

Forschungsantrag

(Bitte ein unterschriebenes Exemplar dieses Antrages per Post und zusätzlich per E-Mail an die Geschäftsstelle schicken.)

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. – DAfStb
Budapester Straße 31
10787 Berlin

1. Forschungsthema:

Herleitung des Nachweises zur Begrenzung der Verformungen für Carbonbeton in Anlehnung an EC2

Kurztitel:

Begrenzung der Verformungen für Carbonbeton

2. Antragsteller/Forschende Stelle:

Anschriften: RWTH Aachen University
Lehrstuhl und Institut für Massivbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
Mies-van-der-Rohe-Str. 1
52074 Aachen

Telefon: +49 (0)241 80 25 170

Telefax: +49 (0)241 80 22 335

E-Mail hegger@imb.rwth-aachen.de

3. Ausgangsbasis und Begründung:

Das Tragverhalten von Bauteilen aus Carbonbeton wird seit vielen Jahren intensiv erforscht. Nachdem anfänglich vorrangig Bewehrungen aus AR-Glas verwendet wurden, werden heute nichtmetallische Bewehrungen (Stäbe, Matten) überwiegend aus Carbon eingesetzt. Zahlreiche Forschungen und Erstanwendungen belegen eindrucksvoll, dass Carbonbeton als Verbundwerkstoff der Zukunft Stahlbeton in bestimmten Anwendungsfeldern optimal ergänzt.

Die bisherigen und aktuellen Untersuchungen konzentrieren sich auf die Nachweise zum Grenzzustand der Tragfähigkeit. Eine Reihe von für die Praxis relevanten Nachweisen aus dem Stahlbetonbau stehen für Carbonbetonbauteile aber noch nicht zur Verfügung. Ohne praxisgerechte und wirtschaftliche Bemessungsansätze und anerkannte Regelwerke ist eine breite Anwendung der Bauweise nicht möglich, da Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) oder allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen (abZ) zeit- und kostenintensiv sind.

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) liegen bisher keine Nachweisverfahren und praxistaugliche Regelungen vor. Die Begrenzung von Verformungen stellt aber zum einen die Gebrauchstauglichkeit sicher und verhindert zum anderen, dass verformte Bauteile angrenzende Bauelemente beeinträchtigen. Dieser Nachweis ist für die Praxis somit von hoher Relevanz.

Der Eurocode 2 bietet für Stahlbetonbauteile zwei Möglichkeiten den Nachweis zur Begrenzung der Verformungen zu führen. Die Verformungen können explizit berechnet und

anschließend mit Grenzwerten verglichen werden. Dabei gilt im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit im Allgemeinen ein Grenzwert von $l/250$ für den Durchhang (l = Stützweite, Kragarm: $l = 2,5 \cdot l_k$). Sind die angrenzenden Bauteile verformungsempfindlich, gilt ein Grenzwert von $l/500$ für die Durchbiegung.

Darüber hinaus enthält der EC2 einen vereinfachten Nachweis über die Biegeschlankheit, der wie folgt geführt werden kann:

$$\frac{l}{d} \leq K \cdot \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \cdot \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2\sqrt{f_{ck}} \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{3/2} \right] \leq (l/d)_{max} \quad \text{wenn } \rho \leq \rho_0 \quad (1)$$

$$\frac{l}{d} \leq K \cdot \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \cdot \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12}\sqrt{f_{ck}} \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho}\right)^{1/2} \right] \leq (l/d)_{max} \quad \text{wenn } \rho > \rho_0 \quad (2)$$

Dabei ist l/d der Grenzwert der Biegeschlankheit, K der Beiwert zur Berücksichtigung des statischen Systems, f_{ck} der charakteristische Wert der Betondruckfestigkeit, ρ_0 der Referenzbewehrungsgrad, ρ der erforderliche Zugbewehrungsgrad und ρ' der erforderliche Druckbewehrungsgrad.

In Abhängigkeit von der Beanspruchung werden für gering- und hochbeanspruchte Bauteile die zulässigen Schlankheiten definiert (siehe Gleichungen (1) und (2)). Der Kategorie "gering beanspruchte Bauteile" werden vor allem Platten zugeordnet, bei denen die Spannweite im üblichen Bereich liegt. Hoch beanspruchte Bauteile sind vorwiegend Balken mit größeren Bereichen im gerissenen Zustand II. Durch die Unterscheidung in gering und hochbeanspruchte Bauteile wird der Einfluss des Bewehrungsgrades auf die Biegesteifigkeit im Zustand II erfasst. Durch den vereinfachten Nachweis können aufwändige Durchbiegungsberechnungen meist entfallen. Die Grenzen der Biegeschlankheit basieren auf einer genauen Berechnung und wurden mit baupraktischen Erfahrungswerten empirisch abgeleitet.

