

Toelichting aan de hand van een rekenvoorbeeld

Brand en de Eurocode 2

Met de introductie van de Eurocodes verandert ook de manier waarop brandwerendheid van betonconstructies moet worden bepaald. Eurocode 2, deel 1-2, vervangt dan NEN 6071. In dit artikel worden enkele van de mogelijkheden getoond die Eurocode 2 biedt om aan te tonen dat de constructie zijn draagvermogen behoudt gedurende de blootstelling aan brand tijdens de vereiste tijdspanne. De mogelijkheden worden geïllustreerd aan de hand van het toetsen van de brandwerendheid van kolommen, waarbij een rekenvoorbeeld is toegevoegd. In een volgend artikel komt de brandwerendheid van liggers ter sprake.

Als de nieuwe Eurocode 2 van kracht wordt, wordt 'NEN 6071 – Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen – Betonconstructies' vervangen door 'NEN-EN 1992-1-2, Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies-deel 1-2: Algemene regels – Ontwerp en berekening van constructies bij brand.' De bepaling van de brandwerendheid vindt vanzelfsprekend plaats in combinatie met de bijbehorende belastingnorm 'NEN-EN 1991-1-2, Eurocode 1: Algemene belastingen – Belastingen bij brand.'

Wat de gevolgen van deze nieuwe normering zijn, wordt in dit artikel toegelicht. Het gaat daarbij alleen om het criterium 'R'; de criteria die betrekking hebben op scheidende functie ('E') en isolatie ('I') worden niet besproken.

Berekeningsmethoden

Voor het berekenen van het draagvermogen van betonnen kolommen bij brand biedt de Eurocode een aantal gereedschappen:

1 Tabellen met minimum afmetingen en wapeningsafstand.

De tabellen kunnen als relatief eenvoudig ontwerp hulpmiddel worden gebruikt. Als de vereiste brandwerendheid bekend is, kan, als aan een aantal randvoorwaarden wordt voldaan, de minimumafmeting en minimum wapeningsafstand worden bepaald.

2 Vereenvoudigde berekeningsmethoden.

Drie verschillende methoden waarbij een doorsnede berekening wordt gemaakt van de constructie waarbij op verschillende manieren rekening wordt gehouden met de afnemende materiaalsterkte bij hogere temperaturen (bijlage B); alleen de 500 °C-isothermmethode wordt hier beschouwd.

3 Geavanceerde berekeningsmethoden.

Geavanceerde rekenmethoden gaan uit van een elementaire benadering waarbij het totale gedrag van de constructie op detailniveau wordt geanalyseerd. Een dergelijke benadering vraagt een zeer gedetailleerde analyse, die alleen in bijzondere gevallen zal worden toegepast en daarom hier buiten beschouwing blijft.

Met deze methoden kan men bepalen of de constructie wel of niet voldoet aan de door het Bouwbesluit 2003 opgelegde eisen ten aanzien van brandwerendheid. De gedachte achter deze driedeling is dat, naarmate men meer rekeninspanning verricht, een hogere brandwerendheid kan worden aangetoond voor hetzelfde element.

Gegevens rekenvoorbeeld

Aan de hand van het volgende rekenvoorbeeld zal het gebruik van de verschillende methoden worden geïllustreerd (fig. 1):

- kolom op bovenste verdieping van een geschoorde constructie;
- systeemlengte 4000 mm; breedte 400 mm; hoogte 300 mm;
- kolom symmetrisch gewapend met aan beide zijden 5 Ø20; beugels Ø10; dekking 30 mm;
- betonsterkteklasse C28/35, wapening B500; effectieve kruipcoëfficiënt $\varphi_{ef} = 1,5$;
- constructie ingedeeld in gevolgklasse CC2; factor voor de quasi-blijvende waarde van de opgelegde belasting $\psi_2 = 0,5$;
- $N_G = 800$ kN; $N_Q = 200$ kN;
- kop- en voetsmoment in absolute waarde gelijk, maar tegengesteld van teken;
- $M_G = 60$ kNm; $M_Q = 20$ kNm;
- vereiste brandwerendheid R is 90 minuten.

Kolom bij kamertemperatuur

Ontwerp bij kamertemperatuur op basis van NEN-EN 1992-1-1, artikel 5.8.8.

rekenwaarde van de normaalkracht:

$$N_{Ed} = \gamma_G \cdot N_G + \gamma_Q \cdot N_Q = 1,2 \cdot 800 + 1,5 \cdot 200 = 1260 \text{ kN}$$

rekenwaarden van de eerste-orde-eindmomenten:

$$M_{02} = \gamma_G \cdot M_G + \gamma_Q \cdot M_Q = 1,2 \cdot 60 + 1,5 \cdot 20 = 102 \text{ kNm};$$

$$M_{01} = -102 \text{ kNm}$$

gelijkwaardig eerste-orde-eindmoment:

$$M_{0e} = 0,6 \cdot 102 + 0,4 \cdot (-102) \geq 0,4 \cdot 102 = 41 \text{ kNm}$$

relatieve normaalkracht:

$$n = N_{Ed} / A_c f_{cd} = 1260 \cdot 10^3 / 300 \cdot 400 \cdot 28 / 1,5 = 0,56$$

mechanische wapeningsverhouding:

$$\omega = A_s f_{yd} / A_c f_{cd} = 10 \cdot 314 \cdot 435 / (300 \cdot 400 \cdot 28 / 1,5) = 0,61$$

