Werkelijke gedrag van een staalconstructie bij brand onderzocht

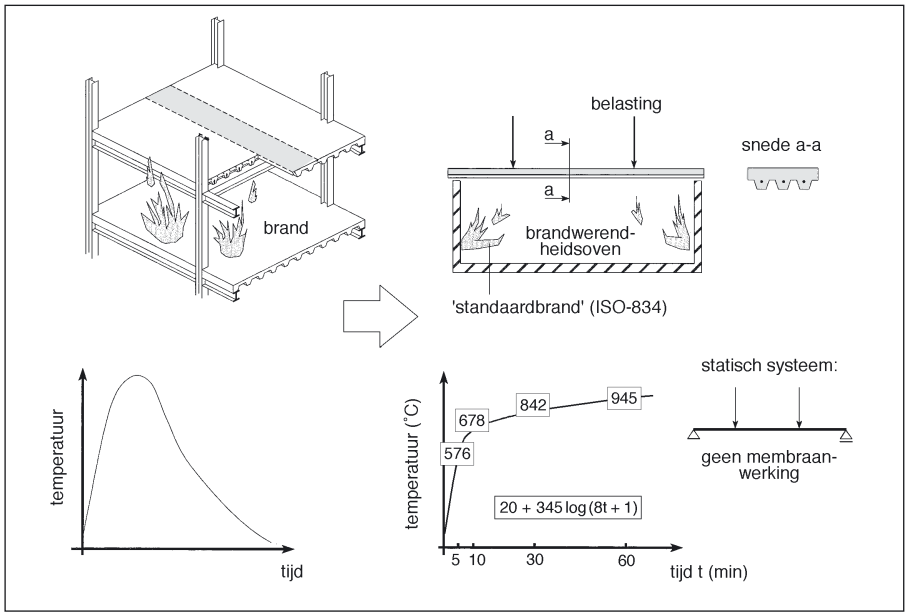
De brandveiligheid van een complete constructie wordt nog steeds beoordeeld op basis van het gedrag van afzonderlijke constructie-onderdelen bij een standaardbrand. Maar uit onderzoek èn uit echte branden weten we dat het draagvermogen van een staalconstructie in verdiepinggebouwen bij een werkelijke brand veel groter kan zijn. Zelfs zonder een brandwerende bescherming blijft een staalconstructie veelal intact. In het Engelse Cardington loopt een onderzoek naar het werkelijke gedrag bij brand van een kantoorgebouw van acht bouwlagen met een staalskelet met staalplaat-betonvloeren. Dit artikel geeft aan wat het onderzoek inhoudt en laat de eerste resultaten zien.

ir. L. Twilt en ir. C. Both
TNO Bouw, Centrum voor Brandveiligheid, Rijswijk

De brandwerendheid van een complete draagconstructie wordt traditioneel beoordeeld op basis van het gedrag van onderdelen van die draagconstructie. Bovendien gaat men bij brandproeven op bijvoorbeeld kolommen en liggers niet uit van de werkelijke omstandigheden bij brand, maar van de zogeheten standaardbrand *(afb. 1)*.
Een nadeel van deze aanpak is dat het niet mogelijk is het effect van herverdeling van belasting en van membraanwerking vast te stellen. Dit levert voor staalconstructies met staalplaat-betonvloeren (of meer algemeen: met een staal-beton constructie) in het algemeen conservatieve resultaten op. Dat bleek bijvoorbeeld bij echte branden, zoals in een ziekenhuis in Liverpool (1978) en het kantorencomplex Broadgate[1/2/3] in Londen (1990, zie kader). Ook realistische brandproeven in Amerika, Australië en Engeland[4] bevestigen dat een moderne staalconstructie een groter incasseringsvermogen heeft bij brand dan volgens een beoordeling op grond van standaardbrandproeven.
In een enorme zeppelin-hangar uit het begin van deze eeuw bij het Engelse plaatsje Cardington, loopt op dit moment een groot onderzoek naar het werkelijke gedrag van staalconstructies bij brand *(afb. 2)*. Inmiddels is een kantoorgebouw van acht bouwlagen met een staalskelet en staalplaat-betonvloeren blootgesteld aan realistische brandomstandigheden. De partners in dit onderzoek zijn British Steel (BS), Building Research Establishment (BRE), beide uit Engeland, Centrum voor Brandveiligheid TNO uit Nederland en het Centre Technique Industriel de la Construction Metallique (CTICM) uit Frankrijk. Bij het onderzoek zijn ook betrokken de Sheffield University en het Steel Construction Institute (SCI), beide eveneens uit Engeland.

