Op 23 juni 1990 ontstond er een brand in één van de in aanbouw zijnde verdiepinggebouwen van het Londense Broadgate. In dit artikel wordt het gedrag van de staalconstructie tijdens die brand geanalyseerd. Dit constructiegedag bleek aanzienlijk te verschillen van het gedrag, dat op basis van brandproeven/berekeningen op constructie-elementen werd verondersteld. De staalconstructie heeft de 'brandproef' uitstekend doorstaan. Géén van de constructie-elementen is bezweken, ondanks het feit dat de brand langer duurde dan waarop was gedimensioneerd, en zowel het sprinklersysteem als een deel van de brandwerende bekleding nog niet waren geïnstalleerd. Bewezen is dat een (staal)constructie door interactie tussen constructiedelen een aanmerkelijke reservedraagkracht heeft tijdens brand.

Evaluatie van een brand in een stalen verdiepinggebouw in Broadgate

Grootste deel schade is gevolg van rookontwikkeling

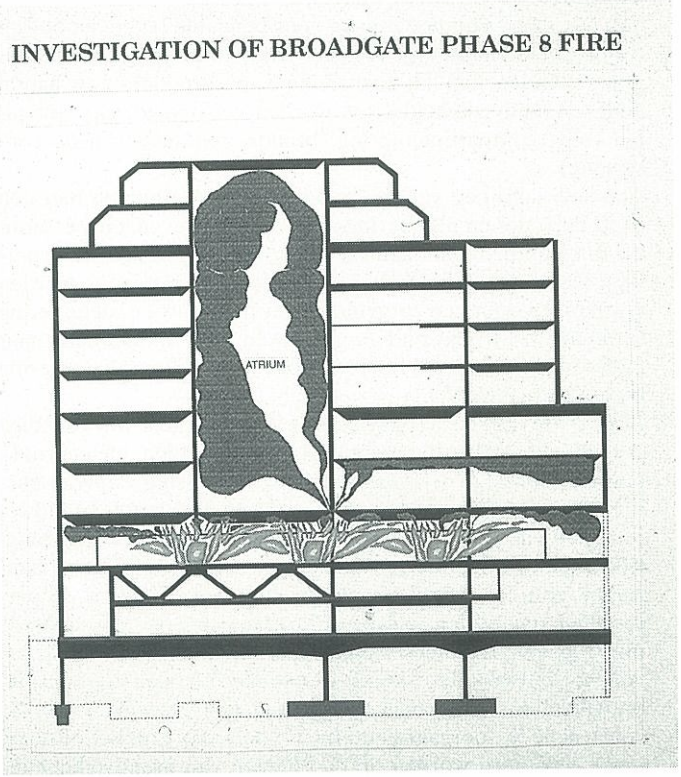
dr. ir. A. F. Hamerlinck

Project Analyse Bureau, Rotterdam

Inleiding

Op 23 juni 1990 ontstond er een brand in één van de in aanbouw zijnde gebouwen van het Broadgate ontwikkelingsplan in Londen. Het betrof Fase 8, een gebouw van dertien verdiepingen. Het gedrag van de constructie, een stalen frame met staalplaat-betonvloeren, wordt in dit artikel besproken aan de hand van een door een Engels onderzoeksteam opgesteld rapport [1]. Een dergelijke analyse van het constructiegedrag na afloop van een brand is uniek en het is zinvol hiervan kennis te nemen. We zijn immers gewend om slechts onderdelen van constructies, zoals een balk, kolom of een deel van een vloer, te beoordelen op hun gedrag tijdens brand, niet constructies als geheel. Dit vanwege het feit dat de testfaciliteiten beperkte afmetingen hebben. Experimentele beoordeling door middel van brandproeven in ovens was in het verleden de enige mogelijkheid. Deze brandproeven werden en worden nog steeds uitgevoerd onder standaard onstandigheden. De temperatuur in de oven wordt gestuurd volgens de alom bekende standaardbrandkromme. Hoewel deze brand in de praktijk (tijdens zogenaamde natuurlijke branden) niet voorkomt, is ze algemeen aanvaard als een hulpmiddel om constructies te classificeren en in de huidige normen zijn de gestelde brandwerendheidseisen erop afgestemd. Voorts worden de opleggingen van de constructiedelen in de proeven zodanig uitgevoerd dat zich geen membraankrachten of inklemmingsmomenten kunnen ontwikkelen, een situatie die zich in de praktijk in vele gevallen wel voordoet.