Bei der Berechnung der Durchbiegung von gerissenen Bauteilen ist grundsätzlich zu beachten, dass die Biegesteifigkeit EI eine lastabhängige Größe ist. In gerissenen Bereichen besteht daher kein linearer Zusammenhang zwischen dem Moment und der Durchbiegung. Die Verformungen nehmen infolge Rissbildung überproportional zu und hängen maßgeblich von der Betonzugfestigkeit ab. Darüber hinaus hat das statische System (gelenkige oder teilweise eingespannte Lagerung) einen großen Einfluss auf den gerissenen Bereich.

Zur Bestimmung der Verformungen kann für einen konkreten Querschnitt die Momenten-Krümmungs-Beziehung (M - κ -Beziehung) aufgestellt werden. Je nach gewählten Annahmen erfolgt die Berechnung vereinfacht oder genau. Vereinfacht lässt sich die M - κ -Beziehung z. B. aufstellen, indem die Biegesteifigkeit EI für den Zustand I und Zustand II bereichsweise konstant angenommen wird. Zur genaueren Ermittlung von Verformungen sind Rissbildung und Mitwirkung des Betons auf Zug zu berücksichtigen. Durch numerische Integration der Krümmung über die Bauteillänge wird dann die Verformung ermittelt. In Abbildung 1 sind der Momenten-, Biegesteifigkeits- und Krümmungsverlauf eines gerissenen Bauteils am Beispiel eines Einfeldträgers im Vierpunktbiegeversuch dargestellt.

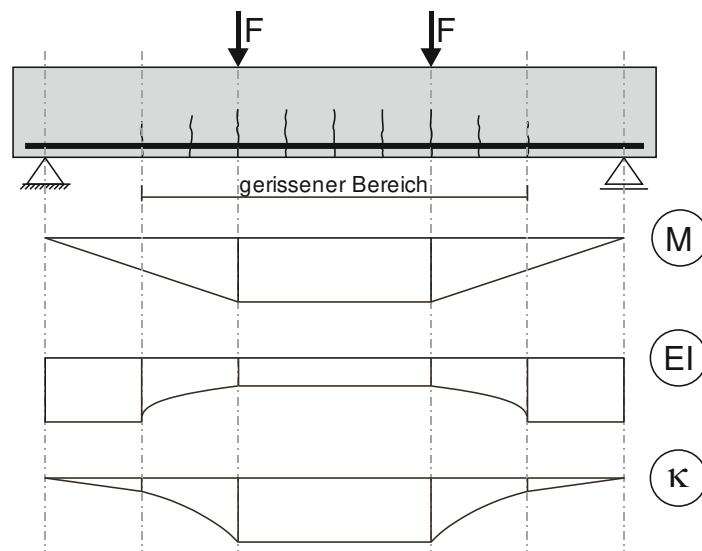


Abb. 1: Schematische Darstellung des Momenten-, Biegesteifigkeits- und Krümmungsverlaufs eines gerissenen und bewehrten Betonbalkens im Vierpunktbiegeversuch

Ein vereinfachter Nachweis zur Begrenzung der Verformungen für Carbonbetonbauteile in Anlehnung an EC2 kann durch systematische Parameterstudien hergeleitet werden. Hierbei wird die Verformung für verschiedene Querschnitte anhand der M - κ -Beziehung durch numerische Integration der Krümmung über die Bauteillänge ermittelt. Darauf aufbauend soll ein vereinfachter Nachweis über die Biegeschlankheit ohne direkte Berechnung der Durchbiegung abgeleitet werden.

Verformungsberechnungen von Stahlbetonbauteilen können nicht ohne Weiteres auf carbonbewehrte Bauteile übertragen werden, da sich Carbonbeton in folgenden Punkten von Stahlbeton unterscheidet:

