Feinbeton nach DIN EN 169-1 [8]
Characteristics of CARBOrefit® fine grained concrete according to DIN EN 169-1 [8]

| Eigenschaft | Einheit | Wert |
|---|----------------------|----------|
| Druckfestigkeit (charakteristischer Wert, 28 d) | [N/mm ²] | ≥ 80 |
| Biegezugfestigkeit (charakteristischer Wert, 28 d) | [N/mm ²] | ≥ 6 |
| Elastizitätsmodul (Mittelwert, 28 d) | [N/mm ²] | ≥ 25.000 |

2.3.2 Carbongitter

Als Bewehrungen im Verstärkungssystem dienen hochleistungsfähige Carbongitter. Die Carbonbewehrungen sind dabei selbst als Verbundwerkstoff aus Carbonfasern und einer Tränkung zu verstehen, die im gitterbildenden Prozess zu Carbongittern weiterverarbeitet werden. Zur Verstärkung bestehender Stahlbetonbauteile stehen in der neuen CARBOrefit®-Zulassung verschiedene Carbongitter zur Verfügung, die je nach erforderlichem Verstärkungsgrad und Anwendungsfall ausgewählt werden können. Durch die Einführung der neuen CARBOrefit®-Zulassung wird die Verwendung einer deutlich größeren Anzahl an verschiedenen Carbongittern ermöglicht, als dies noch bei Anwendungen der alten Zulassung der Fall war.

Die in der neuen Zulassung definierte Regelausführung (Standardausführung) des Carbongitters weist die in Bild 2 dargestellte Geometrie auf, wodurch sich eine Querschnittsfläche von 140 mm²/m ergibt. Neben der als Regelausführung definierten Grundvariante, deren geometrische Eigenschaften Tab. 2 zu entnehmen sind, ermöglicht die neue CARBOrefit®-Zulassung die Verwendung von Sonderausführungen (Bild 3). Dies ermöglicht die gezielte Anpassung des verwendeten Carbongitters auf die Gegebenheiten des konkreten Bauvorhabens und die hieraus resultierenden Randbedingungen. Somit können bei weniger bean-

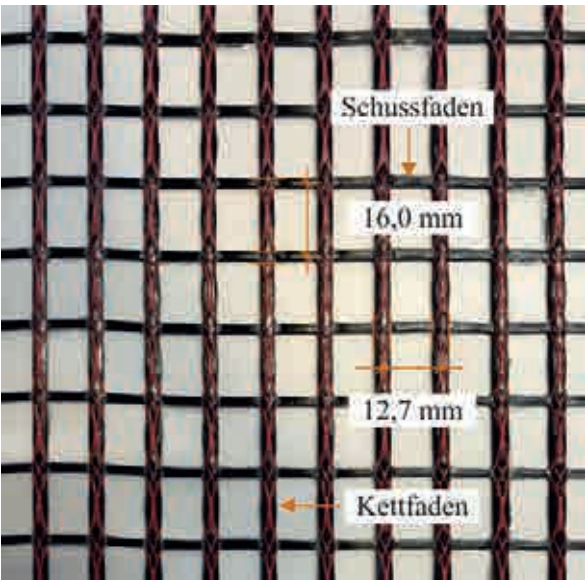


Bild 2 Darstellung der Carbongitterregelausführung
Illustration of the carbon grid standard design

Tab. 2 Geometrische Eigenschaften der Carbongitterregelausführung [6]
Geometric properties of the carbon grid standard design [6]

| Eigenschaft | Einheit | Kett- richtung | Schuss- richtung |
|-------------------------------------|---------|-------------------|---------------------|
| Fasergehalt | [K] | ≥ 48 und ≤ 50 | 12 |
| Querschnitts- fläche Faserstrang | [mm²] | ≥ 1,8 und ≤ 1,95 | 0,45 |
| Faserstrang- abstand | [mm] | 12,7 | 16 +0/-2 |

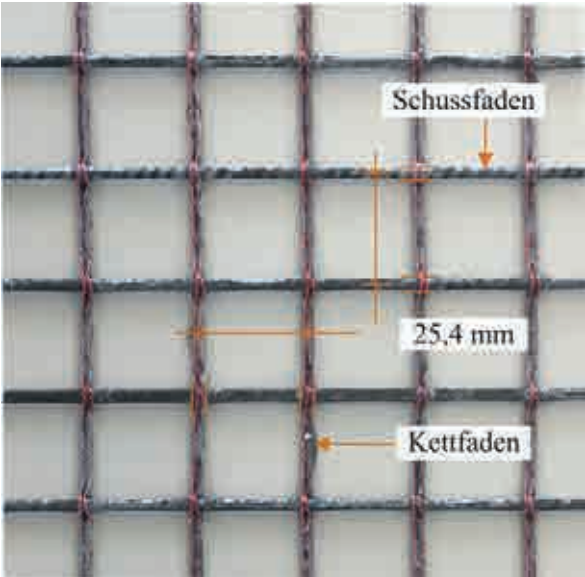


Bild 3 Darstellung einer Carbongittersonderausführung
Illustration of the carbon grid special design

