

Nachweise des konstruktiven Brandschutzes für Stahlbetonbauteile

Jens Minnert¹

ZUSAMMENFASSUNG

Seit 1. Januar 2005 ist in Deutschland die neue DIN 1045-1 (07/01) die verbindliche Norm für die Bemessung und Konstruktion von Tragwerken aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Diese neue Normengeneration hat die bisher gültige DIN 1045 (07/88) bzw. DIN 4227 (7/88) abgelöst. Der Nachweis des konstruktiven Brandschutzes wurde bisher gemäß DIN 4102-4 geführt, deren Regeln auf dem globalen Sicherheitskonzept der DIN 1045 (07/88) basieren. Aufgrund des neuen Sicherheitskonzeptes (Teilsicherheitskonzept) der DIN 1045 (07/01) können die Regelungen in DIN 4102-4 nicht unverändert angewandt werden. Dem in der Praxis tätigen Ingenieur stehen heute zwei unterschiedliche Möglichkeiten für den Nachweis des konstruktiven Brandschutzes zur Verfügung. Der Nachweis kann in Anlehnung an DIN V ENV 1992-1-2 in Verbindung mit einer Richtlinie vom DIBt bzw. mit Hilfe der Anwendungsnorm DIN 4102-22 in Verbindung mit DIN 4102-4 erfolgen. Im Beitrag werden beide Verfahren vorgestellt und deren Anwendung anhand einiger Bemessungsbeispiele verdeutlicht.

1 EINFÜHRUNG

Die in DIN 1045-1 [1] angegebenen Bemessungs- und Konstruktionsregeln gelten nicht für den Brandfall (DIN 1045-1, Abschnitt 1 (4)). Der Brandfall zählt gemäß DIN 1055-100, Abschnitt 9.3 (1) [2] zu den außergewöhnlichen Bemessungssituationen. Da die brandschutztechnische Bemessung nach DIN 4102 Teil 4 [3] Bezug nimmt auf DIN 1045 (07/88) [4], ist die Anwendung für Bauteile und Bauwerke, die nach den Regelungen der neuen DIN 1045 (07/01) geplant und ausgeführt werden, z. B. aus Gründen des unterschiedlichen Sicherheitskonzeptes, nicht direkt möglich.

Um nun die Bemessung für den Brandfall in Verbindung mit der neuen DIN 1045 (07/01) zu ermöglichen, hat das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) folgende Übergangsregelungen festgelegt:

1. Herausgabe einer Richtlinie vom DIBt [5], durch die das Sicherheitskonzept der neuen DIN 1045 (07/01) mit den brandschutztechnischen Regelungen der DIN V ENV 1992-1-2 [6] verknüpft wird.
2. Eine Verknüpfung der DIN 1045 (07/01) mit DIN 4102 Teil 4 [3] durch die Anwendungsnorm DIN 4102-22 [7]. Nach der bauaufsichtlichen Einführung dieser Anwendungsnorm wird die Richtlinie vom DIBt [5] zurückgezogen.

Im Rahmen des Beitrages werden die Nachweise der wesentlichen Bauteile gemäß dem unter Punkt 1 und 2 beschriebenen Verfahren behandelt. Hierbei werden lediglich Bauteile aus Normalbeton der Festigkeitsklasse C12/15 bis C50/60 nach DIN 1045-1 berücksichtigt.

¹ Prof. Dr.-Ing., Fachhochschule Gießen-Friedberg, Fachbereich Bauwesen

2 BRANDVERHALTEN VON MASSIVBAUTEILEN

Bei den im Massivbau verwendeten Baustoffen (Beton, Stahl und Mauerwerk) sind die Spannungs-Dehnungslinien von der Temperatur abhängig. Aufgrund steigender Temperatur kommt es zu einem unterschiedlich ausgeprägten Verlust an Festigkeit und Steifigkeit. Bei den unter niedrigen Temperaturen hergestellten, inhomogenen Werkstoffen Mauerwerk und Beton zeigen sich im Brandfall oft Abplatzungen, die zu einem vorzeitigen Querschnittsverlust bzw. Tragfähigkeitsverlust führen können. Im Regelfall liegt die Tragfähigkeit eines beanspruchten Bauteils oder Querschnitts daher unter dem bei 20°C ermittelten Bauteilwiderstand. Aufgrund der geringeren Bauteilsteifigkeit nehmen die Tragwerksverformungen zu. Bei druckbeanspruchten Bauteilen (z. B. Stützen) steigen daher die Biegemomente aus der Theorie II. Ordnung an.

Bei Beton hängt das Materialverhalten im Brandfall stark von der Betonzusammensetzung ab. Hierbei spielt die Art der verwendeten Zuschläge, der Feuchtegehalt und die Dichtigkeit des Betongefüges bei den Materialeigenschaften unter hohen Temperaturen eine große Rolle. Dehnungsunterschiede zwischen Zuschlag und Zementmatrix oder innerhalb inhomogener Zuschläge (z. B. Granit) können schon bei relativ geringen Temperaturen zu Abplatzungen führen. In Abb. 2.1 ist beispielhaft die Spannungs-Dehnungslinie (σ - ϵ -Linie) von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag bei unterschiedlichen Temperaturen dargestellt.

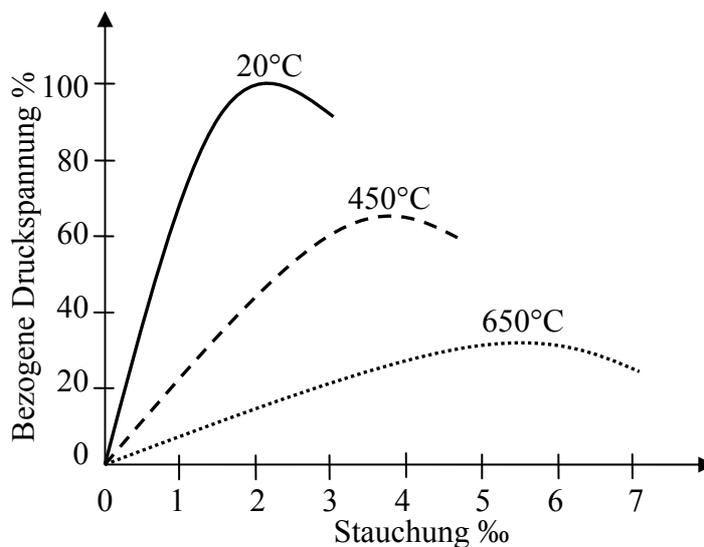


Abb. 2.1: Bezogene Spannungs-Dehnungslinien (σ - ϵ -Linie) von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag bei unterschiedlichen Temperaturen

3 ANFORDERUNGEN UND WIDERSTANDSKLASSEN

In DIN 4102 wird die Feuerwiderstandsklasse „F“ von tragenden Bauteilen und nichttragenden Wänden nach der erforderlichen Widerstandsdauer bei Normbrandbedingungen in Minuten benannt (z. B. F 60, F 90). In dieser Charakterisierung sind die Anforderungen an die Tragfähigkeit, den Raumabschluss und die Wärmedämmung zusammengefasst. Nach der europäischen Norm werden die genannten Kriterien einzeln spezifiziert. Hierbei können Anforderungen an die Tragfähigkeit (R), den Raumabschluss (E) und die Wärmedämmung (I) gestellt werden. Zusätzlich wird auch hier die geforderte Widerstandsdauer in Minuten angegeben (z. B. REI 90).

