

B R A N D S C H U T Z

Fachseminar und Workshop

TRAGWERKSBEMESSUNG VON STAHLBAUTEN FÜR DEN BRANDFALL

–

BEISPIELE

P. Schaumann

J. Upmeyer

**Institut für Stahlbau
Universität Hannover**



Fachhochschule München – Bauen mit Stahl e.V.

München, 13. und 14. April 2000



Inhaltsverzeichnis

1	Stahlträger.....	2
1.1	Aufgabenstellung.....	2
1.2	Tragfähigkeitsnachweis bei Raumtemperatur	3
1.3	Tragfähigkeitsnachweise im Brandfall.....	3
1.3.1	Einwirkungen im Brandfall.....	3
1.3.2	Berechnung der Stahltemperaturen	4
1.3.3	Nachweis auf Temperaturebene (θ_{cr} -Verfahren).....	7
1.3.4	Nachweis auf Tragfähigkeitsebene	8
2	Stahlstütze.....	11
2.1	Aufgabenstellung.....	11
2.2	Tragfähigkeitsnachweis bei Raumtemperatur	12
2.3	Tragfähigkeitsnachweise im Brandfall.....	12
2.3.1	Einwirkungen im Brandfall.....	12
2.3.2	Berechnung der Stahltemperaturen	13
2.3.3	Nachweis auf Temperaturebene (θ_{cr} -Verfahren).....	14
2.3.4	Nachweis auf Tragfähigkeitsebene	17
3	Literatur	18



EC3-1-2 [4]

1 Stahlträger

1.1 Aufgabenstellung

In dem folgenden Beispiel wird die brandschutztechnische Bemessung eines Stahlträgers in einem Geschäfts- und Warenhaus vorgeführt. Es handelt sich um einen beidseitig gelenkig gelagerten Einfeldträger mit einer Stützweite von 12 m. Der Träger soll der Einfachheit halber im Rahmen dieses Beispiels nicht schubfest mit der Stahlbetonplatte verbunden werden. Er ist durch Gleichstreckenlasten beansprucht und wegen der aufliegenden Platte im Brandfall als dreiseitig beflammt anzusehen. Als Brandschutzanforderung wird sowohl die Feuerwiderstandsklasse R 30 wie auch R 90 untersucht.

Als Brandschutzmaßnahmen werden zwei Möglichkeiten betrachtet:

- Kastenförmige Bekleidung aus Gipskarton-Feuerschutzplatten
- Profilfolgende Putzbekleidung.

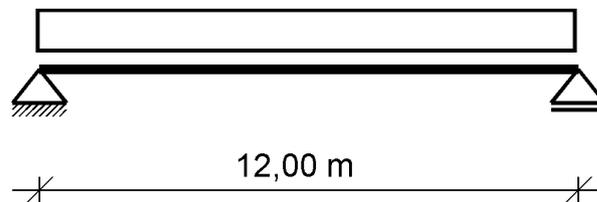


Abbildung 1-1: Statisches System

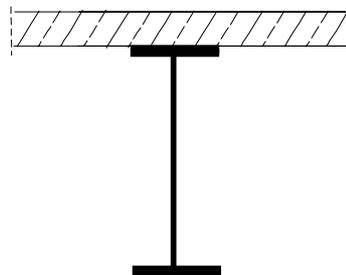


Abbildung 1-2 Trägerquerschnitt

Trägerquerschnitt: Walzprofil, IPE 550, S 235, Querschnittsklasse 1

Materialkennwerte: $f_{yd} = 23,5/1,1 = 21,36 \text{ kN/cm}^2$, $E_a = 21000 \text{ kN/cm}^2$



EC3-1-2 [4]

Querschnittswerte: $A_a = 134 \text{ cm}^2$, $W_{pl} = 2 \cdot S_y = 2 \cdot 1390 = 2780 \text{ cm}^3$

Belastungen: ständig: $g_k = 13,60 \text{ kN/m}$
 veränderlich: $p_k = 7,50 \text{ kN/m}$

1.2 Tragfähigkeitsnachweis bei Raumtemperatur

Nachweis der Biegemomenten- und Querkrafttragfähigkeit bei Raumtemperatur, Verfahren elastisch-plastisch:

plastische Biegemomenten­tragfähigkeit:

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2780 \cdot 23,5 \cdot 10^{-2}}{1,1} = 594,0 \text{ kNm}$$

Querkrafttragfähigkeit:

Wirksame Schubfläche: $A_v = 1,04 \cdot h \cdot t_w = 1,04 \cdot 550 \cdot 11,1 = 6349 \text{ mm}^2$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{6349 \cdot 235}{1,1 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^{-3} = 783,1 \text{ kN}$$

Nachweis:

Biegemomenten­tragfähigkeit in Feldmitte:

$$M_{sd} = [1,35 \cdot 13,60 + 1,50 \cdot 7,50] \cdot \frac{12,00^2}{8} = 533,0 \text{ kNm}$$

$$< M_{pl,Rd} = 594,0 \text{ kNm}$$

Querkrafttragfähigkeit am Auflager:

$$V_{sd} = [1,35 \cdot 13,60 + 1,50 \cdot 7,50] \cdot \frac{12,00}{2} = 177,7 \text{ kN}$$

$$< V_{pl,Rd} = 783,1 \text{ kN}$$

Der Tragfähigkeitsnachweis bei Raumtemperatur ist erfüllt. Eine Momenten–Querkraft-Interaktion ist hier nicht maßgebend.

1.3 Tragfähigkeitsnachweise im Brandfall

1.3.1 Einwirkungen im Brandfall

Hinsichtlich der mechanischen Einwirkungen im Brandfall gelten die Kombinationsregeln für außergewöhnliche Einwirkungen:

$$S_{dA} = S \cdot \left[\sum \gamma_{GA} \cdot G_k + A_d + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right]$$

Dabei ist für den Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen in der außergewöhnlichen Situation $\gamma_{GA} = 1,0$ zu setzen. Der Kombinationsbeiwert $\psi_{1,1}$ für die führende veränderliche Last ergibt sich für Geschäfts- und

EC1-1-1 [1]

EC1-2-2 [3]



Warenhäuser zu 0,8.

