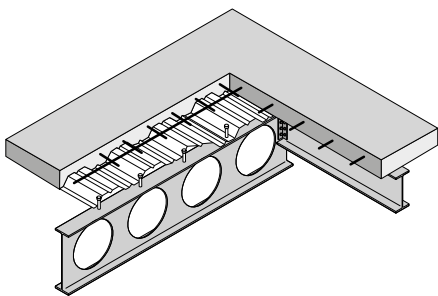


Gunstig membraaneffect staalplaat-betonvloer bespaart op brandwerende bekleding

Brandproeven op grote schaal (uitgevoerd in een aantal landen) en waarnemingen van branden in verschillende Europese gebouwen laten zien dat de prestatie bij brand van gebouwen met een staalconstructie en staalplaat-betonvloeren beter is dan volgt uit de resultaten van standaard brandproeven op afzonderlijke constructie-elementen. Een besparing van brandwerende bekleding is hierdoor haalbaar.

dr.ir. A.F. Hamerlinck en ing. R.J. Stark

Ralph Hamerlinck is senior adviseur bij Bouwen met Staal in Zoetermeer en directeur van Adviesbureau Hamerlinck in Roosendaal. Rob Stark is directeur van Ingenieursbureau SmitWesterman in Gouda, partner van Maatschap Stark en voorzitter van Technische Commissie 3 *Brandveiligheid van Staalconstructies* van Bouwen met Staal in Zoetermeer.



1. Opengewerkte isometrische impressie van een staal-betonvloerconstructie.

De benodigde brandwerende voorzieningen voor gebouwen met een staalskelet en staalplaat-betonvloeren zijn minder dan verwacht: standaard brandproeven op elementen, los van hun constructieve omgeving, geven een andere indicatie van de prestatie van dergelijke constructies dan grote schaalproeven. Dit is toe te schrijven aan een andere krachtwerking bij brand dan waarop doorgaans wordt gerekend: membraanwerking..

Onderzoeksrapporten beschikbaar

Op basis van een omvangrijk onderzoeksprogramma is een eenvoudige ontwerpmethode ontwikkeld waarbij rekening wordt gehouden met de in de praktijk optredende membraanwerking. Deze methode wordt voorgedragen voor opname in de Eurocode (NEN-EN 1994-1-2) en is recent ook in het Nederlands beschikbaar in de vorm van twee rapporten, een Handleiding^[1] en een Constructief Achtergronddocument^[2], en een softwarepakket MACS+^[3].

De methode is conservatief en beperkt zich tot constructies vergelijkbaar met de geteste constructies, te weten: geschoorde gebouwen met een staalskelet opgebouwd met 1) staalbetonliggers uit standaard walsprofielen en staalplaat-betonvloeren en 2) staalbetonliggers met ronde gaten en staalplaat-betonvloeren. De Handleiding geeft ontwerpers inzicht in het gedrag van een geheel gebouw en maakt het mogelijk te bepalen welke elementen onbeschermd kunnen blijven terwijl de veiligheid op het vereiste niveau blijft, vergelijkbaar met de traditionele methoden. Omdat brandveiligheidsadviseurs tegen-

woordig ook natuurlijke branden beschouwen, is ook een natuurlijk brandmodel opgenomen naast het standaardbrand-model, beide uitgedrukt als temperatuur-tijdcurven uit Eurocode 1. Het Constructieve Achtergronddocument^[2] geeft details over brandtesten en eindige-elementenanalyses als onderdeel van de in het afgelopen decennium uitgevoerde andere Europese projecten en enkele details van de zogeheten Cardingtontesten op een gebouw van acht verdiepingen in een voormalige zeppelinhangar in Cardington.

