

Staal-beton constructies vertonen gunstig gedrag bij brand. Het is belangrijk dat betrouwbare en geaccepteerde methoden beschikbaar zijn om de brandweerstand te kunnen berekenen. De toepasbaarheid van de ontwerpregels in NEN-EN 1994, deel 1-2, is onderzocht met een praktijkvoorbeeld. Hoewel de rekenmethodes in het algemeen voldoen, is er een grote behoefte aan de ontwikkeling van ontwerptabellen en -software waarmee in Nederland veel gebruikte constructie-elementen eenvoudig en snel kunnen worden beoordeeld.

Een van de gunstige eigenschappen van staal-beton constructies is het gedrag bij brand. Daarom is het belangrijk dat betrouwbare en geaccepteerde methoden beschikbaar zijn om de brandweerstand van dergelijke constructies te bepalen. In de nieuwe serie Eurocodes is er voor ieder materiaal een afzonderlijk deel waarin het ontwerpen en berekenen van constructies bij brand wordt behandeld. NEN-EN 1994 is de Eurocode waarin het ontwerp en de berekening van staal-beton constructies worden behandeld. Deel 1-1 behandelt de algemene regels en regels voor gebouwen. Ontwerpregels voor het bepalen van de brandweerstand zijn gegeven in het Deel 1-2, waarin voor de materiaaleigen-

De brandwerendheid van de ligger zonder omstorting kan, in aanvulling op de samenwerking tussen beton en staal, verder worden verhoogd door de stalen liggers te bekleden met een brandwerende bekleding of coating. De eerste twee typen worden hieronder nader besproken.

Staal-beton ligger bestaande uit een stalen ligger zonder betonomstorting

Er zijn twee alternatieve modellen gegeven voor de toetsing van een staal-beton ligger zonder omstorting: het kritieke temperatuurmodel en het (meer bewerkelijke) weerstandmodel voor buigend moment. Het kritieke temperatuurmodel is een ver-

Staal en beton samen sterk bij brand

ing. R.J. Stark

Rob Stark is directeur bij SmitWesterman en Stark Partners in respectievelijk Gouda en Delfgauw.

schappen van staal en beton bij hoge temperaturen wordt verwezen naar NEN-EN 1992-1-2 en NEN-EN 1993-1-2. Dit artikel is een bewerking van *literatuur 1*. Er wordt ingegaan op de mogelijkheden om de brandwerendheid van staal-beton constructies te kunnen bepalen met NEN-EN 1994-1-2. Drie elementen worden uitgebreid besproken:

- staal-beton liggers (verbonden met een betonvloer, met of zonder betonomstorting van het staalprofiel);
- staalplaat-betonvloeren;
- staal-beton kolommen.

eenvoudig rekenmodel, dat ook veel wordt toegepast voor stalen liggers zonder samenwerking met beton. Hierbij wordt de kritieke temperatuur θ_{cr} vergeleken met de optredende temperatuur.

Dit model is van toepassing voor liggers die voldoen aan de volgende voorwaarden:

- symmetrische staalprofielen met een maximale hoogte van 500 mm;
- een plaatdikte niet kleiner dan 120 mm;
- samenwerkend in vrij opgelegde liggers die uitsluitend belast zijn door positieve buigende momenten.

Literatuur

1. R.J. Stark, 'Where Steel and Concrete Meet in the Heat', *Composite Construction IV*, Devil's Thumb Ranch, Colorado, USA, 2008 (ccvi.ce.gatech.edu).
2. ENV 1994-1-2: 2005. *Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures – part 1-2: General rules – Structural fire design*.
3. L. Twilt, 'Thermal Response', DIFISEK (Dissemination of Fire Safety Engineering Knowledge), *Working Package 2*, 2005.

Meer informatie over dit onderwerp kan worden verkregen tijdens de cursus Eurocode 4: staal-beton constructies, georganiseerd door Bouwen met Staal in september 2009.

De praktische toepasbaarheid van de rekenmethodes is vastgesteld met een praktijkvoorbeeld: een fitnesscentrum boven de passage van winkelcentrum Spazio in het Stadshart van Zoetermeer (zie *kader p.44/45*).

