

Het vullen van stalen buizen met beton is een bekende methode om de brandwerendheid te verhogen. De gangbare rekenmethoden beperken zich uitsluitend tot toepassingen van gewapend beton. In Engeland is nu een methode ontwikkeld, waarmee de brandwerendheid van ongewapende, gevulde buiskolommen kan worden berekend. De resultaten stemmen goed overeen met de uitkomsten van brandproeven. De methode is ook geschikt voor toepassing in Nederland.

Betongevulde buiskolommen

Nieuwe mogelijkheden voor een brandwerendheid van 60 minuten zonder wapening

dr.ir. A.F. Hamerlinck
ir. W.H. Verburg

Project Analyse Bureau, Rotterdam

De brandwerendheid van een buiskolom hangt af van een aantal factoren, zoals de belasting, het type profiel, de kniklengte en de brandwerende voorzieningen. Een mogelijke voorziening is het vullen van de buis met beton. Dit heeft het voordeel dat het staalprofiel zichtbaar blijft (afb. 1). Een vulling met gewapend beton is al lang mogelijk. Sinds kort bestaat voor bepaalde gevallen een alternatief met ongewapend beton.

Gevulde buiskolommen met wapening

Lange tijd ontbraken geschikte rekenmodellen om de brandwerendheid van kolommen, gevuld met gewapend beton, vooraf rekenkundig te bepalen. Brandproeven waren daarom noodzakelijk. In de jaren zeventig voerde de CIDECT bijvoorbeeld een groot aantal brandproeven uit op dergelijke buiskolommen [1].

Brandproeven vergen echter veel tijd, zijn relatief duur en de uitkomsten vertonen bovendien een tamelijk grote spreiding. In 1988 is in Europees verband een computermodel ontwikkeld en geverifieerd met proeven. Met dit programma zijn ontwerpgrafieken gemaakt, waarmee de opneembare belasting na een brand van 30, 60, 90 of 120 minuten is af te lezen [2, 3]. De Eurocode 4 refereert aan deze grafieken [4].

De beschikbare ontwerpgrafieken gelden alleen voor gevulde buizen met een wapeningspercentage van 1%, 2,5% en 4% (afb. 2). Voor ongewapende buizen geeft de Eurocode geen grafieken. Volstaan wordt met de opmerking dat voor ongewapende buizen een brandwerendheid van 30 minuten haalbaar is en dat 60 minuten uitsluitend te bereiken is bij een relatief lage belastinggraad [3]. De belastinggraad is gedefinieerd als de bij brand aanwezige belasting gedeeld door de bezwijkbelasting bij kamertemperatuur.

Aan de achtergronden van het gedrag van staal-beton kolommen bij brand, en aan ontwerpgrafieken voor gewapende, gevulde buiskolommen zijn reeds twee artikelen in dit blad gewijd [5, 6].

Belastinggraad

De samenstellers van de grafieken gingen ervan uit dat de gevulde buis bij kamertemperatuur als staal-beton kolom is gedimensioneerd. Dit betekent dat de belastinggraad bij brand in de orde ligt van 0,5 à 0,67. In de praktijk echter begint de constructeur doorgaans met het ontwerp bij kamertemperatuur en past voor het belastinggeval brand een betonvulling toe, al dan niet met een wapening. De bijdrage van het beton aan de draagkracht bij kamertemperatuur wordt op deze manier niet meegenomen.



1. Kantoorgebouw Lease Concept in Amsterdam. De stalen buiskolommen zijn gevuld met gewapend beton en blijven daardoor zichtbaar.

men. Het gevolg van deze werkwijze is dat de belastinggraad lager is dan 0,5 à 0,67. Een buis met een geringe wanddikte bijvoorbeeld bezit een belastinggraad bij brand van 0,25 of nog minder.

Bij dergelijke lage waarden is het vaak mogelijk een brandwerendheid van 60 minuten te bereiken met een vulling van ongewapend beton. In bepaalde gevallen kan dat een alternatief zijn voor een wat slankere staal-beton kolom met wapening (en die bij kamertemperatuur dan ook als staal-beton kolom moet worden berekend).

