

ir. L. Twilt en dr.ir. A.F. Hamerlinck

Leen Twilt is voormalig hoofd van het Centrum voor Brandveiligheid TNO (thans Efectis Nederland) in Rijswijk en Ralph Hamerlinck is senior adviseur bij Bouwen met Staal in Zoetermeer en directeur van Adviesbureau Hamerlinck in Roosendaal.

Ruimere mogelijkheden berekening betongevulde stalen buiskolommen

De brandwerendheid van een stalen buiskolom kan sterk verbeteren door deze met beton te vullen^{[9][13]}. Om het effect hiervan te berekenen zijn inmiddels twee rekenmodellen beschikbaar. De methode uit Eurocode 4-1-2^[1] en een recent ontwikkelde alternatieve Franse methode^[2]. Uit een vergelijking blijkt de laatste binnen het toepassingsgebied van de Eurocode even betrouwbaar te zijn als de eerste, bovendien is het toepassingsgebied groter. De Franse methode is op basis van 'gelijkwaardigheid' dan ook te gebruiken in Nederland. Een historisch overzicht, praktische hulpmiddelen voor toepassing van beide methoden en de consequenties van de vigerende regelgeving.

In de jaren '70 en '80 van de vorige eeuw is in Frankrijk en Duitsland de brandwerendheid van betongevulde stalen buiskolommen uitgebreid experimenteel onderzocht^{[3][4]}. Onder auspiciën van CIDECT (Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire) is een rekenmodel ontwikkeld dat de resultaten van de Franse en Duitse proeven voldoende nauwkeurig beschrijft^[5]. Dit model is overgenomen in een richtlijn^[6] waarmee in 1983 de rekenkundige beoordeling van de brandwerendheid van betongevulde stalen buiskolommen in Nederland werd geïntroduceerd^[6]. Ook de ENV-versie van Eurocode 4-1-2 uit 1993 is – waar het betongevulde buiskolommen betreft – op dit rekenmodel gebaseerd^[7]. In de EN-versie van Eurocode 4-1-2 is, afgezien van een aantal formele aanpassingen zonder praktische betekenis, eveneens uitgegaan van dit rekenmodel^[1]. De details van het rekenmodel worden geregeld in bijlage H van de norm, een 'informatieve' bijlage, dus het wordt aan EU-lidstaten overgelaten om ze al dan niet in hun nationale regelgeving op te nemen. In Neder-

land is die bijlage normatief en daarmee heeft het rekenmodel 'kracht van wet'. In Frankrijk is de bijlage 'informatief' en daar bestaat dus de mogelijkheid om Eurocode 4-1-2 met een alternatief rekenmodel toe te passen. Een praktische complicatie van het Eurocode-model is dat het een geavanceerde computerberekening vergt en voor de praktijk weinig toegankelijk is. Met de richtlijn^[6] is (deels) aan dit probleem tegemoet gekomen door een groot aantal ontwerpgrafieken op te nemen, zie ook [8]. Echter, niet voor iedere ontwerpsituatie bestaat een grafiek, dus moet vaak worden geïnterpoleerd. Dit komt de nauwkeurigheid en toegankelijkheid niet ten goede. Een belangrijke stap in de richting van het 'naar de praktijk toebrenge[n]' van het Eurocode-model is het softwarepakket Pot-fire^[10]. Daarmee kunnen voor iedere ontwerpsituatie binnen het toepassingsgebied van het model snel en efficiënt oplossingen worden gegenereerd.

Achtergronden Eurocode-model

Het rekenmodel in de Eurocode valt uiteen in twee delen.

- Beoordeling van de thermische respons: de temperatuurverdeling over de doorsnede, waarbij de doorsnede wordt verdeeld in een groot aantal elementen. De berekening van de thermische respons is gebaseerd op het oplossen van de differentiaalvergelijking voor het warmtetransport in vaste stof: de 'vergelijking van Fourier', in combinatie met de relevante begin- en randvoorwaarden. Uitgegaan wordt van standaard-brandomstandigheden. De thermische weerstand tussen de stalen buis en het beton wordt verwaarloosd, evenals de overgangsweerstand 'omgeving-staalprofiel'. De oplossing van de vergelijking van Fourier is, onder dergelijke omstandigheden, slechts numeriek mogelijk. Men is aangewezen op de computer.
- Beoordeling van de mechanische respons: de axiale kniklast van de kolom bij verhoogde