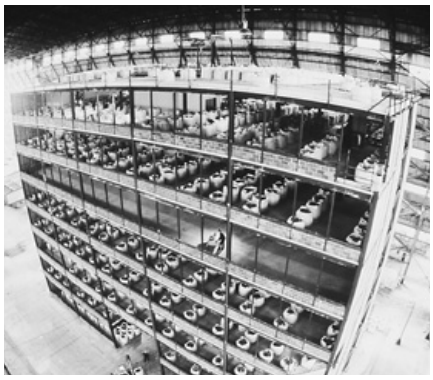
Doel en opzet

Er bestaat steeds grotere behoefte aan een meer rationele beoordelingsmethode voor het gedrag van complete staalconstructies onder realistische brandomstandigheden. Immers, door herverdeling van krachten, bijvoorbeeld via membraanwerking, kan de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken van een complete draagconstructie aanzienlijk toenemen. Dit in vergelijking met de brandwerendheid van de afzonderlijke componenten. Bovendien wijkt de thermische belasting door een natuurlijke brand aanzienlijk af van die van de standaardbrand.
Een probleem bij het ontwikkelen van een rationele beoordelingsmethode – waarbij de herverdeling van krachten in rekening wordt gebracht – is dat niet kan worden volstaan met het verzamelen van informatie uit standaardbrandproeven op onderdelen van de draagconstructie. Daartoe is het nodig dat uitgebreide en gedetailleerde informatie



1. Het standaardbrandconcept: de brandwerendheid wordt bepaald aan de hand van een proef op een constructie-onderdeel, blootgesteld aan de standaardbrand; membraankrachten worden uitgesloten.

2. De zeppelin-hangar, met daarin het gebouw van acht bouwlagen. Zandzakken simuleren de veranderlijke belasting.



Broadgate

Op 23 juni 1990 ontstond brand in een bijna gereed kantoorgebouw in Londen. Dit gebouw telt dertien bouwlagen en heeft een staalskelet met staalplaat-betonvloeren. De kolommen zouden 90 minuten brandwerend worden bekleed en de liggers 60 minuten, verder was er een sprinklerinstallatie en een branddetectie- en alarmeringssysteem voorzien. Op het moment van de brand verkeerde de uitvoering van het gebouw in de eindfase: de constructie was voltooid en de gordijngevel bijna volledig gemonteerd. De brandwerende bekleding was echter nog niet volledig aangebracht; de kolommen op de eerste verdieping waren nog niet beschermd. Ook de blus- en detectiesysteem ontbraken nog.

De brand ontstond op de eerste verdieping in een aannemerskeet van 40×12 m^2 met dertien ingerichte vertrekken voor onderaannemers en duurde bijna vijf uur. Gedurende twee uur was er sprake van een hevige brand met maximale temperaturen van ongeveer 1000 °C.

De constructie is niet bezweken, hoewel er wel sprake was van grote vervormingen. De constructieve schade bleef beperkt tot een gebied van 40x20 m^2, waar de brand het hevigst is geweest, en is daarna relatief eenvoudig gerepareerd.

beschikbaar komt uit realistische brandproeven. Dergelijke proeven zijn echter complex en extreem duur.

Weliswaar bestaat in principe de mogelijkheid de herverdeling van krachten rekenkundig te onderzoeken met geavanceerde rekenmodellen, maar dergelijke modellen moeten wel zijn gevalideerd op basis van realistische brandproeven.

Het nu lopende onderzoek in Cardington is een belangrijke stap naar een meer rationele beoordelingsmethode. Het doel van het onderzoek is tweeledig:

- bepalen van het brandgedrag van een complete staalconstructie onder realistische omstandigheden;
- evalueren van numerieke modellen op basis van de resultaten van de brandproeven.

