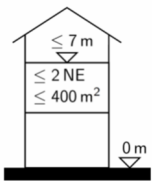
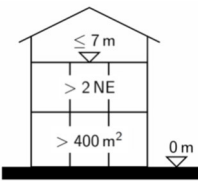
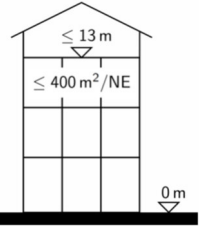
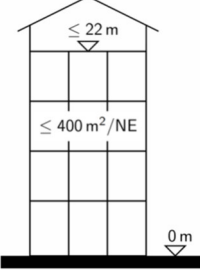


HEISSBEMESSUNG VON STAHLBETONBAUTEILEN

1. Bauordnungsrechtliche Anforderungen

Die aktuellen Bauordnungen der einzelnen Bundesländer gehen auf die Fassungen der Musterbauordnung (MBO) zurück. Für die definierten Gebäudeklassen und Bauteile gibt es anwendungsbezogene Anforderungen bezüglich der Feuerwiderstandsdauer (vgl. *Tabelle 1*).

Tabelle 1 Auszug Bauteilanforderungen abhängig von der Gebäudeklasse (nach MBO) nach [1].

Bauteile	GK1	GK2	GK3	GK4	GK5
					
Tragende und aussteifende Wände und Stützen in oberirdischen Geschossen	--	feuerhemmend		hochfeuerhemmend	feuerbeständig
Tragende und aussteifende Wände und Stützen in Kellergeschossen	feuerhemmend		feuerbeständig		
Brandwände	feuerbeständig und nichtbrennbar				
Wände notwendiger Treppenträume als raumabschließende Bauteile	--	--	feuerhemmend	hochfeuerhemmend	Brandwand
Wände notwendiger Flure als raumabschließende Bauteile	--	--	feuerhemmend (Kellergeschosse: feuerbeständig)		
Fahrschachtwände (Aufzüge) als raumabschließende Bauteile	--	--	feuerhemmend	hochfeuerhemmend	feuerbeständig und nicht-brennbar
Decken als tragende und raumabschließende Bauteile zwischen Geschossen	--	feuerhemmend		hochfeuerhemmend	feuerbeständig
Decken als tragende und raumabschließende Bauteile über Kellergeschossen	feuerhemmend		feuerbeständig		
Decken unter und über Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr	--	--	feuerbeständig		
Decken zwischen dem landwirtschaftlich genutzten Teil und dem Wohnteil eines Gebäudes	feuerbeständig				

Baustoffe werden nach den Anforderungen an ihr Brandverhalten in nichtbrennbare, schwerentflammbare und normalentflammbare unterschieden. Leichtentflammbare Baustoffe dürfen nicht verwendet werden. Stahlbeton- und Spannbetonbauteile bestehen aus nichtbrennbaren Baustoffen der Baustoffklasse A.

Die Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen bezieht sich bei tragenden und aussteifenden Bauteilen auf deren Standsicherheit im Brandfall (**R**), bei raumabschließenden Bauteilen auf deren Widerstand gegen die Brandausbreitung (**EI**). *Tabelle 2* verdeutlicht die Zuordnung der bauaufsichtlichen Anforderungen.

Tabelle 2 Zuordnung bauaufsichtliche Anforderungen und Feuerwiderstandsklassen nach [1].

Bauaufsichtliche Anforderung	Tragende Bauteile		Nichttragende Wände
	ohne Raumabschluss	mit Raumabschluss	
feuerhemmend	R 30/F 30	REI 30/F 30	EI 30/F 30
hochfeuerhemmend	R 60/F 60	REI 60/F 60	EI 60/F 60
feuerbeständig	R 90/F 90	REI 90/F 90	EI 90/F 90
Brandwand	-	REI-M 90	EI-M 90

2. Einwirkungen im Brandfall

Die Beanspruchungen der Bauteile im Brandfall dürfen nach DIN EN 1991-1-2 [2] für den Brandzeitpunkt $t = 0$ unter Berücksichtigung der Kombinationsfaktoren $\psi_{fi} = \psi_{1,1}$ (häufig) oder $\psi_{fi} = \psi_{2,1}$ (quasi-ständig) nach DIN EN 1990 [3] ermittelt werden. Die Verwendung von $\psi_{fi} = \psi_{2,1}$ (quasi-ständig) wird in DIN EN 1991-1-2/NA [4] empfohlen. Bei Leiteinwirkung Wind sollte $\psi_{fi} = \psi_{1,1}$ (häufig) verwendet werden.

Vereinfacht dürfen die Beanspruchungen im Brandfall aus der Kaltbemessung mit einem Reduktionsfaktor η_{fi} abgeleitet werden:

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

Dabei ist E_d der Bemessungswert der zugehörigen Schnittgrößen aus der Kaltbemessung. Der Reduktionsfaktor η_{fi} ergibt sich aus der Beziehung:

$$\eta_{fi} = \frac{E_{d,fi}}{E_d} = \frac{G_k + \psi_{fi} \cdot Q_{k,1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_{k,1}}$$

Vereinfacht kann in der Regel $\eta_{fi} = 0,7$ angenommen werden.