Gevulde buiskolommen zonder wapening

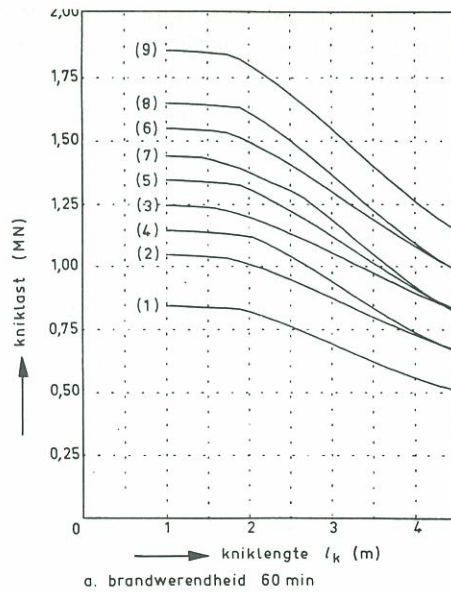
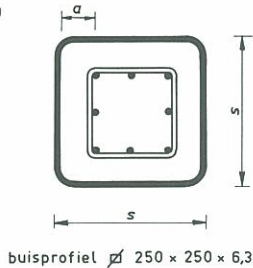
Tot voor kort bestond er geen rekenkundige methode voor de bepaling van de brandwerendheid van ongewapende, gevulde buiskolommen. Brandproeven vormden het enige alternatief. In Engeland is echter een rekenmethode ontwikkeld, waarmee de brandwerendheid wel rekenkundig kan worden bepaald [7]. Deze methode is inmiddels opgenomen in de Britse normen [8].

Rekenmethode

De Engelse rekenmethode geldt voor vierkante en rechthoekige, met

staalsoort buisprofiel Fe 360
 staalsoort betonstaal FeB 400

	ϵ_0
(1) B 25	1,0
(2) B 25	2,5
(3) B 25	4,0
(4) B 37,5	1,0
(5) B 37,5	2,5
(6) B 37,5	4,0
(7) B 50	1,0
(8) B 50	2,5
(9) B 50	4,0



Tabel 1. Knikfactor K voor de betonkern, afhankelijk van de slankheid λ_z .

λ_z	K
14	1,000
20	0,984
30	0,953
40	0,905
50	0,852
60	0,786
70	0,703
80	0,610
90	0,521
100	0,444
110	0,379
120	0,326
130	0,283
140	0,247
150	0,217
160	0,193
170	0,171
180	0,154

2. Voorbeeld van een ontwerpgrafiek voor een gevulde buiskolom 250x250 mm voor een brandwerendheid van 60 minuten [3].

beton gevulde, buiskolommen in geschoorde raamwerken. Het beton mag ongewapend zijn of gewapend met wapeningstaven of met staalvezels. De methode geldt niet voor lichtbeton. Excentrische belastingen kunnen in rekening worden gebracht.

Dit artikel beschrijft de methode voor ongewapende buiskolommen met afmetingen van minimaal 140x140 mm en 100x200 mm. De gebruikte symbolen zijn aangepast overeenkomstig de TGB 1990. Ongewapende buiskolommen moeten aan de volgende twee voorwaarden voldoen:

$$\frac{N_\theta + 6 \left(\frac{1}{h} |M_{\theta,y}| + \frac{1}{b} |M_{\theta,z}| \right)}{0,83K \frac{f_{ck}}{\gamma_m} A_b} \leq \eta$$

en

$$6 \left(\frac{1}{h} |M_{\theta,y}| + \frac{1}{b} |M_{\theta,z}| \right) \leq N_\theta$$

Hierin is:

- N_θ centrische belasting bij brand [N];
- $M_{\theta,y}$ moment om de sterke as bij brand [Nm];
- $M_{\theta,z}$ moment om de zwakke as bij brand [Nm];
- h betondikte, gemeten loodrecht op sterke as [m];
- b betondikte, gemeten loodrecht op zwakke as [m];
- f_{ck} karakteristieke kubusdruksterkte van het beton [N/mm²];
- γ_m materiaalfactor voor beton bij brand: $\gamma_m = 1,3$ (volgens Britse norm);
- A_b oppervlakte van de betondoorsnede [mm²];
- K knikfactor van de betonnen kern volgens tabel 1 [-];
- η tijdsafhankelijke belastingfactor volgens tabel 2 [-].