Aangezien de wijze van beoordelen van constructies op een aantal punten (noodgedwongen) afwijkt van situaties in de praktijk, is de



vraag gerechtvaardigd hoe het bij brandproeven waargenomen gedrag van constructiedelen zich verhoudt tot het gedrag van een gehele constructie bij een werkelijke brand. Het genoemde rapport beoogt inzicht te verschaffen in deze problematiek.
Overigens is sinds de jaren zestig een tweede beoordelingsmethode geaccepteerd, namelijk op basis van berekeningen. De berekeningsmethode beperkte zich tot voor kort tot eenvoudige constructiedelen en was gebaseerd op uitgangspunten, die met de standaard brandproeven correspondeerden. Sinds kort dienen zich echter meer geavanceerde, numerieke hulpmiddelen aan waarmee het mogelijk wordt om uiteenlopende brandsituaties en oplegcondities te analyseren, alsmede gehele constructies, die voor een deel (één verdieping of één kamer) of volledig aan brand kunnen worden blootgesteld. Gezien deze ontwikkelingen is bestudering van constructiegedrag tijdens een werkelijke brand als die in Broadgate extra interessant. Voordat wordt ingegaan op het specifieke gebouw, de brand en de gevolgen daarvan, wordt de brandwerendheidsproblematiek eerst in een breder (brandveiligheids)perspectief geplaatst.

Brandveiligheid van gebouwen

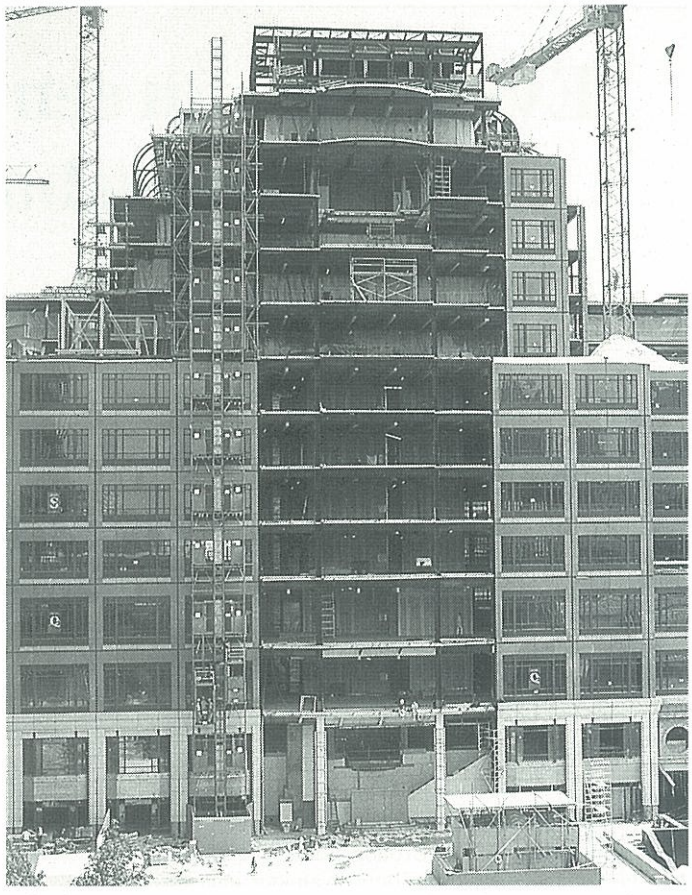
Brandveiligheid van gebouwen is een belangrijke ontwerpeis. Voorop staat hierbij de veiligheid van personen. Voorts is beperking van de financiële schade aan gebouwen en inventaris van belang.
Teneinde een brandveilig gebouw te realiseren is een aantal maatregelen denkbaar, in volgorde van afnemende prioriteit gerangschikt [2]:

