

RAPPORTAGE

Analyse en beschouwing brandverloop en brandbestrijding bedrijfshal aan de Marconistraat te Harlingen



Datum : 20 maart 2012
Versie : 2.0
Van : ing. J.J. Clossen GIFireE

Inleiding

In de nacht van 16 op 17 maart 2012 is er brand ontstaan in een bedrijfshal gelegen aan de Marconistraat 7 te Harlingen. In het gebouw waren twee bedrijven gevestigd. In het rechterdeel bevond zich een magazijn met boeken samen met een kantoordeel van een uitgeverij. In het magazijn waren circa 180.000 boeken opgeslagen met een totaalgewicht van ongeveer 90 ton. In het linkerdeel was een bedrijf gevestigd die handelde in compressoren en airwash-systemen. De brand is ontstaan in het rechterdeel van de bedrijfshal, waarschijnlijk in het magazijn met boeken.

In dit verslag is zowel het brandverloop als de tactische brandbestrijding nader beschouwd en geanalyseerd. Er zijn zowel tijdens het brandverloop als in de fase van de brandbestrijding een aantal kantelmomenten voorgevallen waarbij een nieuwe fase werd ingegaan. Deze kantelmomenten vragen een herziening van de ingezette brandbestrijdingstactiek.

Uitdrukkelijk zijn alleen het brandverloop en de onderdelen van de tactiek en effectiviteit van de brandbestrijding onderzocht en niet de daadwerkelijke inzet van voertuigen (afleggen en opstellen e.d.). Dit zijn basistaken welke door de ingezette ploegen zelf kunnen worden geëvalueerd.

Gebouwenmerken

De buitenwerkse afmetingen van de bedrijfshal (totale hal) waarin beide bedrijven waren gevestigd bedroegen 66 m x 16 m x 9 m (l x b x h). Op basis van deze afmetingen bedroeg het grondoppervlak van elk bedrijf afzonderlijk ongeveer 525 m² en gezamenlijk 1.150 m². Tussen beide bedrijven was een brandwerende scheiding aanwezig bestond uit geïsoleerde sandwichpanelen, waarschijnlijk voorzien van een PIR-isolatieschuim. De buitengevel bestond uit zogenaamde sandwichpanelen. Deze panelen zijn opgebouwd uit een kern van kunststof isolatieschuim rondom afgewerkt met een 0,8 mm dikke stalen plaat. Ook de dakconstructie bestond uit sandwichpanelen. Heel vaak bestaan deze uit een geïsoleerde stalen dakconstructie met zogenaamde cannelure platen. Het gevaar van deze daken is dat – onverbrande – rookgassen door de cannelurekanalen over een (brand)scheiding verplaatst kunnen worden vanuit de ruimte waar de brand woedt naar naastgelegen ruimte. Meestal zijn de cannelures ter plaatse van een brandwerende scheiding opgevuld maar dit blijft een aandachtspunt. In dit geval speelde dit niet en werden er door de dakconstructie geen rookgassen verplaatst.

Eerste verkenning

Door de bemanning van de eerste autospuit is in de bedrijfshal een verkenning uitgevoerd. Verkend zijn de entree en de trapopgang naar boven. Ook is de deur naar het magazijn geopend. Na binnentreding was er in de entree nog een goed zicht en slechts een matige temperatuurverhoging. Tegen de achterwand was een kleine vuurhaard aanwezig. In het magazijn was het heet en dicht van de rook. Op basis van de eerste verkenning lijkt het meest waarschijnlijke scenario dat de brand is ontstaan in het magazijn tegen de binnenwand van de kantoren.

De brandontwikkeling in de bedrijfshal

Vuurbelasting en brandvermogen

In het magazijn van de uitgeverij waren de boeken in stellingen opgeslagen. Papier bestaat uit cellulose en heeft een verbrandingswaarde van ongeveer 17,5 MJ/kg. Uitgaande van 90 ton aan boeken bedroeg de variabele vuurbelasting (beschikbare energie) ongeveer 1.575.000 MJ. Omgerekend per vierkante meter bedraagt deze ongeveer 3.000 MJ/m². In vergelijking met een woning of kantoor waar de gemiddelde vuurbelasting 500 tot 600 MJ/m² bedraagt is deze 5 tot 6 keer zo hoog.

$$17,5 \text{ MJ/kg} \times 90.000 \text{ kg} = 1.575.000 \text{ MJ (MegaJoule)}$$

Het grondoppervlak van de bedrijfshal bedroeg 525 m². De gemiddelde vuurbelasting per vierkante meter bedraagt daardoor ongeveer:

$$1.575.000 \text{ MJ} / 525 \text{ m}^2 = 3.000 \text{ MJ/m}^2$$

Vaak wordt de vuurbelasting (de energie-inhoud van alle brandbare materialen) in een gebouw aangemerkt als maatgevende waarde voor het aanwezige (brandveiligheids)risico. De vuurbelasting in een ruimte of gebouw is echter uitsluitend bepalend voor de lengteduur van een brand en is niet van invloed op een succesvolle beheersing en blussing. De factor die wel voor de brandbestrijding maatgevend is, is het brandvermogen welke vrijgesteld wordt in een brandscenario. Wanneer bijvoorbeeld een hoge vuurbelasting (als gevolg van brandstofkenmerken) met de snelheid van een brandende kaars verbrandt dan is deze eenvoudig te beheersen en onder controle te brengen. Wanneer echter, wederom op basis van brandstofkenmerken, een brand binnen (zeer) korte tijd een grote vermogensgroei kan laten zien (omvang van een 'grote' brand) heeft dit direct gevolgen voor de bestrijdbaarheid, uitbreidingsmogelijkheden en vervolgschade.



Afbeelding 1 1:04 uur, rook wordt uit de bedrijfshal geperst (foto Joachim de Ruijter)

Meestal wordt het brandvermogen in een ruimte of gebouw bepaald door de (beperkte) toevoer van zuurstof door de gevelopeningen. De kwaliteit van de omhulling – is deze steenachtig of wordt de omhulling aangetast door de brand – bepaalt vervolgens hoelang deze ventilatiebeheerste brand in stand blijft.

Ook in de bedrijfshal in Harlingen speelde dit een rol. De omhulling van de loods was opgebouwd uit geïsoleerde sandwichpanelen met slechts een viertal kleine raamopeningen op de bovenverdieping van de kantoren in de rechter kopse gevelwand. De thermisch lichte constructie van de hal was niet in staat om de energie van de brand te absorberen. Dit betekende dat de ruimte relatief snel opwarmde en de door de brand vrijgestelde energie beschikbaar bleef om aanwezige vuurbelasting uit te laten gassen. De dichte omhulling remde de brandgroei vervolgens, omdat de in de hal aanwezige zuurstof opraakte. De aanvankelijk brandstofbeheerste brand in de hal ging daarbij over in een ventilatiebeheerste brand. Op foto's (**afbeelding 1**) en videobeelden is goed zichtbaar dat de rook uit de opwarmende bedrijfshal wordt geperst.



Afbeelding 2 1:14 uur, onverbrande gassen worden naar buiten geperst en verbranden aan de achterzijde in de buitenlucht na het forceren van openingen (foto Joachim de Ruijter)

Nadat de eerste eenheid van de brandweer ter plaatse gekomen was werden in de omhulling openingen gemaakt om 'zicht' op de brand te krijgen en eventueel de brand te kunnen bestrijden. **Afbeelding 2** laat de situatie aan de rechter- en achterzijde van de bedrijfshal zien ongeveer 10 minuten nadat aan de voorzijde de toegangsdeur geforceerd is en in de meest linkse overheaddeur een vierkante opening gezaagd is (zie ook **afbeelding 3**).