temperatuur. De methode is gebaseerd op een methode ontwikkeld voor betongevulde stalen buiskolommen bij kamertemperatuur^[11]. Deze rekenmethode moet gezien worden als een verdere vereenvoudiging van de meer algemene methode voor staal-betonkolommen (zoals H-profielen met gewapend betonvulling tussen de flenzen), die ook wordt gegeven in Eurocode 4-1-2^[1]. De axiale kniklast $N_{fi, Rd}$ bij brand wordt berekend met de Eulerse kniklast ($= N_{fi, cr}$), uitgaande van het concept van de 'tangent (stijfheids)modulus' voor de samenstellende materialen (dat is de stijfheid, rekening houdend met plastisch materiaalgedrag), uiteraard bij de berekende temperatuurcondities. Door de rekken stapsgewijs op te voeren zal de tangent modulus van de samenstellende materialen afnemen (dus ook de rekenwaarde van $N_{fi, cr}$), terwijl de spanningen toenemen (dus ook de rekenwaarde van de plastische normaalkracht $N_{fi, pl, Rd}$). Indien beide krachten gelijk zijn, wordt bezwijken verondersteld. Omdat de temperatuurverdeling over de doorsnede van de kolom ongelijkmatig zal zijn, is een computer nodig. De effecten van thermische spanningen door de ongelijkmatige temperatuurverdeling over de doorsnede, worden niet in rekening gebracht. Dit geldt ook voor de effecten van initiële uitbuigingen op het stabiliteitsgedrag van de kolom.

In afbeelding 1 zijn de gemeten brandwerendheden ($= X$) van vijftien kolommen uit een representatieve steekproef vergeleken met de brandwerendheden zoals berekend met het Eurocode-model ($= Y$)^{[5][6]}. Ook is een indicatie gegeven van de marge tegenover de ideale situatie ($Y = X$). Conclusie: theorie en experiment komen voldoende nauwkeurig overeen, zeker gezien de onderlinge spreiding in de resultaten. Voorzichtigheid is echter geboden. Immers, in de berekeningen is het effect van onder meer de thermische spanningen niet meegenomen. In afbeelding 2 staat

Meer info Voor praktische toepassingen wordt verwezen naar Potfire (v. 3). Dit programma is beschikbaar op <http://www.brandveiligmetstaal.nl/> onder het tabblad 'Tools'. Via een link wordt de gebruiker geleid naar de site waar het Franse CTICM (auteur van Potfire) de diverse versies als 'freeware' beschikbaar stelt. De Franse methode is hierbij aangeduid als 'Potfire_EN1994-1-2-FNA'. Ontwerpersinformatie over betongevulde buiskolommen gebaseerd op de Eurocode (tabellen en een pulldownmenu) is te vinden op http://www.brandveiligmetstaal.nl/pag/202/4e_betongevulde_buiskolommen.html.

het verband tussen de kniklengte en de kniklast van buiskolommen met buitenafmetingen van 300x300 mm, gevuld met gewapend beton, na een blootstelling aan de standaardbrand gedurende 90 minuten^{[5][6]}. Bij de rode knikkromme is een (rekenkundige) schatting gemaakt van het effect van de thermische spanningen. De blauwe kromme is berekend met het Eurocode-model, dus exclusief de invloed van de thermische spanningen. De kniklengte speelt een belangrijke rol: voor relatief lage waarden onderschat het Eurocode-model de kniklast; voor relatief hoge waarden wordt juist een overschatting gevonden. Voor een kniklengte van ongeveer 3 m is het effect verwaarloosbaar.

Het onderzoek is uitgevoerd op kolommen met praktische afmetingen, met commerciële brandwerendheidsovens. Daardoor konden de kniklengtes maar beperkt worden gevarieerd, tussen ± 2 en 3,5 m. Een directe verificatie van het rekenkundig bepaalde effect van de thermische spanningen is daarom niet goed mogelijk. Om deze reden is besloten tot een gevoeligheidsanalyse voor die grootheden waarvan mag worden aangenomen dat ze een belangrijke rol spelen bij het effect van de thermische spanningen op de draagkracht: de kniklengte, het wapeningspercentage en de afmetingen van de doorsnede. Voor deze grootheden is, per geselecteerde proef, het quotiënt bepaald van de met het Eurocode-model berekende brandwerendheid (= Y) en de gemeten brandwerendheid (= X). Zie afbeelding 3 voor de resultaten bij kniklengtes. Hierin is eveneens de regressielijn weergegeven voor de bepaalde datapunten. De helling geeft een indruk van de systematische afwijking van het rekenmodel ten opzichte van de ideale situatie (Y/X = 1) bij variatie in de kniklengte. Uitgaande van een aanvaardbare afwijking van 20% ten opzichte van het gemiddelde proefresultaat, volgt dat de toepassing van het Eurocode-model beperkt moet blijven tot kolommen met een kniklengte van ten hoogste 4,5 m. Veel praktijkgevallen zullen in dit gebied vallen. Voor de grootheden 'wapeningspercentage' en 'afmetingen' is een soortgelijke aanpak gekozen^{[5][6]}. Indien hierbij ook wordt uitgegaan van een maximaal toelaatbare afwijking van 20% gelden de volgende grenzen.

