

O|2, BRANDT HET OF BRANDT HET NIET?

Het klinkt heel eenvoudig, bouwconstructies dienen voldoende weerstand tegen bezwijken te hebben bij brand (hierna: hoofdconstructie). In de basis weten we hoe het zit: een belasting die aan de orde is, temperaturen die op kunnen treden, materiaaleigenschappen bij verschillende temperaturen.... De praktijk is echter weer eens weerbarstiger. Constructies staan niet alleen. Niet alleen hangen verschillende constructies met elkaar samen, elke constructie heeft een relatie met zijn omgeving. De betekenis hiervan voor de eigenschappen van constructies bij brand is niet eenduidig aan de hand van geëigende methoden vast te stellen. Om deze onzekerheid te compenseren kunnen extra voorzieningen worden getroffen. Dit brengt kosten met zich mee, heeft esthetische consequenties of kan niet conform het toepassingsgebied worden gerealiseerd. Door voor concrete situaties rekenkundig uitspraken te doen over het te verwachten temperatuurverloop in de constructie bij een brand, kunnen voorzieningen beter worden afgestemd op de situatie. In dit artikel wordt aan de hand van een casus, het O|2 gebouw te Amsterdam, inzicht gegeven in de mogelijkheden die er op dat gebied zijn. Om de diversiteit aan te geven zijn verschillende situaties besproken.



ir. J.F. (Jaap) Wijnia,
Peutz, Zoetermeer

CASUS

Het O|2 gebouw van de Vrije Universiteit (VU) te Amsterdam is ontworpen door EGM-architecten, waarbij DHV tekende voor de constructies. De constructie van het gebouw is ontworpen in staal met kanaalplaatvloeren. Zie figuur 1 voor een impressie van het gebouw, hierbij zijn de zogenaamde Mikado-kolommen goed te zien. Ook de verdiepingsvloeren boven buitenlucht zijn hier goed zichtbaar. Voor 3 verschillende situaties heeft Peutz de temperaturen in de constructies berekend in geval van brand:

1. staalkolommen in de buitenlucht, de zogenaamde Mikado-kolommen;
2. kanaalplaatvloeren boven buitenlucht;
3. staalconstructie in een binnensituatie.

Door DHV is voor de staalconstructies vastgesteld wat de maximaal toelaatbare temperaturen in de constructies zijn (kritieke temperaturen). Voor de kanaalplaatvloer zijn de gegevens van de brancheorganisatie dienaangaande gehanteerd.

BUITENKOLommen

Een deel van de bovenste verdiepingen (10^e tot en met 13^e) wordt gedragen door een constructie die in de buitenlucht op het dak van de lager gelegen 4^e verdieping is gepositioneerd. Deze zogenaamde Mikado-kolommen bestaan uit meerdere stalen kokerprofielen die onder verschillende hoeken zijn geplaatst (goed zichtbaar in figuur 1). Deze kolommen staan in de buitenlucht, ten minste 6 m verwijderd van de meest nabij gelegen gevel. Door de gevelindeling en de indeling in brandcompartimenten, beide sterk gedecteerd door eigenschappen van het gebouw, worden de kolommen aangestraald door uit-slaande vlammen.

In standaard berekeningen, uitgevoerd op het gebied van brandwerendheid van een staalconstructie met betrekking tot bezwijken, wordt conform de toepasselijke normen gerekend met de standaard brandkromme en standaard rekenregels, passend bij een binnensituatie. Dat betekent dat wordt gerekend met een temperatuurontwikkeling

Tabel 1: De drie verschillende situatie waarvoor de temperaturen in de constructies zijn berekend

situatie	Mikado-kolommen	kanaalplaatvloer	binnenconstructie
materiaal	staal	beton	zie voorbeeld
soortelijke massa	7800 kg/m ³	430 kg/m ²	zie voorbeeld
soortelijke warmte [J/kgK]	480	880	zie voorbeeld
immissie [-]	1,0	0,94	1,0
aanvangstemperatuur [°C]	35	35	25
omgevingstemperatuur [°C]	35	150 / 20 ¹⁾	oplopend / 20 ²⁾
kritieke temperatuur [°C]	435	200	791
convectie [W/m ² K]	20 (aan buitenlucht)	20 (aan buitenlucht)	25 (brandzijde) 8 (niet brandzijde)

1) Buiten is de lucht opgewarmd door de brand, binnen heerst de binnentemperatuur.

2) Waar de brand zich ontwikkelt loopt de temperatuur op conform de brandkromme, waar nog geen brand is heerst de binnentemperatuur.