Proeven

In Cardington zijn vier brandproeven uitgevoerd op een staalskelet met staalplaat- betonvloeren, waarbij de omvang van de proef telkens is vergroot (*afb. 4* en *tabel 1*). Door de verbinding met deuvels werken de vloerliggers als staalbeton liggers.

Begonnen is met een relatief eenvoudige brandproef op een onbeschermde, secundaire staal-beton ligger. De ligger is ingeklemd in de aangrenzende constructie. De thermische uitzetting is gedeeltelijk verhinderd door de verbinding met de rest van de draagconstructie. Door membraanwerking was een herverdeling van krachten mogelijk.

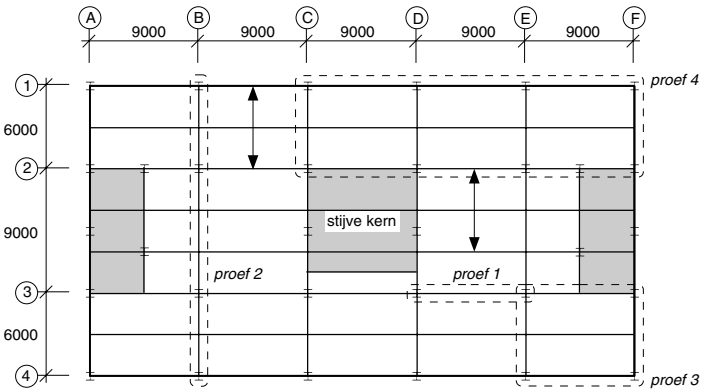
De tweede proef geschiedde op een raamwerk van vier beschermde kolommen en drie onbeschermde, primaire staal-beton liggers. De derde proef vond plaats in een hoek van het gebouw. Hier is een brandcompartiment gemaakt met vier beschermde kolommen, twee beschermde randliggers en één onbeschermde primaire ligger en één onbeschermde secundaire ligger. Als laatste is een compleet ingerichte kantoorruimte met een oppervlak van 9×18 m^2 in brand gestoken.

Van de eerste drie proeven zijn de resultaten vergeleken met de uitkomsten van numerieke simulaties. Deze simulaties zijn uitgevoerd door het Centrum voor Brandveiligheid TNO, gebruik makend van het eindige-elementen programma DIANA.

Ingeklemde ligger

De eerste proef betrof een constructie-onderdeel, namelijk een ingeklemde ligger met een overspanning van 9 m. Met deze proef is het effect van de inklem-

3. Detail van de constructie: de liggers bleven onbekleed, op de kolom moet de bekleding nog worden aangebracht.



4. Plattegrond van het gebouw, met de plaats en de grootte van de vier brandproeven.

Tabel 1. Kenmerken van de brandproeven.

proef	omschrijving	brandwerende bekleding				brandstof
		kolommen	primaire liggers	secundaire liggers	randliggers	
1	ingeklemde ligger	n.v.t.	n.v.t.	nee	n.v.t.	gas
2	raamwerk	gedeeltelijk (a)	nee	n.v.t.	n.v.t.	gas
3	hoekconfiguratie	ja (b)	nee	nee	ja	houtkribben
4	kantoorconfiguratie	ja (b)	nee	nee	gedeeltelijk	meubilair

a. Bovenste 200 mm van de kolommen is onbeschermd.
b. De verbinding met de liggers is onbeschermd.

ming en de verhinderde thermische uitzetting onderzocht. In de numerieke simulatie zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd.

- De vloer van de staalplaat-betonvloer is gemodelleerd met 8-knoops schaalelementen en de ribben met 3-knoops balkelementen, waarbij de wapening en de staalplaat als ingebedde wapening is meegenomen (*afb. 5*). De stalen ligger is gemodelleerd met 3-knoops balkelementen, waarbij de onderflens en het lijf apart zijn gemodelleerd, zodat lokaal plooien van de onderflens in rekening kan worden gebracht.
- De thermische gradiënt in de staalplaat-betonvloer is geschematiseerd op basis van het gemeten verschil tussen de temperatuurontwikkeling van de onder- en bovenflens van de staalplaat en die aan de niet-verhitte zijde; voor de ligger zijn de gemeten temperaturen aangehouden.
- De mechanische materiaaleigenschappen zijn ingevoerd op basis van gemeten waarden; de verbindingen zijn volledig stijf aangenomen.