Echte branden en testen

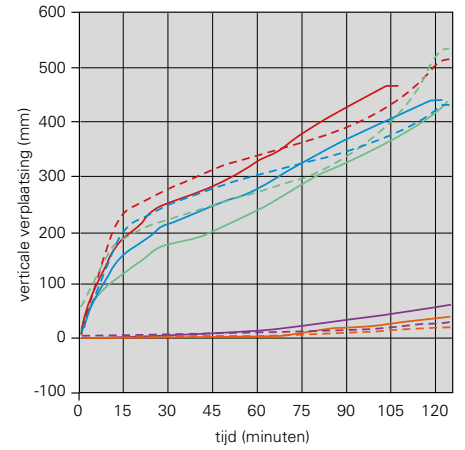
Het gunstige gedrag bij brand is bij toeval ontdekt tijdens een brand in een gebouw in aanbouw in het Londense Broadgate^[4]. De constructie die volgens de gebruikelijke theorie en rekennormen na ongeveer 25 minuten had moeten bezwijken, zeker gezien de werkelijke temperaturen en brandomvang, bleek de brand te doorstaan en het gebouw is niet bezweken. Als gevolg hiervan zijn brandproeven uitgevoerd op een meerverdiepinggebouw met een staalskelet op de testfaciliteit van het Building Research Establishment in Cardington, Groot-Brittannië, zie *afb. 1*^[5]. Op basis hiervan is door prof. Colin Bailey een eenvoudige ontwerpmethode ontwikkeld^[6,7]. Veel van de onderliggende theoretische basis (vloeilijntheorie) bestaat al sinds de late jaren '50, met achtereenvolgende studies naar het constructieve gedrag van gewapend betonplaten bij kamertemperatuur. De methode is naast de Cardingtonproeven gevalideerd met een



2. Cardington testgebouw vóór het betonstorten van de vloeren.



3. Grote Cardington brandproef in een 'echt' kantoor vóór en na de proef.

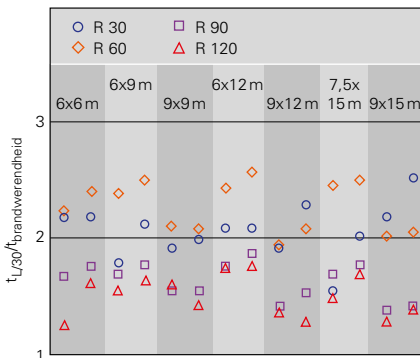


- D219 midden van de vloerplaat (meting)
- D225 midden van de vloerplaat (meting)
- D227 beschermde moerbalk (meting)
- D228 midden van de onbeschermdede balk (meting)
- D232 beschermde kinderbalk (meting)
- D219 midden van de vloerplaat (SAFIR)
- D225 midden van de vloerplaat (SAFIR)
- D227 beschermde moerbalk (SAFIR)
- D228 midden van de onbeschermdede balk (SAFIR)
- D232 beschermde kinderbalk (SAFIR)

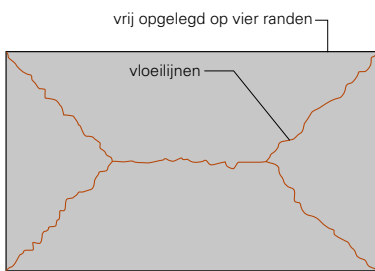
5. Vergelijking experimentele en numerieke resultaten van de verticale verplaatsingen in de COSSFIRE-proef.



4. Grote brandproef met liggers met ronde gaten tijdens en na de proef (foto's: prof. Ali Nadjai).



6. Verhouding tussen de tijd wanneer de doorbuiging $L/30$ wordt bereikt volgens het geavanceerde (eindige-elementen)berekeningsmodel met de brandwerendheid volgens de eenvoudige ontwerp-methode (> 1 is conservatief).