1. Beperk het risico op het ontstaan van brand door enerzijds een verantwoorde toepassing van bouwmaterialen en inventaris en anderzijds een goed beheer en onderhoud (elektrische systemen).
2. Maak tijdig ontvluchting mogelijk via veilige vluchtroutes, branddetectie en -alarmeringssystemen.
3. Voorkom ontwikkeling en uitbreiding van de brand. Een eenmaal onstane brand kan in een vroeg stadium worden geblust door middel van een sprinklersysteem. Hierdoor wordt warmte- en rookontwikkeling beperkt met als gevolg een aanzienlijke reductie van persoonlijke risico's en schade. De bedrijfszekerheid van sprinklers, in het verleden nog wel eens een punt van zorg, is inmiddels voldoende bewezen, bijvoorbeeld door middel van statistische gegevens van branden in kantoorgebouwen. In de meeste landen worden sprinklers dan ook dwingend voorgeschreven voor bepaalde typen gebouwen (bijvoorbeeld kantoorgebouwen vanaf 70 m hoogte). In sommige gevallen kan bij toepassing van sprinklers een aantal andere brandveiligheidseisen worden versoepeld, c.q. vervallen (bijv. compartimentering, brandwerendheid van de constructie)
   Een snel ingrijpen van de brandweer, in combinatie met een goed detectie- en alarmeringssysteem blijkt eveneens, eventueel in combinatie met een sprinkler, efficiënt te zijn ter beperking van de brandschade. Uitbreiding kan eveneens worden voorkomen door een zorgvuldige gevelopbouw en -detaillering (brandoverslag naar andere gebouwen en branddoorslag naar andere verdiepingen), alsmede door brandcompartimentering binnen het gebouw.
4. Beperk de schade als gevolg van een eenmaal tot volledige ontwikkeling gekomen brand. Hierbij valt te denken aan rookgas- en warmteafvoersystemen en de toepassing van constructies met een voldoende brandwerendheid. Hoewel de brandwerendheid van de constructie vaak gezien wordt als de belangrijkste pijler onder een brandveilig ontwerp, blijkt deze aanzienlijk minder efficiënt ter beperking van het risico op persoonlijke ongevallen en financiële schade dan eerdergenoemde maatregelen. De meeste ongevallen en financiële schade bij volledig ontwikkelde branden ontstaan overigens door rookontwikkeling. De schade als gevolg van bezwijken van de constructie is doorgaans een fractie hiervan. Zou het ontwerp meer gebaseerd worden op de effecten van brandveiligheidsmaatregelen ten aanzien van risico's op schade en persoonlijke ongevallen, dan zou minder dan nu het geval is de nadruk worden gelegd op de brandwerendheid van constructie-delen.

In dit artikel wordt vooral aandacht besteed aan de brandwerendheid van staalconstructies. Men dient echter niet uit het oog te verliezen dat dit slechts een bescheiden bijdrage levert tot het totale brandveiligheidsconcept.

Het gebouw

Fase 8 van het Broadgate ontwikkelingsplan nabij Liverpool Station in Londen is een kantoorgebouw van dertien verdiepingen. De afmetingen van het gebouw zijn 84 x 55 m en de hoogte is 65 m gezien vanaf het begane grondniveau, dat zich op zo'n 15 m boven het spoor bevindt (*afb. 1*).



Afbeelding 1. Overzicht van de bouw van Broadgate fase 8 vóór uitbreken van de brand

De constructie bestaat uit een stalen frame met een staalplaatbetonvloer, gebouwd volgens de 'fast track'-methode, zoals in Engeland gebruikelijk voor dit soort gebouwen.
De staalplaat-betonvloer (Ribdeck 60) heeft een overspanning van 3000 mm. De hoogte is 130 mm, waarvan 60 mm voor de trapeziumvormige staalplaat. Er is lichtbeton toegepast met als soortelijke massa 1750 kg/m^3 en een wapeningsnet Ø6-200 op 30 mm van de bovenzijde van de vloer.
De staalconstructie bestaat uit Amerikaanse breedflensprofielen voor de kolommen (raster 13.5 x 6 m) en een aantal liggers. De overige liggers zijn 1 m hoge vakwerkliggers met een overspanning van 13.5 m. De boven- en onderranden van deze vakwerkliggers bestaan uit T-profielen; de diagonalen uit dubbele hoekstalen. De liggers werken samen met de betonplaat via deuvels, die door de staalplaat heen op de bovenflens gelast zijn, en vormen aldus staalbetonliggers.
De verdiepingshoogte is 4100 mm voor de bovenste en 5000 mm voor de onderste verdiepingen.
De stabiliteit wordt in één richting ontleend aan een stalen kern, in de andere richting aan portaalwerking (momentvaste verbindingen