De resultaten van het experiment en de numerieke simulatie zijn vergeleken in termen van de maximale doorbuiging (*afb. 6*). De overeenstemming blijkt bevredigend. Wel blijven na 50 minuten de berekende doorbuigingen wat achter bij de gemeten waarden. Dat komt door de schematisering van de temperatuurverdeling in de staalplaat-betonvloer. In een verdere studie wordt aan dit aspect aandacht geschonken. Belangrijk is verder dat, ondanks de vrij hoge staaltemperaturen van meer dan 800 °C, in de proef geen bezwijken optrad! Het numeriek model bevestigt dit.

Raamwerk

De tweede proef betrof een driebeukig raamwerk met een maximale overspanning van 9 m. De kolommen hadden een brandwerende bekleding tot 200 mm onder het niveau van de onderflens van de primaire liggers; de verbindingen waren onbeschermd. Deze situatie is in het numerieke model meegenomen.
Het model is in principe gelijk aan dat van de ingeklemde ligger. Er zijn echter twee verschillende scenario's geanalyseerd:

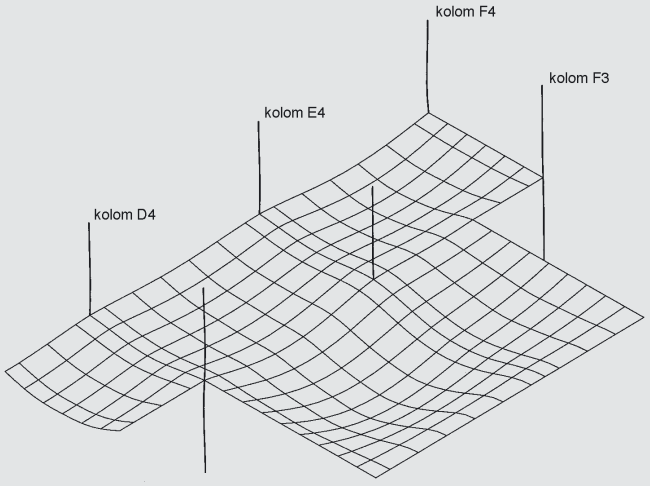
- een compleet raamwerk, inclusief de aansluitende staalplaat-betonvloeren;
- uitsluitend de primaire liggers, dat wil zeggen het raamwerk zonder de kolommen; van de staalplaat-betonvloeren is slechts de liggerwerking in rekening gebracht.

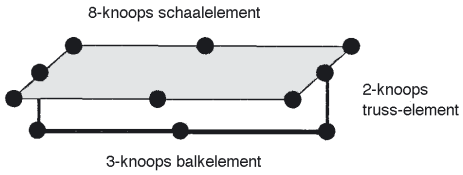
Het tweede scenario is representatief voor een traditionele standaardbrandproef voor het bepalen van de brandwerendheid. De meewerkende breedte van de staalplaat-betonvloer is ingeschat aan de hand van de rekenregels uit ENV 1994-1-15. In beide scenario's is dezelfde temperatuurverdeling aangehouden.
De resultaten van de numerieke simulatie van het complete raamwerk staan in *afbeelding 7*. Hierin zijn de gemeten en de berekende maximale doorbuigingen van de primaire ligger aangegeven als functie van de tijd. Na ongeveer 100 minuten treden in kolom B3 belangrijke plastische vervormingen op (*afb. 8*). De staaltemperatuur ter plaatse bedroeg op dat moment ongeveer 700 °C. De proef toont echter aan dat deze plastische vervormingen geen dramatische gevolgen hebben: er wordt een nieuwe evenwichtssituatie bereikt. Ondanks de zeer hoge temperaturen van meer dan 1100 °C in de stalen liggers, treedt geen bezwijken van de constructie op.
De evaluatie van het tweede scenario laat zien wat er gebeurt indien de herverdeling van krachten door membraanwerking in de staalplaat-betonvloer wordt verwaarloosd. In *afbeelding 7* deze lijn gestippeld weergegeven. Te zien is dat bij een standaardbrandproef de ligger