Volgens de nieuwe Nederlandse betonvoorschriften (NEN 6720) bedraagt de materiaalfactor γ_m niet 1,3 maar 1,0. De hier gegeven rekenprocedure is echter gebaseerd op een grote serie internationale proeven [1]. Bovendien zijn de factoren K en η afgeleid op basis van een materiaalfactor $\gamma_m = 1,3$ en bestaat er een goede overeenstemming tussen de rekenprocedure en de proefresultaten. Het is daarom niet verantwoord voor γ_m de waarde 1,0 te gebruiken in formule (1).

Als alternatief kan men de waarden voor K of η in tabel 1 en tabel 2 delen door 1,3 en conform de nieuwe normen rekenen met $\gamma_m = 1,0$. De knikfactor K hangt af van de slankheid λ_z van de kolom om de zwakke as volgens:

$$\lambda_z = \frac{\ell_{buc,z}}{i_z} = \frac{\ell_{buc,z}}{\sqrt{\frac{I_b}{A_b}}} \quad (3)$$

Tabel 2. Tijdsafhankelijke belastingfactor η .

brandwerendheid	30 min	60 min	90 min	120 min
η	1,000	0,509	0,397	0,359

Hierin is:

- $\ell_{buc,z}$ kniklengte om de zwakke as bij brand [mm];
- i_z traagheidsstraal om de zwakke as [mm];
- I_b kwadratisch oppervlaktemoment [mm⁴]: $I_b = \frac{1}{12} bh^3$

Voor vierkante kolommen, met $b = h$, gaat formule (3) over in:

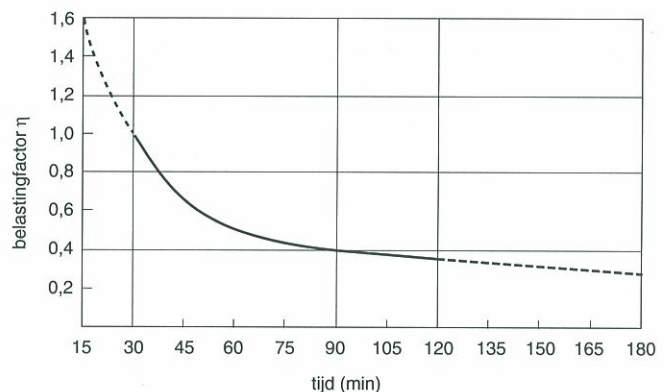
$$\lambda_z = \frac{\ell_{buc,z} \sqrt{12}}{h} \quad (4)$$

Voor centrisch belaste kolommen vervalt voorwaarde (2) en kan formule (1) worden geschreven als:

$$N_\theta \leq \eta 0,83K \frac{f_{ck}}{\gamma_m} A_b \quad (5)$$

Vergelijking rekenresultaten met proeven

De rekenmethode is voor ongewapende buiskolommen geverifieerd met een groot aantal brandproeven op centrisch belaste kolommen [1]. Daartoe is de bezwijkbelasting berekend en vergeleken met de daadwerkelijk tijdens de proef aanwezige belasting. Voor de betondruksterkte is de gemeten waarde na 90 dagen aangehouden; deze varieerde van 30-58 N/mm². Op basis van de discrete waarden voor de belastingfactor η uit tabel 2 is een polynoom afgeleid (afb. 3).



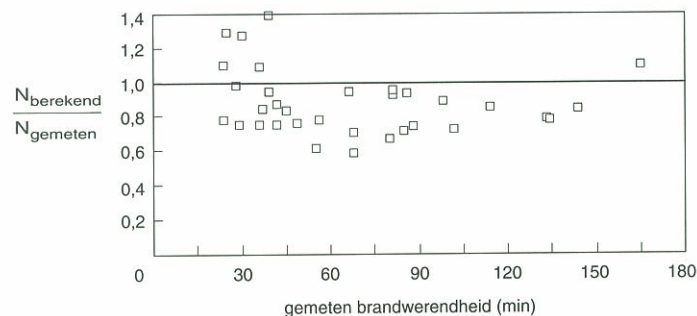
3. Belastingfactor η voor ongewapende buiskolommen, afgeleid uit proefresultaten. Tot 90 minuten brandwerendheid is de grafiek een polynoom, daarboven een rechte lijn. Voor brandwerendheden lager dan 30 of hoger dan 120 minuten is geëxtrapoleerd.

