

64.4 Nachweis einer Verbundstütze mit Kammerbeton im Brandfall



Eine Gemeinschaftsorganisation von stahlerzeugenden Unternehmen und dem Deutschen Stahlbau-Verband DSTV

Verbundstützen mit Kammerbeton können nach dem vereinfachten Verfahren des Eurocodes 4 (DIN EN 1994-1-2) brandschutztechnisch nachgewiesen und so wirtschaftlich optimiert bemessen werden. Der Nachweis nach Anhang F kann geführt werden, wenn es sich um ein ausgesteiftes Tragwerk handelt und die Stütze durch eine zentrische Normalkraft belastet wird. Der Nachweis gilt für Biegung um die z-Achse. Die Festigkeits- und Verformungseigenschaften müssen den Anforderungen und Regeln entsprechen. Das Verfahren nach EC 4 gilt für Feuerwiderstandsdauern ≤ 120 min.

Im Brandfall ist in ausgesteiften Rahmentragwerken die Knicklänge der brandbeanspruchten Stütze $l_{\theta} = 0,5 L$, wenn jedes Stockwerk als ein Brandabschnitt mit ausreichender Feuerwiderstandsdauer betrachtet werden kann.

Einwirkungen

Der Brandfall kann als außergewöhnliche Einwirkung betrachtet werden. Die Teilsicherheitsbeiwerte für ständige Lasten γ_G und $\gamma_{Q,i}$ für veränderliche Lasten können zu 1 angenommen werden. Für die direkten Einwirkungen (Eigengewicht, Schnee, Wind etc.) werden die Kombinationsbeiwerte nach EC 1 Teil 1 bestimmt und die Einwirkungskombinationen festgelegt. Indirekte Einwirkungen durch z. B. thermische Zwängungen müssen bei der brandschutztechnischen Bemessung von Einzelbauteilen nicht berücksichtigt werden. Es gilt daher die Vereinfachung im üblichen Hochbau: $E_{fi,d,t} = \eta_{fi} \cdot E_d$ mit $\eta_{fi} = 0,7$.

Beispiel für Einwirkungskombinationen aus Eigengewicht G , Verkehrslast p , Schnee s und Wind w

K1: Verkehrslast führend

$$S_1 = G + 0,9 \cdot p + 0 \cdot s + 0 \cdot w$$

K2: Wind führend

$$S_2 = G + 0,8 \cdot p + 0 \cdot s + 0,5 \cdot w$$

K3: Schnee führend

$$S_3 = G + 0,8 \cdot p + 0,2 \cdot s + 0 \cdot w$$

Beispiel

Bild 1: Querschnitt Verbundstütze HEB 340 mit Kammerbeton

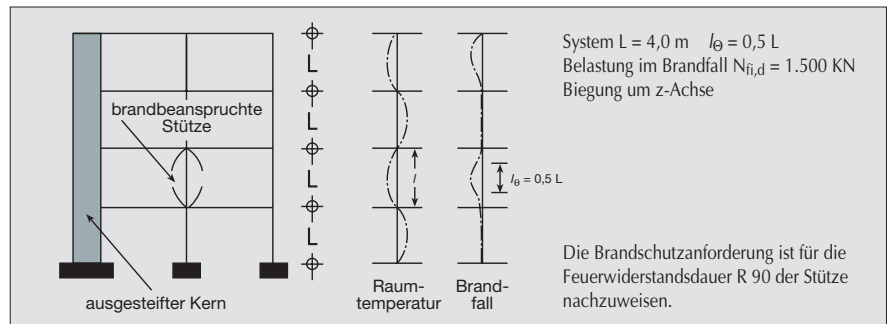
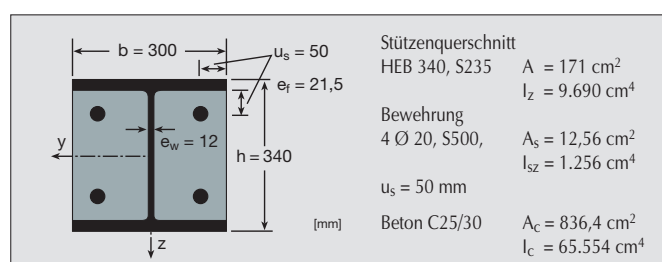


Bild 2: System ausgesteifte Rahmenkonstruktion

Feuerwiderstand	Querschnittsabmessungen		Knicklänge
R 30	$b \geq 230 \text{ mm}$ und $h \geq 230 \text{ mm}$	max. $b = 500 \text{ mm}$	$l_{\theta} \leq 13,5 b$
R 60	$230 \text{ mm} \leq b < 300 \text{ mm}$ oder $h/b > 3$		$l_{\theta} \leq 10 b$
	$b \geq 300 \text{ mm}$ und $h/b \leq 3$	max. $h = 1.100 \text{ mm}$	$l_{\theta} \leq 13,5 b$
R 90 und R 120	$b \geq 300 \text{ mm}$ und $h \geq 300 \text{ mm}$		
	für $h/b > 3$ für $h/b \leq 3$		$l_{\theta} \leq 10 b$ $l_{\theta} \leq 3,5 b$

Tabelle 1: Grenzwerte für Querschnittsabmessungen müssen eingehalten werden.