In **afbeelding 3** zijn de drie geforceerde openingen in de gevel zichtbaar waardoor lucht (zuurstof) naar binnen stroomt. Dit is een belangrijk kantelmoment in het brandverloop. Vanuit een ventilatiebeheerste fase ontwikkelt de brand zich wederom en neemt snel in vermogen toe. Er ontstaan vervolgens steeds meer openingen in wand- en dakconstructie van de verzwakkende dichte omhulling.



Afbeelding 3 1:20 uur, brand in ventilatiebeheerste fase, lucht stroomt door openingen naar binnen (YouTube)

Afbeelding 4 laat de voorzijde van de bedrijfshal zien waar de brand een uitslaand karakter krijgt. De brand in de bedrijfshal neemt nu snel in vermogen toe en moet kort daarop als verloren worden beschouwd. Voor de brandbestrijding betekent dit kantelmoment in het brandverloop dat er een nieuwe fase intreedt waarbij niet meer de brand in dit deel van de bedrijfshal moet worden bestreden maar prioriteit bij de belendingen of een brandscheiding (mits aanwezig) moet worden gelegd.



Afbeelding 4 1:25 uur, de brand krijgt vanaf dit moment een uitslaand karakter (foto Joachim de Ruijter)

Zonemodel OZone

Met behulp van het zonemodel OZone 2.2.6 is het brandverloop in de bedrijfshal na ontsteking geanalyseerd (in **bijlage 1** zijn de resultaten weergegeven). In principe waren er twee

brandscenario's in de bedrijfshal mogelijk. De eerste is het scenario waarbij een brand zich langzaam ontwikkelt maar door gebrek aan brandstof (er staat een object in de hal in brand) niet verder uit kan breiden. Het brandende object – met een beperkt brandvermogen – gebruikt de aanwezige zuurstof op en wordt daarna geremd in haar groei. In dit scenario kan de brand zich gedurende lange tijd ontwikkelen waarbij de rookgastemperatuur in de hal relatief 'beperkt' blijft.

Het tweede en meest waarschijnlijke brandscenario is dat de brand zich met een normale snelheid ontwikkelde waarna deze door gebrek aan zuurstof in een dooffase (ventilatiebeheerst) terecht kwam. Voor het tweede scenario is een simulatie in OZone uitgevoerd om deze te kunnen analyseren.

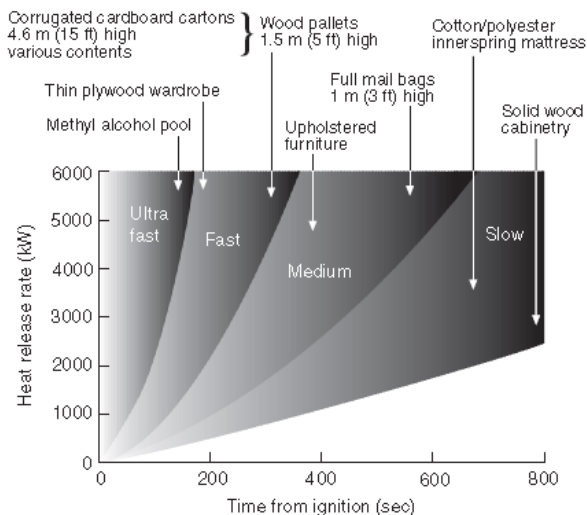


FIGURE 3.7.2 Set of t^2 -Squared Growth Curves

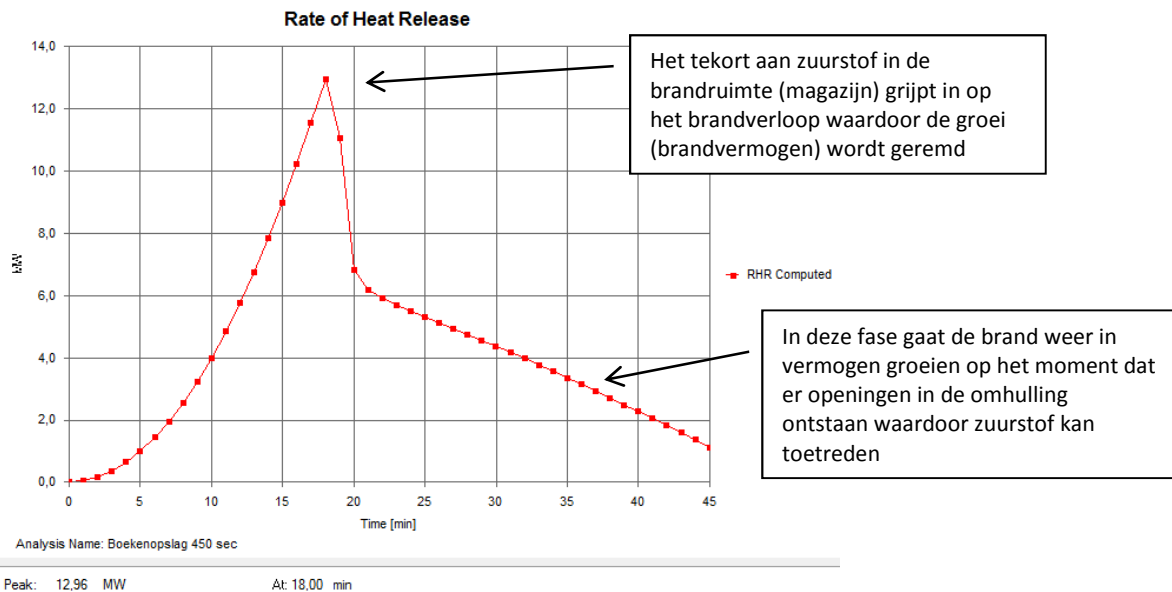
Afbeelding 5 t^2 -brandvermogen-groei (NFPA, Fire Protection Handbook)

Een cellulose brand van papier valt binnen de groeicurve 'medium' zoals deze in **afbeelding 5** is weergegeven. Met een kwadratische groei bereikt de brand na 300 sec een vermogen van 1 MW¹ enzovoort.

Omdat een gevel- en dakconstructie nooit helemaal luchtdicht is wordt een lekverlies van 0,33 % (4 m²) van het oppervlak van de omhulling verondersteld. Om de brand te onderhouden is na ontsteking alleen de zuurstof beschikbaar welke in de bedrijfshal aanwezig is en door de lekken in de omhulling naar binnen stroomt. In **afbeelding 6** is op basis van deze uitgangspunten het berekende brandvermogen weergegeven. Het maximale vermogen van 13 MW wordt 18 minuten na ontsteking bereikt. Dit vermogen komt overeen met ongeveer 'anderhalve' autobrand.

Na 18 minuten is de zuurstof in de ruimte opgebruikt en neemt het vermogen – afhankelijk van de lekverliezen in de omhulling van de bedrijfshal – af tot ongeveer 6 MW. Hoe dichter de hal is hoe lager het brandvermogen in deze fase is. Of en wanneer de gereduceerde ventilatiebeheerste brand weer in vermogen kan groeien is afhankelijk van de vraag of er in de omhulling openingen ontstaan, òf door verzwakking van de gevel- en dakconstructie en/of door ingrijpen van bijvoorbeeld de brandweer.