DIANA

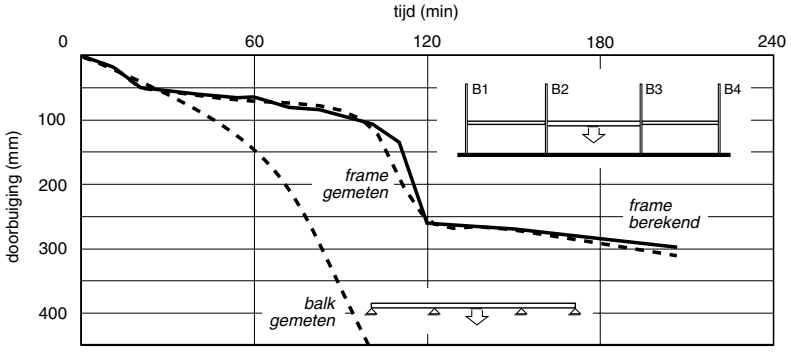
De constructie is gemodelleerd voor een berekening met een eindige-elementenprogramma. De kolommen en de liggers zijn gemodelleerd met balk-kolomelementen en de staalplaat-betonvloer met schaalelementen. Om verschillen met de proeven zoveel mogelijk uit te sluiten, zijn voor de berekening van de mechanische respons zoveel mogelijk de temperaturen gebruikt die tijdens de proeven optraden en ook zijn gemeten.

Getekend is een typisch elementennet is de vervormde toestand bij aanvang van de verhitting. Met een kleine driehonderd elementen duurt de berekening op een HP 735 werkstation zo'n acht uur.





5. Numeriek model voor de staal-beton ligger.



6. Ingeklemde ligger: gemeten en berekende maximale doorbuiging.

De eerste resultaten

Het aan brand blootgestelde verdiepinggebouw heeft een staalskelet met staalplaat-betonvloeren. De liggers zijn onbekleed, terwijl de kolommen wel zijn beschermd. Op basis van de eerste analyses zijn de volgende resultaten beschikbaar.

Constructieve brandveiligheid

- De draagconstructie bezwijkt niet, ondanks temperaturen van meer dan 1100 °C in de onbeschermde stalen liggers.
- De kolommen zijn de kritieke onderdelen en moeten altijd tegen brand worden beschermd.
- De totale stijfheid van de constructie blijft voldoende groot.
- De vloeren verzorgen bij brand een deel van de stabiliteit.

Ontwerp

- In het traditionele brandveiligheidsontwerp wordt geen rekening gehouden met herverdeling van krachten door membraanwerking, hoewel dat natuurlijk wel plaatsvindt (uiteraard afhankelijk van de constructie).
- Kopplaatverbindingen kunnen bij afkoelen uitscheuren; in het ontwerp moet hiermee rekening worden gehouden.

na ongeveer 100 minuten zou zijn bezweken. Dat dit in werkelijkheid niet gebeurt, komt door membraanwerking.

Hoekconfiguratie

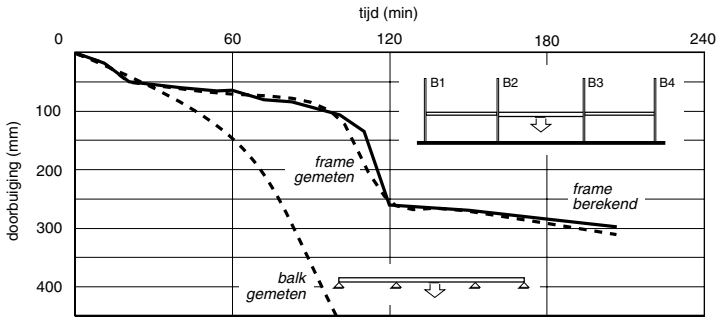
De derde brandproef betrof een hoekconfiguratie. De vuurbelasting bestond uit kribben vurenhout met een equivalent van 45 kg/m^2. De kolommen in het brandcompartiment en de randkolommen waren brandwerend bekleed. De primaire ligger en de secundaire liggers bleven onbekleed; de ruimte tussen de ribben van de staalplaat-betonvloer en de bovenflenzen van deze liggers was ongevuld. Het mechanische gedrag van de draagconstructie is gesimuleerd met hetzelfde model als dat van de eerste twee proeven. In *afbeelding 9* is het gemeten maximale doorbuigingsverloop van de secundaire ligger in het midden van het compartiment vergeleken met de berekende doorbuiging. De overeenkomst is zeer goed te noemen.