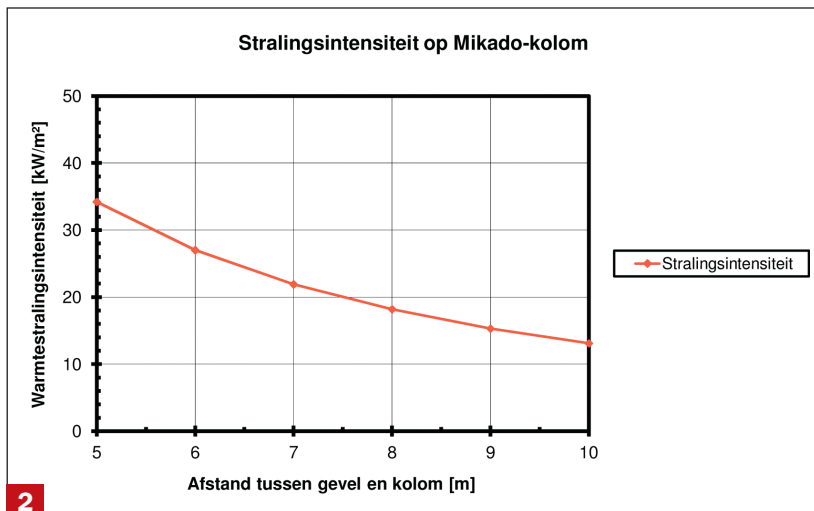
1 Impressie 0 | 2 gebouw

oplopend tot ruim boven 800°C binnen 30 minuten. Toepassing van de gereduceerde brandkromme voor buitensituaties wordt in de NEN 6069 voor deze situatie expliciet uitgesloten. Bij de Mikado-kolommen wordt verwacht dat de constructieonderdelen zich buiten de optredende vlamlichamen vanuit onderliggende of aangrenzende gevelopeningen bevinden. Dit fenomeen is bepalend voor de keuze van de bepalingsmethode.

Welke onderdelen van constructies zich wel en niet in de vlammen bevinden kan bijvoorbeeld worden bepaald door middel van berekeningen met het model van M. Law [1]. Hiermee kan worden bepaald wat de dimensie van het vlamlichaam is en of bepaalde staalconstructies zich binnen dit volume bevinden of daarbuiten. Voorts kan worden bepaald welke stralingsbelasting op de constructie aan de orde is. Op deze manier kan een staalconstructie efficiënter worden gedimensioneerd c.q. kan met meer zekerheid een uitspraak over de prestatie van de constructie worden gedaan. Dit model ligt ook ten grondslag aan de brandoverslagberekeningen volgens NEN 6068, waarbij zij opgemerkt dat hier het oorspronkelijke model van Law is gebruikt, omdat dat is gebaseerd op praktijkproeven en niet door compromissen in de normcommissie is aangepast.

Door de hoekstand van de kolommen varieert de afstand van de kolom tot één van de gevels, waarbij de kleinste afstand tot de gevel circa 6,0 m bedraagt. Om te bepalen in hoeverre daadwerkelijk een voldoende veilige situatie wordt gerealiseerd met niet aanvullend brandwerende afwerking van deze kolommen, is bepaald welke temperatuur de Mikado-kolommen aannemen bij een brand in een naastgelegen brandcompartiment. Deze temperatuur is afhankelijk van de hoeveelheid warmtestraling die op de Mikado-kolom valt, en is daarmee afhankelijk van de afstand tussen de Mikado-kolom en de gevel.

Ten eerste is de warmtestralingsintensiteit ter plaatse van de Mikado-kolommen bepaald bij een brand in een naastgelegen compartiment. Hiertoe is gebruik gemaakt van het rekenmodel dat tevens dient voor de berekening van de brandoverslag. Hoe kleiner de afstand tot de gevel van



2 Warmtestralingsintensiteit als functie van de afstand tot de gevel

de brandruimte, des te groter de warmtestralingsintensiteit op de betreffende Mikado-kolom.

De modellering van de brandontwikkeling in de brandruimte is verricht conform de Nederlandse norm NEN 6068 voor de bepaling van de weerstand tegen brandoverslag. Bij de stralingsberekeningen is voor dit aspect uitgegaan van het Law-model. Op verschillende afstanden van de gevel van een brandruimte is de warmtestralingsintensiteit bepaald. Hierbij is uitgegaan van een gevel waarin een strook met een hoogte van circa 2,0 m (circa 50% van de gevel), bestaand uit circa 300 mm dik beton, ten minste 90 minuten brandwerend is.