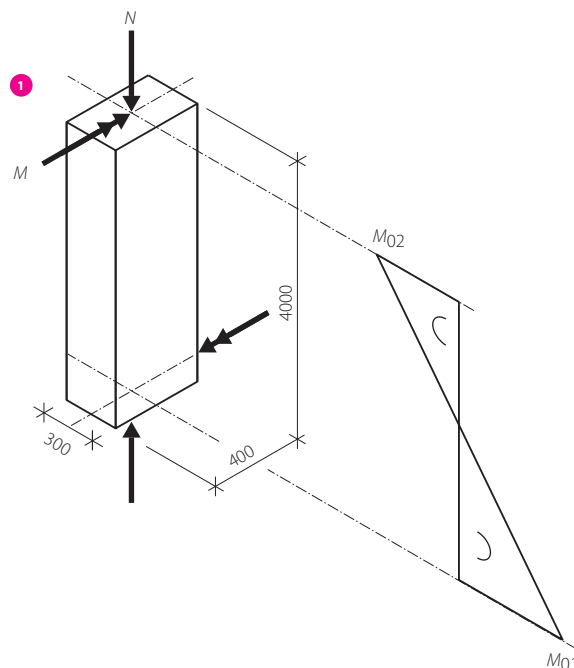
Voor de tweede-ordeberekening wordt de methode gebaseerd op de nominale kromming gebruikt.

correctiefactor:

$$K_r = (1 + \omega - n) / (0,6 + \omega) = (1 + 0,61 - 0,56) / (0,6 + 0,61) = 0,87 \leq 1,0$$

traagheidsstraal:

$$i = \sqrt{I/A} = \sqrt{(1/12 bh^3/bh)} = \sqrt{(1/12 \cdot 400 \cdot 300^3)/(400 \cdot 300)} = 87 \text{ mm}$$



slankheid:

$$\lambda = l_0 / i = 4000 / 87 = 46$$

$$\beta = 0,35 + f_{ck} / 200 - \lambda / 150 = 0,35 + 28 / 200 - 46 / 150 = 0,18$$

$$K_\varphi = 1 + \beta \varphi_{ef} = 1 + 0,18 \cdot 1,5 = 1,27 \geq 1,0$$

nuttige hoogte:

$$d = h - C_{nom} - \phi_{bgl} - \frac{1}{2} \phi_{hw} = 300 - 30 - 10 - 0,5 \cdot 20 = 250 \text{ mm}$$

uitbuiging:

$$e_2 = K_r K_\varphi (l_0^2 / \pi^2) (\epsilon_{yd} / (0,45d)) = 0,87 \cdot 1,27 \cdot (4000^2 / \pi^2) \cdot (2,175 \cdot 10^{-3} / (0,45 \cdot 250)) = 35 \text{ mm}$$

nominaal tweede-orde-moment:

$$M_2 = N_{Ed} \cdot e_2 = 1260 \cdot 35 \cdot 10^{-3} = 44 \text{ kNm}$$

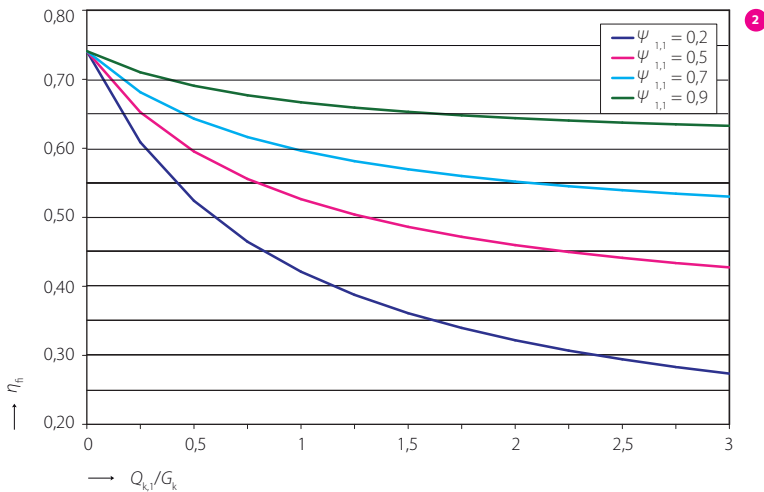
rekenwaarde van het moment:

$$M_{0Ed} + M_2 = \max(M_{0e} + M_2; M_{02}; M_{01} + 0,5M_2) = \max(41 + 44; 102; 102 + 0,5 \cdot 44) = 124 \text{ kNm}$$

imperfectie (scheefstand):

$$\Delta M_{imperfections} = N_{Ed} \cdot l_0 / 600 = 1260 \cdot 4 / 600 = 8 \text{ kNm}$$

De doorsnede berekening moet dus worden uitgevoerd op de combinatie van $N_{Ed} = 1260$ kN en $M_{Ed} = 124 + 8 = 132$ kNm. Voor de kolom is $a/h = (30 + 10 + 20/2) / 300 = 1/6$. Uit tabellen 17.3 en 17.4 uit CB2 (grafieken voor het bepalen de van wapening bij een combinatie van druk en buiging) kan worden bepaald: voor $N_{Ed} / (f_{cd} A_c) = 0,56$ en $M_{Ed} / (f_{cd} b h^2) = 0,20$ geldt $\rho \approx 1,1\%$ voor $a/h = 0,10$ en $\rho \approx 1,5\%$ voor $a/h = 0,20$. Interpoleren levert $\rho \approx 1,4\%$ voor $a/h = 1/6$ ($A_s = 1680 \text{ mm}^2$); de toegepaste wapening ($2 \cdot 5 \text{ Ø}20 = 3140 \text{ mm}^2 = 2,6\%$) is dus royaal voldoende voor het ontwerp bij kamertemperatuur; de kolom is in dat opzicht dus overgedimensioneerd.