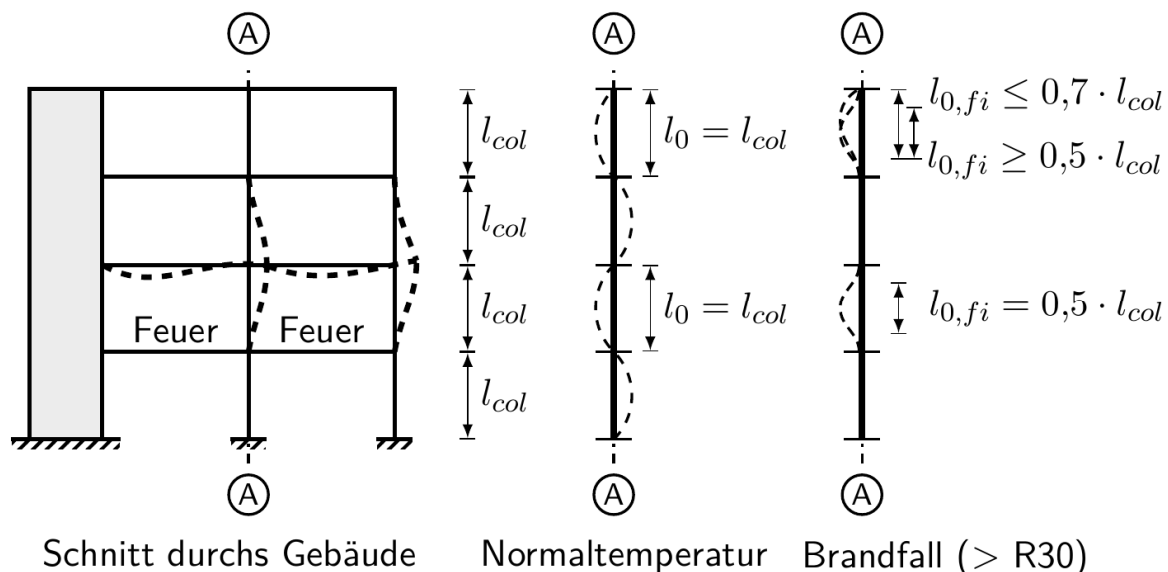


Bild 1 Tragverhalten von Innenstützen in ausgesteiften Gebäuden nach [1].

3. Betondeckung, Achsabstand

Die nach DIN EN 1992-1-1 [5] ermittelte Betondeckung c_{nom} bei Bestandsbauteilen beinhaltet als planarisches Nennmaß das Vorhaltemaß $\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$.

Bei mehrlagiger Bewehrung mit n -Stäben darf ein gewichteter mittlerer Achsabstand a_m mit dem tabellierten Achsabstand a verglichen werden. Der mittlere Achsabstand ist nach DIN EN 1992-1-2, Gl. (5.5) zu bestimmen:

$$a_m = \frac{\sum A_{si} \cdot a_i}{\sum A_{si}}$$

Dabei ist

A_{si} = die Querschnittsfläche des Bewehrungsstabs i

a_i = der Achsabstand des Bewehrungsstabes i zur nächsten brandbeanpruchten Bauteiloberfläche

Der Mindestabstand jedes einzelnen Stabes a_i darf dabei nicht kleiner sein als der tabellierte Wert für R 30 bei einlagiger Bewehrung oder als der halbe mittlere Achsabstand bei mehrlagiger Bewehrung $a_i \geq 0,5 \cdot a_m$.

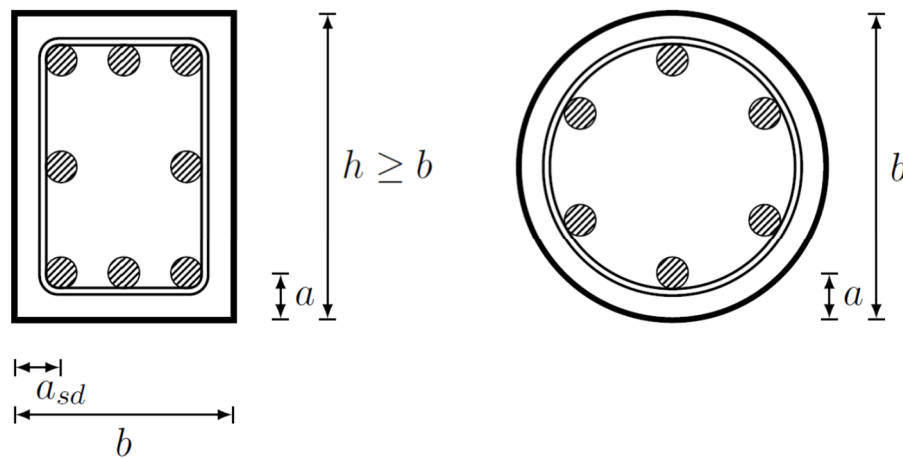


Bild 2 Definition Achsabstand nach [6].

4. Bemessung im Brandfall

4.1 Nachweis mit Methode A / Tabelle 5.2a

Die für die „kalte“ Bemessung gültigen Bewehrungs- und Konstruktionsregeln nach DIN EN 1992-1-1 müssen eingehalten werden.

Tabelle 3 Randbedingungen für die Bemessung nach Methode A / Tabelle 5.2a nach [6].

	Anwendungsbereich
Gebäudeart	ausgesteift
Ausnutzungsgrad	$0,2 \leq \mu_{fi} = N_{Ed,fi}/N_{Rd} \leq 0,7$
Abmessung b'	$200 \text{ mm} \leq b' \leq 450 \text{ mm}$, b' gem. Kapitel 4.2
Achsabstand a	$25 \text{ mm} \leq a \leq 75 \text{ mm}$
Lastausmitte	$e_1 \leq e_{max} \leq 0,15 \cdot h$
Ersatzlänge im Brandfall	$l_{0fi} \leq 3 \text{ m}$
Bewehrungsgrad	$\rho < 0,04$

Sind die Voraussetzungen nach *Tabelle 3* erfüllt, kann das Bauteil über Tabellen in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad und der Geometrie in Feuerwiderstandsklassen eingeteilt werden. Die folgende Tabelle ist für Stützen mit Rechteck- oder Kreisquerschnitten gültig. Die lineare Interpolation zwischen den Werten ist zulässig.

Tabelle 4 Mindestquerschnittsabmessungen und Achsabstände von nicht vorgespannten Stützen mit Rechteck- oder Kreisquerschnitt nach Tabelle 5.2a in [6].