Staal-beton liggers

NEN-EN 1994-1-2 onderscheidt vier typen liggers (*afb 1*):

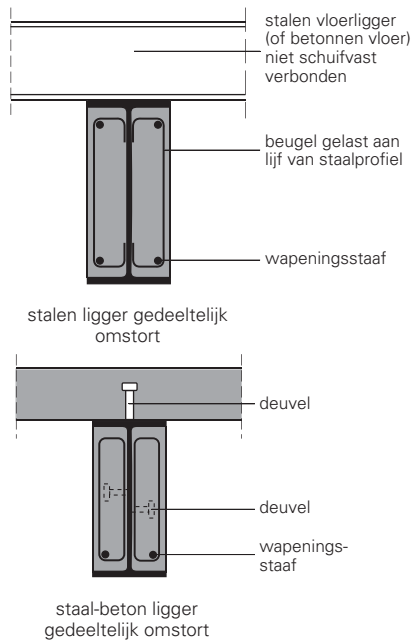
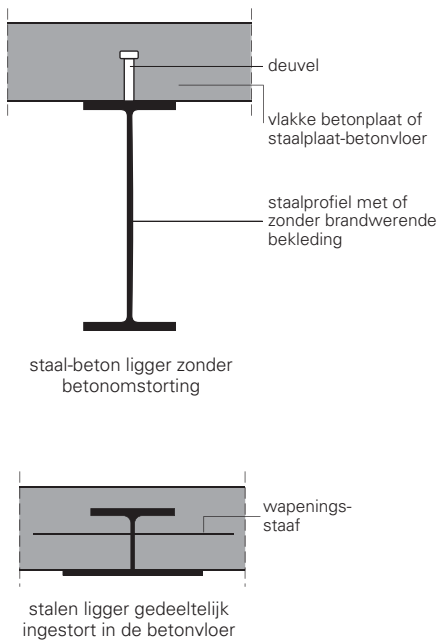
- staal-beton ligger bestaande uit een stalen ligger *zonder* betonomstorting;
- staal-beton ligger bestaande uit een stalen ligger *met* omstorting;
- gedeeltelijk omstorte stalen ligger;
- stalen ligger gedeeltelijk ingestort in de vloer.

Binnen deze randvoorwaarden mag worden aangenomen dat de temperatuur in het staalprofiel gelijkmatig is en dat het gedrag dus vergelijkbaar is met stalen liggers zonder samenwerking. De kritieke temperatuur mag worden bepaald met de belastingsgraad $\eta_{fi,t}$ voor de staal-betonddoorsnede en met de sterkte van staal bij de verhoogde temperatuur volgens de betrekkingen:

- voor 30 minuten brandwerendheid (R30):

$$0,9\eta_{fi,t} = \frac{f_{ay,\theta_{cr}}}{f_{ay}} \quad (1)$$

- in alle andere gevallen:



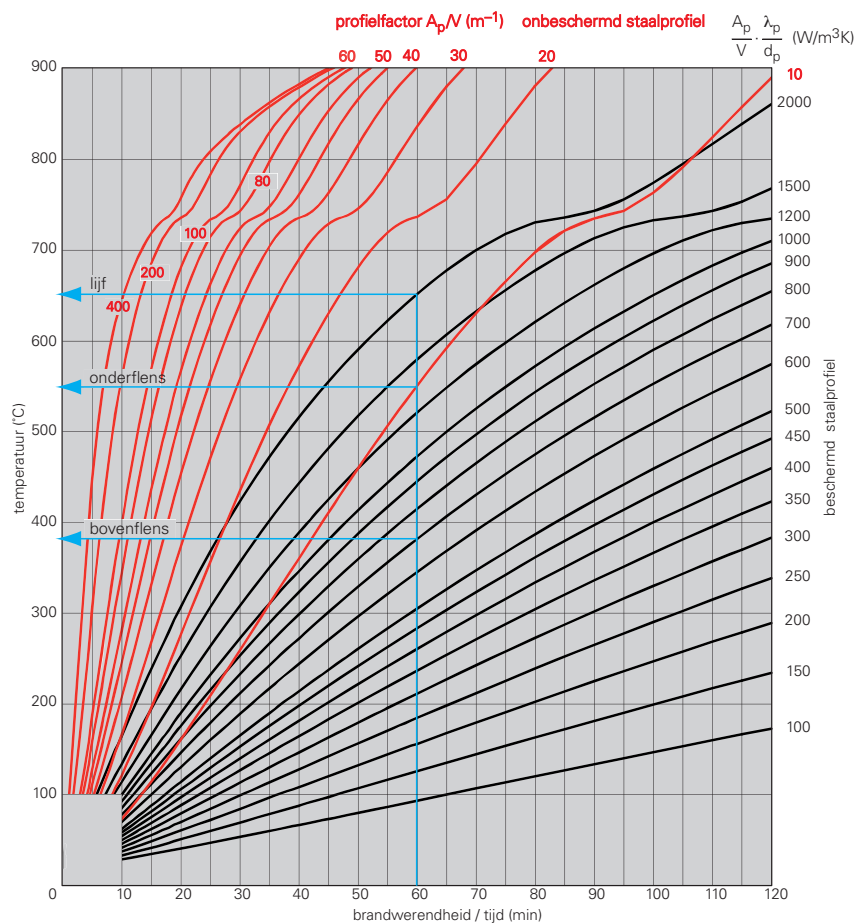
1. Typen staal-beton liggers volgens NEN-EN 1994-1-2.