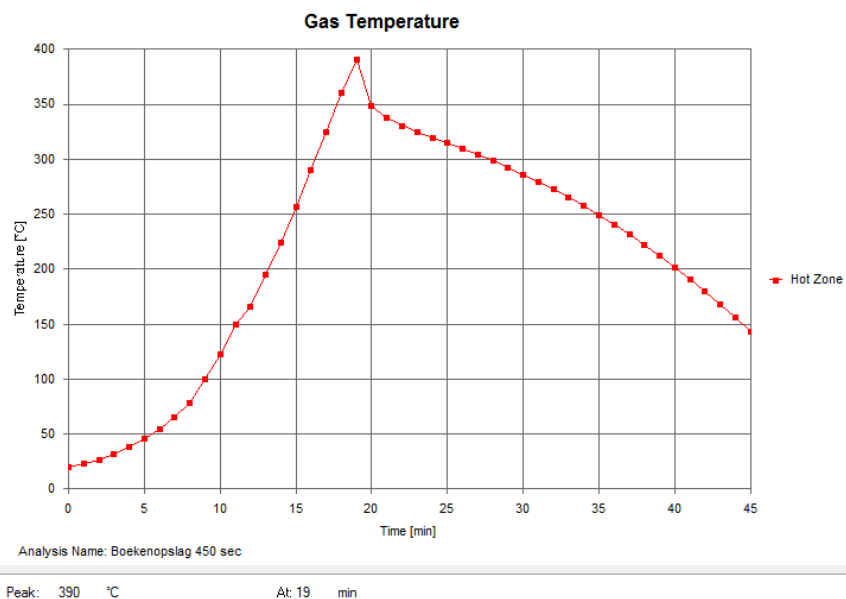
¹ Er zijn inmiddels sterke aanwijzingen dat bij de ontwikkeling van de brand vluchtige stoffen (benzine e.d.) betrokken waren. Dit vertaalt zich in een ultra snelle brandontwikkeling in de eerste groeifase van de brand. Deze aanwijzing versterkt de gedachte dat er sprake was van een ventilatiebeheerste brand, maar heeft geen gevolgen voor de hoeveelheid energie die in de besloten omhulling is vrijgekomen. Dit wordt namelijk begrensd door de beschikbare zuurstof.



Afbeelding 6 Vermogensgroei tot 13 MW met een groeicurve van $t = 300$ s

Op basis van het foto- en videomateriaal kan worden waargenomen dat de brand zich ontwikkelt nadat de brandweer zich toegang heeft verschaft tot het magazijn. Gelijktijdig kan ook worden waargenomen dat de omhulling van de bedrijfshal door de hitte van de brand verzwakt wordt en openingen gaat vertonen. Deze combinatie geeft de brand de gelegenheid zich verder te ontwikkelen. Nadat de brand door de gevel- en dakconstructie breekt loopt het totale brandvermogen in korte tijd op naar 500 tot 600 MW, een zeer forse brand. Een brand van deze omvang kan worden vergeleken met ongeveer 60 tot 80 volledig ontwikkelde autobranden.

Op basis van het berekende brandvermogen kan – in de ontwikkelingsfase na ontsteking – ook de gemiddelde rookgastemperatuur in de bedrijfshal worden berekend. Uit **afbeelding 7** kan worden afgeleid dat de gemiddelde rookgastemperatuur in het magazijn na 19 minuten bijna 400 °C bedraagt.



Afbeelding 7 Temperatuurverloop in het magazijn

In de daarop volgende fase loopt de temperatuur slechts langzaam terug als gevolg van de geïsoleerde omhulling. De interface (scheidslijn tussen de koude en warme zone) heeft nagenoeg de begane grondvloer bereikt wat betekent dat de hete rookgaslaag de brandstof – boeken in de stellingen van het magazijn – volledig omhult. Als gevolg van dit directe contact vindt er convectieve energieoverdracht plaats aan de boeken in de stellingen. Dit vertaalt zich in een hogere uitgassing van brandgassen (pyrolyse) uit de brandstof.

Met een piekvermogen van 13 MW (18 minuten na ontsteking) wordt 0,93 kg papier (boeken) per seconde vergast en verbrand. Opgemerkt wordt dat er aanwijzingen zijn gevonden dat een brandvermogen van 13 MW energie in een 'normaal' brandscenario bij voldoende zuurstof leidt tot flashover condities.

13 MW energie mag ook worden herschreven tot 13 MJ.s. In woorden er komt 13 Mega Joule energie per seconde vrij.

De verbrandingswaarde van papier (cellulose) bedraagt 17,5 MJ/kg

$$13 / 17,5 = 0,74 \text{ kg papier}$$

Per seconde wordt 0,74 kg papier verbrandt. De verbrandingsefficiëntie bedraagt ongeveer 80 % wat betekent dat er $0,74 / 0,8 = 0,93$ kg papier wordt omgezet in pyrolysegassen.

Met de aanwezige temperatuur en de directe overdracht van energie aan de brandstof (boeken) in het magazijn worden ook in de ventilatiebeheerste fase pyrolysegassen gevormd welke maar deels worden verbrand. Met een terugval van ongeveer 50 % (13 MW valt terug tot minder dan 6 MW) wordt er per seconde ongeveer 0,43 kg papier vergast tot pyrolyseproducten. Aangenomen mag worden dat de uitgassing met het dalen van de temperatuur in de brandruimte afneemt. Echter binnen 15 minuten na het ontstaan van de ventilatiebeheerste fase heeft zich ongeveer 310 kg pyrolysegas met een energie-inhoud van 5.400 MJ gevormd. In de bedrijfshal is echter geen zuurstof aanwezig om deze brandgassen te verbranden. Alleen wanneer deze onverbrande cellulose brandstof zich kan verplaatsen naar een naast gelegen ruimte waarbinnen nog voldoende zuurstof aanwezig is kan, na inmenging, een gevaarlijke situatie ontstaan. Binnen de ontstekingsgrenzen – of explosiegrenzen – van deze brandstof kan na ontsteking in deze ruimte een snelle verbranding plaatsvinden. Eventuele mogelijke gevaren zijn in dit rapport verder niet onderzocht. Daarnaast worden de onverbrande gassen door openingen naar buiten geperst waar deze na inmenging met zuurstof verbranden.

Met een piekvermogen van 1 MW welke na 18 minuten door gebrek aan zuurstof in een dooffase terechtkomt wordt 0,93 kg papier per seconde vergast. Uitgaande van een reductie van 50 % samen met een verdere reductie – als gevolg van een dalende temperatuur in de brandruimte – van 50 % na 15 minuten kunnen de volgende waarden worden berekend.

$$(15 \text{ min} \cdot 60 \text{ sec} = 900 \text{ sec})$$

$$0,46 \text{ kg/s} \cdot 900 \text{ s} \cdot 75 \% = 310 \text{ kg pyrolysegas.}$$

Met een verbrandingswaarde van 17,5 MJ/kg resulteert dit in:

$$310 \text{ kg} \cdot 17,5 \text{ MJ/kg} = 5.400 \text{ MJ potentiële energie.}$$

Tijdverloop opkomst brandweer versus brandverloop

Nu inzicht verkregen is in het waarschijnlijke brandverloop is een belangrijke vraag op welk moment de brandweer ter plaatse was en een aanvang maakte met de brandbestrijding. De brand werd gemeld op de alarmcentrale om 00.45 uur. 14 minuten na dit tijdstip was de eerste TS om 00.59 uur ter plaatse. Wanneer hierbij de tijd wordt opgeteld tussen het moment van ontsteking en ontdekking (± 10 minuten) komt op een totaal van tenminste 24 minuten. Maar het is goed mogelijk dat deze tijd langer is geweest. Hiermee is aangetoond dat de brand ventilatiebeheerst was op het moment dat de brandweer ter plaatse kwam en met de brandbestrijding een aanvang maakt.