In figuur 2 is de warmtestralingsintensiteit weergegeven in een grafiek voor een zekere afstand tot de gevel. Bij de kortste afstand tussen gevel en Mikado-kolom – circa 6,0 m – bedraagt de warmtestralingsintensiteit circa 27 kW/m². Vanaf een afstand van circa 7,5 m is de warmtestralingsintensiteit lager dan 20 kW/m². Om vast te stellen of de Mikado-kolom bestand is tegen een dergelijke stralingsbelasting, dient de stijging van de staaltemperatuur ten gevolge van de straling te worden bepaald.

Met de berekende warmtestralingsintensiteit is het temperatuurverloop in de Mikado-kolom bepaald. Door de stralingsbelasting warmt de kolom op, afhankelijk van de massa en de warmtecapaciteit. Tegelijkertijd geeft de kolom warmte af door straling aan de omgeving en door convectieve overdracht aan de buitenlucht.

Bij de berekeningen is uitgegaan van de volgende afmetingen van de constructie:

- diameter kolom: 813 mm
- wanddikte: 16 mm

Voor het rekenmodel zijn de volgende aannames gehanteerd:

- De warmtestralingsintensiteit op de kolommen is vanaf begin tot eind maximaal, hetgeen in de praktijk niet het geval zal zijn. Het model van Law gaat uit van een ontwikkelde compartimentsbrand.
- De convectieve overdracht aan de buitenlucht is verondersteld gelijk te blijven. In de praktijk zal deze



groter worden door toenemende temperatuur en turbulente luchtstroming.

- De warmte wordt verondersteld zich gelijkmatig over de voor- en achterzijde van de kolom te verdelen (ideale warmtegeleiding), de warmte verdeelt zich niet langs de kolom naar boven of beneden (geen warmtegeleiding). In de praktijk zal geen sprake zijn van ideale geleiding of isolatie.

In figuur 3 is voor verschillende warmtestralingsintensiteiten het temperatuurverloop van de aangestraalde Mikado-kolom getoond. De uiteindelijk bereikte staaltemperatuur volgt uit de evenwichtssituatie waarbij de ontvangen warmte (stralingsbelasting) gelijk is aan de afgegeven warmte (door convectie en straling aan de omgeving). De snelheid waarmee dit evenwicht wordt bereikt is afhankelijk van de warmtecapaciteit van de constructie. Voor kolommen met een grotere wanddikte (bijvoorbeeld 20 mm) zal meer tijd verstrijken voordat eenzelfde temperatuur wordt bereikt.

Op basis van bovenstaande kan het volgende worden geconcludeerd:

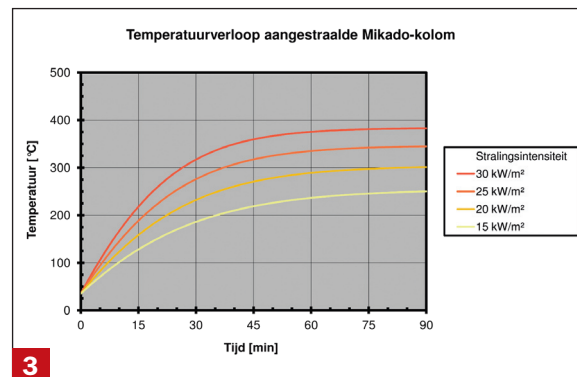
- Op een afstand van 6,0 m bedraagt de warmtestralingsintensiteit circa 27 kW/m².
- Bij een continue warmtestralingsintensiteit van 27 kW/m² bedraagt de temperatuur van de stalen Mikado-kolommen circa 360°C na verloop van 90 minuten.
- Het is niet aannemelijk dat na 90 minuten de staaltemperatuur nog wezenlijk zal stijgen, gezien het brandverloop is een daling van de temperatuur te verwachten.
- Aangezien na 90 minuten de temperatuur van het staal ruimschoots onder de toelaatbare temperatuur van 435°C is gebleven, kan worden gesteld dat de kolommen bij een brand in een naastgelegen brandruimte ten minste 90 minuten intact blijven.

KANAALPLAATVLOER

De vloer van de 10^e verdieping, bestaande uit kanaalplaat, is deels boven buitenlucht gelegen. Bij brand op een lagere verdieping kan de vloer worden opgewarmd tot een ontoelaatbare temperatuur. Om dit te vermijden is de gevel van de 9^e verdieping – direct onder die vloer – uitgevoerd in constructies met een weerstand tegen branddoorslag van 60 minuten. Aanvullend onderzoek is verricht naar het temperatuurverloop in de vloer ten gevolge van een brand op de 8^e verdieping. De kanaalplaatvloer van de 10^e verdieping vormt gedeeltelijk een overstek ter plaatse van de 9^e verdieping en wordt gedragen door Mikado-kolommen in de buitenlucht. De vloer dient in geval van brand gedurende 60 minuten intact te blijven. Op basis van richtlijnen en aanwijzingen heeft de constructeur een maximale temperatuur van 200°C voor de onderzijde van de kanaalplaatvloer vastgesteld.

