

Dr.-Ing. Joachim Kretz

# Stahlbeton-Bauteilanalyse im Brandfall

## Grundlagen zur brandschutztechnischen Nachweisführung nach EC2-1-2 (DIN EN 1992-1-2)

Die Brandschutzteile der Eurocodes sehen neben der Nachweisführung mit tabellarischen Daten (Level 1) auch die rechnerische Nachweisführung mit vereinfachten (Level 2) und mit allgemeinen Rechenverfahren (Level 3) vor.

Grundlage einer allgemeinen brandschutztechnischen Bauteilanalyse sind – nach der Ermittlung der Bauteiltemperatur (thermische Analyse) – die temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen und die thermischen Dehnungen der Baustoffe. In den vereinfachten Verfahren werden die Festigkeiten von Beton und Bewehrung temperaturabhängig mit Beiwerten  $k_c(\theta)$  bzw.  $k_s(\theta)$  abgemindert.



### Grundlagen der Bauteilanalyse

Zur brandschutztechnischen Nachweisführung mit **vereinfachten Berechnungsmethoden** sind in EC2-1-2 [1] im Anhang B drei Verfahren angegeben:

- 500°C-Isothermen-Methode
- Zonenmethode
- Methode zur Beurteilung eines durch Biegemoment und Längskraft beanspruchten Stahlbetonquerschnitts durch Abschätzung der Krümmung

Im Nationalen Anhang EC2-1-2/NA [2] zum EC2-1-2, der die Anwendung der DIN EN 1992-1-2 in Deutschland regelt, werden jedoch die 500°C-Isothermen-Methode und die Methode zur Beurteilung eines durch Biegemoment und Längskraft beanspruchten Stahlbetonquerschnitts durch Abschätzung der Krümmung, von der Anwendung ausgeschlossen.

Die im Anhang B.2 beschriebene „Zonenmethode“ darf für Stahlbeton-Biegebauteile (Balken und Platten), angewendet werden. Für Stahlbetonbauteile (Stützen, Wände), bei denen die Auswirkungen nach Theorie II. Ordnung zu berücksichtigen sind, wird die Anwendung im nationalen

Anhang EC2-1-2/NA in der im EC2-1-2 beschriebenen Form ausgeschlossen. Dies ist darin begründet, dass die Angaben im Anhang B.2 des EC2-1-2 für eine praxisrelevante brandschutztechnische Stützenbemessung unter Berücksichtigung der Stützenverformungen unzureichend sind. Die Vernachlässigung der thermischen Dehnungen in der Zonenmethode führt nach Hosser/Richter [11] bei der nicht-linearen Verwendung zu unsicheren Traglasten  $N_{Rd,fi}$ . Eigene Vergleichsberechnungen sowie Literaturbeispiele bestätigen dies; Stützenbemessungen nach der Zonenmethode liefern zum Teil höhere Tragfähigkeiten als Tragfähigkeiten, die mit den allgemeinen Rechenverfahren ermittelt werden.

Für Druckglieder ist deshalb die Anwendung der allgemeinen Rechenverfahren zu empfehlen oder die Zonenmethode ist dahingehend zu modifizieren, dass durch entsprechende Erweiterungen die Effekte der Stützenverschiebungen (thermische Dehnungen) nach Theorie II. Ordnung ausreichend sicher berücksichtigt wird. An dieser Stelle wird auf erste Veröffentlichungen zu dieser Thematik [7, 8] verwiesen.

## Vereinfachte Berechnungsverfahren

Beim vereinfachten Rechenverfahren wird die Verringerung der Tragfähigkeit durch die temperaturabhängige Verkleinerung der Bauteilquerschnitte und die temperaturbedingte Reduzierung der Baustofffestigkeiten berücksichtigt.

Die dem Brand direkt ausgesetzten Betonbereiche werden bei der Reduzierung des Querschnitts nicht berücksichtigt. Mit dem so definierten Restquerschnitt kann unter Einbeziehung der temperaturbedingten Reduzierung der Bauteilfestigkeiten von Beton und Bewehrungsstahl der Tragfähigkeitsnachweis analog zum Nachweis bei Normaltemperatur geführt werden.