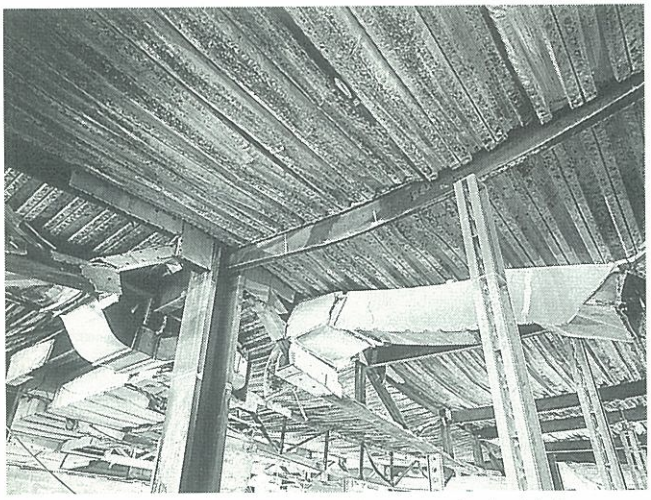
tussen balken en gevelkolommen).
Het brandveiligheidsconcept omvatte:

- een sprinklerinstallatie met als doel een eventueel uitslaande brand in een vroeg stadium onder controle te kunnen krijgen;
- een automatisch branddetectie- en alarmeringssysteem;
- brandwerende bekleding in de vorm van gipsplaten op kolommen en kern (90 minuten) en 20 mm dikke mineraalvezelplaten op de liggers (60 minuten). De gunstige invloed van de sprinklers op het beheersen van de brand rechtvaardigt een langere brandwerendheidseis (d.w.z. bekledingsdikte). In dit project is dit alleen toegepast voor de liggers. Bij kolommen en kern heeft men afgezien van een verlaging van de eis, gezien het belang van deze elementen voor de algehele stabiliteit van het gebouw. Zonder sprinkler zou voor de liggers, evenals voor de kolommen, 90 minuten brandwerendheid zijn geëist. De holle ruimten tussen de staalplaat-betonvloer en de bovenflens van de ligger zijn niet volgestopt met brandwerend materiaal. bij de beoordeling van de liggers is rekening gehouden met ten gevolge hiervan optredende hogere temperaturen in de bovenflens;
- een vloersysteem met een brandwerendheid van 90 minuten. Door de invloed van de sprinkler zou 60 minuten voldoende zijn geweest, net als bij de liggers. De toegepaste 90-minuten vloer bleek echter niet duurder te zijn. De staalplaat-lichtbetonvloer (zonder brandwerende bekleding) is immers voldoende dik (130 mm) en ook de toch al benodigde (krimp)wapening is voldoende om de draagkracht van de tijdens brand sterk verhitte staalplaat over te nemen.

