

# Brandbemessung von Kreis- und Kreisringstützen mit der erweiterten Zonenmethode

David Krybus<sup>1</sup>, Marcus Achenbach<sup>2</sup>, Roland Sauer<sup>1</sup>, Livia Prifti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>RIB Software GmbH, Stuttgart

<sup>2</sup>LGA Bayern, KdöR, Prüfamf für Standsicherheit, Hof

**Zusammenfassung:** Die Anwendung der erweiterten Zonenmethode (EZM) zur Heißbemessung von Stahlbetonstützen wurde auf Kreis- und Kreisringquerschnitte ausgedehnt. Die Validierung des Brandschutznachweises von Rundstützen ist durch die geringe Anzahl verfügbarer experimenteller Ergebnisse jedoch nur eingeschränkt möglich. Der Beitrag vergleicht die Ergebnisse der EZM für Beispiele aus der Literatur und der Praxis mit dem allgemeinen Verfahren.

## 1 Einführung

Die Zonenmethode stellt ein vereinfachtes Verfahren zum Nachweis der geforderten Feuerwiderstandsdauer nach Eurocode 2: Teil 1-2 [1] dar. Die Methode ist bezüglich ihrer Komplexität und ihrer Anwendbarkeit zwischen den tabellarischen Daten und dem allgemeinen Verfahren positioniert. Für den Brandschutznachweis von Stützen nach dem deutschen Nationalen Anhang [2] darf die Zonenmethode nur mit zusätzlichen Annahmen verwendet werden.

Als eine Option der Erweiterung der Zonenmethode wird auf die Arbeit von Cyllok und Achenbach [3] verwiesen. Auf diesen Grundlagen setzt Achenbach [4] auf und entwickelt die Methode von einem Handrechenverfahren zu einem nichtlinearen Verfahren weiter.

Die originalen Ansätze befassen sich lediglich mit Rechteckquerschnitten. Der Anwendungsbereich der EZM wird von den Autoren Krybus, Achenbach und Prifti [5] auf die Kreis- und Kreisringquerschnitte ausgedehnt. Die notwendigen Gleichungen für die Querschnittsreduktion werden abgeleitet, die Methode wird durch die beschränkt verfügbare Anzahl von Experimenten mit Kreisstützen validiert und durch etliche Vergleichsrechnungen von Beispielen aus der Praxis überprüft.

## 2 Erweiterte Zonenmethode

Das ursprüngliche Zonenverfahren, wie von Hertz [6] entwickelt, ist zur Handberechnung des Brandschutznachweises eines Querschnitts gedacht. Die thermischen Dehnungen werden vernachlässigt und es wird angenommen, dass jede Querschnittsfaser die nötige Stauchung erfährt, um die volle Druckfestigkeit zu erreichen. Somit kann die Zonenmethode als ein plastisches Verfahren eingestuft werden. Unter diesen Annahmen kann die Querschnittstragfähigkeit durch die temperaturabhängige Festigkeit  $f_{c,\theta}$  und die Biegesteifigkeit durch den temperaturabhängigen Elastizitätsmodul  $E_{c,\theta}$  beschrieben werden. Hertz betrachtet bei seinen Herleitungen einen Schnitt durch einen rechteckigen Querschnitt, wie in Abb. 1 dargestellt. Die Tragfähigkeit des Betonquerschnitts kann über den Schnitt parallel zur y-Achse durch die Integration der temperaturabhängigen Festigkeit ausgedrückt werden

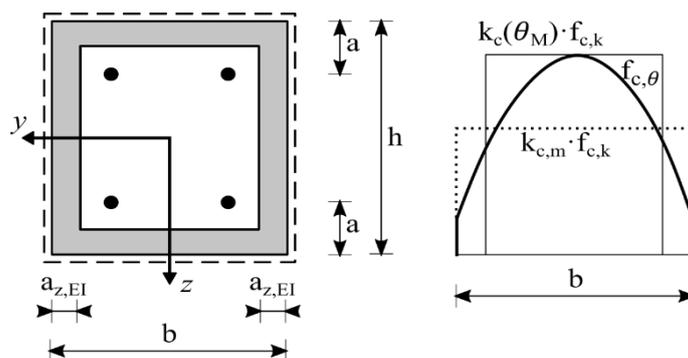
$$n_{Rc,\theta} = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} f_c(\theta) dy = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} k_c(\theta) \cdot f_{c,k} dy = k_{c,m} \cdot f_{c,k} \cdot b. \quad (1)$$

