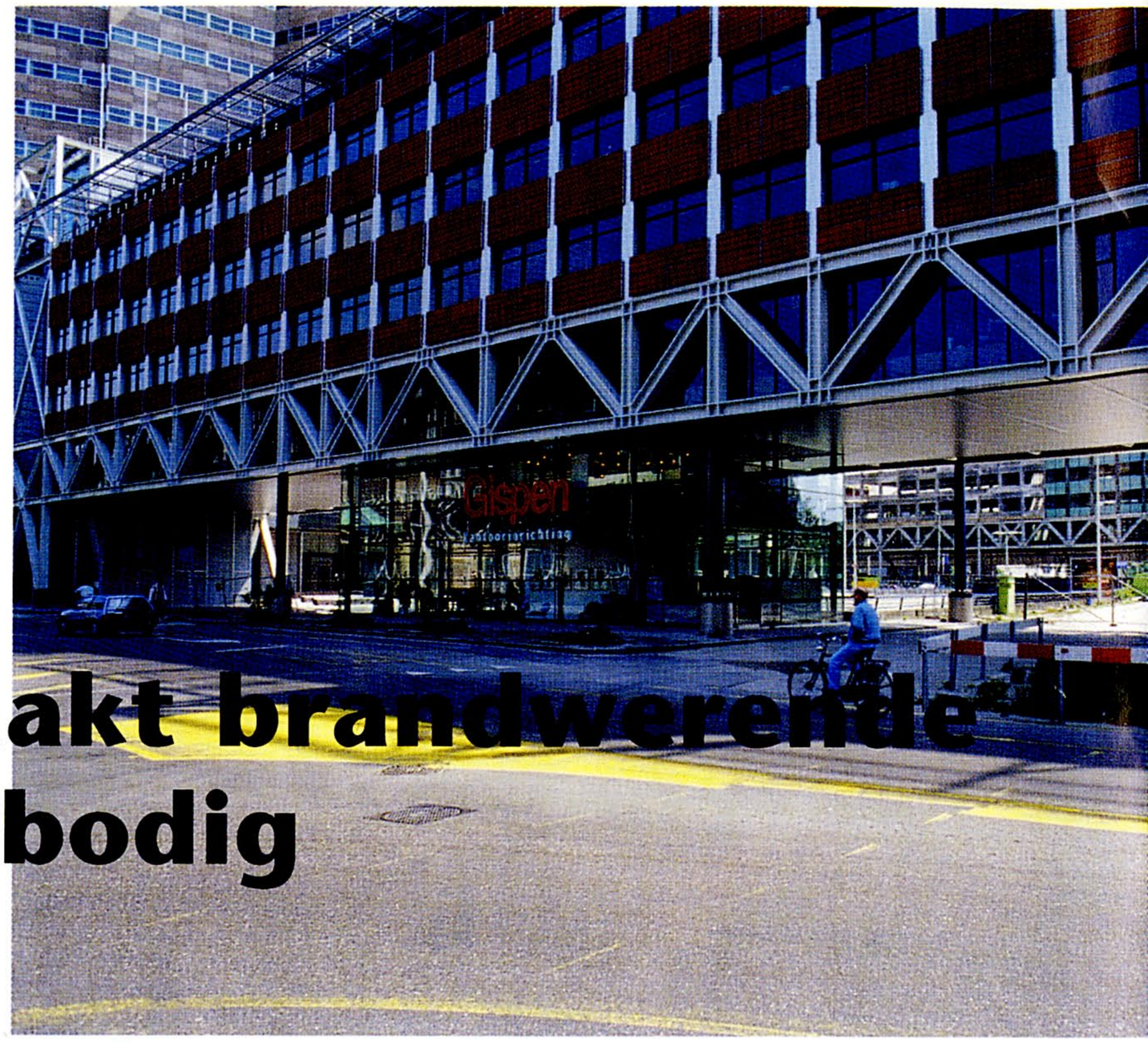
Brandveiligheid Bruggebouwen West en Oost, Den Haag

Nauwkeurige berekening maakt brandwerende bekleding overbodig



Boven de Utrechtse Baan in Den Haag staan twee kantoorgebouwen, elk op enorme stalen vakwerken. Die staalconstructies staan in de buitenlucht en hebben een brandwerendheid van 120 minuten zonder speciale maatregelen, zoals een brandwerende bekleding. Dat was mogelijk door af te stappen van een berekening met de standaardbrandkromme. In plaats daarvan is het temperatuurverloop bij brand nauwkeurig berekend. De auteur vertelt hoe die berekening in de praktijk verliep.

ing. F.P.H. Jakobs
dgmr raadgevende ingenieurs, Arnhem

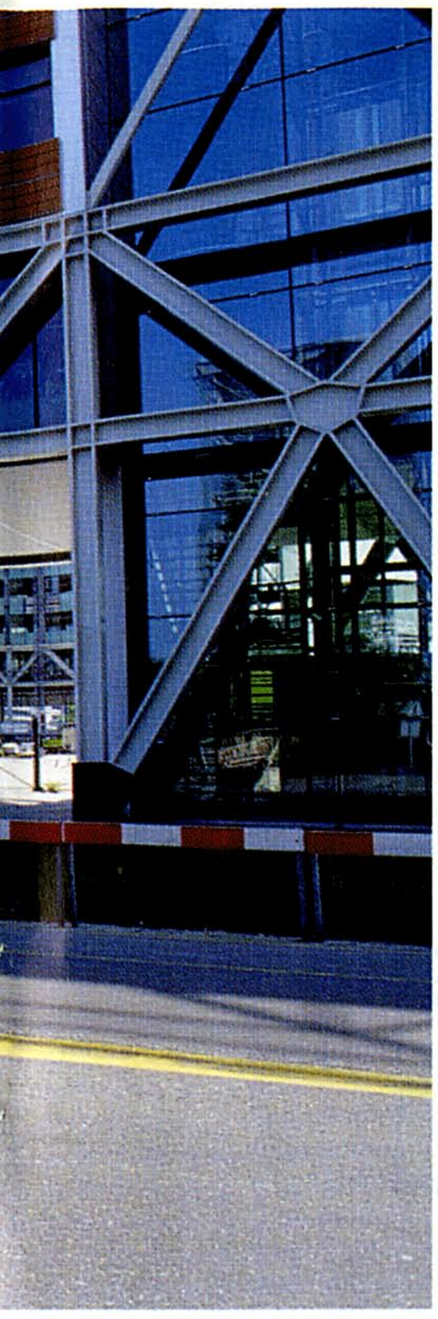
Bij het berekenen van de brandwerendheid van een draagconstructie wordt als regel uitgegaan van de standaardbrandkromme. Dat is een sterk vereenvoudigde aanname voor het temperatuurverloop van een brand in een brandcompartiment.
Wordt een onbeschermde staalconstructie volgens de standaardbrandkromme verhit, dan volgt daaruit doorgaans slechts een geringe brandwerendheid *(zie kader)*. Een brandwerendheid van 60 minuten is voor onbeschermde staalprofielen vrijwel niet haalbaar. De meest voor de hand liggende maatregelen om de brandwerendheid te verhogen zijn een brandwerende bekleding of een brandwerende verf. Bij holle profielen is ook een vulling met beton of soms met water mogelijk.