Samengevat

De aanvankelijk brandstofbeheerste brand gaat op enig moment over in een ventilatiebeheerste brand waarbij onverbrande pyrolysegassen worden gevormd. Deze verzamelen zich in de hete rookgaslaag van het magazijn en verbranden gedeeltelijk daar waar zuurstof in kan mengen. Dit gebeurt deels in de brandruimte en deels langs de dakranden en overige openingen waar zichtbare vlammen zijn waargenomen.

De onverbrande pyrolysegassen vormen – door het gebrek aan zuurstof – niet direct een gevaar in het magazijn van de bedrijfshal. Dit verandert echter wanneer de gassen zich kunnen verplaatsen bijvoorbeeld door overdruk in een (naastgelegen) ruimte waar nog voldoende zuurstof aanwezig is. Na inmenging kan hier een potentieel gevaar ontstaan met de kans op een explosieve verbranding (rookgasexplosie of rollover²). De oplettende lezer zal opmerken dat in het magazijn – als gevolg van de instromende zuurstof door de geforceerde openingen – mogelijk een backdraft-achtige situatie ontstaat. Deze kans is echter niet groot door de aanwezige en zichtbare vuurhaard achter de overheaddeur waardoor de pyrolyse na inmenging direct verbrandt.

Nadat openingen in de omhulling van de bedrijfshal zijn gemaakt ontwikkelt de brand zich opnieuw mede door de vervorming en verbranding van de geïsoleerde panelen in de gevel- en dakconstructie. De brand komt dan terug in een brandstofbeheerste fase.



Afbeelding 8 1:26 uur, brand is uitslaand (foto Joachim de Ruijter)

² Rollover: ontsteking van verzamelde brandgassen in de rookgaslaag buiten de brandruimte.

De brandbestrijdingsfase

Inleiding

Eerder is beschreven dat het brandverloop verschillende fasen kende. De brand wordt aanvankelijk ventilatiebeheerst als gevolg van de dichte omhulling van de bedrijfshal maar groeit uiteindelijk uit tot een onbeheersbare brand met een vermogen van meer dan 500 MW. Daarnaast was de beschikbare primaire bluswatervoorziening eigenlijk niet toereikend om gelijktijdig meer dan één autospuit te kunnen voeden. Het opbouwen van een WTS 1000 om de slagkracht te vergroten kost de nodige tijd. Dit alles maakt dat in een dergelijke situatie keuzes gemaakt moeten worden om de brandbestrijding tactisch aan te pakken. Onderstaand wordt het verloop van de brandbestrijding geanalyseerd en vergeleken met het eerder beschreven brandverloop. Vervolgens wordt gemotiveerd waarom en hoe in een vergelijkbare situatie de brandbestrijding op een aantal punten anders kan worden aangepakt.

Randvoorwaarden effectieve brandbestrijding direct na aankomst brandweer

Na de eerste verkenning zijn er openingen in de omhulling van de bedrijfshal gemaakt, bedoeld om zicht op de brandhaard te krijgen en deze mogelijk te bestrijden. Het forceren van deze openingen in de dichte omhulling kan als een eerste kantelmoment in de brandbestrijding worden beschouwd. Vanaf dat moment wordt de ventilatiebeheerste brand opnieuw gevoed met zuurstof waardoor deze versnelt en wederom in omvang (vermogen) toeneemt. Gelijktijdig, en hierop volgend, verzwakken ook de gevel- en dakpanelen (het eerst aan de achterzijde) waardoor ook hier openingen ontstaan. Dit hele proces neemt enige tijd in beslag alvorens de brand volledig uitslaand wordt en een onbeheersbaar karakter krijgt. Gedurende deze fase lukt het niet om de brand in het magazijn onder controle te krijgen. Hierdoor ontstaat er een tweede kanteling in de brandbestrijdingsfase. Met het snel groeiende brandvermogen moet dan de vraag worden gesteld – of al eerder – of er voldoende slagkracht aanwezig is om een brand van deze omvang te kunnen blussen. Wanneer deze vraag met nee moet worden beantwoord kan de directe bestrijding van de brand gestaakt worden om een nieuwe grens – uitbreiding voorkomen – te bepalen. De slagkracht van één autospuit bij de bestrijding van een binnenbrand is ongeveer 16 MW³. Eerder is berekend dat het brandvermogen na ontsteking tot het moment waarop de brand ventilatiebeheerst wordt maximaal 13 MW bedraagt. Dit lijkt beheersbaar. Echter er moet dan wel aan een aantal randvoorwaarden worden voldaan om deze hoeveelheid energie te kunnen beheersen.

Deze randvoorwaarden zijn:

1. Bereikbaarheid van de brandhaard (om water op het vuur te krijgen) onderverdeeld in de volgende sub voorwaarden
 - a. openingen in de omhulling om toegang te verkrijgen;
 - b. voldoende worplengte van de stralen om op afstand (buiten het gebouw) water op de vuurhaard te kunnen brengen en/of;
 - c. een veilige binnentreding zonder de kans op een onverwachte branduitbreiding;
 - d. voldoende zichtlengte (vrij zicht of met behulp van de warmtebeeldcamera);
 - e. een omgevingstemperatuur en stralingsflux die zodanig laag is dat veilig kan worden binnengetroten (vooral nog verondersteld op < 100 °C respectievelijk < 5 kW/m²).⁴
2. Voldoende slagkracht (voldoende stralen en capaciteit).

Bereikbaarheid

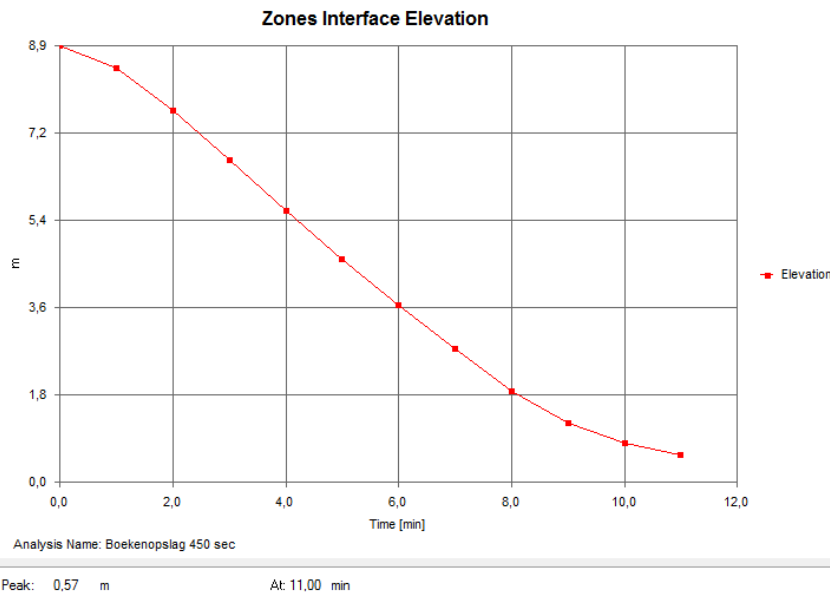
Aan voorwaarde a van de bereikbaarheid werd voldaan door het forceren van de toegangsdeur en het zagen van openingen in de overheaddeuren.

³ Bengtsson Lars-Göran (2001), *Enclosure fires*.

⁴ Zie de technische richtlijn 'TSI Veiligheid spoorwegtunnels' voor de randvoorwaarden voor het veilig optreden van brandweerpersoneel.

Aan voorwaarde b kon deels worden voldaan voor zover de brandhaard in de stellingen en op de verdieping bereikbaar was.

