



Brandveiligheid beton-elementen

Het uitwerken van een veiligheidsberekening voor betonnen platen en balken die aan buiging worden onderworpen, was de primaire doelstelling van een masterproef aan de Universiteit van Gent. In dit artikel volgt een uiteenzetting van het probleem, een samenvatting van het ontwikkelde rekenmodel en een bespreking van de voornaamste resultaten.

Met de introductie van de Eurocodes is het ontwerpen op basis van een semi-probabilistisch veiligheidsconcept reeds enige tijd gangbaar. Het is echter niet steeds duidelijk welk veiligheidsniveau hiermee overeenstemt. Specifiek voor het geval van brand is er geen duidelijkheid hoe de constructieve veiligheid van de constructie tijdens de brand evolueert. Om dit na te gaan moet men overstappen op een volledig probabilistisch veiligheidsconcept. Met dit type berekeningen kan de veiligheid van een constructie in geval van brand kwantitatief worden nagegaan en kunnen verschillende ontwerpalternatieven objectief worden vergeleken.

ir. Ruben Van Coile
Universiteit Gent¹⁾

ENCI Studieprijs (7)

Dit is het zevende artikel in een serie met bijdragen van prijswinnaars van de ENCI Studieprijs 2010. De studie die in dit artikel wordt beschreven kreeg een eervolle vermelding in de categorie universiteiten.

Het gedrag van gewapend beton tijdens brand

De voorbije decennia werd het gedrag van beton tijdens brand reeds diepgaand onderzocht. Door middel van verschillende kleine en grote proefopstellingen werd vastgesteld dat fysische en chemische veranderingen ertoe leiden dat beton bij hogere temperaturen zijn sterkte verliest. Het toepassen van deze gereduceerde mechanische eigenschappen bij berekeningen is een eerste praktische moeilijkheid bij het bepalen van het draagvermogen van betonnen elementen tijdens brand. De opwarming van de betondoorsnede is immers niet uniform, zodat de doorsnede als het ware is samengesteld uit een groot aantal zones met elk een eigen temperatuur en bijgevolg eigen lokale mechanische materiaaleigenschappen.

Ter illustratie wordt in figuur 2 een voorbeeld gegeven van het temperatuursveld na 240 minuten in een 400 mm dikke betonnen plaat, aan de onderzijde blootgesteld aan de normbrand ISO 834. Omdat de plaat in de breedterichting voldoende uitgestrekt wordt verondersteld, is de temperatuur uniform in de breedterichting. Enkel over de hoogte van de plaat ontstaat een temperatuursgradiënt.

In Eurocode EN 1992-1-2 worden temperatuursafhankelijke materiaalmodellen voor beton en wapeningsstaal voorgeschreven. Hierbij wordt gebruikgemaakt van reductiecoëfficiënten, zoals grafisch voorgesteld voor de betondruksterkte in figuur 3. De reductiecoëfficiënt voorgeschreven door de Eurocode is echter enkel een nominale waarde. De onzekerheid omtrent deze nominale waarde werd op basis van proefresultaten van de Universiteit Gent in rekening gebracht als een spreiding op deze reductiecoëfficiënt. In figuur 3 wordt deze onzekerheid voorgesteld door visualisatie van een 90% betrouwbaarheidsinterval (de 5%- en de 95%-fractiel).

De rek in een betonelement tijdens brand is veel complexer dan de rek bij omgevingstemperatuur, zoals blijkt uit vergelijking (1):

$$\varepsilon_{\text{totaal}} = \varepsilon_{\text{spanning}}(\theta, \sigma) + \varepsilon_{\text{thermisch}}(\theta) + \varepsilon_{\text{kruip}}(\theta, \sigma, t) + \varepsilon_{\text{transiënt}}(\theta, \sigma) \quad (1)$$

¹⁾ Ruben van Coile is op het onderzoek 'Invloed van brand op het veiligheidsniveau van betonelementen' afgestudeerd aan de Universiteit Gent. In de begeleidingscommissie zaten prof.dr.ir. Luc Taerwe, dr.ir.-arch. Emmanuel Annerel en dr.ir. Robby Caspele.