Vergelijk

In afbeelding 4 zijn de berekenings- en proefresultaten vergeleken van ongewapende vierkante buiskolommen, in breedte variërend van 140-350 mm. De systeemlengte bedraagt 3600 mm. De kolommen zijn aan de voet ingeklemd en aan de kop scharnierend bevestigd.

Op de horizontale as is de gemeten brandwerendheid uitgezet en op de verticale as de verhouding tussen berekende en gemeten bezwijkbelasting. Voor de meeste proeven is deze verhouding kleiner dan 1. Dit betekent dat de berekening een veilige benadering oplevert. In zes gevallen was dat niet het geval. Bij drie proeven bedroeg de overschatting van de bezwijkbelasting ongeveer 10% en bij de andere drie 30-40%.

Het blijkt dat de omstandigheden tijdens de brandproeven een grote invloed hebben op het resultaat. Met name bij centrisc belaste kolommen is deze invloed erg groot. Identieke kolomproeven in verschillende laboratoria leveren een verschil in brandwerendheid op van soms meer dan 30 minuten. Het voordeel van de rekenmethode is dat de uitkomsten in elk geval consistent zijn.



4. Vergelijking tussen gemeten en volgens de Engelse richtlijnen [8] berekende opneembare belasting bij brand, op het tijdstip waarop de kolom tijdens de proef bezweek. Centrisc belaste kolommen met $\ell_k = 0,7 \cdot 3,6 = 2,5$ m.

Spreiding

Gelet op de spreiding die bij proeven op gevulde buiskolommen optreedt, geeft de berekeningsmethode een redelijk betrouwbare schatting van de bezwijkbelasting. Dit geldt met name in het gebied rond een brandwerendheid van 60 minuten; het toepassingsgebied waar de grootste aandacht naar uitgaat. De spreiding in de proefresultaten is in de Engelse rekenmethode verwerkt met een extra veiligheidsmarge. Hierdoor valt de berekende brandwerendheid doorgaans wat lager uit dan de brandwerendheid uit een brandproef. Voor gevallen waarvoor een beproevingsrapport beschikbaar is, kan men uiteraard gebruik van maken van de de gunstigere proefresultaten.

Ontwerpgrafieken

Op basis van de Engelse rekenmethode zijn voor ongewapende vierkante buiskolommen ontwerpgrafieken beschikbaar (afb. 5). De grafieken geven de kniklast van een centrisc belaste kolom na een brandduur van 60 minuten voor de volgende parameters:

- kniklengte tussen 1,5 en 4,5 m;
- betonkwaliteit B25, B35 en B45;
- vierkante kokers van 150, 200, 250, 300, 350 en 400 mm.

De grafieken mogen worden gebruikt voor staalsoorten met een vloeigrens van 235, 275 en 355 N/mm² en voor elke wanddikte. De kniklengte bij brand mag in bepaalde gevallen worden gereduceerd [9].

De grafieken gelden voor centrisc belaste kolommen in geschoorde raamwerken. Bij excentriciteiten zijn de formules (1) en (2) te gebruiken. Een andere mogelijkheid is om de momenten uit excentrische belastingen conform artikel 9.2.2 van NEN 6072 (Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdeelen. Staalconstructies) om te rekenen tot een equivalente, centrisc normaalkracht. Dit kan met de eenvoudige rekenregel:

$$N_{eq,\theta} = N_{\theta} + \omega_{buc} \frac{M_{\theta}}{M_{pl}} N_{pl} \quad (6)$$

Hierin is:

$N_{eq,\theta}$ centrisc normaalkracht bij brand, die equivalent is met de belastingcombinatie moment + normaalkracht;

N_{θ} bij brand optredende normaalkracht (belastinggeval brand);

M_{θ} bij brand optredende moment (belastinggeval brand);

ω_{buc} knikfactor bij kamertemperatuur (volgens NEN 6770);

M_{pl} (plastische) momentcapaciteit van het profiel om de beschouwde buigingsas bij kamertemperatuur;

N_{pl} opneembare (plastische) normaalkracht bij kamertemperatuur.