4 NACHWEIS DER TRAGFÄHIGKEIT VON STAHLBETONBAUTEILEN NACH DER ANWENDUNGSNORM DIN 4102-22 ZUR DIN 4102-4

Im Brandfall ist der Nachweis gegen das Versagen des Tragwerks im Grenzzustand der Tragfähigkeit zu führen. Neben den entsprechenden Kriterien der „Kaltbemessung“ nach DIN 1045-1 ist bei Stahlbetonbauteilen gemäß der Anwendungsnorm 4102-22 [7] die „Heißbemessung“ zu erbringen. Hierbei ist der folgende Nachweis anzuwenden:

$$E_{d,A} = E_{d,fi}(t) \leq R_{d,fi}(t) \quad (4.1)$$

Dabei ist:

$E_{d,fi}(t)$ Bemessungswert der zeitabhängigen („f“) direkten und indirekten Einwirkungen im Brandfall (Fußzeiger „fi“ = fire)

$R_{d,fi}(t)$ Tragwerks- oder Bauteilwiderstand unter Berücksichtigung der Temperaturzunahme

Die Ermittlung der mechanischen Einwirkungen ist nach der Kombinationsregel der DIN 1055-100 [2] für die außergewöhnliche Bemessungssituation durchzuführen:

$$E_{dA} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{GA,j} \cdot G_{k,j} \oplus A_d \oplus \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (4.2)$$

Symbole:

E_{dA} Bemessungswert einer Beanspruchung aus einer außergewöhnlichen Kombination

A_d Bemessungswert einer außergewöhnlichen Einwirkung

$G_{k,j}$ charakteristischer Wert einer ständigen Einwirkung

$Q_{k,1}$ charakteristischer Wert der vorherrschenden unabhängigen veränderlichen Einwirkung (Leiteinwirkung)

$Q_{k,i}$ charakteristischer Wert einer nicht vorherrschenden unabhängigen veränderlichen Einwirkung (Begleiteinwirkung)

γ_{GA} Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen bei außergewöhnlichen Bemessungssituationen

ψ_1 Kombinationsbeiwert für häufige Werte veränderlicher Einwirkungen

ψ_2 Kombinationsbeiwert für quasi-ständige Werte veränderlicher Einwirkungen

Bei der Klassifizierung auf Basis von Normbrandversuchen ist das Verhalten des Gesamttragwerks unter thermischen Zwängungen nicht von Bedeutung. Der Bemessungswert einer außergewöhnlichen Einwirkung darf aus diesem Grund mit $A_d = 0$ gesetzt werden und der Nachweis für Einzelbauteile geführt werden.

Nach DIN 1055-100, Tabelle A.3 gilt für den üblichen Hochbau der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{GA} = 1,0$. Die Kombinationsbeiwerte ψ_1 und ψ_2 können nachfolgender Tabelle entnommen werden.

Tab. 4.1 Kombinationsbeiwerte gemäß DIN 1055-100, Tabelle A.2

Veränderliche Einwirkungen	ψ_1	ψ_2
Nutzlasten $Q_{k,N}$		
Kategorie A: Wohn- und Aufenthaltsräume	0,5	0,3
Kategorie B: Büros	0,5	0,3
Kategorie C: Versammlungsräume	0,7	0,6
Kategorie D: Verkaufsräume	0,7	0,6
Kategorie E: Lagerräume	0,9	0,8
Verkehrslasten $Q_{k,V}$		
Kategorie F: Fahrzeuggewicht ≤ 30 kN	0,7	0,6
Kategorie G: 30 kN < Fahrzeuggewicht ≤ 160 kN	0,5	0,3
Kategorie H: Dächer	0	0
Schnee- und Eislasten $Q_{k,S}$		
für Orte bis NN + 1000 m	0,2	0
für Orte über NN + 1000 m	0,5	0,2
Windlasten für Hochbauten $Q_{k,W}$	0,5	0
Baugrundsetzungen $Q_{k,\Delta}$	1,0	1,0
Sonstige Einwirkungen	0,7	0,5

Da die Kombinationsbeiwerte ψ_1 und ψ_2 im Regelfall $< 1,0$ sind, liegt das Beanspruchungsniveau in DIN 4102-22 unter dem nach DIN 4102-4. Dies ist z. B. für den Ausnutzungsfaktor α_1 nach DIN 4102, Abschnitt 3.13.2.2 für Stahlbetonstützen von Bedeutung.

Eine Vereinfachung besteht gegenüber Gleichung (4.2) darin, dass die Einwirkungen im Brandfall E_{dA} aus dem Bemessungswert der Einwirkungen E_d bei Normaltemperatur wie folgt angesetzt werden können:

$$E_{dA} = 0,7 \cdot E_d \quad (4.3)$$

Hierbei ist:

E_d Bemessungswert der Einwirkungen für ständige und vorübergehende Bemessungssituation des Nachweises im Grenzzustand der Tragfähigkeit gemäß DIN 1055-100

Die Bestimmung des Tragwerks- bzw. Bauteilwiderstandes $R_{d,fi}(t)$ in Gleichung (4.1) erfolgt über die Klassifizierungstabellen nach DIN 4102-4 für die verschiedenen tragenden Bauteile. Die Klassifizierungstabellen in DIN 4102-4 basieren auf den Normbrandversuchen gemäß DIN 4102-2 [8]. In Tab. 4.2 sind beispielhaft die $[(\max \mu_{E_{ds}}) \times f_{ck}]$ -Werte für Stahlbetonbalken gemäß DIN 4102-22 zusammengestellt. Das bezogene Bemessungsmoment ergibt sich zu

$$\mu_{E_{ds}} = \frac{M_{E_{ds}}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad (4.4)$$

Tab. 4.2: $[(\max \mu_{Eds}) \times f_{ck}]$ -Werte bei Stahlbetonbalken in Abhängigkeit von der Mindestbalkenbreite b bzw. der Mindeststegdicke t gemäß DIN 4102-22

Mindestbalkenbreite b in mm bzw. Mindeststegdicke t in mm	[[$(\max \mu_{Eds}) \times f_{ck}$]-Werte bei Stahlbetonbalken der Betonfestigkeitsklasse				
	C 12/15	C 20/25	C 30/37	C 35/45	C 45/55
	C 16/20	C 25/30		C 40/50	C 50/60
90	1,8	2,1	2,7	1,5	0,8
100	2,5	2,7	3,9	3,1	1,8
110	5,1	4,3	5,1	4,6	3,6
120		8,5	11,0	6,1	5,1
130				12,6	6,8
140	keine Begrenzung				14,6
> 140					

Bezüglich des Betonstahls liegt den Klassifizierungstabellen in DIN 4102-22 die Annahme zugrunde, dass die Spannung in der Betonstahlbewehrung zu Beginn des Brandfalls der in der Kaltbemessung nach DIN 1045-1 unter der maßgebenden Einwirkungskombination nach DIN 1055-100 entspricht.

$$\sigma_s = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (4.5)$$

f_{yk} charakteristischer Wert der Streckgrenze des Betonstahls ($f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$)

γ_s Teilsicherheitsbeiwert für Betonstahl

Zu Beginn der Brandbeanspruchung treten zwei Phänomene auf:

1. Das Einwirkungsniveau E_d sinkt auf den Wert $E_{d,fi(t)}$ nach Gleichung 4.1 ab.
2. Die Festigkeit des Betonstahls nimmt ab (siehe Abb. 4.1).