### Temperaturprofile

Die Temperaturverteilung in einem brandbeanspruchten Querschnitt können für bestimmte Querschnittsabmessungen und Feuerwiderstandsdauern dem Anhang A des EC2-1-2 entnommen werden. Zusätzliche Temperaturprofile sind in weiterführender Fachliteratur angegeben oder können über eine thermische Analyse mit einem allgemeinen Rechenverfahren ermittelt werden.

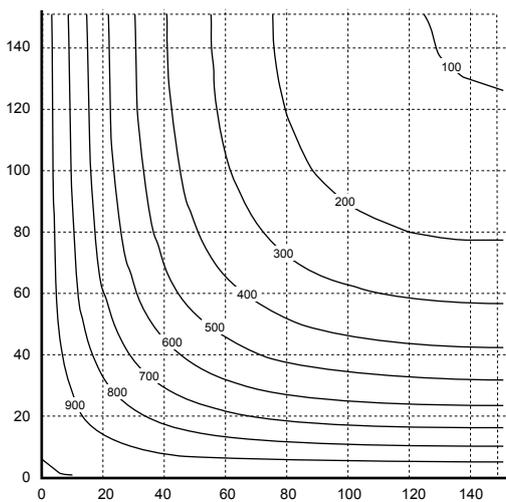


Bild 1. Temperaturprofil (°C) für eine Stütze  $h \times b = 300 \times 300 - R 90$  nach Bild A.13 Anhang A [1]

### Verminderung der Festigkeit

In Abschnitt 4.2 des EC2-1-2 sind in Abhängigkeit der Temperatur  $\theta$  [°C] die baustoffspezifischen Beiwerte zur Abminderung der Festigkeit angegeben. Bild 2 zeigt den temperaturabhängigen Abfall der Betondruckfestigkeit bei steigender Temperatur. Je nach verwendeten Zuschlagstoffen sind die Kurve 1 für Normalbeton mit quarzhaltigen Zuschlägen oder die Kurve 2 mit kalksteinhaltigen Zuschlägen zu verwenden.

In Bild 3 ist der temperaturabhängige Festigkeitsverlauf für Betonstahl (Klasse N) dargestellt. Je nach Herstellung des Betonstahls (warmgewalzt oder kaltverformt) und der Größe der Stahldehnung ist entweder Kurve 1, 2 oder 3 in der Festigkeitsermittlung zu berücksichtigen.

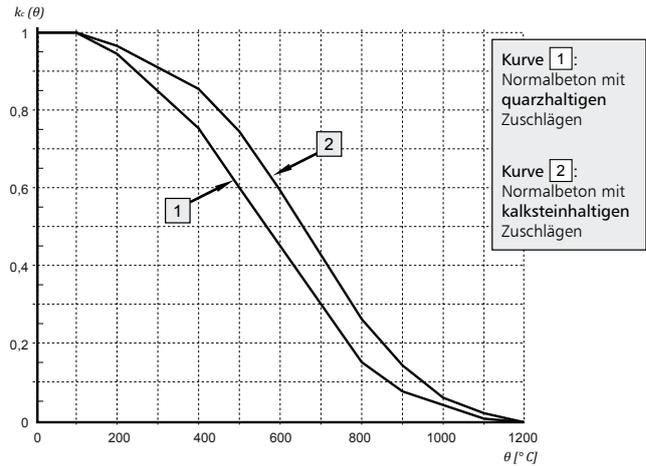


Bild 2. Beiwert  $k_c(\theta)$  zur Berücksichtigung des Abfalls der charakteristischen Druckfestigkeit ( $f_{ck}$ ) von Beton nach [1]

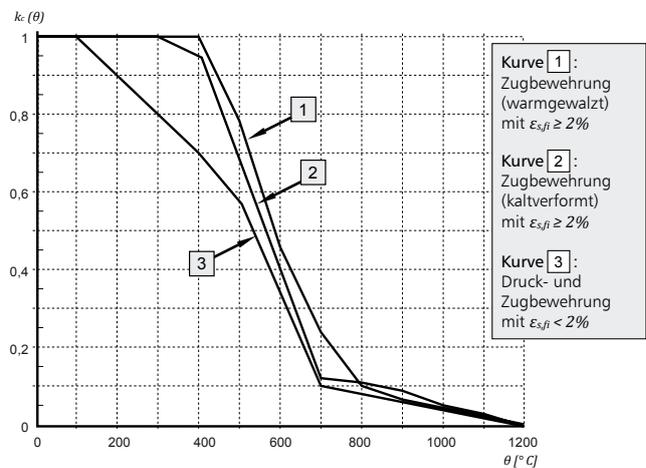


Bild 3. Beiwert  $k_s(\theta)$  zur Berücksichtigung des Abfalls der charakteristischen Druckfestigkeit ( $f_{yk}$ ) von Zug- und Druckbewehrung (Klasse N) nach [1]