Te onderzoeken situatie

Voor een brand op de 8^e verdieping wordt onderzocht of de kanaalplaatvloer niet te warm wordt. Er zal worden bepaald of de temperatuur van de kanaalplaatvloer het temperatuurcriterium van 200°C overschrijdt en of er aanvullende maatregelen getroffen dienen te worden. Hiertoe worden tevens de benodigde brandwerendheid



3 Temperatuurverloop van de aangestraalde Mikado-kolom

van de gevel van de 9^e verdieping en de brandwerende voorzieningen voor de technische kruipkoker onderzocht.

Bepalingsmethode

Het onderzoek is in twee stukken te verdelen. In het eerste deel wordt door middel van een berekening analoog aan NEN 6068, conform het oorspronkelijke Law-model, bepaald wat de stralingsintensiteiten ter plaatse van de vloer zijn ten gevolge van een brand op de 8^e of 9^e verdieping. Aan de hand van deze straling en de lokaal toegenomen temperatuur boven de vlam, warmt de vloer op. De temperatuur boven de vlam is bepaald met behulp van het pluimmodel van Thomas en bedraagt circa 150°C. Tegelijkertijd geeft de vloer convectieve warmte af aan de lucht aan de onder- en bovenzijde van de vloer. Op basis van een energiebalans en een dynamisch rekenmodel is de temperatuur aan de onderzijde van de kanaalplaatvloer bepaald.

Warmtestraling

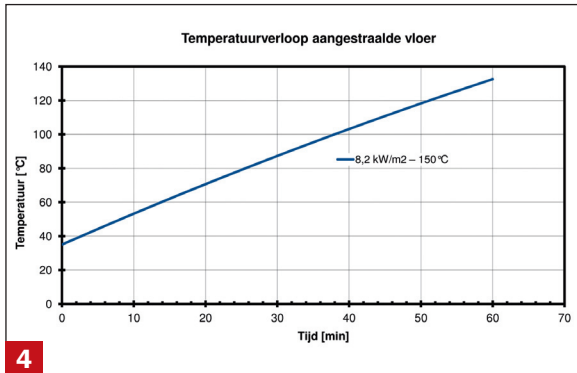
Met het door Peutz ontwikkelde programma Pintegraal versie 44.a7 zijn de vlamafmetingen en stralingsintensiteiten berekend conform het Law-model. De straling is op verschillende afstanden van de gevel bepaald. Vervolgens is de hoogste waarde gebruikt om de maximale temperatuur ter plaatse van de vloer te bepalen.

Uitgangspunten

Op basis van de maximaal berekende stralingsintensiteit is vervolgens het temperatuurverloop van de kanaalplaatvloer ter plaatse van de 10^e verdieping berekend.

De volgende aannames zijn gehanteerd:

- De warmtestralingsintensiteit is vanaf begin tot eind verondersteld maximaal te zijn. In werkelijkheid zal dit niet het geval zijn. Hiervoor geldt hetzelfde als bij de Mikado-kolommen.
- De buitentemperatuur aan de onderzijde van de vloer is verondersteld constant te zijn vanaf aanvang van de brand. In werkelijkheid zal er sprake zijn van een opwarming van de lucht tot 150°C.
- De convectieve overdracht aan de buitenlucht is verondersteld gelijk te blijven. In de praktijk zal deze groter worden door de toenemende temperatuur en turbulente luchtstroming.
- De warmte wordt verondersteld zich instantaan en gelijkmatig over de dikte van de vloer te verspreiden. In de praktijk zal geen sprake zijn van ideale geleiding.



4

Temperatuurverloop in de betonvloer

Onderzoeksresultaten

De maximaal berekende waarde ten gevolge van brand op de 8^e verdieping bedraagt circa 8,2 kW/m².