Tabel 1 Minimumafmetingen en asafstanden voor kolommen van gewapend beton met een rechthoekige of cirkelvormige doorsnede (Tabel 5.2a uit EC2-1-2)

standaard brandwerendheid	minimumafmetingen (mm) kolombreedte b_{min} /asafstand a van de hoofdwapening			
	kolom aan meer dan één zijde blootgesteld			blootgesteld aan één zijde
	$\mu_{fi} = 0,2$	$\mu_{fi} = 0,5$	$\mu_{fi} = 0,7$	$\mu_{fi} = 0,7$
1	2	3	4	5
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

** Minimaal 8 staven. Voor voorgespannen kolommen behoort de toename van de as-afstand volgens 4.2.2 (4) in aanmerking te zijn genomen.

Gebruik van tabellen

Eurocode 2-1-2 geeft voor kolommen van beton met een normaal volumegewicht (2000 - 2600 kg/m³) met kiezelhoudende toeslagmaterialen twee verschillende methoden om met behulp van tabellen de brandwerendheid bij een standaardbrand te bepalen. Beide methoden gelden alleen voor geschoorde constructies. Om aan een gegeven brandwerendheidseis te voldoen, worden, afhankelijk van het belastingniveau, minimumeisen gesteld aan de kolomafmetingen en de wapeningsafstand.

Tabellen - Methode A (artikel 5.3.2)

Deze methode mag worden toegepast als aan de volgende voorwaarden is voldaan:

- effectieve lengte van de kolom onder brandomstandigheden $l_{0,fi} \leq 3000$ mm
- eerste-orde excentriciteit $e = M_{0Ed,fi} / N_{0Ed,fi} \leq e_{max}$; als $h < 300$ mm is $e_{max} = 0,15 h$; als $h \geq 300$ mm is $e_{max} = 0,40 h$
- wapeningsverhouding $\rho_l < 0,04$

De enige variabele die nog moet worden bepaald om op basis van tabel 1 (tabel 5.2a uit EC2-1-2) de brandwerendheid te toetsen, is de reductiefactor voor de belasting onder brandcondities:

$$\mu_{fi} = N_{Ed,fi} / N_{Rd}$$

waarin:

- $N_{Ed,fi}$ is de rekenwaarde van de axiale belasting in de brandsituatie
- N_{Rd} is de rekenwaarde van de weerstand van de kolom bij normale temperaturomstandigheden, uitgaande van de initiële excentriciteit van $N_{Ed,fi}$ en rekening houdend met tweede orde effecten.

In plaats van μ_{fi} mag ook η_{fi} , volgens artikel 2.4.2 worden toegepast. Dit is een veilige bovengrensbepaling (fig. 2).

Voor situaties die afwijken van de algemene uitgangspunten van tabel 5.2a geeft de EC ook nog een combinatie van formules op basis waarvan de standaard brandwerendheid kan worden bepaald. De brandwerendheid R is:

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

waarin:

$$R_{\mu fi} = 83 (1 - \mu_{fi} (1 + \omega) / (0,85 + \omega))$$

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

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

$$R_b = 0,09 b'$$

$R_n = 0$ bij het toepassen van vier hoekstaven; bij het toepassen van meer dan vier staven geldt $R_n = 12$

a is de wapeningsafstand van de langsstaven in mm ($25 \text{ mm} \leq a \leq 80 \text{ mm}$)

$l_{0,fi}$ is de effectieve lengte van de kolom onder brandomstandigheden in m; ($2 \leq l_{0,fi} \leq 6$ m)

b' = $2 A_c / (b+h)$ voor rechthoekige doorsneden of de diameter van cirkelvormige dwarsdoorsneden in mm ($200 \text{ mm} \leq b' \leq 450 \text{ mm}$; $h \leq 1,5 b$)

Rekenvoorbeeld:

Rekenwaarden van de belastingen onder brandcondities:

$$N_{Ed,fi} = N_G + \psi_2 \cdot N_Q = 800 + 0,5 \cdot 200 = 900 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,fi} = M_G + \psi_2 \cdot M_Q = 60 + 0,5 \cdot 20 = 70 \text{ kNm}$$

Controleer eerst of methode A mag worden toegepast:

- Voor geschoorde bouwconstructies waarvoor de geeïste standaardblootstelling aan brand hoger is dan 30 minuten mag, op basis van artikel 5.3.3(3), voor de effectieve lengte

$$l_{0,fi} = 0,5 l \text{ zijn genomen voor tussenverdiepingen en}$$

$$0,5l \leq l_{0,fi} \leq 0,7 l \text{ voor de bovenste verdieping.}$$

Hierdoor voldoet de kolom in het rekenvoorbeeld aan de gestelde eis voor de effectieve lengte:

$$l_{0,fi} \leq 0,7 l_{syst} = 0,7 \cdot 4000 = 2800 \text{ mm} \leq 3000 \text{ mm.}$$

2 Verloop van de reductiefactor η_k als functie van de belastingsverhouding Q_k / G_k (EC2-1-2 fig. 2.1)

3 Temperatuurverdeling ($^{\circ}\text{C}$) in een dwarsdoorsnede van een kolom (1/4 deel), $h \times b = 300 \times 300 - \text{R } 90$ (fig. A.13 uit EC2-1-2), 4-zijdig door brand belast

– De eerste-orde-excentriciteit onder brandcondities

$$e_{fi} = M_{Ed,fi} / N_{Ed,fi} = 70 \cdot 10^6 / 900 \cdot 10^3 = 78 \text{ mm.}$$

Omdat de smalste kolomrichting wordt beschouwd, geldt

$$h = 300 \text{ mm, dus } e_{\max} = 0,4 \cdot 300 = 120 \text{ mm; dus wordt}$$

voldaan aan de voorwaarde $e_{fi} \leq e_{\max}$.