Beanspruchungen im Brandfall:

Biegemoment in Feldmitte:

$$M_{fi,d} = [1,0 \cdot 13,6 + 0,8 \cdot 7,5] \frac{12,0^2}{8} = 352,8 \text{ kNm}$$

Querkraft am Auflager:

$$V_{fi,d} = [1,00 \cdot 13,60 + 0,8 \cdot 7,50] \frac{12,00}{2} = 117,6 \text{ kN}$$

Die Brandbeanspruchung ergibt sich aus den Anforderungen der Feuerwiderstandsklasse R 30 bzw. R 90 zu 30 bzw. 90 Minuten Branddauer nach der Einheits-Temperaturzeit-Kurve.

1.3.2 Berechnung der Stahltemperaturen

Zur Berechnung der Erwärmung des bekleideten Stützenquerschnitts wird das Berechnungsverfahren nach EC3-1-2 angewendet. Danach ergibt sich der Temperaturanstieg $\Delta\theta_{a,t}$ eines bekleideten Stahlbauteils wie folgt:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \cdot A_p / V}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{\left(1 + \frac{\phi}{3}\right)} \cdot \Delta t - \left(e^{\phi/10} - 1\right) \cdot \Delta\theta_{g,t}; \text{ jedoch } \Delta\theta_{a,t} \geq 0$$

$$\text{mit } \phi = \frac{c_p \cdot \rho_p}{c_a \cdot \rho_a} \cdot d_p \cdot \frac{A_p}{V}$$

Dabei bedeuten:

- $\frac{A_p}{V}$ der Profilmfaktor des bekleideten Stahlbauteils
- A_p die Fläche des Brandschutzmaterials, bezogen auf die Bauteillänge
- V das Bauteilvolumen pro Längeneinheit
- c_a spezifische Wärme von Stahl [J/(kg·K)]
- c_p spezifische Wärme des Brandschutzmaterials [J/(kg·K)]
- d_p Dicke des Brandschutzmaterials [m]
- Δt das Zeitintervall [Sekunden] ≤ 30 sek
- $\theta_{a,t}$ die Stahltemperatur zum Zeitpunkt t
- $\theta_{g,t}$ die Temperatur der umgebenden Luft zum Zeitpunkt t
- $\Delta\theta_{g,t}$ der Anstieg der Umgebungstemperatur während des Zeitintervalls Δt
- λ_p die Wärmeleitfähigkeit des Brandschutzmaterials W/(m·K)]
- ρ_a die Dichte von Stahl [kg/m³]
- ρ_p die Dichte des Brandschutzmaterials [kg/m³]

Berechnet werden die Erwärmungsverläufe für das bekleidete Trägerprofil

EC3-1-2 [4]

EC1-2-2 [3]

und NAD [7]

Abschnitt 4.2.5.2

Abschnitt 3.3.1.2



EC3-1-2 [4]

IPE 550 in Abhängigkeit der Branddauer. Dieses kann mit Hilfe eines kleinen Rechenprogramms oder mit den Euronomogrammen [9] erfolgen. Die rechnerischen Bekleidungsicken d werden zunächst in Anlehnung an die bisherigen Regelungen der DIN 4102 Teil 4 angenommen. Die thermischen Materialkennwerte entsprechen dem NAD (s. Tabelle 1-2), wobei der Feuchtigkeitsgehalt konservativ zu Null angenommen wurde. Der Profilmfaktor ist als Verhältnis von brandbeanspruchter Oberfläche A_p zum Volumen V des Stahlbauteiles definiert. Beispiele für die Ermittlung des Profilmfaktors bei I-Profilen zeigt Tabelle 1-1.

Profilmfaktor für Bekleidung mit GKF-Platten:

$$A_p/V = (2 \cdot 55 + 21) / 134 \cdot 10^2 = 98 \text{ m}^{-1}$$

Profilmfaktor für Bekleidung mit Putz:

$$A_p/V \approx (2 \cdot 55 + 3 \cdot 21 - 2 \cdot 1,11) / 134 \cdot 10^2 = 128 \text{ m}^{-1}$$

Tabelle 1-1: Gewählte Bekleidungsicken d [mm] in Abhängigkeit von der Art der Bekleidung und der angestrebten Feuerwiderstandsklasse DIN 4102-4 [2]
Tab. 90 und Tab. 92

	R 30	R 90
<u>GKF-Platte nach DIN 18180:</u> DIN 4102-4 / Tab. 90 $A_p/V = 98 \text{ m}^{-1}$	$\Rightarrow d = 12,5 \text{ mm}$	$\Rightarrow d = 2 \cdot 15 = 30 \text{ mm}$
<u>Putz IVa/IVb nach DIN 18850-2</u> DIN 4102-4 / Tab. 92 $A_p/V = 128 \text{ m}^{-1}$	$\Rightarrow d = 5 \text{ mm}$ $D_{ges} = 5 + 10 = 15 \text{ mm}$	$\Rightarrow d = 15 \text{ mm}$ $D_{ges} = 15 + 10 = 25 \text{ mm}$

Bei den Putzbekleidungen ergibt sich die tatsächliche Dicke D_{ges} aus der rechnerischen Dicke d zuzüglich eines konstruktiven Zuschlages (s. NAD); $\min D_{ges} \geq 15 \text{ mm}$.

Ergänzend wird in den Beispielrechnungen jeweils noch der Erwärmungsverlauf für eine Bekleidungsdicke von $d = 20 \text{ mm}$ berechnet.