Van voorwaarde c kan op voorhand niet worden vastgesteld of hieraan wordt voldaan. De zuurstof in de brandruimte (magazijn) is opgebruikt zodat hier, direct na het forceren van de openingen in de omhulling, geen gevaar ontstaat. Wel stroomt vanaf dit moment zuurstof naar binnen waardoor na inmenging met de pyrolyse het gevaar toeneemt. Wanneer de pyrolyse als gevolg van overdruk in de brandruimte een naastgelegen ruimte (ook loze ruimten, bijvoorbeeld boven een systeemplafond (plenum) kunnen hiertoe worden gerekend) in kan stromen ontstaat er na inmenging met de aanwezige zuurstof wel een gevaarlijke situatie. Dit kan bij een onbekend gebouw nooit geheel worden uitgesloten, echter de kans erop is klein.



Afbeelding 9 Hoogte scheidslijn tussen de hete rookgaslaag en de koude zone

Voorwaarden d en e kunnen worden herleid uit de berekende uitvoerdata van OZone. In **afbeelding 9** is de hoogte van de scheidslijn tussen de hete rookgaslaag en de 'koude' zone opgenomen. De hoogte is na 11 minuten berekend op 0,5 m boven de vloer. Dit betekent dat de verontreiniging – roetdeeltjes e.d. – in de rookgaslaag de zichtlengte belemmeren. Uit **afbeelding 7** kan vervolgens het temperatuurverloop van de hete rookgaslaag worden afgeleid. Na 11 minuten is deze gestegen tot boven de 150 °C. Een omgevingstemperatuur welke hoger is dan 100 °C kan ook met beschermende brandweerkleding niet meer worden betreden. Omdat de rookgaslaag tot op minder dan 0,5 m boven de begane grondvloer is gezakt is de omgevingstemperatuur maatgevend en hoeft de stralingsflux niet meer te worden berekend.

Slagkracht

Slagkracht betekent niet meer en minder dan voldoende handstralen of een waterkanon waarmee voldoende water op de vuurhaard kan worden gebracht. One Seven schiet hierin tekort wanneer het brandvermogen te hoog is⁵.

Op basis van de bovenstaande randvoorwaarden kan worden geconcludeerd dat voldaan kon worden aan de voorwaarden a en b, dat voorwaarde c twijfelachtig is en dat aan voorwaarden d en e niet werd voldaan waardoor toetreding niet mogelijk was. De binnenbrand was daarom alleen veilig te bestrijden vanaf de buitenzijde van de bedrijfshal.

⁵ Zie de brand aan de Violenstraat te Hilversum d.d. 17 oktober 2011 waarbij het brandvermogen opliep tot ongeveer 8 MW.
http://www.youtube.com/watch?v=sdi1n7olqcQ&feature=player_embedded#!

Eerste fase brandbestrijding na het forceren van de openingen (eerste kantelmoment)

Wanneer een veilige binnentreding onmogelijk is om een binnenbrand te bestrijden dan ontstaan er twee mogelijkheden. De brand wordt òf met succes van buitenaf onder controle gebracht en geblust òf de brand groeit uit tot een onbeheersbare brand. De enige kans die de brandweer krijgt om een brand onder controle te brengen is dan ook aanwezig in de eerste fase van de brandbestrijding. De brand heeft dan nog een relatief beperkt brandvermogen en neemt – vanuit een ventilatiebeheerste fase – bij voldoende zuurstof en brandstof (weer snel) in vermogen toe. Na het forceren van de openingen in de omhulling moet alles er dan ook op gericht zijn de brandhaard te lokaliseren. Het is daarbij aan te bevelen om tijdens deze verkenningsfase – indien mogelijk – de openingen die niet gebruikt worden weer af te sluiten. Afhankelijk van de situatie en bevindingen kan en moet dan door de openingen worden ingezet met handstralen of een oscillerend waterkanon om brandstof onder de brandhaard te koelen. Kan de brandhaard niet gelokaliseerd worden of is het gebouw te groot waardoor de brandhaard buiten het bereik van de worplengte van de straal ligt dan ligt een succesvolle inzet niet voor de hand.

Blustactiek

Als gevolg van de straling – van de vlammen boven de brandstof – die voor een deel op het oppervlak van de brandstof valt gaat deze pyrolyseren en brandbare gassen vormen. Wanneer het lukt om de vorming van brandbare gassen af te remmen neemt de brand in omvang af (het brandvermogen wordt kleiner). De meest brute manier om dit te bewerkstelligen is door het oppervlak van de brandstof – onder de vlammen – af te koelen door er water op te spuiten. Wanneer een groot brandvermogen moet worden bestreden is dit de beste aanpak. Een tweede mogelijkheid is om de reactiezone van de vlammen af te koelen waardoor de verbranding stopt en als gevolg daarvan ook de straling – op het brandstofoppervlak – en daarmee de vorming van (voldoende) brandbare gassen. Dit is het principe van de flashover of 3D brandbestrijding zoals deze o.a. in Zweden wordt toegepast en uitgebreid beschreven is door Paul Grimwood⁶. De laatste methode past meer bij de fysieke binnenbrandbestrijding. Overigens spelen er meer factoren een rol maar het voert te ver om daar nu op in te gaan. Het hoofdprincipe is en blijft om de vorming van brandbare gassen af te remmen en te stoppen.

Het inzetten van handstralen aan de buitenzijde van het gebouw in deze (ventilatiebeheerste) fase van de brandbestrijding, om de vlammen uit de openingen te bestrijden, is dan ook zinloos. Als gevolg van de ventilatiebeheerste brandfase verbrandt er maar een deel van de vergaste brandstof in de brandruimte de overige hete onverbrande gassen worden door de openingen geperst waarna deze na inmenging met zuurstof alsnog verbranden. Dit heeft echter geen invloed meer op de brandontwikkeling in de brandruimte (de brandbare pyrolysegassen zijn dan al gevormd).

Bij de inleiding is het al kort aangestipt: de primaire bluswatervoorziening bij de bedrijfshal was net toereikend voor de voeding van één autospuit. Deze voldeed aan de '*Handleiding Bluswatervoorziening en bereikbaarheid*' van het NVBR. Deze schrijft voor dat op industrieterreinen, welke ingericht zijn na de inwerkingtreding van het Bouwbesluit 2003, er volstaan kan worden met een primaire bluswatervoorziening van 60 m³/uur. Dit past ook in de lijn die door de waterleidingbedrijven is uitgezet wat betekent dat tijdens een brand bewust met bluswater moet worden omgegaan indien dit nodig is om 'uitbreiding te voorkomen'.

In **afbeeldingen 10 t/m 15** zijn de eerste acties van de brandbestrijding weergegeven. Daarbij zijn de foto's in volgorde van het verloop gezet.

⁶ Onder andere in: Grimwood, Paul T., Hartin Ed, McDonough John, Raffel John (2005) *3D Firefighting, Training, Techniques and Tactics* en in Grimwood, Paul T., (2008) *Euro Firefighter, Global Firefighting Strategy and Tactics Command and Control – Firefighter Safety*. Zie ook www.firetactics.com waar door CEMAC (Crisis & Emergency Management Centre in België) onder andere *3D Fog-tactieken* vertaald is.



Afbeelding 10 Straal aan zijgevel



Afbeelding 11 Opening in overhaddeur



Afbeelding 12 Inzet eerste straal aan voorzijde



Afbeelding 13 Eerste vlammen boven de deur



Afbeelding 14 Groeiende brand, uitgassende panelen



Afbeelding 15 Bijna volledig uitslaand

Tweede fase brandbestrijding onbeheersbare brand (tweede kantelmoment)

Eerder is reeds aangegeven dat, wanneer de aanwezige slagkracht niet opgewassen is tegen het groeiende brandvermogen, de directe brandbestrijding kan worden gestaakt. Een lagedruk straal met een capaciteit van 250 l/min kan theoretisch ongeveer 12,5 MW energie absorberen. Dit moet echter worden gecorrigeerd met een efficiëntie coëfficiënt waardoor de werkelijke slagkracht in de praktijk aanzienlijk lager is.

