

Dr.-Ing. Joachim Kretz

Erweiterte Zonenmethode

Grundlagen der Berechnung und erforderliche Erweiterungen / Modifikationen

Als vereinfachte Berechnungsmethoden sind im Anhang B der DIN EN 1992-1-2 drei Verfahren zur Brandschutzbemessung angegeben. Über den zugehörigen Nationalen Anhang wird die Anwendung dieser drei vereinfachten Verfahren für Deutschland jedoch auf die sogenannte Zonenmethode beschränkt. Darüber hinaus ist sie nur auf Bauteile, die auf Biegung mit und ohne Normalkraft beansprucht werden, anzuwenden. Für Druckglieder, also für Stahlbetonstützen, nach DIN EN 1992-1-2/NA darf diese Methode nur mit zusätzlichen Annahmen angewendet werden. Die Hintergründe dazu werden nachfolgend erläutert.

In der Fassung der DIN EN 1992-1-2 vom Oktober 2006 wurde die Anwendung der Zonenmethode für schlanke Stützen nach Abschnitt 4.2.1 (1) empfohlen. Diese Formulierung wurde jedoch in der Fassung vom Januar 2009 ersatzlos gestrichen. Danach wird die Zonenmethode nur noch für kleine Querschnitte empfohlen, ohne dass genauer definiert wird, was unter kleinen Querschnitten zu verstehen ist. Entsprechend dem deutschen NA ist die Zonenmethode jedoch die einzige Methode der vereinfachten Verfahren, die für die Anwendung in Deutschland zugelassen ist. Erweiterungen und Modifikationen der Zonenmethode, wie sie in der Literatur ([11], [12]) beschrieben sind, sind erforderlich, um die vereinfachte Heißbemessung auch für schlanke Stützen zu ermöglichen.

Um die Notwendigkeit der erforderlichen Erweiterungen zu verdeutlichen, werden zunächst die mechanischen und thermischen Grundlagen zur Heißbemessung aufgeführt. Der Umfang beschränkt sich jedoch auf das für das Verständnis der Thematik notwendige Maß. Daran schließt sich die Beschreibung der in der Zonenmethode verwendeten Grundlagen an. Über den Vergleich der Spannungsverteilung bei unterschiedlichen Berechnungsansätzen lässt sich deutlich zeigen, in welchen Fällen die Anwendung der Zonenmethode zu Ergebnissen auf der sicheren Seite führt und unter welchen Randbedingungen die Zonenmethode in der im EC 2 Teile 1-2 beschriebenen Form nicht anwendbar ist. Die veröffentlichten Erweiterungen zur Zonenmethode werden angegeben und kommentiert.

1 Mechanische und thermische Grundlagen

1.1 Einwirkungen und Materialsicherheiten im Brandfall

Der Nachweis gegen Versagen des Tragwerks oder Bauteils im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist mit Einwirkungen nach der Kombinationsregel für die außergewöhnliche Bemessungssituation nach DIN EN 1990 „Grundlagen der Bemessung“ [4], [5] zu führen.

Die Sicherheiten für die thermischen Materialeigenschaften sowie die mechanischen Eigenschaften von Beton und Stahlbeton sind bei der Bemessung im Brandfall mit $\gamma_{M,fi} = 1.0$ anzusetzen.

1.2 Temperaturabhängige Werkstoffeigenschaften Verminderung der Festigkeit:

DIN EN 1992-1-2 [1] stellt für die vereinfachte rechnerische Bemessung im Brandfall Diagramme zur Verfügung, die den Festigkeitsabfall der Werkstoffe in Abhängigkeit der Temperatur darstellen. Bei bekannter Temperaturverteilung kann so an jeder Stelle des Querschnitts die anzusetzende Festigkeit bestimmt werden. Bild 1 zeigt den temperaturabhängigen Abfall der Betondruckfestigkeit bei steigender Temperatur. Je nach verwendeten Zuschlagstoffen ist die Kurve 1 für Normalbeton mit quarzhaltigen Zuschlägen oder die Kurve 2 mit kalksteinhaltigen Zuschlägen zu verwenden.

In Bild 2 ist der temperaturabhängige Festigkeitsverlauf für Betonstahl (Klasse N) dargestellt. Je nach Herstellung des Betonstahls (warmgewalzt oder kaltgeformt) und der Größe der Stauchung ist die entsprechende Kurve in der Festigkeitsermittlung zu berücksichtigen.

Werkstoffkennlinien für die Bemessung im Brandfall:

Die verschiedenen Baustoffe (Stahl, Beton, Stahlbeton, ...) unterliegen einem stark temperaturabhängigen Verhalten. Die Spannungs-Dehnungslinien zur Bemessung unterscheiden sich ganz wesentlich von den unter Normaltemperatur anzusetzenden Kennlinien nach DIN EN 1992-1-1 [3]. Die drastische Abnahme des E-Moduls und die Abnahme der Festigkeit, verbunden mit einer Zunahme der Bruchdehnung sind aus Bild 3 klar zu erkennen. Infolge der starken Abnahme des E-Moduls bei steigender Temperatur verringert sich die Steifigkeit des Querschnitts, die Konstruktion wird weicher. Dies ist ein signifikanter Parameter für das Verformungsverhalten des Werkstoffs und damit für die Konstruktion.