De stralingsintensiteiten ten gevolge van brand op de 9^e verdieping zijn in alle gevallen lager dan bovengenoemde waarde indien de gevel als volgt 60 minuten brandwerend wordt uitgevoerd:

- Daar waar de kanaalplaatvloer van de 10^e verdieping direct een overstek vormt voor de 9^e verdieping, compleet.
- Voor de gevel naast de overstek dient de breedte van 1 stramien (1,8 meter) 60 minuten brandwerend te worden uitgevoerd om het temperatuurcriterium van de nabij gelegen kanaalplaatvloer van de 10^e verdieping niet te overschrijden.
- Het vluchttrappenhuis en het liftportaal bevinden zich per definitie niet in een brandcompartiment. Als gevolg hiervan is hier geen sprake van invloed op de kritische temperatuur van de kanaalplaatvloer. In bepaalde situaties wordt de gevel brandwerend uitgevoerd om trappenhuis of brandweerlift te beschermen tegen brandoverslag.
- Stralingsintensiteit vanuit een om de hoek gelegen geveldeel naar de kanaalplaatvloer is laag. Brandwerende maatregelen op deze locaties zijn niet benodigd.

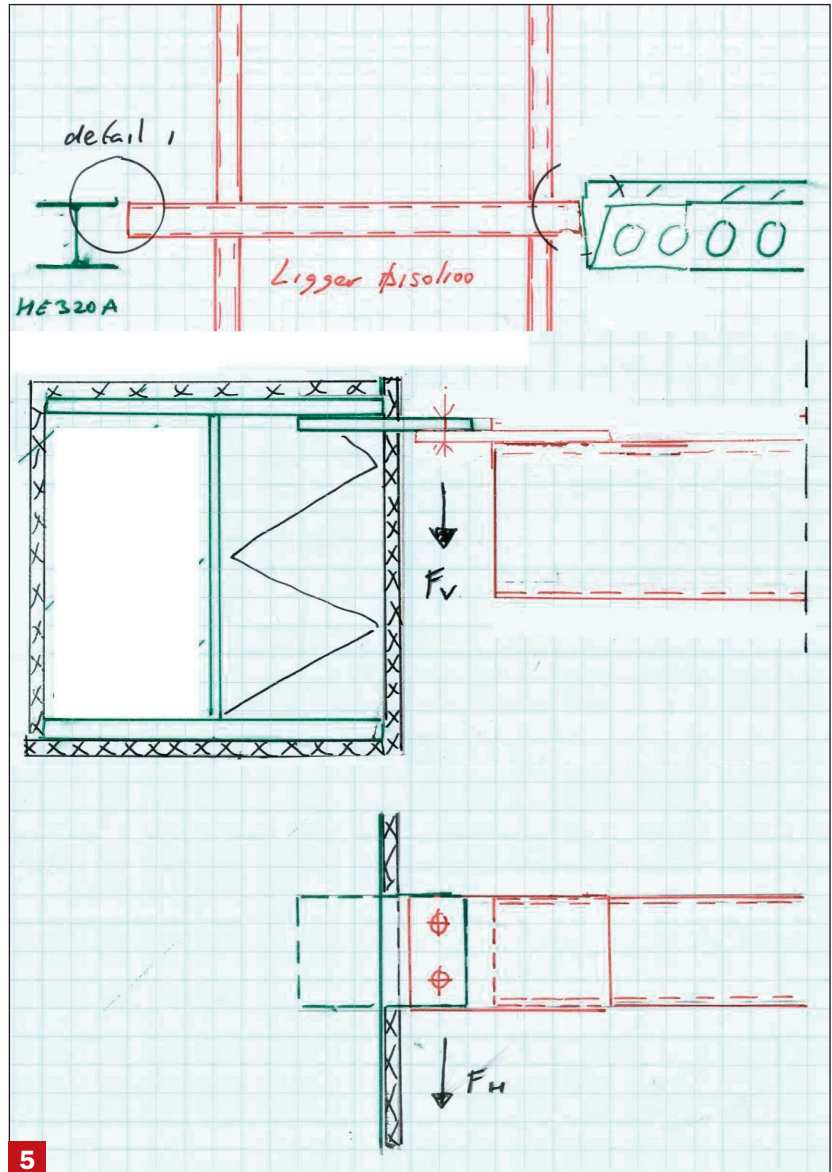
Temperatuurverloop kanaalplaatvloer

In figuur 4 is het temperatuurverloop van de kanaalplaatvloer weergegeven. Hieruit wordt geconcludeerd dat de temperatuur van 200°C niet binnen 60 minuten, en zelfs niet binnen 90 minuten, wordt bereikt.

BINNENCONSTRUCTIE

Rondom de liftschachten zijn staalconstructies ontworpen die deels onderdeel uitmaken van de hoofddragconstructie. Deels zijn windverbanden direct aan de constructie gekoppeld en zijn de constructies voor de liften aan de hoofddragconstructie gekoppeld. De hierdoor ontstane knooppunten, in combinatie met de gewenste afwerking van onder andere het windverband, leidt tot onzekerheid over temperaturen in de hoofddragconstructies. Om dit te bepalen is gebruik gemaakt van het pakket Voltra, om in tijd variërende eigenschappen binnen het detail in voldoende nauwkeurigheid te kunnen meenemen.