Rekenvoorbeeld

Gegeven. Centrisc belaste kolom in een kantoorgebouw. De draagconstructie is een geschoorde raamwerk met vier bouwlagen met een verdiepinghoogte van elk 3,6 m. De kolom draagt een vloerveld 7×5 m². $G = 3$ kN/m² en $Q = 4$ kN/m², met $\Psi = 0,5$.

Kolomprofiel. Vierkante buis $250 \times 250 \times 6$ (staalsoort vergelijkbaar met FeE 275), gevuld met beton B45 zonder wapening. De geëiste brandwerendheid bedraagt 60 minuten.

Gevraagd. Controleer de gegeven kolom.

Uitwerking. De optredende belasting bij brand in de kolom op de begane grond bedraagt:

$$N_{\theta} = (4 \cdot 3 + 4 \cdot 4 \cdot 0,5) \cdot 7 \cdot 5 = 700 \text{ kN.}$$

De kniklengte mag worden gereduceerd, doordat bij brand de kolom zich gedraagt als zijnde ingeklemd aan beide uiteinden [9]. Daardoor geldt $\ell_{buc,z} = 1800$ mm. Het beton in de kolom heeft een dikte $h = 250 - 12 = 238$ mm. De slankheid van de kolom volgt uit formule (4):

$$\lambda_z = \frac{1800 \sqrt{12}}{238} = 26,2$$

Uit tabel 1 volgt hiermee $K = 0,96$. Met $\eta = 0,509$ (tabel 2) is de opneembare belasting na 60 minuten brand te berekenen als het rechterlid van formule (5):

$$\eta \cdot 0,83K \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_m} A_b = 0,509 \cdot 0,83 \cdot 0,96 \cdot \frac{45}{1,3} \cdot 238^2 = 795 \text{ kN} > N_{\theta} = 700 \text{ kN}$$

De kolom voldoet dus. De waarde voor de kniklast na 60 minuten brand is ook te vinden met de grafiek uit afbeelding 5.