140 mm < dwarsafmeting < 410 mm
0% < wapeningspercentage < 5%

Op praktische gronden geeft de Eurocode nog aanvullende beperkingen aan het toepassingsgebied van het rekenmodel:

C20/25 ≤ betonsterkte ≤ C40/50
30 min ≤ brandwerendheid ≤ 120 min

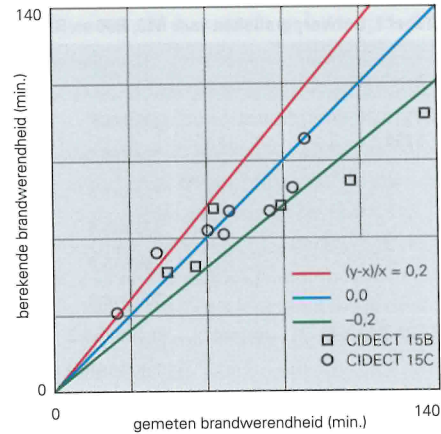
Binnen bepaalde grenzen kunnen ook de effecten van een excentrische belasting in rekening worden gebracht. Hiervoor geeft de Eurocode eenvoudige vuistregels, afhankelijk van het wapeningspercentage, de afmetingen van de kolom en de excentriciteit. Deze regels zijn opgesteld in overstemming met rekenregels bij kamertemperatuur^{[1][12]}. Met deze vuistregels neemt de bij brand opneembare normaalcracht bij de introductie van een (kleine) excentriciteit fors af, zo leert de ervaring. De Eurocode-rekenmethode valt in de norm onder de afdeling 'eenvoudige rekenmodellen'. Maar het gebruik ervan is slechts mogelijk met geavanceerde computerberekeningen. Daarom zijn de volgende hulpmiddelen ontwikkeld: ontwerpgrafieken en gebruikersvriendelijke software.

Ontwerpgrafieken

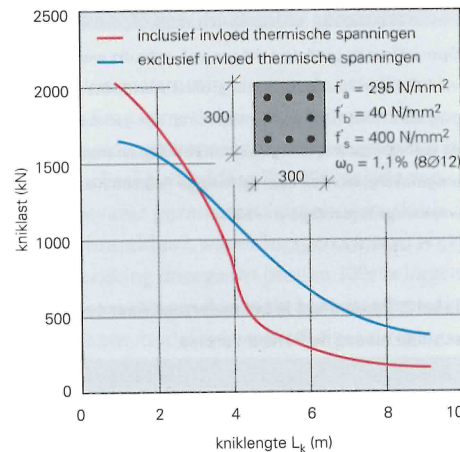
Afbeelding 4 is een voorbeeld van een ontwerpgrafiek^{[6][8][9]} waarin de draagkracht bij brand is af te lezen als functie van de kniklengte bij brand voor een buisprofiel bij een standaardbrandduur van 60 minuten. Tabel 1 geeft een overzicht van beschikbare ontwerpgrafieken voor brandwerendheidsklassen R60, R90 en R120. Voor tussenliggende situaties mag lineair worden geïnterpoleerd. Het toepassingsgebied is uiteraard gelijk aan dat van het Eurocode-model.

Software

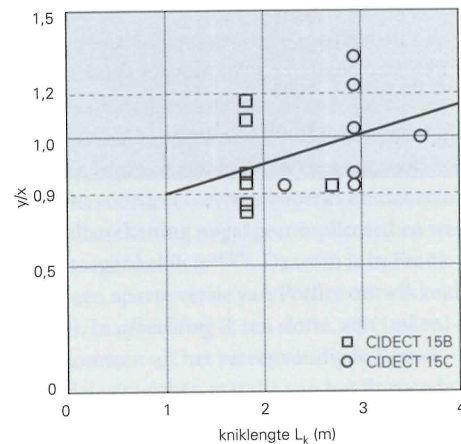
Gebruikersvriendelijke software is ontwikkeld waarmee het ontwerp van onbeschermde betongevulde stalen buisprofielen snel en efficiënt kan worden getoetst. In dat kader is het Eurocode-model uitgebreid, zodat ook de brandwerendheid van rechthoekige buiskolommen met beton kan worden bepaald^[10]. Het programma heet Potfire^[12]. Inmiddels zijn meerdere versies in omloop, gebaseerd