1 Praktijkvoorbeeld TU Delft
2 Temperatuursveld in een 400 mm dikke
betonnen plaat na 240 min ISO 834 brand

3 Reductiecoëfficiënt $f_c(\theta)/f_c(20^\circ\text{C})$ volgens EN 1992-1-2 (voorgesteld als een 50%-fractiel; onzekerheid omtrent deze waarde voorgesteld door een 90% betrouwbaarheidsinterval, i.e. een 5%- en een 95%-fractiel)

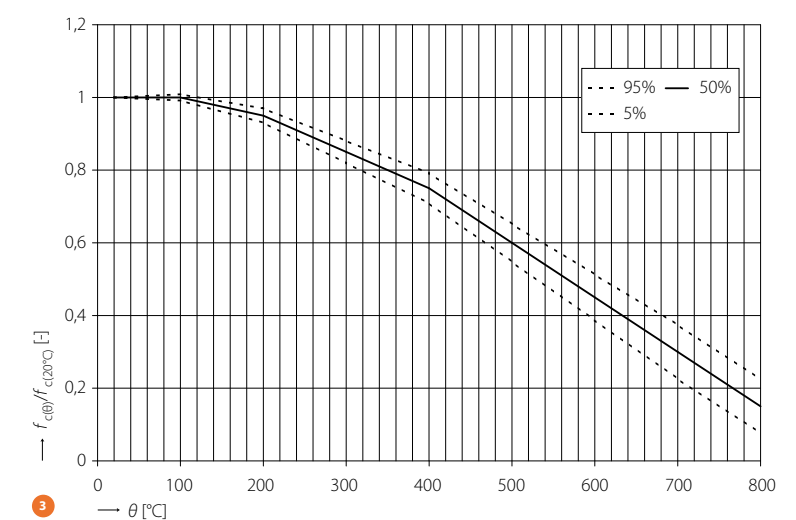


Naast een zuivere spanningsgerelateerde rek bestaat de totale rek bij hoge temperaturen eveneens uit de vrije thermische uitzetting en een kruipcomponent. Daarnaast werd bij betonelementen die onder belasting worden opgewarmd een vierde component waargenomen, de transiënte rek genaamd. Tijdens de masterscriptie werden de berekeningen enkel uitgevoerd op basis van de eerste component van (1), de spanningsgerelateerde rek, en werd het maximaal weerstandbiedend moment bepaald door ofwel falen van het beton bij een stuik van 3,5%, ofwel falen van de wapening bij een staalrek van 10%. Verder werd de lokale temperatuur tijdens brand slechts elke 5 mm geëvalueerd.

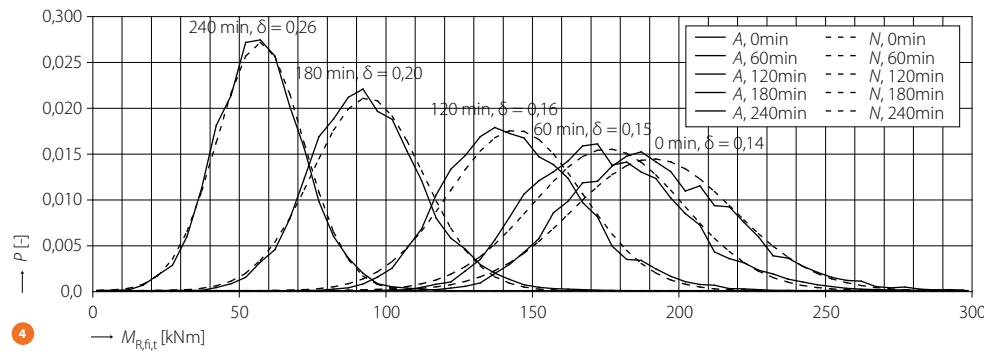
Op basis van een dergelijke vereenvoudigde analyse kon de relevantie van een latere, complexere berekening worden vastgesteld. Onderzoek naar de integratie van de overige componenten in het ontwikkelde rekenmodel heeft momenteel plaats aan de Universiteit Gent.