Feuerwiderstands-kategorie	Mindestmaße (mm) Stützenbreite b_{\min} / Achsabstand a			
	brandbeansprucht auf mehr als einer Seite			brandbeansprucht auf einer Seite
	$\mu_{fi} = 0,2$	$\mu_{fi} = 0,5$	$\mu_{fi} = 0,7$	$\mu_{fi} = 0,7$
R 30	200/25	200/25	200/32 300/27	155/25
R 60	200/25	200/36 300/31	250/46 350/40	155/25
R 90	200/31 300/25	300/45 400/38	350/53 450/40*	155/25
R 120	250/40 350/35	350/45* 450/40*	350/57* 450/51*	175/35
R 180	350/45*	350/63*	450/70*	230/55
R 240	350/61*	450/75*	-	295/70

* Mindestens 8 Stäbe

4.2 Nachweis mit Methode A / Gleichung 5.7

Für die Berechnung der Feuerwiderstandsdauer R einer Stütze kann alternativ die nachfolgende Gleichung nach DIN EN 1992-1-2 [6] verwendet werden. Die Gleichung stammt aus empirischen Untersuchungen und berücksichtigt den Ausnutzungsgrad, den Achsabstand der Bewehrung, die Stützenlänge, die Querschnittsbreite und die Bewehrungsanordnung.

$$R = 120 \cdot [(R_{\eta_{fi}} + R_a + R_l + R_b + R_n) / 120]^{1,8}$$

mit

$$R_{\eta_{fi}} = 83 \cdot [1,0 - \mu_{fi} \cdot (1 + \omega) / (0,85 / \alpha_{cc} + \omega)]$$

$$\omega = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}}$$

$$\alpha_{cc} = 0,85$$

$$R_a = 1,60 \cdot (a - 30)$$

a Achsabstand der Längsbewehrung (mm);
25 mm $\leq a \leq$ 80 mm

$$R_l = 9,60 \cdot (5 - l_{0,fi})$$

$l_{0,fi}$ = die Ersatzlänge der Stütze im Brandfall;

2 m $\leq l_{0,fi} \leq$ 6 m; Werte von $l_{0,fi} = 2$ m geben sichere Ergebnisse für Stützen

mit $l_{0,fi} < 2$ m

$$R_b = 0,09 \cdot b'$$

$$b' = \frac{2 \cdot A_c}{b + h} \text{ für Rechteckquerschnitte}$$

$$= \phi_{col} \text{ für Kreisquerschnitte}$$

$$200 \text{ mm} \leq b' \leq 450 \text{ mm}; h \leq 1,5 \cdot b$$

$$R_n = 0 \text{ für } n = 4 \text{ (nur Eckstäbe vorhanden)}$$

$$= 12 \text{ für } n > 4$$

4.3 Nach Zonenmethode (für Stahlbetonbalken)

Die Zonenmethode eignet sich insbesondere für Bauteile, bei denen der vorhandene Achsabstand der Bewehrung oder die Querschnittsabmessung kleiner ist, als der entsprechende Mindestwert aus der Bemessungstabelle. Gleichzeitig wird dabei die Tragfähigkeit bei Normaltemperatur nicht voll ausgenutzt. Die Ermittlung der Einwirkung erfolgt wie in *Kapitel 2*.

Bei der Zonenmethode wird die Verringerung der Tragfähigkeit von Bauteilen unter Brandbeanspruchung näherungsweise durch eine temperaturabhängige Verkleinerung des Betonquerschnittes erfasst. Zusätzlich wird die temperaturabhängige Abminderung der Baustoffe berücksichtigt. Die Temperatur in den Längsbewehrungsstäben kann anhand der Isothermenverläufe (z.B. in *Bild 3*) in Abhängigkeit Bauteilgeometrie und der Branddauer unter Normbrand entnommen werden.

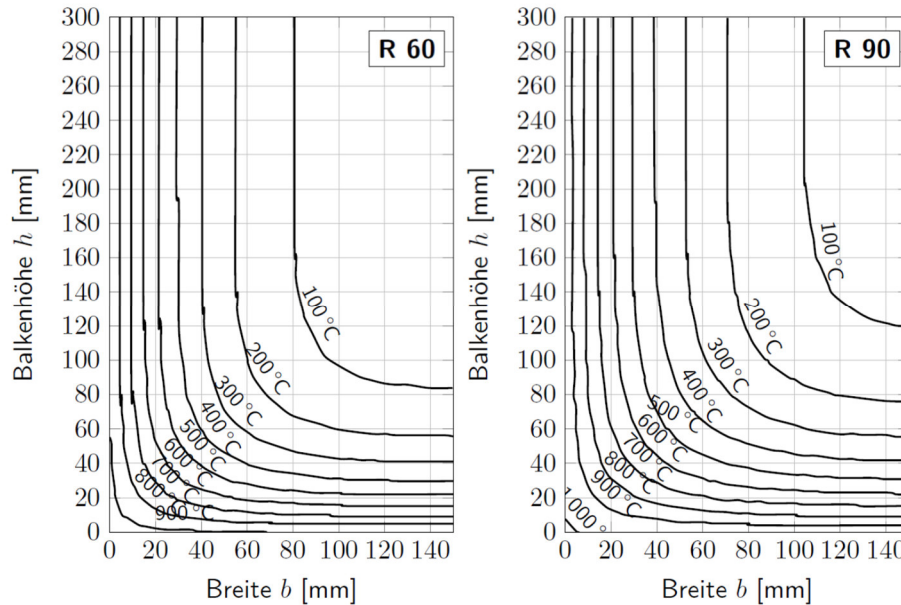
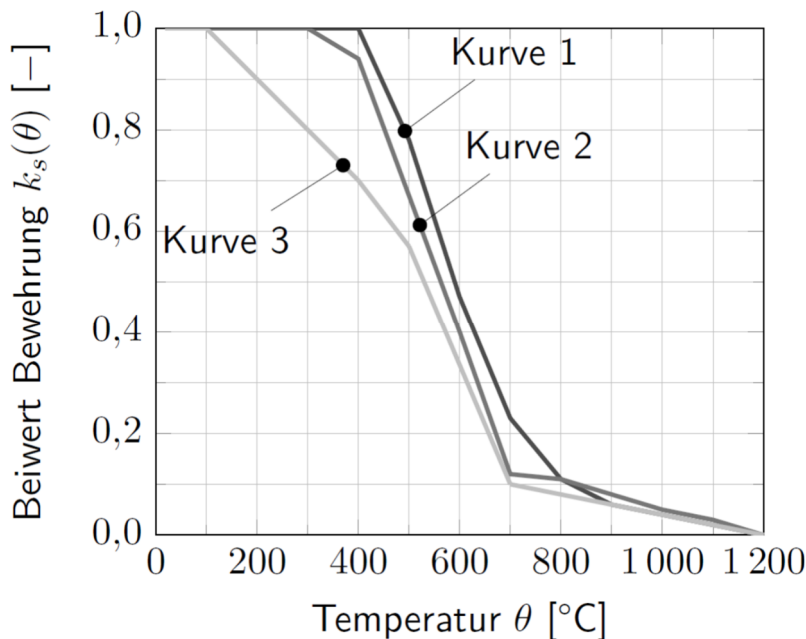