In de overgangsfase van water naar stoom (bij 100 °C) wordt 2,26 MJ/kg energie door het water geabsorbeerd. In het gebied hierboven kan door water per graad Celsius nog eens 0,00201 MJ/kg energie geabsorbeerd worden. Dit betekent – met een temperatuur van de rookgaslaag van 400 °C – dat er per kg water theoretisch de navolgende hoeveelheid energie kan worden geabsorbeerd:

$$400 \cdot 0,00201 + 2,26 = 3,064 \text{ MJ}$$

De theoretische slagkracht van een LD-straal met een capaciteit van 250 ltr/min ($250 / 60 = 4,2$ ltr/s) bedraagt hierdoor:

$$3,064 \cdot 4,2 \approx 12,5 \text{ MJ ofwel } 12,5 \text{ MW brandvermogen.}$$

Met een brandvermogen dat in korte tijd uitgroeit tot enkele honderden megawatts vrijgestelde energie is de slagkracht van één of twee autospuiten volstrekt ontoereikend. De ‘absorptiecapaciteit’ van het water uit de straalpijpen is niet opgewassen tegen het enorme brandvermogen en verdampt binnen korte tijd zie (**afbeelding 16**). Daar komt nog bij dat de beschikbare primaire bluswatervoorziening slechts toereikend was om één autospuit te voeden. Dit tweede kantelmoment in de brandbestrijding is het moment waarop de inzetstrategie moet worden herzien. Elke liter water die dan nog op de brand wordt gebracht verlengt (onnodig) de brandduur en kan niet worden gebruikt om, met de ‘beperkte’ beschikbaarheid van bluswater, een nieuwe grens vanuit de gedachte ‘uitbreiding voorkomen’ te zekeren.



Afbeelding 16 Brand wordt uitslaand en onbeheersbaar (foto Joachim de Ruijter)

One Seven, toegepast om de brandende bedrijfshal 'in te pakken'

In de beginfase van de brandbestrijding, voordat de brand uitslaand werd, is de bedrijfshal aan de buitenzijde 'ingepakt' met One Seven blusschuim (afbeelding 17 en afbeelding 18). Op beide afbeeldingen is zichtbaar dat de aanhechting van het schuim matig is. Naast de matige aanhechting, waarvan de reden niet nader is onderzocht, volgt onderstaand een analyse van de effectiviteit van het blusschuim.



Afbeelding 17 'Inschuimen' zijgevel bedrijfsloods met One Seven (foto Joachim de Ruijter)



Afbeelding 18 'Inschuimen' voorzijde bedrijfshal met One Seven (foto Joachim de Ruijter)

In de brandruimte worden – tijdens de uitslaande brand – gemakkelijk temperaturen van 800 °C en meer bereikt. Tussen de vuurhaard in de brandruimte en het blusschuim bevindt zich het eerder beschreven geïsoleerde sandwichpaneel. Aan de brandzijde wordt het paneel opgewarmd waarna door geleiding energie door het paneel wordt gevoerd. Naarmate het PUR-schuim in de panelen verder verteerd wordt neemt de isolatiewaarde af en wordt er meer energie afgegeven aan de buitenzijde in casu aan het blusschuim.

Uit onderstaande berekening blijkt dat, bij een onaangestast paneel – het isolatieschuim blijft intact –, het meer dan 130 uur duurt voordat de hitte door het paneel heen gedrongen is. Wanneer echter het PUR-schuim in het paneel is verteerd dan dringt de hitte binnen enkele seconden door de dunne resterende metalen wand heen.

Onderstaand zijn twee berekeningen uitgevoerd om de benodigde tijd uit te rekenen voordat de warmte door de panelen is. De eerste is de situatie waarbij het paneel nog onbeschadigd is. In de berekening is het dunne staal aan weerszijden van het PUR-schuim weggelaten. Staal geleidt gemakkelijk warmte en heeft om die reden weinig tot geen invloed op de uitkomst van de berekening. De tweede berekening is uitgevoerd voor de situatie waarbij het PUR-schuim is weggebrand, zodat alleen de dunne metalen bekleding de scheiding vormt tussen de vuurhaard en het schuim op het paneel. In deze situatie is een enkele metalen plaat verondersteld.

1) Geïsoleerd sandwichpaneel nog intact:

$$t < \frac{\rho \cdot c}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{d}{2}}$$

$$t < \frac{35 \cdot 1470}{0,019} \cdot \sqrt{\frac{0,06}{2}}$$

$t < 470.000 \text{ sec} \approx$ meer dan 130 uur voordat de warmte door de panelen gedrongen is.

2) PUR-schuim weggebrand:

$$t < \frac{7850 \cdot 460}{45800} \cdot \sqrt{\frac{0,0008}{2}}$$

$t < 1,6 \text{ sec}$ met een vertraging van 2 seconden is de warmte door een enkelwandige metalen afwerking gedrongen.

Waarin:

t	= tijd	[sec]
ρ	= soortelijke massa	[kg/m ³]
c	= soortelijke warmte	[J/kg.K]
λ	= warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m.K]
d	= dikte stalen wand (0,8 mm)	[m]

Geconcludeerd kan worden, dat wanneer in een ideale situatie de panelen onbeschadigd blijven er geen redenen zijn om deze extra te ‘beschermen’ met een schuimlaag. De hitte in de brandruimte kan

lange tijd niet aan de buitenzijde worden waargenomen. Om dit te illustreren kan een proefje worden uitgevoerd met een gasbrander en een vergelijkbaar sandwichpaneel. Wanneer deze aan één zijde wordt verhit zal aan de andere zijde – ook niet na enige tijd – geen temperatuursverhoging merkbaar zijn.



1) Het duurt 130 uur voordat de hitte van de brand door het sandwichpaneel gedrongen is en het One Seven blusschuim heeft bereikt

2) In de fase waarin het isolatiemateriaal (PUR-schuim) door de brand verteerd is en alleen een dunne metalen wand de scheiding vormt dan duurt het slechts enkele seconden voordat de hitte door het metaal de buitenzijde van de gevel heeft bereikt

Afbeelding 19 Blusschuim tegen buitengevel (YouTube)

In de situatie waarbij het isolatiemateriaal echter wél verteerd en uitsluitend het dunne metaal resteert, wordt de hitte van de brand binnen een paar seconden door het metaal naar buiten toe geleid. Dit zal vervolgens door het blusschuim worden geabsorbeerd met als gevolg dat het water in het schuim verdampt.

Met een conservatieve temperatuur aanname van 700 tot 800 °C is berekend dat de stralingsflux van de dunne stalen wand – het PUR-schuim is weggebrand – ongeveer 40 tot 60 kW/m² bedraagt. Deze waarde komt overeen met de bronstraling welke in de ‘Leidraad beheersbaarheid van brand 2007’ wordt toegepast⁷.

De stralingsflux die als gevolg van de optredende temperatuur 700 tot 800 °C (973 K tot 1.073 K) van de brand optreedt op de buitenzijde van het sandwichpaneel, nadat het PUR-schuim door de brand is verteert, kan als volgt worden berekend⁸.

$$q'' = \phi \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

$$q'' = 1 \cdot 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-11} \cdot 973^4$$

of

$$q'' = 1 \cdot 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1073^4$$

$$q'' = 40 \text{ kW/m}^2$$

of

$$q'' = 60 \text{ kW/m}^2$$

Waarin:

q''	= stralingsflux in	[kW/m ²]
ϕ	= view of zichtfactor (is 1)	[-]
ϵ	= emissiecoëfficiënt (gesteld op 0,8)	[-]
σ	= constante van Stefan-Boltzmann $5,67 \cdot 10^{-11}$	[kW/m ² .K ⁴]
T	= absolute temperatuur	[K]

⁷ Oranjewoud SAVE, EFPC en V2PO Advies (2007), *Integrale leidraad Beheersbaarheid van Brand 2007*.

