

fib Bulletin 108 over prestatiegericht brandontwerp



Medio 2023 verscheen fib Bulletin 108 'Performance-based fire design of concrete structures'. Dit rapport geeft een toelichting op ontwerpmethoden voor constructies onderhevig aan brand, die zijn gebaseerd op prestaties in plaats van concrete voorwaarden voor bijvoorbeeld de dekking.

In vergelijking met andere veelgebruikte bouwmaterialen presteert beton goed bij brand, onder meer vanwege de lagere thermische geleidbaarheid, de hogere specifieke warmte en de grotere thermische massa. Lang werd gedacht dat betonconstructies zelfs volledig brandveilig waren. Na de nodige incidenten en onderzoek werd echter duidelijk dat het materiaal ook kwetsbaar kan zijn bij brand en dat daar in het ontwerp rekening mee moet worden gehouden.

Ontwerpmethodes

Bij het ontwerpen van betonconstructies onderhevig aan brand zijn er globaal twee methodes. De eerste is een voorschrijvende methode, ook wel bekend als de *deemed-to-satisfy*-aanpak (wanneer een product voldoet aan vooraf vastgestelde normen, wordt verwacht dat aan bepaalde technische eisen wordt voldaan). Deze wordt gebruikt in de meest voorkomende constructies.

De tweede benadering is gebaseerd op prestatiecriteria, en heet ook wel *performance based design* (PBD). Deze aanpak was lang beperkt tot de wetenschappelijke wereld. Door toenemende rekenkracht van computers wordt hij echter steeds gangbaarder. De aanpak biedt meer vrijheid in het ontwerp en maakt de weg vrij voor innovatieve oplossingen. Hij kan ook resulteren in besparingen op materiaalkosten. Ook de transparantie en betrouwbaarheid van het ontwerp

nemen toe. Aan deze PBD-methode hangt echter ook een prijskaartje. Er is een hoger niveau van analyse nodig en hij is veeleisender voor de ontwerper. Ook is een intensieve communicatie met belanghebbenden vereist.

fib Bulletin

Om richting te geven aan de PBD-aanpak is *fib Bulletin 108 'Performance-based fire design of concrete structures'* opgesteld. De samensteller en redacteur van het bulletin is Thomas Gernay (John Hopkins University), een gerenommeerd expert op het gebied van *computational modelling* van het gedrag van constructies bij brand. Co-redacteur is Ruben Van Coile (Universiteit Gent), gespecialiseerd in probabilistische *structural fire safety engineering* (SFE). Binnen *fib Working Group 2.3.2* werden zij bijgestaan door een aantal andere deskundigen, onder meer vanuit Holmes.

fib Bulletin 108 bevat state-of-the-art kennis over PBD-methoden voor betonconstructies onderhevig aan brand. Het is bedoeld als richtlijn voor ontwerpers die beginnen met PBD. Het rapport is een vervolg op *fib Bulletins 38* en *46*, uit 2007 respectievelijk 2008 [1, 2]. Het geeft daarom ook een beeld van de ontwikkelingen en onderzoeksresultaten van de afgelopen 15 jaar.

Gedrag beton bij brand

Een duidelijk begrip van het materiaalgedrag van zowel beton als staal bij brand is →

auteurs



DR. JEREMY CHANG

Technical Director
Holmes NZ
(Christchurch)



**IR. PASCAL
SCHROIJEN**

Project Director
Holmes NZ (Auckland)



**DR. IR. MAURO
POLIOTTI**

Constructief Ontwerper
Witteveen+Bos /
Lid Stufib vaste
commissie fib



IR. THIJS PIERIK

Ontwerpleider
Nepocon /
Lid Stufib vaste
commissie fib



onontbeerlijk voordat een prestatiegericht constructief brandontwerp voor een betonconstructie kan worden uitgevoerd. Daarom geeft het bulletin een overzicht van de gevolgen van brand op de prestaties van beton. Daarbij wordt ingegaan op de meest relevante materiaal- en thermische eigenschappen, onder meer specifieke warmte, thermische geleidbaarheid, sterkte en stijfheid, en temperatuurafhankelijkheid.