Der kritische Zustand ist dann erreicht, wenn die reduzierte Betonstahlfestigkeit gleich der für die Aufnahme der Einwirkung $E_{d,fi(t)}$ erforderlichen Stahlspannung $\sigma_{d,fi(t)}$ ist.

Für die Betonstahlfestigkeit $\sigma_{d,fi(t)}$ wurde in DIN 4102-22 folgende Annahme getroffen:

- Verhältnis $E_{d,fi(t)} / E_d$ beträgt 0,70.
- Teilsicherheitsbeiwert für den Betonstahl $\gamma_s = 1,15$.

Mit den Annahmen ergibt sich für den Betonstahl folgender Wert:

$$\sigma_{s,fi} = 0,70 \cdot \frac{f_{yk}}{1,15} \approx 0,6 \cdot f_{yk} \quad (4.6)$$

Mit diesem Wert ergibt sich gemäß Abb. 4.1 die kritische Temperatur $\theta_{krit} = 500^\circ\text{C}$ für Betonstahl, die während der geforderten Feuerwiderstandsdauer nicht überschritten werden darf.

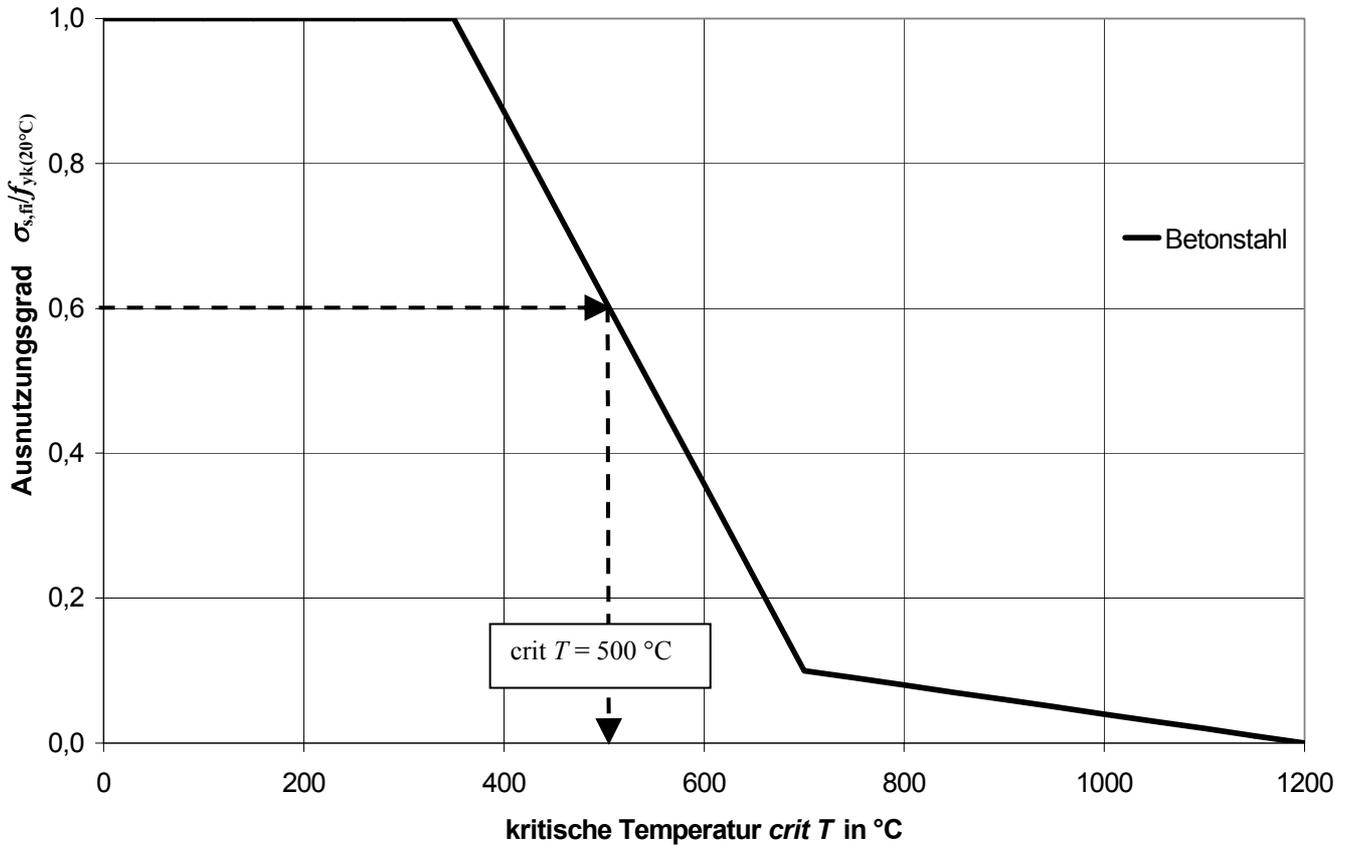


Abb. 4.1: Ausnutzungsgrad von Betonstählen $\sigma_{s,fi}/f_{yk(20^\circ\text{C})}$ in Abhängigkeit von der kritischen Temperatur

DIN 4102-22 ermöglicht die Einordnung von Stützen und Wänden in Feuerwiderstandsklassen nach den Tabellenwerten der DIN 4102-4. Hierbei ist der Ausnutzungsfaktor nach DIN 4102-4, Tabelle 31 mit folgender Gleichung nach DIN 4102-22 zu bestimmen:

$$\alpha_1 = \frac{N_{fi,d,t}}{N_{Rd}} \cdot \alpha^* \quad (4.7)$$

mit

$N_{fi,d,t}$ Bemessungswert der vorhandenen Längskraft im Brandfall nach DIN 1055-100

$$N_{fi,d,t} = \sum_{i \geq 1} 1,0 \cdot N_{gk,i} + \psi_{1,1} \cdot N_{Qk,1} + \sum_{j > 1} \psi_{2,j} \cdot N_{Qk,j} \quad (4.8)$$

N_{Rd} Bemessungswert der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

α^* Faktor gemäß Abb. 4.2 (DIN 4102-22, Bild 15 a) in Abhängigkeit von der Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} des Betons und dem geometrischen Bewehrungsgrad. Als Vereinfachung kann der Faktor $\alpha^* = 2,0$ gewählt werden.

Ist der Ausnutzungsfaktor $\alpha_1 \leq 1,0$, kann der Nachweis der Feuerwiderstandsdauer nach Tabelle 31 der DIN 4102-4 geführt werden. Bei einer größeren Ausnutzung muss die Bemessungslast bei der „Kaltbemessung“ nach DIN 1045-1 entsprechend erhöht werden.