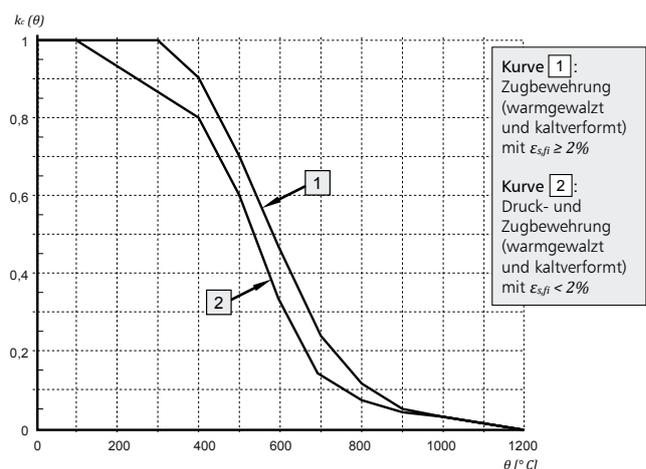


Bild 4. Beiwert  $k_s(\theta)$  zur Berücksichtigung des Abfalls der charakteristischen Druckfestigkeit ( $f_{yk}$ ) von Zug- und Druckbewehrung (Klasse X) nach [1]

### Zonenmethode

Bei dieser Methode wird der Querschnitt in eine Anzahl paralleler ( $n \geq 3$ ; empfohlen 20) Zonen gleicher Dicke (rechteckige Elemente) eingeteilt und die mittlere Temperatur (aus dem Temperaturfeld) und die entsprechende Druckfestigkeit  $f_{cd}(\theta)$  sowie der E-Modul jeder Zone werden bestimmt.

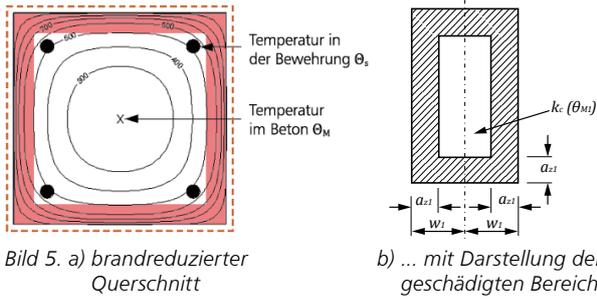


Bild 5. a) brandreduzierter Querschnitt

b) ... mit Darstellung der geschädigten Bereiche

Der vom Brand geschädigte Querschnitt (rot markierte Bereich) wird durch einen reduzierten Querschnitt, den sogenannten brandreduzierten Querschnitt, repräsentiert. Gegenüber dem Ausgangsquerschnitt (Originalquerschnitt) wird eine geschädigte Zone der Dicke  $a_z$  an den brandbeanspruchten Seiten vernachlässigt (Bild 5 b). Der „Punkt“  $M$  (bzw.  $M_1$ ) wird dazu verwendet, die reduzierte Druckfestigkeit des Betons für den gesamten Restquerschnitt (brandreduzierten Querschnitt) zu bestimmen.