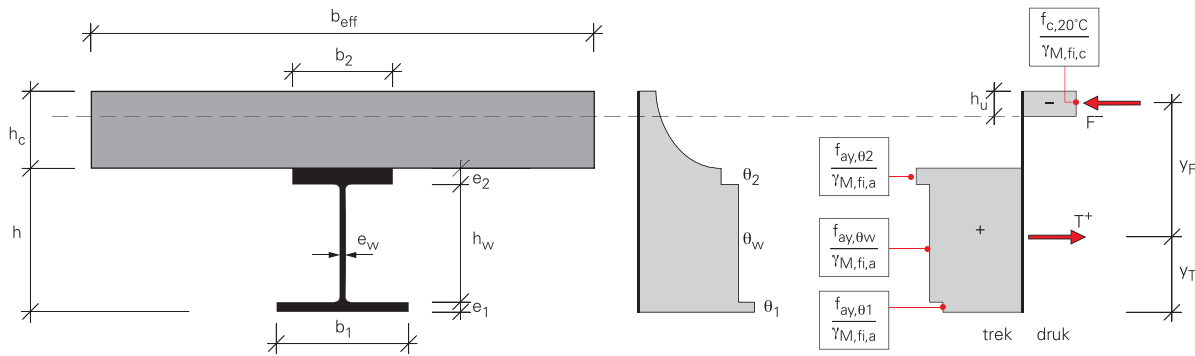
2. ECCS Nomogram 89. De grafiek geeft de relatie tussen brandwerendheid en temperatuur voor verschillende profielfactoren (rood: onbeklede staalprofielen; zwart: beklede staalprofielen).