De brand

Op 23 juni 1990 ontstond er brand in een grote aannemerskeet op de eerste verdieping. Deze keet (40×12 m) bestond uit 13 vertrekken ten behoeve van onderaannemers. Deze vertrekken waren als kantoren ingericht. De keet was opgebouwd uit een houten vloer, sandwichpanelen met een polystyreenkern als wanden en dak, bevestigd op koudgevormde stalen profielen. De precieze oorzaak van de brand is onbekend.
Op het moment van de brand was de uitvoering van het gebouw in zijn eindfase. De constructie was voltooid en de gordijngevel bijna volledig gemonteerd (*afb. 1*). De brandwerende bekleding was nog niet volledig aangebracht op de staalconstructie. Met name de kolommen op de eerste verdieping en de randbalkén waren onbeschermd. De branddeuren naar trappen en liften in de kern waren nog niet geïnstalleerd, evenals het sprinklersysteem en het branddetectie- en alarmeringssysteem.
De inzet van de brandweer, die een half uur na ontdekken van de brand ter plaatse was, werd bemoeilijkt door de heftige rookontwikkeling. Daarom werd hoofdzakelijk geblust van buiten het gebouw. Hierbij werd een hefplatform gebruikt (*afb. 2*). De ramen werden gebroken om blusmateriaal vanuit dit platform te kunnen inzetten. Direct blussen van de brandhaard in de keet was echter niet mogelijk, waardoor de brand zo lang kon duren. Als gevolg van blusactiviteiten van de brandweer is een groot deel van de wel aanwezige brandwerende bekleding op de liggers weggespoten (*afb. 3* en *4*).
De totale duur van de brand was meer dan 4,5 uur, waarvan gedurende 2 uur sprake was van een hevige brand met maximale temperaturen in de orde van 1000°C.
De brand in de bouwkeet was als gevolg van de beperkte luchttoevoer ventilatiebeheerst. Dat wil zeggen dat de brand langer duurt en de gemiddelde temperaturen lager zijn dan bij vrije verbranding (brandstofbeheerst). Bij vrije verbranding is de brandduur van een kantoor met de gebruikelijke inventaris minder dan een uur.
Mogelijke brandscenario's zijn nagerekend met de computer, uitgaande van de afmetingen van de brandruimte in de keet, de hoeveelheid brandbaar materiaal en de grootte van de raamopeningen. Op basis van deze berekeningen werd geconcludeerd, dat het in de keet niet warmer dan 1000°C kon zijn geworden, mogelijk zelfs slechts 600°C. De maximale temperaturen in de raamopeningen blijken echter hoger dan 1000°C te zijn geweest. Deze temperaturen waren hoger dan in de keet, omdat een deel van de brandbare gassen pas tot ontbranding kwam bij de raamopeningen van de keet, waar een overmaat aan zuurstof aanwezig was. Vrijwel alle brandbare materialen in de keet zijn verbrand, zo bleek na inspectie.
De directe schade bedroeg meer dan *f* 81 miljoen, waarvan zo'n *f* 6 miljoen aan de staalconstructie en de vloer. Het leeuwedeel van de schade was een gevolg van de rook, die zich via kern en atrium vrijelijk door het gebouw kon verspreiden, omdat de branddeuren nog niet aanwezig waren.
De constructieve schade beperkte zich tot een gebied van 40 x 20 m op de eerste verdieping, waar de brand het hevigst is geweest. Vijf kolommen, 44 liggers en 1600 m^3 vloer moesten worden vervangen. De schade aan de gevel was minimaal (vier ramen, deels door de brandweer gebroken).

Afbeelding 2. De brandweer in actie vanaf een blusplatform ter hoogte van de eerste verdieping



Afbeelding 3. Overzicht van de brandruimte met de niet zichtbaar vervormde kolom (onbeschermd), de in meer of mindere mate vervormde liggers, waarvan de bekleding deels is weggespoten door blusstralen, en de onderzijde van de staalplaat-betonvloer, waarvan de staalplaat gedeeltelijk los is gekomen van de betonplaat

Afbeelding 4. Overzicht van de brandruimte met een vervormde kolom, walsliggers met locaal bezweken flenzen en een vakwerkligger met uitgeknikte rand- en wandstaaf

Gedrag van de constructie tijdens de brand

Ondanks de duur van de brand (langer dan de geëiste brandwerendheid van de constructie) en het ontbreken van brandwerende bekleding op de kolommen, is de constructie niet bezweken. Wel was sprake van grote vervormingen en lokaal plooien van onderdelen. *Afbeelding 5* geeft een overzicht van de schade aan de constructie in het gebied waar de brand het hevigst was. De resten van de aannemerskeet, waar de brand ontstaan is, zijn nog zichtbaar.
Dat de constructie desondanks niet is bezweken, heeft de volgende oorzaken:

- de warmtestroming van de brand naar de constructie was geringer dan bij een standaard brandproef;
- de belastingen waren in de bouwfase lager dan in de gebruiksfase;
- de constructie als geheel blijkt een aanzienlijke reserve te hebben.

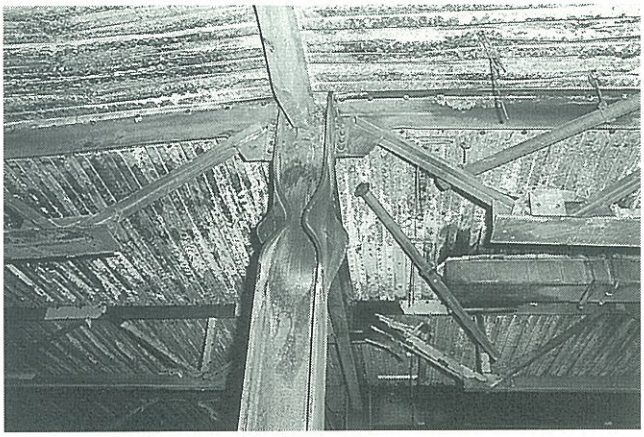
Afbeelding 5. Restanten van de aannemerskeet waar de brand ontstaan is en overzicht van de (locale) schade aan de constructie