Einheitstemperaturzeitkurve (ETK):

Für die normgerechte Klassifizierung von Bauteilen ist eine Festlegung auf eine bestimmte Brandbelastung bzw. Temperaturzeitkurve erforderlich. National und international wird die Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) zur normgerechten Klassifizierung von Bauteilen verwendet. Die ETK wird standardmäßig zur Heißbemessung nach den vereinfachten Berechnungsmethoden angewandt. Die in DIN EN 1992-1-2 [1] enthaltenen Temperaturprofile sind auf der Grundlage der ETK erstellt.

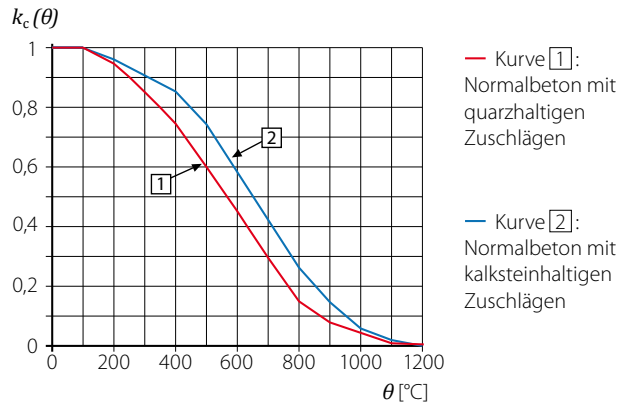


Bild 1. Beiwert $k_c(\theta)$ zur Berücksichtigung des Abfalls der charakteristischen Druckfestigkeit f_{ck} für Beton nach [1]

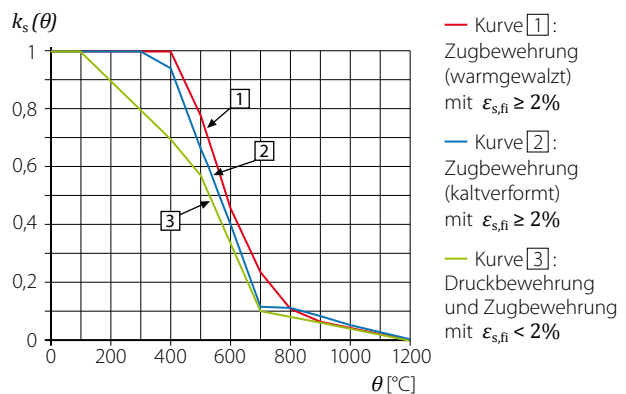


Bild 2. Beiwert $k_s(\theta)$ zur Berücksichtigung des Abfalls der charakteristischen Druckfestigkeit f_{sk} von Zug- und Druckbewehrung (Klasse N) nach [1]

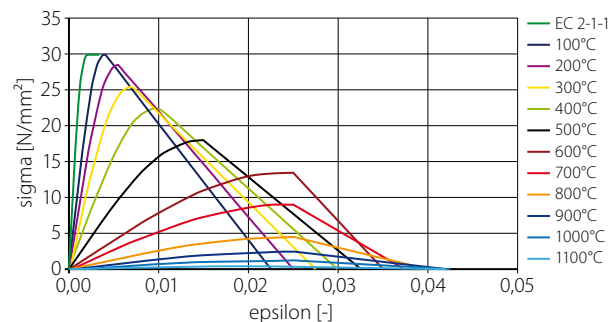


Bild 3. Spannungs-Dehnungskennlinien von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag bei steigender Temperatur nach [1]

1.3 Thermische Dehnungen

Die thermischen Dehnungen der Werkstoffe entstehen durch die hohen Temperaturbeanspruchungen. Infolge des über den Querschnitt unterschiedlichen Temperaturverlaufs (Temperaturprofil) entstehen einerseits Eigenspannungen und andererseits durch die Längenänderung des Bauteils indirekte Einwirkungen (Zwangskräfte) auf das Tragwerk, die zu veränderten Schnittgrößen führen können.

Eigenspannungen im Querschnitt:

Bei vierseitiger Beflammung entstehen symmetrische thermische Dehnungen; die Dehnungen sind aber nicht gleichförmig. Infolge der über den Querschnitt sehr unterschiedlichen Temperaturen sind die thermischen Dehnungen stark nichtlinear über den Querschnitt (siehe Bild 4).

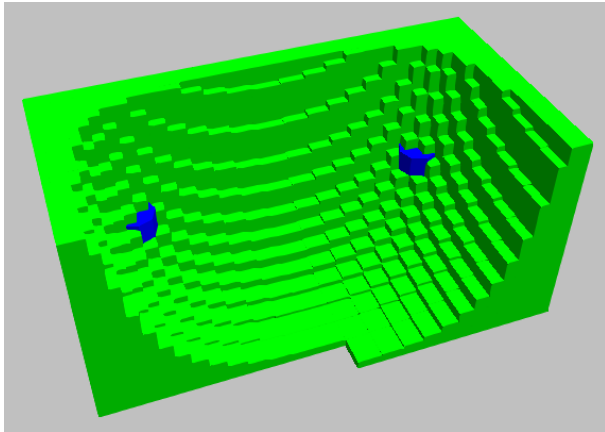


Bild 4. Freie thermische Dehnungen eines „halben“ Stahlbetonquerschnitts mit zwei Bewehrungsseisen (blau)

Aus den thermischen Dehnungen ergeben sich unter der Annahme des Ebenbleibens des Querschnitts Zwangsspannungen im Querschnitt. Die außen liegenden Randbereiche würden sich infolge der hohen Temperatur stärker ausdehnen als die weniger temperierten (kälteren) Innenbereiche. Durch die Verhinderung der freien Ausdehnung bei Ebenbleiben des Querschnitts entstehen im Außenbereich Druckspannungen und im inneren Bereich Zugspannungen, d. h. auch bei symmetrischer Brandbeanspruchung ist von einem Temperaturgradienten im Querschnitt auszugehen.