Überprüfung der Anwendungsgrenzen für die Verbundstütze

Knicklänge	$l_{\theta} \leq 13,5 b = 13,5 \cdot 0,3 = 4,05 > l = 0,5 \cdot 4,0 = 2,0$	erfüllt
Querschnittsabmessungen	$300 \text{ mm} \leq h = 340 \text{ mm} \leq 1.100 \text{ mm}$	erfüllt
R 90	$300 \text{ mm} \leq b = 300 \text{ mm} \leq 500 \text{ mm}$	
Bewehrungsgrad	$1 \% \leq \mu_s = 1,5 \% \leq 6 \%$	erfüllt

Der vereinfachte Nachweis der Grenznormalkraft $N_{fi,RD,z,90}$ wird an einem reduzierten Querschnitt geführt. Die Tragfähigkeit des Bauteils muss für die geforderte Feuerwiderstandsdauer gewährleistet sein. Die Stütze wird in die vier Teilquerschnitte Flansche, Steg, Kammerbeton und Bewehrung eingeteilt. Die plastische Grenznormalkraft und die Biegesteifigkeit werden einzeln für die Teilquerschnitte berechnet. Der Bemessungswert im

Brandfall ergibt sich aus der Addition der Tragfähigkeiten der Teilquerschnittswerte. Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_M werden für alle Werkstoffe mit 1,0 eingesetzt. Die Reduktionsfaktoren sind abhängig von der geforderten Feuerwiderstandsklasse.

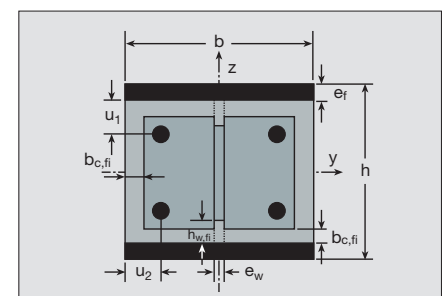


Bild 3: Reduzierter Querschnitt

Werkstoffeigenschaften

Stahl	$f_{ay, 20^\circ} = 235 \text{ N/mm}^2$ $E_{a,f, 20^\circ\text{C}} = 21.000 \text{ KNcm}^2$
Betonstahl	$f_{ry, 20^\circ} = 500 \text{ N/mm}^2$ $E_s = 21.000 \text{ KNcm}^2$
Beton	$f_c, 20^\circ = 25 \text{ N/mm}^2$ $E_{cd} = 3050/1,35 = 2.260 \text{ KNcm}^2$

Flansche des Stahlquerschnitts

Die durchschnittliche Flanschttemperatur berechnet sich zu $\Theta_{f,t} = \Theta_{o,t} + k_t (A_m/V)$

$$A_m/V = 2(h+b)/hb = 2(0,34+0,3)/0,3 \cdot 0,34 = 12,55 \text{ m}^{-1}$$

$$\Theta_{c,t} = 805 + 6,15 \cdot 12,55 = 882 \text{ }^\circ\text{C}$$

	$\Theta_{o,t} [^\circ\text{C}]$	$k_t [\text{m } ^\circ\text{C}]$
R 30	550	9,65
R 60	680	9,55
R 90	805	6,15

Tabelle 2

Im EC4 sind die Reduktionsfaktoren k_θ für die Spannungsdehnungsbeziehungen von Baustahl in Abhängigkeit der Stahltemperatur $\Theta_{c,t}$ angegeben (EC 4-1-2 Tab. 3.2):