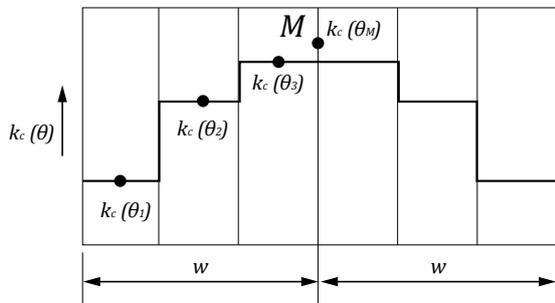


Bild 6. Unterteilung einer von beiden Seiten brandbeanspruchten Stütze in Zonen für die Berechnung der Festigkeitsreduktion und der  $a_z$ -Werte

Anhang B.2 unterscheidet bei der Ermittlung der geschädigten Zone der Dicke  $a_z$  zwischen:

- Druckgliedern (Stützen, Wände)
- überwiegend biegebeanspruchten Bauteilen (Platten, Balken)

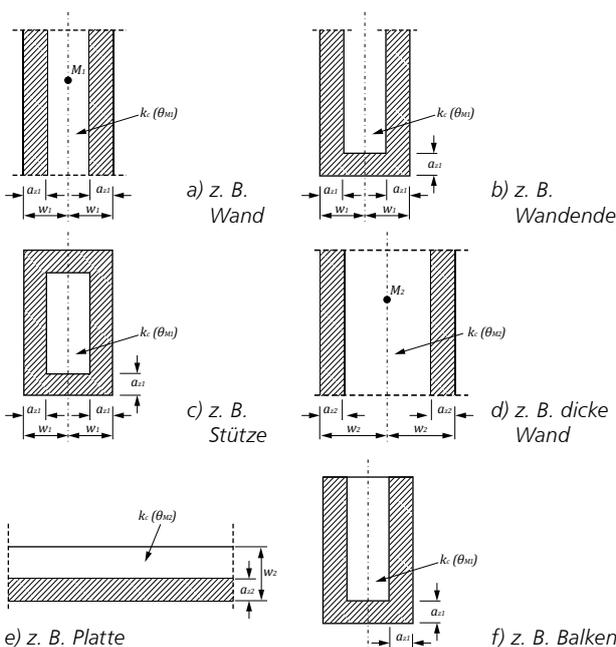


Bild 7. Reduktion der Festigkeit und des Querschnitts bei brandbeanspruchten Querschnitten [1]

Der mittlere Reduktionskoeffizient für einen bestimmten Querschnitt, der den Faktor  $(1 - 0,2/n)$  enthält, um die Temperaturveränderung in jeder Zone zu berücksichtigen, wird berechnet zu:

$$k_{c,m} = \frac{(1 - 0,2/n)}{n} \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i) \quad (1)$$

mit

- $n$  Anzahl paralleler Positionen in  $w$
- $w$  halbe Gesamtbreite
- $m$  Nummer der Zone

Die Breite  $a_z$  der geschädigten Zonen für Bauteile, bei denen Auswirkungen infolge Theorie II. Ordnung zu berücksichtigen sind (Stützen, Wände), kann rechnerisch über nachfolgende Formel bestimmt werden:

$$a_z = w \left[ 1 - \left( \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right)^{1,3} \right] \quad (2)$$

Alternativ lässt sich die Reduktion  $a_z$  auch grafisch bestimmen (Bild 8).

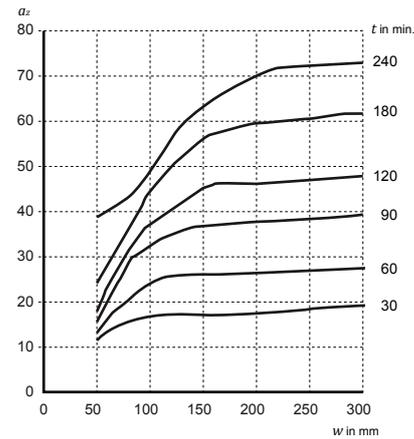


Bild 8. Reduktion  $a_z$  des Querschnitts einer Stütze mit quarzhaltigem Zuschlag [1]

Die Breite  $a_z$  der geschädigten Zonen für Bauteile, die überwiegend biegebeanspruchten sind (Platten, Balken), kann rechnerisch über nachfolgende Formel bestimmt werden:

$$a_z = w \left[ 1 - \left( \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right) \right] \quad (3)$$

Alternativ lässt sich die Reduktion  $a_z$  für diese Bauteile auch grafisch nach Bild 9 bestimmen.