1. Vergelijking tussen de berekende (= Y) en gemeten (= X) brandwerendheid.



2. Illustratie van het effect van de thermische spanningen.



3. Gevoeligheidsanalyse kniklengte.

Literatuur

1. NEN-EN 1994-1-2. (Eurocode 4: Ontwerp en berekening van staal-betonconstructies – Deel 1-2: Algemene regels – Ontwerp en berekening van constructies bij brand), 2005 + Nationale Bijlage 2007.
2. J.M. Aribert, Ch. Renaud, en B. Zhao, 'Simplified fire design for composite hollow-section columns'. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, *Structures & Buildings* 6 (2008), p. 325-336.
3. G. Grandjean, J.P. Grimaud, en L. Petit, 'Détermination de la durée au feu des profils creux remplis de béton'. *Cometube*, 1980.
4. K. Kordina en B.W. Klingsch, 'Brandverhalten von Stahlstützen im Verband mit Beton massiven Stahlstützen ohne Beton'. *Programm P35 der Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl*, 1983.

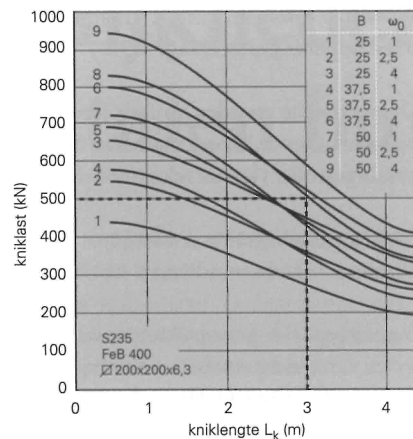
Tabel 1. Ontwerpgrafieken voor R60, R90 en R120.

beton- en staalkwaliteit	type buisprofiel	kolomafmetingen (mm)
C20, C30, C40 S235	rond	219,1x4,5
		244,5x5,0
		273,0x5,0
		323,9x5,6
		355,6x5,6
		406,4x6,3
C20, C30, C40 S235	vierkant	180x180x6,3
		200x200x6,3
		220x220x6,3
		250x250x6,3
		260x260x6,3
		300x300x7,1
		350x350x8,0
		400x400x10,0

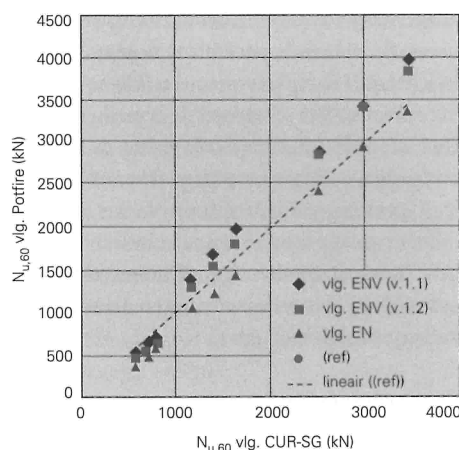
Opmerking: de grafieken mogen ook gebruikt worden voor S355 en voor buizen met grotere wanddikte. De grafieken (met 1; 2,5 en 4%-wapening) zijn gebaseerd op de toenmalige wapeningkwaliteit FeB 400 en mogen omgerekend worden naar de huidige FeB 500 (vereiste wapeningspercentage $\omega = 0,8\%$).

Tabel 2. Parameters in het onderzoek naar de verschillen tussen de Potfire-versies.

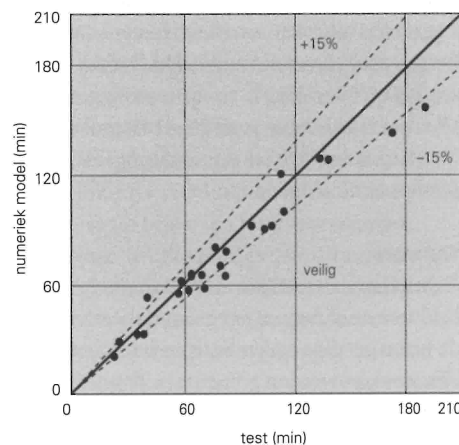
kolomdoorsnede (mm)	wapening FeB 500 (mm)	afstand wapening tot buitenzijde staalprofiel (mm)
Ø 219,1x4,5	8Ø8	30
	8Ø12	
	8Ø16	
Ø 273,0x5,0	8Ø10	34
	8Ø16	
	8Ø20	
Ø 355,6x5,6	8Ø12	44
	8Ø20	
	8Ø25	