Die aus symmetrischer Brandbeanspruchung entstehenden thermischen Dehnungen reduzieren zwar die Steifigkeit des Querschnitts, sie erzeugen aber keine zusätzliche Ausmitte und damit keine zusätzliche Biegung. Anders ist dies jedoch bei nicht symmetrischer Brandbelastung. Hierbei entstehen zusätzliche Ausmitten und infolgedessen zusätzliche Biegebeanspruchungen, die für die Bemessung zu berücksichtigen sind.

2 Vereinfachtes Rechenverfahren – Zonenmethode

2.1 Grundlagen der vereinfachten Verfahren

Allgemeine Berechnungsverfahren im Brandfall führen sowohl eine thermische Analyse zur Bestimmung des Temperaturverlaufs im Querschnitt sowie eine mechanische Analyse zur Bestimmung der Tragfähigkeit auf der Grundlage der temperaturabhängigen Werkstoffkennlinien durch.

Im Allgemeinen führen vereinfachte Verfahren keine der beiden Analysen genau durch, sondern verwenden Näherungen und Vereinfachungen, die für die Ermittlung der Tragfähigkeit im Brandfall auf der sicheren Seite liegen (sollten!).

Vereinfachungen der Näherungsverfahren:

- Verwendung von vorgegebenen Temperaturprofilen nach DIN EN 1992-1-2, Anhang A [1] für die Feuerwiderstandsklassen R30, R60, R90 oder R120
- Vereinfachte mechanische Analyse
 - fiktive Reduktion der Querschnittsabmessungen
 - Ansatz konstanter Betoneigenschaften für den gesamten (reduzierten) Querschnitt
 - plastische Biegebemessung

2.2 Grundlagen der Zonenmethode

Grundlage der Zonenmethode ist die Plastizitätstheorie. Über einen Ersatzquerschnitt (brandreduzierter Querschnitt) sollen konstante Spannungen so aufsummiert werden, dass sie die gleiche innere Kraftgröße ergeben wie die Integration der nichtlinearen Spannungen über den gesamten Querschnitt. Bei der Zonenmethode wird der Querschnitt in eine Anzahl paralleler ($n \geq 3$) Zonen gleicher Dicke (rechteckige Elemente) eingeteilt. Anschließend werden die mittlere Temperatur (aus dem Temperaturfeld) und die entsprechende Druckfestigkeit $f_{cd}(\theta)$ sowie der E-Modul jeder Zone bestimmt. Der vom Brand geschädigte Querschnitt wird durch einen reduzierten Querschnitt, den sogenannten brandreduzierten Querschnitt, repräsentiert. Gegenüber dem Ausgangsquerschnitt (Originalquerschnitt) wird eine geschädigte Zone der Breite a_z an den brandbeanspruchten Seiten vernachlässigt (Bild 5).

Der „Punkt“ M (bzw. M_1) wird verwendet, um die reduzierte Druckfestigkeit des Betons für den gesamten Restquerschnitt (brandreduzierten Querschnitt) zu bestimmen. Anstatt mit nichtlinear über den Querschnitt verlaufenden Festigkeiten zu rechnen, wird vereinfachend ein Mittelwert der Festigkeiten bestimmt.

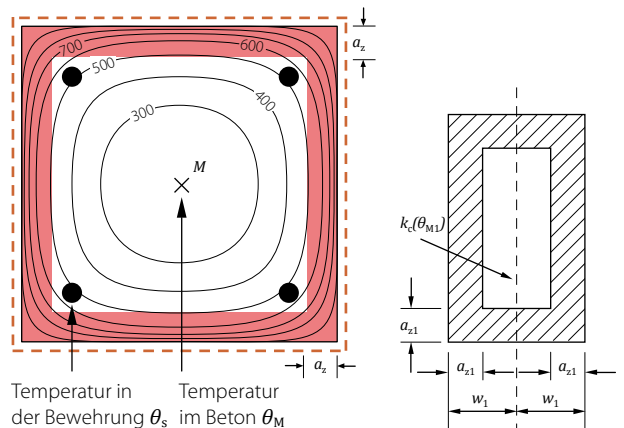


Bild 5. Brandreduzierter Querschnitt (innerer Bereich) und geschädigte Zone a_z (rot)

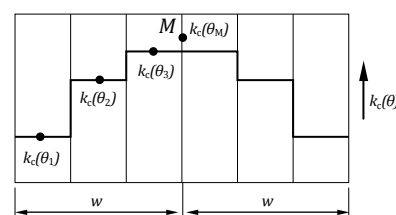


Bild 6. Unterteilung einer beidseitig brandred. Stütze in Zonen für die Ermittlung der Festigkeitsreduktion und der a_z -Werte

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:

$$k_{c,m} = \frac{(1 - \frac{0.2}{n})}{n} \cdot \sum_{i=1}^n k_{c,i}(\theta) \quad (\text{B.11}) \text{ aus [1]}$$

mit

n Anzahl paralleler Zonen 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, kann rechnerisch über nachfolgende Formel (B.13) bestimmt werden.

$$a_z = w \left[1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right)^{1.3} \right] \quad (\text{B.13}) \text{ aus [1]}$$

Die Schnittgrößenermittlung und die Bemessung inklusive der Theorie II. Ordnung erfolgt mit dem brandreduzierten Querschnitt und der infolge erhöhter Temperatur reduzierten Querschnittssteifigkeit analog „dem Berechnungsverfahren für Normaltemperatur“. Eine nähere Beschreibung des Berechnungsverfahrens für die Zonenmethode erfolgt in der Norm [1], [2] nicht.