Bij verhitting ondergaat zowel beton als staal een thermische uitzetting. Deze kan leiden tot thermische buiging of thermische spanning als gevolg van verhinderde vervorming. Bovendien verslechteren de eigenschappen van beton wanneer het wordt blootgesteld aan hoge temperaturen. De mate waarin dat gebeurt, wordt beïnvloed door vochtgehalte, type toeslagmateriaal, de betonmengselsamenstelling en de ontwikkelingsnelheid van de temperatuur. Deze degradatie is onomkeerbaar na afkoeling, omdat ze het gevolg is van chemische veranderingen in het betonmengsel. Ook de mechanische eigenschappen van wapening bij verhoogde temperaturen zijn kritische factoren, zoals vloeigrens, elasticiteitsmodulus en spanning-rek-relaties. Hierbij geldt dat voorspanstaal anders reageert dan traditionele wapening. Voorspanstaal heeft een hogere toelaatbare spanning en verliest sneller sterkte wanneer het wordt blootgesteld aan hitte en krijgt ook minder sterkte terug tijdens en na het afkoelen.

In het rapport wordt speciale aandacht besteed aan afsparren van beton als gevolg van de interactie tussen interne poriëndruk, thermische en mechanische spanningen. Dit fenomeen kan worden voorkomen door meer aandacht te besteden aan de betonsamenstelling, maar is nog steeds onderwerp van onderzoek. Het rapport vat ook andere kennishiaten samen, zoals het gedrag van verbindingen onder brandexplosie of de invloed van brand op faalmechanismen door bijvoorbeeld afschuiving, torsie of verlies van aanhechting.

Voor de berekening van de thermische spanning en de vervorming van een constructie-element tijdens een brand zijn meestal gespecialiseerde *structural fire engineering* computerprogramma's nodig, aangezien eenvoudige methoden hoogstwaarschijnlijk geen nauwkeurige resultaten opleveren voor ontwerpers. Opgemerkt wordt verder dat brand geen beschouwing van de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT) is. Zodra een brand volledig ontwikkeld is, zal er onomkeerbare schade aan de constructie ontstaan, waarna de constructie gerepareerd of vervangen moet worden.

Ontwerpproces

De essentie van een prestatiegericht constructief brandontwerp ligt in een weloverwogen en grondige overweging van verschillende factoren. Hierbij moet elke ruimte (compartiment) in een gebouw worden

Een duidelijk begrip van het materiaalgedrag van zowel beton als staal bij brand is onontbeerlijk



beoordeeld, rekening houdend met bijvoorbeeld aanwezige brandbelasting en ventilatie. Daarbij zijn ook de invloed van oppervlakteafwerkingen op de intensiteit van de brand, de locatie van de brand binnen het compartiment en de temperatuurontwikkeling factoren om rekening mee te houden.

Het belangrijkste onderdeel van het bulletin beschrijft de workflow van prestatiegericht ontwerpen bij brand (fig. 5). Dit stappenplan is in lijn met de internationale richtlijnen in voor *fire safety engineering*: ISO 23932-2018 'General Principles' en ISO 24679-1:2019 'Performance of structures on fire'. De stappen in het proces zijn over het algemeen toepasbaar voor alle typen gebouwen.

Stap I: Scope van het project De eerste stap omvat het identificeren van de context en het doel van het ontwerp. De belangrijkste aspecten daarbij zijn de kenmerken van het gebouw, de definitie van de brandbelastingen en mechanische belastingen.

Stap II: Identificeren van doelstellingen, functionele eisen, prestatie-criteria en risicoanalysebenadering In de tweede stap moeten doelstellingen worden vastgesteld. Het gaat hierbij om eisen uit voorschriften of eisen die zijn gedefinieerd door gebouweigenaren. Enkele voorbeelden zijn veiligheid van mensenlevens, bescherming van gebouwonderdelen, continuïteit van de activiteiten, bescherming van het milieu of behoud →

FIB BULLETINS

Een aantal maal per jaar publiceert *fib international* een *fib Bulletin*. Dit zijn verschillende rapporten met bijvoorbeeld aanbevelingen, ontwerphandleidingen of state-of-the-art kennis over een specifiek onderwerp. Van de voor *Cement*-lezers meest relevante rapporten publiceren we een samenvatting, in samenwerking met de vaste commissie *fib van Stufib*.