Für $\Theta_{c,t} = 882 \text{ }^\circ\text{C}$ werden die Faktoren interpoliert: $k_{\max, \theta} = 0,069$; $k_{E,\theta} = 0,072$
Für den Teilquerschnitt Flansch wird der Bemessungswert der plastischen Grenznormalkraft und die Biegesteifigkeit berechnet

$$N_{fi,pl,Rd,90} = 2(b \cdot e_f \cdot f_{amax}) / \gamma_{M,fi,a} = 2(30 \cdot 2,15 \cdot 1,62) / 1,0 = 209 \text{ N/mm}^2$$

mit $f_{amax,\theta} = k_{\max, \theta} \cdot f_{ay, 20^\circ} = 0,069 \cdot 23,5 = 1,62 \text{ N/mm}^2$

$$(EI)_{fi,f,z} = E_{a,f,t} (e_f b^3/6) \text{ mit } E_{a,f,t} = k_{E,\theta} E_{a,f,20^\circ\text{C}}$$

$$(EI)_{fi,f,z} = 21.000 \cdot 0,072 (2,15 \cdot 30^3/6) = 1,46 \cdot 10^7 \text{ KNcm}^2$$

Steg

Der Bemessungswert der plastischen Grenznormalkraft wird mit einer reduzierten Steghöhe und reduzierten Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Feuerwiderstandsklasse ermittelt.

Feuerwiderstandsklasse	$H_t [\text{mm}]$
R 30	350
R 60	770
R 90	1100

Tabelle 3

$$h_{w,fi} = 0,5(h-2e_f) (1 - \sqrt{1-0,16(H_t/h)})$$

$$h_{w,fi} = 0,5(34-2 \cdot 2,15) (1 - \sqrt{1-0,16(110/34)}) = 4,54 \text{ cm}$$

$$f_{amax,w,t} = f_{ay,w, 20^\circ\text{C}} \sqrt{1-0,16(H_t/h)}$$

$$f_{amax,w,t} = 23,5 \cdot \sqrt{1-0,16(110/34)} = 16,32 \text{ KN/cm}^2$$

$$N_{fi,pl,Rd,w} = e_w (h-2 e_f - 2 h_{w,fi}) f_{amax,w,t} / \gamma_{M,fi,a} = 1,2 (34 - 2 \cdot 2,15 - 2 \cdot 4,54) \cdot 16,32 / 1,0 = 404 \text{ KN}$$

$$(EI)_{fi,w,z} = E_{a,w,20^\circ\text{C}} (h - 2 e_f - 2 h_{w,fi}) e_w^3 / 12 = 21.000 \cdot 20,62 \cdot 1,2^3 / 12 = 0,00623 \cdot 10^7 \text{ KNcm}^2$$

Kammerbeton

Die Kammerbetonfläche wird um die Dicke $b_{c,fi}$ reduziert. Die Dicke ist in Abhängigkeit der Feuerwiderstandsklasse in Tabelle 4 angegeben.

$$b_{c,fi} = 0,5(12,55) + 22,5 = 28,8 \text{ mm}$$

Die Durchschnittstemperatur im Beton wird in Abhängigkeit des A_m/V -Faktors ermittelt.

Feuerwiderstandsklasse	
R 30	$b_{c,fi} = 4,0 \text{ mm}$
R 60	$b_{c,fi} = 15,0 \text{ mm}$
R 90	$b_{c,fi} = 0,5(A_m/V) + 22,5 [\text{mm}]$

Tabelle 4

$$\Theta = 393 \text{ }^\circ\text{C} \text{ für } A_m/V = 12,55 \text{ (EC4-1-2 Anhang F Tab F.4)}$$

plast. Grenznormalkraft

$$N_{fi,pl,Rd,c} = 0,86 [(h - 2e_f - 2b_{c,fi}) (b - e_w - 2b_{c,fi}) - A_s] f_{c,\theta} / \gamma_{M,fi,c}$$

$$f_{c,\theta} = f_{c,20^\circ\text{C}} \cdot k_{c,\theta} \text{ mit } k_{c,\theta} = 0,75 \text{ nach Tab 3.3 für } \Theta = 393 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$N_{fi,pl,Rd,c} = 0,86 [(34 - 2 \cdot 2,15 - 2 \cdot 2,88) (30 - 1,2 - 2 \cdot 2,88) - 12,56] \cdot 2,5 \cdot 0,75 / 1,0 = 869 \text{ KN}$$

Sekantenmodul Biegesteifigkeit

$$E_{c,sec,\theta} = f_{c,20^\circ\text{C}} \cdot k_{c,\theta} / \epsilon_{cu,\theta} = 2,5 \cdot 0,75 / 7,5 \cdot 10^{-3} = 250 \text{ KNcm}^2$$

mit $\epsilon_{cu,\theta} = 7,5 \cdot 10^{-3}$ für $\Theta = 393 \text{ }^\circ\text{C}$ (nach EC4-1-2 Tab. 3.3)

$$(EI)_{fi,c,z} = E_{c,sec,\theta} [(h - 2 e_f - 2 b_{c,fi}) [(b - 2 b_{c,fi})^3 - e_w^3] / 12 - I_{sz}]$$

$$= 250 [((34 - 2 \cdot 2,15 - 2 \cdot 2,88) [(30 - 2 \cdot 2,88)^3 - 1,2^3] / 12) - 1,256]$$

$$= 0,679 \cdot 10^7 \text{ KNcm}^2$$

mit Trägheitsmoment des Bewehrungsstahls $I_{sz} = 2 \cdot 2 \cdot 3,14 (30 \cdot 0,5 - 5,0)^2 = 1.256 \text{ cm}^4$