3 Vergleich der Spannungsverteilung bei unterschiedlichen Berechnungsansätzen

In [9] „Ein Beitrag zur Bemessung von Stahlbetonstützen im Brandfall“ wurden verschiedene Bemessungsverfahren verglichen. Ein Auszug dieser Ergebnisse wird hier vorgestellt und kommentiert, ohne auf die einzelnen Rechenschritte einer physikalisch nichtlinearen Berechnung im Rahmen dieses kurzen Artikels näher einzugehen.

Allen Vergleichs-Berechnungen liegen die gleichen Temperaturprofile nach DIN EN 1992-1-2, Anhang A [1] zugrunde. Die Temperaturverteilung im Querschnitt für die untersuchte Feuerwiderstandsdauer ist damit in allen Verfahren identisch.

3.1 Zentrische Normalkraft

Die nachfolgende Betrachtung geht von einer zentrischen Normalkraftbeanspruchung eines Stützenquerschnitts aus. Der Tragfähigkeitsnachweis erfolgt hier zunächst anhand einer reinen Querschnittsbetrachtung.

Bild 7 stellt die prinzipielle Spannungsverteilung infolge einer zentrischen Normalkraft für nachfolgende Berechnungsmethoden dar. Schon der prinzipielle Vergleich der Berechnungen mit und ohne thermische Dehnung zeigt deren Einfluss auf die Verteilung der inneren Kräfte.

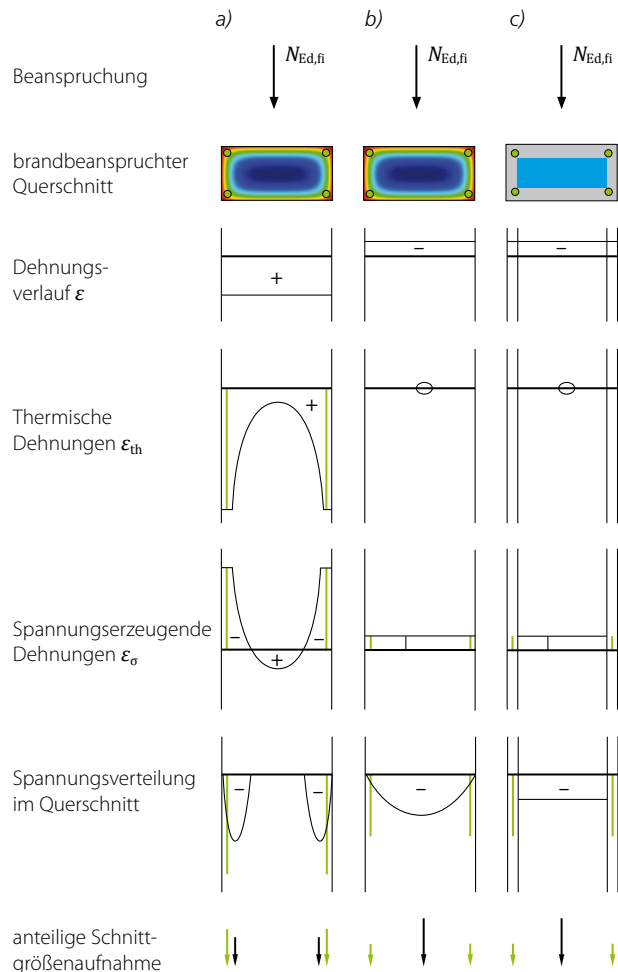


Bild 7. Prinzipielle Spannungsverteilung im Stützenquerschnitt für versch. Berechnungsansätze bei kleiner Normalkraft nach [9]

- a) Physikalisch nichtlineare Berechnung unter Berücksichtigung der thermischen Dehnung
- b) Physikalisch nichtlineare Berechnung ohne Berücksichtigung der thermischen Dehnung
- c) Zonenmethode ohne Berücksichtigung der thermischen Dehnung

In Bild 7 ist unter a) und b) ein Stahlbetonrechteckquerschnitt mit dem zu berücksichtigenden Temperaturprofil dargestellt. Bild 7 c) zeigt den brandreduzierten Ersatzquerschnitt (hellblau) mit konstanter Temperatur und die geschädigte Zone der Breite a_z . Infolge der wirkenden Normalkraft $N_{Ed,fi}$ stellen sich die in Bild 7 a) bis c) prinzipiell angegebenen Dehnungen ε über den Stützenquerschnitt ein. Die Dehnungsebene wird sich für jede Berechnungsmethode unterschiedlich einstellen, um zur gleichen aufnehmbaren Normalkraft zu führen.

Thermische Dehnungen ε_{th} werden nur in der Berechnungsmethode a) berücksichtigt. Die spannungserzeugenden Dehnungen ε_{σ} ergeben sich in allen Fällen aus der Differenz der Dehnungen. Die einwirkende Normalkraft $N_{Ed,fi}$ entspricht der Summe der über die Fläche integrierten Spannungen.

Bei gleicher Belastung führen die verschiedenen Ansätze zu unterschiedlichen Verteilungen der inneren Kräfte. Wie Vergleichsberechnungen nach [9] ergeben, werden unter zentrischer Normalkraftbeanspruchung die niedrigeren Traglasten unter Vernachlässigung der thermischen Dehnungen erreicht. Dies lässt sich damit erklären, dass unter Berücksichtigung der thermischen Dehnungen die spannungserzeugenden Dehnungen über den Querschnitt näher am Scheitelpunkt der Werkstoffkennlinien liegen.