Tabelle 1-2: Ermittlung des Profilmfaktors

Brandbeanspruchung	dreiseitig		allseitig	
	profilfolgend	kastenförmig	profilfolgend	kastenförmig
Art der Bekleidung				
Profilmfaktor $A_p/V =$	$\frac{\text{Mantelfläche} - b}{A}$	$\frac{2h + b}{A}$	$\frac{\text{Mantelfläche}}{A}$	$\frac{2h + 2b}{A}$



EC3-1-2 [4]

Tabelle 1-3: Thermische Materialkennwerte von Brandschutzbekleidungen aus [8]

Brandschutzmaterial	Wärmeleitfähigkeit λ_p [W/(m*K)]	Spezifische Wärme c_p [J/(kg*K)]	Dichte ρ_p [kg/m ³]
Putze	Mörtelgruppe P II, PIV a,b,c nach DIN 18550 Teil 2	0,12	1100
	Vermiculite- und Perlite-mörtel nach DIN 4102-4 Abschn. 3.1.6.5	0,12	1100
Platten	Gipskarton-Feuerschutz-Platten (GKF) nach DIN 18180	0,20	1700

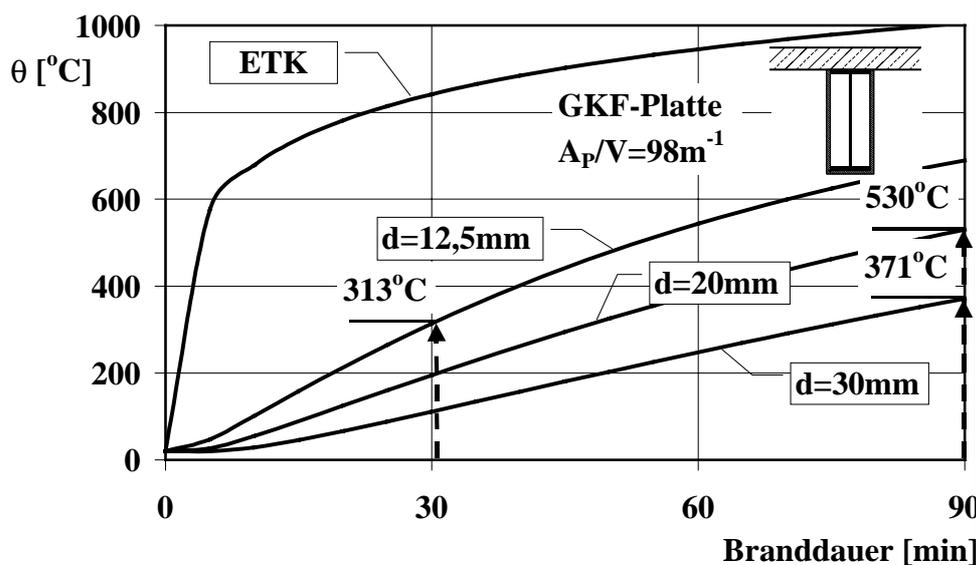


Abbildung 1-3: Erwärmungskurven für den Trägerquerschnitt mit GKF-Platten, Kurvenparameter: Dicke der Bekleidung



EC3-1-2 [4]

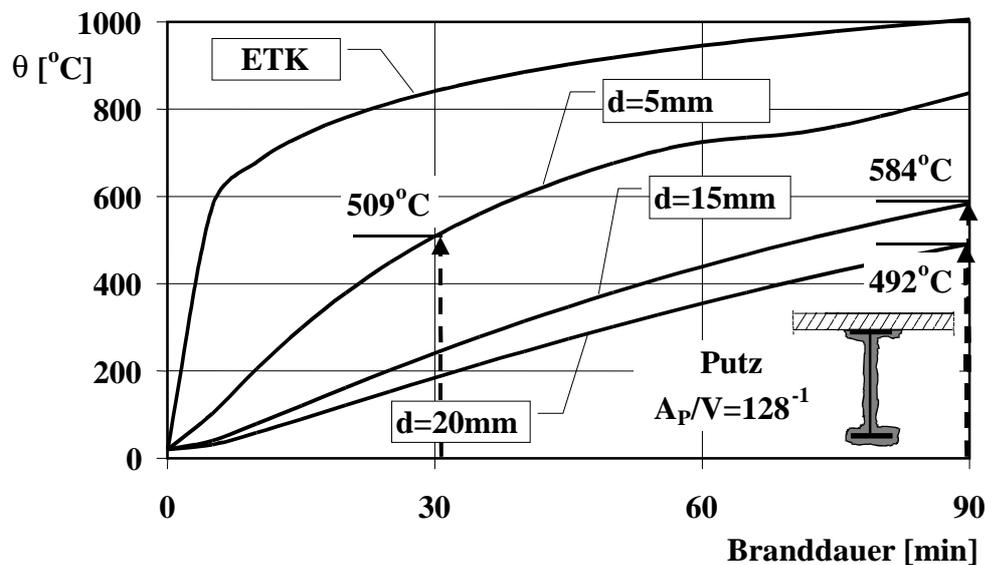


Abbildung 1-4: Erwärmungskurven für den Trägerquerschnitt mit Putz
Kurvenparameter: Dicke der Bekleidung

1.3.3 Nachweis auf Temperaturebene (θ_{cr} -Verfahren)

Abschn. 4.2.4

Beim Nachweis auf Temperaturebene ist nachzuweisen, dass die höchste im Brandfall auftretende Stahltemperatur $\theta_{a,max}$ unterhalb der kritischen Stahltemperatur θ_{cr} bleibt. Die kritische Stahltemperatur θ_{cr} ergibt sich in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad. Der Ausnutzungsgrad μ_0 zum Zeitpunkt $t = 0$ darf wie folgt bestimmt werden:

über Einwirkungen und Widerstände:
$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$$

Abschn. 4.2.4 (4)

oder

über den Abminderungsfaktor η_{fi} :
$$\mu_0 = \eta_{fi} \cdot \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_M} = \eta_{fi} \cdot \frac{1,0}{1,1}$$

Abschn. 4.2.4 (5)

In diesem Beispiel ergibt sich der Ausnutzungsgrad aus den Biegemomenten des Trägers:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} = \frac{M_{fi,d}}{M_{fi,Rd,0}}$$

Das im Brandfall wirkende Biegemoment $M_{fi,d} = 352,8 \text{ kNm}$ ist aus Kapitel 1.3.1 bekannt. Die Biegemomenten Tragfähigkeit im Brandfall zum Zeitpunkt $t=0$ ist zu ermitteln.



EC3-1-2 [4]

$$M_{fi,Rd,0} = W_{pl} \cdot f_y \cdot k_{y,\Theta,max} \cdot \frac{1}{\gamma_{M,fi}}$$

mit $k_{y,\Theta,max} = 1,0$ für $\Theta = 20^\circ\text{C}$ zum Zeitpunkt $t = 0$

wobei der Materialteilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,fi} = 1,0$ gesetzt wird.

