

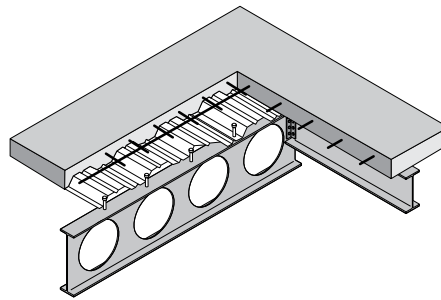
Benutten membraanwerking

Bij staal-beton vloersystemen blijkt het gedrag bij brand aanzienlijk gunstiger dan menigeneen denkt. Dit komt door membraaneffecten, waardoor de krachtwerking verandert. Hiernaar wordt al lang onderzoek gedaan, maar dit heeft nu geleid tot praktisch ontwerpgereedschap, waarmee inmiddels projectmatig ervaring is opgedaan. Besparingen op brandwerende bescherming van secundaire stalen liggers zijn mogelijk van 30-50%. De rekenmethodiek wordt opgenomen in de aanstaande versie van Eurocode 4 Staal-beton.

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

Ralph Hamerlinck is senior adviseur bij Bouwen met Staal en directeur van Adviesbureau Hamerlinck in Roosendaal. Rob Stark is directeur bij IMd Raadgevende Ingenieurs in Rotterdam.

Begin jaren '90 werd uit praktijkbranden duidelijk dat staalconstructies met staalplaat-betonsystemen een veel hogere weerstand tegen brand hebben dan gedacht. Constructies van meerlaagse kantoorgebouwen die volgens de theorie en beschikbare kennis al lang bezwaken hadden moeten zijn door de optredende hoge temperaturen, doorstonden de gehele brand en konden na beperkt herstel in gebruik worden genomen. Deze branden en het daaruit verworven inzicht waren aanleiding voor de grote schaal brandproeven in een oude Zeppelinloods in het Engelse Cardington, voor de door Colin Bailey (c.s.) (red. Engelse engineer) ontwikkelde theorieën en voor het enkele jaren geleden uitgevoerde Europese onderzoeksprogramma MACS (*Membrane Action of Composite Structures in case of fire*). In het daarop volgende disseminatieproject MACS+ is de gegenereerde kennis praktisch toepasbaar gemaakt in de vorm van een achtergronddocument, een ontwerp-handleiding, presentaties in het kader van seminars en ontwerpsoftware. Hierdoor is het voor de praktijk mogelijk relatief ingewikkelde theorie op een gebruikersvriendelijke,



1. Impressie staal-beton vloerconstructie.

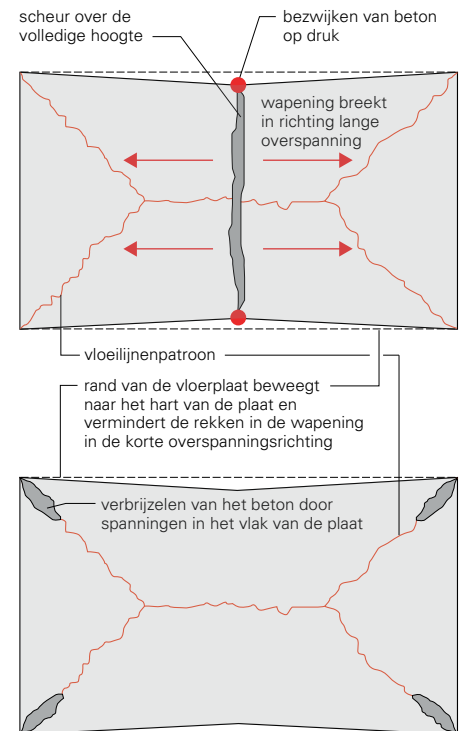


2. Vloeilijnenpatroon om weerstand van de vloer bij membraanwerking te berekenen.

verantwoorde manier in projecten toe te passen en economische ontwerpen te realiseren. Het overzichtsartikel in deze editie geeft een goed beeld van wat in het kader van MACS daarvoor is onderzocht, wat de ontwerpmethodiek inhoudt en wat de relevante referenties zijn. In dit artikel een samenvatting van de achtergronden en de ontwerpmethodiek vooral gericht op praktijktoepassingen.