$$1,0 \eta_{fi,t} = \frac{f_{ay, \theta_{cr}}}{f_{ay}} \quad (2)$$

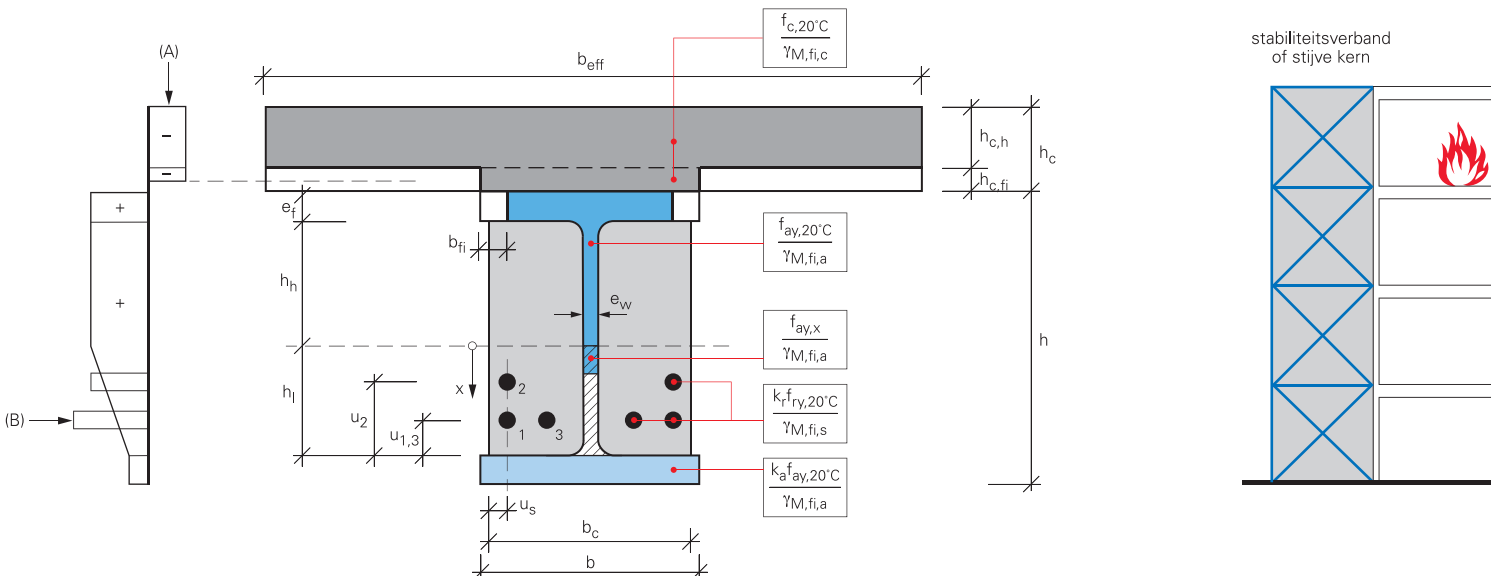
Voor het bepalen van staaltemperatuur in het staalprofiel kan de profielfactor van de onderflens (omtrek/volume) worden gebruikt. In de dagelijkse praktijk is ECCS Nomogram 89 (afb. 2) een handig hulpmiddel. Hierin geven de rode lijnen de onbeklede staalprofielen weer en de zwarte lijnen beklede staalprofielen. Het subscript 'fi' wordt gebruikt voor factoren en belastingen bij brand (van 'fire').

Het weerstandmodel voor het buigend moment is gegeven in de informatieve Annex E van NEN-EN 1994-1-2, die in de Nationale Bijlage normatief is verklaard. Bij het gebruik van dit model mag de weerstand voor het buigend moment worden berekend met de plasticiteitstheorie, waarbij rekening wordt gehouden met de verandering van de materiaaleigenschappen afhankelijk van de temperatuur. De plasticiteitstheorie mag worden gebruikt voor alle doorsnedeklassen, behalve voor klasse 4 (NEN-EN 1994-1-2; 4.3.4.1.2). Voor de weerstand bij negatieve momenten mag het model worden toegepast voor profielen met doorsnedeklasse 1 of 2 onder brandcondities. Voor klasse 3 en 4 zijn de volgende vereenvoudigingen gegeven.





3. Momentweerstandmethode; spanningsverdeling voor de berekening van een positief moment.



4. Schema voor het berekenen van het positieve moment in een gedeeltelijk omstorte stalen ligger verbonden met een betonplaat.

5. Constructief gedrag van kolommen

- Indien het stalen lijf of de onderflens van de staal-beton doorsnede bij brand klasse 3 is, mag de breedte worden gereduceerd tot een meewerkende waarde volgens NEN-EN 1993-1-5.
- Indien het stalen lijf of de onderste stalen flens van de staal-beton doorsnede bij brand in klasse 4 valt, moet de weerstand ervan worden verwaarloosd.

De spanningsverdeling is weergegeven in afbeelding 3. Uit het krachterevenwicht kan de momentweerstand worden bepaald.

Een gedeeltelijk omstorte stalen ligger verbonden met een betonplaat

Het model is gebaseerd op een brandbelasting aan de onderzijde van de ligger volgens de standaard brandkromme. Aangenomen wordt dat het profiel driezijdig wordt blootgesteld aan brand. De plasticiteitstheorie wordt gebruikt. NEN-EN 1994-1-2 geeft regels voor het berekenen van de momentweerstand bij verschillende waarden van de brandwerendheid. Het effect van temperaturen op de materiaaleigenschappen kan in rekening worden gebracht door de afmetingen van de samenstellende delen van de doorsnede te reduceren, of door de

karakteristieke mechanische eigenschappen te vermenigvuldigen met een reductiefactor. Voor onderflens en lijf van het staalprofiel, en wapening tussen de flenzen wordt de volledige doorsnede met een gereduceerde sterkte meegenomen. Bij de betonomstorting, onderkant plaat en de uiteinden van de bovenflens worden de delen die worden beïnvloed door de blootstelling aan brand verwaarloosd (afb. 4).