Tab. 3 Zulässiger Bereich der geometrischen Eigenschaften der Carbongittersonderausführung [6]
Permitted range of geometric properties of the carbon grid special design [6]

| Eigenschaft | Einheit | Kett- richtung | Schuss- richtung |
|-------------------------------------|---------|-------------------|---|
| Fasergehalt | [K] | ≥ 48 und ≤ 50 | ≥ 12 und ≤ 50 |
| Querschnitts- fläche Faserstrang | [mm²] | ≥ 1,8 und ≤ 1,95 | ≥ 0,45 und ≤ 1,95 |
| Faserstrang- abstand | [mm] | ≥ 12,7 und ≤ 50,8 | ≥ 16 +0/-2 und kleiner als der zweifache Faserstrangabstand in Kettrichtung |
| Zusätzliche Anforderungen | [-] | | mind. 20 % der Querschnittsfläche in Kettrichtung |

spruchten Bauwerken wesentliche Querschnittsflächen gespart und somit wirtschaftlicher gearbeitet werden. Die einzuhaltenden Bereiche der geometrischen Eigenschaften der Sonderausführungen sind Tab. 3 zu entnehmen.

Neben der Variation der geometrischen Eigenschaften der Carbongitter erlaubt die neue Zulassung die Auswahl zwischen drei unterschiedlichen Faserstrangtypen, welche sich hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften (u. a. Zugfestigkeit und Verbundverhalten, Flexibilität der Gitter) unterscheiden. Das bisherige TUDALIT-Gitter der alten Zulassung [7] und die dazugehörige Materialkombination sind in die neue CARBOrefit®-Zulassung übernommen worden und entsprechen dem neuen Typ 1. Die unterschiedlichen Faserstrangtypen sowie ihre mechanischen Eigenschaften können Tab. 4 entnommen werden.

Besonders hervorzuheben sind an dieser Stelle die deutliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des Faserstrangtyps 3 unter Dauerlast oder Temperatureinwirkung (40 °C) sowie seine Dauerhaftigkeit gegen chemische Exposition. Wie in Tab. 5 zu sehen ist, konnten die zur Berücksichtigung der Materialeigenschaften anzusetzenden Abminderungsbeiwerte sowohl für die Zug- als auch für die Verbundfestigkeit der Carbongitter gegenüber der alten TUDALIT-Zulassung [7] deutlich verbessert werden. Die hohe Leistungsfähigkeit der neuen Carbonbewehrungen kann somit nun auch in der Bemessung berücksichtigt werden, was zu deutlich wirtschaftlicheren Bemessungen der Verstärkungslösungen führen wird.

Mit der neuen und erweiterten CARBOrefit®-Zulassung, der Wahl zwischen drei verschiedenen Faserstrangtypen in Kombination mit der Regel- bzw. Sonderausführung der Carbongitter, werden den Planenden neue Möglichkeiten bei der Konzipierung von Lösungen eröffnet. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen können die Carbongitter gezielt und entsprechend den Vorgaben der neuen Zulassung für die Verstärkungsmaßnahmen konfiguriert und stets eine statisch sinnvolle und wirtschaftliche Lösung erarbeitet werden.

Tab. 4 Mechanische Eigenschaften der verschiedenen CARBOrefit®-Faserstrangtypen [6]
Mechanical properties of the different CARBOrefit®-yarn types [6]

| Eigenschaft | Einheit | Typ 1 | Typ 2 | Typ 3 |
|-----------------------------|---------|------------------|----------|------------------|
| Bemessungszugfestigkeit | [N/mm²] | 768 | 967 | 1.300 |
| E-Modul | [N/mm²] | 206.667 | 206.667 | 206.667 |
| max. Verstärkungskraft | [kN/m] | 430 | 430 | 430 |
| Bemessungsverbundfestigkeit | [N/mm] | 0,564 | 2,6 | 4,7 |
| Verankerungslänge | [mm] | 2.450 | 670 | 500 |
| Flexibilität | [–] | äußerst flexibel | flexibel | weniger flexibel |

Tab. 5 Abminderungsbeiwerte zur Berücksichtigung von Temperaturbelastung (40 °C), Dauerlast und chemischer Exposition [6]
Reduction coefficients to account for temperature exposure (40 °C), continuous exposure and chemical exposure [6]

| Abminderungsbeiwerte | Typ 1 | Typ 2 | Typ 3 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|
| Zugfestigkeit | | | |
| Temperaturbeanspruchung (40 °C) | 0,85 | 0,85 | 1,00 |
| Dauerlast | 0,70 | 0,70 | 0,70 |
| Dauerhaftigkeit | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Verbundfestigkeit | | | |
| Temperaturbeanspruchung (40 °C) | 0,45 | 0,80 | 1,00 |
| Dauerlast | 0,47 | 0,70 | 0,70 |
| Dauerhaftigkeit | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