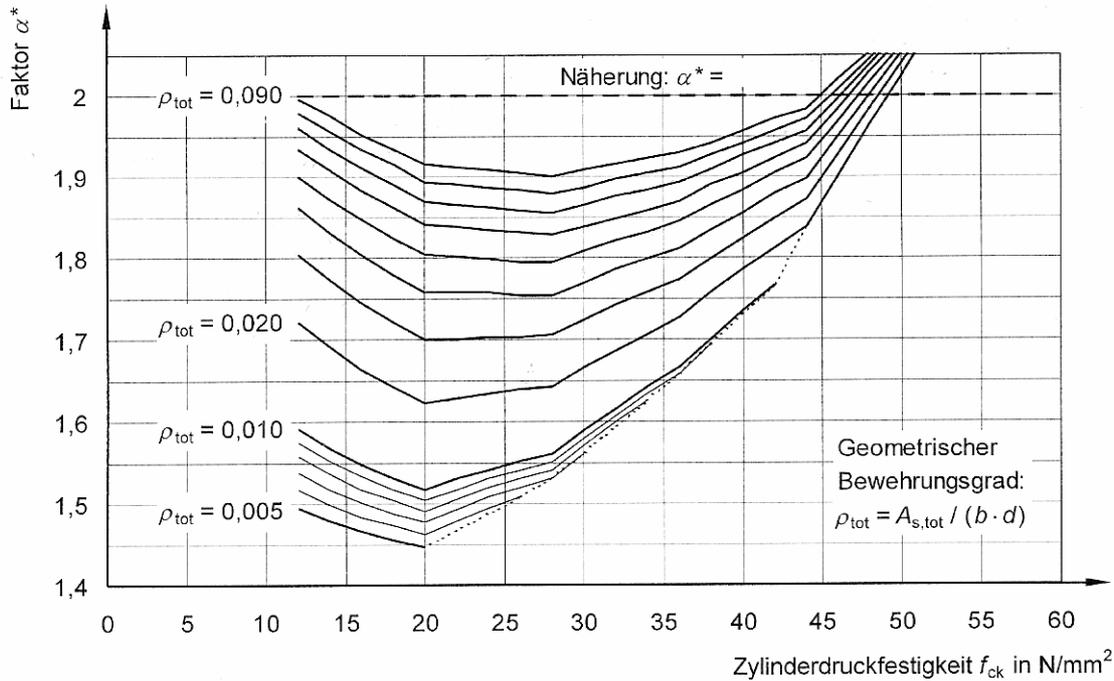


Abb. 4.2: Faktor α^* in Abhängigkeit der Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} und des geometrischen Bewehrungsgrades ρ_{tot} gemäß DIN 4102-22 [7]

5 NACHWEIS DER TRAGFÄHIGKEIT VON STAHLBETONBAUTEILEN NACH DER DIN V ENV 1992-1-2 MIT DER DIBT-RICHTLINIE

Im Folgenden werden die Nachweise für die Tragwerksbemessung im Brandfall nach der zur Zeit in Deutschland gültigen Fassung der DIN V ENV 1992-1-2 [6] mit der DIBt-Richtlinie [5] zur Anwendung der DIN V ENV 1992-1-2 in Verbindung mit DIN 1045-1 betrachtet.

Nach DIN V ENV 1992-1-2 können brandschutztechnische Nachweise durch drei verschiedene Nachweismethoden geführt werden. Dies sind

- die Gesamttragwerksberechnung
- die Berechnung von Tragwerksteilen und
- die Bauteilberechnung.

Dabei dürfen folgende Nachweisverfahren angewendet werden:

- Nachweise mit tabellarischen Daten
- Vereinfachtes Rechenverfahren
- Allgemeines Rechenverfahren

Die Anwendungsrichtlinie des DIBt [5] erlaubt derzeit jedoch nicht die Anwendung des vereinfachten und allgemeinen Rechenverfahren in Deutschland, so dass die Tragwerksbemessung im Brandfall lediglich mit den tabellarischen Daten anzuwenden ist. Die Anwendung dieses Verfahrens wird im Folgenden eingehend behandelt.

Das tabellarische Verfahren entspricht dem bisher üblichen Nachweisverfahren nach DIN 4102-4 [3]. In Abhängigkeit von der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer und ggf. der Ausnutzung des Bauteils werden je nach Bauteilart Mindestwerte der Bauteilabmessungen und Achsabstände der Bewehrung angegeben. Diese Einzelwerte wurden aus Versuchsergebnissen gewonnen und durch Erfahrung und Nachrechnungen bestätigt. Für die Mehrzahl der üblichen Bauteile im Hochbau stellen die Tabellenwerte konservative Annahmen dar.

Für den Nachweis von Einzelbauteilen gilt

$$E_{d,fi} \leq R_{d,fi} \quad (5.1)$$

Dabei ist:

$E_{d,fi}$ Bemessungswert einer Schnittgröße im Brandfall (Fußzeiger „fi“ = fire)

$R_{d,fi}$ Bemessungswert der Tragfähigkeit (Widerstand) bei Brand

Vereinfachend darf $E_{d,fi}$ gemäß DIN V ENV 1992-1-2 über einen Abminderungsfaktor η_{fi} aus dem Bemessungswert der Einwirkungen bei Normaltemperatur bestimmt werden, der im Wesentlichen vom Verhältnis der veränderlichen Einwirkungen zu den ständigen Einwirkungen abhängt.

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (5.2)$$

Dabei ist:

$E_{d,fi}$ Bemessungswert der Einwirkungen im Brandfall (Fußzeiger „fi“ = fire)

η_{fi} Reduktionsfaktor in Abhängigkeit von $\xi = Q_{k,1} / G_k$

$$\eta_{fi} = \frac{1,0 + \psi_{1,1} \cdot \xi}{\gamma_G + \gamma_Q \cdot \xi} \quad (5.3)$$

ξ Verhältnis veränderlichen zu den ständigen Einwirkungen

$$\xi = \frac{Q_{k,1}}{G_k} \quad (5.4)$$

E_d Bemessungswert der Einwirkungen mit Hilfe der Grundkombination im Grenzzustand der Tragfähigkeit gemäß DIN 1045-1 unter Normaltemperatur

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (5.5)$$

Bei überwiegend biegebeanspruchten Bauteilen muss sichergestellt werden, dass die Einwirkungen $E_{d,fi}$ vom Bauteil über die normative Widerstandsdauer aufgenommen werden kann. Dies geschieht mit Hilfe von Tabellenwerten für die Mindestabmessungen sowie den Mindestachsabstand der Bewehrung. Durch die Mindestabmessungen wird erreicht, dass unter Brandeinwirkung ein hinreichender Betonrestquerschnitt erhalten bleibt, um die Biegedruckkraft aufzunehmen. In Abb. 5.1 ist die Abnahme der charakteristischen Druckfestigkeit f_{ck} von Beton mit ansteigender Temperatur dargestellt.

Die Parameter Mindestabmessungen und Mindestachsabstand der Bewehrung sind von der geforderten Feuerwiderstandsdauer, dem statischen System und der Brandbeanspruchungsart (einseitig, allseitig) abhängig. In Tab. 5.1 sind beispielhaft die entsprechenden Werte für statisch bestimmt gelagerte Stahlbetonplatten unter Berücksichtigung der DIBt-Richtlinie [5] zusammengestellt.

