

RICHTLIJN

BRANDVEILIGHEID STALEN PARKEERGARAGES

Eerste druk

Bouwen met Staal Technische Commissie 3 Brandveiligheid Staalconstructies

Auteurs A.F. Hamerlinck (Bouwen met Staal), A. Breunese en L.M. Noordijk (Efectis Nederland), D.W.L. Jansen (DHV) en N.J. van Oerle (Adviesbureau Peutz & Associates)

Bouwen met Staal rapport 2011.01

Zoetermeer, 7 november 2011

Inhoud

	Voorwoord	3
1	Inleiding	4
2	Afbakening	7
2.1	Wettelijk kader	7
2.2	Eurocodes	9
2.3	Toepassingsgebied	9
2.4	Koppeling brandwerendheidseis – bepalingmethode	11
3	Brandscenario's en -modellering	12
3.1	Brandvermogens en vuurbelasting van auto's	12
3.2	Uitbreiding van brand en aantal auto's	14
3.3	Brandvermogensscenario	15
3.4	Locaal brandmodel volgens Hasemi	20
3.5	Warmteoverdracht van de brand naar de constructie	20
4	Mechanische belasting op de constructie tijdens brand	21
5	Thermische respons staalconstructie	22
6	Mechanische respons staalconstructie	23
6.1	Schematisering van de staalconstructie bij brand	23
6.2	Effecten van verhinderde vervorming	23
6.3	Stalen verbindingen	24
6.4	Stabiliteit	25
6.5	Vloeren	25
7	Geavanceerde brand- en responsmodellen	26
8	Literatuur	27
	Bijlagen	
A	Achtergronden uit Europese onderzoeksprogramma's	28
B	Stappenplan	29
C	Praktijkvoorbeeld	30

Deze Richtlijn telt 32 pagina's

Voorwoord

Mobiliteit en veiligheid zijn twee belangrijke aspecten binnen de samenleving. In deze richtlijn over het bepalen van de brandveiligheid bij stalen parkeergarages komen deze twee aspecten samen.

Het gebruik van staal voor de hoofddraagconstructie van een parkeergarage is in Nederland een regelmatig gekozen oplossing. Bij het ontwerpen van een dergelijke constructie is brand een belangrijk belastinggeval. Wanneer voor de toetsing de 'standaard' berekeningsmethoden worden gebruikt kan dit leiden tot een niet realistische en in sommige gevallen zelfs onveilige oplossing. Vaak zijn bij deze benadering aanvullende brandwerende maatregelen noodzakelijk, wat niet leidt tot het meest economische ontwerp. die bij een nauwkeuriger beoordeling blijken achterwege te kunnen blijven. Dit beïnvloedt vanzelfsprekend de economie van het ontwerp.

Met behulp van moderne technieken en opgedane kennis zijn we steeds beter in staat om in de ontwerpfase van gebouwen 'de werkelijkheid' te benaderen. Fire Safety Engineering (FSE) is hier een goed voorbeeld van. Deze ontwerpmethodiek benadert een realistisch brandverloop in een ruimte en de effecten van deze brand op de toegepaste materialen en constructie. Hiermee wordt niet alleen een efficiëntere constructie ontworpen, maar tegelijk ook een veiliger gebouw gecreëerd.

Deze richtlijn geeft de Nederlandse ontwerppraktijk handvatten om met behulp van FSE op een veilige en realistische manier branden in parkeergarages te analyseren en het gedrag van de staalconstructie hierbij te bepalen. Hierbij worden tevens aanbevelingen gedaan voor het toepassen van de daartoe ontwikkelde software.

De technische commissie TC3 "brandveiligheid voor staalconstructies" van Bouwen met Staal heeft als algemene doelstelling bij te dragen aan het vermeerderen en verspreiden van kennis op het gebied van brandveiligheid in relatie tot staal. Deze richtlijn is het resultaat van de inspanning van leden van de TC3 en een goed voorbeeld van de realisatie van bovengenoemde doelstelling. De richtlijn zal voor veel ontwerp bureaus een welkome aanvullende ontwerp tool zijn.

ing. R.J. Stark

voorzitter Technische Commissie 3 Brandveiligheid Staalconstructies van Bouwen met Staal

september 2011

1 Inleiding

Uit praktijkonderzoek is gebleken dat het in open parkeergarages mogelijk is om de brandwerendheid van de staalconstructie niet zoals gebruikelijk met de 'standaard' brand te bepalen, maar met de werkelijk te verwachten 'natuurlijke' brand. Deze verschilt met name bij natuurlijk geventileerde parkeergarages sterk ten opzichte van de 'standaard' brand. De Eurocodes [1, 2, 3] openen de weg naar toepassing van deze nieuwe rekentechnieken. Afhankelijk van de bouwkundige indeling en het constructieve ontwerp kan aangetoond worden dat brandwerende maatregelen – ten opzichte van de beoordeling volgens de 'standaard' brand op de gehele staalconstructie – kunnen vervallen of in belangrijke mate kunnen worden gereduceerd.

FSE (Fire Safety Engineering) van constructies onderscheidt zich van de traditionele benadering (classificatie) door:

- de introductie van meer realistische brandomstandigheden, de zogenaamde 'natuurlijke branden' (in plaats van de standaardbrand) en/of
- de thermische en mechanische respons van de constructie te betrekken op systemen (in plaats van op componenten).

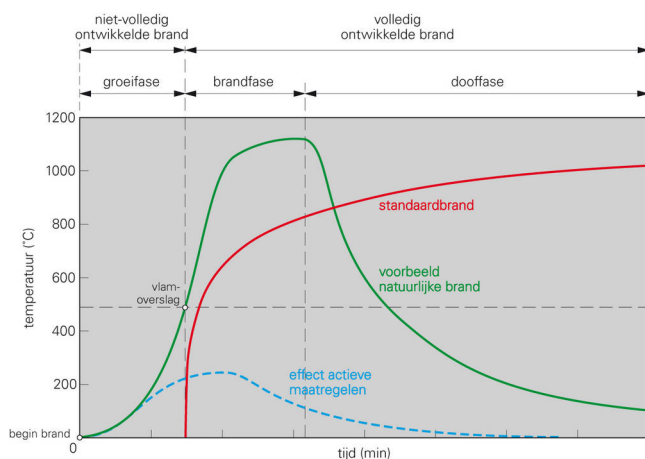
Het huidige classificatiesysteem houdt in dat een component van de constructie (een vloerplaat, een kolom, een ligger) beoordeeld wordt onder de 'laboratorium'-omstandigheden van een standaardbrand. Beide schematiseringen (van de brand én van de constructie) in de traditionele benadering kunnen resulteren in een grote afwijking ten opzichte van het werkelijke gedrag (afb. 1).



Afb. 1 Tijdens branden in parkeergarages blijkt het temperatuurverloop aanzienlijk af te wijken van de zogenaamde 'standaardbrand' (aanvankelijk iets hogere temperaturen, maar na verloop van tijd lagere temperaturen).

Het doel van FSE in het algemeen en bij stalen parkeergarages in het bijzonder is om het werkelijke gedrag van de (staal)constructie beter te beschrijven en op basis hiervan te komen tot een meer realistische beoordeling van de eventueel benodigde brandwerende maatregelen. In voorkomende gevallen kunnen deze geheel vervallen of sterk worden beperkt.

Branden in gebouwen kenmerken zich door een groeifase, een brandfase en een dooffase (afb. 2). De overgang van de groei- naar de brandfase wordt het vlamoverslagpunt ('flashover') genoemd. Op dat punt gaat de tot dat moment nog locale brand over in een volledig ontwikkelde brand, waarin alle brandbare materialen in de brandruimte mee gaan branden. De ruimte staat dan volledig in brand en de brand is binnen de brandruimte niet meer beheersbaar voor de brandweer. Bij parkeergarages die voldoende¹ ventilatie hebben of waar tijdig ingrijpen door de brandweer mogelijk is, treedt geen vlamoverslag op en blijft de brand lokaal. De brand blijft beperkt tot één of enkele (deels) gelijktijdig brandende auto's.



Afb. 2 Het temperatuurverloop tijdens een natuurlijk brand is afhankelijk van de specifieke omstandigheden van de ruimte en de brandbare inhoud en wijkt af van de 'standaardbrand'. Bij open parkeergarages is geen sprake van een volledig ontwikkelde brand (met de gehele ruimte en alle auto's tegelijk in brand). Het punt van vlamoverslag treedt niet op en de brand blijft lokaal.

Het doel van deze Richtlijn is om de Nederlandse ontwerppraktijk handvatten aan te reiken om op een veilige, maar realistische manier locale branden in parkeergarages te analyseren en het gedrag van de staalconstructie hierbij te bepalen. In deze Richtlijn is de 'state of the art' van brandveiligheid van stalen parkeergarages opgenomen. Ervaringen uit de hedendaagse ontwerppraktijk, uit overleg met en goedkeuring door toetsende overheden bij concrete projecten en uit door Efectis Nederland verrichte second opinion en onderzoeksprojecten, zijn in deze Richtlijn

¹ Zie de definitie van 'voldoende' geventileerd in § 2.3.

verwerkt. Daarmee kan deze Richtlijn als een waardevolle basis beschouwd worden voor de aanpak van de brandveiligheid van stalen parkeergarages in het kader van de realisatie van een gelijkwaardig veiligheidsniveau. Resultaat van de gelijkwaardige beoordelingstechniek in deze Richtlijn is een analyse of de staalconstructie afhankelijk van de specifieke omstandigheden onbeschermd kan worden toegepast, danwel in welke mate bescherming nodig is, zodat voldaan wordt aan de functionele eisen van de bouwregelgeving.

Uitwerking van een constructief ontwerp volgens deze Richtlijn betekent dat een aantal stappen doorlopen moeten worden, zie het Stappenplan in bijlage B.

2 Afbakening

2.1 Wettelijk kader

Een parkeergarage is volgens Bouwbesluit 2012 een 'overige gebruiksfunctie voor het stallen van motorvoertuigen'. Voor nieuwbouw stelt afdeling 2.2 Sterkte bij brand dat de hoofddraagconstructie² 90 minuten brandwerend moet zijn als er verblijfsvloeren zijn die hoger liggen dan 5 m boven het meetniveau (artikel 2.10 lid 4). Het meetniveau is het niveau van de hoofdentree van de parkeergarage (vaak ook de hoofdingang van de brandweer), doorgaans Peil. Op basis van artikel 2.10 lid 6 kan de eis van 90 minuten met 30 minuten gereduceerd worden naar 60 minuten³. Als er geen (verblijfs)vloeren hoger dan 5 m liggen, geldt er geen brandwerendheidseis voor de hoofddraagconstructie.