2.4 Planung und Bemessung

Die Planung von Verstärkungsmaßnahmen mit dem Verbundwerkstoff Carbonbeton wird durch die neue CARBOrefit®-Zulassung [6] deutlich vereinfacht und eröffnet den Planenden die Möglichkeit, losgelöst von einer starren Vorgabe des zu verwendenden Carbongitters die Planungen genau auf die jeweiligen Gegebenheiten einer Baumaßnahme anpassen zu können. Mit den auf Grundlage von DIN EN 1992-1-1 [9] formulierten Bemessungsregeln liefert die neue Zulassung ein Regelwerk zur einfachen und bauteilgerechten Bemessung von Verstärkungsmaßnahmen mit Carbonbeton. Planenden steht damit ein transparentes Werkzeug zur wirtschaftlichen Bemessung einer Carbonbetonverstärkung zur Verfügung, in dem alle notwendigen Angaben zur Bemessung und zum Umgang mit dem Material übersichtlich dargestellt sind. Ebenfalls finden sich auf der offiziellen CARBOrefit®-Internetseite (www.carborefit.de) zum Verstärken mit Carbonbeton weiterführende Informationen und Berechnungsbeispiele für die Planenden, wodurch eine einfache Nachweisführung gewährleistet ist.

2.5 Ausführung

Mit dem Einsatz des Hochleistungswerkstoffs Carbonbeton für den Anwendungsfall der Verstärkung von Stahlbetonkonstruktio-

nen wurde mithilfe der neuen CARBOrefit®-Zulassung ein Verfahren geschaffen, welches in einfachen Prozessschritten, analog zu herkömmlichen Sprüh- und Laminierverfahren zum Aufbringen des Feinbetons, effizient einzusetzen ist. Mit Carbonbeton können sowohl horizontale als auch vertikale Verstärkungen durchgeführt werden. Aufgrund der flexiblen Bewehrungsstruktur können Bauwerke mit schwierigen Bauteilgeometrien wie beispielsweise die historische Bogenbrücke Thainburg in Naumburg an der Saale (Bild 4) ertüchtigt und Bauteile auch ummantelt werden (Bild 5).

Das prinzipielle Vorgehen bei der Anwendung einer Carbonbetonverstärkung ist somit ähnlich zum konventionellen Spritzbeton und unterteilt sich in das Vorbereiten der Altbetonoberfläche, den tatsächlichen Verstärkungsprozess und das Nachbehandeln der Verstärkungsschicht. Zum Verstärken wird eine 3–5 mm starke Feinbetonschicht auf den vorbereiteten Untergrund appliziert, anschließend eine Lage Carbongitter in die frische Feinbetonschicht eingearbeitet und eine weitere Feinbetonschicht gleicher Stärke flächenüberdeckend aufgetragen. Je nach Anzahl der notwendigen Carbongitterlagen wird der Vorgang wiederholt und eine abschließende Feinbetonschicht auf die letzte Carbongitterlage aufgetragen. Das genaue Vorgehen sowie die Anforderungen an die Vorbereitung und das Nachbehandeln sind in der neuen CARBOrefit®-Zulassung [6] beschrieben.

Leichtes Über-Kopf-Arbeiten durch hohe Haftfähigkeit und geringes Gewicht



Bild 4 Brücke Thainburg in Naumburg (Saale)
Bridge Thainburg in Naumburg (Saale)



Foto: CARBOCON GMBH

Bild 5 Verstärkungsarbeiten am Brückenbogen der Brücke Thainburg in Naumburg (Saale)
Strengthening the arch of the bridge Thainburg in Naumburg (Saale)

Im Vergleich zu einer konventionellen Spritzbetonverstärkung wird durch die hohe Haftfähigkeit des Feinbetons und das geringe Gewicht der Carbongitter ein leichteres Arbeiten über Kopf ermöglicht. Dabei können mehrere Verstärkungslagen frisch in frisch aufgebracht werden, ohne dass dabei eine Verdübelung mit dem Altbeton notwendig wird. Somit kann ein wesentlich leichteres und zügigeres Verstärken sichergestellt werden. Auch im Verankerungsbereich ist aufgrund der flächigen Verstärkung und des daraus resultierenden flächigen Lastübertrags der Carbonbetonschicht zum Altbeton im Gegensatz zur Verstärkung mit Betonstahl keine Verdübelung zum Altbeton notwendig. Der Arbeitsaufwand zur Verstärkung fällt daher deutlich geringer aus und kann unter sehr geringem Personalaufwand erfolgen. Dies gewährleistet effiziente und wirtschaftliche Verstärkungsmaßnahmen.