- Die nichtmetallische Bewehrung hat einen vom Betonstahl abweichenden E-Modul ($E_S = 200.000 \text{ N/mm}^2$, $E_{\text{Carbon}} = 150.000 \text{ bis } 240.000 \text{ N/mm}^2$, $E_{\text{AR-Glas}} = 60.000 \text{ bis } 70.000 \text{ N/mm}^2$).
- Die profilierte Oberfläche von Betonstahl bewirkt einen vorwiegend mechanischen Verbund zwischen Bewehrung und Beton (lokale Verzahnung der Rippen mit dem Beton). Aufgrund der Oberflächenstruktur von typischen Carbonbewehrungen liegt bei Carbonbeton häufig ein weitgehend adhäsiver Verbund zwischen Beton und Bewehrung vor.
- Die Spannung der nichtmetallischen Bewehrung im Gebrauchszustand liegt oberhalb der Betonstahlspannung, was mit größeren Krümmungen und damit auch mit größeren Verformungen verbunden ist.
- Höherfeste Feinbetone (Größtkorn $\leq 8 \text{ mm}$) besitzen eine größere Verformungsfähigkeit als Normalbetone (Größtkorn $16 - 32 \text{ mm}$)
- Bauteile aus Carbonbeton haben in der Regel eine kleinere Bauteildicke, sodass eine andere Bezugsgröße der Biegeschlankheit vorliegt.

Das beschriebene Forschungsthema ist nicht Gegenstand laufender Untersuchungen und wird in keinem der Vorhaben des BMBF-Forschungsclusters „Carbon Concrete Composites (C³)“ behandelt.

4. Ziel des Forschungsvorhabens:

Zur Vervollständigung der Bemessungsrichtlinie Carbonbeton sollen ein praxistaugliches Verfahren und Regeln zur wirksamen Durchbiegungsbegrenzung von Carbonbeton abgeleitet werden. Für den Nachweis soll für typische statische Systeme ein Kriterium der zulässigen Biegeschlankheit unter Angabe aller Randbedingungen in Anlehnung an EC2

hergeleitet werden. Mit diesem Nachweis kann auch für Carbonbeton auf eine aufwändige direkte Berechnung der Durchbiegung im Regelfall bei üblichen Randbedingungen verzichtet werden. Das Nachweisverfahren soll gleichermaßen für Fassadenplatten und hohe schlanke Träger anwendbar sein.

Die Erkenntnisse des Forschungsvorhabens sollen direkt in das „Arbeitspapier Bemessung“ einfließen, das im Rahmen des BMBF-Vorhabens C³ L9 bearbeitet wird und als Grundlage für eine DAfStb-Richtlinie dienen soll. Damit sollen die Hemmnisse hinsichtlich des Einsatzes des neuen Verbundwerkstoffs durch praktikable, wirtschaftliche und umfassende Bemessungsregeln abgebaut und Carbonbeton in der Baupraxis etabliert werden.

5. Arbeitsplan:

Der Arbeitsplan gliedert sich in 6 Schritte:

(1) Versuchsdatenbank

Den ersten Schritt stellt die Erstellung einer Versuchsdatenbank zur Durchbiegung von carbonbewehrten Bauteilen dar. Dabei sollen die Haupteinflussgrößen, die zur Berechnung der Verformungen im vereinfachten Nachweisverfahren für carbonbewehrte Bauteile zu erfassen sind, identifiziert werden.

(2) Erweiterung vorhandener Software-Tools

Anschließend werden nichtlineare M- κ -Beziehungen für überwiegend auf Biegung beanspruchte Carbonbetonquerschnitte hergeleitet und anhand von Versuchsdaten validiert.

(3) Ermittlung der Durchbiegung für typische statische Systeme

Das Nachweisverfahren basiert auf einem Ansatz, der die Durchbiegung anhand von repräsentativen M- κ -Beziehungen ermittelt. Ziel ist es, die Einflüsse aus den nichtlinearen Materialverhalten (Beton, Bewehrung, Rissbildung und Verbund, zeitabhängiges Verhalten) zu quantifizieren.

Um eine hohe Akzeptanz des Nachweises bei den Zulassungsbehörden und Normungsgremien zu erreichen, erfolgt die Herleitung auf Basis kinematischer Gesetze. Zur Herleitung werden Parameterstudien für typische statische Systeme (Einfeldträger mit beliebigen Einspanngraden, Durchlaufsysteme, einfache Rahmensysteme) mit einem FE-Modell durchgeführt, das die Verformungen anhand von nichtlinearen M- κ -Beziehungen ermittelt. Mit diesen M- κ -Beziehungen, die durch eine Versuchsdatenbank validiert sind, lassen sich die maßgebenden Einflüsse aus dem Spannungs-Dehnungsverhalten von carbonbewehrten Bauteilen (Zug- und Druckfestigkeit, E-Modul, Rissbildung und Verbund, zeitabhängigem Verhalten) zutreffend erfassen.

(4) Herleitung einer zulässigen Biegeschlankheit (einfacher Nachweis)

Auf Basis der Parameterstudien in Arbeitspaket (3) werden unter Berücksichtigung der Durchbiegungsbegrenzung von $l/250$ und $l/500$ zulässige Biegeschlankheiten hergeleitet.