De 'hoofddraagconstructie' waarvoor in Bouwbesluit 2012 eisen gesteld worden veroorzaakt bij bezwijken ervan het bezwijken van constructies in een ander brandcompartiment. Wanneer een parkeergarage uit slechts één brandcompartiment bestaat, zou deze strikt genomen geen hoofddraagconstructie hebben en dus ook niet aan de 60-minuteneis hoeven te voldoen. De volgende vier aspecten dienen echter te worden meegewogen:

1 De eisen gelden voor situaties die door het Bouwbesluit afgedekt worden. In het algemeen dus brandcompartimenten tot en met 1000 m². Parkeergarages hebben vaak (veel) grotere brandcompartimenten (toegestaan op basis van gelijkwaardigheid, bijvoorbeeld door toepassing van mechanische ventilatie of automatische blusinstallaties). Een en ander kan naar de geest van het voorschrift wordt vertaald naar parkeergarages: de hoofddraagconstructie veroorzaakt bij bezwijken ervan het bezwijken van constructies buiten een oppervlakte van 1000 m². Wanneer een parkeergarage van 4 bouwlagen beschouwd wordt, komt dit neer op een grondoppervlakte van 250 m², hetgeen ongeveer overeenkomt met een gemiddeld vloerveld rondom een hoofdkolom, waarvan het bezwijken (bij een lokale brand) gedurende 60 minuten voorkomen moet worden. Hierdoor is bij grote parkeergarages

² Bouwbesluit 2012 is gepubliceerd in Stb. 2011, 416 en is vanaf 1-1-2012 van kracht. In BB 2012 zijn de brandwerendheidseisen identiek aan die in BB 2003. BB 2012 kent het begrip 'hoofddraagconstructie' niet en verwijst niet zoals in BB 2003 door naar NEN 6702 voor een definitie van dit begrip. In plaats daarvan wordt omschreven voor welke constructies de eis geldt. Dit is inhoudelijk voor parkeergarages hetzelfde als in deze Richtlijn beschreven is. De term hoofddraagconstructie wordt gehandhaafd in deze Richtlijn omdat deze bekend is en voor constructeurs inhoudt dat er in het kader van de regelgeving eisen voor gelden ter voorkoming van voortschrijdend bezwijken (buiten het brandcompartiment).

³ Bij een permanente vuurbelasting $\leq 500 \text{ MJ/m}^2$, hetgeen bij parkeergarages vrijwel altijd het geval is (bij de permanente vuurbelasting wordt immers alleen de ruwbouw (constructie, dak, gevels) meegeteld, die bij parkeergarages in het algemeen vrijwel uitsluitend uit onbrandbare materialen bestaat).

die bestaan uit slechts één brandcompartiment wel sprake van een hoofddraagconstructie met hogere eisen aan de brandwerendheid,

2 Bij hogere parkeergarages (hoogste vloer > 8 m) moeten de trappenhuizen als 'extra beschermde vluchtroute' worden uitgevoerd. Dit wil zeggen dat ze niet in het brandcompartiment van de parkeergarage mogen liggen en 60 minuten brandwerend moeten zijn afgescheiden. Als het bezwijken van de constructie van de parkeergarage leidt tot het omtrekken van deze trappenhuizen, geldt hier automatisch ook de eis van 60 minuten voor.

3 Binnenaanval door de brandweer. De brandweer moet in tegenstelling tot andere gebruiksfuncties naar binnen kunnen om een repressieve inzet te kunnen plegen en heeft dus een zekere constructieve bescherming nodig. Het onder 1 gestelde borgt in voldoende mate dat de brandweer tijdens haar werk niet gehinderd wordt door het bezwijken van de constructie.

Wanneer er geen eis van 60 minuten geldt (vanwege de hoogte van de parkeergarage óf omdat er geen hoofddraagconstructie is), geldt nog wel de eis van 30 minuten in verband met het in stand houden van beschermde vluchtroutes (dit zijn in ieder geval de trappenhuizen, maar kan ook voortkomen uit een indeling in subbrandcompartimenten), volgens artikel 2.10 lid 1 van Bouwbesluit 2012.

Résumerend zal er voor parkeergarages van enige omvang een brandwerendheids-eis van 60 minuten gelden voor de hoofddraagconstructie; voor lage parkeergarages (twee lagen plus een parkeerdek) een eis van 30 minuten en voor nog kleinere parkeergarages (waarbij vanaf elk punt op het parkeerdek binnen de afstand van 40 m (bij een bezetting van < 1 persoon per 30 m²)⁴ het gebouw via de trappen verlaten kan worden en er derhalve geen beschermde vluchtroutes zijn) geen eis. Ook voor onderdelen van de constructie die bij bezwijken slechts een plaatselijk effect hebben en geen gevolgen hebben voor de stabiliteit of voortschrijdend bezwijken veroorzaken, geldt uiteraard geen eis.

⁴ 40 m is de maximale loopafstand in het verblijfsgebied volgens BB artikel 2.102 lid 7 (60 m, waarbij de loopafstand door het verblijfsgebied met 1,5 vermenigvuldigd moet worden (en die door de verkeersruimte met 1,0).

2.2 Eurocodes

Voor de bepaling van de brandwerendheid verwijst Bouwbesluit 2012 in artikel 2.11 en 2.10 naar de Eurocodes NEN-EN 1990 (belastingen), impliciet doorverwijzend naar NEN-EN 1991-1-2 (belastingen bij brand), en NEN-EN 1993-1-2 (staalconstructies bij brand). De Eurocodes zijn per 1-1-2012 wettelijk van kracht. Tot die tijd zijn ze in het kader van gelijkwaardigheid gebruikt. De Eurocodes moeten gebruikt worden in combinatie met de voor elk Eurocodedeel opgestelde, voor Nederland geldende, Nationale Bijlage (NB)..

In deze Richtlijn wordt volledig gebruik gemaakt van de Eurocodes:

- NEN-EN 1990 + NB voor de combinatieregels van de mechanische belastingen;
- NEN-EN 1991-1-2 + NB voor de thermische belasting, waarbij gebruik gemaakt wordt van informatieve bijlage C over lokale branden. Deze Eurocode staat in hoofdstuk 3 de thermische belasting op basis van natuurlijke brandscenario's toe. Deze Richtlijn dient als een nadere uitwerking van NEN-EN 1991-1-2 + NB in de vorm van brandvermogensscenario's en geeft richting aan de toe te passen invoerparameters;
- NEN-EN 1993-1-2 + NB voor de thermische en mechanische respons van een staalconstructie;
- NEN-EN 1994-1-2 + NB voor de thermische en mechanische respons van een staal-betonconstructie.

2.3 Toepassingsgebied

Het toepassingsgebied van deze richtlijn is: bovengrondse, natuurlijk geventileerde⁵ parkeergarages met een 'normaal' gebruik⁶. Overweging hierbij is dat in dergelijke parkeergarages een goede afvoer van warmte via de open gevels mogelijk is, zodat de brand een lokaal karakter heeft en er geen compartimentsbrand⁷ ontstaat. Wel kan deze lokale brand, zolang geen repressief ingrijpen door de brandweer plaatsvindt, door de parkeergarage gaan 'wandelen' en de zone met hoge temperaturen zich verplaatsen. Zonder overigens te leiden tot vlamoverslag ('flashover'), met andere woorden de brand blijft lokaal van karakter.

Als voorwaarde voor het mogen rekenen met een lokaal brandvermogensscenario geldt de invloed op het stromingsprofiel nabij de brandende auto('s). Er moet voldoende vrije uitstroom van hete verbrandingsgassen mogelijk zijn om opbouw van

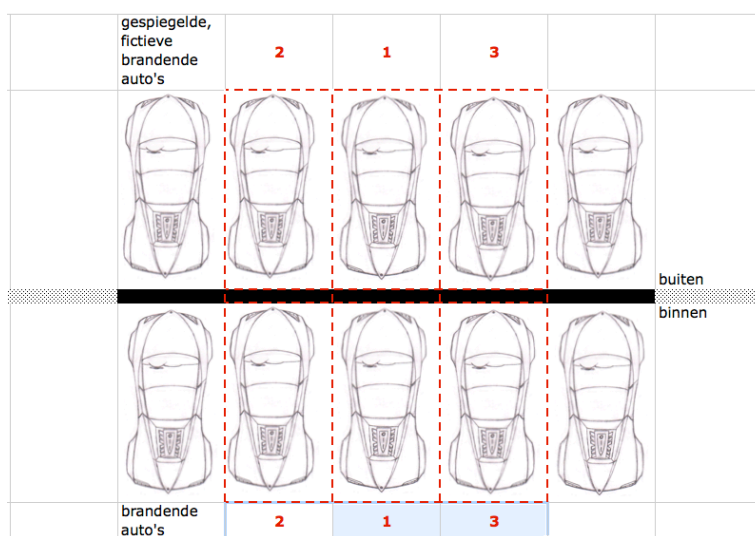
⁵ Desgewenst daarbij geassisteerd door stuwdrukventilatoren, welke voor het onderwerp van deze Richtlijn een positief effect hebben (ten aanzien van de afvoer van warmte).

⁶ Deze Richtlijn is niet geschikt voor (automatische) stallingssystemen of voor verhuurbedrijven met auto's op zeer korte afstand van elkaar, maar wel voor (openbare) parkeergarages of stallingsgarages met overwegend personenwagens.

⁷ Hiermee wordt bedoeld dat de gehele parkeergarage in brand staat en alle auto's tegelijkertijd bijdragen aan de brand.

een uniforme hete luchtlaag onder het plafond te kunnen beperken. De voorwaarden in NEN 2443 voor natuurlijk geventileerde parkeergarages (bedoeld voor de ventilatie-eisen in het kader van koolmonoxide en LPG-gebruik) zijn in dit kader niet à priori voldoende⁸. Er moeten eisen aan toegevoegd worden om vrije uitstroom te waarborgen, een en ander afhankelijk van het constructieve ontwerp (o.a. balken onder het plafond in één of twee richtingen, aanwezigheid gesloten wand in korte/lange zijde):

- de 54 m-eis tussen twee tegenover elkaar liggende gevels uit NEN 2443 wordt genuanceerd tot: vanuit elk punt in de parkeergarage is de afstand tot een gevel kleiner of gelijk aan 27 m;
- elke gevel bestaat voor $\geq 1/3$ van het oppervlak uit (niet-afsluitbare) openingen (de optie van $\geq 2,5\%$ van de bruto vloeroppervlakte van het verblijfsgebied aan openingen is niet van toepassing);
- wanneer één wand over een lengte van $\geq 7,5$ m dicht is over de gehele hoogte, is een conservatieve beschouwing op basis van spiegelsymmetrie mogelijk (waarbij dus feitelijk het dubbele aantal auto's in brand wordt verondersteld en geen warmte-uitwisseling ter plaatse van het spiegelvlak plaatsvindt). Bij een hoek met twee dichte wanden over een lengte van $\geq 7,5$ m is deze spiegelsymmetrie in beide richtingen toe te passen;



Afb. 3 Toepassing van spiegelsymmetrie bij gevels die over $> 7,5$ m dicht zijn.