Standaardbrandkromme niet altijd realistisch

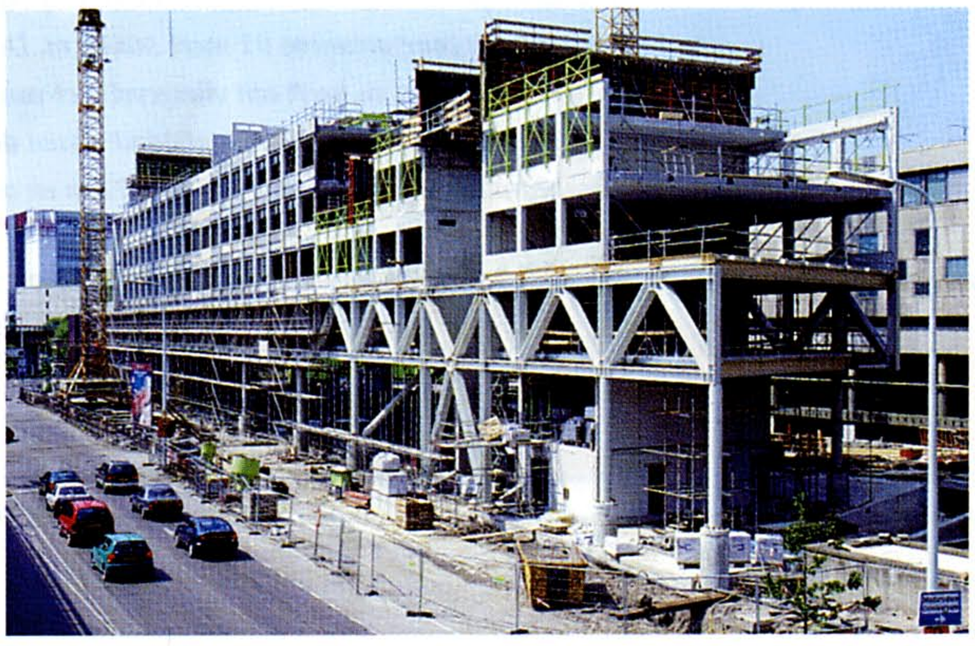
Maar in sommige gevallen is een hoge brandwerendheid op een andere manier te bereiken. Niet door fysieke maatregelen, maar door een nauwkeurige analyse van het probleem.
Voor een staalconstructie die bijvoorbeeld buiten het gebouw staat is de standaardbrandkromme geen realistisch uitgangspunt. Zo'n constructie wordt meestal niet aan alle zijden door het vuur belast. Ook geeft de constructie warmte af via convectie en straling door de relatief lage temperatuur van de buitenlucht én door de verhoogde luchtsnelheden die bij brand vaak ontstaan.
Door deze effecten loopt de temperatuur van zo'n onbeklede constructie veel minder hoog op dan wanneer die zou zijn blootgesteld aan een brand volgens de standaardbrandkromme. De weerstand van de staalconstructie tegen brand valt dus hoger uit. Maar om zo'n veel gunstiger temperatuur/tijd-curve te mogen gebruiken in plaats van de standaardbrandkromme, is wel goedkeuring nodig van de toetsende instantie. Overigens levert het hanteren van een aangepaste opwarmingscurve niet in alle gevallen voordeel op.
Van deze gedachtengang maakten wij gebruik bij het ontwerp van twee kantoorgebouwen in Den Haag, de Bruggebouwen West en Oost over de A12 (Utrechtse Baan). Beide gebouwen zijn verregaand identiek en rusten op een stalen vakwerkconstructie van stalen profielen HD 400. De architect wilde de constructie onbekleed laten, en dat leverde natuurlijk een behoorlijke kostenbesparing op. De vakwerkconstructie maakt deel uit van de hoofddraagconstructie en dient voor dit gebouw 120 minuten brandwerend zijn. De voorbereidingen voor Bruggebouw West begonnen eind 1994; inmiddels is het kantoor opgeleverd en enige tijd in gebruik. Bruggebouw Oost werd eind 1996 voorbereid en is nu volop in aanbouw.

Bruggebouw West

Om de weerstand van de stalen vakwerkliggers tegen brand te bepalen, is een gelijkwaardige bepalingsmethode gebruikt, bestaande uit vijf stappen.
1. Modelleren van een volledig ontwikkelde brand in één van de brandcompartimenten van het gebouw.
2. Berekenen van de maximum temperatuur in de brandruimte én de tem-



Op de voorgrond Bruggebouw West dat al enige tijd in gebruik is. Op de achtergrond is Bruggebouw Oost in aanbouw (zie ook kleine foto).



peratuur en de grootte van de uitslaande vlammen uit de gevelopeningen.

3. Berekenen van de warmtebelasting (straling en eventueel convectie) op het vakwerk door brand in het gebouw en door uitslaande vlammen.

4. Berekenen van de opwarming gedurende 120 minuten en de maximum temperatuur van het staal voor een representatief deel van het vakwerk.