Bild 3 Isothermenverläufe für vierseitig brandbeanspruchte Balkenquerschnitte nach 60 min und 90 min Normbrandbeanspruchung nach Bild A.9 in [6].

Mit den ermittelten Temperaturen in den Bewehrungsstäben werden die Beiwerte $k_{s,i}(\theta)$ für die Abminderung der Festigkeit unter Temperaturbeanspruchung ermittelt. Dabei wird ein Dehnungszustand angenommen, welcher überprüft werden muss. In Abhängigkeit von der Stahlsorte gibt es verschiedene Diagramme.



- Kurve 1: Zugbewehrung (warmgewalzt) mit $\epsilon_{s,fi} \geq 2 \%$
- Kurve 2: Zugbewehrung (kaltverformt) mit $\epsilon_{s,fi} \geq 2 \%$
- Kurve 3: Druckbewehrung und Zugbewehrung mit $\epsilon_{s,fi} < 2 \%$

Bild 4 Beiwert $k_s(\theta)$ zur Berücksichtigung des Abfalls von f_{yk} von Zug- und Druckbewehrung (Klasse N) nach Bild 4.2a in [6].

Mit den Beiwerten $k_{s,i}(\theta)$ lassen sich die abgeminderten Baustoffkennwerte für die Bewehrung bestimmen nach:

$$f_{s,d,fi} = k_{s,i}(\theta) \cdot f_{yk} / \gamma_{s,fi} \text{ mit } \gamma_{s,fi} = 1,0$$