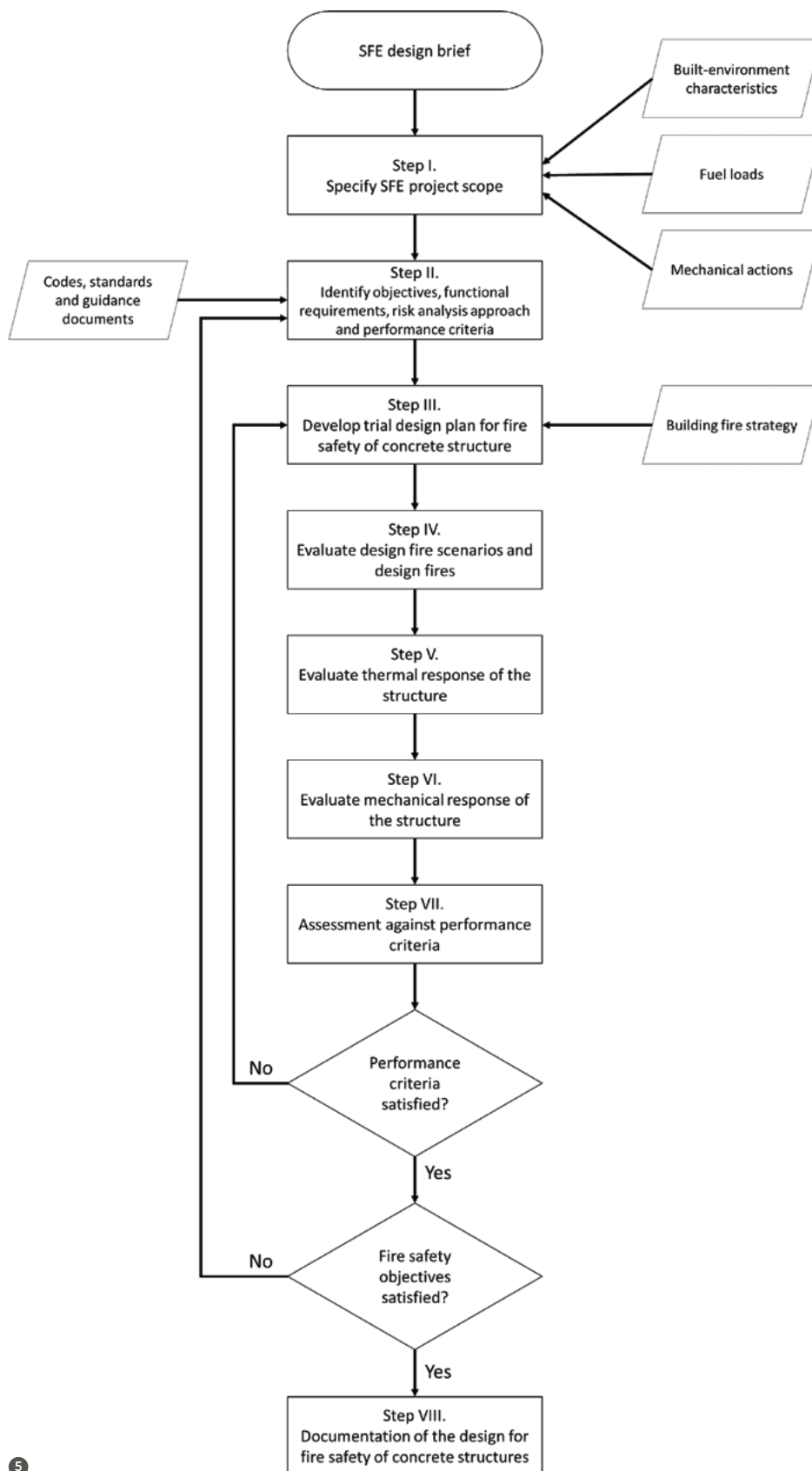


Het bulletin anticipeert op een probabilistische benadering

VASTE COMMISSIE FIB

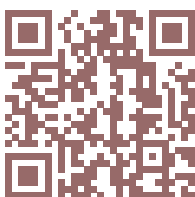
Om de link tussen *Stufib* en *fib* te stimuleren is binnen *Stufib* in 2022 de vaste commissie *fib* opgericht. Deze commissie volgt de ontwikkelingen binnen *fib* en informeert de *Stufib*-leden daarover. Ze inventariseert en selecteert onderwerpen waarvoor samenwerking kan worden opgezocht. Ook bewaakt ze de samenwerking tussen *Stufib*-studiecellen en *fib* Task Groups. Zitting in de commissie hebben:

- dr.ir. Agnieszka Bigaj-Van Vliet
- ing. Ab van den Bos
- ir. Henco Burggraaf (namens bestuur *Stufib*)
- ir. Jasper Doorgeest (secretaris)
- ing. Ronald Klein-Holte
- ir. Thijs Pierik
- dr.ir. Mauro Poliotti
- ir. Rob Vergoossen (voorzitter)



EERDER IN CEMENT

In *Cement* wordt regelmatig over brandwerendheid gepubliceerd. In 2009 verscheen zelfs een heel themanummer: Brandwerendheid onderzocht (*Cement* 2009/7), met onder andere aandacht voor Fire Safety Engineering (het toepassen van een brandfysisch model in een probabilistische benadering). Noemenswaardig is ook het artikel 'Performance based fire engineering' uit 2017. Alle artikelen over brandwerendheid zijn online gebundeld.



van erfgoed. Deze doelen moeten als functionele eisen kwalitatief worden toegelicht. Zo zou bij bescherming van gebouwonderdelen kunnen gelden: "De constructie moet na brand herstelbaar zijn". De prestatie-criteria zijn kwantitatieve gegevens waarmee wordt beoordeeld of aan de functionele eisen is voldaan. Voor hetzelfde voorbeeld kan een specifieke drempel worden vastgesteld voor de maximale temperatuur van de wapening of het beton om vast te stellen of een constructie daarna kan worden hersteld of niet. De risicoanalysebenadering verwijst ten slotte naar hoe de onzekerheden binnen het project worden behandeld. Er ontstaan twee alternatieven bij de toepassing van PBD: (1) deterministische benadering op basis van geloofwaardige worst-case-scenario's; of (2) probabilistische benaderingen.

Stap III: Proefontwerp De PBD-strategie is een iteratief proces en vereist daarom een voorlopig constructief ontwerp, meestal bij normale temperatuur.

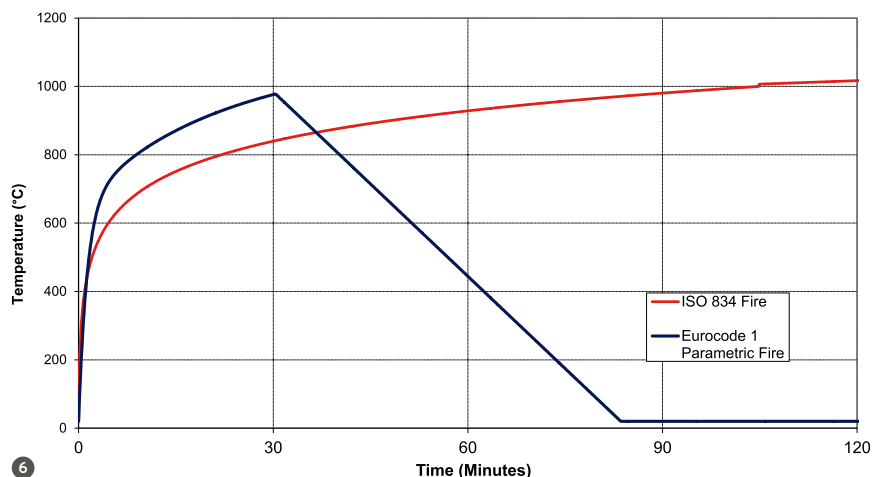
Stap V: Ontwerpbranden Op basis van het potentiële gebruik van het gebouw formuleert de brandveiligheidsadviseur ontwerpbranden, uitgedrukt in temperatuur-tijd- of tijd-warmteafgifte-relaties. Dit is een van de belangrijkste aspecten van het ontwerpproces. Het wordt niet aanbevolen om gestandaardiseerde curven te gebruiken, omdat realistische of 'fysisch gebaseerde' branden een beter beeld geven van het werkelijke gedrag.

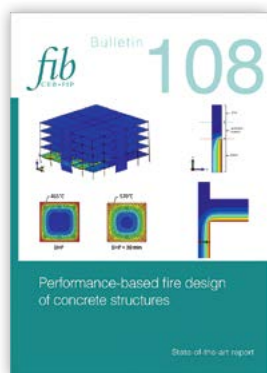
De ontwerpbranden kunnen variëren in grootte en locatie en moeten rekening houden met factoren als aanwezige brandbare materialen, locaties van scheidingswanden en de mogelijkheid van meerdere gelijktijdige branden. Het is noodzakelijk om een eindig aantal brandscenario's te overwegen met geloofwaardige worst cases. Als alternatief moet in een probabilistische analyse een volledig scala aan potentiële branden worden gegeneerd.