– Bij de toegepaste hoeveelheid wapening geldt een wapeningsverhouding van $3140 / (300 \cdot 400) = 0,026 < 0,04$.

De conclusie is dan ook: methode A mag worden toegepast.

Bepaling belastingniveau onder brandcondities

Nu wordt berekend hoe groot de normaalkrachtweerstand van de kolom bij 20°C is. Daarbij wordt uitgegaan van een initiële excentriciteit zoals die van toepassing is onder brandcondities (e_{fi}). Deze initiële excentriciteit, e_{fi} , die dus moet worden aangehouden voor het bepalen van N_{Rd} , bedraagt 78 mm. De opneembare normaalkracht N_{Rd} moet op iteratieve wijze worden bepaald. Na enig itereren blijkt dat $N_{Rd} \approx 1700 \text{ kN}$.

De rekenstappen zijn:

eerste-orde eindmomenten:

$$M_{02} = -M_{01} = N_{Rd} \cdot e_{fi} = 1700 \cdot 0,078 = 133 \text{ kNm}$$

gelijkwaardig eerste-orde eindmoment:

$$M_{0e} = 0,6 \cdot 133 + 0,4 \cdot (-133) \geq 0,4 \cdot 133 = 53 \text{ kNm}$$

relatieve normaalkracht:

$$n = N_{Rd} / A_c f_{cd} = 1700 \cdot 10^3 / (300 \cdot 400 \cdot 28/1,5) = 0,76$$

mechanische wapeningsverhouding:

$$\omega = 0,61$$

correctiefactor:

$$K_r = (1 + \omega - n) / (0,6 + \omega) = (1 + 0,61 - 0,76) / (0,6 + 0,61) = 0,70 \leq 1,0$$

$$\beta = 0,18$$

$$K_{\phi} = 1,27$$

$$d = 250 \text{ mm}$$

uitbuiging:

$$e_2 = K_r K_{\phi} (I_0^2 / \pi^2) (\epsilon_{yd} / 0,45d) = 0,70 \cdot 1,27 \cdot (4000^2 / \pi^2) \cdot (2,175 \cdot 10^{-3} / (0,45 \cdot 250)) = 28 \text{ mm}$$

nominaal tweede-ordemoment:

$$M_2 = N_{Rd} \cdot e_2 = 1700 \cdot 28 \cdot 10^{-3} = 48 \text{ kNm}$$

rekenwaarde van het moment:

$$M_{0Ed} + M_2 = \max(M_{0e} + M_2; M_{02}; M_{01} + 0,5M_2) = \max(53 + 48; 133; 133 + 0,5 \cdot 48) = 157 \text{ kNm}$$

scheefstand (imperfectie):

$$\Delta M_{\text{imperfecties}} = N_{Ed} l_0 / 600 = 1700 \cdot 4 / 600 = 11 \text{ kNm}$$

Als de doorsnedeberekening wordt uitgevoerd met de combinatie van de gevonden $N_{Ed} = 1700 \text{ kN}$ en de daarmee berekende $M_{Ed} = 157 + 11 = 168 \text{ kNm}$ (dit alles bij 20°C) volgt uit de wapeningsgrafieken van CB2 dat bij $N_{Ed} / f_{cd} A_c = 0,76$ en $M_{Ed} / f_{cd} b h^2 = 0,25$ na interpoleren geldt $\rho \approx 2,6\%$. De toegepaste wapening ($2 \cdot 5\text{O}20 = 3140 \text{ mm}^2$) komt hiermee overeen (2,6%).

Het belastingniveau in de brandsituatie is dus gelijk aan:

$$\mu_{fi} = N_{Ed,fi} / N_{Rd} = 900 / 1700 = 0,53$$

Voor een kolom die aan meer dan één zijde aan brand is blootgesteld geldt, op basis van tabel 1 aflezend voor $\mu_{fi} = 0,5$ en R_{90} :

- minimumafmeting 300 mm en wapeningsafstand 45 mm of
- minimumafmeting 400 mm en wapeningsafstand 38 mm

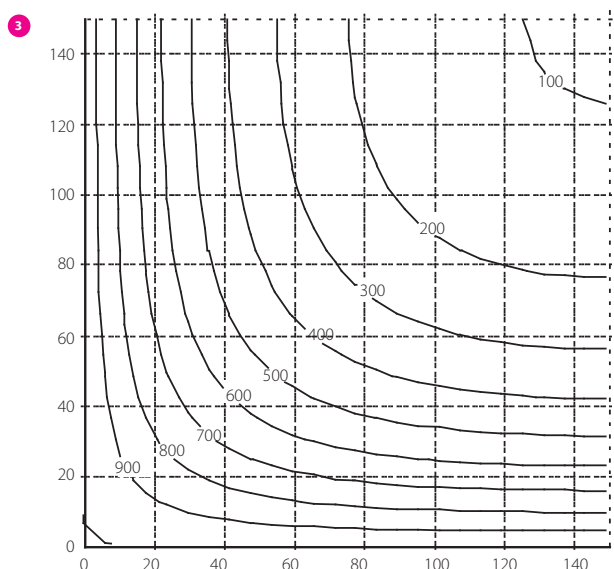
De toegepaste kolom voldoet aan de eerste combinatie van minimumafmeting en wapeningsafstand ($a = c + \text{O}_{sw} + 0,5 \text{O}_{sl} = 30 + 10 + 0,5 \cdot 20 = 50 \text{ mm}$).