Tab. 5.1: Mindestmaße und –achsabstände für statisch bestimmt gelagerte, einachsig und zweiachsig gespannte Stahlbetonplatten (nach [5] und [6])

Feuerwiderstandsklasse	Mindestmaße [mm]			
	Plattendicke	Achsabstand a		
		einachsig	zweiachsig	
h_s [mm]		$l_x/l_y \leq 1,5$	$1,5 < l_x/l_y \leq 2,0$	
1	2	3	4	5
F 30	60	10 ^{a)}	10 ^{a)}	10 ^{a)}
F 60	80	20	10 ^{a)}	15 ^{a)}
F 90	100	30	15 ^{a)}	20
F 120	120	40	20	25
F 180	150	55	30	40
F 240	Entfällt			

l_x und l_y sind die Spannweiten einer zweiachsig gespannten Platte (beide Richtungen nahezu rechtwinklig zueinander), wobei l_y die längere Spannweite ist.

Der Achsabstand a in den Spalten 4 und 5 gilt für zweiachsig gespannte Platten, die an allen vier Rändern gestützt sind. Trifft dies nicht zu, sind die Platten wie einachsig gespannte Platten zu behandeln.

^{a)} Normalerweise reicht die erforderliche Betondeckung nach DIN 1045-1 aus.

Die Mindestachsabstände a der Bewehrung sind so festgelegt, dass die mittlere Temperatur von auf Zug beanspruchten Bewehrungsstäben während der geforderten Feuerwiderstandsdauer nicht die kritische Temperatur $\theta_{krit} = 500^\circ\text{C}$ für Betonstahl überschreitet. Diese Temperaturen wurden so gewählt, dass für $E_{d,fi} = 0,7 \cdot E_d$ und $\gamma_s = 1,15$ die bei θ_{krit} aufnehmbare Stahlspannung nicht überschritten werden. In Abb. 5.1 ist die Abminderung der charakteristischen Festigkeit f_{yk} von Betonstahl mit ansteigender Temperatur dargestellt. Bei abweichender Ausnutzung der Bewehrung können die Achsabstände der Betonstahlbewehrung und statisch bestimmt gelagerten Biegebauteilen modifiziert werden:

$$\text{Ermittlung der Stahlspannung } \sigma_{s,fi} \text{ im Brandfall } \sigma_{s,fi} = \frac{E_{d,fi}}{E_d} \cdot \frac{f_{yk}(20^\circ\text{C})}{\gamma_s} \cdot \frac{A_{s,erf}}{A_{s,vorh}} \quad (5.6)$$

Bestimmung der kritischen Temperatur θ_{krit} mit Hilfe der in DIN V ENV 1992-1-2 angegebenen Beziehung zwischen der Temperatur im Stahl θ und der zugehörigen Streckgrenze f_y (Abb. 5.1)

$$\text{Änderung des Achsabstandes aus der Tabelle um } \Delta a = 0,1 \cdot (500 - \theta_{krit}) \quad (5.7)$$

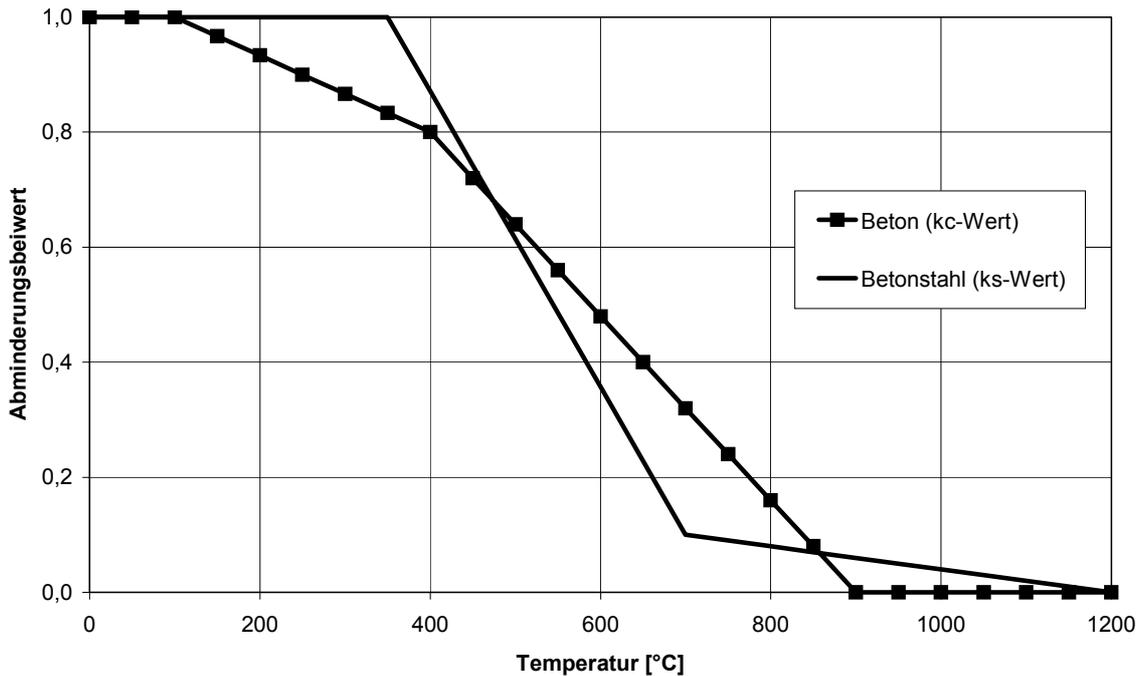


Abb. 5.1: Abnahme der charakteristischen Druckfestigkeit von Beton f_{ck} ($k_c(\theta)$ -Werte) und der Festigkeit von Betonstahl f_{yk} ($k_s(\theta)$ -Werte) mit ansteigender Temperatur nach DIN V ENV 1992-1-2

Bei schlanken Druckgliedern ist der im Brandfall entstehende Abfall der Steifigkeit und die damit verbundenen erhöhten Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung zu berücksichtigen. Dies wird in der Norm durch den Ausnutzungsgrad μ_{fi} berücksichtigt.

$$\mu_{fi} = \frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi}(\theta = \theta_0)} = \frac{\eta_{fi}}{\gamma_M} \cdot \frac{E_{d,kalt}}{R_{d,kalt}} \leq 0,4 \tag{5.8}$$

Für die Bemessung von Stützen ergibt sich gemäß [9] folgende Vorgehensweise:

- Bestimmung der bezogenen Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung

$$v_{Ed,fi} = \frac{N_{Ed,fi}}{b \cdot h \cdot f_{ck}} \tag{5.9}$$

$$\mu_{Ed,fi} = \frac{M_{Ed,fi}^{II}}{b \cdot h^2 \cdot f_{ck}} = \frac{N_{Ed,fi} \cdot (e_0 + e_a + e_2)}{b \cdot h^2 \cdot f_{ck}} \tag{5.10}$$

$N_{Ed,fi}$ Bemessungswert der Stützennormalkraft im Brandfall (Fußzeiger „fi“ = fire)

e_0 planmäßige Ausmitte nach Theorie I. Ordnung

e_a zusätzliche ungewollte Lastausmitte (DIN 1045-1, Gleichung (33))

e_2 zusätzliche Lastausmitte nach Theorie II. Ordnung

$$e_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{2 \cdot \varepsilon_{syk}}{0,9 \cdot d} \cdot \frac{1}{10} \cdot l_0^2 \tag{5.11}$$

Die Beiwerte K_1 und K_2 können auf der sicheren Seite liegend mit 1,0 angenommen werden.