De hierna gepresenteerde situatie betreft een thermische brug ter plaatse van een koppeling van de hoofddragcon-



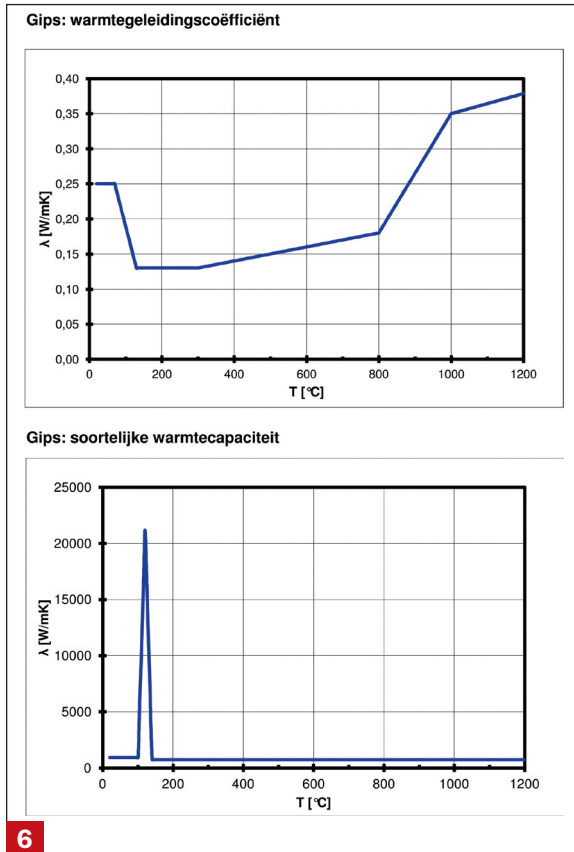
5

Ansluiting liftconstructie op de hoofddragconstructie

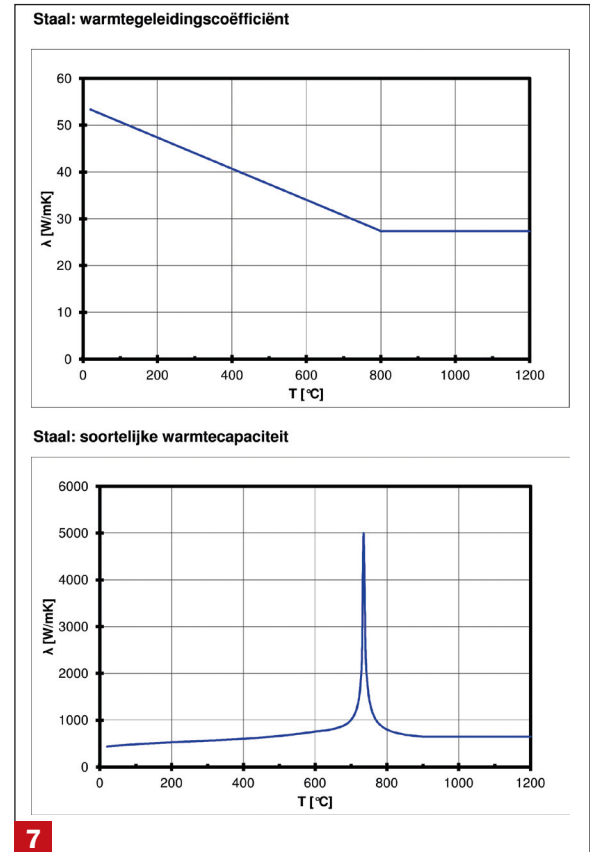
structie aan de liftconstructie. De hoofddragconstructie bevindt zich ter plaatse van liftplein oost en west op as E en D en bestaat uit een HE320A-profiel dat langs de gevel is gelegen. Tussen het HE320A-profiel en het stalen frame type 1 van de liftconstructie is een verbinding door de brandwerende bekleding (thermische brug) verondersteld van 100 x 10 mm, waaraan het stalen frame van de liftconstructie wordt bevestigd (zie figuur 5). Voor deze twee stalen liggers zijn berekeningen uitgevoerd om de temperatuur te bepalen in geval van brand in de liftschacht en in het geval van brand in het aangrenzende brandcompartiment.