5. Beoordelen of de maximum staaltemperatuur lager is dan de kritieke staaltemperatuur.

Alle brandcompartimenten op de eerste verdieping (tussen de twee vakwerkliggers) zijn gemodelleerd *(zie afbeelding)* en uit de berekening volgde dat in compartiment B1 de temperaturen het hoogst opliepen. Voor het modelleren van een brand in een brandcompartiment en het bepalen van de temperatuur in de ruimte en de temperatuur van de vlammen (stap 1 en 2) is gebruik gemaakt van bijlage A en B van NEN 6068[4]. Deze bijlagen zijn gebaseerd op een Engels berekeningsmodel voor het modelleren van 'compartiment fires'[5].

Bijlage A geeft aan hoe een brandruimte moet worden gemodelleerd. Het model is geschikt voor rechthoekige brandruimten met rechthoekige gevelopeningen. De maximale afmetingen zijn 20 m diep, 5 m hoog en 120 m breed; de gevelopeningen mogen niet hoger zijn dan 3 m. Voor grotere afmetingen is niet bekend of het model betrouwbare resultaten oplevert.

Bijlage B geeft de modellering weer van de uitslaande vlammen uit de gevelopeningen. Het is een stationair model. Dat wil zeggen: er wordt een maximum temperatuur tijdens de brand berekend en een maximale grootte van een uitslaande vlam.

De berekening volgens bijlage A en B van NEN 6068 is uitgevoerd met een permanente vuurbelasting van 60 kg vurenhout per vierkante meter vloeroppervlak. Uit een algemeen bekende vuistregel volgt dat de brand dan na ongeveer 60 minuten is uitgewoed bij gebrek aan meer brandbaar materiaal. Toch is aangenomen dat de brand daarna nog een vol uur doorgaat, omdat de constructie nu eenmaal 120 minuten weerstand moest bieden.

Uit de berekening volgt een maximum temperatuur in het brandcompartiment van 698 °C. Verder volgt uit de berekening dat de brand binnen het gebouw blijft. Dit komt, omdat het aantal gevelopeningen zo groot is dat er voldoende zuurstof wordt aangevoerd om alle brandbare gassen in de brandruimte tot ontbranding te laten komen. Er zijn zodoende geen brandbare gassen meer die ter plaatse van de gevelopening als uitslaande vlam buiten het gebouw zullen ontbranden. Het stalen vakwerk wordt dus niet rechtstreeks door het vuur belast, maar uitsluitend door de warmtestraling via de gevelopeningen.

De warmtestraling op het stalen vakwerk is berekend met het stralingsoverdrachtsmodel uit bijlage D van NEN 6068. Dit model voorziet in twee berekeningen. Met de eerste wordt de straling berekend afkomstig uit een gevelopening. Deze berekening is gebaseerd op een stralend vlak met een emissiecoëfficiënt van 1,0, de waarde voor een

Bepalingsmethoden van de brandwerendheid

Het Bouwbesluit geeft aan hoe de brandwerendheid van een draagconstructie moet worden bepaald. Dat kan op twee manieren: experimenteel of rekenkundig. In beide gevallen wordt als regel de standaardbrandkromme als temperatuurverloop van de brand gehanteerd.

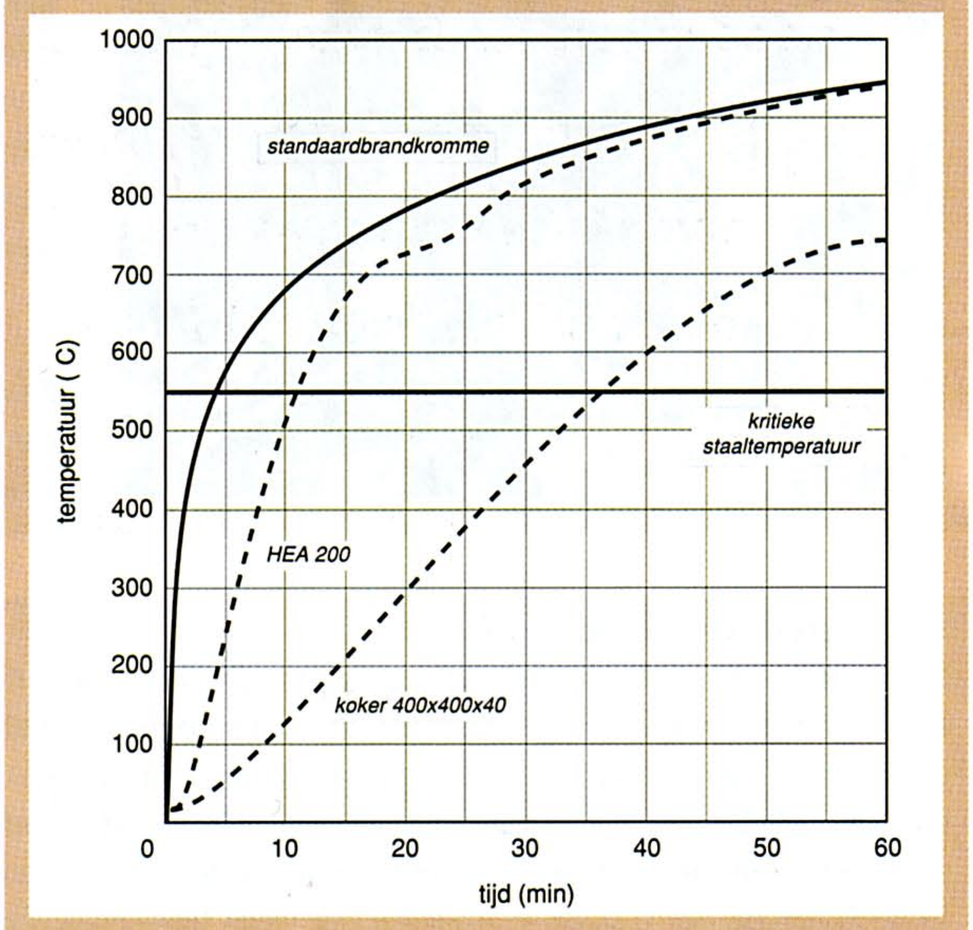
Experimenteel

De experimentele methode staat beschreven in NEN 6069[1]. Daarbij wordt de constructie in speciale ovens blootgesteld aan verhitting (brand). De brandwerendheid (in minuten) is het tijdstip waarop de constructie niet meer in staat is de belasting (inclusief het eigen gewicht) te dragen.