(5) Validierung des Nachweiskonzeptes mit Versuchsdaten

Der vereinfachte Nachweis wird anhand der in Arbeitspaket (1) erstellten Versuchsdatenbank validiert.

(6) Erstellung des Schlussberichts

Alle Ergebnisse werden in einem Schlussbericht zusammengefasst.

6. Welche Bereiche des Beton- und Stahlbetonbaus werden in erster Linie betroffen?

Das Projekt richtet sich an zukünftige Tragwerksplaner im Bereich des Carbonbetonbaus. Die Erkenntnisse sind im Wesentlichen für den Entwurf und die Bemessung von Neubauteilen aus Carbonbeton von hoher Relevanz.

7. Welcher Nutzen wird erwartet? Welche Möglichkeiten bestehen für eine schnelle Umsetzung des Ergebnisses in die Praxis?

Die Ableitung des Nachweises zur Begrenzung von Verformungen in Anlehnung an den EC2 ist von hoher Relevanz, da aktuell ein solcher Nachweis für carbonbewehrte Bauteile nicht zur Verfügung steht. Mit dem vereinfachten Nachweis soll das Einhalten der Grenzwerte der zulässigen Verformung von Carbonbetonbauteilen wie im EC2 über die Biegeschlankheit nachgewiesen werden.

Kurzfristig soll der Nachweis für Entwurfsplanungen oder Vorbemessungen im Rahmen von Zulassungen im Einzelfall oder bauaufsichtlichen Zulassungen verwendet werden. Mittelfristig ist die Aufnahme des Nachweises in Regelwerke vorgesehen. Durch Herleitung des Nachweises in Anlehnung an Stahlbetonbauteile ist mit einer hohen Akzeptanz der Mitglieder in Normungsgremien aus den Bereichen der Bauaufsicht, Forschung, beratenden Ingenieure, Bauausführung und Produkthersteller zu rechnen.

Der Berechnungsansatz soll direkt in das „Arbeitspapier Bemessung“ einfließen, das im BMBF Vorhaben C³ V-L9 erstellt wird. Hierdurch werden Hemmnisse zur Anwendung der Carbonbetonbauweise abgebaut, da allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen und Zustimmungen im Einzelfall weitgehend überflüssig werden. Über den „Unterausschuss Nichtmetallische Bewehrung“ des DAfStb sollen die Erkenntnisse Eingang in die DAfStb-Richtlinie zur Bemessung von Betonbauteilen mit nichtmetallischen Bewehrungen finden. Dies führt zu einer schnellen Verbreitung und höheren Akzeptanz der neuen Bauweise bei Bauherren, Tragwerksplanern und Bauausführenden.

8. Ist dieser oder ein ähnlicher Antrag schon früher beim DAfStb gestellt worden?

Wenn ja: Aktenz./Datum ja / nein

9. Ist bei einer anderen forschungsfördernden Stelle ein Antrag gleicher oder ähnlicher Thematik gestellt worden?

Wenn ja: Bei ja / nein

10. Wird der Forschungsantrag in Zusammenhang mit einer Promotionsarbeit gestellt?

ja / nein

11. Gesamtkosten des Forschungsvorhabens:

Eigenmittel:	8.000 €
Fremdmittel:	0 €
beantragter Zuschuss:	26.000 €
	34.000 €

beantragter Zuschuss, aufgeschlüsselt nach Kalenderjahren

2019	0 €
2020	26.000 €
2021	0 €
Gesamt:	26.000 €

12. Gesamtdauer des Forschungsvorhabens: 12 Monate

Aachen, den 15.08.2019

(Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger)

Arbeits- und Kostenplan zum Antrag - Übersicht

Titel und Kurzbezeichnung des Einzelvorhabens:

Herleitung des Nachweises zur Begrenzung der Verformungen für Carbonbeton in Anlehnung an EC2

Begrenzung der Verformungen für Carbonbeton

Forschungszeitraum:

01.01.2020 - 31.12.2020 (12 Monate)

Arbeitsschritt	Jahr												Monate
	2020												
	Zeitraum - Monate												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1 Versuchsdatenbank													2
2 Erweiterung vorhandener Software-Tools													3
3 Ermittlung der Durchbiegung für typische statische Systeme													4
4 Herleitung einer zulässigen Biegeschlankheit (einfacher Nachweis)													2
5 Validierung des Nachweiskonzepte mit Versuchsdaten													3
6 Erstellung des Schlussberichts													2

Personaleinsatz MM													Monate
	0-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20	-22	-24	MM
1 Wissenschaftlicher Mitarbeiter (TV-L13)	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	5,50
1 Studentische Hilfskraft	1,00	1,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	7,00