Ontwerptabellen

De hierboven vermelde eenvoudige rekenregels zijn weliswaar toepasbaar, maar voor de dagelijkse praktijk veelal nog te bewerkelijk. Als alternatief zijn in NEN-EN 1994-1-2 ontwerptabellen gegeven, zie bijvoorbeeld tabel 1. Ze zijn beschikbaar voor twee typen:

- staal-beton ligger bestaande uit een gedeeltelijk omstorte stalen ligger.
- staal-beton ligger bestaande uit volledig omstorte stalen ligger, waarbij de beton fungeert als brandwerende bekleding.

Staalplaat-betonvloeren

Bij blootstelling aan brand volgens de standaard brandkromme, moeten staalplaat-betonvloeren voldoen aan de criteria draag-

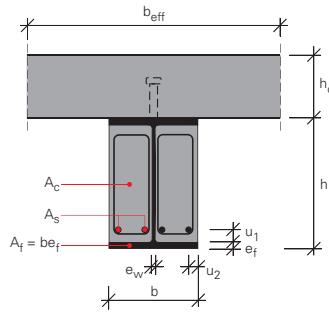
vermogen (mechanische weerstand R) en scheidend vermogen (isolatie I en integriteit E). In NEN-EN 1994-1-2 zijn rekenregels gegeven voor beklede en niet beklede staalplaat-betonvloeren. Bij toepassing van staalplaat-betonvloeren die binnen het toepassingsgebied van de Eurocode vallen, mag worden aangenomen dat aan het integriteitcriterium E wordt voldaan. In NEN-EN 1994-1-2; annex D is een rekenmethode gegeven voor toetsing van de criteria isolatie I en mechanische weerstand R van onbeklede staalplaat-betonvloeren. In de dagelijkse praktijk worden ontwerptabellen van de fabrikanten gebruikt om de weerstand van de staalplaat-betonvloeren bij brand te bepalen.

Staal-beton kolommen

Het berekeningsmodel gegeven in NEN-EN 1994-1-2 mag alleen worden toegepast voor kolommen in geschoorde raamwerken die alzijdig worden verhit conform de standaard brandkromme.

Het berekeningsmodel voor het berekenen van de weerstand van centrisch belaste kolommen tijdens brand is opgesplitst in twee afzonderlijke delen.

1. Berekenen van de ontwerpwaarde van het



Toepassingsvoorwaarden:

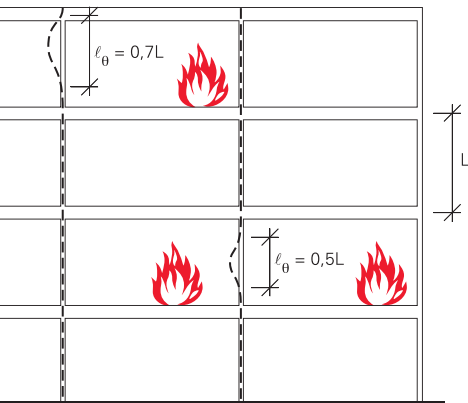
$$h_c \geq 120 \text{ mm}; \quad b_{\text{eff}} \leq 5 \text{ m}$$

$$\frac{b}{e_w} \geq 15; \quad \frac{e_f}{e_w} \leq 2$$

$$\frac{A_s}{A_c + A_s} \leq 5\%$$

Tabel 1. Minimale doorsnede-afmetingen b_{min} en minimale bijlegwapening in verhouding tot de oppervlakte van de flens A_s/A_f voor vrij opgelegde staal-beton liggers bestaande uit gedeeltelijk omstorte stalen liggers.

		brandwerendheid (min)							
		30		60		90		120	
belasting	hoogte	b_{min} (mm)	A_s/A_f (%)	b_{min} (mm)	A_s/A_f (%)	b_{min} (mm)	A_s/A_f (%)	b_{min} (mm)	A_s/A_f (%)
0,3	$h \geq 0,9b_{\text{min}}$	70	-	100	-	170	-	200	-
	$h \geq 1,5b_{\text{min}}$	60	-	100	-	150	-	180	-
	$h \geq 2,0b_{\text{min}}$	60	-	100	-	150	-	180	-
0,5	$h \geq 0,9b_{\text{min}}$	80	-	170	-	250	0,4	270	0,5
	$h \geq 1,5b_{\text{min}}$	80	-	150	-	200	0,2	240	0,3
	$h \geq 2,0b_{\text{min}}$	70	-	120	-	180	0,2	220	0,3
	$h \geq 3,0b_{\text{min}}$	60	-	100	-	170	0,2	200	0,3
0,7	$h \geq 0,9b_{\text{min}}$	80	-	270	0,4	300	0,6	-	-
	$h \geq 1,5b_{\text{min}}$	80	-	240	0,3	270	0,4	300	0,6
	$h \geq 2,0b_{\text{min}}$	70	-	190	0,3	210	0,4	270	0,5
	$h \geq 3,0b_{\text{min}}$	70	-	170	0,2	190	0,4	240	0,5
	$h \geq 3,0b_{\text{min}}$	70	-	170	0,2	190	0,4	240	0,5