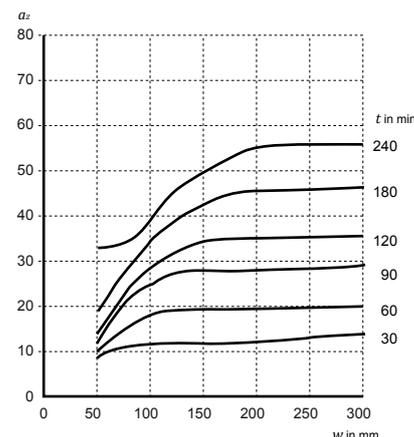


Bild 9. Reduktion  $a_z$  des Querschnitts einer Platte mit quarzhaltigem Zuschlag [1]

## Allgemeine Berechnungsverfahren

Der brandschutztechnische Nachweis der allgemeinen Rechenverfahren (Level 3) beinhaltet die **vollständige thermische und mechanische Analyse** in einem numerischen Simulationsmodell (ausführlichere Erläuterungen dazu siehe [6]).

Grundlage der brandschutztechnischen Bauteil- und Tragwerksanalyse sind die temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien sowie die thermischen Dehnungen der Baustoffe.

Die verschiedenen Baustoffe (Stahl, Beton, Betonstahl, ...) unterliegen einem stark temperaturabhängigem Verhalten. Wie die nachfolgenden  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramme für Beton und Betonstahl zeigen, sinken die Materialfestigkeiten bei steigenden Dehnungen mit Ansteigen der Temperatur deutlich ab (Bilder 10 und 11).

Für die temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien des Betons (Bild 10) und des Betonstahls (Bild 11) werden im EC2-1-2 in Kapitel 3 „Materialeigenschaften“ Gleichungen und temperaturabhängige Parameter angegeben.

Bild 12 zeigt die thermischen Dehnungen  $\Delta l/l$  von Beton, Betonstahl und Stahl in Abhängigkeit der Temperatur. Der Wert  $\Delta l/l$  definiert das Verhältnis aus der temperaturbedingten Längenänderung des Bauteils zur Länge des Bauteils bei 20°C.

Aus der thermischen Analyse des Querschnitts ist das Temperaturfeld zum Zeitpunkt t bekannt. Die Temperaturprofile erzeugen thermische Verlängerungen, thermische Dehnungen, die nach Abschnitt 3.3.1 für Beton und nach Abschnitt 3.4 für Betonstahl und Spannstahl zu ermitteln sind.

In Bild 13 ist beispielhaft die thermische Dehnungsverteilung eines Stahlbetonquerschnitts (Querschnittshälfte) bei vierseitiger Beflammung unter der Annahme der freien thermischen Dehnungen dargestellt.

Bei der Berechnung der Spannungen wird die Bernoulli-Hypothese vom Ebenbleiben des Gesamtquerschnitts vorausgesetzt. Da die freien thermischen Dehnungen die Verträglichkeit verletzen, müssen sich im Querschnitt aus Verträglichkeitsgründen thermische Eigenspannungen einstellen. Diese Eigenspannungen sind für jedes Teilelement (Thermoelement) so zu bestimmen, dass die Verträglichkeitsbedingungen und die Gleichgewichtsbedingungen erfüllt sind. Bei diesen Berechnungen sind sämtliche Dehnungsanteile des Querschnitts über die temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien zu ermitteln. Die Dehnungsverteilung zur Erfüllung der Gleichgewichts- und der Verträglichkeitsbedingungen muss iterativ bestimmt werden.

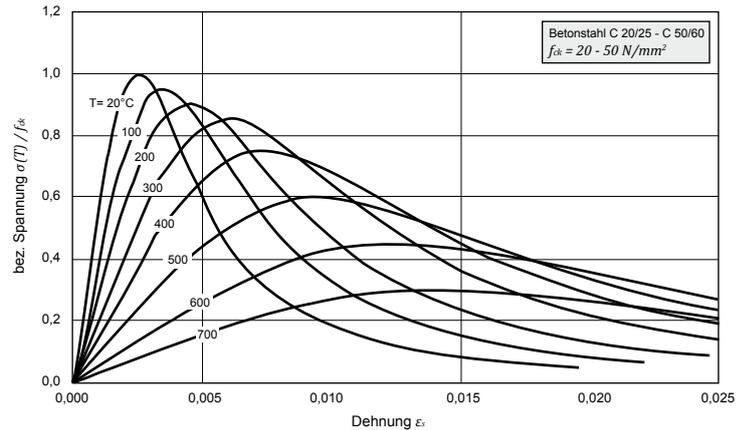


Bild 10.  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag bei steigenden Temperaturen nach [1]