Der Faktor  $k_{c,m}$  steht für die mittlere Abminderung der Festigkeit. Wird der Abfall der Festigkeit  $k_c(\theta_M)$  auf den Mittelpunkt M bezogen, kann aus der Gleichheit der Tragfähigkeiten das Maß für die Reduktion der Querschnittsbreite bestimmt werden

$$a_{z,f} = \frac{b}{2} \cdot \left(1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)}\right). \quad (2)$$

Empirisch wurde von Hertz die Gleichung zur Berücksichtigung der Verringerung der Biegesteifigkeit des brandbeanspruchten Querschnitts aus Vergleichsrechnungen abgeleitet:

$$a_{z,EI} = \frac{b}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)}\right)^{4/3}\right). \quad (3)$$



**Abbildung 1:** links: Bezeichnungen am Querschnitt, rechts: Verteilung der Betonspannungen (—), der mittleren Festigkeit (-) und des Spannungsblock (...) für  $z = 0$

Die Gültigkeit dieser Annahmen wird von Achenbach [4] überprüft und die Ergänzungen der Zonenmethode werden dort weiter ausgearbeitet. Für das dabei entwickelte Verfahren liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Die thermischen Dehnungen von Beton und Betonstahl werden vernachlässigt.

- Die beflamten Ränder werden (siehe Abb.1) um das Maß  $a_{z,EI}$  verkleinert.
- Bei der Modellierung des Betons werden die Arbeitslinien des allgemeinen Verfahrens nach Norm [1] verwendet. Es wird von konstanten Stoffeigenschaften im Restquerschnitt ausgegangen, die auf die Temperatur im Mittelpunkt M bezogen werden.
- Es wird eine Scheitelstauchung  $|\varepsilon_{c1,\theta}| \geq 3,5 \text{ ‰}$  angesetzt.
- Die Bewehrung wird mit den Spannungs-Dehnungsbeziehungen des allgemeinen Verfahrens nach Norm [1] modelliert.
- Die Fläche der druckbeanspruchten Bewehrung wird verkleinert. Der Beiwert  $\eta_s(\theta)$  zur Abminderung beträgt 1,0 bis 100 °C und 0,5 ab 400 °C. Zwischenwerte werden linear interpoliert.

Die erweiterte Zonenmethode nach Achenbach wird durch die Nachrechnung von Laborversuchen validiert und das Sicherheitsniveau im Vergleich zum allgemeinen Verfahren durch eine vollprobabilistische Methode bestimmt [4].

Das Verfahren wurde in das Programm zur Bemessung von Hochbaustützen BEST [7] implementiert. Das Programm basiert auf der Finiten Element Methode, welche für die geometrisch und materiell nicht-lineare Analyse eingesetzt wird. Durch Nachrechnung von Brandversuchen wird die Implementierung in das Programm BEST erfolgreich validiert [8].

### 3 Erweiterung für Kreis- und Kreisringquerschnitte

Der Rechteckquerschnitt gehört bei den Stahlbetonstützen zu den meistverbreiteten Formen, was auch die Anzahl der Experimente bestätigt. Die gleichen Voraussetzungen, die man für die Ableitung der Zonenmethode trifft, lassen sich auch bei den Kreis- oder Kreisringquerschnitten zugrunde legen. Bei einer gleichmäßigen Beflammung um den ganzen Querschnitt herum, stellt sich eine Temperaturverteilung mit Isothermen ein, die parallel zum Querschnittsrand verlaufen.