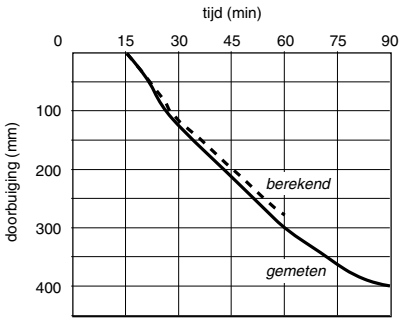
Kantoorconfiguratie

De vierde brandproef betrof eveneens een hoekconfiguratie; de vuurbelasting in deze proef was echter realistisch: uitgegaan is van een praktische kantoorinrichting. Alleen de kolommen in het brandcompartiment waren beschermd: alle liggers en verbindingen bleven onbeschermd. Ook nu weer bleek dat ondanks de hoge en langdurige thermische belasting de staalconstructie niet bezweek (*afb. 10*).

Op dit moment wordt gewerkt aan computersimulaties om de mechanische responsie te kunnen bepalen. De benodigde rekentijden van meerdere dagen zijn vooralsnog extreem lang. Het onderzoek is er op gericht methoden te vinden om, zonder verlies aan nauwkeurigheid, de

7. Raamwerk: gemeten en berekende maximale doorbuiging.





9. Hoekconfiguratie: gemeten en berekende maximale doorbuiging.

8. Plastische vervorming van het onbeschermde deel van kolom B3 na de raamwerkproef.

10. Ondanks de hoge en langdurige thermische belasting is de staalconstructie niet bezweken.

numerieke modellen te vereenvoudigen zodanig dat de rekentijden binnen de perken blijven.

De toekomst

De grootschalige brandproeven in Cardington zijn nog niet volledig geëvalueerd. Inmiddels is wel duidelijk dat:

- staalskeletbouw met staalplaat-betonvloeren onder brandomstandigheden een aanzienlijk grotere draagkracht heeft dan verwacht zou kunnen worden op grond van standaardbrandproeven, zelfs indien de constructie gedeeltelijk onbekleed is;
- de verhoogde draagkracht, die met name het gevolg is van mogelijke herverdeling van krachten door membraanwerking, is goed te berekenen.

Op grond van deze inzichten wordt het mogelijk in de toekomst een staalskelet gedeeltelijk onbekleed uit te voeren, terwijl toch kan worden aangetoond dat de constructieve brandveiligheid voldoende is gewaarborgd. Dit betekent een aanzienlijke kostenbesparing, vergeleken met de huidige praktijk, waarin zowel de kolommen als de liggers meestal volledig tegen brand moeten worden beschermd.

Het onderzoek in Cardington levert een enorme hoeveelheid kennis en nieuwe inzichten op. Om die ook volledig in de praktijk ingang te doen vinden, is het nodig dat ontwerp- en rekenregels worden opgesteld die toegankelijk zijn voor ontwerpers. Het tot stand brengen van dergelijke regels is het onderwerp van een Europees vervolgproject. Aan dit project wordt deelgenomen door de partners in het hier beschreven onderzoek (BS, BRE, TNO), aangevuld met Arbed (Luxemburg). Verwacht wordt dat binnen drie jaar operationele ontwerp- en rekenregels voor beschikbaar komen. Hiermee is dan het werkelijke gedrag bij brand van staalskeletbouw op een praktische toegankelijke wijze te beschreven.

Literatuur

1. J. Robinson en G. Newman, 'Cardington fire test: first results', *New Steel Construction* 5 (1997) 3, p. 23-27.
2. *Investigation of Broadgate phase 8 fire*, uitgave Steel Construction Institute, Berkshire 1991.
3. A.F. Hamerlinck, 'Evaluatie van een brand in een stalen verdiepinggebouw in Broadgate', *Bouwen met Staal* 104 (1992), p. 11-15.
4. D.B. Moore, *Full scale fire tests on complete buildings,* Second Cardington Conference, Cardington 1996.
5. C. Both en L. Twilt, *'The real behaviour of modern largely unprotected steel framed buildings under natural fire conditions',* DIANA World, no. 1, 1997.