- Berechnung des mechanischen Bewehrungsgrades

$$\omega_{tot,k} = \frac{A_{s,vorh} \cdot f_{yk}}{b \cdot h \cdot f_{ck}} \tag{5.12}$$

Im Interaktionsdiagramm für symmetrisch bewehrte Querschnitte liefert der Schnittpunkt der geraden durch den Koordinatenursprung und den Bemessungspunkten $v_{Ed,fi}$ und $\mu_{Ed,fi}$ mit der Linie für $\omega_{tot,k}$ die aufnehmbare Normalkraft $v_{Rd,fi(0)}$ zum Zeitpunkt $t = 0$.

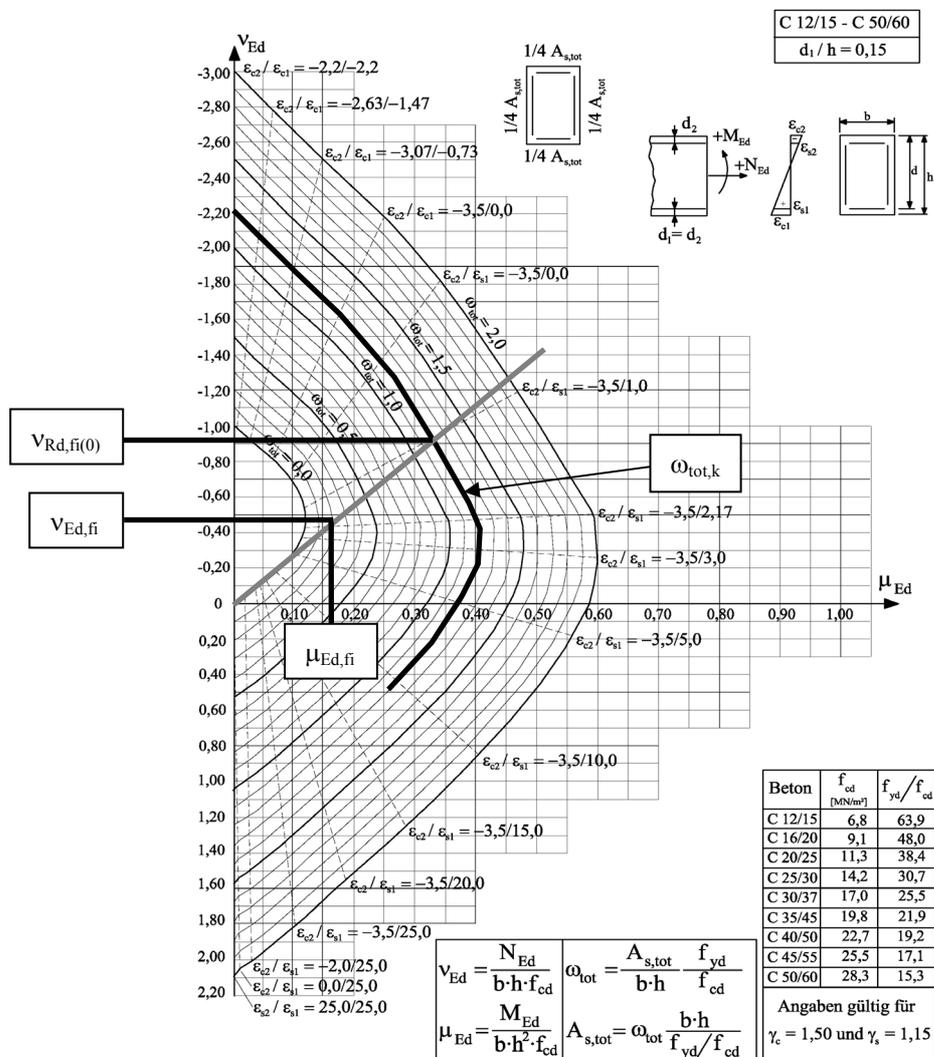


Abb. 5.2: Ermittlung von $v_{Rd,fi(0)}$ mit Hilfe des Interaktionsdiagramms für Biegung und Normalkraft

Daraus kann dann direkt der Ausnutzungsfaktor $\mu_{fi} = v_{Ed,fi}/v_{Ed,fi(0)}$ berechnet werden. Dieser Ausnutzungsfaktor muss stets kleiner als 0,4 sein.

In Abhängigkeit des vorhandenen Ausnutzungsfaktors kann aus der Tabelle 5.2 das erforderliche Achsmaß der Bewehrung sowie die Mindestabmessungen abgelesen werden.

Tab. 5.2: Mindestmaße und –achsabstände für Stahlbetonstützen mit Rechteck- und Kreisquerschnitt (nach [5] und [6])

Feuerwiderstandsklasse	Mindestmaße [mm]			
	Stützenbreite b_{min} / Achsabstand a			
	brandbeansprucht auf mehr als einer Seite			brandbeansprucht auf einer Seite
	$\mu_{fi} = 0,1$	$\mu_{fi} = 0,3$	$\mu_{fi} = 0,4$	$\mu_{fi} = 0,4$
1	2	3	4	5
F 30	150/10 ^{a)}	150/10 ^{a)}	150/10 ^{a)}	100/10 ^{a)}
F 60	150/10 ^{a)}	180/10 ^{a)}	200/10 ^{a)}	120/10 ^{a)}
F 90	180/10 ^{a)}	210/10 ^{a)}	240/35	140/10 ^{a)}
F 120	200/40	250/40	280/40	160/45
F 180	240/50	320/50	360/50	200/60
F 240	Entfällt			
^{a)} Normalerweise reicht die erforderliche Betondeckung nach DIN 1045-1 aus.				

Hinweis: Bei einer „Heißbemessung“ nach DIN 4102-4 in Verbindung mit DIN 4102-22 können die Gleichungen (5.9 – 5.12) sinngemäß benutzt werden. Hierbei sind jedoch die Bemessungswerte der Materialfestigkeiten (f_{cd} , bzw. f_{yd}) und der Bemessungswert der Dehnung des Betonstahls an der Streckgrenze (ϵ_{yd}) gemäß DIN 1045-1 zu benutzen.