⁸ De voorwaarden uit NEN 2443 voor open parkeergarages zijn:

- tenminste twee tegenover elkaar gelegen wanden zijn gevels voorzien van (niet-afsluitbare) openingen;
- de maximale afstand tussen deze twee tegenover elkaar gelegen gevels is 54 m;
- de laagste vloer ligt $\leq 1,3$ m onder maaiveld;
- de openingen in de gevels zijn per verblijfsgebied (verdieping) $\geq 1/3$ van het oppervlak van alle gevels en wanden die dat verblijfsgebied begrenzen óf
- de openingen in twee tegenover elkaar gelegen gevels zijn in elk van deze gevels $\geq 2,5\%$ van de bruto vloeroppervlakte van dat verblijfsgebied;
- tevens dient de minimale ventilatie bepaald volgens $NEN 1087 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ per m^2 gebruiksoppervlak te bedragen (eis uit het Bouwbesluit).

- de vrije uitstroom van hete verbrandingsgassen mag boven de brandende auto's niet aan vier zijden belemmerd worden door bijvoorbeeld hoge stalen balken, borstweringen of dichte geveldelen die onder de vloer uitsteken;
- tevens dient de vrije uitstroom mogelijk te zijn over een hoogte van ten minste 500 mm. Hierbij dient de stroming naar boven niet gehinderd te worden.

2.4 Koppeling brandwerendheidseis - bepalingmethode

In § 2.3 is het toepassingsgebied niet afgebakend ten aanzien van de aanwezigheid van gebouwdelen boven de parkeergarage (met andere gebruiksfuncties, bijvoorbeeld kantoor, hotel of woningen). Als gevolg van deze bovengelegen gebruiksfuncties kunnen de brandwerendheidseisen voor de constructie anders zijn. In § 2.1 zijn de eisen beschreven voor situaties met alleen de parkeerfunctie. Hierbij geldt dat bij parkeergarages van enige omvang een eis van 60 minuten van toepassing is voor de hoofddraagconstructie. Daarbij is nog geen rekening gehouden met de aanwezigheid van bovenbebouwing. De aanwezigheid van bovenbebouwing kan conform de voorschriften in het Bouwbesluit leiden tot een hogere eis dan 60 minuten:

- bovenbebouwing met kantoor-, onderwijs-, sport-, winkel-, industrie- of bijeenkomstfunctie (hoogste vloer ≤ 70 m): de eis voor de hoofddraagconstructie wordt niet hoger, maar blijft 60 minuten⁹;
- bovenbebouwing met logies-, gezondheidszorg- of celfunctie (hoogste vloer ≤ 70 m): de eis voor de hoofddraagconstructie wordt hoger: 90 minuten¹⁰;
- bovenbebouwing met woonfunctie (hoogste vloer ≤ 70 m): de eis voor de hoofddraagconstructie wordt hoger: 120 minuten¹⁰.

Bij combinatie van functies geldt de hoogste eis.

Wanneer de in de hiernavolgende hoofdstukken van deze Richtlijn beschreven aanpak wordt gevolgd, kan worden beoordeeld of een staalconstructie het brandscenario (zie hoofdstuk 3) doorstaat dat hoort bij de brandwerendheidseis aan de hoofddraagconstructie (met bij een hogere eis een zwaarder brandscenario). Met andere woorden: de staalconstructie bezwijkt niet en de staalconstructie voldoet op basis van de gelijkwaardige veiligheidsanalyse.

In alle gevallen gelden de buitengewone belastingen volgens hoofdstuk 4.

⁹ Hierbij is ervan uitgegaan dat er sprake is van een lage permanente vuurbelasting en derhalve de 30 minuten reductie toegepast mag worden

¹⁰ ongeacht of er sprake is van een lage permanente vuurbelasting, omdat de 30 minuten reductie niet toegepast mag worden bij woongebouwen.

3 Brandscenario's en -modellering

Binnen het toepassingsgebied van deze Richtlijn geldt dat de brand in een parkeergarage beperkt blijft tot een lokale brand (geen flashover). Omdat de constructie zich in of nabij de lokale brand kan bevinden, is het niet goed mogelijk gebruik te maken van zonemodellen, zoals beschreven in NEN 6055 [9] (O-zone, Cfast of een ander zonemodel). Enerzijds omdat de wijze waarop een brand wordt gemodelleerd niet overeenkomt en anderzijds doordat de grove benadering met zones niet aansluit bij de situaties in parkeergarages als gevolg van de karakteristieke afmetingen. Verder kan de standaard brandstof van de meeste zonemodellen (cellulose) niet gebruikt worden in het verbrandingsmodel, maar moet een andere (koolwaterstof)brandstof worden gekozen. Het zonemodel is minder geschikt omdat homogeniteit van de zones verondersteld wordt en lokale opwarmingseffecten niet goed beschreven kunnen worden (met uitzondering van liggers recht boven de brandhaard). Alternatief is een geavanceerd (CFD-)model te gebruiken, waarbij overigens het modelleren van een (lokale) brandhaard de nodige kennis en ervaring vraagt.

In deze Richtlijn wordt een (natuurlijk) brandmodel van een lokale brand toegepast, waarbij het specifieke brandvermogensscenario ontleend is aan uitgebreid internationaal onderzoek. In dit kader wordt verwezen naar het in dat Europese onderzoekskader speciaal voor parkeergarages ontwikkelde rekenprogramma CaPaFi¹¹. CaPaFi is geschikt voor open (natuurlijk geventileerde) parkeergarages of gesloten parkeergarages met een grote oppervlakte (waarbij de wanden geen invloed hebben op de warmte-afvoer), die aan de in § 2.3 gestelde (aanvullende) criteria voldoen.

NEN-EN 1991-1-2 beschrijft in § 3.3 de toepassing van natuurlijke brandmodellen. § 3.3.1.3 van die norm verwijst voor lokale branden (waarbij geen vlamoverslag optreedt) naar bijlage C, welke de status 'informatief' heeft (in de Nederlandse Nationale Bijlage). CaPaFi werkt volgens deze bijlage C, volgens de methode Hasemi (zie § 3.4 van deze Richtlijn).

3.1 Brandvermogens en vuurbelasting van auto's

Internationaal wordt vaak gebruik gemaakt van de brandvermogenscurves uit het EGKS-rapport [8] (gebaseerd op de tests in Vernon), tabel 4.1/4.2/p.77. Hierbij worden drie auto's beschouwd met een calorische waarde van 9500 MJ (klasse 3, dat wil zeggen de op een na zwaarste, volgens het Europese onderzoek, met 320 kg

¹¹ CaPaFi (versie 2.1 (2010)) is een op www.brandveiligmetstaal.nl onder 'tools' te downloaden excel-programma voor het berekenen van de opwarming van stalen constructiedelen van parkeergarages met meerdere brandende auto's, volgens EN 1991-1-2 en EN 1993-1-2.

brandbaar materiaal per auto). Standaard wordt bij auto's uitgegaan van een verbrandingsefficiëntie van 70% (zie ook het Efectis-onderzoek van de brand in de Lloydstraat [10], waardoor het vrijkomend vermogen bij de brand $9500 \cdot 70\% = 6650$ MJ bedraagt. Uit het Europese onderzoek blijkt de 2e auto 12 minuten na de 1e en de 3e auto 24 min na de 1e te branden. De 1e auto staat in het midden (conservatief) van de drie brandende auto's.

Er geldt dat het Europese onderzoek van rond de eeuwwisseling nog steeds representatief is voor het beoordelen van branden in parkeergarages met het huidige wagenpark¹². In deze Richtlijn is uitgegaan van een zwaarder wordend brandvermogensscenario om overeenstemming te bereiken met de toename van de vereiste weerstand tegen brand van de constructiedelen (ref. de standaard-brandwerendheidseis). Hiermee wordt parallel aan de verkleining van de kans op bezwijken bij zwaarder wordende eisen bij deze benadering gezorgd dat de kans dat een brandscenario zich voor kan doen kleiner is waardoor de kans dat de constructie hierdoor kan bezwijken ook kleiner is. Hierdoor wordt aangesloten bij de standaard regelgeving waarbij de vereiste weerstand tegen brand van constructiedelen wordt verhoogd en de kans op bezwijken wordt beperkt.

Het bovengenoemde standaard Europese brandscenario is in deze Richtlijn aangehouden bij een eis van 30 minuten. Bij eisen van 60, 90 en 120 minuten raken telkens meer auto's betrokken en/of vindt sneller brandoverslag plaats en/of wordt uitgegaan van een zwaardere vermogenscurve voor de 1^e auto. Dit wordt in § 3.2 en 3.3 uitgewerkt.

De vastgestelde brandscenario's zorgen voor een afstemming met de getrapte eisen uit de vigerende regelgeving. Door uit te gaan van aangepaste brandscenario's afhankelijk van de situaties wordt de brandduur aangepast waardoor ook aangesloten wordt bij de standaard vereiste weerstand tegen brand in minuten volgens de standaard brandkromme.

Deze aanpak in deze Richtlijn is daardoor een robuuste, met voldoende veiligheidsmarge.

In deze Richtlijn wordt geen aansluiting gezocht bij Ontw. NEN 6098:2010. De curves in deze Richtlijn, gebaseerd op de proeven in het Franse Vernon en het EGKS-onderzoek, liggen hoger dan die in Ontw. NEN 6098. In Ontw. NEN 6098 wordt enerzijds beoogd de ventilatievoorzieningen te dimensioneren en wordt anderzijds rekening gehouden met effectief brandweeringrijpen. Om die reden zijn de curves in de Ontw. NEN 6098 niet geschikt voor het beoordelen van constructieve veiligheid van hoofd draagconstructies. Bij de constructieve beschouwing wordt er immers van

¹² Indien aangetoond wordt dat toekomstige auto's als gevolg van het gebruik van andere materialen en technieken leidt tot een afwijkend brandscenario zal het scenario hierop aangepast moeten worden.

uitgegaan dat de constructiedelen niet vroegtijdig mogen bezwijken. Hierbij wordt geen rekening gehouden met een effectieve brandweerinzet. Dat sluit goed aan bij de bepaling van de brandwerendheid van constructiedelen volgens de standaard brandkromme, waarbij eveneens geen rekening wordt gehouden met een brandweerinzet.