De laatste twee aspecten worden in de volgende alinea's toegelicht. De constructie was tijdens de brand aanzienlijk lichter belast dan waarop in het ontwerp is gedimensioneerd. De veranderlijke belasting als gevolg van inventaris was immers niet aanezig (met uitzondering van aannemersketen op eerste en tweede verdieping). Dit betekende een belastingfactor (gedefinieerd als de aanwezige belasting gedeeld door de bezwijkbelasting bij kamertemperatuur) in de orde van slechts 10-25%. Voor de constructie-elementen, waarover het rapport op dit punt informatie biedt (vakwerkliggers), bedroeg deze belasting ongeveer de helft van die waarop in het ontwerp voor de brandsituatie was gedimensioneerd. De kritieke temperatuur (temperatuur waarbij het constructie-element de erop werkende krachten niet meer kan opnemen), blijkt voor de walsliggers ca. 800°C, voor de vakwerkliggers ca. 700°C en voor de kolommen 700-750°C te hebben bedragen bij de aanwezige belasting. Aanzienlijk hoger derhalve dan wanneer het gebouw volbelast was geweest; dan zou de kritieke temperatuur in de orde van 200°C lager zijn.
In het ontwerp voor het belastinggeval brand werden de constructie-elementen als afzonderlijk beschouwd met geïdealiseerde randcondities, zoals te doen gebruikelijk. De opleggingen werden geacht vrije verplaatsingen mogelijk te maken en de rotatiestijfheid van de boutverbindingen (ligger-kolom) werd verwaarloosd. In het algemeen zijn dit veilige aannamen. Aangezien constructie-elementen onderdeel uitmaken van een groter geheel, zijn deze aannamen echter niet realistisch. Sommige elementen worden sterker opgewarmd dan andere (aangrenzende) elementen; daardoor worden thermische vervormingen gedeeltelijk verhinderd, zodat grote krachten en momenten kunnen ontstaan, die het constructiegedrag beïnvloeden.
In het algemeen veroorzaken verhinderde thermische uitzettingen in het begin van de brand drukkrachten, waardoor plaatselijk plastische vervormingen kunnen optreden. Op een gegeven moment kunnen deze plastische vervormingen zelfs groter worden dan de thermische uitzetting. Het verhitte constructie-element gaat dan als het ware aan zijn omgeving hangen, in plaats van zich er tegen af te zetten. De drukkrachten veranderen hierdoor in trekkrachten (membraanwerking). Krachtoverdracht door membraanwerking kost minder arbeid dan door buiging, hetgeen betekent dat er nog een extra reserve aan draagkracht is. Bovendien is een herverdeling van krachten mogelijk van sterk verhitte (minder stijve) elementen naar koelere (stijve) elementen. Door de interactie met de rest van de constructie zijn dus zowel randcondities als belastingsituatie anders dan waarop het element in het ontwerpstadium gedimensioneerd is. Dit leidt in vele gevallen tot een aanzienlijk hogere brandwerendheid dan volgens de gebruikelijke ontwerpmethoden voorzien.

Gedrag van de constructie-delen

Na behandeling van het gedrag van de constructie als geheel, zal nu het gedrag van de constructie-delen meer in detail worden belicht. Een aantal *walsliggers* onderging grote doorbuigingen (tot een maximum van 38 cm, zie *afb. 3*), locaal plooien van de onderflens bij de liggereinden (*afb. 4*) en in sommige gevallen zijdelings uitbuigen van het lijf. Deze locale effecten zijn te verklaren door verhindering van vervormingen bij de opleggingen, zoals in de vorige paragraaf uiteengezet. In het begin van de brand ontstond hierdoor een combinatie van drukkrachten en inklemmingsmomenten, die door de boutverbinding met de kolom mogelijk waren, hetgeen leidde tot plooien van onderflens en het aansluitende lijf. Desondanks bezweek de ligger niet. Door het ontstane plastisch scharnier veranderde het gedrag in dat van een vrij opgelegde ligger, het systeem waarop bij het ontwerp is gedimensioneerd. Door toenemende vervormingen konden vervolgens membraankrachten ontstaan, waardoor de draagkracht gunstig beïnvloed werd. Voorwaarde voor het ontstaan van membraankrachten is echter wel dat deze door de aangrenzende constructiedelen opgenomen kunnen worden, hetgeen hier aannemelijk lijkt aangezien de liggers via kolommen aansloten op liggers in aangrenzende velden.
Bij de *vakwerkliggers* trad in een aantal gevallen knik van drukdiagonalen op, waardoor de doorbuigingen toenamen (tot een maximum van 55 cm). Bij enkele liggers werd dit gevolgd door een grote vervorming in de einddiagonaal (*afb. 4*).
Uit metallurgisch onderzoek op een drietal beschadigde liggers volgde dat temperaturen van het staal maximaal in de orde van 600°C zijn geweest. Uit berekeningen op een vrij ingehangen ligger bleken de locale knikverschijnselen bij de aanwezige belasting pas op te treden bij temperaturen boven 700°C. Klaarblijkelijk speelt verhindering van vervormingen bij de opleggingen hier een vergelijkbare rol als bij de walsliggers, waardoor inklemmingsmomenten en drukkrachten ontstaan.