Het veiligheidsniveau van betonplaten tijdens brand

In de Eurocodes worden rekenregels gegeven voor betonconstructies onderhevig aan brand. Het veiligheidsniveau dat hiermee overeenstemt is echter niet expliciet bekend. Bereken hoe veilig de rekenmethodes van de Eurocode zijn, was één van de doelstellingen van de masterscriptie. Dit vereiste probabilistische berekeningen waarbij de onzekerheden en



- 4 Distributie van $M_{R,t}$ op verschillende tijdstippen, A: waargenomen distributie, N: benadering door normale
- 5 Evolutie van $M_{R,t}$ voor een 400 mm dikke plaat tijdens ISO 834 brand
- 6 Evolutie β_1 en β_2 voor 400 mm dikke plaat
- 7 Vergelijking waarden β_1 voor verschillende nominale betondekkingen
- 8 Vergelijking veiligheidsindices β_1 en β_2 in geval van een perfect geplaatste wapening (0 mm spreiding betondekking) en wapening geplaatst met standaard nauwkeurigheid (5 mm)



variatië omtrent basisparameters in het model werden verrekend. Hierbij werden de relevante parameters als stochastische variabelen gemodelleerd. Zo werd de betondruksterkte corresponderend met een sterkteklasse C20/25 als een lognormale distributie met gemiddelde van 25,4 MPa en een standaardafwijking van 2,7 MPa in rekening gebracht. Het gemiddelde en de spreiding van het maximaal weerstandbiedend moment van een betonnen plaat of balk werden vervolgens bepaald door middel van Monte Carlo-simulaties. Bij deze methode werd een groot aantal balken of platen berekend, waarbij elke balk of plaat werd bepaald door een random set van de probabilistische parameters. In casu bleek een simulatiegrootte van 10 000 random simulaties voldoende om de distributie en karakteristieken van het weerstandbiedend buigend moment nauwkeurig te bepalen. Ter illustratie worden in figuur 4 de berekende 5%-, 50%- en 95%- fractielen van het weerstandbiedend moment $M_{R,t}$ van een 400 mm dikke plaat, aan de onderzijde blootgesteld aan brand, weergegeven in functie van de tijd van blootstelling aan de ISO 834 brand. In deze figuur worden eveneens de Eurocode-rekenwaarden $M_{Rd,t}$ en $M_{Ed,t}$ weergegeven, waarbij $M_{Ed,t}$ werd bepaald op basis van een variabele last van 5 kN/m². Dit stemt overeen met de variabele last die voor woonhuizen wordt voorgeschreven. De afname van het weerstandbiedend moment tijdens brand is een gevolg van de lagere waarden voor de betondruksterkte en de vloeigrens bij hogere temperaturen. Naast de 5%-, 50%- en 95%-fractielen zelf, neemt ook de afstand tussen deze fractielen af. Dit betekent dat niet enkel het gemiddelde weerstandbiedend moment wordt gereduceerd, maar ook de spreiding die met dit weerstandbiedend moment gepaard gaat. De relatieve spreiding, de variatiecoëfficiënt $\delta_{MR,t}$ neemt echter toe, zodat relatief genomen de onzekerheid omtrent de draagcapaciteit van een betonnen vloerplaat tijdens brand toeneemt. Het grote aantal berekeningen maakt het eveneens mogelijk voor het voorbeeld uit figuur 4 de distributie van het weerstandbiedend moment en zijn evolutie tijdens brand grafisch voor te stellen (fig. 5). Uit de berekeningen blijkt dat tijdens brand een normale distributie de verdeling van het weerstandbiedend moment beter en conservatiever benadert dan een lognormale distributie. Figuur 5 bevestigt bovendien dat tijdens brand het gemiddeld weerstandbiedend moment en de

spreiding afnemen.