3.2 Uitbreiding van brand en aantal auto's

Het uitgangspunt voor de brandscenario's is een lokale brand van een beperkt aantal auto's in de parkeervakken. Uit onderzoek blijkt dat meer dan 95% van de branden beperkt blijft tot maximaal 3 auto's die (volledig) uitbranden. Het is om die reden slechts zelden nodig scenario's met meer dan 3 auto's te beschouwen. Enerzijds omdat er gezien de installatietechnische voorzieningen van uit wordt gegaan dat de brandweer na ca. 20 minuten in staat is de lokale brand te beheersen. Anderzijds omdat wanneer dat laatste niet zou gebeuren de brand 'door de parkeergarage wandelt', waarbij de thermische belasting op de constructie boven auto 1 al over zijn maximum is en het maximum later op andere plaatsen gaat optreden. Door auto 1 op een willekeurige plaats te beschouwen is dit al ondervangen. In een worst case beschouwing kan het (in extra kritische situaties) zinvol zijn 5 auto's in brand te beschouwen (na 24 minuten). In deze Richtlijn wordt een brand met 5 brandende auto's aangenomen voor situaties met een brandwerendheidseis van 90 of 120 minuten; een aanpak die als uiterst conservatief kan worden aangemerkt..

In aanvulling op het EGKS-onderzoek wordt voor Nederland in deze Richtlijn als referentiescenario aangehouden: klasse 3 auto's (9500 MJ), waarbij 12, respectievelijk 24 minuten na ontstaan van brand de brand overspringt naar de (in dwarsrichting) naastgelegen auto's. Brandoverslag naar auto's die in langsrichting aan elkaar grenzen behoeft niet meegenomen te worden in verband met de grotere afstand tussen de brandhaard in vergelijking met de dwarsrichting.

Omdat het Bouwbesluit in bepaalde gevallen bij bovenbebouwing een hoger veiligheidsniveau eist, wordt dat in het kader van deze Richtlijn vertaald in een brandscenario dat zwaarder is naarmate de brandwerendheidseis hoger is:

- Bij parkeergarages zonder bovenbebouwing en wanneer de hoogste parkeervloer $\leq$ 5 m boven het meetniveau ligt, kan (afhankelijk van de vluchtafstanden) de eis voor de draagconstructie 30 minuten brandwerendheid zijn (in verband met het in stand houden van beschermde vluchtroutes): het brandvermogensscenario met na 12 minuten 2 en na 24 minuten 3 auto's in brand wordt voorgeschreven.
- Bij parkeergarages met vloeren > 5 m of bij bovenbebouwing waarvoor de eis voor de hoofdconstructie 60 minuten is: het brandvermogensscenario met na 12 minuten 2 en na 24 minuten 4 auto's in brand wordt voorgeschreven.

- Bij parkeergarages met bovenbebouwing waarvoor de eis voor de hoofddraagconstructie 90 minuten is: het brandvermogensscenario met na 12 minuten 3 en na 24 minuten 5 auto's in brand wordt voorgeschreven.
- Bij parkeergarages met bovenbebouwing waarvoor de eis voor de hoofddraagconstructie 120 minuten is: het brandvermogensscenario met na 12 minuten 3 en na 24 minuten 5 auto's in brand (met voor auto 1 een hoger vermogen dan de standaard) wordt voorgeschreven.

Worst case uitgangspunt is derhalve een lokale brand met na 24 minuten 3 (bij een eis van 30 minuten), 4 (bij een eis van 60 minuten) of 5 auto's (bij een eis van 90 of 120 minuten) in brand.

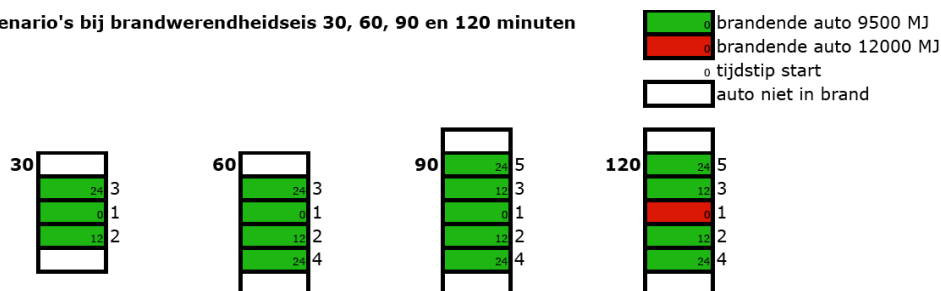
In specifieke situaties (afhankelijk van het constructieve ontwerp) kan het nodig zijn een enkele brandende auto (van 9500 MJ), op een hellingbaan of een rijbaan te beschouwen. Dat kan een relevant scenario zijn, wanneer de constructie hiervan afwijkend is van de constructie van de parkeervakken.

3.3 Brandvermogensscenario

Het maatgevende brandvermogensscenario dat moet worden beschouwd volgens deze Richtlijn is weergegeven (zie afbeelding 4 voor de posities en volgorde van de auto's):

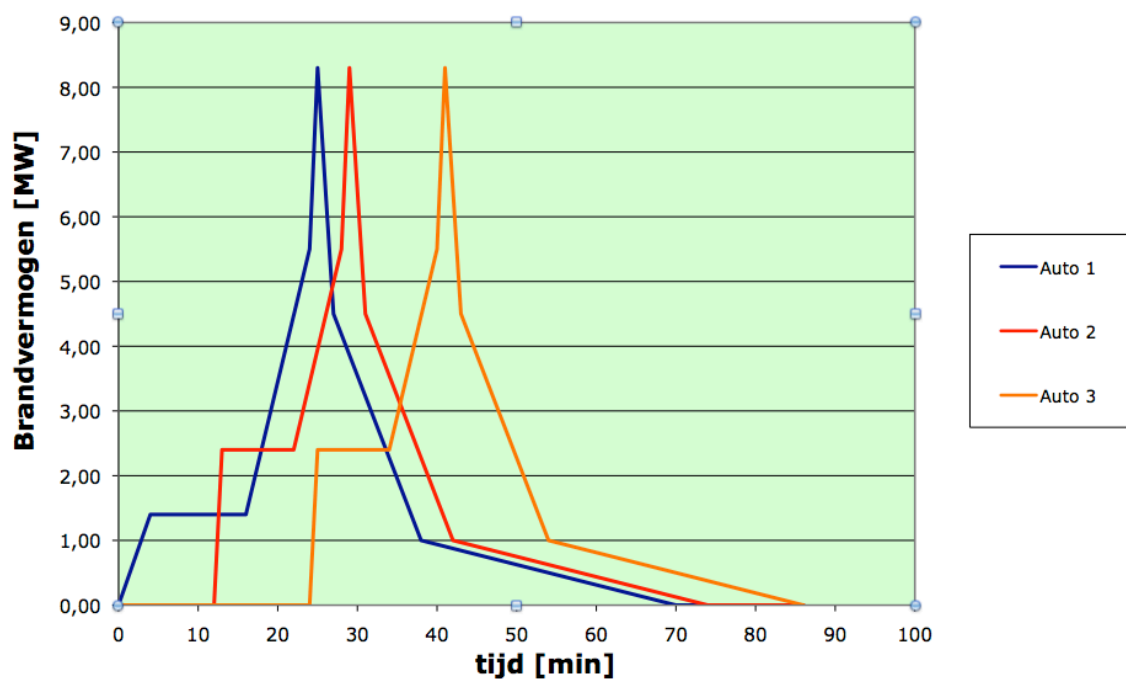
- voor een brandwerendheidseis van 30 minuten in afbeelding 5 en tabel 1;
- voor een brandwerendheidseis van 60 minuten in afbeelding 6 en tabel 2
- voor een brandwerendheidseis van 90 minuten in afbeelding 7 en tabel 3
- voor een brandwerendheidseis van 120 minuten in afbeelding 8 en tabel 4.

Scenario's bij brandwerendheidseis 30, 60, 90 en 120 minuten



Afb. 4 Posities en volgorde van de ontsteking van de brandende auto's bij de te beschouwen brandvermogensscenario's bij een eis van 30, 60, 90 en 120 minuten.

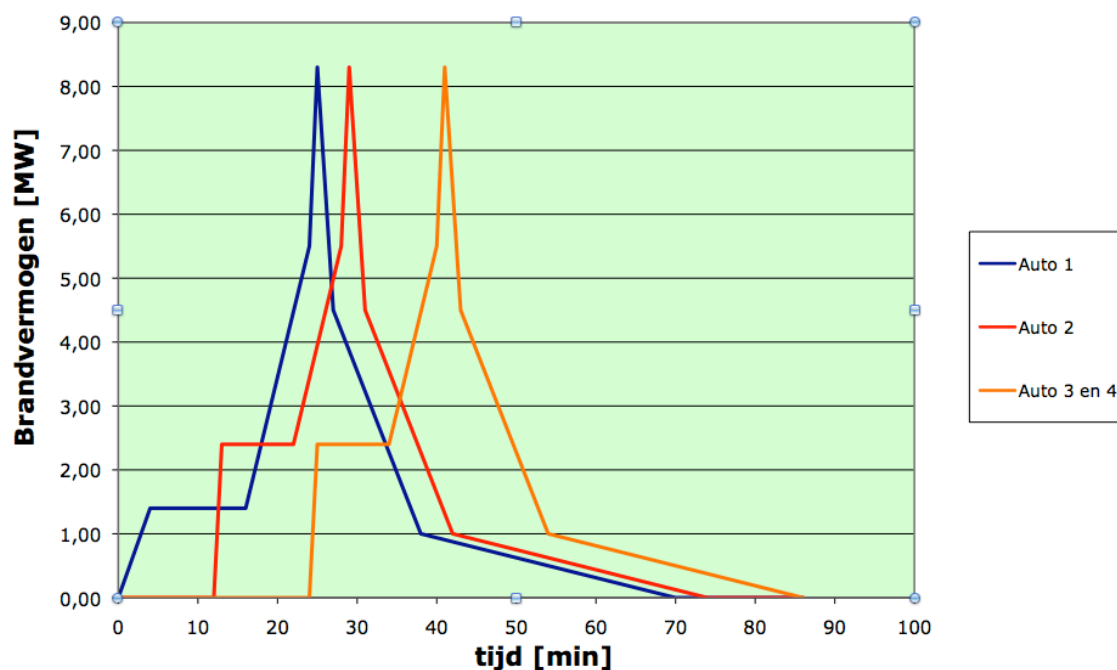
Bij de uitbreiding van de brand wordt uitgegaan van kennis die is ontwikkeld tijdens brandproeven. Bij de brandproeven zijn de auto's opgesteld zoals weergegeven in bovenstaand figuur. Indien in een parkeergarage de auto's niet haaks ten opzichte van de rijbaan worden opgesteld of om andere redenen afwijkt van de standaardopstelling kan het noodzakelijk zijn het scenario hierop aan te passen.