Biegemomenten Tragfähigkeit:

$$M_{fi,20^\circ\text{C},Rd} = W_{pl} \cdot f_y \cdot \frac{1}{\gamma_{M,fi}} = 2780 \cdot 23,5 \cdot \frac{1}{1,0 \cdot 100} = 653,3 \text{ kNm}$$

Ausnutzungsgrad:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} = \frac{352,8}{653,3} = 0,54$$

Die kritische Temperatur $\theta_{a,cr}$ ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} \theta_{a,cr} &= 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \\ &= 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot 0,540^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 572^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Die maximal auftretende Bauteiltemperatur muss unterhalb der kritischen Temperatur von 572°C bleiben, um die geforderte Feuerwiderstandsklasse zu gewährleisten. Aus den Erwärmungsberechnungen in Kap. 1.3.2 (s. Abbildungen 1-3 und 1-4) ergibt sich als höchste Stahltemperatur für die in Tabelle 3-6 gewählten Parameter:

$\theta_{a,max} = 530^\circ\text{C}$ (R 90, GKF-Platten $d=20$ mm).

Der Brandschutznachweis ist mit

$$\theta_{a,max} = 530^\circ\text{C} < \theta_{a,cr} = 572^\circ\text{C} \quad \checkmark$$

sowohl für die GKF-Plattenbekleidung als auch für die Putzbekleidung mit den jeweiligen Bekleidungsstärken in den Feuerwiderstandsklassen R 30 und R 90 erfüllt. Für die 15mm dicke Putzbekleidung ist der Nachweis für die Feuerwiderstandsklasse R 90 nicht erbracht, da die ! maximale Bauteiltemperatur $\theta_{a,max} = 584^\circ\text{C}$ größer als die kritische Temperatur ist.

1.3.4 Nachweis auf Tragfähigkeitsebene

Beim Nachweis auf Tragfähigkeitsebene wird im Brandfall der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit geführt:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t}$$

Im vorliegenden Beispiel ist der Nachweis für die Biegemomente in dem

Abschnitt 4.2.4 (2)

Abschn. 2.4.2 (2)



EC3-1-2 [4]

Träger zu führen:

$$M_{fi,d} \leq M_{b,fi,Rd,t}$$

Das im Brandfall wirkende Biegemoment $M_{fi,d} = 352,8 \text{ kNm}$ ist aus Kap. 1.3.1 bekannt.

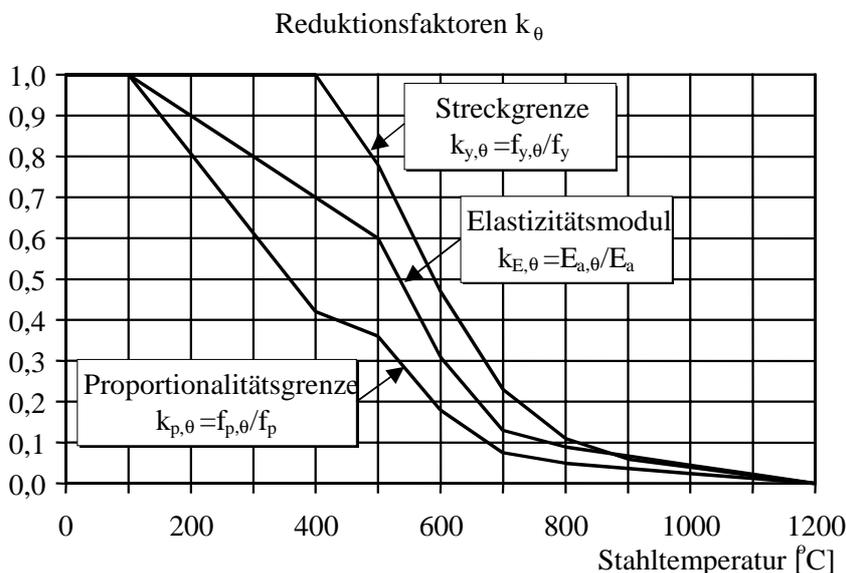
Die Biegemomententragfähigkeit im Brandfall zum Zeitpunkt t ist in Abhängigkeit von den dann herrschenden Stahltemperaturen zu ermitteln.

Für die Bemessung wird die maximale Stahltemperatur maßgebend. Die maximale auftretende Bauteiltemperatur für den bekleideten Träger ist $\theta_{a,max} = 530^\circ\text{C}$; s. dazu die Erwärmungsverläufe in Abbildung 1-3 und 1-4 für die Bekleidungsstärken nach Tabelle 1.1. Die Biegemomententragfähigkeit unter erhöhter Temperatur ergibt sich aus:

$$M_{fi,90,Rd} = M_{pl,Rd,20^\circ\text{C}} \cdot k_{y,530^\circ\text{C}} \cdot \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{fi}} \cdot \frac{1}{\kappa_1 \cdot \kappa_2}$$

Abschn. 4.2.3.3 (3) und (4)

Der Einfluss der erhöhten Stahltemperatur auf die Festigkeitseigenschaften von Baustahl wird in Abbildung 1-5 deutlich.



siehe auch Tabelle 3.1

Abbildung 1-5: Abhängigkeit der Streckgrenze, der Proportionalitätsgrenze und des Elastizitätsmoduls von der Temperatur

In Abhängigkeit von $\theta_{a,max}$ werden die Abminderungsfaktoren $k_{y,\theta}$ und $k_{E,\theta}$ (linear interpoliert) abgelesen:

$$k_{y,530^\circ\text{C}} = 0,69 \quad k_{E,530^\circ\text{C}} = 0,51$$



EC3-1-2 [4]

Es ergeben sich für $\theta_a = 530^\circ\text{C}$ folgende Materialkennwerte:

$$f_{y,530^\circ\text{C}} = k_{y,530^\circ\text{C}} \cdot f_y = 0,69 \cdot 23,5 = 16,2 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$E_{a,530^\circ\text{C}} = k_{E,530^\circ\text{C}} \cdot E = 0,51 \cdot 21000 = 10710 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Tabelle 1-4: Anpassungsfaktoren $\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2$ nach EC3-1-2