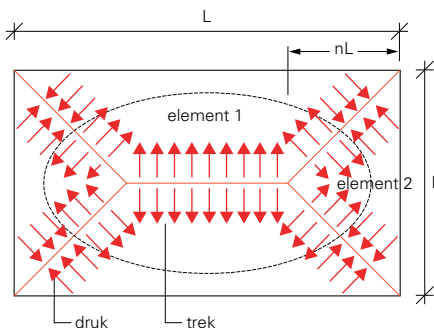
Membraanwerking van sb-vloersystemen

De brandwerendheid van gebouwen met een staalskelet en staalplaat-betonvloeren (afb. 1) is hoger dan verwacht: standaardbrandproeven op elementen los van hun constructieve omgeving, geven geen bevredigende indicatie van de prestatie van dergelijke constructies. De reserves zijn toe te schrijven aan een

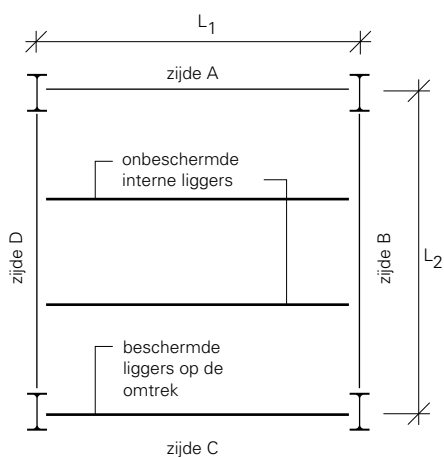


3. Bezwijkvormen bij membraanwerking: a) bezwijken van wapening op trek; b) bezwijken van beton op druk.

andere krachtwerking bij brand dan waarop doorgaans wordt gerekend: membraanwerking. Door grote vervormingen tijdens brand verandert het gedrag geleidelijk van buiging naar trekkrachten. De trekkrachten worden opgenomen door het wapeningsnet in het beton (en deels door de staalplaten) en boven, in de sterk vervormde vloer, ontstaat een drukring met grote drukkrachten, met name in de hoeken (afb. 2-4). De in het kader van MACS ontwikkelde rekenmethode vindt zijn basis in de aloude vloeilijnentheorie uit de jaren '50 en is aangepast aan de specifieke brandfenomenen bij een staalplaat-betonsysteem. De methode is gevalideerd met brandtesten en eindige-elementenanalyses. De validatie is in twee stappen gedaan. Ten eerste, door aan te tonen dat de resultaten van eindige-elementenpakketten goed



4. Plaat vrij opgelegd op vier randen, waarin de krachten in het vlak van de vervormde plaat over de vloeilijnen door trek- en druk- membraankrachten te zien zijn (betonnen drukring met wapeningsnet onder trek bij grote vervormingen).



5. Voorbeeld ontwerpzone van een vloer.

overeenkomen met de testen. Ten tweede, door aan te tonen dat de resultaten van de eenvoudige ontwerpmethod (c.q. met de MACS+ software (free ware)) conservatief zijn in vergelijking met de resultaten van een geavanceerde eindige-elementenpakket met een uitgebreide parameterstudie. Bij alle testen is geconcludeerd dat door membraamwerking het draagvermogen bij brand lang aanwezig blijft. Bij geen enkele test is echt bezwijken opgetreden, maar zijn wel zeer grote vervormingen waargenomen. Bij het ontwerpen van vloersystemen met deze methodiek zal men in detaillering hiermee rekening moeten houden. De methode 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