4. Voorbeeld van een ontwerpgrafiek (60 min).



5. Toetsing uitkomsten van de verschillende Potfire-versies aan de CUR/SG-richtlijn.



6. Vergelijking van de brandwerendheden uit brandproeven en berekeningen met een geavanceerd model volgens de eindige-elementenmethode^[13].

op verschillende versies van Eurocode 4-1-2. De verschillen zijn marginaal en inhoudelijk van weinig betekenis. In afbeelding 5 zijn voor de kolommen in tabel 2 en voor een standaardbrandduur van 90 minuten, de uitkomsten van drie verschillende Potfire-versies vergeleken met de CUR/SG-richtlijn^[6]. Merk op dat de CUR/SG-uitkomsten direct gebaseerd zijn op het oorspronkelijke Eurocode-model. Deze uitkomsten worden door de EN-versie van Potfire goed beschreven. De uitkomsten op basis van de twee ENV-versies wijken enigszins af maar zijn in de meeste gevallen aan de veilige kant.

Frans alternatief

In Frankrijk is een alternatief ontwikkeld dat via de Franse Nationale Bijlage^[15] normatief is voorgeschreven. In Nederland kan het worden gebruikt op basis van gelijkwaardigheid. Om dat te beoordelen, is het van belang beide methoden te vergelijken en te weten waarom de Fransen dit alternatief hebben ontwikkeld en normatief aangewezen.

De Eurocode-methode heeft een beperkt toepassingsgebied, hetgeen in de praktijk met name bij grotere kniklengten ($> 4,5$ m) en bij grotere excentriciteiten ($> 0,5$ maal de dwarsafmeting van het profiel) problemen oplevert. De Franse methode heeft een groter toepassingsgebied door een theoretisch beter onderbouwde beschrijving van het gedrag. Zaken die in de Eurocode worden verwaarloosd zijn:

- thermische rekken en spanningen;
- imperfecties en een initiële vooruitbuiging (2e-orde-effecten);
- slip tussen de stalen buis en betonnen kern.

De Franse methode is afgeleid van de meer geavanceerde eindige-elementenmethode^[14]. Hierbij worden in opeenvolgende tijdstappen Δt via een iteratief proces de evenwichts- en constitutieve vergelijkingen opgelost, rekening houdend met de gewijzigde sterkte en stijfheid door de temperatuurstijging per element. Ook is rekening gehouden met een eventuele verschuiving in het contactvlak staal-beton aan de binnenzijde van de buis. In elk element is de totale rek opgebouwd uit vier componenten.

- De spanningsgerelateerde rek, corresponderend met het σ - ϵ diagram volgens de

5. L. Twilt en P.W. van de Haar, *Harmonization of the Calculation Rules for the Fire Resistance of Concrete Filled HSS Columns*. TNO-IBBC rapport BI-86-461, Delft 1986.
6. L. Twilt en P.W. van de Haar, *Brandwerendheid van staal-betonkolommen. Deel 2. Stalen buisprofielen gevuld met beton*, CS/CUR/SG-rapport 6, Rotterdam/Gouda 1989.
7. EN 1994-1-2, (Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules. Structural Fire Design), 1994.
8. L. Twilt (sam.). R. Hass, W. Klingsch, M. Edwards, D. Dutta, *Design Guide for Structural Hollow Section Columns Exposed to Fire*, CIDECT, Keulen 1994.
9. *Calculation of the fire resistance of centrally loaded composite steel-concrete columns exposed to the standard fire*, ECCS Technical note 55, Brussel 1988.
10. L. Twilt, C. Both, J. Kruppa en B. Zhao, 'Fire Design of Unprotected Concrete Filled Columns: The further Development and Extension of Application of User-friendly PC Software'. *Proceedings of the 9th International Symposium on Tubular Structures*, Düsseldorf 2001, p. 475-480.
11. P. Guyaux en J. Janss, 'Comportement au Flambement des Tubes en Acier Remplis de Béton'. *C.R.I.F. MT* 65, 1979.

Eurocode, behorend bij de temperatuur van dat element; een en ander overeenkomstig het Eurocode-model.

- De thermische rek door uitzetting door temperatuurstijging; hiermee wordt geen rekening gehouden in het Eurocode-model.
- Kruiptrek; evenals bij het Eurocode-model wordt in het Franse model aangenomen dat de kruiptrek impliciet is verwerkt in het σ - ϵ -diagram.
- Residuele rekken (de verhinderde rekken als gevolg van restspanningen door fabricage); hiermee wordt in het Eurocode-model geen rekening gehouden.