7. Vloeilijnenpatroon om de weerstand van de vloer te berekenen.

Verantwoording

Het MACS+-project is gefinancierd met steun van het Europese Onderzoeksfonds inzake Kolen en Staal (RFCS). De publicaties en software zijn gemaakt als resultaat van andere onderzoeken:

- RFCS-project FICEB;
- RFCS-project COSSFIRE;
- Leonardo Da Vinci-project 'Fire Resistance Assessment of Partially Protected Composite Floors' (FRACOF);
- een eerder project gesponsord door staalproducent ArcelorMittal en CTICM (Frans instituut voor metalen in de bouw), uitgevoerd door een samenwerkingsverband van CTICM en het Steel Construction Institute (Engelse instituut voor staalconstructies) in de bouw).

serie andere proeven, zoals een in het Franse Metz op een vloerveld van $8,7 \times 6,7 \text{ m}^2$ ^[9], en een waarbij de nadruk lag op gedrag van de verbindingen bij brand (met name tijdens de afkoelfase). Tot slot is een grote test uitgevoerd met liggers waarvan het lijf ronde gaten had (afb. 4).

De validatie is in twee stappen gedaan. Ten eerste door aan te tonen dat de resultaten van eindige-elementenpakketten goed overeenkomen met de testen (afb. 5). Ten tweede door aan te tonen dat de resultaten van de eenvoudige ontwerp-methode (c.q. met de MACS+ software) conservatief zijn in vergelijking met de resultaten van een geavanceerde eindige-elementenpakket (SAFIR) aan de hand van een uitgebreide parameterstudie (afb. 6). Bij alle testen is geconcludeerd dat door de membraanwerking het draagvermogen bij brand lang aanwezig blijft. Bij geen enkele test is echt bezwijken (het naar beneden komen van de vloer) opgetreden, maar zijn wel zeer grote vervormingen waargenomen. Bij het ontwerpen van vloersystemen volgens de hier omschreven methodiek moet in de detaillering hiermee rekening worden gehouden. In afbeelding 5 is te zien dat al snel (na 15 minuten) een vervorming in het midden van de vloer kan optreden tussen 120 en 240 mm.

Ontwerpmethode

De eenvoudige ontwerp-methode is gebaseerd op de vloeilijntheorie (afb. 7 en 8) en de relevante bezwijkvormen die bij het uitgebreide testprogramma zijn waargenomen. De modellering, waarvoor in de eenvoudige ontwerp-methode de formules zijn afgeleid, staat in afbeelding 9. Het toepassingsgebied van de ontwerp-methode is beperkt tot geschoorde raamwerken niet gevoelig voor knik door zijdelingse verplaatsing (van het zijdelings ongesteunde raamwerk), raamwerken opgebouwd uit primaire en secundaire liggers met eenvoudige dwarskrachtverbindingen (flexibele kopplaten, lipverbindingen, hoekstaalverbindingen), en staalplaat-betonvloeren bestaande uit een staalplaat (tot en met 80 mm hoogte), een enkele laag wapeningsnet en normaal of lichtbeton (betondikte boven de staalplaat 60 tot 130 mm), ontworpen in overeenstemming met EN 1994-1-1,

(afb. 1). Voor liggers met ronde gaten geldt dat deze nog niet in EN 1994-1-1 zijn opgenomen, maar dat deze moeten worden ontworpen met een gelijkwaardige bepalingsmethode als die in EN 1994-1-1 waarbij specifiek aandacht moet zijn gegeven aan het lokale plooigedrag van de lijven.

In de ontwerp-methode deelt de ontwerper de vloerplaat op in een aantal ontwerp-zones (afb. 10). De liggers op de omtrek van deze zones moeten zijn ontworpen om de brandwerendheid vereist voor de vloerplaat te bereiken en zullen daarom normaal gesproken brandwerend worden beschermd. Een ontwerpzone van de vloer moet aan de volgende criteria voldoen.

- Elke zone is rechthoekig.
- Elke zone is alzijdig door liggers begrensd.
- De liggers binnen een zone overspannen slechts in één richting.
- Kolommen zijn niet geplaatst binnen een ontwerpzone; wel op de omtrek van de zone.
- Voor brandwerendheden van meer dan 60 minuten, of wanneer de parametrische brandkromme wordt gebruikt, zijn alle kolommen verbonden met ten minste één brandwerend beschermde ligger in elke orthogonale richting.