Rekenkundig

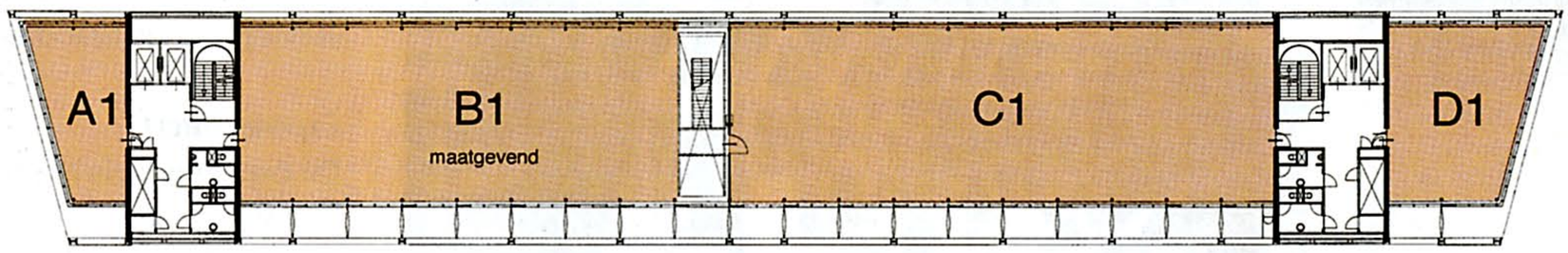
De rekenkundige methode staat voor staalconstructies beschreven in NEN 6072[2]. Eerst wordt met een thermische berekening de opwarming van de staalconstructie berekend, per tijdstap van bijvoorbeeld een minuut. Vervolgens wordt met een mechanische berekening de kritieke staaltemperatuur bepaald; dat is de temperatuur waarbij de betreffende constructie onder de gegeven belasting bezwijkt. De kritieke temperatuur hangt onder meer af van het type constructie (ligger of kolom), de hoogte van de belasting en de zwaarte van het profiel.

De brandwerendheid van de constructie is het tijdstip (in minuten) waarop de temperatuur van het staalprofiel uit de thermische berekening hoger wordt dan de kritieke staaltemperatuur uit de mechanische berekening.

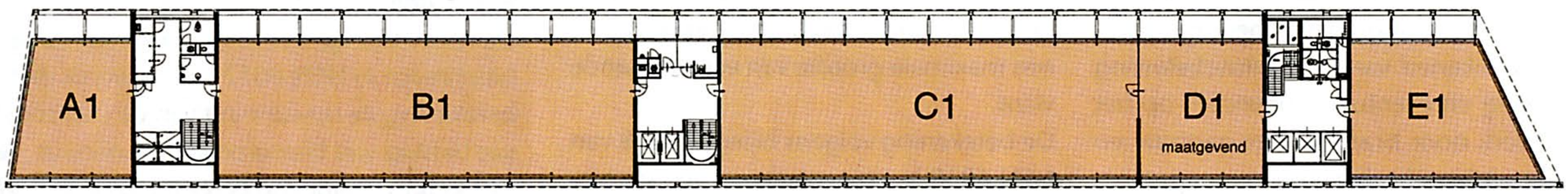


De brandwerendheid van een onbekleed, vierzijdig verhit profiel volgens de standaardbrandkromme is gering. Bij een kritieke staaltemperatuur van 550 °C bedraagt de brandwerendheid van het HE-profiel 11 minuten en van het kokerprofiel 37 minuten (conform NEN 6072).

Brandcompartimentering van de eerste verdieping in Bruggebouw West. Het maatgevende compartiment B1 meet 36x11 m. Deze bouwlaag hangt tussen de twee vakwerken en heeft een vliesgevel met van vloer tot plafond een niet-brandwerende beglazing. De afstand tussen de vliesgevel en het vakwerk bedraagt aan de noordwestzijde 0,27 m en aan de zuidoostzijde 2,8 m.

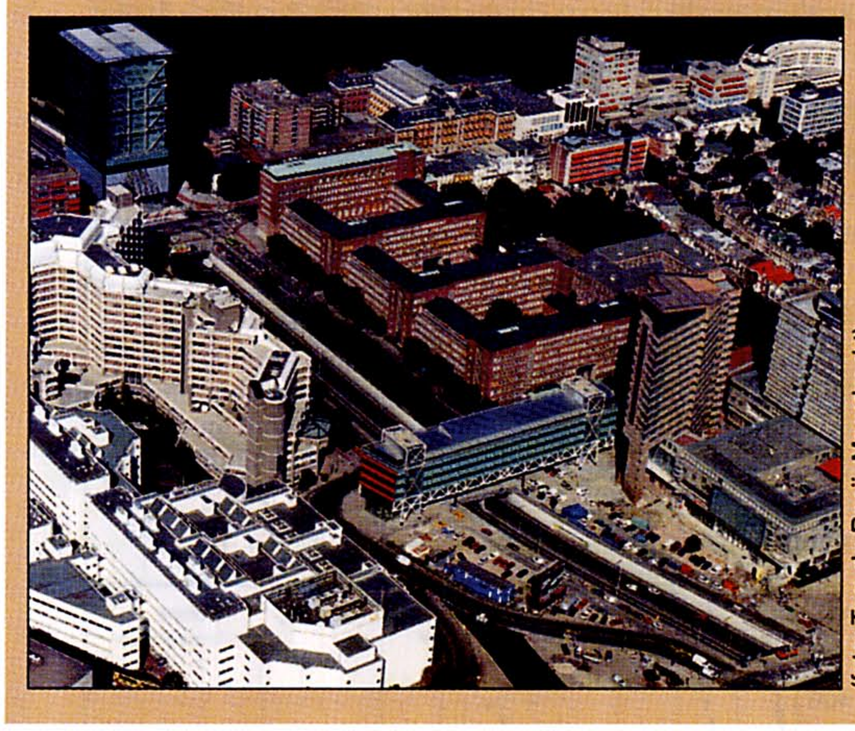


Het maatgevende brandcompartiment D1 in Bruggebouw Oost voor het uitbreidingsscenario meet 11x11 m.