Die Verstärkung mit Carbonbeton kann neben dem zuvor beschriebenen Spritzverfahren auch im Laminierverfahren durchgeführt werden. Der Aufbau der Carbonbetonverstärkung erfolgt hierbei ebenfalls lagenweise abwechselnd mit einer Schicht Feinbeton und einer Lage der gitterförmigen Carbonbewehrung.

Eine obligatorische Schulung der ausführenden Unternehmen stellt die hohe Qualität bei der Umsetzung der Verstärkungsmaßnahme mit Carbonbeton sicher. Weitergehende Informationen zur Schulung und Qualitätssicherung beim Verstärken mit Carbonbeton können der neuen CARBOrefit®-Homepage entnommen werden.

2.6 Zukünftige Entwicklung

Das Konsortium um die mitwirkenden Partner strebt eine stetige Weiterentwicklung der Zulassung an. So ist das Ziel, dass die bestehende Zulassung jährlich im Anwendungsbereich erweitert wird. In naher Zukunft wird eine Ausweitung auf Außenbauteile und zyklisch beanspruchte Bauteile angestrebt, um eine größere Palette beim Verstärken mit Carbonbeton abbilden zu können. Die Eignung der in der Zulassung geregelten Materialien für den Außen- bzw. Brückenbereich konnte im Jahr 2020 schon eindrucksvoll bei der Verstärkung der ersten Autobahnbrücke in Hessen [3]

gezeigt werden. Ziel ist es daher, die in den Praxisprojekten gewonnenen Erkenntnisse in die neue Zulassung einfließen zu lassen und auch das Verstärken von Brückenbauwerken mit Carbonbeton in naher Zukunft zum Anwendungsgegenstand des CARBOrefit®-Verfahrens zu machen. Langfristig wird ebenfalls angestrebt, dass weitere Konstruktionselemente (z. B. Plattenbalken) und weitere Nachweisdefizite (u. a. Querkraft- und Torsionsdefizite) mit der neuen CARBOrefit®-Zulassung abgedeckt und verstärkt werden dürfen. Somit kann zukünftig ein wesentlicher Bereich der Verstärkung und Sanierung von bestehenden Bauteilen mit Carbonbeton abgedeckt werden.

3 Das Konsortium

3.1 Allgemeines

Das Konsortium besteht aus insgesamt acht hoch qualifizierten Partnern aus dem Bereich des Carbonbetonbaus und setzt sich aus drei Carbongitterherstellern, zwei Tränkungsherstellern und je einem Carbonfaserhersteller, Betonhersteller und Planungsbüro zusammen. Somit wird die gesamte Prozesskette zum Verstärken mit Carbonbeton abgedeckt und ein stetiger Wissenstransfer gewährleistet. Die Integration aller bei der Carbonbetonherstellung notwendigen Firmen ermöglicht eine enge Zusammenarbeit, die die Sicherstellung höchster Qualitätsansprüche und effizienter Absprachen ermöglicht. Hierdurch kann gewährleistet werden, dass das hohe Potenzial von Carbonbeton im Bereich der Verstärkung bzw. Sanierung auch ausgeschöpft werden kann.

3.2 Die einzelnen Partner

3.2.1 Tränkungshersteller

Mit der Firma CHT Germany GmbH als einem von zwei Tränkungsherstellern steht ein Partner mit über 65 Jahren Erfahrung im Bereich hochwertiger Spezialchemikalien, Hilfsmittel und Additiven zur Verfügung. Durch die langjährige Zusammenarbeit des Tränkungsherstellers mit verschiedenen Gitterherstellern konnten

verschiedene hochleistungsfähige Tränkungen entwickelt werden.



Ansprechpartner:
Ralf Schneppensiefen
Bismarckstr. 102
72072 Tübingen
Tel.: +49 (0) 151 511 986 73
E-Mail: ralf.schneppensiefen@cht.com

Der zweite Tränkungshersteller Zschimmer & Schwarz Chemie GmbH ist seit der Erteilung der ersten bauaufsichtlichen Zulassung zum Verstärken mit TUDALIT und der Lefatex-SBR-Tränkung fester Bestandteil der Zulassung. Das Unternehmen überzeugt als Hersteller von Dispersionen, Emulsionen oder Compounds und liefert wichtige Erfahrungen für die stetige Weiterentwicklung der Tränkungen.



Ansprechpartner:
Edmund Lingel
Stiegstraße 64
41379 Brüggen-Bracht
Tel.: +49 (0) 215 787 891 9
E-Mail: info.zsdl@schimmer-schwarz.com

ein hohes Produktionsvolumen der Carbongitter. Zudem eröffnet die enge Zusammenarbeit mit verschiedenen Gitterherstellern eine gewisse Vielfalt, welche den Produkthanwendern die Möglichkeit gibt, speziell für ein bestimmtes Bauprojekt angepasste Carbongitter zu entwickeln und so stets eine wirtschaftliche und statisch sinnvolle Lösung erarbeiten zu können. Die einzelnen Gitterhersteller verfügen bei der Herstellung der Carbongitter jeweils über jahrelange Erfahrung, sowohl auf wissenschaftlicher als auch praktischer Ebene, und ermöglichen so die Sicherstellung des höchsten Qualitätsanspruchs.