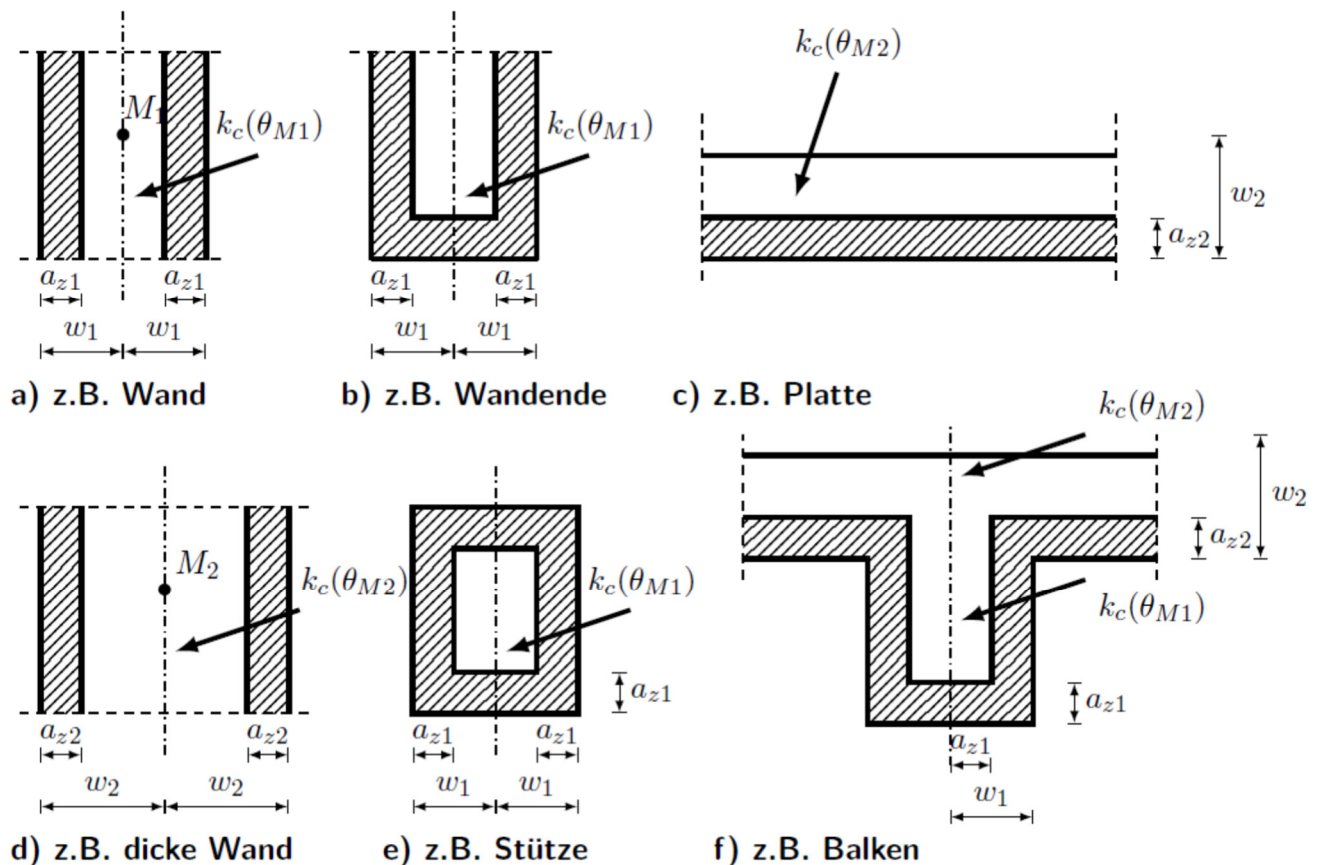


Bild 5 Reduktion der Festigkeit und des Querschnitts bei brandbeanspruchten Querschnitten nach Beflammungsrichtung nach Bild B.3 in [6].

Bild 5 definiert den Einflussbereich des Abminderungswertes $k_c(\theta_M)$. Dieser wird zum Beispiel nach Bild 6 ermittelt.

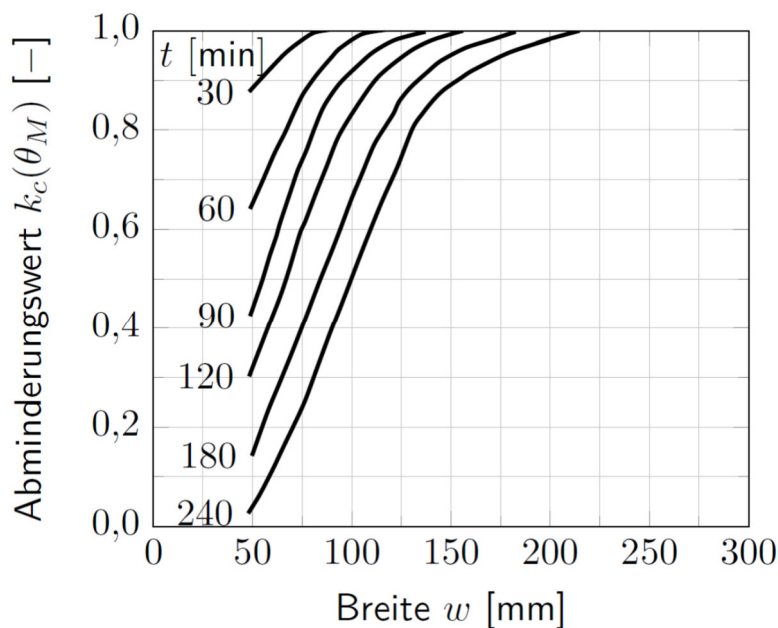


Bild 6 Reduktion der Druckfestigkeit für einen reduzierten Querschnitt mit quarzhaltigem Zuschlag nach Bild B.5 in [6].

w wird bestimmt als (siehe Bild 5):

- die Dicke der Platte,
- die Dicke einer einseitig beanspruchten Wand oder Stütze,
- die Hälfte der Dicke eines Steges eines Balkens
- die Hälfte der Dicke einer zweiseitig beanspruchten Wand oder Stütze oder
- die Hälfte der kleinsten Abmessung einer vierseitig beanspruchten Stütze

Die abgeminderte Betondruckfestigkeit ergibt sich aus:

$$f_{cd,fi} = k_c(\theta_M) \cdot f_{ck} / \gamma_{c,fi} \text{ mit } \gamma_{c,fi} = 1,0$$

Die maßgebliche Geometrie des tragfähigen Restquerschnittes lässt sich nach *Bild 7* bestimmen:

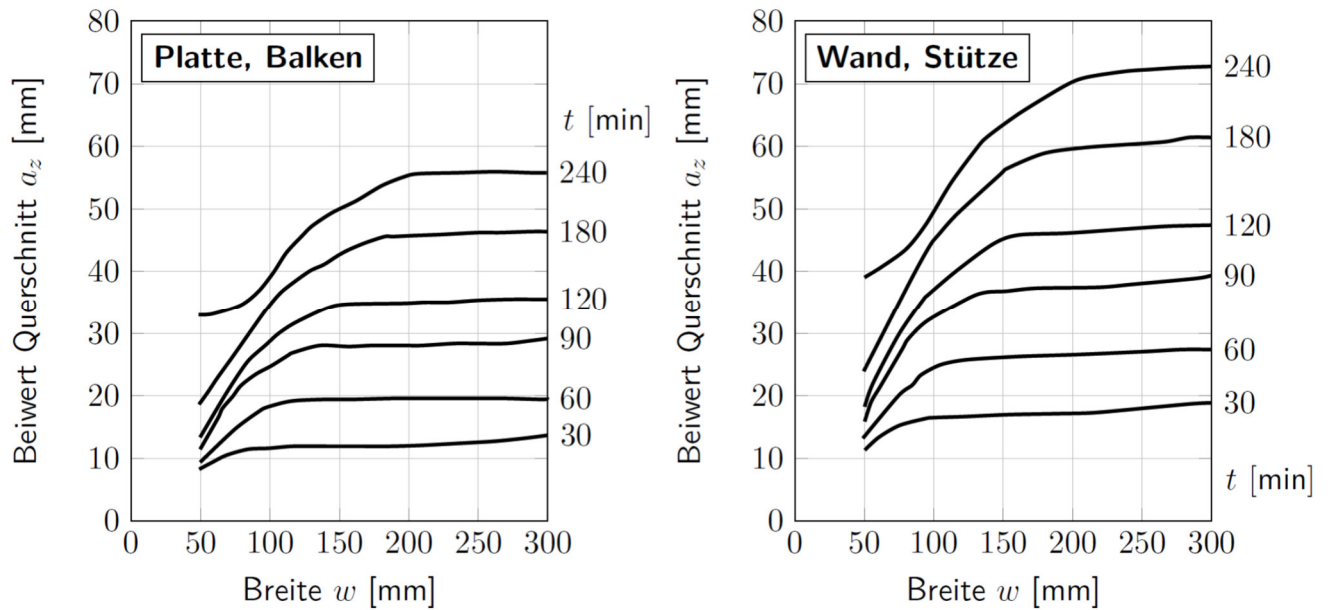


Bild 7 Reduktion des Querschnitts und der Festigkeit unter Annahme der Normbrandbeanspruchung in Abhängigkeit von der Branddauer nach Bauteil nach Bild B.5 in [6].