Stap V: Thermische respons Er wordt een thermische analyse uitgevoerd om de niet-lineaire temperatuurverdeling te bepalen. Hierbij moet rekening worden gehouden met de locatie van de brand, de afmetingen van de compartimenten, de afmetingen en locatie van openingen, de aanwezigheid van een brandbestrijdingssysteem en met temperatuurafhankelijke eigenschappen van de materialen.

Meer specifiek moet de onomkeerbaarheid van thermische eigenschappen worden meegenomen om het thermische gedrag tijdens de afkoelingsfase te kunnen vastleggen. De analyse moet de thermische randvoorwaarde in alle oppervlakken omvatten. Meestal is hiervoor een 1D- of 2D-thermische analyse voldoende, wat meestal wordt gedaan door middel van eindige elementenanalyse.

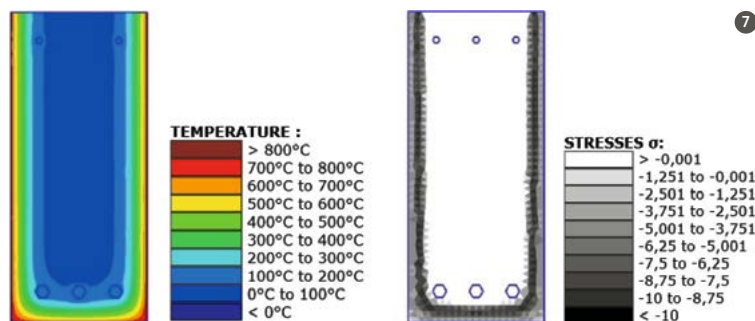
Stap VI: Mechanische respons Vervolgens moet de mechanische respons worden bepaald, rekening houdend met de tempe- →





FIB BULLETIN 108

fib bulletin 108 'Performance-based fire design of concrete structures' (mei 2023, 115 p.) is geschreven door fib Working Group 2.3.2 'Performance-based fire design'. Het bulletin is, zowel in pdf als in print, te koop op de website van fib:



ratuurverdeling verkregen in de vorige stap, en de mechanische belastingen. Deze respons moet rekening houden met de effecten van brand en temperatuur op de mechanische materiaaleigenschappen onder verschillende temperaturen, zoals thermische uitzetting, sterkte en stijfheid. Ook moeten typen constructieve elementen, geometrie van de elementen, verbindingen en randvoorwaarden en aanwezige reserv capaciteit in de gehele constructie worden beschouwd.

Deze analyse moet inzicht geven in het draagvermogen en de stabiliteit van de constructie tijdens de gehele duur van de brand (verwarmings- en afkoelingsfasen). Daarom moet rekening worden gehouden met de temperatuurafhankelijkheid van de materiaaleigenschappen en de onomkeerbaarheid tijdens de afkoelingsfase.

Zowel de thermische als de mechanische responsanalyse moet worden uitgevoerd totdat de constructie weer volledig is afgekoeld. De belangrijkste reden hiervoor zijn de verdere degradatieprocessen die

kunnen optreden, zoals verdere afname van de sterkte of onomkeerbaarheid van tijdelijke krimpspanningen.

Er worden globaal twee methoden gebruikt voor de analyse van de mechanische respons: een doorsnede berekening en een geavanceerde niet-lineaire eindige elementenberekening. In een bijlage van het bulletin worden richtlijnen gegeven over hoe deze geavanceerde berekeningen kunnen worden toegepast.

Het kiezen van de juiste methode is cruciaal en vereist kennis van de mogelijkheden en beperkingen van de methode. Eenvoudige spreadsheetberekeningen, zoals die zijn ontwikkeld op basis van de vloeilijntheorie, kunnen ontoereikend zijn bij onregelmatige vloervormen of lokale branden. En sommige eindige-elementenanalyseprogramma's kunnen onomkeerbare schade beter in rekening brengen dan andere.