Door de berekende waarden voor $M_{R,t}$ te vergelijken met de rekenwaarden berekend aan de hand van de Eurocode, kan men de relatieve veiligheid van deze rekenwaarden bepalen. Bij het berekenen van het veiligheidsniveau wordt in de literatuur gebruikgemaakt van de veiligheidsindex β , algemeen gedefinieerd door (2):

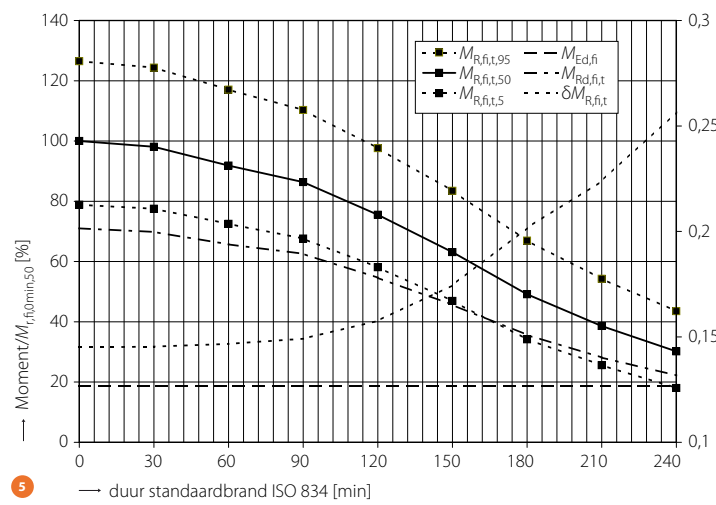
$$P_f = P[M_R < M_E] = \Phi(-\beta) \quad (2)$$

Omdat (2) echter eveneens een probabilistische berekening van de aangrijpende belastingen vereist, werden in deze studie twee alternatieve (niet-courante) definities van de veiligheidsindex toegepast:

$$P_{f,1} = P[M_{R,t} < M_{Ed,t}] = \Phi(-\beta_1) \quad (3)$$

$$P_{f,2} = P[M_{R,t} < M_{Rd,t}] = \Phi(-\beta_2) \quad (4)$$

Met vergelijkingen (3) en (4) kan de veiligheid ten opzichte van de rekenwaarden berekend op basis van de Eurocode worden bepaald zonder additionele veronderstellingen met betrekking tot de belastingen in te voeren. Zo duidt de veiligheidsindex β_2 de kans aan dat het werkelijke weerstandbiedend moment $M_{R,t}$ berekend via Monte Carlo-simulaties, kleiner is dan de rekenwaarde bepaald op basis van de Eurocode voor het weerstandbiedend moment $M_{Rd,t}$. Indien β_2 tijdens brand afneemt, wat wordt bevestigd door figuur 6, betekent dit dat de relatieve veiligheid van de rekenwaarde bepaald op basis van de Eurocode tijdens brand afneemt. Zo is er bij 240 minuten blootstelling aan de ISO 834 brandcurve een grotere kans dat het werkelijke weerstandbiedend moment van de plaat kleiner is dan de rekenwaarde van het weerstandbiedend moment berekend op basis van de Eurocode, dan bij 60 minuten blootstelling. Analooft duidt β_1 op de kans dat het werkelijke weerstandbiedend moment $M_{R,t}$ kleiner is dan de rekenwaarde van het aangrijpend moment $M_{Ed,t}$. Omdat tijdens brand $M_{Ed,t}$ onafhankelijk mag worden verondersteld van de duur van de brand, is het logisch dat β_1 tijdens brand moet afnemen. De afname van β_1 correspondeert dan ook met een toename van de kans op constructief falen van het constructie-element.