Für einen Rechteckquerschnitt ergeben sich die Dimensionen zu:

$$b_{fi} = b - 2 \cdot a_z$$

$$h_{fi} = h - 2 \cdot a_z$$

Anschließend kann die Betonstahlzugkraft, sowie die Betondruckkraft für den Brandfall ermittelt werden (siehe *Bild 8*). Das Bemessungswiderstandsmoment (für einen Stahlbetonbalken) ergibt sich aus:

$$M_{Rd,fi} = F_{cd,fi} \cdot z \geq M_{Ed,fi}$$

Dabei kann die Höhe der Betondruckzone aus folgender Beziehung (siehe *Bild 8*), berechnet werden:

$$F_{sd,fi} = F_{cd,fi} = b_{fi} \cdot \lambda \cdot x \cdot \eta \cdot f_{cd,fi}$$

$$x = \frac{F_{sd,fi}}{b_{fi} \cdot \lambda \cdot \eta \cdot f_{cd,fi}}$$

Für den Nachweis muss das Widerstandsmoment für den Brandfall größer sein als das über den Ausnutzungsgrad abgeminderte, einwirkende Moment aus der „kalten“ Bemessung.

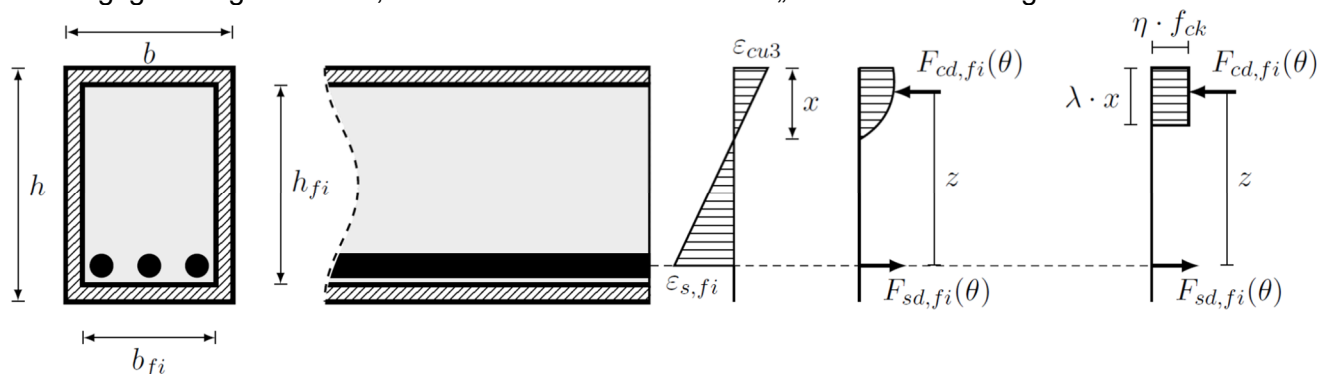


Bild 8 Spannungsverteilung im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei rechteckigem Betonquerschnitt und vierseitiger Brandbeanspruchung.

5 ÜBUNGEN

5.1 Nachweis der Feuerwiderstandsdauer einer Stahlbetonstütze

Ermitteln Sie für eine durchlaufende Geschossstütze in einem ausgesteiften Gebäude mit $b/h = 200 \text{ mm}/200 \text{ mm}$ und $l = 4,20 \text{ m}$ = Geschosshöhe die Feuerwiderstandsklasse. Vereinfachend kann angenommen werden, dass $A_{s,erf} \approx A_{s,gew}$ entspricht. Damit gilt auf der sicheren Seite $N_{Rd} \geq N_{Ed}$. Die Forderung an die Lastausmitte $e_1 \leq e_{max}$ ist erfüllt.

Aufgaben:

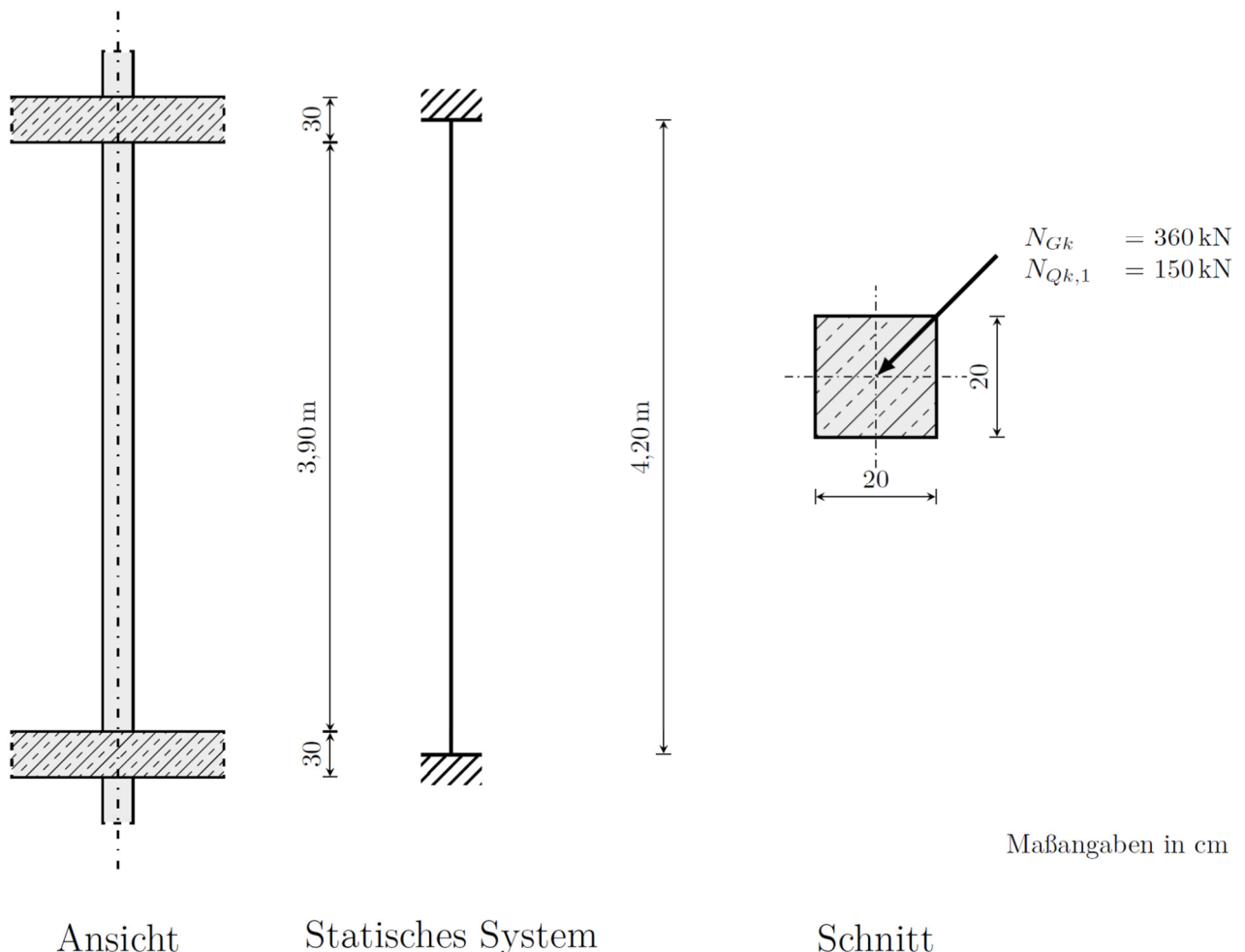
1. Feuerwiderstandsklasse nach Methode A/Tabelle 5.2a
 - a. Nach obiger Aufgabenstellung.
2. Feuerwiderstandsklasse nach Methode A/Gleichung 5.7
 - a. Nach obiger Aufgabenstellung.
 - b. Wie ändert sich im Vergleich zu 2.a die Feuerwiderstandsdauer, wenn sich die zu untersuchende Stütze im Dachgeschoss befindet?
 - c. Wie ändert sich im Vergleich zu 2.b die Feuerwiderstandsdauer der zu untersuchenden Stütze im Dachgeschoss bei einem erhöhten Bewehrungsgrad (8 statt 4 Eckstäbe, Annahme $\mu_{fi} = 0,55$)?

Baustoffe:

- Beton C20/25
- 4 \varnothing 20 mm Eckstäbe Betonstahl B 500
- $a_{vorh} = 43 \text{ mm}$

Einwirkungen (aus „kalter“ Bemessung):

- ständige Last (inklusive Stützeigengewicht): $N_{Gk} = 360 \text{ kN}$
- veränderliche Lasten (Kategorie D) $N_{Qk,1} = 150 \text{ kN}$



Maßangaben in cm

5.2 Feuerwiderstandsdauer eines Stahlbetonbalkens nach der Zonenmethode

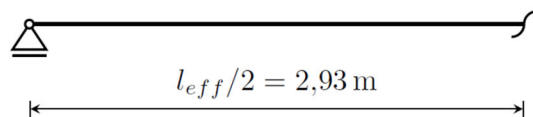
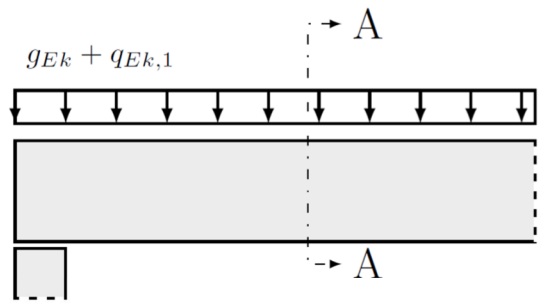
Weisen Sie für einen Stahlbetonbalken im **Bestand** mit $b \times h = 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ unter vierseitiger Brandbeanspruchung die bauordnungsrechtlichen Anforderungen an ein feuerbeständiges Bauteil nach. Nutzen Sie dabei die Zonenmethode und das nachfolgende Temperaturprofil (Bild 9).