Ansprechpartner:
Werner Sinz
Steinerne Furt 44
86167 Augsburg
Tel.: +49 (0) 821 700 172 0
E-Mail: werner.sinz@hitexbau.com



Ansprechpartner:
Matthias Naumann
Holzwiesenweg 17
95028 Hof/Saale
Tel.: +49 (0) 928 159 166 10
E-Mail: mail@kneitz-sit.de

3.2.2 Faserhersteller

Der Carbonfaserhersteller Teijin Carbon Europe GmbH als assoziierter Partner liefert mit seinen Fasern den Grundbestandteil der Carbongitterbewehrung. Die jahrelange Erfahrung als Lieferant für die Luft- und Raumfahrtindustrie gewährleistet die hohe Qualität der Fasern und stellt die mechanischen Eigenschaften der Carbonbewehrung u. a. im Hinblick auf deren Zugfestigkeit sicher. Mit der Beteiligung des Partners im Konsortium kann sichergestellt werden, dass eine optimale Interaktion zwischen den Carbonfasern und den Tränkungen garantiert wird und Materialweiterentwicklungen möglichst schnell dem Anwender zugänglich gemacht werden.



Ansprechpartner:
Sabrina Beverungen
Kasinostraße 19-21
42103 Wuppertal
Tel.: +49 (0) 202 322 334
E-Mail: s.beverungen@teijincarbon.com



Ansprechpartner:
Prof. Chokri Cherif
Freiberger Str. 37
1067 Dresden
Tel.: +49 (0) 351 404 703 00
E-Mail: info@tudatex.de

3.2.4 Betonhersteller

Mit dem Unternehmen PAGEL Spezial-Beton GmbH & Co. KG steht dem Konsortium der führende Hersteller im Bereich des Feinbetons für das Verstärkungssystem Carbonbeton zur Verfügung. Die langjährigen Erfahrungen im Bereich der Betonherstellung und -entwicklung gewährleisten die hohen Qualitätsanforderungen an den Feinbeton und stellen die gleichbleibenden Verarbeitungsbedingungen des Feinbetons sicher. Hochwertige Verstärkungen bestehender Stahlbetonbauteile mit Carbonbeton werden somit garantiert.



Ansprechpartner:
Hennig von Daake
Wolfsbankring 9
45355 Essen
Tel.: +49 (0) 201 685 040
E-Mail: info@pagel.de

3.2.3 Gitterhersteller

Mit den Firmen Hitexbau GmbH, Wilhelm Kneitz Solution in Textile GmbH und der TUDATEX GmbH (assoziiierter Partner) konnten drei Gitterhersteller für das Projektkonsortium gewonnen werden. Alle drei Partner verfügen über eine ausgezeichnete Expertise im Bereich der Textilfertigung und gewährleisten gemeinsam

3.2.5 Planer und Koordinator

Mit der CARBOCON GMBH steht den Planenden und Anwendenden der neuen Zulassung ein Partner zur Seite, der aufgrund seiner langjährigen Erfahrung und seines Know-hows bei der Planung von Verstärkungsmaßnahmen mit Carbonbeton Unterstützung liefern kann. Gerade im Bereich von Sonderlösungen und Spezialanwendungen kann der Partner essenzielle Hilfestellungen bieten und Planende bei der Realisierung von Verstärkungsmaßnahmen gezielt unterstützen. Zusätzlich fungiert die CARBOCON GMBH im Konsortium als Koordinator und Projektleiter und steht für alle Fragen rund um die Zulassung bzw. das Verstärken mit Carbonbeton zur Verfügung.



Ansprechpartner:
Maximilian May
Ammonstraße 72
01067 Dresden
Tel.: +49 (0) 351 482 055 19
E-Mail: m.may@carbocon-gmbh.de

4 Aktuelle Praxisprojekte bei der Verstärkung von Bauteilen mit Carbonbeton

Nachfolgend wird anhand von zwei aktuellen Praxisprojekten das Anwendungspotenzial der Carbonbetonbauweise zur Verstärkung bestehender Bauwerke noch einmal verdeutlicht. Bei beiden Projekten konnte die bisherige Zulassung nicht angewendet werden, da sowohl die verwendeten Gitter (entsprechen dem Faserstrang Typ 3 der neuen CARBOrefit®-Zulassung) als auch der Anwendungsbereich von querkraft- und mehraxial beanspruchten Bauteilen nicht Gegenstand der Zulassung zum damaligen Planungszeitpunkt waren. Die Verstärkung der Bauteile erfolgte deshalb in beiden Fällen auf Grundlage einer Zustimmung im Einzelfall. Basierend auf der Weiterentwicklung und Erweiterung der CARBOrefit®-Zulassung sollen langfristig ähnliche Projekte nach abZ/aBG umsetzbar sein.