ommen in een geschoord raamwerk.

temperatuurverloop in de staal-beton doorsnede na een bepaalde tijd van blootstelling aan de brand conform een warmtestroom-berekening op basis van de uitgangspunten in NEN-EN 1991-1-2. Voor het bepalen van dit temperatuurverloop zijn numerieke berekeningen noodzakelijk.

2. Berekenen van de ontwerpwaarde van de axiale knikbelasting $N_{fi,Rd}$, behorende bij het temperatuurverloop als vastgesteld in stap 1. De procedure is hetzelfde als bij normale temperatuur, doch met aangepaste materiaaleigenschappen

De ontwerpwaarde van de axiale normaalkracht bij een staal-betonkolom bedraagt:

$$N_{fi,Rd} = \chi N_{fi,pl,Rd} \quad (3)$$

Hierin is χ de knikfactor volgens knikkromme c van NEN-EN 1993-1-1; 6.3.1, die afhankelijk is van de relatieve slankheid tijdens brand. De relatieve slankheid volgt uit:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \sqrt{\frac{N_{fi,pl,Rd}}{N_{fi,cr}}} \quad (4)$$

De ontwerpwaarde van de plastische weerstand $N_{fi,pl,Rd}$ tijdens brand kan worden

bepaald met (formules ontleend aan NEN-EN 1994-1-2):

$$N_{fi,pl,Rd} = \frac{\sum_j (A_{a,\theta} f_{ay,\theta}) / \gamma_{M,fi,a} + \sum_k (A_{s,\theta} f_{sy,\theta})}{\gamma_{M,fi,s} + \frac{\sum_m (A_{c,\theta} f_{c,\theta})}{\gamma_{M,fi,c}}} \quad (5)$$

En de Eulerse knikkracht tijdens brand volgt uit:

$$N_{fi,cr} = \frac{\pi^2 (EI)_{fi,eff}}{\ell_{\theta}^2} \quad (6)$$

Om de invloed van thermische spanningen in rekening te brengen worden voor de berekening van de effectieve buigstijfheid de waarden gereduceerd met de factor $\varphi_{i,q}$.

$$(EI)_{fi,eff} = \sum_j (\varphi_{a,\theta} E_{a,\theta} I_{a,\theta}) + \sum_k (\varphi_{s,\theta} E_{s,\theta} I_{s,\theta}) + \sum_m (\varphi_{c,\theta} E_{c,sec,\theta} I_{c,\theta}) \quad (7)$$

De kniklengte van de kolommen mag worden bepaald volgens afbeelding 5.

In NEN-EN 1994-1-2 zijn ontwerptabellen en rekenregels gegeven voor verschillende soorten staal-beton kolommen. Voor een

snelle en ook nauwkeurigere berekening van beton gevulde buisprofielen is het speciaal hiervoor ontwikkelde programma Potfire beschikbaar.

Conclusie

In Nederland worden de staal-beton liggers over het algemeen ontworpen zonder beton omstorting. Om de benodigde brandweerstand te bereiken worden de profielen vaak bekleed met een brandwerende bekleding of voorzien van een coating. In NEN-EN 1994-1-2 zijn geen ontwerptabellen gegeven voor dit type liggers. Er is ook nog geen software voor beschikbaar.