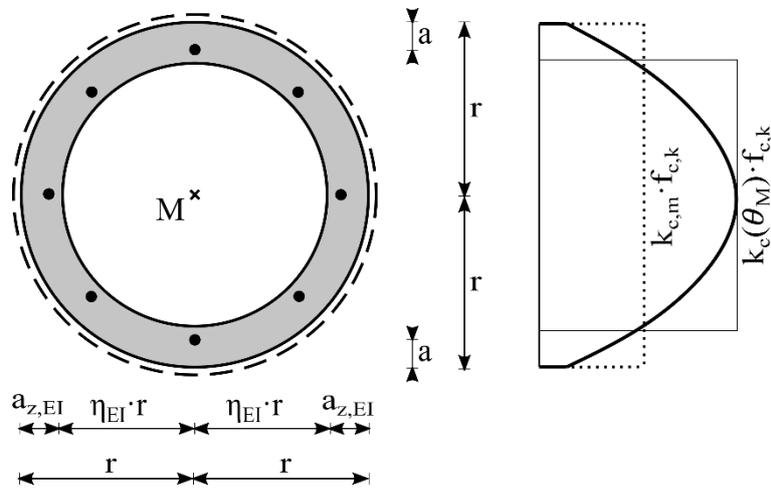
Krybus, Achenbach und Prifti [5] berichten über die Möglichkeit der Ausdehnung der Methode für die Kreis- und Kreisringquerschnitte von brandbeanspruchten Stützen. Analog zu den Rechteckquerschnitten wird ein Schnitt durch den Mittelpunkt gelegt und an ihm der Verlauf der temperaturabhängigen Festigkeit betrachtet, siehe Abb. 2.

Abweichend von einem Rechteck- oder einem Wandquerschnitt wird der erforderliche Formelapparat für einen Schnitt mit der Integration nicht über die Breite abgeleitet, sondern es wird über den gesamten Querschnitt aufintegriert. Die Tragfähigkeit des vollen Kreisquerschnitt berechnet sich mit

$$N_{Rc,\theta} = \int_0^{2\pi} \int_0^r f_{c,\theta} \cdot r \, dr \, d\varphi = \int_0^{2\pi} \int_0^r k_c(\theta) \cdot f_{c,k} \cdot r \, dr \, d\varphi. \quad (4)$$

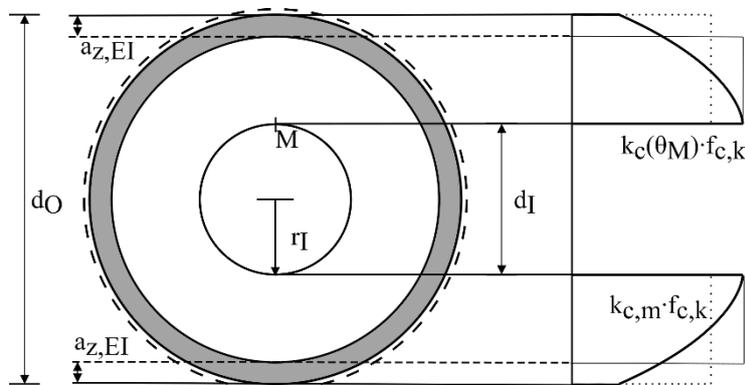
Mit der Einführung des „mittleren“ Reduktionsfaktors und des reduzierten Querschnitts mit dem Bezug auf den Mittelpunkt schreibt sich die Tragfähigkeit zu

$$N_{Rc,\theta} = \pi \cdot r^2 \cdot k_{c,m} \cdot f_{c,k} = \pi \cdot (\eta_f \cdot r)^2 \cdot k_c(\theta_M) \cdot f_{c,k}. \quad (5)$$



**Abbildung 2:** links: Bezeichnungen des Kreisquerschnitts der weiterentwickelten Zonenmethode, rechts: Verteilung der temperaturabhängigen Betondruckspannungen (—), der mittleren Festigkeit (-) sowie des Spannungsblocks (...) für den Schnitt durch den Mittelpunkt

Für den Kreisringquerschnitt ist die untere Integrationsgrenze in radialer Richtung durch den inneren Radius definiert. Als Bezugspunkt für die Mittelpunkttemperatur wird ein Punkt M an den inneren Rand gelegt (siehe. Abb. 3)



**Abbildung 3:** Definition eines Kreisringquerschnitts

In diesem Fall ergibt sich die Tragfähigkeit mit der „mittleren“ Reduktion zu

$$N_{Rc,\theta} = \pi \cdot (r_O^2 - r_I^2) \cdot k_{c,m} \cdot f_{c,k}, \quad (6)$$

die der Tragfähigkeit des verkleinerten Querschnitts mit dem Bezug der Temperatur auf den Punkt M gleicht.

$$N_{Rc,\theta} = \pi \cdot ((\eta_f \cdot r_O)^2 - r_I^2) \cdot k_c(\theta_M) \cdot f_{c,k}. \quad (7)$$

Für beide Querschnittsformen wird der Reduktionsfaktor  $\eta_f$  eingeführt, der über die Anpassung der Querschnittsfläche die gleiche Tragfähigkeit des vollen und des reduzierten Querschnitts sicherstellt.