Ontwerppraktijk

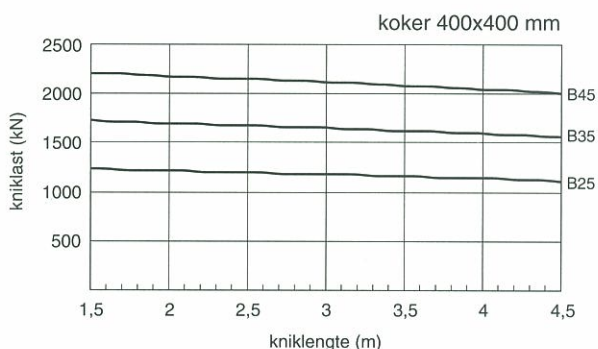
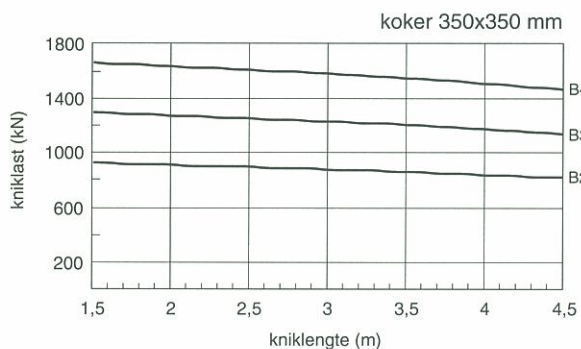
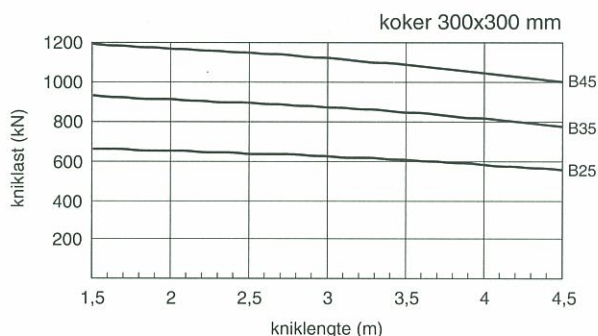
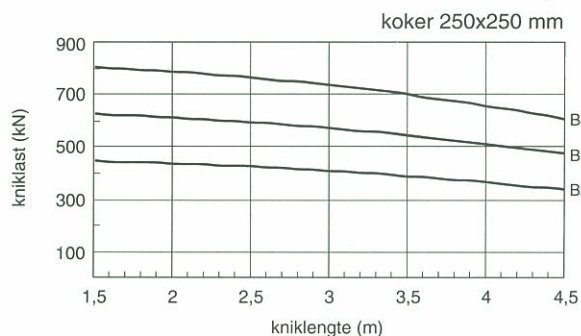
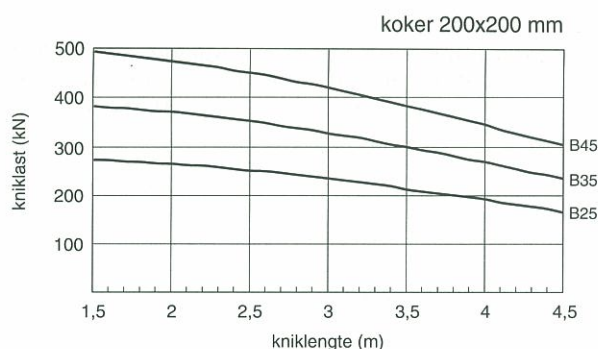
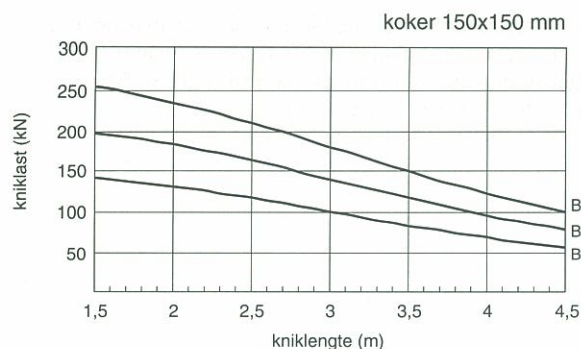
Bij een brandwerendheidseis van 60 minuten of meer is het belastinggeval brand vrijwel altijd maatgevend voor gevulde buiskolommen. In dat geval voldoet zo'n kolom doorgaans ruimschoots bij kamertemperatuur. De constructeur doet er daarom verstandig aan eerst het aspect brandwerendheid te bekijken en daarvoor de optimale kolomdoorsnede te bepalen.

Het is raadzaam een buis te nemen met een minimale wanddikte. Verder is een hoge staalsoort met een vloeigrens van 355 N/mm² niet zinvol, omdat de bijdrage van de stalen buis aan de totale draagkracht bij brand gering is. Een staalsoort vergelijkbaar met FeE 275 of lager is vanuit dat oogpunt gezien een betere keuze.

De constructeur moet vervolgens een afweging maken tussen bijvoorbeeld een gevulde buis van zekere afmetingen met een laag wapeningspercentage (1%), een kleinere buis met een hoger wapeningspercentage (4%) of een grotere buis zonder wapening. Deze afweging geschiedt op basis van esthetische, uitvoeringstechnische en financiële criteria. Overigens bestaan er grote verschillen in de prijs per kilo tussen verschillende kokerprofielen; de afweging kan dus per geval anders uitpakken.

Volgorde

Het ontwerpen van staal-beton kolommen, waarbij tegelijkertijd rekening wordt gehouden met alle belastinggevallen, is nog geen gangbare praktijk in Nederland. Meestal begint men met de dimensionering van de staalconstructie bij kamertemperatuur en komt pas daarna de brandwerendheid aan de beurt. De bijdrage van de betonvulling en van de eventuele wapening wordt dan niet meegenomen bij het ontwerp bij kamertemperatuur; deze bijdrage kan aanzienlijk zijn. Er ontstaat daardoor een onnodige extra draagcapaciteit bij kamertemperatuur. Door het bijzondere belastinggeval brand eerder in het ontwerp te betrekken, zijn vaak doelmatiger oplossingen mogelijk.