⁸ Quintiere, James G. (1998), *Principles of fire behaviour*.

Met de optredende stralingsflux kan vervolgens worden berekend hoeveel blusschuim (water) er verdampt binnen een bepaalde tijd. Wanneer er 1 cm schuim tegen de gevel aangeplakt zit bevat dit schuim 1,25 kg water (bij zogenaamd 'plak- of droogschuim' is dit nog minder). In de buitenschil van het schuim is het water opgesloten welke door de energieoverdracht en absorptie van energie binnen 47 tot 71 seconden verdampt is. De praktijk is echter dat de restanten van de sandwichpanelen dan al van de gevel zijn afgevallen.

Volumedeel water in One Seven

One Seven blusschuim bestaat uit een verhouding van 1 deel water op 7 delen lucht in een normale toepassing. Het zogenaamde 'plak- of droogschuim' welke bedoeld is voor het 'inpakken' van buitengevels bevat nog minder water. In de berekening wordt uitgegaan van de hierboven genoemde verhouding.

1 m³ blusschuim heeft een volume van 1.000 l waarvan 1/8 deel uit water bestaat.

$1.000 / 8 = 125$ l wat gelijk is aan 125 kg.

1 m³ blusschuim bevat dus 125 kg water.

1 m² blusschuim met een dikte van 1 cm tegen een buitengevel is gelijk aan 1/100 deel van 1.000 l. Dit betekent dat 1 cm blusschuim tegen een gevel 1/100 deel van 125 kg water bevat.

$125 / 100 = 1,25$ kg.

1 m² blusschuim met een dikte van 1 cm bevat dus 1,25 kg water.

Verdampingssnelheid One Seven

Eerder is berekend dat de stralingsflux van de gevel als gevolg van de brand 40 tot 60 kW/m² bedraagt. Deze energie wordt overgedragen aan het blusschuim welke op de gevel geplakt zit. Het water in het blusschuim absorbeert vervolgens deze energie door te verdampen. De benodigde hoeveelheid energie om 1 kg water te laten verdampen (heat of gasification) bedraagt 2.260 kJ/kg (of 2,26 MJ/kg).

1 m² schuim op de gevel bevat 1,25 kg water. Om dit te laten verdampen is $1,25 \cdot 2.260 = 2.825$ kJ energie benodigd.

Ook is berekend dat de stralingsflux 40 tot 60 kW/m² bedraagt. Dit kan worden herschreven in 40 tot 60 kJ/m² per seconde.

Met een energieaanvoer vanuit de brand van 60 kJ/m² per seconde is het water in het blusschuim in 47 seconden verdampt.

Een energiestroom van 40 kJ/m².s resulteert in: $2.825 \text{ kJ/m}^2 / 40 \text{ kJ/m}^2.\text{s} = 71 \text{ s}$

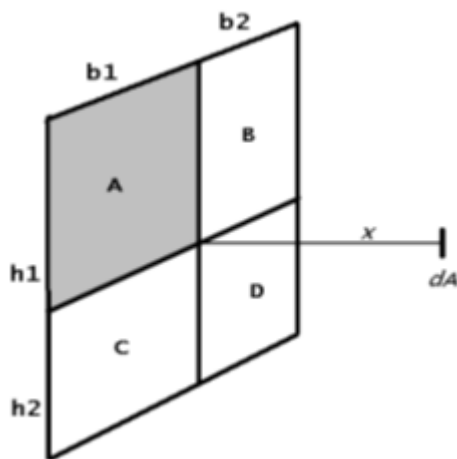
Een energiestroom van 60 kJ/m².s resulteert in: $2.825 \text{ kJ/m}^2 / 60 \text{ kJ/m}^2.\text{s} = 47 \text{ s}$

Uiteraard kan daarbij de vraag rijzen wat de invloed is van de in de schuimbellen opgesloten lucht. Lucht is een uitstekende warmte-isolator of beter gezegd een slechte warmtegeleider. Echter alleen wanneer lucht is opgesloten in een omhulling die in stand blijft, zoals bijvoorbeeld in een isolatiemateriaal, dan draagt lucht bij aan de isolatiewaarde. Wanneer de omhulling – water in dit geval –

verdampt, dan 'ontsnapt' de lucht en daarmee een eventuele isolerende werking. Daarnaast is de warmtecapaciteit (soortelijke warmte) van lucht niet erg hoog. Per graad temperatuurverschil kan lucht – bij een omgevingstemperatuur van 20 °C – ongeveer 1,1 kJ/kg energie opnemen (lucht weegt ongeveer 1,2 kg per m³). De absorptiecapaciteit van water is vele malen hoger. Alleen al in de overgangsfase van water naar stoom absorbeert water de eerder genoemde 2.260 kJ/kg. Dit is ruim tweeduizend keer zoveel in vergelijking met lucht.

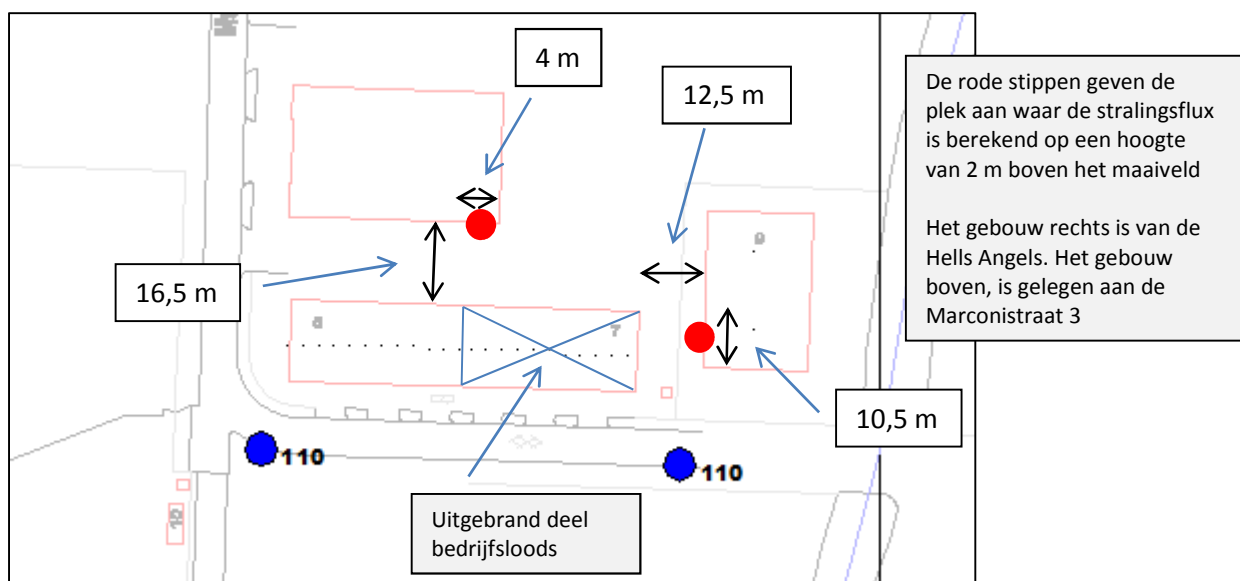
Bescherming van belendende gebouwen

Nu onderzocht is wat het effect is met betrekking tot het 'inpakken' van de bedrijfshal met blusschuim kan relatief eenvoudig ook het effect worden onderzocht voor toepassing als bescherming voor gebouwen. Daartoe moet worden berekend wat de stralingsflux op de gevel of het dak van het belendende gebouw is.