De waarden van β_1 en β_2 kunnen onder meer worden gebruikt om de huidige rekenregels voor betonconstructies tijdens brand te optimaliseren en om de brandweerstand van bestaande constructies te begroten waarbij bijvoorbeeld de exacte betondekking slechts weinig nauwkeurig bekend is. De belangrijkste toepassing ligt echter in het kwantitatief vergelijken van ontwerpalternatieven (E: comparative design). De berekening van de veiligheidsindices maakt het immers mogelijk op een objectieve manier de constructieve brandveiligheid van twee ontwerpalternatieven te vergelijken. De praktische impact van dit principe wordt hieronder toegelicht.

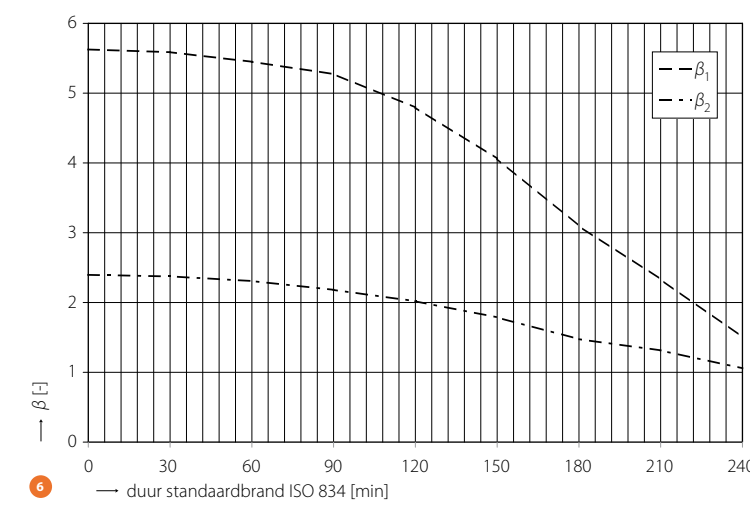
Een voldoende grote en nauwkeurig gerealiseerde betondekking

Uit het vergelijken van verschillende resultaten blijkt dat het vergroten van de betondekking de brandweerstand van betonplaten en -balken gevoelig kan verhogen, zoals blijkt uit figuur 7 voor een betondekking variërend tussen 15 en 45 mm. Deze conclusie was reeds bekend in de internationale literatuur, maar kan dankzij het ontworpen rekenmodel nu eveneens worden gekwantificeerd in termen van het constructief veiligheidsniveau, zodat een rechtstreekse afweging met andere brandtechnische maatregelen mogelijk is.

De nauwkeurige plaatsing van de wapening blijkt eveneens een zeer grote impact te hebben op de evolutie van het veiligheidsniveau tijdens brand (fig. 8). Deze conclusie is van bijzonder belang voor de praktijk. Zo kan een prefab producent dankzij gecontroleerde productieomstandigheden voor eenzelfde ontwerp van bijvoorbeeld een betonbalk een hogere brandveiligheid garanderen dan wanneer deze betonnen balk in situ wordt geproduceerd. De hogere brandveiligheid bij een nauwkeurige

Voortgezet onderzoek

In oktober 2011 werd een vierjarig vervolgonderzoek opgestart aan de Universiteit Gent. Dit onderzoek wordt mogelijk gemaakt door het Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek Vlaanderen (FWO).



plaatsing biedt ook opties voor het optimaliseren van de brandveiligheid door kwaliteitscontrole op de bouwplaats. Op basis van verschillende types kwaliteitscontrole kan een hogere constructieve brandweerstand aan betonconstructies worden toegekend. Ter illustratie is in figuur 8 voor een identiek ontwerp van een betonplaat het verschil in veiligheidsindex bij een standaardafwijking op de betondekking van in het eerste geval 0 mm en in het tweede geval 5 mm voorgesteld. Deze en andere conclusies laten een doorgedreven optimalisatie toe, waarbij architectonische, technische en financiële belangen tegen elkaar worden afgewogen. Men zou via het opgestelde rekenmodel bijvoorbeeld de financiële afweging kunnen maken tussen enerzijds het verhogen van het wapeningspercentage en anderzijds het toepassen van een verhoogde kwaliteitscontrole op de bouwplaats. ☒