Durch den Einsatz einer Carbonbetonverstärkung konnte in beiden Referenzprojekten eine schlanke, wirtschaftliche und vor al-

lem denkmalgerechte Verstärkungsmaßnahme durchgeführt und somit der Materialaufwand und Ressourcenverbrauch gegenüber einer konventionellen Spritzbetonverstärkung drastisch reduziert werden. Zusätzlich konnte die Anwendung mit Carbonbeton dazu beitragen, den Abriss von Bauteilen und -werken zu vermeiden. Damit leistet Carbonbeton gleichzeitig einen Anteil bei der Umsetzung von Klimazielen für das Bauwesen. Mit dem Erhalt der Bauwerke wurde zudem das historische Erscheinungsbild für nachfolgende Generationen bewahrt – ein Beitrag zur Nachhaltigkeit.

In beiden ausgeführten Praxisbeispielen erfolgte die Verwendung der durch die neue Zulassung beschriebenen Materialien, wodurch das Potenzial und die hohe Leistungsfähigkeit der neuen Zulassung deutlich werden.

4.1 Verstärkung des Beyer-Baus der TU Dresden

Der von Martin Dülfer entworfene und 1913 eingeweihte Beyer-Bau (Bild 6) befindet sich zentral auf dem Campus der Technischen Universität Dresden in der George-Bähr-Straße 1 und ist mit dem Observatoriumsturm eines der Wahrzeichen der Universität. Es umfasst fünf Geschosse zuzüglich Keller, Turmgeschoss und Dachboden. Die Haupttragwerksstrukturen, einschließlich der Decken und Unterzüge, sind in Eisenbetonbauweise ausgeführt. Die Deckensysteme sind als Plattenbalkendecken ausgeführt und die Unterzüge weisen Spannweiten von bis zu 11 m auf. Die Decken, welche quer zu den Unterzügen spannen, sind als mehrfeldrige Platten ausgebildet. Die Spannweiten der Einzelfelder der Decken liegen in den meisten Fällen zwischen 2 und 3 m und betragen im Einzelfall bis zu 4 m. Der Beton der Unterzugstege wurde auf Grundlage von durchgeführten Bauteiluntersuchungen in die nicht normativ geregelte Festigkeitsklasse C8/10 eingeordnet. Der Beton der Deckenplatten ist der Festigkeitsklasse C20/25 zuzuordnen. Die Bestandsbiegebewehrung besteht aus Glattstahl mit Durchmessern von bis zu 30 mm und die Stababstände betragen in den Unterzügen oftmals nur wenige Millimeter. Die charakteristische Festigkeit der Bestandsbewehrung beträgt 260 N/mm² [10]. Im Zuge einer Nachrechnung wurden vor allem im Bereich der Bestandsdecken und -unterzüge erhebliche statische Defizite ermittelt.



Foto: Ulrich van Stipriaan

Bild 6 Ansicht des Beyer-Baus
View of the Beyer-Bau



Foto: CARBOCON GMBH

Bild 7 Großbauteilversuch im Rahmen der Zustimmung im Einzelfall
Large-scale bending test for project-related approval

Für die Verstärkung der Decken und Unterzüge im Beyer-Bau wurden verschiedene Varianten untersucht und miteinander verglichen. Als effizientestes Verfahren stellte sich die Verstärkung mit Carbonbeton heraus, da hierbei der Materialaufwand gegenüber einer konventionellen Spritzbetonvariante mit Stahlbewehrung deutlich reduziert und so eine sehr viel nachhaltigere Verstärkungslösung realisiert werden kann. Für die Verstärkung der Decken des Beyer-Baus hat sich in den Nachweisen der Biegetragfähigkeit eine 10 mm dünne Lage Carbonbeton als ausreichend herausgestellt. Die Deckenfelder spannen grundsätzlich einachsrig zwischen den Unterzügen bzw. Wänden. Dementsprechend verläuft die Haupttragrichtung des Carbondgitters in Richtung der kürzeren Spannweite bzw. quer zu den Unterzügen. Die Verstärkung der Unterzüge erfolgte je nach Erfordernis des jeweiligen Unterzugs mit einer oder zwei Lagen Carbonbeton. Die Haupttragrichtung des Carbondgitters verläuft in Bauteillängsrichtung. Die Betondeckung beträgt 5 mm, sodass insgesamt nur eine Verstärkungsdicke von 10 bis 15 mm notwendig ist. In einzelnen Bereichen gelang es nicht, die erforderliche Tragfähigkeit durch zwei Bewehrungslagen an der Stegunterseite zu erreichen. An diesen Unterzügen ist zudem eine Verstärkung an den Stegseiten vorgesehen. Die Verstärkung erfolgt sowohl für die Decken als auch für die Unterzüge mit den in der neuen Zulassung beschriebenen Materialien. Als Carbondgitter kommt die durch die Zulassung aufgeführte Regelausführung in Kombination mit dem Faserstrangtyp 3 zum Einsatz.