	Statisches System	Beflammung	Anpassungs-faktor κ
Träger	Einfeldträger (statisch bestimmt)	allseitig	1,0
		dreiseitig mit Beton- oder Verbunddeckenplatte	1,0*)
	statisch unbestimmte Träger	allseitig	0,8
		dreiseitig mit Beton- oder Verbunddeckenplatte	0,8*)
Stützen	alle Lagerungsbedingungen	allseitig	1,2
Zugglieder	-	allseitig	1,0

*) durch NAD gegenüber EC3-1-2 geändert

Der Einfluß der Lagerungsbedingungen und der ungleichförmigen Temperaturverteilung über den Querschnitt wird durch die Anpassungsfaktoren κ berücksichtigt. Der Träger ist an den Auflagern statisch bestimmt gelagert und liegt unter der Stahlbetonplatte (dreiseitig beflammt). Der Anpassungsfaktor ist Tabelle 1-4 zu entnehmen:

$$\kappa = 1,0$$

$$M_{fi,90,Rd} = M_{pl,Rd,20^\circ\text{C}} \cdot k_{y,530^\circ\text{C}} \cdot \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{fi}} \cdot \frac{1}{\kappa} = 594,0 \cdot 0,69 \cdot \frac{1,1}{1,0} \cdot \frac{1}{1,0} = 450,8 \text{ kNm}$$

Nachweis:

$$M_{fi,d} = 352,8 \text{ kNm} \leq 450,8 \text{ kNm} = M_{b,fi,Rd,d}$$

Der Nachweis der Tragfähigkeit im Brandfall ist erbracht.

Abschn.4.2.3.3 (3)
und NAD



EC3-1-2 [4]

2 Stahlstütze

2.1 Aufgabenstellung

In dem folgenden Beispiel wird die brandschutztechnische Bemessung einer Stahlstütze in einem Geschäfts- und Warenhaus gezeigt. Es handelt sich um eine Stütze in einem aussteiften Rahmentragwerk, die biegesteif an die darüber bzw. darunter liegenden Stützen angeschlossen ist. Die geometrische Länge beträgt 3,0 m. Unter den genannten Bedingungen darf die Knicklänge im Brandfall halbiert werden. Die Stütze ist durch eine zentrische Normalkraft belastet. Die Brandbeanspruchung der Stütze erfolgt von vier Seiten. Als Brandschutzanforderung wird sowohl die Feuerwiderstandsklasse R 30 wie auch R 90 untersucht.

Als Brandschutzmaßnahmen werden zwei Möglichkeiten betrachtet:

- Kastenförmige Bekleidung aus Gipskarton-Feuerschutzplatten
- Profilfolgende Putzbekleidung.

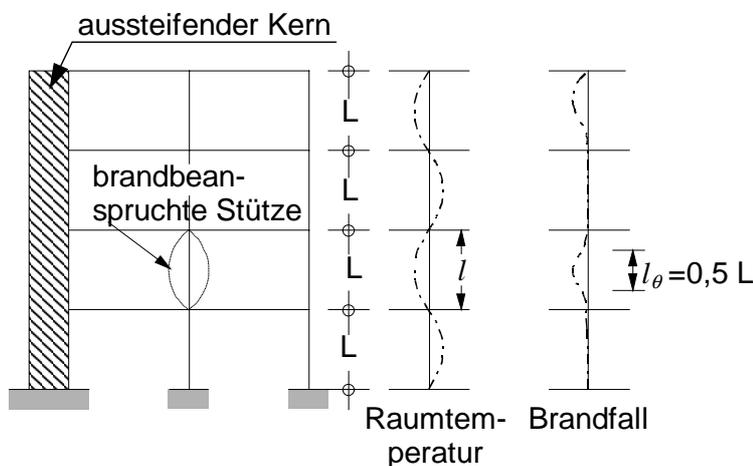


Abbildung 2-1: Knicklängen von Stützen in aussteiften Rahmentragwerken

Stützenquerschnitt: Walzprofil HE 300 B, S 235, Querschnittsklasse 1

Materialkennwerte: $f_{y,d} = f_y / \gamma_{M0} = 23,5 / 1,1 = 21,36 \text{ kN/cm}^2$

$E_a = 21000 \text{ kN/m}^2$

Querschnittswerte: $A_a = 149 \text{ cm}^2$, $I_a = 8560 \text{ cm}^4$ (schwache Achse)

Systemhöhe: $L = 3,0 \text{ m}$



EC3-1-2 [4]

Normalkräfte in der Stütze:

$$\text{ständig: } G_k = 1200 \text{ kN}$$

$$\text{veränderlich: } P_k = 600 \text{ kN}$$

2.2 Tragfähigkeitsnachweis bei Raumtemperatur

EC3-1-1 [1]

Normalkrafttragfähigkeit bei Raumtemperatur für Biegeknicken um die schwache Achse:

plastischer Normalkraftwiderstand:

$$N_{pl,Rd} = A_a \cdot f_y / \gamma_{M0} = 149 \cdot 23,5 / 1,1 = 3183 \text{ kN}$$

Knicklänge:

$$L_{Kz} = \beta \cdot L = 1,0 \cdot 300 = 300 \text{ cm}$$

bezogener Schlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{Kz}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{300}{7,58 \cdot 93,9} = 0,42$$

Reduktionsfaktor χ nach der Knickspannungskurve c (schwache Achse, $\alpha = 0,49$):

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,64 + \sqrt{0,64^2 - 0,42^2}} = 0,89$$

mit

$$\Phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,49(0,42 - 0,2) + 0,42^2 \right] = 0,64$$

Normalkrafttragfähigkeit:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1} = 0,89 \cdot 1,0 \cdot 149 \cdot 23,5 / 1,1 = 2833 \text{ kN}$$

Nachweis:

$$N_{sd} = 1,35 \cdot 1200 + 1,50 \cdot 600 = 2520 \text{ kN} < N_{b,Rd} = 2833 \text{ kN}$$

Der Tragfähigkeitsnachweis bei Raumtemperatur ist erfüllt.

2.3 Tragfähigkeitsnachweise im Brandfall

2.3.1 Einwirkungen im Brandfall

Hinsichtlich der mechanischen Einwirkungen im Brandfall siehe Kapitel 1.3.1. Dabei ist für den Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen in der außergewöhnlichen Situation $\gamma_{GA} = 1,0$ zu setzen. Der Kombinations-

EC1-2-2



EC3-1-2 [4]

beiwert $\psi_{1,1}$ für die führende veränderliche Last ergibt sich für Geschäfts- und Warenhäuser zu 0,8.