Durch die Umformulierung kann die Breite der „geschädigten“ Zone für den Kreis

$$a_{z,f} = r \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)}} \right) \quad (8)$$

und für den Kreisring

$$a_{z,f} = r_0 \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{k_{c,m} \cdot (r_0^2 - r_1^2) + r_1^2 \cdot k_c(\theta_M)}{k_c(\theta_M) \cdot r_0^2}} \right) \quad (9)$$

ausgedrückt werden. Analog zum Rechteck kann entsprechend der Empfehlung von Hertz die Reduktion der Biegesteifigkeit zu  $\eta_{EI} \approx \eta_f^{4/3}$  angenommen werden und die „geschädigte“ Zone zu ihrer Berücksichtigung ermittelt werden.

Die „geschädigte“ Zone ist auf keinen Fall mit den Abplatzungen oder mit dem Abbrand zu verwechseln, sondern stellt ein mathematisches Modell dar.

Die Recherche der Fachliteratur ergeben nur wenig Veröffentlichungen zu Experimenten mit Stützen mit rundem Querschnitt. Die Nachrechnung einer kleinen Serie Kreisstützen mit EZM, die von Franssen und Dotreppe [9] im Brand untersucht worden sind, ist von Krybus, Achenbach und Prifti in [5] beschrieben. Für Kreisringstützen sind kaum Brandversuche vorhanden.

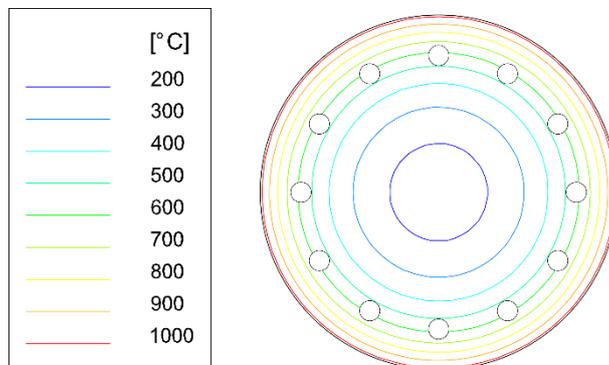
## 4 Praktische Beispiele aus der Literatur

### 4.1 Kreisstütze

Am Beispiel einer Kreisstütze aus [10] wird der Brandschutznachweis mit der erweiterten Zonenmethode illustriert. Es handelt sich um eine Stütze im Dachgeschoss mit einem Durchmesser von 35 cm. Die Stütze ist in der Betonklasse C45/55 ausgeführt und mit 15 Bewehrungsstäben vom Durchmesser 20 mm B500 bewehrt. Der Randachsabstand der Stäbe beträgt 40 mm. Die Stütze soll für 120 Minuten im Brand standsicher bleiben.

Für die Stütze wird eine Belastung am Kopf mit einer ständigen Last  $N_{GK} = 1497$  kN und einer Schneelast  $N_{QK} = 1153$  kN angenommen. Durch den Kombinationsbeiwert für Schnee  $\psi_{2,1} = 0$  ist die ständige Last gleichzeitig auch die Bemessungslast im Brandfall. Aufgrund der Lage der Pendelstütze im obersten Geschoss können beim Brand nur am unteren Lagerpunkt die Rotation wirksam gehindert werden, was zu einer Reduktion der Knicklänge für den Eulerfall 3 führt (unten eingespannt). Die ungewollte Ausmitte stellt sich infolge der Imperfektion ein.