In elke doorsnede zijn de totale rekken over de elementen lineair verdeeld (Bernoulli) net als in het Eurocode-model. De geavanceerde methode is gevalideerd met 33 in verschillende landen uitgevoerde brandproeven. Omdat deze proeven gedaan zijn zonder de vooruitbuiging te meten, is in de berekeningen uitgegaan van 1/500 van de kolomlengte, dat strookt met de tolerantie in de productnorm. In het algemeen is het verschil tussen de berekende en gemeten brandwerendheden minder dan 15%, zie *afbeelding 6*. Dit is acceptabel gezien de variatie die bij brandproeven gebruikelijk is. De afwijking is van dezelfde orde als bij de verificatie van het Eurocode-model (*afb. 1*).

Vereenvoudigd model

De met proeven gevalideerde geavanceerde methode is gebruikt om de vereenvoudigde methode uit de Franse Nationale Bijlage te kalibreren. De thermische berekening hiervan voldoet – net als het Eurocode-model – volledig aan EN 1991-1-2 (thermische belastingen bij brand), EN 1993-1-2 (thermische eigenschappen staal) en 1992-1-2 (thermische eigenschappen beton). Vereenvoudigde temperatuurformules zijn afgeleid, waarbij ronde doorsneden in concentrische segmenten worden verdeeld met per segment een uniforme temperatuur als functie van de brandduur. De stalen buis is één segment en de betonvulling bestaat uit minimaal vijf segmenten. Voor vierkante doorsneden geldt een soortgelijke benadering. Uitgaande van de temperaturen van de elementen wordt de opneembare normaalkracht $N_{fi,b,Rd}$ berekend

met de volgende stappen.

Stap 1: de plastische normaalkracht $N_{fi,pl,Rd}$ volgt uit de sommatie van de bijdragen van de elementen. Voor elk element is de bijdrage bepaald als de oppervlakte van dat element, vermenigvuldigd met de bij de temperatuur van dat element horende maximale sterkte (volgens EN 1994-1-2).

Stap 2: de effectieve buigstijfheid $EI_{fi,eff}$ volgt uit de sommatie van de bijdragen van de elementen. Voor elk element is de bijdrage bepaald als het kwadratisch oppervlaktemoment (I) van dat element, vermenigvuldigd met de bij de temperatuur van dat element horende elasticiteitsmodulus E (volgens EN 1994-1-2), waarbij voor beton de *secant stijfheid* wordt aangehouden. Deze bijdragen worden vermenigvuldigd met een reductiecoëfficiënt φ , waarmee het effect van de thermische rekken wordt verdisconteerd.

Stap 3: de Eulerse kniklast $N_{fi,cr}$ wordt berekend uit $\pi^2 EI_{fi,eff} / l_0^2$, met als l_0 de kniklengte bij brand.

Stap 4: de relatieve slankheid van de kolom $\lambda_0 = (N_{fi,pl,Rd} / N_{fi,cr})^{1/2}$.

Stap 5: de opneembare normaalkracht $N_{fi,b,Rd} = \chi(\lambda_0) N_{fi,pl,Rd}$, waarbij de knikfactor χ als functie van de relatieve slankheid λ_0 bepaald wordt met een knikkromme vergelijkbaar met die van EN 1993-1-1.

Deze procedure komt overeen met die uit EN 1994-1-2 voor de beoordeling van het constructief gedrag van staal-beton kolommen. Opgemerkt wordt dat het Eurocode-model hiervan – in de nadere uitwerking – afwijkt op een aantal punten, met name de volgende.

- **De correctiecoëfficiënten voor de thermische spanningen.** In het Franse model worden hiervoor waarden gegeven, gebaseerd op kalibratieberekeningen en afhankelijk van het onderdeel van de doorsnede (staal, beton, wapening) en de brandduur. In het Eurocode-model wordt het effect van de thermische spanningen verwaarloosd.

- **De slankheid bij brand.** In het Franse model wordt hierbij uitgegaan van de relatieve slankheid bij brand (λ_0 , zie *stap 4*). λ_0 is daarmee temperatuurafhankelijk. Als verdere verfijning wordt hierbij nog een 'transitieslankheid' ($\lambda_{0,transitie}$) ingevoerd, afhankelijk van de afmetingen van de brandduur, de af-

metingen van de doorsnede en het wapeningspercentage. Voor relatief lage waarden van de relatieve slankheid ($\lambda_0 \leq \lambda_{0,transitie}$) wordt rekening gehouden met het verschil in opwarming van de stalen buis en het aangrenzende beton. In het Eurocode-model wordt de knikbelasting direct berekend uit de kniklengte bij brand (l_0). Hierbij mag volgens EN 1994-1-2: 4.3.5.1 (10) – onder omstandigheden – de kniklengte bij brand worden gereduceerd tot 50% van de waarde bij kamertemperatuur. Merk op dat de waarde van l_0 onafhankelijk is van de temperatuur. Ten opzichte van het Franse model is dus sprake van een belangrijke vereenvoudiging.