Normalkraft im Brandfall:

$$N_{fi,d} = 1,0 \cdot 1200 + 0,8 \cdot 600 = 1680 \text{ kN}$$

Die Brandbeanspruchung ergibt sich aus den Anforderungen der Feuerwiderstandsklasse R 30 bzw. R 90 zu 30 bzw. 90 Minuten Branddauer nach der Einheitstemperatur-Zeitkurve.

2.3.2 Berechnung der Stahltemperaturen

Zur Berechnung der Erwärmung des bekleideten Stützenquerschnitts wird das Berechnungsverfahren nach EC3-1-2 angewendet. Das Berechnungsverfahren ist in Kapitel 1.3.1 bereits erläutert worden.

Berechnet werden die Erwärmungsverläufe für das bekleidete Stützenprofil HE-300-B. Sie sind in den Abbildungen 2-2 und 2-3 dargestellt. Dabei wird für den Wärmestrom infolge Strahlung ein resultierender Emissionswert $\epsilon_{res} = 0,5$ angesetzt. Die rechnerischen Bekleidungs-dicken d werden zunächst in Anlehnung an die bisherigen Regelungen angenommen. Die thermischen Materialkennwerte entsprechen dem NAD (s. Tabelle 1-2), wobei der Feuchtigkeitsgehalt konservativ zu Null angenommen wurde.

Abschn. 4.2.5.2 (1)

Tabelle 2-1: Gewählte Bekleidungs-dicken d [mm] in Abhängigkeit von der Art der Bekleidung und der angestrebten Feuerwiderstandsklasse

DIN 4102-4 Tab. 94 bzw. Tab. 95

	R 30	R 90
<u>GKF-Platte nach DIN 18180:</u> DIN 4102-4 / Tab. 95 $A_p/V = 81 \text{ m}^{-1}$	$\Rightarrow d = 12,5 \text{ mm}$	$\Rightarrow d = 3 \cdot 15 = 45 \text{ mm}$
<u>Putz IVa/IVb nach DIN 18850-2</u> DIN 4102-4 / Tab. 94 $A_p/V = 116 \text{ m}^{-1}$	$\Rightarrow d = 10 \text{ mm}$ $D_{ges} = 10 + 5 = 15 \text{ mm}$	$\Rightarrow d = 35 \text{ mm}$ $D_{ges} = 35 + 5 = 40 \text{ mm}$

Bei den Putzbekleidungen ergibt sich die tatsächliche Dicke D_{ges} aus der rechnerischen Dicke d zuzüglich eines konstruktiven Zuschlages (s. NAD) ; $\min D_{ges} \geq 15\text{mm}$.

Ergänzend wird in den Beispielrechnungen jeweils noch der Erwärmungsverlauf für eine Bekleidungs-dicke von $d = 20\text{mm}$ berechnet.



EC3-1-2 [4]

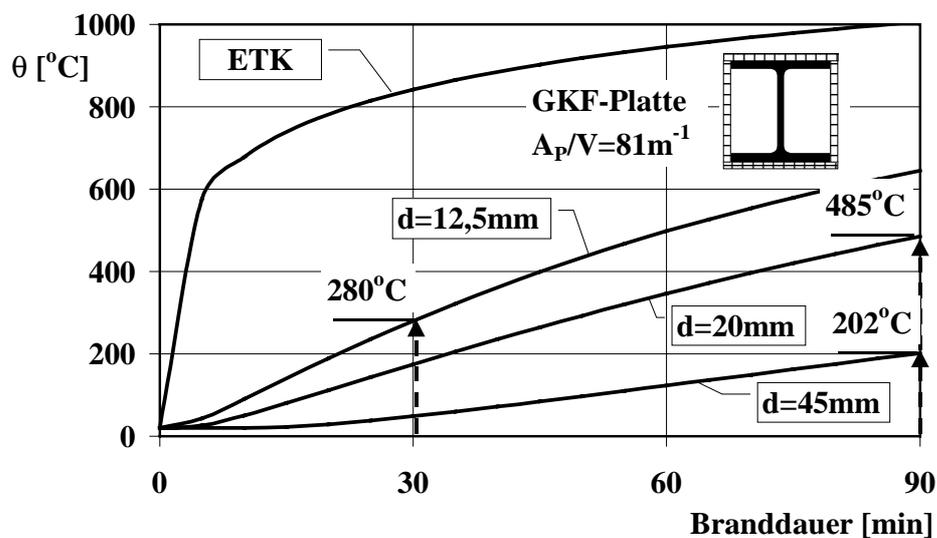


Abbildung 2-2: Erwärmungskurven für den Stützenquerschnitt mit GKF-Platten, Kurvenparameter: Dicke der Bekleidung

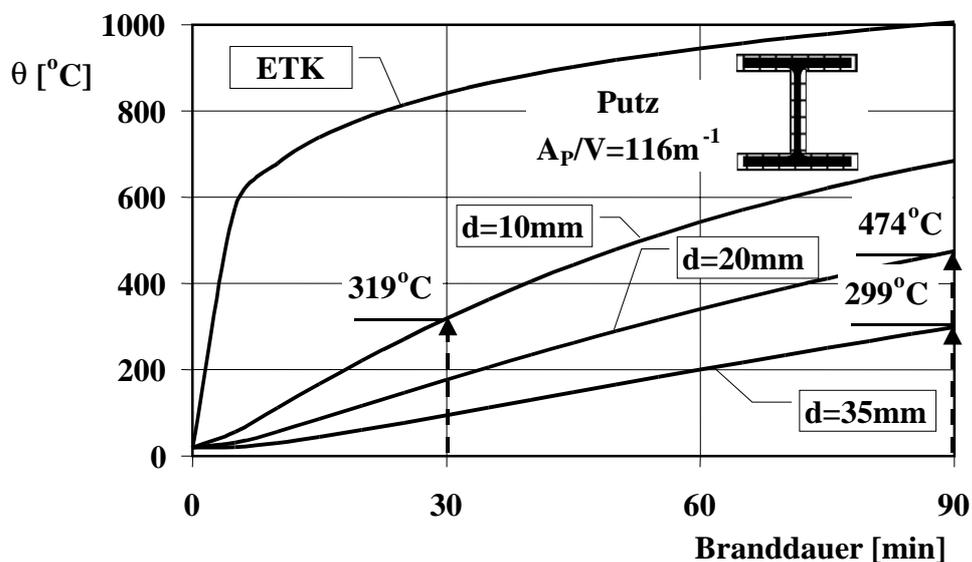


Abbildung 2-3: Erwärmungskurven für den Stützenquerschnitt mit Putz, Kurvenparameter: Dicke der Bekleidung