Bruggebouwen West en Oost

Beide bruggebouwen staan dwars over de A12 in Den Haag (Utrechtse baan), aan de Grotiusplaats. Bruggebouw West is inmiddels opgeleverd en enige tijd in gebruik[3]; Bruggebouw Oost is nu in aanbouw.



(foto: Tom de Rooij, Moordrecht)

Gebouw West heeft zes bouwlagen en is 102 m lang, Oost heeft aan de noordoost-zijde vier extra bouwlagen en is 133 m lang. Verder zijn ze vrijwel identiek.

Kenmerkend voor de draagconstructie is de tafelconstructie, bestaande uit twee vakwerliggers en stalen portalen ter plaatse van de kernen van het gebouw. Op deze constructie, die buiten het gebouw op maximaal 2,8 m van de gevel loopt, rusten de kantoorverdiepingen.

Bruggebouw West is inmiddels opgeleverd en enige tijd in gebruik. Rechts daarvan is nu Bruggebouw Oost volop in aanbouw.

Modelleren volgens de normen

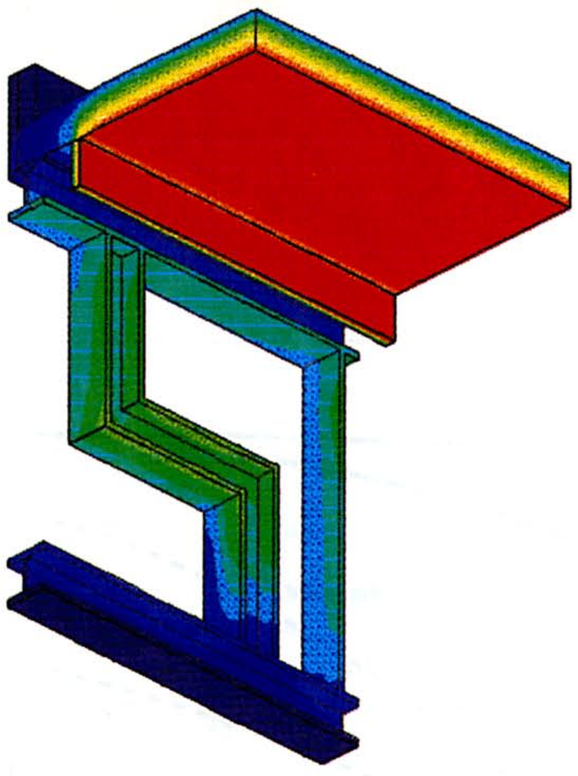
De hier beschreven bepalingsmethode sluit aan op Europese normontwikkelingen. Het modelleren van een brand in een brandcompartiment en het vervolgens bepalen van de opwarming van een buiten het gebouw gelegen draagconstructie staat beschreven in Annex C van ontwerp-norm NVN-ENV 1991-2-2[6]. Net als in de bijlage A en B van NEN 6068 wordt voor de modellering van een brand in een brandcompartiment gebruik gemaakt van het Engelse model van Law en O'Brien[5].

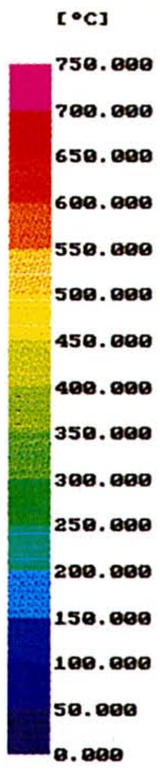
In de Europese norm staan in Annex B eveneens berekeningsmodellen die kunnen worden toegepast voor draagconstructies binnen een gebouw. Deze modellen gaan ook uit van een 'compartiment fire'. Door het modelleren van de brandruimte, de aanwezige oppervlakte aan gevelopeningen en de aanwezige vuurbelasting kan het temperatuurverloop in de ruimte worden berekend. Deze temperatuur/tijd-curve kan dan als gelijkwaardige opwarmingscurve worden gebruikt in plaats van de standaardbrandkromme. Daarvoor is wel toestemming van Bouw- en Woningtoezicht (brandweer).

perfecte zwarte straler en dus en veilige aanname. Met de tweede berekening wordt de straling van de uitslaande vlammen berekend, als stralend lichaam. De berekening wordt uitgevoerd per geprojecteerd vlak van de vlam. Uitsluitend die vlamvlakken die door het 'rekenpunt' worden gezien, worden in de berekening betrokken.