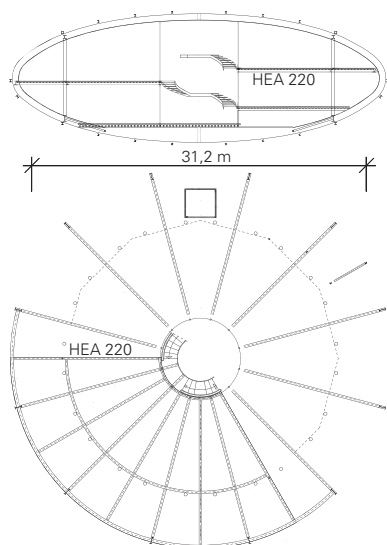
Over de vloeren kan worden geconcludeerd dat de tabellen van de fabrikanten voldoen in de behoefte. Voor speciale gevallen kan gebruik worden gemaakt van de rekenmodellen in NEN-EN 1994-1-2.

De tabellen voor kolommen in NEN-EN 1994-1-2 zijn makkelijk in gebruik. Het toepassingsgebied is echter beperkt. Voor sommige typen kolommen zijn geen ontwerptabellen beschikbaar. Met name voor de in Nederland vaak toegepaste betongevulde buisprofielen zijn aanvullende ontwerptabellen wenselijk. Wellicht een taak voor CUR en Bouwen met Staal? •

Het fitnesscentrum is door Frits van Dongen van de Architecten Cie. ontworpen als een UFO op de passage van het winkelcentrum Spazio midden in Zoetermeer. Door het lage gewicht van de staal-beton constructie zijn drie slanke staal-beton kolommen voldoende om de gehele constructie te dragen. De ronde vakwerkligger die zij ondersteunen is de hoofddrager in de UFO. Gebogen H-profielen loodrecht op deze vakwerkligger verdelen de UFO in twaalf gelijke taartpunten. Tussen de gevel en het centrale trappenhuis zijn staalplaat-betonvloeren aangebracht op staalbeton liggers (afb. 6, 7, en 8). De vereiste brandwerendheid van de hoofd draagconstructie bedraagt 90 minuten. Voor de tussenvloeren, die geen onderdeel uitmaken van de hoofd draagconstructie, geldt een eis van 30 minuten.



6. Het fitnesscentrum boven de passage van winkelcentrum Spazio.



7. Draagconstructie UFO, langsdoorsnede.

8. Draagconstructie, bovenaanzicht.

Berekening 1: Staal-beton ligger

Volgens de kritieke temperatuurmethode.

Materiaalgegevens en afmetingen

- stalen ligger: HEA 220A (S235);
- staalplaat-betonvloer: Comflor 70; $h_c = 170$ mm; $f_{yp} = 320$ N/mm²; betonkwaliteit C20/25;
- profielfactor van de onderflens (omtrek/volume) = $2 \cdot (220+11) / (220 \cdot 11) = 191$ mm.

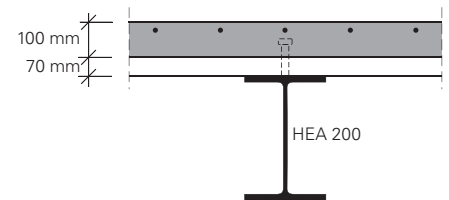
Belastingen

- $G_{k,1} = 4,0$ kN/m; $G_{k,2} = 14,0$ kN/m;
- $Q_{k,1} = 5,0$ kN/m; $Q_{k,2} = 17,5$ kN/m; $\psi_f = 0,5$;
- $Q_{fi,d,1} = 4,0 + 0,5 \cdot 5,0 = 6,5$ kN/m; $Q_{fi,d,2} = 14,0 + 0,5 \cdot 17,5 = 8,8$ kN/m.

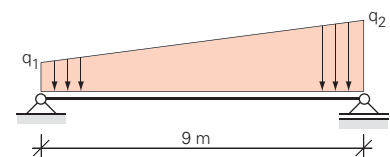
Berekening belastinggraad en kritieke temperatuur

- momentweerstand staal-beton ligger bij normale temperatuur: $M_{pl,Rd} = 291$ kNm;
- optredend moment en dwarskracht bij brand: $M_{fi,Ed} = 146$ kNm; $V_{fi,Ed} = 78$ kN;
- belastinggraad: $\eta_{fi,t} = M_{fi,Ed} / M_{pl,Rd} = 146/291 = 0,5$;
- $k_{y,0cr} = 0,9 \cdot \eta_{fi,t} = 0,9 \cdot 0,5 = 0,45$. De verhouding van de toelaatbare vloeispanning bij brand/ de toelaatbare vloeispanning bij kamertemperatuur ofwel $f_{ay,0cr} / f_a$;
- kritieke temperatuur (NEN-EN 1994-1-2, formule 4.22): $\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln(1/(0,9674 \cdot k_{y,0cr}^{3,833}) - 1) + 482 = 585$ °C.