2.3.3 Nachweis auf Temperaturebene (θ_{cr} -Verfahren)

Beim Nachweis auf Temperaturebene ist nachzuweisen, dass die höchste im Brandfall auftretende Stahltemperatur $\theta_{a,max}$ unterhalb der kritischen Stahltemperatur θ_{cr} bleibt. Die kritische Stahltemperatur θ_{cr} ergibt sich in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad (siehe Kapitel 1.3.3).

Abschn. 4.2.4



EC3-1-2 [4]

über Einwirkungen und Widerstände:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$$

Abschn. 4.2.4 (4)

oder

über den Abminderungsfaktor η_{fi} :

$$\mu_0 = \eta_{fi} \cdot \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_M} = \eta_{fi} \cdot \frac{1,0}{1,1}$$

Abschn. 4.2.4 (5)

In diesem Beispiel ergibt sich der Ausnutzungsgrad aus den Normalkräften der Stütze

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} = \frac{N_{fi,d}}{N_{b,fi,Rd,0}}$$

Die im Brandfall wirkende Normalkraft $N_{fi,d} = 1680$ kN ist aus Kapitel 2.3.1 bekannt. Die Normalkrafttragfähigkeit im Brandfall zum Zeitpunkt $t=0$ ist zu ermitteln:

$$N_{b,fi,Rd} = \frac{\chi_{fi}}{1,2} \cdot A \cdot k_{y,\Theta,max} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

Abschn. 4.2.3.2 (1)

mit $k_{y,\Theta,max} = 1,0$ für $\Theta = 20^\circ\text{C}$ zum Zeitpunkt $t = 0$

wobei der Materialteilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,fi} = 1,0$ gesetzt wird.

Die Knicklänge ergibt sich im Brandfall zu (vgl. Abbildung 2-1):

Abschn. 4.2.3.2 (4)

$$L_{fi} = 0,5 \cdot L = 0,5 \cdot 300 = 150 \text{ cm}$$

Bezogener Schlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda}_{fi,0} = \frac{L_{fi}}{(i_z \cdot \lambda_1)} = \frac{150}{7,58 \cdot 93,9} = 0,21$$

Unabhängig vom Querschnittstyp und der Knickrichtung wird im Brandfall stets die Knickspannungslinie c maßgebend. Abminderungsbeiwert χ für das Biegeknicken nach der Knickspannungskurve c (schwache Achse, $\alpha = 0,49$):

Abschn. 4.2.3.2 (2)

$$\begin{aligned} \chi_{fi} &= \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \\ &= \frac{1}{0,52 + \sqrt{0,52^2 - 0,21^2}} = 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{mit } \Phi &= 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \\ &= 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,21 - 0,2) + 0,21^2] = 0,52 \end{aligned}$$



EC3-1-2 [4]

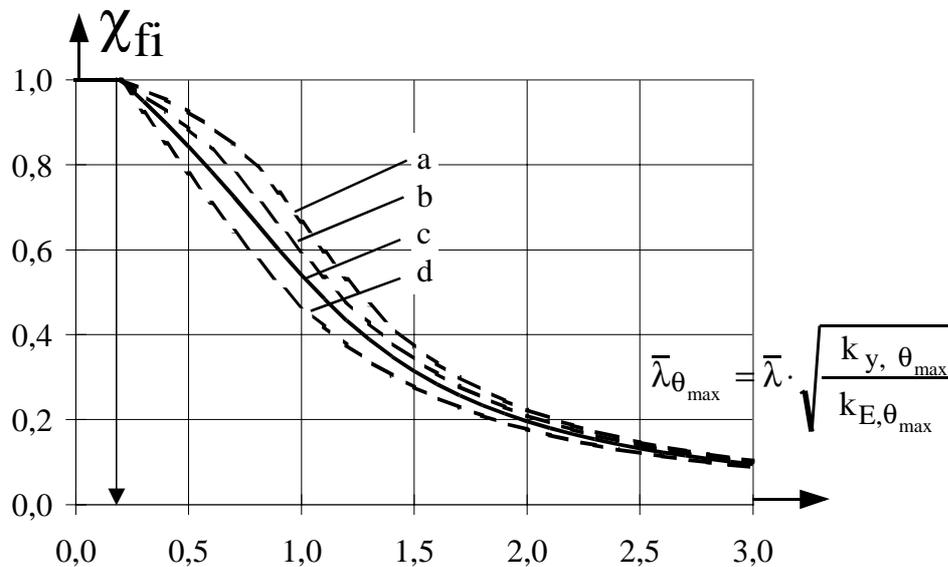


Abbildung 2-4: Knickspannungskurve im Brandfall (Kurve c)

$$\text{Normalkrafttragfähigkeit: } N_{b,fi,Rd,0} = \frac{1,0}{1,2} \cdot 149 \cdot \frac{23,5}{1,0} = 2918 \text{ kN}$$

$$\text{Ausnutzungsgrad: } \mu_0 = \frac{N_{fi,d}}{N_{b,fi,Rd,0}} = \frac{1680}{2918} = 0,58$$

Abschn. 4.2.4 (4)

Die kritische Temperatur $\theta_{a,cr}$ ergibt sich zu:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot 0,58^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 560 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Abschn. 4.2.4 (2)

Die maximal auftretende Bauteiltemperatur muss unterhalb der kritischen Temperatur von 560°C bleiben, um die geforderte Feuerwiderstandsklasse zu gewährleisten. Aus den Erwärmungsberechnungen in Kapitel 2.3.1 (s. Abbildungen 2-2 und 2-3) ergibt sich als höchste Stahltemperatur für die in Tab. 3-6 gewählten Parameter: $\theta_{a,max} = 319^\circ\text{C}$ (R 30, Putzbekleidung $d=10\text{mm}$).