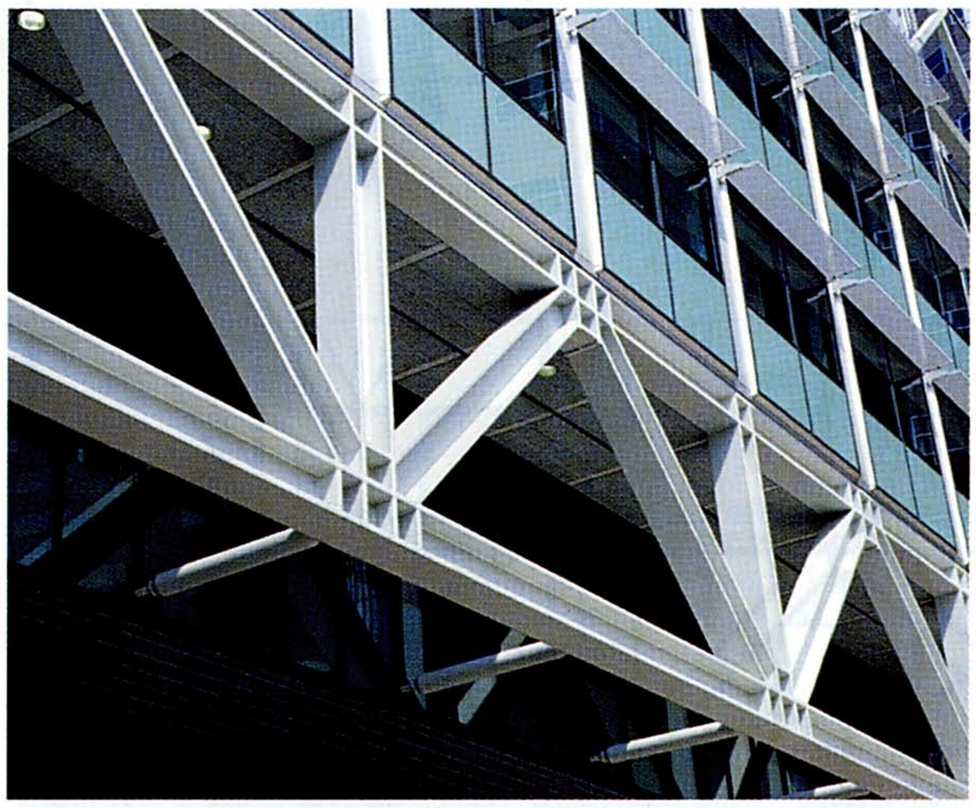
Voor de berekening van de warmtestraling op het vakwerk gebruikten we een zelf ontwikkeld computerprogramma. Dit programma werkt volgens een driedimensionaal stelsel, waarin de afmeting van de gevelopening en eventuele uitslaande vlammen worden ingevoerd met x-, y- en z-coördinaten. Op een groot aantal plaatsen van het vakwerk zijn rekenpunten gelegd die ook via drie coördinaten worden ingevoerd. Het programma berekent vervolgens voor de rekenpunten de warmtestraling door de brand *(zie afbeelding)*.

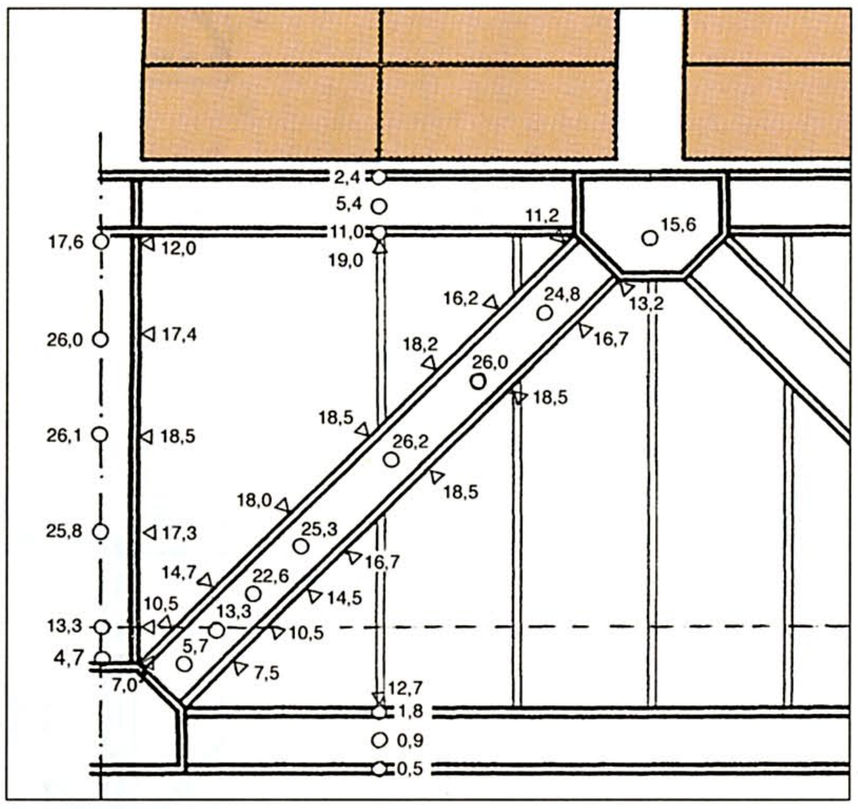
Nu de warmtebelasting op het vakwerk bekend is, is een driedimensionaal model van een deel van het vakwerk gemaakt met het programma Trisco 3.6 van Physibel om de temperatuurverdeling in de staalconstructie te bepalen. In dit model wordt de constructie in de vorm van blokken gemodelleerd; de diagonaal is daarom vervangen door een z-vormige staaf. Ingevoerd worden de materiaaleigenschappen, de berekende





Berekende temperaturen van een representatief deel van het vakwerk voor gebouw West. De diagonaal is gemodelleerd als een z-vormige staaf.





Berekende warmtestralings-flux in kW/m² op een representatief deel van het vakwerk voor gebouw West.

warmtestraling op de diverse plaatsen van het vakwerk en de overdrachtcoëfficiënten voor straling en convectie. Deze overdrachtcoëfficiënten zijn van groot belang, met name die voor convectie. Bij brand stroomt door de thermiek van de hete gassen namelijk veel koele omgevingslucht langs het vakwerk. Die lucht zorgt voor afkoeling, zodat het staal minder snel opwarmt.

De maximum temperatuur wordt bereikt in de diagonaal en bedraagt 320 °C. De maximum waarde in de boven- en onderregel bedraagt respectievelijk 235 °C en 140 °C. De berekende temperaturen liggen ver onder de kritieke staaltemperatuur van 550 °C; het draagvermogen van staal is dus niet afgenomen.

Uit de berekeningen blijkt dat het onbekleed stalen vakwerk gedurende 120 minuten weerstand tegen brand kan bieden volgens de gelijkwaardige bepalingsmethode. Een brandwerende bekleding kon hierdoor worden uitgespaard.

Bruggebouw Oost

In 1996 gebruikten we voor Bruggebouw Oost dezelfde berekeningsmethode. Het enige verschil met Bruggebouw West is de lengte van het gebouw, waardoor de eerste verdieping is onderverdeeld in vijf brandcompartimenten in plaats van vier.