Afb. 5 Maatgevend brandvermogensscenario bij een eis van 30 minuten.

t [min]	Brandvermogen [MW]		
	Auto 1	Auto 2	Auto 3
0	0,00	0,00	0,00
4	1,40		
12		0,00	
13		2,40	
16	1,40		
22		2,40	
24	5,50		0,00
25	8,30		2,40
27	4,50		
28		5,50	
29		8,30	
31		4,50	
34			2,40
38	1,00		
40			5,50
41			8,30
42		1,00	
43			4,50
54			1,00
70	0,00		
74		0,00	
86			0,00

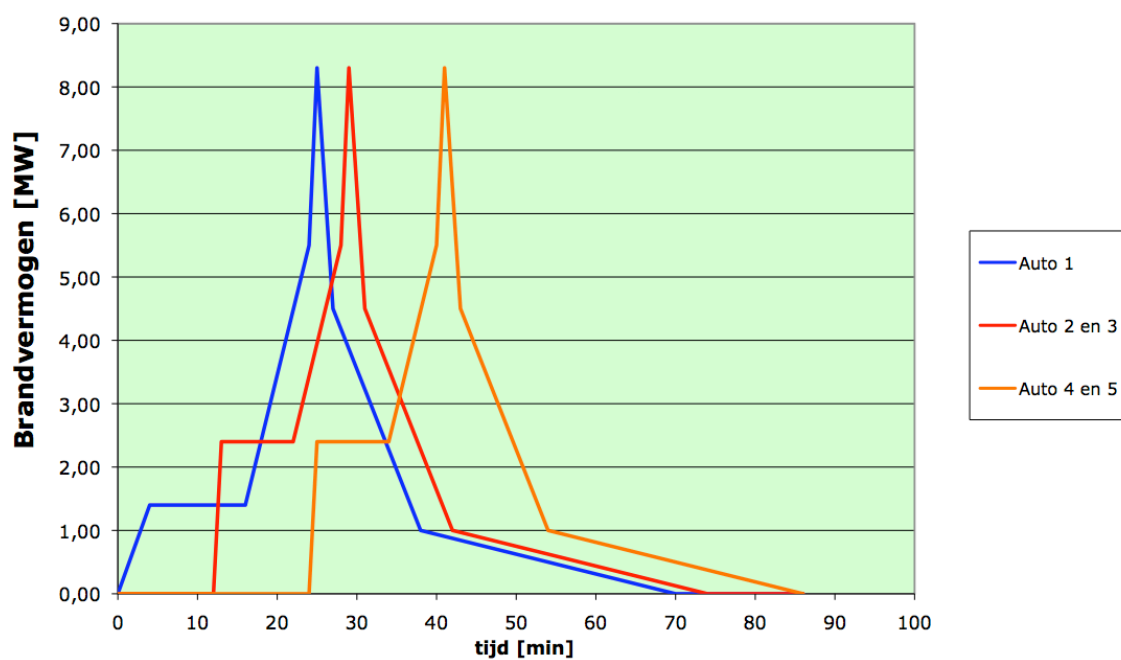
Tabel 1 Maatgevend brandvermogensscenario bij een eis van 30 minuten, weergegeven als invoerparameters voor het brandvermogen als functie van de tijd.



Afb. 6 Maatgevend brandvermogensscenario bij een eis van 60 minuten.

t [min]	Brandvermogen [MW]		
	Auto 1	Auto 2	Auto 3 en 4
0	0,00	0,00	0,00
4	1,40		
12		0,00	
13		2,40	
16	1,40		
22		2,40	
24	5,50		0,00
25	8,30		2,40
27	4,50		
28		5,50	
29		8,30	
31		4,50	
34			2,40
38	1,00		
40			5,50
41			8,30
42		1,00	
43			4,50
54			1,00
70	0,00		
74		0,00	
86			0,00

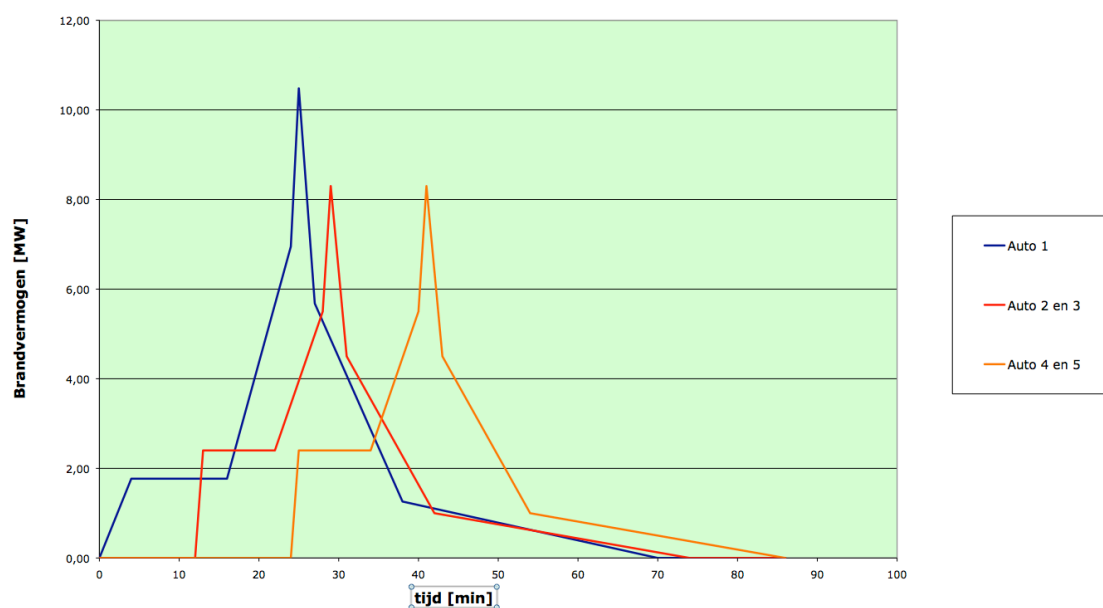
Tabel 2 Maatgevend brandvermogensscenario bij een eis van 60 minuten, weergegeven als invoerparameters voor het brandvermogen als functie van de tijd.



Afb. 7 Maatgevend brandvermogensscenario bij een eis van 90 minuten.

t [min]	Brandvermogen [MW]		
	Auto 1	Auto 2 en 3	Auto 4 en 5
0	0,00	0,00	0,00
4	1,40		
12		0,00	
13		2,40	
16	1,40		
22		2,40	
24	5,50		0,00
25	8,30		2,40
27	4,50		
28		5,50	
29		8,30	
31		4,50	
34			2,40
38	1,00		
40			5,50
41			8,30
42		1,00	
43			4,50
54			1,00
70	0,00		
74		0,00	
86			0,00

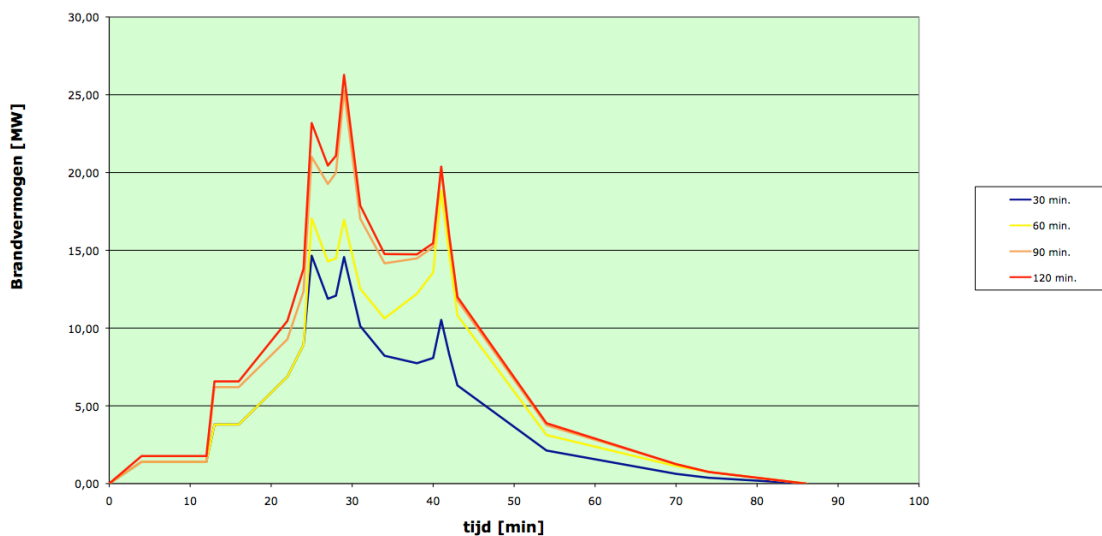
Tabel 3 Maatgevend brandvermogensscenario bij een eis van 90 minuten, weergegeven als invoerparameters voor het brandvermogen als functie van de tijd.



Afb. 8 Maatgevend brandvermogensscenario bij een eis van 120 minuten.

t [min]	Brandvermogen [MW]		
	Auto 1	Auto 2 en 3	Auto 4 en 5
0	0,00	0,00	0,00
4	1,77		
12		0,00	
13		2,40	
16	1,77		
22		2,40	
24	6,95		0,00
25	10,48		2,40
27	5,68		
28		5,50	
29		8,30	
31		4,50	
34			2,40
38	1,26		
40			5,50
41			8,30
42		1,00	
43			4,50
54			1,00
70	0,00		
74		0,00	
86			0,00

Tabel 4 Maatgevend brandvermogensscenario bij een eis van 120 minuten, weergegeven als invoerparameters voor het brandvermogen als functie van de tijd.



Afb. 9 Gesommeerde brandvermogensscenario's bij een eis van 30, 60, 90 en 120 minuten.

3.4 Locaal brandmodel volgens Hasemi

Er dient een voor parkeergarages bruikbaar pluimmodel te worden toegepast. Gezien de specifieke afmetingen van een parkeergarage en de grootte van de brandhaard bij auto's is het Hasemi –model een toepasbaar pluimmodel. Hierbij treedt vlamcontact met het plafond op ((6)-(12) van bijlage C van NEN-EN 1991-1-2). Het uitgangspunt is dus dat de vlamlengte langer is dan hoogte van het plafond.