Alle interne liggers binnen de zone mogen onbeschermd blijven, op voorwaarde dat met MACS+-rekenmethodiek of software wordt aangetoond dat de brandwerendheid van de ontwerpzone voldoende is. De grootte en h.o.h.-afstand van de onbeschermdeliggers zijn niet kritisch voor de constructieve prestatie tijdens brand. Bij de grenstoestand brand is aangenomen dat de weerstand van de onbeschermdeliggers significant afneemt. De staalplaat-betonvloer blijft over als een in twee richtingen overspannend element. De beschermde liggers op de omtrek nemen bij brand de volledige verticale belasting op. Vervolgens wordt de benuttingsgraad bepaald en hieruit volgt de kritieke staaltemperatuur van de beschermde liggers. De brandwerende bescherming moet zijn ontworpen met deze kritieke temperatuur en de brandwerendheid die is vereist voor de vloerplaat. De ontwerp-methode controleert niet expliciet de brandwerendheid van de vloerplaat op het criterium

thermische isolatie of vlamdichtheid.

De ontwerper moet daarom zorgen dat de vloer voldoende dik is voor de isolatie, met EN 1994-1-2. Om te zorgen dat de vloer zijn vlamdichtheid behoudt en de membraan-trekkkrachten kan opnemen, moet het wapeningsnet voldoende overlappen. Het is in de landen waar deze vloersystemen veelvuldig worden toegepast mogelijk om de liggers bij de rand van de vloerplaten te ontwerpen als niet-samenwerkende stalen liggers: de kosten voor afschuifwapening meer kunnen zijn dan de meerkosten van een iets zwaardere niet-samenwerkende stalen ligger. Voor het ontwerp bij brand is het belangrijk dat de vloerplaat goed is verankerd aan de randliggers. Hoewel bij niet samenwerkende randliggers bij kamertemperatuur geen deuvelds benodigd zijn, beveelt de ontwerpmethodestiffdeuvelds aan (h.o.h. < 300 mm) met U-vormige wapeningstaven om de stiffdeuvelds. Het ligt voor de hand de randliggers dan ook als staal-betonliggers uit te voeren.

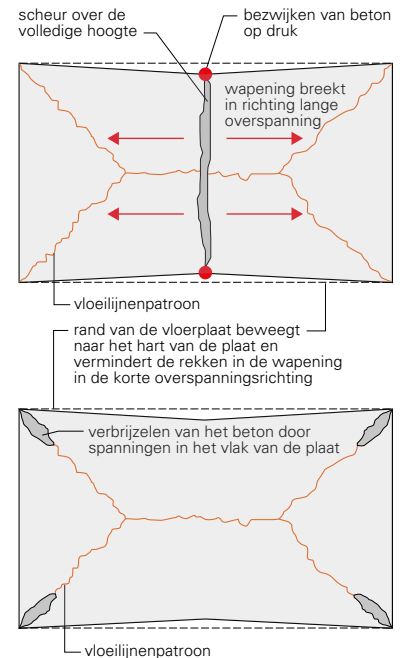
Handige software

De ontwerpmethodede is opgenomen in de MACS+-software. De methode was in 2000 al geïmplementeerd in de software FRACOF met een herziene, verbeterde versie in 2006. Concepten die overeenkomen met de ontwerpmethodede bereiken ten minste het brandveiligheidsniveau dat is vereist in het Bouwbesluit en zijn op grond van gelijkwaardigheid toepasbaar. Er zijn bouwkostenbesparingen mogelijk zonder dat het veiligheidsniveau lager wordt dan vereist. Door de (niet benodigde) brandwerende bescherming op een deel van de kinderbalken weg te laten, kan zo'n 30% op kosten worden bespaard. In aanvulling op de brandwerendheid bij de standaard temperatuur-tijd-kromme, worden er aanbevelingen gepresenteerd voor gebouwen die worden ontworpen om een natuurlijke brand te weerstaan. Natuurlijke branden kunnen gedefinieerd worden in de MACS+-software met de parametrische brandkromme uit EN 1991-1-2. Deze houdt rekening met de grootte van het compartiment, de grootte van alle openingen en de hoeveelheid brandbare materialen. Als alternatief staat MACS+-software andere temperatuur-tijd-krommen toe (als tekstbestand in te lezen),