Projectvoorbeeld 1: Het Platform in Utrecht

In Utrecht is naast het Centraal Station en boven het tram- en busstation van de Uithoflijn Microcity het Platform gerealiseerd^[4]. De constructie is opgebouwd uit een staalskelet (S355) met vakwerkspanten op de onderste twee commerciële lagen om de 12,0 m. Tussen deze vakwerkspanten zijn op de tweede en derde verdieping staal-beton liggers met staalplaat-betonvloeren aangebracht. De keuze voor deze vloer stoelt op het gewichtsreductie, maar ook met flexibiliteit voor het maken van sparingen. De secundaire staal-beton liggers zijn uitgevoerd met IPE 550-profielen, h.o.h. 3,60 m. Op deze liggers ligt een staalplaat-betonvloer van 140 mm (Comflor 75, ongestempeld). Omdat boven de commerciële verdiepingen woningen zijn gepositioneerd en het bovenste verblijfsgebied boven 13 m ligt, moet de volledige hoofddragconstructie een brandwerendheid van 120 minuten waarborgen. Ondanks deze hoge eis is met de Macs+-software gelukt om de liggers om-en-om brandwerend te bekleden, met een besparing van ± 50% op de secundaire liggers. Hierbij was niet meer dan standaardwapening \varnothing 8-150 nodig. De overige staalconstructie is voorzien van brandwerende beplating, berekend met de kritieke staaltemperaturen.



Foto's: Mariska Stieber

Projectvoorbeeld 2: A-pier op Schiphol

Cepezed en IMd maken deel uit van het internationale en integrale ontwerpsteam onder coördinatie van AECOM dat de nieuwe pier van Schiphol ontwerpt. Om de positie als multimodaal knooppunt en 'preferred airport' te bestendigen en verder te ontwikkelen, speelt Schiphol met de nieuwe pier in op de groei van het aantal passagiers en vliegtuigbewegingen. De pier, die bijna 400 m lang is en grotendeels een hoogte van vier lagen heeft, wordt uitgevoerd in een staalconstructie met portalen om de 12,60 m. Tussen deze portalen zijn met een hart-op-hart afstand 3,0 m secundaire liggers aangebracht, uitgevoerd als cellular beams of volle wandliggers (basis IPE 500). Over de secundaire liggers is een staalplaat-betonvloer (Comflor 95, 150 mm dik) aangebracht, uitgevoerd met een wapeningsnet \varnothing 8-100. De staalconstructie is uitgevoerd in S355 behoudens de secundaire liggers (S235).

De brandwerendheidseis is 90 minuten die is gereduceerd naar 60 minuten vanwege een sprinklerinstallatie. De kolommen zijn uitgevoerd als staal-beton kolommen en het overige staal is uitgevoerd met een brandwerende coating of spuitmortel. De constructieonderdelen in het zicht zijn brandwerend gecoat en de onderdelen die niet in het zicht komen (zoals de secundaire liggers) zijn voorzien van een spuitmortel. In het ontwerp is eveneens gebruik gemaakt van Macs+-software waardoor het mogelijk was de secundaire liggers om-en-om niet te voorzien van een brandwerende spuitmortel. Uiteindelijk is in de uitvoering door de aannemer gekozen deze besparing niet toe te passen. Vanwege uitvoeringsaspecten en de angst dat wellicht te weinig of verkeerde liggers zouden worden behandeld, zijn alle secundaire liggers voorzien van een brandwerende spuitmortel. Een gemiste kans.



Foto's: John Gundlach/flying Holland en Frank de Jong/IMd

Projectvoorbeeld 3: Timmerhuis in Rotterdam⁵¹

De constructie bestaat uit twee onderling gekoppelde kernen van stalen vakwerken. Vanaf de kernen lopen verdiepinghoge vierendeel-liggers in twee richtingen, waarmee de vrije overspanningen en uitkragingen tot 17 m mogelijk zijn gemaakt. Het aantal kolommen (grid 7,2x7,2 m) blijft hiermee tot het minimum beperkt. De verdiepingvloeren zijn lage staalplaat-betonvloeren (60 mm staalplaat; 150 mm totale vloerdikte) op stalen liggers met sparingen in de lijven voor leidingen en kabels. Het leeuwendeel van de staalconstructie blijft in het zicht. Met een brandwerende coating voldoet het staal aan de vereiste brandwerendheid (van 120 minuten in de woningen tussen 20 en 60 m en 90 minuten in de onderste vijf (gesprinkelde) publieke lagen tot ± 20 m). Andere delen van de staalconstructie zijn beschermd met een brandwerende beplating. Een deel van de constructie (o.a. van de bovenste terraswoningen en onderste hangwoningen) hoefde niet brandwerend te worden uitgevoerd, omdat deze niet als hoofddragconstructie wordt beschouwd (geen voortschrijdende instorting van andere woningen). De brandwerendheid van de staalplaat-betonvloeren is bereikt door wapening (Ø 8-150 kruisnet). Door membraanwerking te benutten en door de toepassing van de MACS-software kon 50% van de secundaire liggers HEA 260 (middenliggers, zie foto) onbeschermd blijven. De randliggers van het vloerveld (dus 7,2x7,2 m²) zijn wel brandwerend gecoat, met een laagdikte afgestemd op de kritieke staaltemperaturen van 700 à 750 °C (bij een permanente en veranderlijke vloerbelasting van 5,6, respectievelijk 3,0 kN/m² en een combinatiefactor $\Psi_2 = 0,3$ volgens NEN-EN 1990). Twee randliggers bestaan vanwege portaalwerking (stabiliteit in één richting van het gebouw) uit een HEA 400-profiel. En twee randliggers zijn een HEA 260 (uitgevoerd als 50% schuifsterke staal-beton ligger). Alle liggers in S355. Uiteindelijk kon een deel van de brandwerende besparing van 50% op de secundaire liggers niet behaald worden door brandcompartimentering van bouwkundige wanden loodrecht onder de liggers.