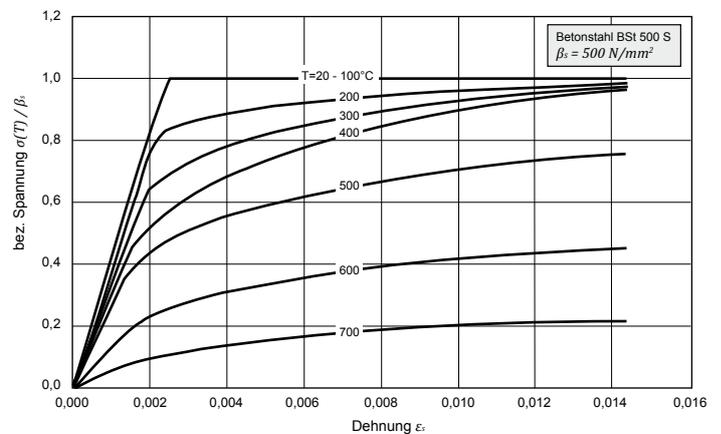


Bild 11.  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm von Betonstahl bei erhöhten Temperaturen nach [1]

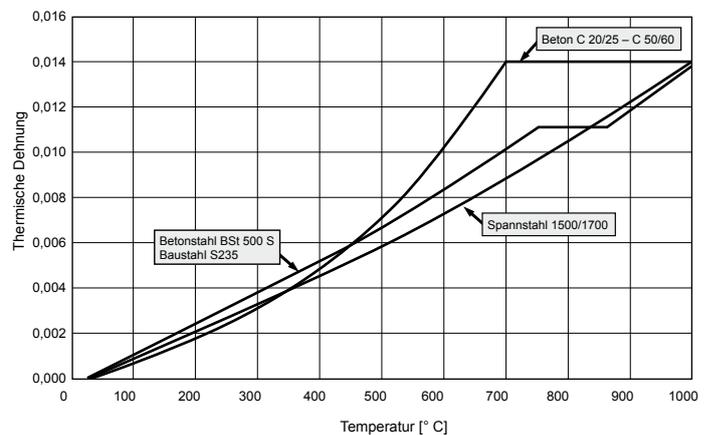


Bild 12. Thermische Dehnungen  $\Delta l/l$  von Beton, Betonstahl und Stahl als Funktion der Temperatur

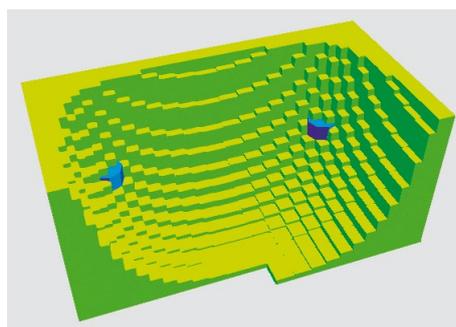
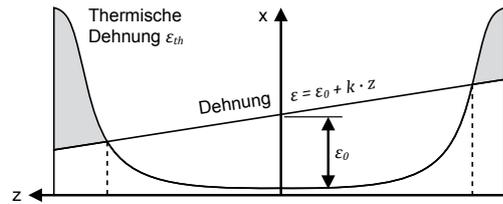
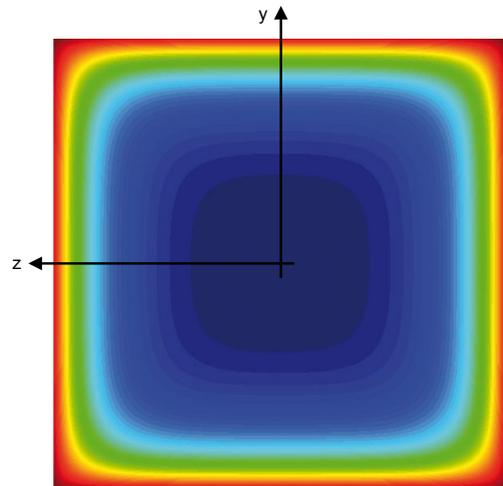


Bild 13. Freie thermische Dehnungen eines Stahlbetonquerschnitts



a) Dehnungsverteilung in Höhe der z-Achse nach [4]



b) Isothermen

Bild 14. Beispiel eines vierseitig beflamten Stahlbetonquerschnitts

Unter der Annahme des Ebenbleibens des Querschnitts verhalten sich die Dehnungen  $\epsilon$  eines Querschnitts zueinander wie ihre Abstände  $z$  von der Dehnungs-Nulllinie.