Als η_{fi} als uitgangspunt wordt gehanteerd voor het bepalen van de minimum afmeting en de wapeningsafstand, volgt uit figuur 2 voor $Q_k / G_k = 200/800 = 0,25$ en $\psi_2 = 0,50$ dat $\eta_{fi} = 0,65$ ($\approx 0,70$). Op basis van deze waarde blijkt uit tabel 1:

- minimum afmeting 350 mm en wapeningsafstand 53 mm of
- minimum afmeting 450 mm en wapeningsafstand 40 mm

Met deze methode zou de voorbeeldkolom dus niet voldoen.

Deze benaderingswijze voor η_{fi} is ongunstig omdat deze is berekend met vgl. (6.10) uit EC0, een vergelijking met $1,35G +$



- 4 Spanningsverdeling in de uiterste grenstoestand voor een rechthoekige dwarsdoorsnede in beton met drukwapening (fig. B.2 uit EC2-1-2)
- 5 Doorsnede-berekening kolom onder brandcondities volgens een plastische spanningsverdeling

Tabel 2 Minimumafmetingen en asafstanden voor kolommen van gewapend beton met een rechthoekige of cirkelvormige doorsnede (Tabel 5.2b uit EC2-1-2)

standaard brandwerendheid	mechanische wapeningsverhouding	minimumafmetingen (mm)			
		kolombreedte b_{min} / asafstand a			
	ω	$n = 0,15$	$n = 0,3$	$n = 0,5$	$n = 0,7$
1	2	3	4	5	6
R 30	0,100	150/25*	150/25*	200/30:250/25*	300/30:350/25*
	0,500	150/25*	150/25*	150/25*	200/30:250/25*
	1,000	150/25*	150/25*	150/25*	200/30:300/25*
R 60	0,100	150/30:200/25*	200/40:300/25*	300/40:500/25*	500/25*
	0,500	150/25*	150/35:200/25*	250/35:350/25*	350/40:550/25*
	1,000	150/25*	150/30:200/25*	200/40:400/25*	300/50:600/30
R 90	0,100	200/40:250/25*	300/40:400/25*	500/50:550/25*	550/40:600/25*
	0,500	150/35:200/25*	200/45:300/25*	300/45:550/25*	500/50:600/40
	1,000	200/25*	200/40:300/25*	250/40:550/25*	500/50:600/45
R 120	0,100	250/50:350/25*	400/50:550/25*	550/25*	550/60:600/45
	0,500	200/45:300/25*	300/45:550/25*	450/50:600/25*	500/60:600/50
	1,000	200/40:250/25*	250/40:400/25*	450/45:600/30	600/60
R 180	0,100	400/50:500/25*	500/60:550/25*	550/60:600/30	(1)
	0,500	300/45:450/25*	450/50:600/25*	500/60:600/50	600/75
	1,000	300/35:400/25*	450/50:550/25*	500/60:600/45	(1)
R 240	0,100	500/60:550/25*	550/40:600/25*	600/75	(1)
	0,500	450/45:500/25*	550/55:600/25*	600/70	(1)
	1,000	400/45:500/25*	500/40:600/30	600/60	(1)

* Gewoonlijk is de dekking vereist volgens EN 1992-1-1 maatgevend.
(1) Vereist een breedte groter dan 600 mm. Een afzonderlijke beoordeling voor knik is vereist.

1,5Q. In Nederland wordt gerekend met de maatgevende van EC0 vgl. (6.10a) ($1,35G + \psi_1 1,5Q$) en (6.10b) ($1,2G + 1,5Q$). In dit rekenvoorbeeld is bij 20 °C vgl. (6.10b) maatgevend. Dan is:

$$\eta_{fi} = \frac{G + \psi_2 Q}{1,2G + 1,5Q} = \frac{800 + 0,5 \cdot 200}{1,2 \cdot 800 + 1,5 \cdot 200} = 0,71$$

Omdat de kolom qua hoeveelheid wapening is overgedimensioneerd, is het belastingniveau onder brandcondities bij verondersteld uitnutten van de kolom bij 20 °C ($\eta_{fi} = 0,71$), hoger dan het belastingniveau bij brandcondities op basis van de werkelijke sterkte van de kolom bij 20 °C ($\mu_{fi} = 0,53$).

Als de formules worden gebruikt voor het bepalen van brandwerendheid vinden we:

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

$$= 83 \cdot (1 - 0,53 \cdot (1 + 0,61) / (0,85 + 0,61)) = 34$$

$$R_a = 1,60 (a - 30) = 1,60 \cdot (50 - 30) = 32$$

$$R_l = 9,60 (5 - l_{0,fi}) = 9,60 \cdot (5 - 2,80) = 21$$

$$b' = 2 A_c / (b + h) = 2 \cdot 300 \cdot 40 / (300 + 400) = 343 \text{ mm}$$

$$R_b = 0,09 b' = 0,09 \cdot 343 = 31$$

$$R_n = 12 (n = 10 > 4)$$

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

$$= 120 \cdot ((34 + 32 + 21 + 31 + 12) / 120)^{1,8} = 139 \text{ minuten}$$

Het gebruiken van de formule leidt tot een aanzienlijk hogere brandwerendheid dan zou worden verwacht op basis van de aflezing uit tabel 1.

Tabellen - methode B (artikel 5.3.3)

Voor het mogen toepassen van methode B gelden minder randvoorwaarden dan voor de toepassing van methode A. Als gebruik wordt gemaakt van de tabellen in bijlage C is feitelijk alleen de maximale eerste-orde-excentriciteit onder brandomstandigheden beperkt: $e/b \leq 0,5$ met $e_{max} = 200 \text{ mm}$.