Foto's: Ossip van Duivenbode

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), 2014 + C1/A1, 2014 + NB, 2007.
2. MACS. Brandgedrag van staal-beton vloersystemen (<https://research.bauforumstahl.de/nl/fire-safety-1/brandgedrag-van-staal-beton-vloersystemen-disseminatie/>).
3. A.F. Hamerlinck en R.J. Stark, 'Gunstig membraaneffect staalplaat-betonvloer bespaart op brandwerende bekleding', *Bouwen met Staal* 230 (december 2012), p. 24-27.
4. Diverse auteurs, 'Multifunctioneel complex Het Platform, Utrecht', *Bouwen met Staal* 270 (augustus 2019), p. 28-43.
5. R.M.J. Doomen, 'Vakwerk met vierendeel-liggers', *Bouwen met Staal* 252 (augustus 2016), p. 6-17.

niveau blijft, vergelijkbaar met de traditionele methoden.

In de nieuw te verschijnen Eurocode 1994-1-2 wordt het onderwerp 'membrane action' opgenomen, waarbij de membraanwerking van staalplaat-betonsystemen dan ook normatief kunnen worden benut (zie p. 37).

Ontwerpmethode

In de ontwerpmethode deelt de ontwerper de vloerplaat op in een aantal ontwerpzones (afb. 5). De liggers op de omtrek van deze zones moeten zijn ontworpen (brandwerend beschermd) om de brandwerendheid vereist voor de vloerplaat te bereiken. 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 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+-) software wordt aangetoond dat de brandwerendheid van de ontwerpzone voldoende is. De grootte en h.o.h.-afstand van de onbeschermd liggers zijn niet kritisch voor de constructieve prestatie tijdens brand. Bij de grenstoestand brand is aangenomen dat de weerstand van de onbeschermd interne liggers 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. Verder 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. Om te zorgen dat de vloer zijn vlamdichtheid behoudt en de membraan trekkrachten kan opnemen, moet het wapeningsnet voldoende overlappen. 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 deuvels nodig zijn, beveelt de ontwerp-methode stiftdeuvels aan (h.o.h. ≤ 300 mm) met U-vormige wapeningstaven om de stiftdeuvels. Het ligt voor de hand de randliggers dan ook als staal-beton liggers uit te voeren.

MACS-software

Met de ontwerpmethode die is opgenomen in de MACS-software zijn bouwkostenbesparingen mogelijk zonder dat het veiligheidsniveau lager wordt dan vereist. Door de (onnodige) brandwerende bescherming op een deel van de kinderbalken weg te laten, kan zo'n 30% op kosten worden bespaard. De ontwerper rekent een vloerzone door volgens de belastingen in het buitengewone belastinggeval brand (volgens NEN-EN 1991-1-2). 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, 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.

Conclusie

Met de membraanwerking in staalplaat-betonvloeren is praktisch een brandwerendheid te realiseren met een aanzienlijke kostenbesparing, omdat slechts 1/3 tot 1/2 van de secundaire liggers brandwerend hoeft te worden beschermd. •