Bei einachsiger Biegung gilt:

$$\epsilon = \epsilon_0 + \frac{d\epsilon}{dz} \cdot z = \epsilon_0 + k \cdot z \tag{4}$$

Die Gesamtdehnungen im Querschnitt setzen sich aus den spannungserzeugenden Dehnungen  $\epsilon_\sigma$  der Baustoffe und aus ihren thermischen Dehnungen  $\epsilon_{th}$  zusammen [5].

$$\epsilon = \epsilon_\sigma + \epsilon_{th} \tag{5}$$

Um  $\sigma(\epsilon_\sigma, \theta)$  aus den temperaturabhängigen  $\sigma$ - $\epsilon$ -Beziehungen zu ermitteln, wird  $\epsilon_\sigma$  benötigt.  $\epsilon_\sigma$  ergibt sich danach zu:

$$\epsilon_\sigma = \epsilon - \epsilon_{th} = \epsilon_0 + k \cdot z - \epsilon_{th} \tag{6}$$

Nach der Erfassung der Einflussgrößen (thermische und mechanische Materialeigenschaften) erfolgt als abschließender Nachweis der Heißbemessung die Ermittlung der System- und Querschnittstragfähigkeit.

Die nachfolgenden Bilder 15 und 16 zeigen das zu einem bestimmten Zeitpunkt im Querschnitt vorhandenen Temperaturprofil und die infolge der erhöhten Temperatur erfolgte starke Abminderung der E-Moduli und dadurch bedingt die Verringerung der Biegesteifigkeit ( $EJ_\theta$ ).



Nach Zustellung der mb-news 5/2011 erreichte uns der Hinweis, dass in unserem Anwenderportrait „Unterwegs im Schwarzwald“ die Erwähnung des entwerfenden Architekten zu einem abgebildeten Projekt fehle. Diese Information ergänzen wir selbstverständlich in der vorliegenden mb-news:

Bei dem abgebildeten Projekt „Eingangüberdachung Hotel Feldberger Hof“ handelt es sich um einen Entwurf des Architekten Christian Klein, oceanarchitects.

Wir bedanken uns für den Hinweis und holen das Versäumte hiermit gerne nach.



OCEANARCHITECTS  
Kietzstr. 8  
DE-17192 Waren-Müritz  
Germany

t +49(0)3991 168 400  
f +49(0)3991 168 402  
ck@oceanarchitects.de  
www.oceanarchitects.de

Bild 16 lässt erkennen, dass in den Randbereichen die Abminderung des E-Moduls des Betons infolge der erhöhten Temperatur so stark ist, dass diese Bereiche nahezu keinen Beitrag mehr für die Biegesteifigkeit des Querschnitts leisten (analog zur geschädigten Zone  $\alpha_z$  der vereinfachten Rechenverfahren).

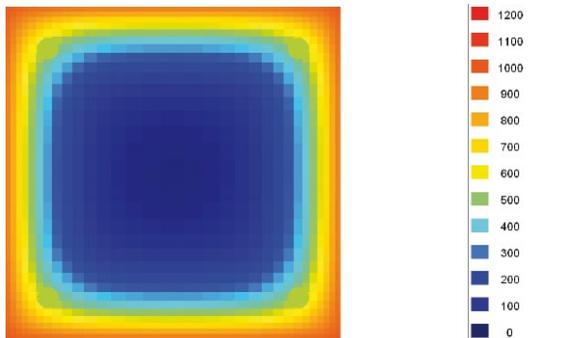


Bild 15. Temperaturfeld eines vierseitig beflamten Querschnitts nach  $t = 90 \text{ min}$