Die Vernachlässigung der thermischen Dehnungen führt hingegen zu einer konstanten spannungserzeugenden Dehnungsebene. Das bedeutet, dass die spannungserzeugenden Dehnungen in verschiedenen Zonen nicht die Scheitelpunktdehnung erreichen. Die über den Querschnitt bzw. über den Restquerschnitt zu integrierenden Spannungen liefern deshalb eine geringere Normalkrafttragfähigkeit.

Die Tragfähigkeiten ohne Berücksichtigung der thermischen Dehnungen liegen unter zentrischer Normalkraftbeanspruchung im Vergleich zu Berechnungen mit thermischen Dehnungen auf der sicheren Seite. Anders verhält es sich jedoch bei Betrachtung einer nicht symmetrischen Brandbeanspruchung oder infolge zusätzlicher Biegemomente, d. h. unter Berücksichtigung einer vorhandenen Krümmung.

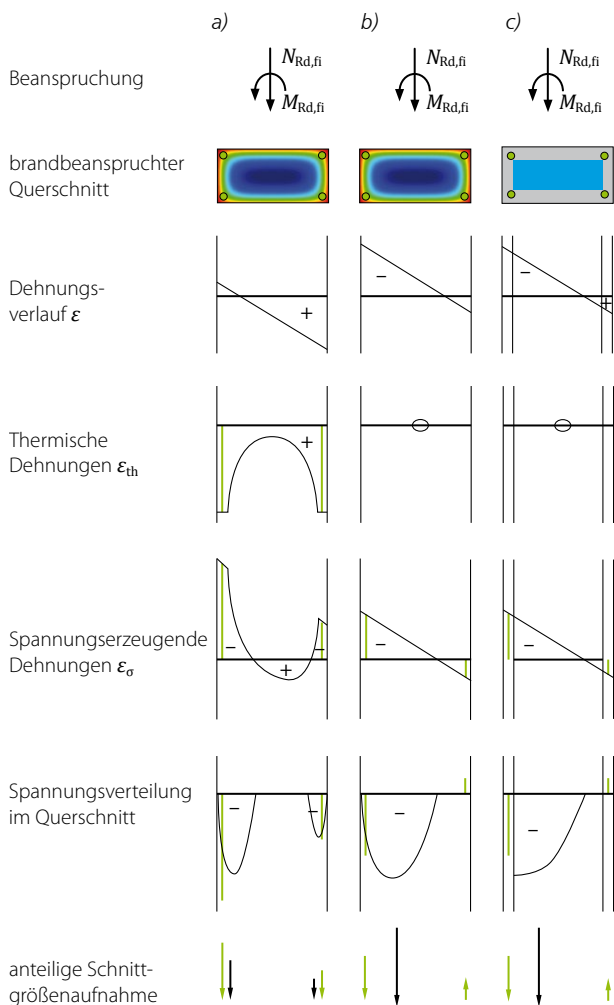


Bild 8. Prinzipielle Spannungsverteilung im Stützenquerschnitt für verschiedene Berechnungsansätze bei Normalkraft und Biegung nach [9]

3.2 Normalkraft und Biegemoment

Für Beanspruchungen aus Normalkraft und Biegemoment wird die wirklichkeitsnahe Berücksichtigung der Steifigkeit einer Stütze maßgebend. Zur qualitativen Beurteilung der Auswirkungen einer zusätzlichen Krümmung auf das Tragverhalten werden wieder die verschiedenen Berechnungsansätze verglichen.

In Bild 8 werden die verschiedenen Berechnungsansätze (vergleiche Bild 7) nun für Beanspruchungen aus Normalkraft und Biegemoment betrachtet.

Die Auswertung der Dehnungs- und Spannungsverteilungen über den Querschnitt für die verschiedenen Berechnungsmethoden lässt erkennen, dass die Vernachlässigung der thermischen Dehnungen zu höheren aufnehmbaren Momenten führt. Dies ergibt sich aus der Verlagerung der Betonkraft zum gedrückten Rand. Insbesondere bei der Zonenmethode führt dies zu einer Überschätzung der Momententragfähigkeit.

4 Erfordernis der Anpassung der Zonenmethode für schlanke Stützen – Erweiterte Zonenmethode

Wie bereits zuvor erwähnt, beruht die Zonenmethode auf der Plastizitätstheorie und ist damit in der nach Norm definierten Form nicht geeignet, eine nichtlineare Berechnung zutreffend abzubilden.

Damit eine sichere Bemessung ohne Überschätzung der Tragfähigkeit und Steifigkeit mit dem Verfahren, der Zonenmethode, möglich ist, muss dieses Verfahren erweitert bzw. modifiziert werden. Im NA zur DIN EN 1992-1-2 [2] wird die Anwendung der Zonenmethode nur unter Berücksichtigung zusätzlicher Annahmen für schlanke Stützen erlaubt. Dabei werden die Veröffentlichungen von Cylok und Achenbach [10], [11] und Zilch, Müller und Reitmayer [12] als Literaturstellen zitiert.

Im Folgenden werden die dort angegebenen Berechnungsansätze zur Erweiterung der Anwendbarkeit der Zonenmethode für Berechnungen schlanker Stützen nach Theorie II. Ordnung komprimiert vorgestellt.