6 BERECHNUNGSBEISPIELE

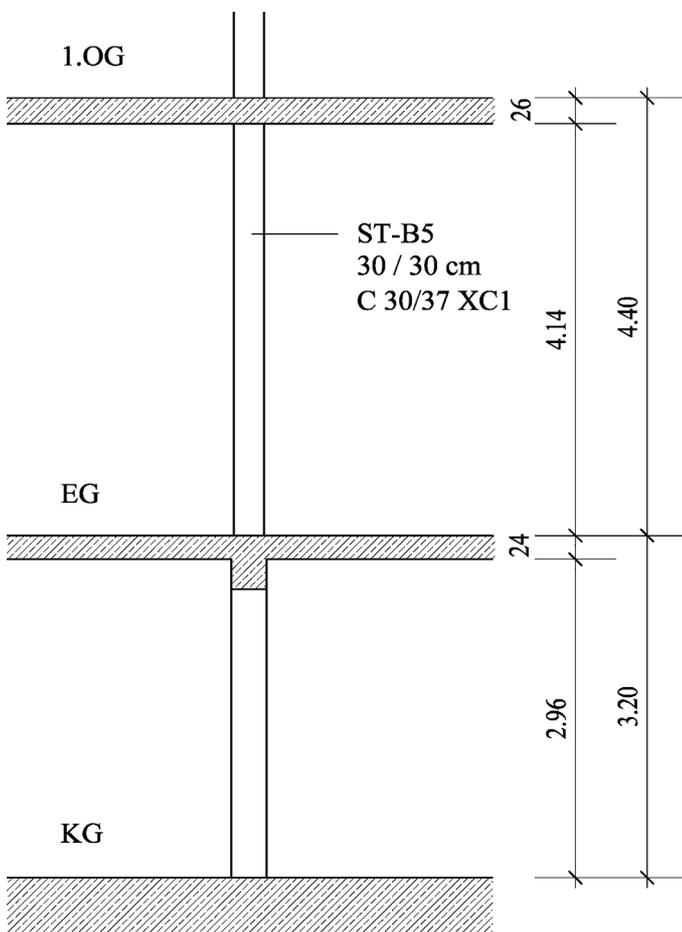
6.1 Innenstütze ohne Knickgefahr (Stützenschlankheit $\lambda \approx 50$), XC1, b/h = 30/30 cm, $l_{col} = l_0 = 4,39$ m

Das Bemessungsbeispiel wurde aus dem Buch „Stahlbetonprojekt nach DIN 1045 neu“ [10] Kapitel 7 entnommen.

Zu bemessen ist eine Innenstütze mit geringer Schlankheit im Erdgeschoß eines fünfgeschossigen üblichen Hochbaus. Das Gebäude ist zur Aufnahme von Horizontalkräften durch Deckenscheiben und Wandscheiben hinreichend ausgesteift. Die Innenstütze ist mit den Decken biegesteif verbunden. Die Außenluft hat keinen Zugang (geschlossene Räume), die Umweltbedingungen entsprechen somit DIN 1045-1, 6.2, Tabelle 3. Die Belastung ist vorwiegend ruhend. Im Folgenden wird die Innenstütze für eine Feuerwiderstandsklasse F 90 nachgewiesen.

Baustoffe: -Beton C 30/37 Ortbeton
 -Betonstabstahl BSt 500 S(A) (Normalduktil)

Betondeckung: -Betonstabstahl $c_{nom} = 35$ mm
 -Bügel $c_{nom} = 20$ mm



Eingangswerte:

$$\lambda = 4,39 / (0,289 \cdot 0,30) \approx 50$$

-> Kein Nachweis nach Theorie II. Ordnung erforderlich.

$$\begin{aligned} \text{C30/37} \quad f_{ck} &= 30,0 \text{ N/mm}^2 \\ f_{cd} &= 17,0 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{BSt 500} \quad f_{yk} &= 500 \text{ N/mm}^2 \\ f_{yd} &= 435 \text{ N/mm}^2 \\ \varepsilon_{yd} &= 2,175 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Einwirkungen:} \quad N_{G,k} &= -1489,9 \text{ kN} \\ N_{Q,k} &= -359,3 \text{ kN} \\ N_{Ed} &= -2550,0 \text{ kN} \end{aligned}$$

6.1.1 Bemessung im Kaltzustand gemäß DIN 1045-1

Ergebnisse der Kaltbemessung (siehe [10]):

gewählt: Betonstahl BSt 500 S(A)

$$8 \text{ } \varnothing 25 = 39,3 \text{ cm}^2 > 35,52 \text{ cm}^2 = A_{s,\text{erf}}$$

6.1.2 Bemessung für den Brandfall nach DIN 4102-4 und DIN 4102-22:

Aus Kaltbemessung:

$$N_{\text{Ed}} = -2550,0 \text{ kN}$$

Vereinfachter Nachweis (gemäß Gleichung (4.3)):

$$N_{\text{Ed,fi}} = 0,7 \cdot -2550,0 = -1785,0 \text{ kN}$$

$$N_{\text{Rd}} = -(30^2 - 39,3) \cdot 1,7 - 39,3 \cdot 43,5 = -3172,7 \text{ kN}$$

Geometrischer Bewehrungsgrad:

$$\rho_{\text{tot}} = \frac{39,3}{30^2} = 0,044$$

Nach Bild 15a, DIN 4102-22 (siehe Bild 4.2):

$$\alpha^* = 1,78$$

$$\alpha_1 = 1,78 \cdot \frac{1785,0}{3172,7} = 1,0$$

Für den Ausnutzungsfaktor vorh. $\alpha_1 = 1,0$ ergeben sich gemäß DIN 4102-4, Tabelle 31 in Verbindung mit der Anwendungsnorm DIN 4102-22 folgende Mindestquerschnittsabmessung sowie folgende Mindestachsabstände der Bewehrung:

$$b_{\text{min}} = 240 \text{ mm} \leq 300 \text{ mm} = \text{vorh. } b$$

$$u_{\text{min}} = c_{\text{nom}} \text{ gemäß DIN 1045-1}$$

Die Stütze kann nach DIN 1045-1 in Verbindung mit der Anwendungsnorm DIN 4102-22 in die Feuerwiderstandsklasse F 90 eingestuft werden.

6.1.3 Bemessung für den Brandfall nach DIN EN 1992-1-2 und DIBt-Richtlinie:

$$\text{mit } \gamma_M = 1,0: \quad \begin{cases} f_{cd} = 30 \text{ MN/m}^2 \hat{=} 3,0 \text{ kN/cm}^2 \\ f_{yd} = 500 \text{ MN/m}^2 \hat{=} 50 \text{ kN/cm}^2 \\ \varepsilon_{yd} = \varepsilon_{yk} = 2,5 \cdot 10^{-3} \end{cases}$$

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \cdot E_d$$

$$\xi = \frac{Q_{K1}}{G_k} = \frac{359,3}{1489,9} = 0,241$$

$$\eta_{fi} = \frac{1,0 + 0,5 \cdot 0,241}{1,35 + 1,5 \cdot 0,241} = 0,655 \quad (\text{für Bürogebäude})$$

(alternativ vereinfacht: $\eta_{fi} = 0,7$)

$$N_{d,fi} = 0,655 \cdot 2550,0 = 1670,25 \text{ kN}$$

$$R_{d,fi(0)} = -(30^2 - 39,3) \cdot 3,0 - 39,3 \cdot 50 = -4547,1 \text{ kN}$$

Ausnutzungsgrad:

$$\mu_{fi} = \frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi(0)}} = \frac{1670,25}{4547,10} = 0,37$$

Für den Ausnutzungsfaktor vorh. $\mu_1 \approx 0,4$ ergeben sich gemäß DIN V ENV 1992-1-2, Tabelle 4.1 in Verbindung mit der DIBt-Richtlinie folgende Mindestquerschnittsabmessung und Mindestachsabstände der Bewehrung:

$$b_{\min} = 240 \text{ mm} \leq 300 \text{ mm} = \text{vorh. } b$$

$$a_{\min} = 35 \text{ mm} \leq a_{\text{vorh}} = 35 + 25/2 = 47,5 \text{ mm}$$

Die Bemessung nach DIN 1045-1 in Verbindung mit DIN V ENV 1992-1-2 und der DIBt-Richtlinie kann die Stütze in die Feuerwiderstandsklasse F 90 einstufen.