Der Brandschutznachweis ist mit

$$\theta_{a,max} = 319^\circ\text{C} < \theta_{a,cr} = 560^\circ\text{C} \quad \checkmark$$

sowohl für die GKF-Plattenbekleidung als auch für die Putzbekleidung mit den jeweiligen Bekleidungsstärken in den Feuerwiderstandsklassen R 30 und R 90 erfüllt.

Hinweis: Für Stützen der Querschnittsklasse 4 ist der Brandschutznachweis auf Temperaturebene erfüllt, wenn bis zum Erreichen der angestrebten

Abschn. 4.2.4 (6)



EC3-1-2 [4]

Feuerwiderstandsdauer an keinem Punkt des Querschnitts die Stahltemperatur θ_a größer als 350°C ist.

2.3.4 Nachweis auf Tragfähigkeitsebene

Beim Nachweis auf Tragfähigkeitsebene wird im Brandfall der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit geführt: Abschn. 2.4.2 (2)

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t}$$

Im vorliegenden Beispiel ist der Nachweis für die Normalkräfte in der Stütze zu führen:

$$N_{fi,d} \leq N_{b,fi,Rd,t}$$

Die im Brandfall wirkende Normalkraft $N_{fi,d} = 1680 \text{ kN}$ ist aus Kapitel 2.3.1 bekannt. Die Normalkrafttragfähigkeit im Brandfall zum Zeitpunkt t ist in Abhängigkeit von den dann herrschenden Stahltemperaturen zu ermitteln. Für die Bemessung wird die maximale Stahltemperatur maßgebend. Die maximale auftretende Bauteiltemperatur für die bekleidete Stütze ist $\theta_{a,max} = 319^\circ\text{C}$; s. dazu die Erwärmungsverläufe in Abbildung 2-2 und 2-3 für die Bekleidungsstärken nach Tabelle 1-2.

Die Normalkrafttragfähigkeit unter erhöhter Temperatur ergibt sich aus: Abschn. 4.2.3.2 (1)

$$N_{b,fi,Rd,\theta_{a,max}} = \frac{\chi_{fi,\theta}}{1,2} \cdot A \cdot \frac{f_{y,\theta}}{\gamma_{M,fi}}$$

In Abhängigkeit von $\theta_{a,max}$ werden die Abminderungsfaktoren (s. Abbildung 1-5) $k_{y,\theta}$ und $k_{E,\theta}$ (linear interpoliert) abgelesen: Tab. 3.1

$$k_{y,319^\circ\text{C}} = 1,0 \quad k_{E,319^\circ\text{C}} = 0,78$$

Damit ergeben sich für $\theta_{a,max} = 319^\circ\text{C}$ folgende Werkstoffkennwerte:

$$f_{y,319^\circ\text{C}} = k_{y,319^\circ\text{C}} \cdot f_y = 1,0 \cdot 23,5 = 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$E_{a,319^\circ\text{C}} = k_{E,319^\circ\text{C}} \cdot E = 0,781 \cdot 21000 = 16401 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Die Normalkrafttragfähigkeit (Knicken um die schwache Achse) wird unter Berücksichtigung des bezogenen Schlankheitsgrades ermittelt:

Knicklänge: $l_{fi} = 150 \text{ cm}$

Schlankheit: $\bar{\lambda}_{fi,0} = 0,21$

$$\bar{\lambda}_{fi,\theta} = \bar{\lambda}_{fi,0} \cdot \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,21 \cdot \sqrt{\frac{1,0}{0,78}} = 0,24$$

Abschn. 4.2.3.2 (2)



EC3-1-2 [4]

Abminderungsfaktor $\chi_{fi,\theta}$ nach Knickspannungskurve c :

$$\chi_{fi,\theta} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,54 + \sqrt{0,54^2 - 0,24^2}} = 0,98$$

$$\text{mit } \Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$= 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,24 - 0,2) + 0,24^2] = 0,54$$

Normalkrafttragfähigkeit:

$$N_{b,fi,Rd,\theta,a,max} = \frac{\chi_{fi,\theta}}{1,2} \cdot A \cdot \frac{f_{y,\theta}}{\gamma_{M,fi}} = \frac{0,98}{1,2} \cdot 149 \cdot \frac{23,5}{1,0} = 2860 \text{ kN}$$

Nachweis:

$$N_{fi,d} = 1680 \text{ kN} \leq 2860 \text{ kN} = N_{b,fi,Rd,\theta} \quad \checkmark$$

Der Nachweis der Tragfähigkeit im Brandfall ist erbracht.

Abschn. 4.2.3.2(2)

Abschn. 4.2.3.2(1)

3 Literatur

- [1] DIN V ENV 1993-1-1: Eurocode 3; Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau, 04/92
- [2] DIN 4102 Teil 4: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, 03/94
- [3] DIN V ENV 1991-2-2 Eurocode 1 - Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 2-2: Einwirkungen auf Tragwerke - Einwirkungen im Brandfall, Deutsche Fassung ENV 1991-2-2: 1995, Mai 1997
- [4] DIN V ENV 1993-1-2 Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall, Deutsche Fassung ENV 1993-1-2: 1995, Mai 1997
- [5] Schaumann, P.: Brandschutznachweise für ungeschützte Stahlkonstruktionen - Näherungsformeln für die Erwärmung nach ETK, BundesBauBlatt, Heft 7, S. 69 bis 71, 1999
- [6] Schaumann, P.: Brandschutzbemessung im Stahlbau – DIN V ENV 1993-1-2 - Eurocode 3 Teil 1-2, in: Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes – Erläuterungen und Anwendungen zu den Brandschutzteilen der Eurocodes 1 bis 6, Beuth Verlag, 2000
- [7] Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1991-2-2 Eurocode 1 - Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 2-2: Einwirkungen auf Tragwerke - Einwirkungen im Brandfall, November 1999
- [8] Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1993-1-1: Eurocode 3; Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau, November 1999
- [9] Fontana, M.: Das Euronomogramm – ein praktisches Hilfsmittel zur Berechnung des Feuerwiderstandes von Bauteilen aus Stahl nach Eurocode 3, Stahlbau 65, Heft 2, S. 57 bis 59, 1996