Bepalingsmethode

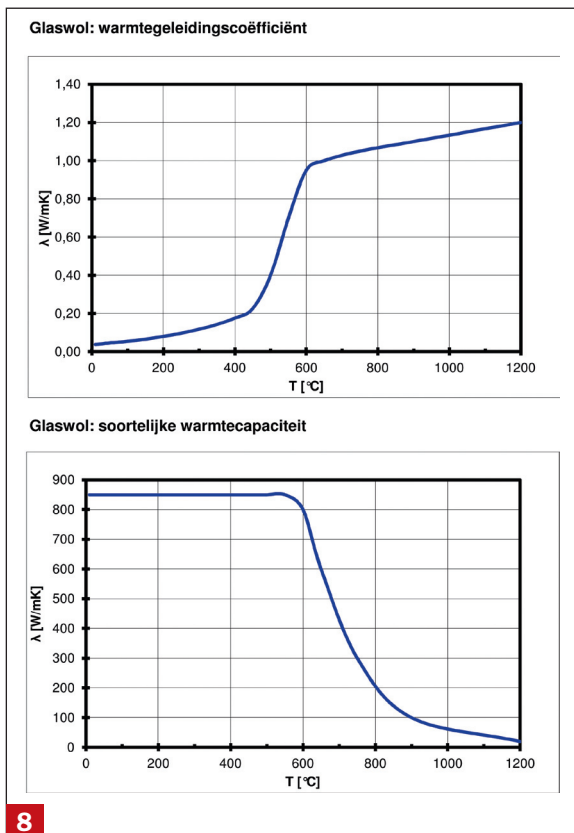
Voor het betreffende detail is in het rekenprogramma Voltra van Physibel een driedimensionaal rekenmodel opgesteld waarbij een standaard brandverloop wordt gesimuleerd. Per tijdstap van een halve minuut worden, op basis van een eindige elementenmethode, de optredende temperaturen in het model berekend. De door Voltra berekende temperaturen zijn afhankelijk van gekozen modelparameters. Deze zijn zodanig veilig ingeschat dat de berekende situatie ongunstiger is dan dat de situatie in werkelijkheid zou zijn (worst case scenario).



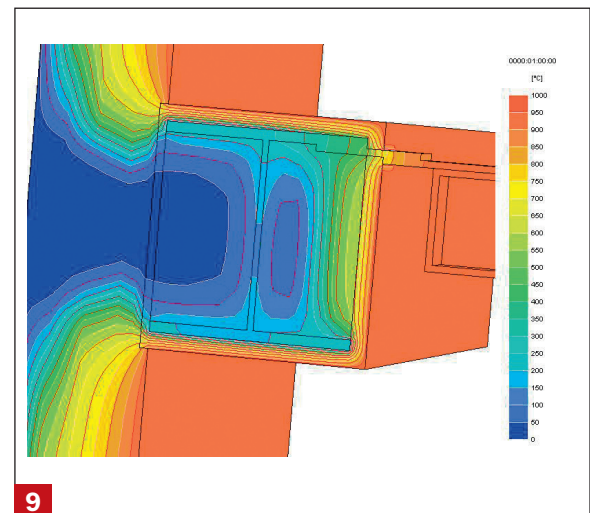
Gipseigenschappen als functie van de temperatuur



Staaieigenschappen als functie van de temperatuur



Glaswoleigenschappen als functie van de temperatuur



Temperatuurverloop in hoofddragconstructie

Voorts is er uitgegaan van de volgende uitgangspunten:

- Interval tijdstap: 30 seconden, met uitvoer om de 5 minuten.
- De gridindeling is zodanig gekozen dat verdere verfijning geen significant ander rekenresultaat oplevert.

- Bij overgangen waarbij een groot verschil is tussen de materiaaleigenschappen is een verfijnde gridindeling toegepast.
- Van alle materialen, met uitzondering van het beton zijn de fysische eigenschappen temperatuurafhankelijk ingevoerd, zie de figuren 6 tot en met 8 ter illustratie (bij beton wordt verondersteld dat de toename van de warmtegeleidingscoëfficiënt bij verhitting ruimschoots gecompenseerd wordt door de positieve invloed van de uitdamping van vocht).
- De aangehouden functies hebben niet persé een fysische betekenis (hoewel de fysica wel de basis is voor de te hanteren gegevens), maar geven de situatie weer, waarbij de uitkomsten van de berekeningen conservatief worden ingeschat. Daarbij is rekening

- gehouden met de eventuele desintegratie van materialen.
- In de berekeningen is aangenomen dat de wanden voldoen aan de brandwerendheidseis van 60 minuten. De verhitte zijde van het detail wordt zodoende belast met de standaardbrandkromme en de niet-verhitte zijde wordt belast met een 60 minuten vertraagde standaardbrandkromme.
- Warmteoverdrachtscoëfficiënt luchtholtes: 3,15 W/m²K (exclusief straling).
- Gerekend is met een niet-lineaire stralingsoverdracht: er wordt naarmate het temperatuurverschil toeneemt per graad temperatuurverschil steeds meer warmte overgedragen naar de in de zichthoek aanwezige materialen.