11. Staal-beton ligger in het werk, voor het aanbrengen van de betonvloer.



9. Schetsmatige dwarsdoorsnede van de ligger.



10. Statisch schema en belasting op de ligger.

Controle

Uit afbeelding 2 volgt dat de staaltemperatuur na 30 minuten hoger is dan 800 °C. De kritieke temperatuur is $\theta_{a,cr} = 585$ °C. Deze constructie voldoet dus niet aan de eisen voor brandwerendheid. Dit zou kunnen worden verholpen door brandwerende bekleding toe te passen. De benodigde dikte d_p daarvan kan eveneens met afbeelding 2 worden bepaald. Bij een kritieke temperatuur van $\theta_{a,cr} = 585$ °C, is voor een brandwerendheid van 30 minuten een profielfactor ≥ 2000 nodig. Brandwerende bekleding verhoogt de feitelijke profielfactor met een factor λ_p/d_p (waarin λ_p de thermische geleidbaarheid van de isolator is). In dit geval geldt dus: $191 \cdot \lambda_p/d_p \geq 2000$, dus: $\lambda_p/d_p \geq 10,5$. Bij een thermische geleidbaarheid van $\lambda_p = 0,035$ W/mK is de minimale dikte d_p van het brandwerend materiaal dan 3,3 mm.

Berekening 2: Staal-beton kolom

Materiaalgegevens en afmetingen

- ronde staal-beton kolom met volledige omstort profiel HD 400x216 (S355);
- beton: ronde omstorting, $d = 700$ mm (C30/35);
- wapening: 8 $\varnothing 25$ (S500);
- $L_{by} = L_{bz} = 5400$ mm

Belastingen

- $G_k = 8762$ kN;
- $Q_k = 2394$ kN; $\psi = 0,5$;

Berekening belastinggraad

- $N_{pl,Rd} = 19.376$ kN;
- $N_{Rd,z} = 16.560$ kN;
- $N_{fi,d} = 8762 + 0,5 \times 2394 = 9959$ kN;
- $\eta_{fi} = 9959 / 16.560 = 0,6$.

Controle

Omdat de vloeren van de onderliggende winksels ook op de kolommen rusten is getoetst aan de eisen die horen bij een brandwerendheid van 120 minuten. De controle-eisen zijn bepaald met *tabel 2* (NEN-EN 1994-1-2, tabel 4.4).

- voor de kolombreedte en dikte: b_c and $h_c \geq 350$ mm;
- voor de wapeningsdekking: $c \geq 50$;
- voor de minimale hart-op-hart afstand tussen wapeningsstaven: $u_s \geq 30$.

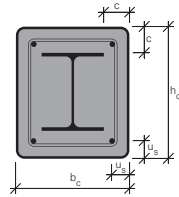
Voor de toegepaste kolom geldt: $b_c = h_c = 700$ mm, $c = 350 - 200\sqrt{2} = 67$ mm en $u_s = 60$ mm. Het ontwerp voldoet dus.

Tabel 2. Minimale waarden van de doorsnede en van de betondekking van (rechthoekige) staal-beton kolommen, bestaande uit volledig omstorte staalprofielen. Keuze uit twee alternatieve oplossingen.

	standaard brandwerendheid					
	R30	R60	R90	R120	R180	R240
doorsnede-afmetingen h_c en b_c (mm) ^a	150	180	220	300	350	400
1 dekking op staalprofiel c (mm)	40	50	50	75	75	75
dekking tot hart wapening u_s (mm)	20 ^b	30	30	40	50	50
doorsnede-afmetingen h_c en b_c (mm) ^a	-	200	250	350	400	-
2 dekking op staalprofiel c (mm)	-	40	40	50	60	-
dekking tot hart wapening u_s (mm)	-	20 ^b	20 ^b	30	40	-

a. Volgens de auteur geldt de tabel ook voor rechthoekige en ronde doorsneden, mits voor h_c en h_b tenminste de minimale afmetingen worden aangehouden.

b. Deze waarden behoren te zijn getoetst volgens NEN-EN 1992-1-1, art. 4.4.1.2.



12. Volledig omstorte staal-beton kolom in het werk.