Bewehrungsstäbe

Streckgrenze und Elastizitätsmodul werden in Abhängigkeit der Feuerwiderstandsklasse und der Achsabstände der Bewehrung reduziert (Tab. 5).

$$N_{fi,pl,Rd,s} = A_s \cdot k_{y,t} \cdot f_{sy,20^\circ\text{C}} / \gamma_{M,fi,s} = 12,56 \cdot 0,572 \cdot 50 / 1,0 = 359 \text{ KN}$$

$$(EI)_{fi,s,z} = k_{E,t} \cdot E_{s,20^\circ\text{C}} \cdot I_{sz} = 0,406 \cdot 21.000 \cdot 1.256 = 1,07 \cdot 10^7 \text{ KNcm}^2$$

	u [mm]	45	50
R 30	$k_{y,t}$	1	1
	$k_{E,t}$	0,865	0,888
R 60	$k_{y,t}$	0,883	0,976
	$k_{E,t}$	0,647	0,689
R 90	$k_{y,t}$	0,434	0,572
	$k_{E,t}$	0,283	0,406

Tabelle 5

Bemessungswert der Grenznormalkraft

$$N_{fi,pl,Rd} = N_{fi,pl,Rd,f} + N_{fi,pl,Rd,w} + N_{fi,pl,Rd,c} + N_{fi,pl,Rd,s} = 209 + 404 + 869 + 359 = 1.841 \text{ KN}$$

Gesamtbiegesteifigkeit

$$(EI)_{fi,eff,z} = \varphi_{f,\theta} (EI)_{fi,f,z} + \varphi_{w,\theta} (EI)_{fi,w,z} + \varphi_{c,\theta} (EI)_{fi,c,z} + \varphi_{s,\theta} (EI)_{fi,s,z}$$

mit den Reduktionsfaktoren $\varphi_{i,\theta}$ zur Berücksichtigung thermischer Zwängungsspannungen

$$\varphi_{f,\theta} = \varphi_{c,\theta} = \varphi_{s,\theta} = 0,8 \quad \varphi_{w,\theta} = 1,0$$

$$(EI)_{fi,eff,z} = 0,8 \cdot 1,46 \cdot 10^7 + 1,0 \cdot 0,00623 \cdot 10^7 + 0,8 \cdot 0,679 \cdot 10^7 + 0,8 \cdot 1,07 \cdot 10^7 = 2,57 \cdot 10^7 \text{ KNcm}^2$$

Mit diesen Werten wird die Eulerknicklast für eine Knicklänge im Brandfall $l_\theta = 0,5 \cdot L = 2 \text{ m}$ errechnet:

$$N_{fi,cr,z} = \pi^2 (EI)_{fi,eff,z} / l_\theta^2 = \pi^2 \cdot 2,57 \cdot 10^7 / 200^2 = 6.350 \text{ KN}$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{N_{fi,pl,Rd} / N_{fi,cr,z}} = \sqrt{1.841 / 6.350} = 0,54$$

Aus der Knickspannungskurve c (ENV 1993-1-1) ergibt sich der Reduktionsfaktor $\chi_z = 0,82$

Die Tragfähigkeit im Brandfall ist für die Verbundstütze für die Feuerwiderstandsklasse R 90 ausreichend:

$$N_{fi,rd,z} = \chi_z \cdot N_{fi,pl,Rd} = 0,82 \cdot 1.841 = 1.509 \text{ KN} > N_{fi,d} = 1.500 \text{ KN}$$

Literatur

- DIN V ENV 1994-1-2 EC 4, 1997-06
- DIN V ENV 1991-2-2 – EC 1, 1997-05
- DIN V ENV 1994-1-1 – EC 4, 1997-06
- NAD-Richtlinie zur DIN V ENV 1994-1-1; 1997-06
- Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocode; DIN, Hosser; 1. Auflage 2000



Sohnstraße 65 · 40237 Düsseldorf
Postfach 10 48 42 · 40039 Düsseldorf
Telefon (02 11) 67 07-828
Telefax (02 11) 67 07-829
www.bauen-mit-stahl.de
zentrale@bauen-mit-stahl.de