5. Ontwerpgrafieken van ongewapende buiskolommen op basis van de Engelse voorschriften [7, 8]. De kniklast na 60 minuten brand is af te lezen als functie van de kniklengte.

Voorbeeld

Neem als voorbeeld een kolom met een lengte van 3,6 m en een centrische belasting bij brand $N_0 = 500$ kN. Onder de voorwaarden genoemd in NEN 6072 gedragen de kolommen zich bij brand als zijnde ingeklemd. In dat geval mag de kniklengte (met uitzondering van de kolommen op de bovenste verdieping) worden gereduceerd tot 1,8 m.

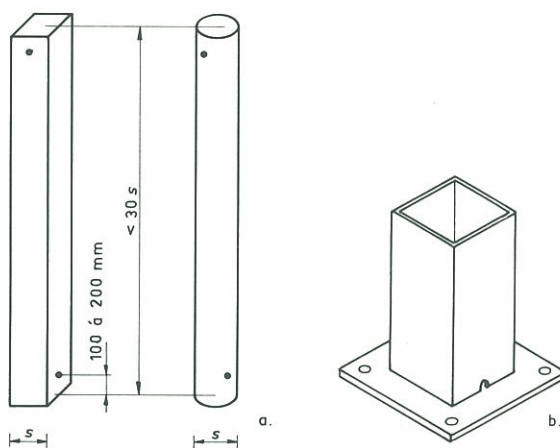
Er zijn nu drie opties om een brandwerendheid van 60 minuten te halen. Hierbij is N_{20} is de bezwijkbelasting bij kamertemperatuur voor een vulling met beton B45:

- 250x250x6 mm zonder wapening; $N_{20} = 1500$ kN;
- 200x200x6,3 mm met 1% wapening (8Ø8); $N_{20} = 1200$ kN;
- 180x180x6,3 mm met 4% wapening (4Ø16 + 4Ø12); $N_{20} = 1050$ kN.

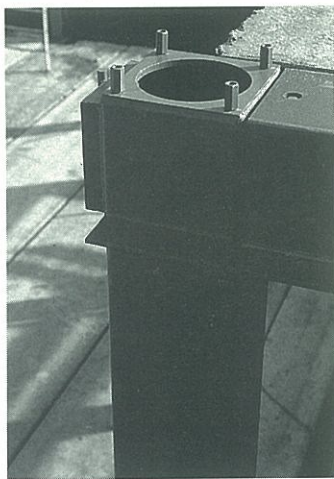
Uitvoering

Een buisprofiel moet ten minste twee gaten van rond 12 mm hebben bij beide kolomeinden. De maximale afstand tussen de gaten bedraagt 30 maal de dwarsafmeting van de kolom (afb. 6) [3]. De gaten zorgen ervoor dat in het beton aanwezige vocht bij brand uit de kolom kan verdampen. Wanneer dat niet mogelijk is, ontstaan in de kolom door waterdamp hoge drukken waardoor de kolom kan 'exploderen'.

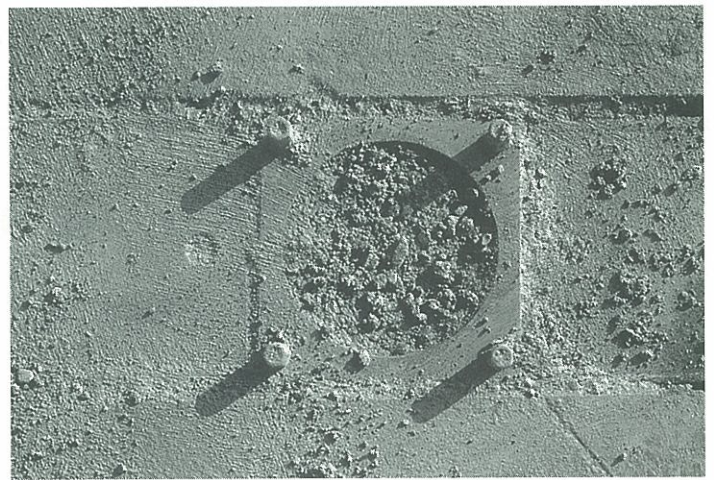
De buizen worden van te voren in de fabriek of van bovenaf op de bouwplaats met beton gevuld (afb. 7). In een recent project is een doorgaande buis over vier bouwlagen in één keer gevuld van onderaf (afb. 8).