Conform het EGKS-onderzoek geldt standaard een brandniveau H_s van 0,3 m ten opzichte van de bovenzijde van de vloer (ref. CaPaFi).

3.5 Warmteoverdracht van de brand naar de constructie

De brandtemperatuurcurve op basis van de lokale brandvermogenscurve bepaalt conform EN 1991-1-2 artikel 3.1 en 3.3.1.1 in combinatie met de emissiefactor ε (= 0,8) en de convectieve warmte-overdrachtscoëfficiënt α_c (= 35 W/m²K) de warmte-overdracht van de brand naar de constructie in de vorm van straling en convectie.

4 Mechanische belasting op de constructie tijdens brand

Het buitengewone belastinggeval brand voorziet volgens NEN-EN 1990 + NB in de volgende combinatieregels voor de belastingen op (hoofddraag)constructies:

- onderdelen waar geen windbelasting op aanwezig is:

$$1,0 \cdot G_k + \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i},$$

waarbij

G_k = de permanente belasting;

$Q_{k,i}$ = de veranderlijke belasting (index i voor meerdere belastingen), welke voor de vloerbelasting van parkeergarages (voertuigen tot 25 kN) 2 kN/m² is (Tabel 6.8 in artikel 6.3.3.2 van NEN-EN 1991-1-1 + NB);

Ψ_2 = de 'quasi blijvende' waarde voor de combinatiefactor, welke voor de vloerbelasting van parkeergarages 0,6 is (Tabel A.1.1 van NEN-EN 1990 + NB).

- onderdelen waar wel windbelasting op aanwezig is:

$$1,0 \cdot G_k + \Psi_1 \cdot Q_w + \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

waarbij (in aanvulling op het voorgaande punt)

Q_w = de windbelasting volgens NEN-EN 1991-1-4 + NB;

Ψ_1 = de 'frequente' waarde voor de combinatiefactor, welke voor wind 0,2 is (Tabel A.1.1 van NEN-EN 1990 + NB).

5 Thermische respons staalconstructie

De warmte-overdracht van de brand naar de constructie in de vorm van straling en convectorie op basis van de lokale brandvermogenscurve moet conform EN 1993-1-2 (artikel 4.2.5.1 voor onbeschermd staal met de formules (4.25) en (4.26)) worden omgerekend tot een staaltemperatuurcurve. De belangrijkste constructie-afhankelijke parameter hierin is de profielfactor A_m/V . Voor I- en H-profielen moet volgens EN 1993-1-2 worden uitgegaan van $(A_m/V)_{box}$ (dwz er wordt rekening gehouden met het zogenaamde schaduweffect met de schaduwfactor k_{sh})¹³. De profielfactoren uit tabellen zijn bruikbaar als de constructie door de brandende auto's van drie of vier zijden aangestraald wordt, zoals bij een ligger boven een brandende auto of een kolom tussen de auto's. Bij een randkolom- of -ligger is dat niet het geval, want wordt de kolom aan drie zijden en de ligger aan twee zijden opgewarmd, waardoor de profielfactoren lager zijn. Gezien de vlamlengte is het advies om bij randliggers op < 2,5 m afstand van het hart van de brandende auto het conservatieve uitgangspunt van driezijdige verhitting te hanteren.

De schaduwfactor 0,9, uit Eq (4.26a) van EN 1993-1-2 mag volgens (2) van 4.2.5.1 alleen worden toegepast onder 'nominal fire actions'. De onderbouwing van deze factor 0,9 is met standaardbrandproeven gedaan. Er is echter geen plausibele reden om deze factor onder hydrocarbon omstandigheden conform Eurocode wel toe te mogen passen en onder natuurlijke brandomstandigheden in een parkeergaragebrand niet. De schaduwfactor 0,9, uit Eq (4.26a) van EN 1993-1-2 wordt in CaPaFi wel in rekening gebracht.

¹³ Bij de invoer van deze $(A_m/V)_{box}$ waarden past een waarschuwing. De waarden in kolom 1 en 2 van de BiS-tabel (zie <http://www.brandveiligmetstaal.nl/pag/295/pagina.html>) en tabel 4.5 van [13] bevatten de waarde van $0.9 \cdot (A_m/V)_{box}$, zodat daarmee rechtstreeks de temperatuur van onbeschermd staal na 30 minuten standaard brand kan worden afgelezen. Voor invoer in CaPaFi moeten de waarden van kolom 4 of 6 gebruikt worden. Het hangt verder nog af van de positie van het beschouwde onderdeel ten opzichte van de brand.

6 Mechanische respons staalconstructie

6.1 Schematisering van de staalconstructie bij brand

De traditionele beoordeling van constructies bij brand is gebaseerd op de standaardbrand en een componentbenadering, waarbij het effect van (verhinderde) thermische vervormingen niet meegenomen wordt in de beoordeling. Bij een FSE-aanpak zoals in deze Richtlijn moet het thermische effect op de krachtswerking echter wel beschouwd worden. Er zijn twee situaties denkbaar:

1. het thermische effect op de krachtswerking is niet verwaarloosbaar. In deze situatie is het noodzakelijk om een geavanceerd mechanisch model te gebruiken (bijvoorbeeld een eindige elementenmodel) óf een eenvoudig model volgens de componentbenadering, waarbij het thermische effect in de randcondities (oplegreacties) wordt verdisconteerd;
2. het thermische effect op de krachtswerking is verwaarloosbaar (eventueel door specifieke detaillering van de constructie). Dit is bij stalen parkeergarages met onbeschermde staal doorgaans het geval, zie § 6.2. Het eenvoudige mechanische model volgens § 4.2 van NEN-EN 1993-1-2 mag dan gebruikt worden. Wanneer de staaltemperatuur gedurende de beschouwde brandwerendheidsduur lager is dan de kritieke staaltemperatuur, mag worden aangenomen dat de staalconstructie de brand kan weerstaan en niet bezwijkt.

Bezwijken tijdens de afkoelfase treedt bij staal niet op onder de voorwaarde dat 'flexibele' verbindingen zijn toegepast (bijvoorbeeld hoekstaal- of kopplaatverbindingen), zie § 6.3.

6.2 Effecten van verhinderde vervorming

Wanneer de gebruikelijke 'member analysis' (eenvoudige mechanisch model) wordt toegepast, kunnen we verwijzen naar § 2.4.2 van NEN-EN 1993-1-2, waar in clause (4) staat:

- (4) Alleen de effecten van thermische vervormingen, veroorzaakt door een thermische gradiënt over de dwarsdoorsnede, hoeven te zijn beschouwd. De effecten van axiale of in het vlak optredende thermische uitzettingen mogen zijn verwaarloosd.

Afhankelijk van het constructieve ontwerp kunnen lokaal thermische spanningen ontstaan door de plaatselijke opwarming door een brandende auto. Plooiën van flenzen bij opleggingen van (doorgaande) liggers als gevolg van verhinderde of ongelijke thermische vervormingen kan voorkomen worden door ingelaste schotjes, welke vaak al worden toegepast om krachten vanuit kolommen in te leiden.

Thermische spanningen zullen bij de kolommen beperkte effecten hebben (de temperaturen zijn over de doorsnede relatief gelijkmatig verdeeld; in de lengte is relatief vrije vervorming mogelijk).

Thermische spanningen zullen bij de liggers beperkt zijn in de doorsnede, omdat de temperatuur relatief gelijkmatig verdeeld is. De bovenflenzen zullen iets koeler zijn, maar niet in grotere mate dan bij de standaard brand. Dit heeft geen effect op de plastische momentcapaciteit. In lengterichting zijn er lokaal temperatuurverschillen die als gevolg van de samenhang gedeeltelijk tot verhinderde vervormingen en daardoor thermische spanningen leiden. Deze zijn het grootste in de bovenflenzen, waar ze door de koppeling met de vloer geen instabiliteit zullen veroorzaken. In de onderflenzen worden ze over het algemeen gecombineerd met trekspanningen en zijn ze minder van belang. Bij het steunpunt (onderzijde) moet de oplegging in combinatie met de schotjes voorzien in het voorkomen van zijdelings uitknikken van de onderrand. Dit in verband met mogelijke drukspanningen in de onderrand.

6.3 Stalen verbindingen

In NEN-EN 1993-1-2 wordt aangegeven dat de weerstand bij brand van geboute en gelaste verbindingen niet hoeft te worden gecontroleerd, indien aan de volgende twee voorwaarden wordt voldaan (zie NEN-EN 1993-1-2: 4.2.1(6)):

- de thermische isolatie van de verbinding, gekarakteriseerd door de grootheid $(d_p/\lambda_p)_{\text{verbinding}}$ moet tenminste gelijk zijn aan die van de aansluitende delen;
- de benuttingsgraad van de verbinding, gekarakteriseerd door de grootheid E_d/R_d moet gelijk zijn of minder dan die van de aansluitende delen.

Motivering van de eerste voorwaarde is dat het staalvolume ter plaatse van de verbinding groter zal zijn dan dat ter plaatse van de aansluitende delen. Dit leidt tot een lagere staaltemperatuur.

De tweede voorwaarde spreekt voor zichzelf, waarbij opgemerkt wordt dat de voorwaarde geverifieerd dient te worden op basis van het ontwerp bij kamertemperatuur.

De vuistregel houdt in dat de verbindingen die aan deze twee voorwaarden moeten voldoen op dezelfde wijze beschermd moeten worden als de (maatgevende van de) aansluitende delen. Het betekent ook dat de verbindingen niet beschermd hoeven te worden als de aansluitende delen niet beschermd hoeven te worden.

Bezwijken tijdens de afkoelfase treedt bij staal niet op onder de voorwaarde dat 'flexibele' verbindingen zijn toegepast (bijvoorbeeld hoekstaal- of volledige kopplaatverbindingen, welke uit onderzoek [11] een gunstig gedrag blijken te vertonen in vergelijking met bijvoorbeeld lipverbindingen of partiele kopplaatverbindingen).

6.4 Stabiliteit

Vaak zijn er bij parkeergarages in voldoende mate stabiliteitsverbanden aanwezig. Bij een lokale brand kan het wegvallen van één verband of 2 aangrenzende verbanden dan gemakkelijk door de overige verbanden opgevangen worden (redundantie). Bij het belastinggeval brand hoeft immers slechts 20% van de windbelasting gerekend te worden bij een belastingfactor 1,0. Wanneer er redundantie aanwezig is (de krachten in een aan brand blootgesteld verband worden dan overgenomen door andere verbanden), is het niet nodig te rekenen aan de draagkracht van de verbanden onder invloed van de bij brand optredende temperatuur. De stabiliteitsverbanden voldoen dan zonder aanvullende brandwerende voorzieningen.