In de tabellen in bijlage C kan men gedetailleerd het effect van slankheid, mechanische wapeningsverhouding, excentriciteit en belastingniveau meenemen in de bepaling van de minimum kolomafmetingen en wapeningsafstand bij een bepaalde brandwerendheid. Het belastingniveau, n , wordt daarbij als volgt bepaald:

$$n = N_{0Ed,fi} / (0,7(A_c f_{cd} + A_s f_{yd}))$$

Tabel 2 (tabel 5.2b uit EC2-1-2) is een 'vereenvoudigde' samenvoeging van de negen tabellen in bijlage C, die mag worden toegepast als de eerste-orde-excentriciteit onder brandomstandigheden beperkt is ($e/b \leq 0,25$ met $e_{max} = 100 \text{ mm}$) en de slankheid van de kolommen niet groter is dan 30.

Rekenvoorbeeld:

Controle of methode B volgens bijlage C mag worden toegepast:

eerste-orde excentriciteit onder brandcondities:

$$e_{fi} = e = 78 \text{ mm} < e_{max} = 200 \text{ mm};$$

$$e/b = 78/300 = 0,26 < 0,50;$$

controle mag dus op basis van bijlage C plaatsvinden.

$$\omega = 0,61;$$

$$n = N_{0Ed,fi} / (0,7(A_c f_{cd} + A_s f_{yd}))$$

$$= 900\,000 / (0,7 \cdot (300 \cdot 400 \cdot 28/1,5 + 3140 \cdot 435)) = 0,36$$

$$\lambda_f = l_{0,fi} / i = 2800/87 = 32$$

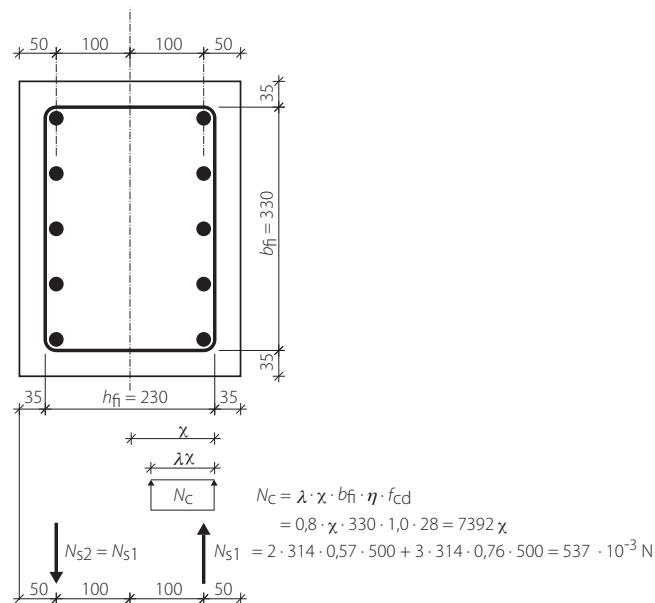
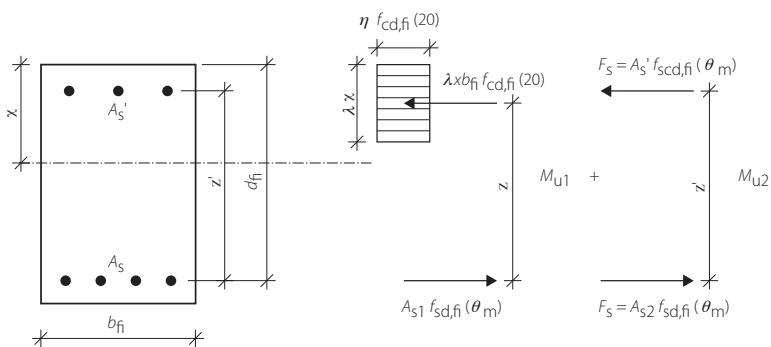
Toepassing van methode B op basis van tabellen C.1 t/m C.9:

- Bij de aanwezige mechanische wapeningsverhouding en 1^e-orde excentriciteit moet tabel 3 (tabel C5 uit EC2-1-2) worden gehanteerd. Uitgaande van de slankheid en het belastingniveau, kan op basis van interpolatie worden gevonden:
 - minimum kolomafmeting 240 mm en minimum wapeningsafstand 45mm
 - minimum kolomafmeting 406 mm en minimum wapeningsafstand 25 mm

Het resultaat dat wordt gevonden met methode B is aanzienlijk gunstiger dan bij het gebruik van methode A.

Toepassing methode B op basis van de vereenvoudigde tabel 5.2b

Controleer eerst of methode B volgens tabel 5.2b (tabel 2) mag worden toegepast:



$$e_{fi} = 78 \text{ mm}; e_{fi}/b = 78/300 = 0,26 > 0,25;$$

$$e_{fi} = 78 \text{ mm} < e_{max} = 100 \text{ mm}$$

Conclusie:

e_{fi}/b is hoger (2%) dan het grenscriterium. Ook de slankheid bij brand is iets hoger (ca. 7%) dan de grenswaarde voor het toepassen van tabel 2. Formeel is het toepassen van de tabel dus niet toegestaan. Omdat de overschrijdingen echter beperkt zijn, lijkt het hanteren van de resultaten, zij het met enige reserve, toelaatbaar. Aflezen van tabel 2 voor $\omega = 0,50$ en $n = 0,36$, leidt, op basis van interpolatie, tot:

- minimum kolomafmeting 230 mm en minimum wapeningsafstand 45 mm
- minimum kolomafmeting 375 mm en minimum wapeningsafstand 25 mm

In dit geval blijken de resultaten gevonden bij het gebruiken van bijlage C iets ongunstiger te zijn dan bij het gebruik van tabel 2, terwijl dit normaal gesproken andersom zou moeten zijn. Het verschil is wellicht te verklaren uit het feit dat in het rekenvoorbeeld niet wordt voldaan aan de grenscriteria horend bij tabel 2. Op basis van deze vergelijking lijkt het dus onverstandig om buiten de grenswaarden van tabel 2 te treden, ook al gaat het slechts om kleine overschrijdingen.