4.1 Erweiterte Berechnungsmethode nach Cylok und Achenbach

Die von Cylok und Achenbach vorgeschlagene vereinfachte Berechnungsmethode „Vereinfachte Bemessung brandbeanspruchter Stahlbetonkragstützen in Anlehnung an EC 2“ ist in der Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 7, veröffentlicht.

Die Autoren stellen in dieser Veröffentlichung eine vereinfachte Ermittlung eines Interaktionsdiagramms vor, das auf die Verhältnisse bei hohen Temperaturen angepasst wird. In Anlehnung an das Modellstützenverfahren wird der Einfluss aus der Theorie II. Ordnung über eine Abschätzung der Krümmung im Brandfall berücksichtigt.

Für die Berechnung des Interaktionsdiagramms werden nachfolgende zusätzliche Annahmen getroffen:

- Die Druckbewehrung wird auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt.
- Die Zugbewehrung wird nur bis zur Proportionalitätsgrenze angesetzt.
- Für den brandreduzierten Querschnitt wird die temperaturabhängige Scheiteldehnung ϵ_{c1} angesetzt.
- Die im Mittelpunkt des Querschnitts zu berücksichtigende Temperatur ist mit mindestens 100 °C anzusetzen (auch wenn die normgerechte Ermittlung eine niedrigere Temperatur ergibt).

Zur Ermittlung der Schnittgrößen im Brandfall wird ein Krümmungsverlauf angesetzt und über die Stablänge integriert. Die Bestimmung der Maximalkrümmung erfolgt mit dem Dehnungszustand, der auf der Druckseite die Scheiteldehnung des Betons und auf der Zugseite die Proportionalitätsdehnung der Stahlbetonbewehrung erreicht. In Analogie zum Modellstützenverfahren findet auch für die Heißbemessung die Berücksichtigung einer Zusatzausmitte $e_{2,fi}$ statt.

Die Bemessung von Kragstützen mit üblichen Schlankheiten führt jedoch zu Ausmitten, bei denen die Steifigkeit des Systems maßgebend für die Schnittgrößenermittlung nach Theorie II. Ordnung wird.

Ohne weitere Anpassungen der Zonenmethode zur Berücksichtigung der thermischen Dehnungen führt die Zonenmethode zu unsicheren Ergebnissen bei schlanken Stützen. In einer weiteren Veröffentlichung „Anwendung der Zonenmethode für brandbeanspruchte Stahlbetonstützen“ in der Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), Heft 12, beschreiben die Autoren deshalb weitere Anpassungen der Methode zur Berücksichtigung der Einflüsse aus thermischen Dehnungen.

Entsprechend der Veröffentlichung [11] erfolgt die wesentliche Anpassung des Verfahrens durch die Berücksichtigung einer modifizierten Betonstahl-Arbeitslinie. Nach deren Vorschlag ist „für Betonstahl unter Druck eine (Vor-)Stauchung von 0.2% anzuwenden, die über eine Spannungsreduktion auszudrücken ist“.

Eine Überprüfung durch Vergleich der Ergebnisse mit Berechnungen nach dem Allgemeinen Verfahren liefert nach deren Angaben für drei angegebene Kragstützen (Eichpositionen) Tragfähigkeiten und Verformungen auf der sicheren Seite.

Nach [9] werden die von Cylok und Achenbach gewählten Anpassungen wie folgt kommentiert: „Solche Anpassungen mögen bemessungstechnisch zum Ziel führen, führen jedoch zu Verfremdungen der nichtlinearen Berechnung, deren Auswirkungen nicht für alle Fälle überschaubar sind“.

4.2 Erweiterte Zonenmethode nach Zilch, Müller, Reitmayer

Die von Zilch, Müller und Reitmayer vorgeschlagenen Erweiterungen zur Zonenmethode [12] wurden in der Zeitschrift Bauingenieur Band 85, Juni 2010 veröffentlicht.

Die nach Zilch [12] vorgeschlagene Erweiterung der Zonenmethode basiert auf dem Vorschlag, die thermische Dehnung des Stahls durch eine modifizierte Arbeitslinie zu berücksichtigen. Die sich im Bewehrungsstahl einstellenden thermischen Dehnungen werden durch das Verschieben der Arbeitslinie um das Maß der thermischen Dehnungen berücksichtigt. Für den brandreduzierten Betonquerschnitt werden die thermischen Dehnungen jedoch konstant über den Querschnitt angesetzt. Der Größe der thermischen Dehnung wird aus der Mittelpunkttemperatur (mindestens 100 °C) bestimmt.

Abgesehen davon, dass für den Beton keine dem tatsächlichen Verlauf folgende thermische Dehnung berücksichtigt wird, führt der unterschiedliche Ansatz der thermischen Dehnungen für Stahl (Vordehnung) und Beton (100 °C) zu Steifigkeiten des Querschnitts, die auf der sicheren Seite liegen. Eine Gegenüberstellung der unter Anwendung der allgemeinen Rechenverfahren und der so erweiterten Zonenmethode errechneten Normalkrafttragfähigkeiten $N_{Rd,fi}$ liefert für die drei Eichbeispiele aus [11] Tragfähigkeiten, die deutlich geringer sind. Die Abweichungen zu den Berechnungen mit allgemeinen Verfahren betragen zwischen 16 % und 24 %.

Um die relativ hohen Abweichungen im Vergleich zum allgemeinen Verfahren zu minimieren, nehmen die Autoren eine weitere Modifikation des Verfahrens vor. Dazu werden die temperaturabhängigen Dehnungen nach dem allgemeinen Verfahren und der vorgeschlagenen erweiterten Zonenmethode betrachtet.