Aus der thermischen Analyse, für welche die Temperaturverteilung nach 120 min im Querschnitt in Abb. 4 gezeigt wird, geht hervor, dass im Schwerpunkt eine Temperatur von 146 °C erreicht wird. Die Breite der „geschädigten“ Zonen, um die der Kreisradius reduziert wird, beträgt 5,6 cm.



**Abbildung 4:** Temperaturverteilung im Querschnitt nach 120 min Brand

Obwohl die Bewehrungsstäbe eine Temperatur von 577 °C erreichen, die zu einem großen Verlust der Festigkeit führt, kann durch den hohen Bewehrungsgehalt von 4,9 % die Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten nachgewiesen werden. Die Stütze ist im Brandfall zu 85 % ausgenutzt und die rechnerisch maximale Branddauer nach EZM beträgt 141 Minuten. Dies wird durch eine Berechnung mit dem Programm InfoCAD [11] nach dem allgemeinen Verfahren (AV) bestätigt. Eine Übersicht der möglichen Branddauer ist in Tab. 1 zusammengefasst.

| Lösung        | Verfahren         | Branddauer [min] |
|---------------|-------------------|------------------|
| Referenz [10] | Gleichung 5.7 [1] | 149              |
| InfoCAD [11]  | AV                | 149              |
| BEST [7]      | EZM               | 141              |

**Tabelle 1:** Maximal mögliche Branddauer der Kreisstütze für verschiedene Verfahren und Lösungen

## 4.2 Schleuderbetonstütze

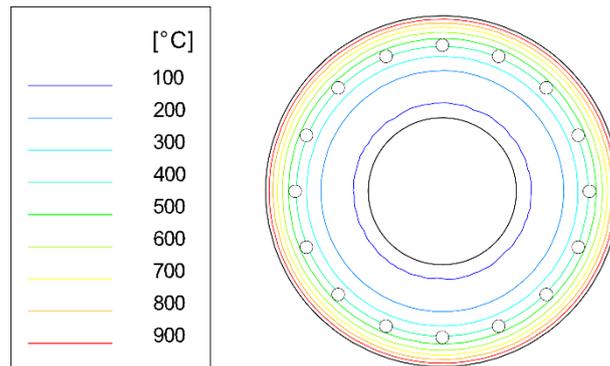
Zur Veranschaulichung der Anwendung der EZM an einem Kreisringquerschnitt wird der Brandschutznachweis einer Schleuderbetonstütze aus [12] geführt. Die Stütze ist aus Beton C80/95 hergestellt und 6 Meter lang. Der Außendurchmesser beträgt 55 cm. Durch das Schleuderverfahren bei der Herstellung entsteht ein Innenraum mit dem Durchmesser von 23 cm. Die Stütze ist mit zwei Lagen bewehrt. In der äußeren Lage mit dem Randachsabstand von 4,5 cm sind 16Ø40 platziert. Die innere Lage besteht aus 8Ø28, beide aus dem Stahl B500. Der sehr hohe Bewehrungsgehalt von 12,8 % ist durch die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung möglich.

Nachgewiesen wird die Feuerwiderstandsklasse R90. In der Veröffentlichung von Quast und Richter [12] wird die maximale Traglast mit der planmäßigen Ausmitte von 0,1 d gesucht. Zu berücksichtigen ist auch die Imperfektion mit der Exzentrizität von 12,2 mm. Um den Vergleich zu vereinfachen, wird die ermittelte Traglast von 7722 kN von den Autoren übernommen.

Im Programm BEST ist die Definition nur einer Bewehrungslage möglich. Auf der sicheren Seite liegend wird daher nur die äußere Lage der Bewehrung mit 16Ø40 berücksichtigt. Ihre

statische Wirkung ist bei der exzentrischen Stützenbelastung wesentlich größer und beim Brand wird sie auch deutlich mehr erwärmt.

Die ermittelte Temperatur in den Bewehrungsstäben von 415 °C stimmt mit den Ergebnissen der Autoren überein (siehe Abb. 5). Der innere Rand erreicht eine Temperatur von 92,8 °C und der Querschnitt wird bei der Berechnung mit EZM um eine Zonenbreite von 3,6 cm reduziert.