Gezien de lage benuttingsgraad ($= 0,2/1,5 = 0,133$) is een enkel verband overigens in staat 20% van de windbelasting te dragen tot een temperatuur van 786 °C (dit is de temperatuur waarbij de staalsterkte gedaald is tot 13%). Deze temperatuur wordt in de in deze Richtlijn beschreven scenario's doorgaans niet bereikt.

6.5 Vloeren

Doorgaans werkt de vloer als stabiliteitsschijf. Door koppeling van de vloer aan de liggers ontstaat samenhang en wordt kip van de liggers voorkomen. Hoewel de staalconstructie met een locale brand wordt beoordeeld, is het gebruikelijk de vloer op basis van een standaard brand te beoordelen.

Enkele specifieke opmerkingen over kanaalplaten.

kanaalplaten

De kanaalplaten vormen stabiliteitsschijven. Bij een lokale brand kan de stabiliteitsfunctie echter altijd door de omliggende koude vloerdelen overgenomen worden. Wat dat betreft is daar op dezelfde manier als bij de windverbanden sprake van redundantie. De kanaalplaten moeten (doorgaans, zie §2.4) voldoen aan de eis van 60 minuten standaard brandwerendheid, waarbij aanvullend geëist is dat voldaan wordt aan de BFBN-aanbevelingen van juni 2011. Wat de kanaalplaten betreft geldt dat de temperaturen en vervormingen van de stalen liggers bij natuurlijke branden niet hoger zijn dan waar de stalen liggers op beschermd zouden zijn bij een 60 minuten standaard brand uitvoering. Dit volgt eenvoudig uit het feit dat de kritieke staaltemperatuur niet bereikt wordt bij de natuurlijke branden en dat dit bij de standaard brand en een efficiënt uitgevoerde bekledingsdikte (bijv. bij verf) wel bijna het geval zou zijn. Hieraan is gelijkwaardigheid te ontleen.

7 Geavanceerde brand- en responsmodellen

Het is mogelijk en toegestaan om geavanceerder te rekenen dan volgens deze Richtlijn. Het kan nodig zijn meer geavanceerde brandmodellen (bijv. CFD-modellen) en /of meer geavanceerde responsmodellen (bijv. 2D of 3D eindige elementenmodellen) te gebruiken.

Geavanceerde brandmodellen (bijv. CFD-modellen) zijn toegestaan en kunnen zinvol zijn als bijvoorbeeld de vrije uitstroom van verbrandingsgassen aan de randen belemmerd wordt (bij dichte wanden of hoge randliggers) of in besloten parkeergarages.

Geavanceerde mechanische responsmodellen (bijv. 2D of 3D eindige elementenmodellen) zijn toegestaan en kunnen zinvol zijn als bijvoorbeeld de effecten van locale opwarming en de effecten van verhinderde vervorming in rekening gebracht moeten worden of wanneer het fenomeen van membraanwerking van de vloer (bijvoorbeeld een staalplaat-betonvloer¹⁴) in rekening gebracht moet worden om de herverdeling van krachten van de meest opgewarmde stalen liggers boven de brandhaard naar naastgelegen, koelere liggers mogelijk te maken.

In die geavanceerde modellen dient dan wel te worden uitgegaan van de in deze richtlijn gestelde ontwerpbranden voor een brandwerendheid van resp. 30, 60 90 of 120 minuten.

¹⁴ Voor het in rekening brengen van de membraanwerking in staal-beton vloersystemen is de gratis tool Fracof beschikbaar. zie www.brandveiligmetstaal.nl onder 'tools'.

8 Literatuur

- [1] NEN-EN 1991-1-2 (Eurocode 1. Belastingen op constructies. Deel 1-2. Algemene belastingen. Belastingen bij brand), 2002 + C1, 2009 + Nationale Bijlage, NEN, 2007.
- [2] NEN-EN 1993-1-2 (Eurocode 3. Ontwerp en berekening van staalconstructies. Deel 1-2. Algemene regels. Ontwerp en berekening van constructies bij brand), 2005 + C1, 2006 + C2, 2009 + Nationale Bijlage, NEN, 2007.
- [3] NEN-EN 1994-1-2 (Eurocode 4. Ontwerp en berekening van staal-betonconstructies. Deel 1-2. Algemene regels. Ontwerp en berekening van constructies bij brand), 2005 + C1, 2008 + Nationale Bijlage, NEN, 2007.
- [4] Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in closed car parks (EUR-rapport 18867), Brussel 1999.
- [5] J.-B. Schleich, L.-G. Cajot, M. Brasseur e.a., Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in large compartments (EUR-rapport 18868), Brussel 1999.
- [6] J.-B. Schleich, L.-G. Cajot, M. Pierre e.a., Valorisation project. Natural fire safety concept (EUR-rapport 20349), Brussel 2002.
- [7] J.-B. Schleich, L.-G. Cajot, D. Joyeux e.a., Competitive steel buildings through natural fire safety concept (EUR-rapport 20360), Brussel 2002.
- [8] EGKS-rapport 'Demonstration on real fire tests in car parks and highrise buildings', zie <http://bookshop.europa.eu>).
- [9] NEN 6055 Thermische belasting op basis van het natuurlijk brandconcept; bepalingsmethode, 2011.
- [10] M.P. de Feijter, A.J. Breunese, Onderzoek brand parkeergarage Lloydstraat, Rotterdam, Efectis Nederland-rapport 2007-Efectis-R0894, Rijswijk 2007.
- [11] Cossfire eindrapport, EGKS-onderzoek.
- [12] Fire Spread in Car Parks, DCLG/BRE publication BD2552, 111. p.
- [13] A.F. Hamerlinck, *Brand. Brandveiligheid en berekening van de brandwerendheid van staalconstructies voor gebouwen volgens Eurocode 3*, Bouwen met Staal, Zoetermeer 2010

A Achtergronden uit Europese onderzoeksprogramma's

Europees onderzoek dat in de afgelopen decennia is verricht, heeft een belangrijke rol gespeeld in de ontwikkeling van de FSE methoden in de Eurocodes. In de eerste plaats moet hier het EGKS-project “Competitive Steel Buildings through Natural Fire Safety Concept” genoemd worden [7]. In de eerste fase van dit project - NFSC-1, (1994-1998) - waaraan 14 instituten in 10 verschillende landen hebben deelgenomen, zijn theorieën en modellen ontwikkeld. In de 2de fase - NFSC-2, (1997-2000) - zijn de in de eerste fase ontwikkelde modellen gevalideerd en is gewerkt aan een verbetering van de gebruikersvriendelijkheid ervan. In de laatste fase - NFSC-3, (1999-2001) - stond het toegankelijk maken van de verkregen inzichten centraal. In dit kader is de publicatie van een op de praktijk gerichte versie van het eindrapport in verschillende Europese talen, waaronder de Nederlandse, tot stand gebracht [6]. Parallel aan het NFSC-project zijn onderzoeken uitgevoerd van specifieke gebouwtypen: de beoordeling van het gedrag onder natuurlijke brandomstandigheden van stalen parkeergarages en hallen (1993-1996) [4, 5]. En een demonstratieproject, waarin de toepasbaarheid van de resultaten van deze projecten is geïllustreerd (1998-2002). De rapporten kunnen gedownload worden van <http://www.bouwenmetstaal.nl/lasso/publicaties/gratis/>.

B Stappenplan

Uitwerking van een constructief ontwerp volgens deze Richtlijn betekent dat de volgende stappen doorlopen moeten worden:

- 1 Ontwerp de staalconstructie volgens NEN-EN 1993-1-1 + NB voor de belastingcombinaties volgens NEN-EN 1990 + NB.
- 2 Stel vast dat het gebouw een bovengrondse, natuurlijk geventileerde parkeergarage met een 'normaal' gebruik betreft en controleer of voldaan wordt aan de voorwaarden van NEN 2443 en de in § 2.3. gestelde aanvullende voorwaarden aan de openheid en vrije uitstroom van warmte, om met het lokale brandvermogensscenario uit deze Richtlijn te mogen rekenen.
- 3 Bepaal de brandwerendheidseis voor de hoofddraagconstructie (dat wil zeggen de draagconstructie die bij bezwijken leidt tot voortschrijdend bezwijken (buiten het brandcompartiment c.q. van een vloeroppervlakte $> 1000 \text{ m}^2$)) conform Bouwbesluit 2012, rekening houdend met het vloerniveau van de bovenste parkeerlaag en de aanwezigheid en gebruiksfunctie van eventuele bovenbebouwing), zie § 2.4 en § 3.2.
- 4 Definieer het brandvermogensscenario op basis van de in stap 3 vastgestelde brandwerendheidseis, zie § 3.3, afb. 4 en afb. 5 (30 minuten), 6 (60 minuten), 7 (90 minuten), respectievelijk 8 (120 minuten).
- 5 Bepaal welke posities van brandende auto's voor het in stap 4 gedefinieerde brandvermogensscenario in relatie tot de te beschouwen onderdelen van de staalconstructie, mogelijk maatgevend zijn en voer een berekening uit voor deze posities. Voor de warmteoverdracht worden de factoren uit NEN-EN 1991-1-2 (zie § 3.5) aangehouden.
- 6 Bepaal per onderdeel van de staalconstructie wat de maximaal optredende staaltemperatuur is gedurende het locale brandscenario met de voor dat onderdeel meest ongunstige positionering van brandende auto's. Hierbij geldt NEN-EN 1993-1-2 (zie § 5).
- 7 Stel vast dat de effecten van thermische vervorming op de krachtswerking van de staalconstructie mogen worden verwaarloosd (zie § 6.2) en dat de verbindingen voldoen aan de voorwaarden in § 6.3 (benuttingsgraad en flexibiliteit).
- 8 Bepaal per onderdeel van de staalconstructie de kritieke staaltemperatuur voor de aanwezige belastingen bij het buitengewone belastinggeval brand uit NEN-EN 1990 + NB (zie § 4) en het eenvoudige mechanische model uit § 2.4.2 van NEN-EN 1993-1-2 + NB.
- 9 Controleer of de staaltemperatuur gedurende de brandwerendheidsduur in alle onderdelen van de staalconstructie (stap 6) lager blijft dan de kritieke staaltemperatuur (stap 8).

C Praktijkvoorbeeld

Het voorbeeld is een parkeergarage met twee verdiepingen en een parkeerdek zonder bovenbebouwing. Het parkeerdek ligt op 7,5 m. De staalconstructie bestaat uit doorgaande randliggers IPE 360 van staalsoort S 235 met daarop een betonvloer. De vrije hoogte tot onderkant vloer is 2,75 m. De betonvloer overspant 16 m; de middenvelden van de liggers overspannen 5 m. De permanente belasting is $q_g = 4,0 \text{ kN/m}^2$, de veranderlijke belasting is $q_q = 2,0 \text{ kN/m}^2$, de combinatiefactor $\Psi_2 = 0,6$.