Bij vijf *kolommen* had plooi plaatsgevonden in de flenzen op ca. 30 cm van de aansluiting met de vakwerkliggers (*afb. 6*). Als gevolg van deze plastische vervorming waren de kolommen zo'n 10 cm korter geworden. Ook bij de kolommen geldt weer dat de vervormingen niet verklaard kunnen worden bij de aangenomen krachtsverdeling en opgetreden temperaturen (in de orde van 600°C). De verklaring is ook hier te vinden in de randcondities. Als gevolg van temperatuurverschillen tussen aangrenzende kolommen ontstonden uitzettingsverschillen. De uitzetting van de meest verhitte kolommen werd deels verhinderd door het buigstijve raamwerk in de ene richting van het gebouw en de 'scharnierende' verbindingen met de vakwerkliggers in de andere richting, die (opgeteld over alle verdiepingen) een aanzienlijke rotatiestijfheid hadden. Deze weerstand tegen axiale vervormingen van een kolom kon kwantitatief vastgesteld worden tijdens de reparatiewerkzaamheden, toen het gebouw ter plaatse van de kolommen opgevijzeld is.



Afbeelding 6. Uitknikken van de flenzen van de kolom leidde niet tot algeheel bezwijken van de constructie door herverdeling van krachten naar aangrenzende kolommen, die in mindere mate aan de brand waren blootgesteld

Door de verhinderde uitzetting ontstonden tijdens de brand aanzienlijke normaalkrachten, waardoor de bezwijkbelasting bereikt kon worden en de plastische vervormingen konden ontstaan zoals te zien op *afb. 6*. Door deze vervormingen en de interactie met de overige kolommen en liggers kon vervolgens een aanzienlijke herverdeling van krachten naar naburige kolommen plaatsvinden. Deze gunstige herverdeling zorgde ervoor dat de kolom niet is bezweken. Bezwijken zou onder deze omstandigheden slechts plaats kunnen vinden bij aanmerkelijk hogere temperaturen dan bij de afzonderlijke kolom met de oorspronkelijke belasting.

De *staalplaat-betonvloer* volgde de doorbuigingen van de liggers, waarbij tussen de liggers beperkte additionele doorbuigingen optraden. Over grote oppervlakken was de staalplaat los gekomen van het beton (*afb. 3*). De hiermee gepaard gaande scheurvorming in het beton resulteerde in drie grote scheuren. Deze scheuren bevonden zich alle op de grens van het gebied waarin ondersteunende liggers aanzienlijk waren vervormd. In een van de scheuren was de wapening gebroken.

De *verbindingen* bleken in staat grote plastische rotaties te ondergaan, een eigenschap die een grote mate van herverdeling van krachten in de constructie mogelijk heeft gemaakt. De meeste verbindigen waren geboute dubbele hoekstaalverbindingen. De hogere staalkwaliteit van de bouten in vergelijking met de stalen profielen zorgde ervoor, dat de platen rondom de boutgaten plastisch vervormden in plaats van de bouten zelf. Slechts enkele van de bouten zijn gebroken. In twee verbindingen in het aan brand blootgestelde gebouwdeel was een kopplaatverbinding toegepast, waarvan de vervormingcapaciteit minder groot bleek te zijn. In de ene verbinding trad boutbreuk op, in de andere breuk van de plaat.