6.2.1 Bemessung im Kaltzustand gemäß DIN 1045-1

Ergebnisse der Kaltbemessung:

gewählt: Betonstahl BSt 500 S(A)

$4 \text{ } \varnothing 28 = 24,6 \text{ cm}^2 > 22,5 \text{ cm}^2 = A_{s,\text{erf}}$
--

6.2.2 Bemessung für den Brandfall nach DIN 4102-4 und DIN 4102-22:

Aus Kaltbemessung:

$$N_{\text{Ed}} = -1400,0 \text{ kN}$$

$$M_{\text{Ed}} = 56,0 \text{ kNm}$$

Vereinfachter Nachweis (gemäß Gleichung (4.3)):

$$N_{\text{Ed,fi}} = 0,7 \cdot -1400,0 = -980,0 \text{ kN}$$

$$M_{\text{Ed,fi}} = 0,7 \cdot 56,0 = 39,2 \text{ kNm}$$

$$v_{\text{Ed,fi}} = \frac{-0,980}{0,25^2 \cdot 19,8} = -0,80$$

$$\mu_{\text{Ed,fi}} = \frac{0,0392}{0,25^3 \cdot 19,8} = 0,13$$

$$\omega_{\text{tot,k}} = \frac{24,6}{25^2} \cdot 21,9 = 0,86$$

$$v_{\text{Rd,fi(0)}} = -1,12$$

$$N_{\text{Rd}} = -1,12 \cdot 0,25^2 \cdot 19,8 \cdot 10^3$$

$$= -1386 \text{ kN}$$

Geometrischer Bewehrungsgrad:

$$\rho_{\text{tot}} = \frac{24,6}{25^2} = 0,039$$

Nach Bild 15a, DIN 4102-22 (siehe Bild 4.2):

$$\alpha^* = 1,8$$

$$\alpha_1 = 1,8 \cdot \frac{980}{1386} = 1,27$$

Gemäß DIN 4102-4, Tabelle 31 muss der Ausnutzungsfaktor $\alpha_1 \leq 1,00$ sein. Der Nachweis kann für die geforderte Feuerwiderstandsdauer F 90 nicht geführt werden!

Genauerer Nachweis (gemäß Gleichung (4.2)):

$$N_{G,k} = -815 \text{ kN} \quad N_{Q,k} = -200 \text{ kN}$$

$$\gamma_{GA} = 1,0 \quad \gamma_A = 1,0$$

$$\psi_{11} = 0,5 \quad \text{für Bürogebäude}$$

$$N_{\text{Ed,fi}} = -815 - 0,5 \cdot 200 = -915 \text{ kN}$$

$$M_{\text{Ed,fi}} = \frac{915}{980} \cdot 39,2 = 36,6 \text{ kNm}$$

$$\left. \begin{aligned} v_{\text{Ed,fi}} &= \frac{-0,915}{0,25^2 \cdot 19,8} = -0,74 \\ \mu_{\text{Ed,fi}} &= \frac{0,0366}{0,25^3 \cdot 19,8} = 0,118 \end{aligned} \right\} v_{\text{Rd,fi}(0)} = -1,18$$

$$N_{\text{Rd}} = -1,18 \cdot 0,25^2 \cdot 19,8 \cdot 10^3 = -1460 \text{ kN}$$

$$\alpha_1 = 1,8 \cdot \frac{915}{1460} = 1,13$$

Gemäß DIN 4102-4, Tabelle 31 muss der Ausnutzungsfaktor $\alpha_1 \leq 1,00$ sein. Der Nachweis kann für die geforderte Feuerwiderstandsdauer F 90 nicht geführt werden!

Um die geforderte Feuerwiderstandsdauer F 90 für die Innenstütze nachweisen zu können, ist eine erneute Kaltbemessung mit erhöhten Bemessungswerten der Einwirkungen erforderlich. Die Einwirkungen müssen um ca. 15 % gegenüber der ursprünglichen Kaltbemessung erhöht werden.

$$N_{Ed} = 1,15 \cdot (-1400) = -1610 \text{ kN}$$

Eine erneute Kaltbemessung ergibt: $\text{erf } A_s \approx 30 \text{ cm}^2$

gewählt: Betonstahl BSt 500 S(A)

$$8 \text{ } \emptyset 25 = 39,3 \text{ cm}^2 > 30 \text{ cm}^2 = A_{s,\text{erf}}$$

Heissbemessung:

$$N_{Ed,fi} = -915 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,fi} = 36,6 \text{ kNm}$$

$$v_{Ed,fi} = -0,74$$

$$\mu_{Ed,fi} = 0,118$$

$$\omega_{\text{tot},k} = \frac{39,3}{25^2} \cdot 21,9 = 1,4$$

$$v_{Rd,fi(0)} = -1,5$$

$$N_{Rd} = -1,5 \cdot 0,25^2 \cdot 19,8 \cdot 10^3 = -1856 \text{ kN}$$

$$\alpha^* = 1,84$$

$$\alpha_1 = 1,84 \cdot \frac{915}{1856} \approx 0,91$$

Für den Ausnutzungsfaktor vorh. $\alpha_1 = 0,91 \approx 1,0$ ergibt sich gemäß DIN 4102-4, Tabelle 31 in Verbindung mit der Anwendungsnorm DIN 4102-22 folgende Mindestquerschnittsabmessung und Mindestachsabstände der Bewehrung:

$$b_{\text{min}} = 240 \text{ mm} \leq 250 \text{ mm} = \text{vorh. } b$$

$$u_{\text{min}} = c_{\text{nom}} \text{ gemäß DIN 1045-1}$$

Nach einer Erhöhung der Einwirkung um ca. 15 % und der erneuten „Kaltbemessung“ nach DIN 1045-1 in Verbindung mit der Anwendungsnorm DIN 4102-22 kann die Stütze in die Feuerwiderstandsklasse F 90 eingestuft werden.

7 LITERATUR

- [1] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Deutsches Institut für Normung e. V., Juli 2001
- [2] DIN 1055-100: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, Deutsches Institut für Normung e. V., März 2001
- [3] DIN 4102-4: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, Ausgabe März 1994 mit Berichtigungen 1 bis 3 vom Mai 1995, April 1996 und September 1998
- [4] DIN 1045: Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung, Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Ausgabe Juli 1988
- [5] DIBt-Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1992-1-2 in Verbindung mit DIN 1045-1, Mitteilungen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Heft 2/2002, Seite 49 – 51
- [6] DIN V ENV 1992-1-2: Eurocode 2 – Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1–2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Vornorm, Ausgabe Mai 1997
- [7] DIN 4102-22: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 22: Anwendungsnorm zu DIN 4102-4, November 2004
- [8] DIN 4102-2: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 2: Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, Ausgabe September 1977
- [9] Graubner, C.-A.; Hausmann, G.; Karasek, J.: Bemessung von Betonfertigteilen nach DIN 1045-1, Beitrag im Betonkalender 2005, Teil 2, Seite 299-374, Ernst & Sohn Verlag Berlin
- [10] Minnert, J.: Stahlbeton-Projekt nach DIN 1045 neu, Seite 153-166, 1. Auflage, Bauwerk Verlag, Berlin 2005