**Abbildung 5:** Temperaturverteilung im Kreisringquerschnitt der Schleuderbetonstütze (R90)

Nach der EZM ist für R90 die volle Ausnutzung erreicht. Die maximale Feuerwiderstandsdauer wird zum Vergleich mit dem allgemeinen Verfahren [11] überprüft. Beide Verfahren zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Referenzergebnis (siehe Tab. 2).

| Lösung        | Verfahren | Branddauer [min] |
|---------------|-----------|------------------|
| Referenz [12] | AV        | 90               |
| InfoCAD [11]  | AV        | 91               |
| BEST [7]      | EZM       | 90               |

**Tabelle 2:** Maximal mögliche Branddauer der Schleuderbetonstütze für verschiedene Verfahren und Lösungen

## 5 Fazit und Ausblick

Das verbreitete Anwendungsspektrum der erweiterten Zonenmethode nach Achenbach um die Kreis- und Kreisringquerschnitte eröffnet weitere Möglichkeiten beim Brandschutznachweis von Stahlbetonstützen. Das Verfahren ist durch Nachrechnung von Brandversuchen rechteckiger Stützen validiert. Ebenso für die wenigen Experimente mit Kreisstützen liefert die EZM sichere Ergebnisse. An praktischen Beispielen zeigt die Methode eine gute Vergleichbarkeit mit dem komplexen allgemeinen Verfahren. Somit können beide Verfahren in ihren Anwendungen gegenseitig geprüft werden.

Der Entwurf des neuen Eurocode [13] enthält teilweise neue Regeln und Empfehlungen für die Zonenmethode. Auch die Kreisquerschnitte werden behandelt. Die thermische

Leitfähigkeit wird neu definiert und die Imperfektionen im Brandfall sollen anders als bis jetzt angesetzt werden. Diese Änderungen werden in den nächsten Jahren verfolgt, damit die erweiterte Zonenmethode auch nach der Einführung des neuen Eurocodes und des neuen Nationalen Anhang angewendet werden darf.

## Literatur

- [1] DIN EN 1992-1-2: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, 2010
- [2] DIN EN 1992-1-2/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, 2010
- [3] CYLLOK, M.; ACHENBACH, M.: Anwendung der Zonenmethode für brandbeanspruchte Stahlbetonstützen. In: Beton- und Stahlbetonbau Bd. 104 (2009), S. 813–822
- [4] ACHENBACH, M. Weiterentwicklung der Zonenmethode für den Nachweis der Feuerwiderstandsdauer von rechteckigen Stahlbetondruckgliedern, Bauhaus-Universität Weimar, Diss., 2018
- [5] KRYBUS, D.; ACHENBACH, M.; PRIFTI, L. Extension of the zone method for the design of circular and tubular concrete columns subjected to a standard fire. Journal of Structural Fire Engineering, Vol. ahead-of-print, No. ahead-of-print, 2023
- [6] HERTZ, K. Design of Fire Exposed Concrete Structures (Report Nr. 160). Lyngby: Technical University of Denmark, Institute of Building Design, 1981
- [7] BEST 23.0, Hochbaustütze, RIB Software GmbH, 2023
- [8] KRYBUS, D.; ACHENBACH, M.; PRIFTI, L. Die weiterentwickelte Zonenmethode: ein baupraktisches Verfahren zur Heißbemessung von Stahlbetonstützen, In: Lochner-Aldinger, I. (Hrsg.) 1. Fachkongress Konstruktiver Ingenieurbau, Technische Akademie Esslingen, 2022, S. 199-206
- [9] FRANSSEN, J.-M.; DOTREPPE, J.-C. Fire tests and calculation methods for circular concrete columns. In: Fire Technology 39 (2003), S. 89–97
- [10] ZEHFUß, J.; KAMPMEIER, B. Konstruktiver baulicher Brandschutz im Betonbau. In: Betonkalender 2018, Teil 2. Berlin: Ernst & Sohn, 2018
- [11] InfoCAD, Version 23.00, InfoGraph GmbH, 2023
- [12] QUAUST, U.; RICHTER, E. Vereinfachte Berechnung von Stahlbetonstützen unter Brandbeanspruchung. In: Beton- und Stahlbetonbau Bd. 103 Heft 2 (2008), S. 119-125
- [13] FprEN 1992-1-2: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. Final draft. 2023