Uit de berekening volgt een maximum temperatuur in het maatgevende brandcompartiment op de eerste verdieping van 736 °C. Dat leidt tot een maximaal 40 °C hogere staaltemperatuur in de vakwerkliggers. Deze hogere temperatuur is toe te schrijven aan de andere afmetingen van het compartiment en de gevelopeningen. De maatgevende staaltemperatuur in de vakwerkliggers, ter plaatse van de diagonaal, bedraagt bij Bruggebouw Oost dus 320 + 40 = 360 °C. Bij een staaltemperatuur tot ongeveer 400 °C is het draagvermogen nog niet of nauwelijks afgenomen en kunnen de optredende spanningen door de belasting bij brand door het staal worden opgenomen. Ook de vakwerkliggers van Bruggebouw Oost kunnen dus onbekleed blijven, terwijl ze toch 120 minuten brandwerend zijn.

Voor Bruggebouw Oost ging de gemeente echter niet akkoord met deze berekening. In de voorbespreking hadden we aangekondigd dat we dezelfde systematiek zouden hanteren en er leek dus niets aan de hand. Op basis van 'nieuwe inzichten' bij de gemeente moest er echter aanvullend onderzoek komen, omdat alleen was gerekend met een volledig ontwikkelde brand in het gehele brandcompartiment van het gebouw. Bouw- en Woningtoezicht wilde weten of een brand in een kleinere ruimte, bij het begin van een brand, niet zou leiden tot uitslaande vlammen. Die kunnen de staalconstructie raken, waardoor de temperatuur van het staal hoger wordt.

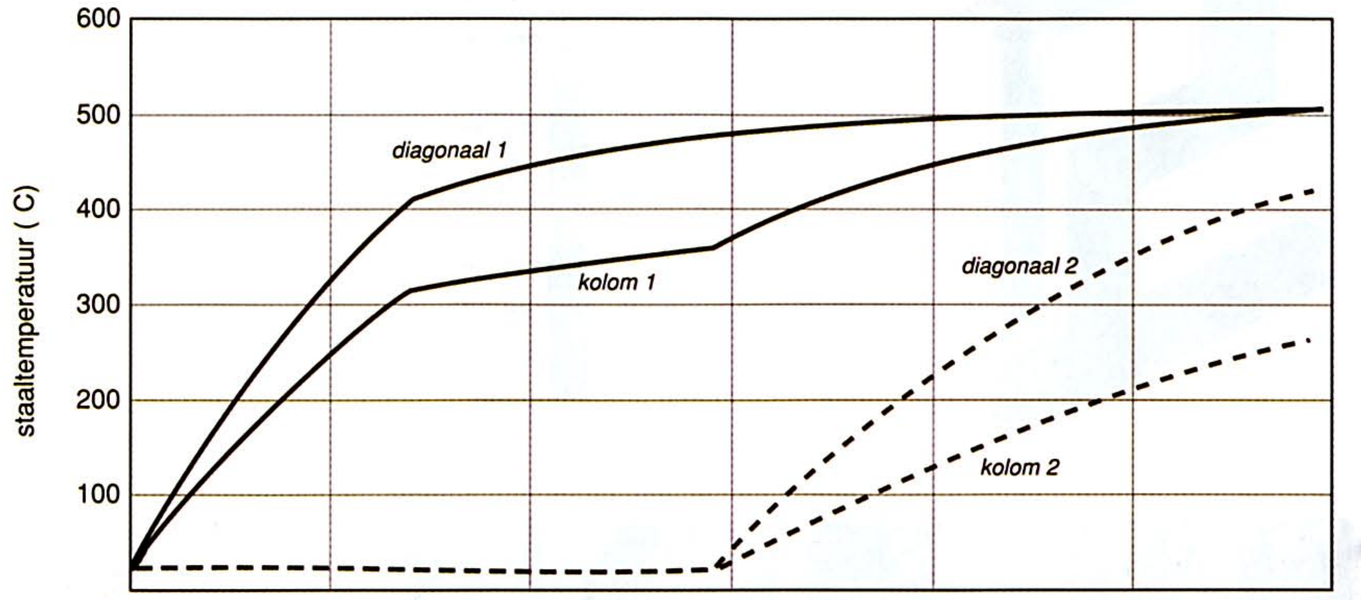
Daarom is onderzoek gedaan naar een branduitbreidingsscenario, om de effecten van ingedeelde brandcompartimenten te beoordelen op de staaltemperatuur van de vakwerkligger, uitgaande van een brand met een duur van 120 minuten. Het uitbreidingsscenario verliep in drie fasen.

- *Fase 1: 0-30 minuten.* Er ontstaat brand in één kantoorruimte in bijvoorbeeld een prullenbak. De brand ontwikkelt zich langzaam en blijft gedurende een bepaalde tijd beperkt tot deze ene ruimte (aanname: 30 minuten).
- *Fase 2: 30-60 minuten.* De brand slaat via de kantoordeur en de gang door naar het kantoor aan de andere zijde van de gang.
- *Fase 3: 60-120 minuten.* Na verloop van tijd (aanname: na 60 minuten) slaat de brand door naar de naastgelegen kantoorruimten. Uiteindelijk ontwikkelt zich een volledige brand in het gehele brandcompartiment.