Vereenvoudigde berekeningsmethoden (artikel 4.2)

500°-isothermmethode (bijlage B.1)

Het kenmerk van deze methode is dat wordt aangenomen dat alle delen van de betondoorsnede waarvan de temperatuur hoger is geworden dan 500 °C geen bijdrage meer leveren aan de sterkte van de doorsnede. Voor die delen die niet heter zijn geworden dan 500 °C wordt aangenomen dat die hun oorspronkelijke sterkte en stijfheid hebben behouden. Dit betekent voor een op druk belaste kolom dat de slankheid in brandcondities afneemt en dat, als gevolg daarvan, de tweede-orde-excentriciteiten zullen toenemen. Daar staat tegenover dat de

materiaaleigenschappen met een materiaalfactor $\gamma_{M,fi} = \gamma_{s,fi} = \gamma_{c,fi} = 1,0$ mogen worden gehanteerd (in plaats van $\gamma_s = 1,15$ en $\gamma_c = 1,50$; zie NEN-EN 1992-1-2, artikel 2.3(2)P) en dat met kruip, gezien het kortdurende karakter van de brandsituatie, geen rekening hoeft te worden gehouden.

Rekenvoorbeeld:

Als eerste stap moet worden vastgesteld waar de 500 °C isotherm in de doorsnede ligt. Deze mag men zelf berekenen, maar omdat niet iedereen over de mogelijkheid beschikt om dergelijke berekeningen te maken zijn in bijlage A voor een beperkt aantal doorsneden isothermen gegeven na 60, 90 en 120 minuten blootstelling aan brand. Voor de hier toegepaste kolomdoorsnede is geen temperatuurverdeling beschikbaar in bijlage A. Op basis van de temperatuurverdeling voor de doorsnede met een hoogte van 300 mm en een breedte van 300 mm (fig. 3) kan wel een redelijke inschatting worden gedaan over de temperatuurverdeling: gemiddeld neemt de buitenste circa 35 mm temperaturen aan die hoger zijn dan 500 °C. De temperatuur van de wapening is niet voor alle staven identiek: de vier hoekstaven worden ongeveer 500 °C, de andere zes staven circa 340 °C.

Ontwerp bij brand:

$$N_{Ed,fi} = 900 \text{ kN}; M_{02} = -M_{01} = 70 \text{ kNm}$$

$$M_{0e} = 0,6 \cdot 70 + 0,4 \cdot (-70) \geq 0,4 \cdot 70 = 28 \text{ kNm}$$

$$n = N_{Ed,fi} / A_c f_{cd}$$

$$= 900 \cdot 10^3 / ((300 - 2 \cdot 35) \cdot (400 - 2 \cdot 35) \cdot 28 / 1,0) = 0,42$$

Bij het gebruik van de vereenvoudigde berekeningsmethoden kan voor drukwapening op basis van artikel 4.2.4.3 uit EC2-1-2 de vloeigrens van betonstaal als functie van de temperatuur worden bepaald.

● **LITERATUUR**

- 1 NEN-EN 1991-1-2, Eurocode 1: Belastingen op constructies, deel 1-2: Algemene belastingen – Belasting bij brand
- 2 NEN-EN 1992-1-2, Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies, deel 1-2: Algemene regels – Ontwerp en berekening bij brand
- 3 Taerwe, L., Brandwerendheid van betonconstructies volgens de Eurocodes. *Cement* 2006/7
- 4 Braam, C.R. en Lagendijk, P., Constructielear Gewapend Beton. CB2, Cement&BetonCentrum

Voor de hoekstaven geldt: $k_s(\theta = 500\text{ °C}) = 0,57$
 Voor de overige staven geldt: $k_s(\theta = 340\text{ °C}) = 0,70 - 0,3(340 - 400)/300 = 0,76$

Eenvoudigheidshalve wordt voor de trekwapening dezelfde sterkte aangehouden.

mechanische wapeningsverhouding onder brandcondities:
 $\omega = A_s f_{yd} / A_c f_{cd} = (4 \cdot 314 \cdot 0,57 \cdot 500 + 6 \cdot 314 \cdot 0,76 \cdot 500) / ((300 - 2 \cdot 35) \cdot (400 - 2 \cdot 35) \cdot 28/1,0) = 0,51$
 $K_r = (1 + \omega - n) / (0,6 + \omega) = (1 + 0,51 - 0,42) / (0,6 + 0,51) = 0,98 \leq 1,0$

traagheidsstraal:
 $i_{fi} = \sqrt{I/A} = \sqrt{(1/12 b_{fi} h_{fi}^3 / (b_{fi} h_{fi}))} = \sqrt{(1/12 \cdot (400 - 2 \cdot 35) \cdot (300 - 2 \cdot 35)^3 / (400 - 2 \cdot 35)(300 - 2 \cdot 35))} = 66\text{ mm}$

slankheid:
 $\lambda = l_{o,fi} / i_{fi} = 2800/66 = 42$
 $\beta = 0,35 + f_{ck}/200 - \lambda/150 = 0,35 + 28/200 - 42/150 = 0,21$
 $K_{\phi} = 1 + \beta \phi_{ef} = 1 + 0,21 \cdot 0 = 1,00$

nuttige hoogte:
 $d_{fi} = 300 - 35 - 30 - 10 - 0,5 \cdot 20 = 215\text{ mm}$

uitbuiging:
 $e_2 = K_r K_{\phi} (l_{o,fi}^2 / \pi^2) (\epsilon_{yd} / 0,45d) = 0,98 \cdot 1,00 \cdot (2800^2 / \pi^2) \cdot (2,175 \cdot 10^{-3} / (0,45 \cdot 215)) = 18\text{ mm}$

tweede-orde moment:
 $M_2 = N_{Ed,fi} \cdot e_2 = 900 \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 16\text{ kNm}$

rekenwaarde van het moment:
 $M_{0Ed} + M_2 = \max(M_{0e} + M_2; M_{02}; M_{01} + 0,5M_2) = \max(28 + 16; 70; 70 + 0,5 \cdot 16) = 78\text{ kNm}$

imperfecties (scheefstand):
 $\Delta M_{imperfecties} = N_{Ed,fi} l_{o,fi} / 600 = 900 \cdot 2,80 / 600 = 4\text{ kNm}$