Baustoffe:

- Beton C35/45
- Betonstahl B 500 (warmgewalzt, Klasse N)
- 2 $\varnothing 25 \text{ mm}$ + 2 $\varnothing 20 \text{ mm}$

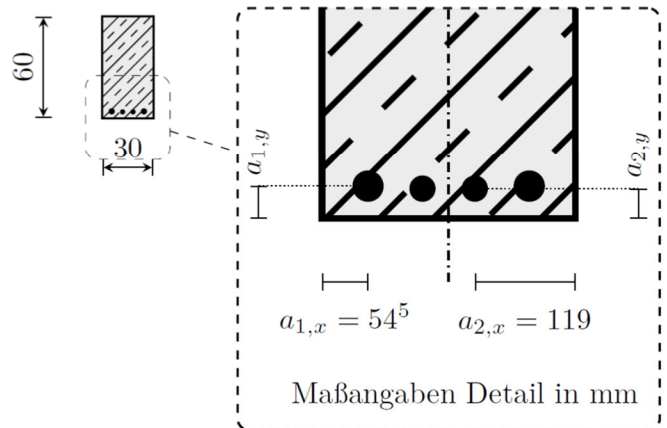
Einwirkungen (aus „kalter“ Lastannahme):

- ständige Last (inkl. Balkeneigengewicht): $g_{Ek} = 42,55 \text{ kN/m}$
- veränderliche Lasten (Kategorie B) $q_{Ek,1} = 12,53 \text{ kN/m}$



Maßangaben in cm

Schnitt A-A Detail



Hinweis:

Die Ergebnisse sind von der Ablesegenauigkeit abhängig. Bitte lesen Sie die Temperatur in Bild 9 mit einer Genauigkeit von 10 °C ab. Dies ist insbesondere für den Beiwert $k_s(\theta)$ (Bild 4) wichtig.

6 LITERATUR

- [1] Fingerloos, F.; Wörner, J. D.; Bergmeister, K.: 2013 Beton-Kalender. Lebensdauer und Instandsetzung, Brandschutz. Ernst & Sohn, Berlin, 2013.
- [2] DIN EN 1991-1-2:2002: Allgemeine Einwirkungen. Brandeinwirkungen auf Tragwerke.
- [3] DIN EN 1990:2002: Grundlagen der Tragwerksplanung.
- [4] DIN EN 1992-1-2/NA:2015 inkl. A2:2021-04: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall.
- [5] DIN EN 1992-1-1:2004: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
- [6] DIN EN 1992-1-2:2004 inkl. A1:2019 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall.

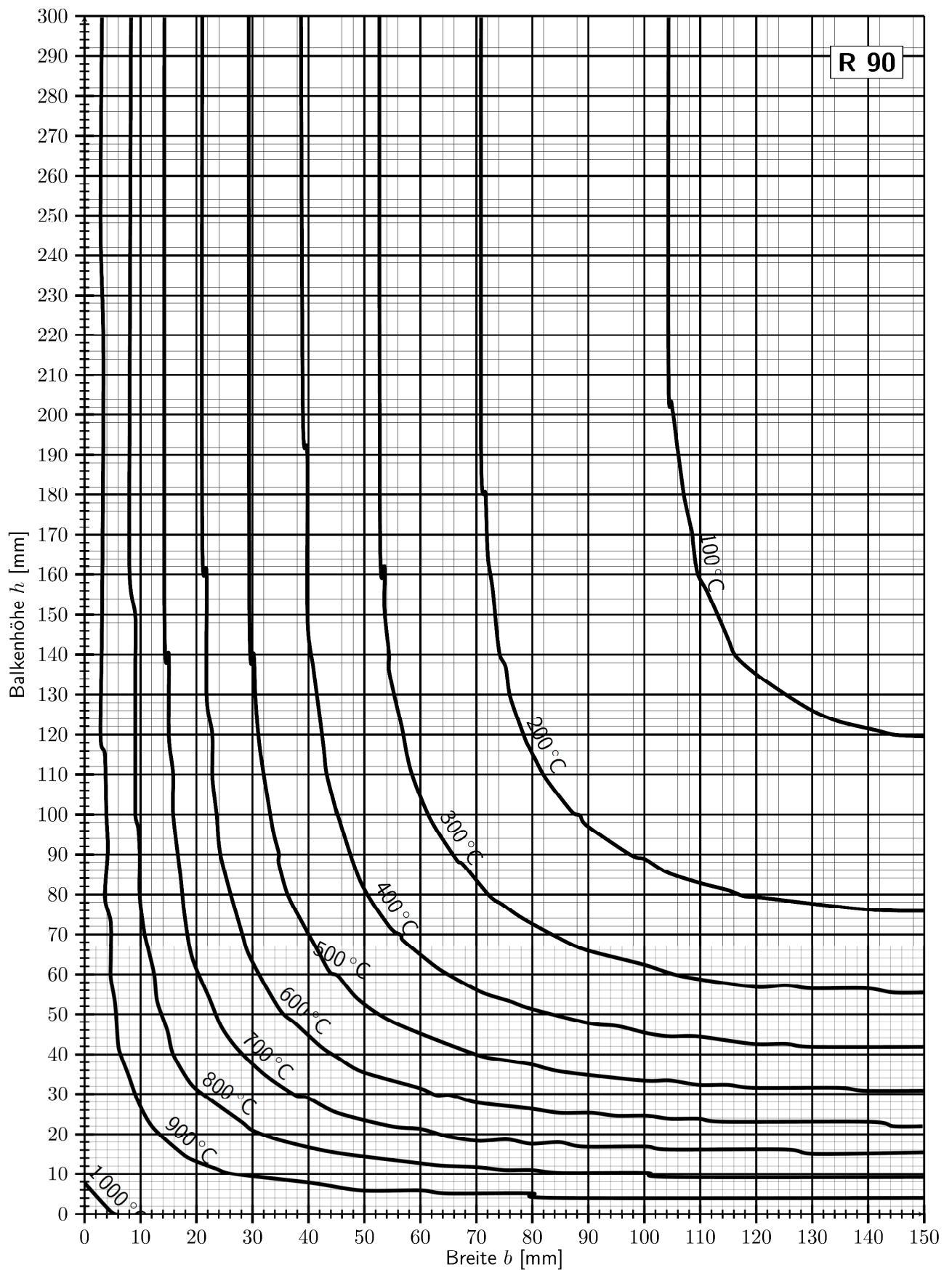


Bild 9 Temperaturprofil R 90 für einen Stahlbetonbalken mit $h \times b = 600 \times 300$ mm nach Bild A.7b in [6].