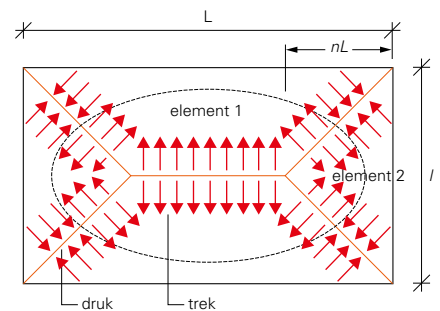
waarmee de output van andere brandmodellen kan worden gebruikt in het kader van gelijkwaardigheid (met motivatie). De ontwerper rekent een vloerzone door volgens de belastingen in de Eurocode. Hij moet de constructie van de vloerplaat (inclusief het wapeningsnet) en liggerafmetingen definiëren, omdat deze het brandgedrag van de vloerplaat beïnvloeden. De ontwerper heeft details nodig van de profielgrootte, de staalsoort en de graad van afschuifverbinding, voor elke ligger in de vloerplaat. De MACS+-software bepaalt of de vereiste brandwerendheid wordt gehaald met de aangegeven niet-beklede liggers en wat de aan te houden (extra) belastingen en kritieke staaltemperaturen zijn voor het bepalen van de bekledingsdikte voor de liggers op de rand van de ontwerpzone van de vloer. Wanneer de vloer niet voldoet is het vaak mogelijk dit wel te bereiken door het wapeningsnet iets te verzwaren. •

Literatuur

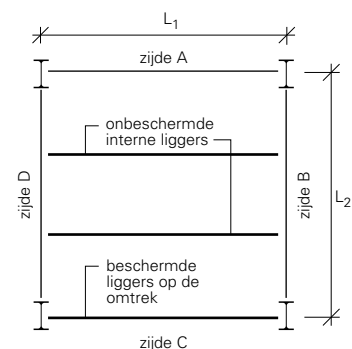
1. R. Hamerlinck, O. Vassart en B. Zhao, *Membranwerking van staal-betonconstructies tijdens brand*, Ontwerphandleiding, Bouwen met Staal, ArcelorMittal en CTICM, 2012.
2. R. Hamerlinck, O. Vassart en B. Zhao, *Membranwerking van staal-beton constructies tijdens brand*, Constructieve Achtergronddocument, Bouwen met Staal, ArcelorMittal en CTICM, 2012.
3. MACS+-software, via www.arcelormittal.com/profielen of www.bouwenmetstaal.nl en www.macsfire.eu (per 1-1-2013, met verwijzing naar de bijbehorende documenten in verschillende talen (15)).
4. A.F. Hamerlinck, 'Evaluatie van een brand in een stalen verdiepinggebouw in Broadgate', *Bouwen met Staal* 104 (1992), p. 11-15.
5. L. Twilt en C. Both, 'Werkelijk gedrag van een staalconstructie bij brand onderzocht', *Bouwen met Staal* 141 (1998), p. 27-31.
6. C.G. Bailey en D.B. Moore, 'The structural behaviour of steel frames with composite floor slabs subject to fire, Part 1: Theory', *The Structural Engineer* 78 nr. 6 (2000), p. 19-27.
7. C.G. Bailey en D.B. Moore, 'The structural behaviour of steel frames with composite floor slabs subject to fire, Part 2: Design', *The Structural Engineer* 78 nr. 11 (2000), p. 28-33.
8. C. Both, A.F. Hamerlinck en R.J. Stark, 'Grote brandproef demonstreert brandveiligheid staalplaat-betonvloer', *Bouwen met Staal* 201 (2008), p. 46-47.



8. Bezwijkvormen: (a) bezwijken van de wapening op trek; (b) bezwijken van het beton op druk.



9. Plaat vrij opgelegd op vier randen, waarin de krachten in het vlak van de plaat over de vloeilijnen door trek- en druk-membraankrachten te zien zijn.



10. Voorbeeld van een ontwerpzone van de vloer.