6. Gaten in het buisprofiel voorkomen drukopbouw door waterdamp tijdens brand [3].



7. Bedrijfsgebouw Thermopol in Monster. De ongewapende buiskolommen worden van bovenaf gevuld (links) en bezitten een brandwerendheid van 60 minuten (rechts).



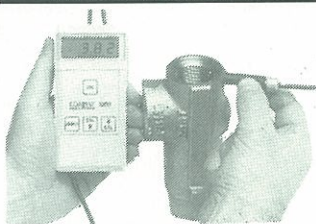
Literatuur

1. J.P. Grimault, *Calcul à l'incendie des profils creux remplis du béton. Manuel Pratique*, uitgave Cometube, Parijs 1982.
2. ECCS werkgroep TC3-Fire safety of steel structures, *Calculation of the fire resistance of centrally loaded composite steel-concrete columns exposed to the standard fire* (Technical note 55), Brussel 1988.
3. *Brandwerendheid van staal-betonekolommen. Deel 2. Stalen buisprofielen gevuld met beton* (CUR/SG/CS rapport 6), uitgave CUR, Staalbouwkundig Genootschap en Centrum Staal, Gouda/Rotterdam 1989.
4. *Eurocode 4* (Design of composite structures. Part 10. Structural Fire Design), april 1990 (draft).
5. L. Twilt, 'Brandveiligheid staal-betonekolommen', *Bouwen met Staal* 63 (1983), p. 9-11.
6. L. Twilt, J. Wardenier en A.K. de Groot, 'Toepassing van buisprofielen bij staal-betonekolommen (3). Beoordeling van het gedrag bij brand', *Bouwen met Staal* 60 (1982), p. 9-17.
7. *Design manual for concrete filled columns. Part 2. Fire resistant design*, uitgave British Steel.
8. *BS 5950* (Structural use of steelwork in building. Part 8. Code of practice for fire resistant design), British Standards Institution, 1990.
9. A.F. Hamerlinck en L. Twilt, 'Brandwerendheid van staalconstructies. Berekeningsmethode volgens NEN 6072', *Bouwen met Staal* 110 (1993), p. 9-15.



8. Kantoorgebouw Haagse Tram Maatschappij in Den Haag. Buiskolommen met wapeningkorven zijn over vier bouwlagen in één keer vanaf de begane grond met beton gevuld (foto: Voorbij Betonbouw, Wilnis).

LAAGDIKTEMETERS



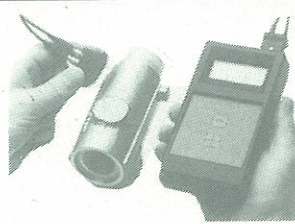
Coatest 1000 Ferro/Non-Ferro laagdiktemeters met vaste of separate meetsonde. Tevens leverbaar met statistische functies.

PORIËN TESTERS



Detectors voor het opsporen van poriën in coatings met een dikte van maximaal 30 mm.

ULTRASONE DIKTEMETER



Ultrasone wanddiktemeter met een meetbereik van 2-250 mm. Wordt ondermeer toegepast voor het meten van *roest van binnenuit*.

GLANSMETERS



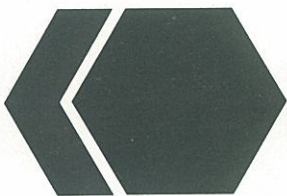
De Rhopoint Novo-Gloss is een serie portabele glansmeters conform nationale en internationale normen zoals: ISO, ASTM, DIN, enz.



EVANO MEETTECHNIEK

MEET- EN TESTAPPARATUUR VOOR COATINGINSPECTIE

Stationsweg 87, 8091 AC Wezep * Postbus 119, 8090 AC Wezep * Tel. 05207 - 65698 * Fax. 05207 - 63055



staalbouwcommissaris

GEEFT U EEN GOEDE RAATLIGGER

CORRESPONDENTIE:
Postbus 822
2003 RV Haarlem

Tel.: 023 - 319259
Fax: 023 - 326680

FABRIEK:
Kernweg 2
1627 LC Hoorn