Stap VII: Vergelijking doelstellingen Nadat de thermische en mechanische respons is



bepaald voor alle overwogen brandscenario's, worden de beoordelingsresultaten vergeleken met de prestatiecriteria. Deze criteria hebben meestal betrekking op het borgen van de stabiliteit van de constructie gedurende een vooraf bepaalde periode tijdens een brand, inclusief een periode na afkoeling. Aanvullend criterium kan bijvoorbeeld zijn het beperken van vervorming om scheuren in beton te voorkomen.

Als aan de branddoelstellingen is voldaan, kan het ontwerp verder worden gedocumenteerd en geïmplementeerd. Als het ontwerp niet voldoet, moet het worden aangepast (terug naar stap III). Een andere mogelijkheid is een heroverweging van de functionele eisen.

Stap VIII: Documentatie Als laatste stap volgt de documentatie van het gehele ontwerpproces. Het bulletin bevat een paragraaf met de aanbevolen documentatie voor prestatiegericht constructief brandontwerp voor betonnen gebouwen. Deze documentatie die aannames, beperkingen, prestatiecriteria en beoordelingsresultaten omvat, is belangrijk voor het verkrijgen van goedkeuring en dient als documentatie voor mogelijke toekomstige wijzigingen aan het gebouw. Details van indieningsvereisten kunnen verschillen, afhankelijk van de lokale bouwtoezicht, echter de informatie die moet worden verstrekt is in principe vergelijkbaar.

Probabilistisch ontwerp

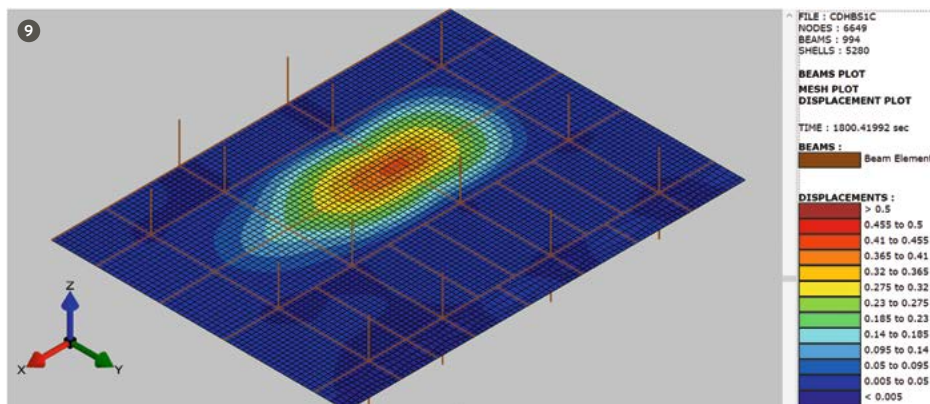
Het bulletin anticipeert op toekomstige trends in prestatiegericht constructief brandontwerp, waarbij een probabilistische

benadering wordt geïntegreerd. Deze ontwikkeling is het gevolg van de vooruitgang in reken capaciteit van computers, die het mogelijk maakt om een veelheid aan simulaties uit te voeren binnen een haalbaar tijdsbestek.

Bij probabilistisch ontwerpen wordt rekening gehouden met de waarschijnlijkheid van gebeurtenissen, waardoor de mogelijke gevolgen kunnen worden beoordeeld met behulp van uitgebreide computersimulaties. Deze benadering maakt verdere optimalisatie van brandbeveiligingsstrategieën mogelijk. Het bulletin gaat in op de implementatie van deze benadering en geeft inzichten in de beoogde uitvoering.

Nuttige richtlijn

Het bulletin dient als een uitgebreide introductie tot prestatiegericht constructief brandontwerp. Hoewel het gericht is op betonconstructies, kan het concept ook worden toegepast op andere typen constructies, zoals beton-staalbetonconstructies of zelfs houtconstructies. Het bulletin is geschreven door een groep experts op dit gebied en geeft de state-of-the-art weer in de kennis van constructief brandontwerp. Het is een nuttige richtlijn voor ontwerpers, ongeacht de mate waarin ze bekend zijn met prestatiegericht constructief brandontwerp. Een nadeel is dat het document toepassingsvoorbeelden mist die de lezer verder zouden helpen bij het implementeren van de aanbevelingen. Toch zal het document zeker hulp bieden bij de toepassing van de prestatiegerichte benadering. ●



LITERATUUR

- 1 *fib* Bulletin No. 38: Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling, 2007.
- 2 *fib* Bulletin No. 46: Fire design of concrete structures - structural behavior and assessment, 2008.