Een doorsnede-berekening moet dus worden uitgevoerd op de combinatie van $N_{Ed,fi} = 900\text{ kN}$ en $M_{Ed,fi} = 78 + 4 = 82\text{ kNm}$. De kolomtabellen uit CB2 kunnen in deze situatie niet worden gebruikt. Zolang er geen hulpmiddelen beschikbaar zijn, is men derhalve aangewezen op een handberekening. Deze doorsnede-berekening kan plaatsvinden op basis van een plastische spanningsverdeling in de doorsnede (figuur B.2 uit EC2-1-2, zie fig. 4). Voor dit specifieke geval blijkt dat bij de aanwezige normaalkracht een moment van 167 kNm kan worden opgenomen, zoals blijkt uit figuur 5. Dat is ruimschoots meer dan de vereiste 82 kNm. Dat het totaal moment (1e plus 2e orde en imperfecties) dat bij 20 graden moet kunnen worden opgenomen nagenoeg

gelijk is aan het moment dat bij brandcondities kan worden opgenomen (157 + 11 = 168 versus 167), berust op toeval.

Naast 500 °C isotherm methode noemt de EC nog de 'zone-methode' (bijlage B.2) en de methode gebaseerd op een schatting van de kromming (bijlage B.3). Deze methodes worden in het kader van dit artikel niet verder besproken. ☒

Tabel 3 Minimumafmetingen en asafstanden voor kolommen van gewapend beton; rechthoekige en cirkelvormige doorsneden. Mechanische-wapeningsverhouding $\omega = 0,500$. Gemiddeld eerste-orde-moment: $e = 0,25b$ met $e \leq 100\text{ mm}$ (Tabel C5 uit EC2-1-2)

standaard brandwerendheid	λ	minimumafmetingen (mm) Kolombreedte b_{min} / asafstand a			
		kolom aan meer dan één zijde blootgesteld aan brand			
		$n = 0,15$	$n = 0,3$	$n = 0,5$	$n = 0,7$
1	2	3	4	5	6
R 30	30	150/25*	150/25*	150/25*	200/30:250/25*
	40	150/25*	150/25*	150/25*	300/45:350/25*
	50	150/25*	150/25*	200/30:250/25*	350/40:450/25*
	60	150/25*	150/25*	250/30:300/25*	500/30:550/25*
	70	150/25*	150/35:200/25*	350/30:400/25	550/35:600/30
	80	150/25*	200/30:250/25*	400/40:500/25	600/50
R 60	30	150/25*	150/35:200/25*	250/35:350/25*	350/40:550/25
	40	150/25*	200/30:300/25*	300/35:500/25*	450/50:600/30
	50	150/30:200/25*	200/40:350/25*	300/45:550/25*	500/50:600/35
	60	150/35:200/25*	250/40:500/25*	400/45:600/30	600/45
	70	200/30:300/25*	300/40:500/25*	500/40:600/35	600/80
	80	200/35:300/25*	350/40:600/25*	550/55:600/40	(1)
R 90	30	150/35:200/25*	200/45:300/25*	300/45:550/25*	500/50:600/40
	40	200/35:250/25*	250/45:500/25*	350/50:600/25*	550/50:600/45
	50	200/40:300/25*	300/45:550/25*	500/50:600/35	600/55
	60	200/50:400/25	350/50:600/25*	550/50:600/45	(1)
	70	300/35:500/25*	400/50:600/35	600/50	(1)
	80	300/40:600/25*	500/55:600/40	600/80	(1)
R 120	30	200/45:300/25*	300/45:550/25*	450/50:600/25*	500/60:600/50
	40	200/50:350/25*	350/50:550/25*	500/50:600/40	600/55
	50	250/45:450/25*	450/50:600/25*	500/55:550/45	600/80
	60	300/50:500/25*	500/45:600/40	550/60:600/60	(1)
	70	350/50:550/25*	500/50:550/45	600/75	(1)
	80	400/50:600/25*	500/55:550/50	(1)	(1)
R 180	30	300/45:450/25*	450/50:600/25*	500/60:600/50	600/75
	40	350/50:500/25*	500/50:600/25*	600/60	(1)
	50	450/50:500/25*	500/60:600/50	600/70	(1)
	60	500/50:600/25*	550/60:600/55	(1)	(1)
	70	500/55:600/35	600/65	(1)	(1)
	80	500/60:600/55	600/75	(1)	(1)
R 240	30	450/45:500/25*	550/55:600/25	600/70	(1)
	40	450/50:550/25*	600/50	600/80	(1)
	50	500/55:600/25*	600/65	(1)	(1)
	60	550/55:600/40	600/75	(1)	(1)
	70	600/60	(1)	(1)	(1)
	80	600/70	(1)	(1)	(1)

* Gewoonlijk is de dekking vereist volgens EN 1992-1-1 maatgevend. (1) Vereist een breedte van groter dan 600 mm. Een afzonderlijke beoordeling voor knik is vereist.