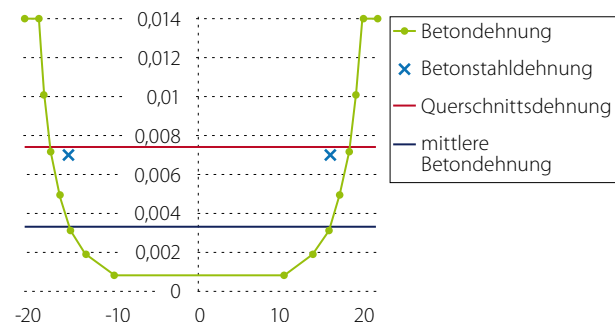


Bild 9. Thermische Dehnungen bei Anwendung des allgemeinen Verfahrens nach [12]

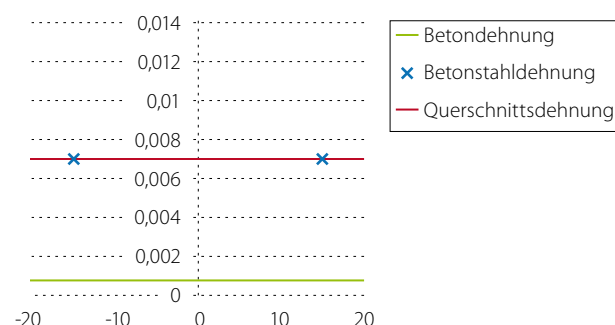


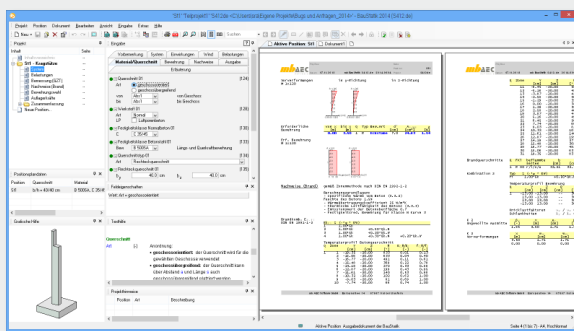
Bild 10. Thermische Dehnungen bei Anwendung der erweiterten Zonenmethode nach [12]



Anwendung in der BauStatik

Erweiterte Zonenmethode nach DIN EN 1992-1-2 und NA in den BauStatik-Modulen S403.de und S412.de

Das im Eurocode 2 Teil 1-2 [1,2] angegebene vereinfachte Verfahren zur Brandschutzbemessung ist nach dem zugehörigen nationalen Anhang für Deutschland nicht ohne weitere Annahmen für schlanke Stützen und Kragstützen anwendbar. Damit die Bemessung von schlanken Stahlbeton-Stützen auch im Brandfall ermöglicht wird, werden die Module S403.de und S412.de um die Berechnungsgrundlagen der erweiterten Zonenmethode ergänzt.



Die in den Modulen berücksichtigten Erweiterungen der Zonenmethode basieren auf der Veröffentlichung von Zilch, Müller und Reitmayer [3]. Die wesentlichen Erweiterungen und Modifikationen der Zonenmethode sind:

- Die im Mittelpunkt des brandreduzierten Querschnitts vorhandene Temperatur wird mit mindestens 100 °C angesetzt
- Der Einfluss der thermischen Dehnungen wird berücksichtigt durch:
 - eine modifizierte Arbeitslinie des Betonstahls
 - eine auf die mittlere Betondehnung angepasste Temperaturdehnung des brandreduzierten Stahlbetonquerschnitts

Mit den so vorgenommenen Anpassungen liegen die Ergebnisse (Tragfähigkeiten, Verformungen) nach der erweiterten Zonenmethode im Vergleich zu den Ergebnissen nach dem allgemeinen Verfahren auf der sicheren Seite [3].

Normen und Literatur

- [1] DIN EN 1992-1-2:2010-12, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Bemessung für den Brandfall
- [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 für den Brandfall
- [3] Zilch, K.; Müller, A.; Reitmayer, C.: Erweiterte Zonenmethode zur brandschutztechnischen Bemessung von Stahlbetonstützen. In Bauingenieur, Band 85, Juni 2010.

In Bild 9 ist der Verlauf der thermischen Dehnung nach dem allgemeinen Verfahren für einen Stützenquerschnitt (Querschnitt zu Eichbeispiel 1) dargestellt. Der Gleichgewichtszustand der thermischen Dehnungen stellt sich nach Bild 9 bei einer Querschnittsdehnung von ca. 7.5 ‰ ein. Da diese Dehnungen geringfügig die Betonstahndehnungen von 7.1 ‰ übersteigen, treten Zugkräfte in der Bewehrung auf. Die äußeren Betonbereiche werden infolge der Gleichgewichtsdehnung gestaucht. Im unbelasteten Zustand sind die Betonbereiche, deren thermische Dehnung unterhalb der Querschnittsdehnung liegt, gerissen. Sie tragen deshalb nicht zur Steifigkeit bei. Eine Aktivierung erfolgt erst durch äußere Lasten (Druckkräfte). Die äußeren Betonbereiche hingegen werden bereits bei geringen Krümmungen zur Steifigkeit des Querschnitts beitragen.