BEREKENDE TEMPERATUREN STAALCONSTRUCTIE

In figuur 9 is het berekende temperatuurverloop in de constructie na 60 minuten weergegeven. Hieruit blijkt dat de staalconstructie ruimschoots onder de maximale kritische staaltemperatuur blijft (circa 500°C) voor het berekende detail. Uit de berekening blijkt dat het detail voldoet aan de door de constructeur opgegeven kritische staaltemperaturen na 60 minuten brandverloop. Afgezien van de reeds aangehouden brandwerende voorzieningen zijn geen aanvullende maatregelen nodig.

ALGEMENE CONCLUSIES

Voor het O|2-gebouw is met de hierboven omschreven methodes concreet een uitspraak gedaan over de te ver-

wachten functionaliteit van de hoofddraagconstructie bij brand. Door deze concrete uitspraken is *meer zekerheid over het niveau van veiligheid* en kan het treffen van voorzieningen aan de windverbanden in de vides of de draagconstructie voor de liftmechanismen achterwege blijven. Waar het de draagconstructie van de liften betreft, is niet alleen esthetiek van belang, maar ook de mogelijkheid om een bekleding te realiseren.

Het is bij dergelijke onderzoeken van groot belang vooraf de noodzakelijke betrouwbaarheid vast te stellen, zodat tijdens het onderzoek die betrouwbaarheid ook als leidraad dient voor de te hanteren uitgangspunten, (materiaal-)data en deelmodellen. Omdat dit maatwerk-onderzoek betreft en derhalve niet vastgestelde randvoorwaarden en uitgangspunten direct toepasbaar zijn, dient ook heel duidelijk aangegeven te worden hoe en waarmee is gerekend. ■

BRONNEN

- ▶ [1] Fire safety of bare external structural steel: Law, M. et al, 1981
- ▶ [2] Bouwbesluit 2003: versie zoals van kracht 31 maart 2012
- ▶ [3] Bouwbesluit 2012: versie zoals van kracht 30 november 2012
- ▶ [4] NEN 6068:2004

VRAAG REDACTIE:

Bij de beoordeling van het O|2 gebouw is gekozen voor fysische benadering en is gebruik gemaakt van het model van Law voor het berekenen van de warmtestraling. Law heeft ook een model voor geventileerde omstandigheden (zie ook NEN-EN-1991). Waarom is er voor gekozen niet dit model te hanteren?

ANTWOORD AUTEUR:

Het model van Law geeft 2 verschillende submodellen voor het benaderen van windinvloeden. Het eerste betreft een model waarbij door dwarsventilatie aan de lijzijde van het gebouw veel grotere vlammen ontstaan dan met een situatie waarbij relatief lage windsnelheden aan de orde zijn. Het tweede betreft een model waarbij ten gevolge van een luchtstroming parallel aan de gevel de vlammen niet loodrecht op de gevel uit de gevel komen.

Bij de modellering zoals in dit artikel besproken spelen daarbij de volgende overwegingen:

1. De brandruimten zoals in dit gebouw aan de orde hebben geen tegenover elkaar gelegen buitengevels, waardoor een echte dwarsventilatie niet kan ontstaan. Wel is sprake van gevelopeningen in twee verschillende gevels met een onderlinge hoek van 90°. Er kan derhalve wel sprake zijn van relatief veel toevoer van zuurstof en buitenlucht door één gevel en relatief veel afvoer van onverbrande gassen door een andere gevel, leidend tot grotere vlammen. Bij de beschouwde situaties zal in het geval van veel afvoer door één van de gevels sprake zijn van een luchtstroming parallel aan die zelfde gevel (zie onder 2).
2. Bij een luchtstroming parallel aan de gevel zal, naast schuine vlammen, ook sprake zijn van een sterkere inmengen van omgevingslucht en derhalve meer afkoeling. Omdat in dit geval sprake is van observatiepunten tegenover of boven de brandruimte, waarbij de positie in horizontale zin niet als relevant is meegenomen (de hele breedte van de gevel is beschouwd met gehanteerde immissie voor een als ongunstige locatie berekende positie), heeft de stand van de vlammen weinig invloed, terwijl de afkoeling wel invloed heeft op de resultaten.

Resumerend is gesteld dat de gehanteerde versie van het Law-model voldoende representatief is voor de verrichte beoordeling.