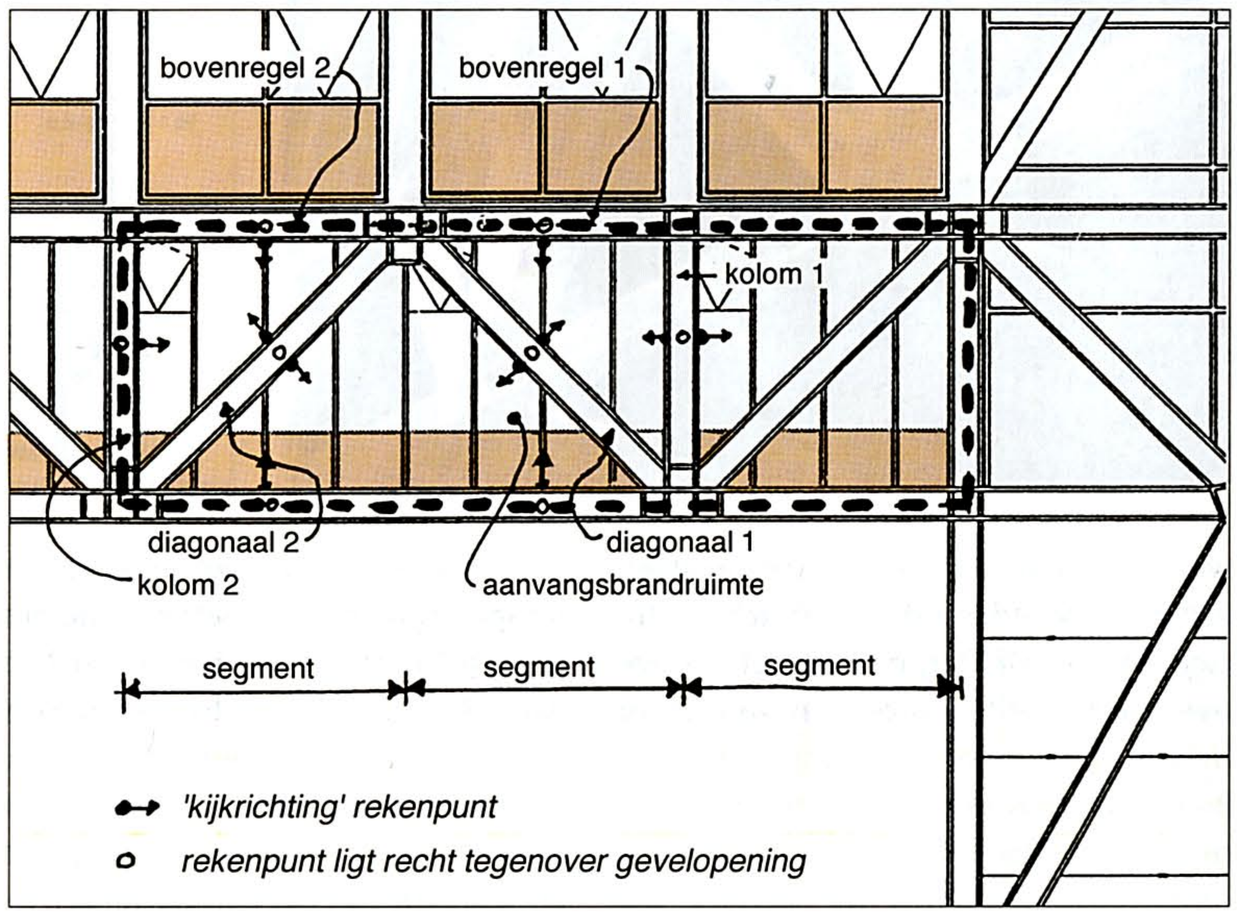
In dit aanvullend onderzoek zijn de volgende vijf stappen doorlopen:

1. Modelleren van een brand in het maatgevende brandcompartiment van het gebouw voor de drie verschillende fasen van de brand.

Berekende temperaturen in het vakwerkstramien direct voor de aanvangsbrandruimte bij het aanvullende onderzoek naar het uitbreidingsscenario bij Bruggebouw Oost.



Berekende segmenten van het vakwerk voor het aanvullende onderzoek naar het uitbreidingsscenario bij Bruggebouw Oost.



2. Berekenen van de maximum temperaturen in de brandruimte en de temperatuur en grootte van de uitslaande vlammen uit de gevelopeningen voor de drie verschillende brandfasen.
3. Berekenen van de warmtebelasting (straling en eventueel convectie) op het vakwerk door de brand in het gebouw en de uitslaande vlammen.
4. Berekenen van de opwarming en maximum staaltemperatuur van een representatief deel van het vakwerk gedurende 120 minuten.
5. Beoordelen of de maximum staaltemperatuur lager is dan de kritieke staaltemperatuur.

Gedurende de eerste fase van het scenario bleken er uitslaande vlammen te zijn. Een klein gedeelte van het vakwerk bevindt zich dan aan één zijde van het gebouw in het vuur. Wanneer de brand daarna doorslaat naar het vertrek aan de andere kant van de gang (fase 2) en vervolgens het hele compartiment in brand staat (fase 3), blijven de vlammen weer binnen het gebouw. Voor deze drie brandfasen is de brandbelasting op de stalen vakwerkligger berekend. Gedurende fase 1 blijkt een deel van de constructie ook via convectie te worden opgewarmd, omdat de constructie zich gedeeltelijk in het vuur bevindt.

Op basis van deze brandbelasting is voor het maatgevende deel van het vakwerk en voor de twee ernaast gelegen segmenten de opwarming berekend gedurende 120 minuten *(zie afbeelding)*. De diagonaal van het vakwerk is hierbij maatgevend.

In diagonaal 1, die precies voor de ruimte loopt waar de brand ontstaat, wordt de hoogste temperatuur bereikt: 510 °C *(zie afbeelding)*. In het segment ernaast loopt de temperatuur in de diagonaal na 120 minuten op tot 430 °C. De constructeur heeft vervolgens een controleberekening uitgevoerd om na te gaan of deze temperatuur toelaatbaar was. Hierbij is aangenomen dat de temperatuur van de gehele vakwerkligger 510 °C bedraagt. De constructie bleek bij deze temperatuur niet te bezwijken. Hoewel bij een uitbreidingsscenario de temperatuur in het vakwerk plaatselijk wel hoger werd dan in het eerste onderzoek, waren aanvullende voorzieningen in de vorm van een bekleding niet nodig.

Literatuur

1. *NEN 6069* (Experimentele bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen), 1991.
2. *NEN 6072* (Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen, staalconstructies), 1991.
3. E. Hoekstra en R. Torsing, 'Ongelijkvloerse kruising', *Bouwen met Staal* 140 (1998), p. 28-35.
4. *NEN 6068* (Bepaling van de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag), 1991.
5. M. Law en T. O'Brien, *Fire safety of bare external structural steel,* Constrade 1981.
6. *NVN-ENV 1991-2-2* (Eurocode 1. Basis of design en actions on structures. Part 2.2. Actions on structures exposed to fire), 1995.
7. *Eurocode 3* (Design of steel structures. Part 2.1. General rules. Structural fire design), 1995.