Uit metallurgisch onderzoek op een groot aantal bouten (M20, M24 en M30 met kwaliteit 8.8) bleek dat de temperatuur van de bouten niet boven 540°C is geweest.

Conclusies

De studie verricht naar aanleiding van de brand in één van de in aanbouw zijnde Broadgate-gebouwen [1], leidde tot de volgende conclusies:

1 De draagconstructie, bestaande uit een stalen frame en staalplaat-betonvloeren, behield zijn stabiliteit en brandscheidende functie, ondanks een langere brandduur dan waarmee in het ontwerp rekening is gehouden en het ontbreken van een deel van de brandwerende bekleding.

2. Wanneer een brand slechts een deel van een verdieping treft en de constructie als één geheel werkt, zoals bij de huidige verdiepingbouw gebruikelijk, blijkt de (staal)constructie in staat tot een grote mate van herverdeling van krachten. Als gevolg hiervan heeft de ocnstructie een aanzienlijke reserve-draagkracht, waardoor de stabiliteit van het gebouw langer gewaarborgd blijft dan waarop in het ontwerp is gedimensioneerd (gebaseerd op het gedrag van constructie-elementen).

3. Het werkelijke gedrag van een constructie-element bij brand, kan aanzienlijk afwijken van dat waarvan in het ontwerp (op basis van proeven/berekeningen) is uitgegaan. Enerzijds is dit een gevolg van een ander verloop van de warmte-overdracht naar de constructie dan bij een standaard brand. Anderzijds zijn de oplegcondities en het statisch systeem anders. In het ontwerp wordt uitgegaan van geïdealiseerde randcondities, waarbij de opleggingen vrij kunnen vervormen. In de praktijk maken constructie-elementen onderdeel uit van een raamwerk, waardoor vervormingen deels worden verhinderd en het krachtenspel als gevolg van herverdeling van krachten naar minder sterk verhitte onderdelen behoorlijk kan wijzigen tijdens de brand.

4. Het verdient aanbeveling om in de toekomst de brandwerendheid te beoordelen aan de hand van gehele constructies, in plaats van onderdelen hiervan. Ontwerp volgens deze nieuwe filosofie wordt mogelijk met de momenteel beschikbaar komende computersoftware. Verificatie van deze software is echter niet mogelijk met behulp van brandproeven, daar de afmetingen van de testfaciliteiten onvoldoende zijn. Dit schept een probleem voor de acceptatie van met dergelijke software berekende resultaten. Analyse van schadegevallen kan wellicht nuttig zijn om de geldigheid van deze computerhulpmiddelen te toetsen. Als kanttekening hierbij geldt wel dat het niet mogelijk is het temperatuurverloop te reconstrueren, hooguit de maximale staaltemperatuur.

5. De bovengenoemde ontwerpfilosofie, waarbij constructies als geheel beschouwd worden en eventueel het effect van (actieve) brandveiligheidsmaatregelen (bijvoorbeeld sprinklers) op de uitbreiding van de brand en diens temperatuurontwikkeling in de beschouwing betrokken wordt, biedt de mogelijkheid om brandwerende maatregelen te treffen daar waar ze het meest efficiënt zijn. Dit leidt tot een meer economisch ontwerp. Zo zou bijvoorbeeld een staalconstructie in een verdiepinggebouw deels onbeschermd kunnen worden uitgevoerd, als onbeschermde kolommen hun draagkracht kunnen overdragen aan beschermde (gevel)kolommen. Dit zou bewerkstelligd kunnen worden door een verdiepinghoge vakwerkligger toe te passen in de installatielaag boven in het gebouw. Deze kan de belasting van een willekeurige aan brand blootgestelde kolom op een van de verdiepingen over de overige kolommen verdelen.

6. Het grootste deel van de schade was een gevolg van de rookontwikkeling. De schade aan de constructie was slechts een fractie hiervan. Vervanging van een deel van de staalconstructie en staalplaat-betonvloeren kon in relatief kort tijdsbestek (1 maand) en tegen beperkte kosten plaatsvinden.

Referentie

[1] Structural Fire Engineering. Investigation of Broadgate Phase 8 Fire. Steel Construction Institute. Juni 1991.

[2] Steel and fire safety. A global approach. Eurofer. 1990.

Afbeeldingen 1 en 3 zijn gemaakt door Ian Cook, afbeeldingen 2, 4, 5 en 6 door de Londense brandweer.