- **De excentriciteit van de belasting.** Zowel in het Franse als in het Eurocode-model wordt dit effect op de opneembare kracht bij brand empirisch in rekening gebracht.

De overeenstemming tussen de vereenvoudigde Franse methode en de met proeven gevalideerde, geavanceerde methode is goed, zie bijvoorbeeld *afbeelding 7*^[14]. Bij variatie van de relevante parameters (afmetingen, slankheid, brandduur, wapeningspercentage) blijkt de afwijking doorgaans binnen 10% te liggen. Het toepassingsgebied van het vereenvoudigde Franse model is in *tabel 3* afgezet tegen die van het Eurocode-model. Het toepassingsgebied van het Franse model is aanzienlijk uitgebreider. Zo claimt het Franse model toepasbaar te zijn voor kniklengten bij brand tot maar liefst 18,3 m, uitgaande van de maximaal toegestane dwarsafmeting van 610 mm. Afhankelijk van de randvoorwaarden kan de toegestane systeemlengte oplopen tot 26 à 36 m. In het Eurocode-model wordt de kniklengte beperkt tot 4,5 m (iets meer dan het testbereik van de Europese ovens). Een ander voordeel van het Franse model is dat in beginsel een handberekening mogelijk is. Dit voordeel is echter beperkt omdat zo'n handberekening nogal gecompliceerd en weinig toegankelijk is^{[14][15]}. Daarom is in Frankrijk een aparte versie van Potfire ontwikkeld (v. 3). In *afbeelding 8*, ten slotte, zijn (reken-)uitkomsten uit het vereenvoudigde Franse model vergeleken met die van het Eurocode-model. In [14] wordt ook een meer uitgebreide vergelijking gemaakt tussen het Franse model en het Eurocode-model. Kantteke-

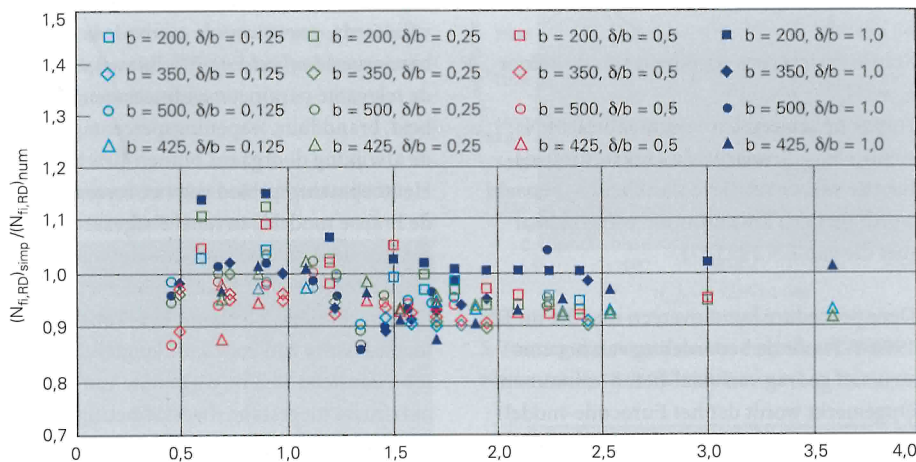
Literatuur (vervolg)

12. Potfire, 'User's Manual' versies 1.1 (2000), 1.2, 2 en 3 (2009).
13. J.W.B. Stark en R.J. Stark, *Staal-beton: Toepassing en berekening van staal-beton constructies voor gebouwen volgens Eurocode 4 bij normale temperatuur en brand*, Bouwen met Staal, Zoetermeer 2009.
14. J.M. Aribert, Gh. Renaud en B. Zhao, 'Simplified fire design for composite hollow-section columns'. *Structures & Buildings* 161 (2008), p. 325-336.
15. AFNOR-NF EN 1994-1-2/NA, *Annexe Nationale à la NFEN 1994-1-2*, AFNOR 2007.