Die im Zuge der statischen Nachrechnung ermittelten Defizite hinsichtlich der Biegetragfähigkeit der Decken und Unterzüge können mit einer Carbonbetonverstärkung behoben werden, das bestehende Tragwerk mit geringem Aufwand verstärkt und die Bestandsabmessungen der Bauteile weitestgehend erhalten bleiben. Durch die schlanke Carbonbetonverstärkung bleibt das ursprüngliche Erscheinungsbild bestehen, was bei Verwendung einer konventionellen Spritzbetonverstärkung nicht möglich gewesen wäre. Die Ausführung der Verstärkungsarbeiten mit Carbonbeton im Beyer-Bau hat im September 2021 begonnen.

4.2 Hyparschale Magdeburg

Die durch Ulrich Mütther geplante und 1969 im Magdeburg errichtete Hyparschale ist eine der größten Stahlbetonschalen dieser Art in Deutschland. Das Bauwerk wurde als Mehrzweckhalle für

Messen, Konzerte und Veranstaltungen genutzt und gilt als kulturelles und architektonisches Wahrzeichen der Stadt. Seit 1990 steht das Bauwerk, welches als die größte erhaltene Mütther-Schale gilt, unter Denkmalschutz.

Die Dachkonstruktion besteht aus vier Hyparschalen (hyperbolische Paraboloidschalen), die mit einer Betondicke zwischen 5 und 7 cm jeweils eine Fläche von 24 m × 24 m überspannen [10]. Das gesamte Dachtragwerk überspannt damit stützenfrei eine Fläche von 48 m × 48 m [11, 12]. Aufgrund einer Vielzahl an Schäden und einiger, während der Errichtung des Bauwerks entstandenen, Baumängel musste das als Wahrzeichen Magdeburgs angesehene Gebäude 1997 gesperrt werden.

Zur Behebung der Vielzahl an Schäden und der Tragfähigkeitsdefizite wurden seit der Sperrung des Gebäudes verschiedene Sanierungsverfahren untersucht. Die lange Zeit favorisierte Lösung einer Verstärkung des Baudenkmals mittels konventionellem Spritzbeton und eines Betonauftrags von 70 mm auf der Ober- und 70 mm auf der Unterseite musste verworfen werden. Weitere Untersuchungen zum Bestand hatten gezeigt, dass die zusätzlich in das Bauwerk eingetragenen Lasten infolge der konventionellen Verstärkung nicht durch die Bestandskonstruktion hätten aufgenommen werden können. Zudem wäre die schlanke Erscheinung der Schale durch dieses Vorgehen zerstört worden. Mit der Planung einer Carbonbetonverstärkung konnte eine Alternativlösung erarbeitet werden, durch die die Wiederherstellung der ursprünglichen Tragfähigkeit mittels des Aufbringens einer einlagigen Verstärkung mit einer Gesamtdicke von lediglich 10 mm auf der Ober- und der Unterseite der bestehenden Schale erzielt werden konnte. Durch den von der Stadt Magdeburg angenommenen Vorschlag zur Verstärkung der Hyparschale mittels Carbonbeton konnte das bedeutende Baudenkmal unter minimalstem Ressourcen- und Arbeitsaufwand vor einem Abriss bewahrt und der Öffentlichkeit wieder zugänglich gemacht werden. Die Verstärkungsmaßnahmen erfolgten zwischen Sommer 2020 und Sommer 2021.

Die Verstärkung der Hyparschale in Magdeburg erfolgte mit Materialien, welche in der neuen CARBOrefit®-Zulassung geregelt sind. Als Bewehrung kam ein durch die Zulassung als Sonderausführung beschriebenes biaxiales Carbondgitter zum Einsatz. Langfristig soll die Verstärkung von biaxial biegebeanspruchten Bauteilen mit Carbonbeton als Anwendungsgegenstand mit in die Zulassung aufgenommen und bauaufsichtlich geregelt werden.