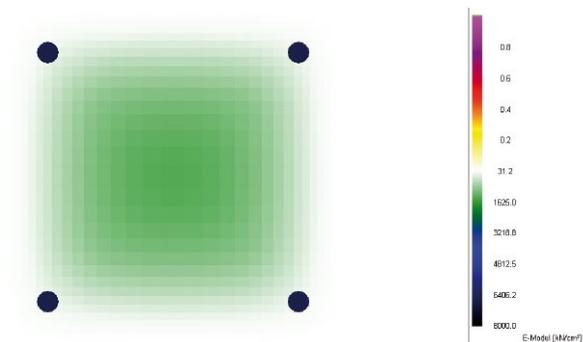


Bild 16. E-Modul (Steifigkeit) des vierseitig beflamten Querschnitts nach  $t = 90 \text{ min}$

## Zusammenfassung

In diesem Artikel wurden die rechnerischen Verfahren (vereinfachte Verfahren -Level 2- und das allgemeine Verfahren -Level 3-) bezüglich ihrer Grundlagen und Hintergründe vorgestellt.

Nach dem nationalen Anhang (DIN EN 1992-1-2/NA) zur DIN EN 1992-1-2 darf die vereinfachte Zonenmethode für biegebeanspruchte Bauteile angewendet werden, während sie für Bauteile, bei denen Einflüssen nach Theorie II. Ordnung zu berücksichtigen sind, in der vorliegenden Form nicht anwendbar ist. Erst die „erweiterte Zonenmethode“, wie erste Veröffentlichungen ([7] und [8]) zeigen, wird zu sicheren Traglasten und damit zu praxisrelevanten Stützenbemessungen unter Berücksichtigung der Stützenverformungen führen. Das allgemeine Rechenverfahren ermöglicht die vollständige thermische Analyse zur Ermittlung der Bauteiltemperaturen und anschließend eine mechanische Analyse zur Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens.

Dr.-Ing. Joachim Kretz  
mb AEC Software GmbH  
mb-news@mbaec.de

### Weiterführender Artikel:

Leistungsbeschreibung „S056 Stahlbeton-Querschnitte, Analyse im Brandfall nach EC 2-1-2 (Rechteck- und Kreisquerschnitt) (DIN EN 1992-1-2)“ auf den folgenden Seiten.

## Literatur

- [1] DIN EN 1992-1-2:2010-12: Eurocode 2 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung im Brandfall. Deutsche Fassung EN 1992-1-2:2004 + AC:2008.
- [2] DIN EN 1992-1-2/NA:2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung im Brandfall.
- [3] DIN EN 1991-1-2:2010-12: Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Brandeinwirkungen auf Tragwerke; Deutsche Fassung EN 1991-1-2:2002 + AC:2009.
- [4] Richter, E.; Kampmeier, B.: Brandbemessung von Stahlbetonteilen nach Eurocode 2. In „Bauphysik Kalender 2011“, Ernst & Sohn, Berlin 2011.
- [5] Hosser, D.; Richter, E.: Brandschutz nach Eurocode (DIN EN 1992-1-2). In „Stahlbetonbau aktuell 2011“, Bauwerk Verlag, Berlin 2011.
- [6] Kretz, Joachim: Heißbemessung von Stahlbetonstützen nach den Eurocodes EN 1991 Teil 1-2 und EN 1992 Teil 1-2, mb-news Nr. 4/2008.
- [7] Zilch, K.; Müller, A.; Reitmeyer, C.: Erweiterte Zonenmethode zur brandschutztechnischen Bemessung von Stahlbetonstützen. Bauingenieur Band 85, Juni 2010, S. 282-287.
- [8] Cyllok, M.; Achenbach, M.: Anwendung der Zonenmethode zur brandschutztechnischen Bemessung von Stahlbetonstützen. Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), Heft 12, S. 813-822.
- [9] Hosser, Dietmar: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB) der Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V., 1. Auflage Mai 2006
- [10] Richter, Ekkehard: Heißbemessung von Stahlbetonbauteilen. Seminar-Weiterbildung für Tragwerksplaner, 20. Februar 2008, Kaiserslautern.
- [11] Hosser, D.; Richter, E.: Überführung von EN 1992-1-2 in EN-Norm und Bestimmung der national festzulegenden Parameter (NDP) im Nationalen Anhang zu EN 1992-1-2. Schlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2007.