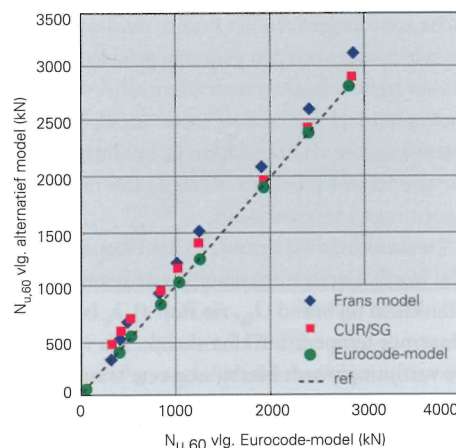
Tabel 3. Toepassingsgebied Frans model en Eurocode-model.

vereenvoudigd Frans model					Eurocode-model	
type kolom		ongewapend centrisch belast $\omega = 0$ en $\delta = 0$		gewapend centrisch/excentrisch belast	'alle typen'	
klasse brandwerendheid		R30	R60	R30/R60	R90/R120	R30/R60/R90/ R120
$(b \text{ of } d)_{\min}$ in mm		100	150	150	200	$140 \leq (b \text{ of } d) \leq 410$
$(b \text{ of } d)_{\max}$ in mm		610		610		
l_{Φ} in mm		$l_{\Phi} \leq 30(b \text{ of } d)$		$l_{\Phi} \leq 30(b \text{ of } d)$		≤ 4500
betonklasse		tussen C20/25 en C60/75				tussen C 20/25 en C40/50
$\omega_{\min}$ in %	$\delta/(b \text{ of } d) = 0$	n.v.t.		1		$0 \leq \omega \leq 5$
	$1/8 \leq \delta/(b \text{ of } d) \leq 1/2$			1	2	
	$1/2 \leq \delta/(b \text{ of } d) \leq 1$			2		
$\omega_{\min}$ in %	$\delta/(b \text{ of } d) = 0$			5		NB: $\delta(b \text{ of } d) \leq 0,5$
	$1/8 \leq \delta(b \text{ of } d) \leq 1/2$					

d = diameter ronde buiskolom (mm); b = kleinste dwarsafmeting vierkante of rechthoekige buiskolom (mm); l_{ϕ} = knik-lengte van de kolom bij brand (mm); ω = wapeningspercentage van de kolom; δ = excentriciteit normaalkracht (mm)



7. De verhouding tussen de met de Franse Nationale Bijlage berekende opneembare normaalkracht en die berekend met de eindige-elementenmethode, beide na 90 minuten en bij 5% wapening, bij diverse profielafmetingen en excentriciteiten van de belasting, weergegeven als functie van de slankheid^[13].



8. Vergelijking resultaten Eurocode-model, het Franse model en de CUR/SG-ontwerpgrafieken.

ning daarbij is dat geen acht wordt geslagen op het beperkte toepassingsgebied van het Eurocode-model. Dit leidt tot oneigenlijke conclusies. Volledigheidshalve zijn ook resultaten van de CUR/SG-publicatie weergegeven. Naar verwachting liggen de Eurocode- en de CUR/SG-waarden zeer dicht bij elkaar. Ten opzichte van de Franse waarden worden veilige uitkomsten gevonden. De overeenkomst tussen de modellen is bevredigend, zeker gezien de bij brandproeven gebruikelijke spreiding in meetresultaten (afb. 1 en 6).

Conclusies

Zowel het Eurocode-model als het Franse model zijn uitgebreid gevalideerd met brandproeven op betongevulde stalen buiskolommen. Aannemelijk is gemaakt dat beide modellen binnen het toepassingsgebied van bijlage H van EN 1994-1-2 gelijkwaardig zijn. Een belangrijk voordeel van het Franse model is dat toepassingsgebied aanzienlijk is verruimd ten opzichte van de Eurocode. Deze uitbreiding is mogelijk gemaakt door toepassing van een geavanceerde rekenmethode. Het resultaat is onder meer dat kolommen met aanzienlijk grotere slankheden en excentriciteiten kunnen worden beoordeeld dan bij toepassing van het Eurocode-model. Het Franse model is inmiddels opgenomen in de Franse Nationale Annex en is daarmee in Frankrijk een normatief onderdeel van EN 1994-1-2. Naar verwachting zal worden voorgesteld om bij de komende aanpassing van de Eurocodes 'Brand', het Franse model op te nemen in EN 1994-1-2. Deze aanpassing kan echter nog geruime tijd duren. In Nederland is de huidige bijlage H van EN 1994-1-2 en daarmee ook het Eurocode-model normatief. Toepassing van het Franse model in Nederland vraagt dus een beroep op 'gelijkwaardigheid'. Zo'n beroep lijkt, gezien de hier beschreven geavanceerde achtergrond van het Franse model en de uitgebreide validatie, alleszins gerechtvaardigd. Dit betekent dat ook in Nederland het gebruik van het Franse model verantwoord wordt geacht. Wanneer wordt voldaan aan het toepassingsgebied volgens bijlage H van EN 1994-1-2 kan uiteraard ook gebruik worden gemaakt van het Eurocode-model (via Potfire (v. 02)) of van de CUR/SG-ontwerpgrafieken^[5].