Bild 8 Verstärkung der Hyparschale Magdeburg
Strengthening the Hyparschale in Magdeburg



Bild 9 Ausführungsarbeiten mit Carbonbeton
Strengthening with carbon reinforced concrete

Im Rahmen der Verstärkungsmaßnahme der Hyparschale Magdeburg erfolgte eine vereinfachte Betrachtung des Ressourcenverbrauchs und der CO₂-Emission. Der Vergleich wurde zwischen der durchgeführten Carbonbetonverstärkung und der zuvor geplanten und verworfenen konventionellen Spritzbetonverstärkung gezogen. Aufgrund der großen Beton- und Bewehrungsersparnis konnten durch die Carbonbetonverstärkung bis zu 85 % an Ressourcen und 52 % an CO₂-Emission einspart werden [1]. Weitere Faktoren wie Transport und Logistik, vereinfachte Handhabung und Zeitersparnis wurden nicht mit betrachtet. Dennoch kann anhand dieses Vergleichs das enorme Potenzial des Werkstoffs bei der Sanierung oder Verstärkung von bestehenden Bauteilen im Hinblick auf den Ressourcenverbrauch und den CO₂-Ausstoß gezeigt werden.

Neben der zuvor beschriebenen deutlichen Ressourcenersparnis wird die final durchgeführte Carbonbetonverstärkung dem Bestand und der zur Bauzeit revolutionären Schlankheit der Hyparschale deutlich gerechter als die zunächst geplante konventionelle Spritzbetonverstärkung.

Literatur

- [1] Schumann, A.; Schladitz, F.; Schöffel, J.; May, S.; Curbach, M. (2021) *Ressourceneinsparung mit Carbonbeton – Am Beispiel der Verstärkung der Hyparschale in Magdeburg* in: Hauke, B. [Hrsg.] *Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz, Konstruktive Lösungen für das Planen und Bauen – Aktueller Stand der Technik*. Berlin: Ernst & Sohn.
- [2] Jesse, F.; Curbach, M. (2010) *Verstärken mit Carbonbeton* in: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. [Hrsg.] *BetonKalender 2010*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 457–565.
- [3] Steinbock, O.; Bösche, T.; Schumann, A. (2021) *Carbonbeton – Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken – Teil 2. Beton- und Stahlbetonbau* 116, H. 2, S. 109–117. doi.org/10.1002/best.202000106
- [4] Riegelmann, P.; May, S.; Schumann, A. (2017) *Das Potential von Carbonbeton für den Brückenbestand – das ist heute schon möglich* in: Curbach, M. [Hrsg.] *Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium*. Institut für Massivbau der TU Dresden. Dresden, 8./9. März 2017, S. 79–90.
- [5] Schumann, A.; May, S.; Bochmann, J. (2021) *Zu neuer Leistungsfähigkeit*. B + B Bauen im Bestand, H. 1, S. 20–25.
- [6] Deutsches Institut für Bautechnik [Hrsg.] (2021) *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-31.10-182: CARBOrefit®-Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonbeton*. Berlin. Geltungsdauer 1. Juni 2021–1. Juni 2026.
- [7] Deutsches Institut für Bautechnik [Hrsg.] (2014) *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-31.10-182: Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT (Textilbewehrter Beton)*. Berlin. Geltungsdauer 1. Dez. 2016–1. Juni 2021.
- [8] DIN EN 196-1 (2005-05) (2005) *Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*; Deutsche Fassung EN 196-1: 2005. Berlin: Beuth. Ausgabe Mai 2005.
- [9] DIN EN 1992-1-1 (2011-01) (2011) *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*; Deutsche Fassung EN 1992-1-1: 2011. Berlin: Beuth. Ausgabe Jan. 2011.
- [10] Wellner, S.; Scheerer, S.; Hampel, T. (2017) *Untersuchungen des Otto-Mohr-Laboratoriums an historischer Bausubstanz in und um Dresden* in: Curbach, M.; Opitz, H.; Scheerer, S.; Hampel, T. [Hrsg.] *9. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen*. TU Dresden, 21. Sept. 2017, S. 207–214.
- [11] Riegelmann, P.; Schumann, A.; May, S.; Bochmann, J.; Garibaldi, M. P.; Curbach, M. (2020) *Müther's shell structures in Germany – a solution to avoid demolition*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering History and Heritage 174, no. 3, pp. 124–132. doi.org/10.1680/jenhh.20.00012
- [12] Hentschel, M. et al. (2019) *Sanierung der Hyparschale Magdeburg*. Bautechnik 96, H. 1, S. 25–30. doi.org/10.1002/bate.201800087
- [13] MFPA Leipzig (2019) *Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben C³-V2.3 „Brandverhalten von Carbonbeton“*. Leipzig.
- [14] Materialprüfanstalt (MPA) für das Bauwesen (2014) *Untersuchungsbericht, Bauwerksuntersuchungen an der Hyparschale Magdeburg*. Braunschweig.

Ansprechpartner in Vertretung für das gesamte Konsortium

Dipl.-Ing. Maximilian May
info@carborefit.de
 Innovationsleiter
 CARBOCON GMBH
 World Trade Center Dresden
 Ammonstr. 72, 01067 Dresden



Wir
eröffnen
Ihnen den



Carbonbetonmarkt.

**Jetzt Mitglied werden
und profitieren.**