Bei der erweiterten Zonenmethode (Bild 10) ist dies nicht der Fall, da sich aufgrund der geringen Temperaturdehnung des Betons bei 100 °C kein Gleichgewichtszustand innerhalb des Querschnitts zwischen den Materialdehnungen einstellt. Für den gesamten Betonquerschnitt ergibt sich eine thermische Dehnung von ca. 0.743 ‰, die die Dehnung des Betonstahls im ganzen Bereich unterschreitet. Damit ist der Beton über den ganzen Querschnitt im gerissenen Zustand. Die Steifigkeit sinkt drastisch ab und kann erst durch deutliche Druckkräfte wieder aktiviert werden. Die Steifigkeit wird dadurch unterschätzt. Damit liegen die so ermittelten Traglasten auf der sicheren Seite. Dies lässt sich anhand der Momenten-Krümmungs-Linie der erweiterten Zonenmethode in Bild 11 (blaue Kurve) gut erkennen. Sie unterschreitet erheblich die Momenten-Krümmungs-Linie nach dem allgemeinen Berechnungsverfahren.

Um die Verformungen realitätsnäher erfassen zu können, wird das Verfahren weiter modifiziert. Als weitere Anpassung der erweiterten Zonenmethode verwenden Zilch et. al. eine auf die mittlere Betondehnung (im Beispiel bei 3.25 ‰) angepasste Temperaturdehnung. Dadurch wird das Mitwirken des Betons bei geringeren Stauchungen aktiviert und die Steifigkeit vergrößert. Unter Berücksichtigung der modifizierten thermischen Betondehnungen passt sich die Momenten-Krümmungs-Linie nach der so modifizierten erweiterten Zonenmethode (Bild 11, grüne Linie) besser der Momenten-Krümmungs-Linie nach dem allgemeinen Verfahren an. Die Abweichungen liegen sowohl bei den Stützenverformungen als auch bei den Traglasten für die drei in [10] beschriebenen Eichbeispiele zwischen 6 % und 16 %.

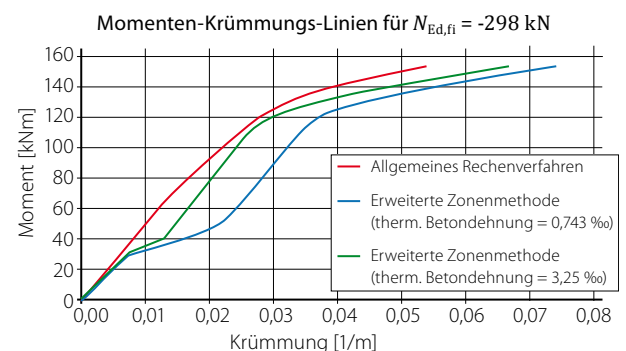


Bild 11. Momenten-Krümmungs-Linien nach [12]

5 Zusammenfassung

Die Grundlage der Zonenmethode ist die Plastizitätstheorie. Unter Brandeinwirkung entstehen in einem Stahlbetonstützenquerschnitt thermische Dehnungen, die das Trag- und Verformungsverhalten der Stütze maßgeblich beeinflussen. Ohne Berücksichtigung der thermischen Dehnungen liegen die Ergebnisse nach der Zonenmethode für schlanke Stützen auf der unsicheren Seite.

Die Anwendung für schlanke Stützen erfordert deshalb eine Anpassung des vereinfachten Verfahrens zur wirklichkeitsnäheren Berechnung der Festigkeit und der Steifigkeit. Die im Rahmen von Veröffentlichungen getroffenen Berechnungsannahmen und Erweiterungen werden vorgestellt. Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Modifikationen der Zonenmethode liefern die so erweiterten Verfahren zur Zonenmethode Ergebnisse auf der sicheren Seite.

Die angegebenen Modifikationen mögen für die sichere Bemessung von schlanken Stützen zielführend sein, das ursprünglich vereinfachte Verfahren wird aber durch die pauschalen Anpassungen immer weniger anschaulich und nachvollziehbar. In einem folgenden Artikel wird deshalb ein modifiziertes Verfahren vorgestellt, das das Trag- und Verformungsverhalten sicher abbildet und ohne pauschale Anpassungen auskommt.

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

Normen und Literatur

- [1] DIN EN 1992-1-2:2010-12, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Bemessung für den Brandfall
- [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 für den Brandfall
- [3] DIN EN 1992-1-1:2011-01, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [4] DIN EN 1990:2012-12, Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010
- [5] DIN EN 1990/ NA:2012-12, Eurocode 0: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Grundlagen der Tragwerksplanung
- [6] DIN EN 1991-1-2:2010-12, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke; Deutsche Fassung EN 1991-1-2:2002 + A1:2005 + AC:2010
- [7] DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke.
- [8] Kretz, J.: Heißbemessung von Stahlbetonstützen nach den Eurocodes EN 1991 Teil 1-2 und EN 1992 Teil 1-2, mb-news Nr. 4/2008.
- [9] Gelien, M.: Ein Beitrag zur Bemessung von Stahlbetonstützen im Brandfall. Dissertation Bergische Universität Wuppertal, Heft 19, August 2011
- [10] Cyllok, M.; Achenbach, M.: Vereinfachte Bemessung brandbeanspruchter Stahlbetonkragstützen in Anlehnung an EC 2. In: Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 7.
- [11] Cyllok, M.; Achenbach, M.: Anwendung der Zonenmethode für brandbeanspruchte Stahlbetonstützen. In: Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), Heft 12.
- [12] Zilch, K.; Müller, A.; Reitmayer, C.: Erweiterte Zonenmethode zur brandschutztechnischen Bemessung von Stahlbetonstützen. In Bauingenieur, Band 85, Juni 2010.