1 De staalconstructie is ontworpen volgens NEN-EN 1993-1-1 + NB op de belastingcombinaties volgens NEN-EN 1990 + NB.

2 Het is een bovengrondse, natuurlijk geventileerde parkeergarage met een 'normaal' parkeergebruik en er wordt voldaan aan de voorwaarden van NEN 2443 en de in § 2.3. gestelde aanvullende voorwaarden aan de openheid en vrije uitstroom van warmte.

3 De brandwerendheidseis voor de hoofddraagconstructie bedraagt 60 minuten conform Bouwbesluit 2012, omdat het vloerniveau van de bovenste parkeerlaag 7,5 m ($> 5 \text{ m}$) is en er geen bovenbebouwing is.

4 Het brandvermogensscenario op basis van § 3.3, afb. 4 en afb. 6 (60 minuten) wordt toegepast.

5 De parkeervakken c.q. de 4 brandende auto's bevinden zich haaks op de randliggers. De afstand van het hart van het parkeervak tot de ligger is 2,5 m.

6 De maximaal optredende staaltemperatuur gedurende het locale brandscenario met de voor dat onderdeel meest ongunstige positionering van brandende auto's is berekend met CaPaFi, zie afb. C1 voor de invoer en C2 voor de berekende temperaturen van de driezijdig verhitte IPE 360 (profielfactor $A_m/V = 163 \text{ m}^{-1}$ en $A_m/V (\text{box}) = 122 \text{ m}^{-1}$). Deze bedraagt $\theta_{a,\max} = 541 \text{ }^\circ\text{C}$ na 32 minuten midden tussen auto 1 en 2 in.

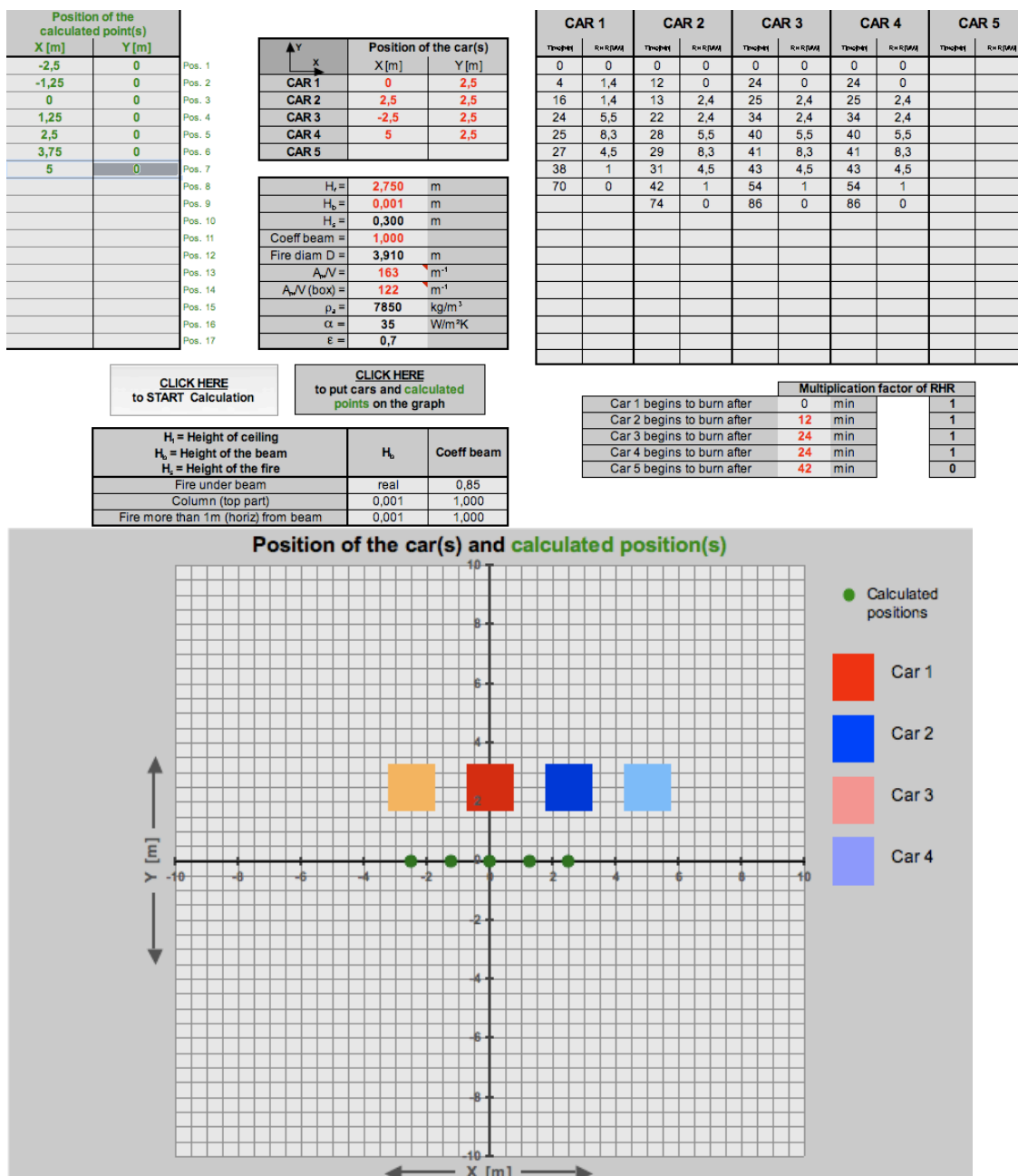
7 Het effect van thermische vervorming op de krachtswerking van de staalconstructie mag worden verwaarloosd en de verbindingen voldoen aan de voorwaarden in § 6.3 (benuttingsgraad en flexibiliteit).

8 Een eenvoudige, conservatieve berekening van de kritieke staaltemperatuur voor de aanwezige belastingen bij het buitengewone belastinggeval brand uit NEN-EN 1990 + NB (zie § 4) en het eenvoudige mechanische model uit § 2.4.2 van NEN-EN 1993-1-2 + NB:

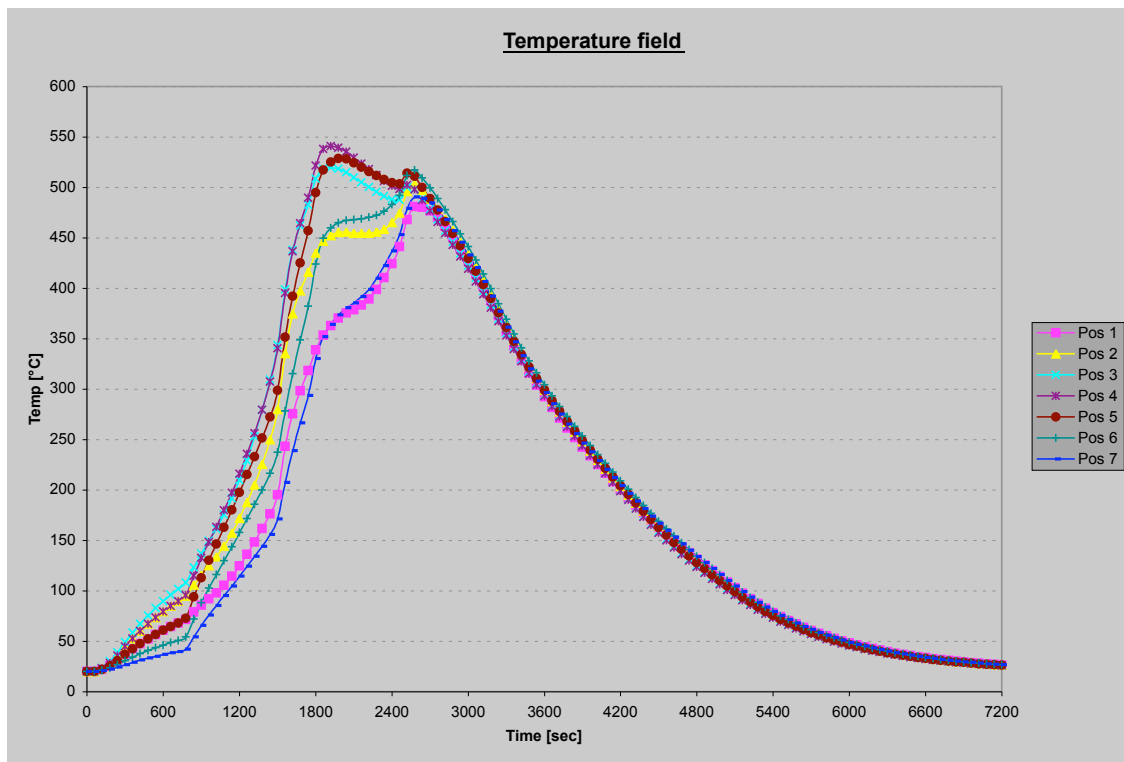
- IPE 360 van S 235 is bij brand een klasse 1 profiel (zie tabel 4.10 van [13]), zodat van een plastische momentenverdeling en een plastische momentcapaciteit uitgegaan mag worden.
- belasting bij brand $q_\theta = (4,0 + 0,6 \cdot 2,0) + 0,6 = 42,2 \text{ kN/m}^2$.

- optredende moment bij brand $M_{\theta} = 1/16 \cdot 42,2 \cdot 5^2 = 66 \text{ kNm}$.
- opneembare moment bij 20 °C $M_{20} = W_{pl} \cdot f_y = 1019 \cdot 0,235 = 240 \text{ kNm}$.
- benuttingsgraad $\mu_0 = M_{\theta} / M_{20} = 66 / 240 = 0,28$.
- correctiefactor $\kappa_1 = 0,7$ (ligger onder een betonvloer) en $\kappa_2 = 0,85$ (doorgaande ligger).
- kritieke staaltemperatuur $\theta_{a,cr} = 755 \text{ °C}$ voor $\mu_0 \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2 = 0,28 \cdot 0,7 \cdot 0,85 = 0,164$ (zie tabel 4.1 van [13]).

9 Omdat de staaltemperatuur gedurende de brandwerendheidsduur in alle onderdelen van de staalconstructie lager blijft dan de kritieke staaltemperatuur ($\theta_{a,max} = 541 \text{ °C} \leq \theta_{a,cr} = 755 \text{ °C}$) wordt voldaan aan de gestelde brandwerendheidseis.



Afb. C1 Invoer van het praktijkvoorbeeld.



Afb. C2 Berekende staaltemperaturen in het praktijkvoorbeeld.