Afbeelding 20 Stralingsvlak van 4 kwadranten, sommatie geeft de totale zichtfactor op punt dA

Door de brand in het gebouw te schematiseren als een stralend vlak is eenvoudig te berekenen wat de straling op afstand x op een punt (dA) is. In **afbeelding 20** is dit schematisch weergegeven. Door de zichtfactor van alle vier kwadranten (A, B, C en D) afzonderlijk te berekenen en vervolgens bij elkaar op te tellen kan op elke plek parallel aan het stralend vlak de stralingsflux worden berekend.



Afbeelding 21 Situatie 'fireground' Marconistraat Harlingen

In **afbeelding 21** zijn de beide punten weergegeven van de plekken waar de warmteflux is berekend op een hoogte van 2 m boven het maaiveld. De stralingsflux op de gevel van het gebouw van de Hells Angels (Marconistraat 9) bedraagt 6,5 kW/m². De warmtestraling op de gevel van de bedrijfshal achter de uitgebrande hal (Marconistraat 3) is berekend op 4,7 kW/m².

De berekeningsmethode is ontleend aan de PGS 2 en wordt ook gebruikt in de 'Integrale leidraad Beheersbaarheid van Brand 2007'. Onderstaand zijn de rekenresultaten uit de Excelsheet weergegeven.

Marconistraat 9 (Hells Angels)

Geometrische gegevens

afstand x van stralend vlak tot punt dA =		12,50	m	
hoogte	h1 =	5,00	m	h1/x = 0,4000
	h2 =	2,00	m	h2/x = 0,1600
breedte	b1 =	5,25	m	b1/x = 0,4200
	b2 =	10,75	m	b2/x = 0,8600

zichtfactoren

F(A) =	0,044	F(C) =	0,019
F(B) =	0,070	F(D) =	0,030

Resultaat

Zichtfactor (f)	0,163
-----------------	-------

Warmtestraling

Met een stralingsflux van 45 kW/m² van de vlammen uit het bedrijfspand (eerder berekend) volgt:
40 . 0.163 = 6,52 kW/m²

Marconistraat 3 (Achterliggende bedrijfshal)

Geometrische gegevens

afstand x van stralend vlak tot punt dA =		16,50	m	
hoogte	h1 =	5,00	m	h1/x = 0,3030
	h2 =	2,00	m	h2/x = 0,1212
breedte	b1 =	2,00	m	b1/x = 0,1212
	b2 =	64,00	m	b2/x = 3,8788

zichtfactoren

F(A) =	0,011	F(C) =	0,005
F(B) =	0,072	F(D) =	0,030

Resultaat

Zichtfactor (f)	0,117
-----------------	-------

Warmtestraling

Met een stralingsflux van 40 kW/m² van de vlammen uit het bedrijfspand (eerder berekend) volgt:
40 . 0,117 = 4,68 kW/m²

Tijdens de brand is schade ontstaan aan het achterliggende bedrijfsgebouw, gelegen aan Marconistraat 3 te Harlingen. Naast de polycarbonaatbeglazing in de overheaddeur van de bedrijfshal welke deels is uitgezakt, is ook de buitenste glasplaat van de dubbele beglazing in de raamkozijnen door de hitte gescheurd. In **afbeelding 22** is de schade van de beglazing in de overheaddeur zichtbaar. Opgemerkt wordt dat met uitzondering van de beglazing er verder geen schade – ook geen verfschade – aan het bedrijfsgebouw is ontstaan. Dit geldt ook voor het gebouw van de Hells Angels.

De benodigde temperatuur om polycarbonaat te kunnen spuitgieten (extruderen) varieert van 240 tot 280 °C. Dit betekent dat de temperatuur van de kunststofbeglazing net onder deze waarde gebleven is, waardoor het alleen is uitgezakt en bol is gaan staan.



Afbeelding 22 **Uitgezakte beglazing (polycarbonaat) in overheaddeur**

Met de benodigde temperatuur om polycarbonaat te vervormen (240 °C) is teruggerekend of de eerder berekende stralingsflux van de brand (40 tot 60 kW/m²) overeenkomt met het opgetreden schadebeeld. Uit de berekening blijkt dat de benodigde stralingsflux om de schade te veroorzaken tenminste 4,4 kW/m² moet bedragen. Eerder is berekend dat de stralingsflux op punt dA van deze gevel 4,7 kW/m² bedroeg.

Door zowel de temperatuur van de geschematiseerde bronstraling (de brand in de bedrijfshal) als wel de temperatuur waarbij de polycarbonaatbeglazing in de overheaddeur vervormt in onderstaande formule te voeren, kan de bijbehorende stralingsflux worden berekend.

$$q'' = \phi \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_0^4)$$

$$q'' = 0,117 \cdot 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-11} \cdot (973^4 - 513^4)$$

$$q'' = 4,39 \text{ kW/m}^2 \quad \approx \quad \mathbf{4,4 \text{ kW/m}^2}$$

Waarin:

q''	= stralingsflux in	[kW/m ²]
ϕ	= view of zichtfactor (0,117, zie voorgaande berekening)	[-]
ϵ	= emissiecoëfficiënt (gesteld op 0,8)	[-]
σ	= constante van Stefan-Boltzmann $5,67 \cdot 10^{-11}$	[kW/m ² .K ⁴]
T_1	= absolute temperatuur (brand 700 °C = 973 K)	[K]
T_0	= absolute temperatuur (polycarbonaat 240 °C = 513 K)	[K]

In Nederland is vastgelegd dat de stralingsflux op de gevel van een naastgelegen gebouw in beginsel gedurende een uur niet meer dan 15 kW/m² mag bedragen. Binnen deze periode wordt er geen brandoverslag verondersteld. In enkele van de ons omringende landen mag deze waarde niet groter zijn dan 12,5 kW/m². Deze laatste waarde is gebaseerd op hout dat bij deze stralingsflux ontleedt, vergast en met behulp van een ontstekingsbron (vlam of vonk) ontsteekt⁹. Voor de spontane ontsteking van hout – zonder ontstekingsbron – is een stralingsflux van meer dan 20 kW/m² benodigd. Bouwplannen worden op dit punt gecontroleerd waarbij in het geval van een hogere stralingsflux moet worden voorzien in een aangetoonde brandwerendheid in de gevel.

One Seven, toegepast om belendingen te beschermen

Eerder is berekend hoe groot de stralingsflux was op de gevels van de naastliggende gebouwen. Onderstaand zijn voor verschillende stralingsfluxen – binnen een bandbreedte van 5 tot 20 kW/m² – berekeningen gemaakt om de benodigde tijd te bepalen waarbinnen het water in het blusschuim is verdampt. Als basis is wederom 1 cm schuim op de gevel verondersteld. Of deze waarde in de praktijk ook wordt behaald is sterk afhankelijk van de ondergrond. Een gladde ondergrond maakt dat de aanhechting van het schuim slecht is waardoor het van de gevel afloopt (zie ook de foto's eerder in deze rapportage). Daarnaast moet worden bedacht dat 'plak schuim, wat beter hecht, minder verkoelend water bevat welke benodigd is om de gevel te beschermen.

1 m² schuim op de gevel bevat 1,25 kg water. Om dit te laten verdampen is $1,25 \cdot 2260 = 2825$ kJ energie benodigd.

De navolgende stralingsfluxen zijn berekend:

20 kW/m ² , is gelijk aan 20 kJ/m ² .s	$2.825 \text{ kJ/m}^2 / 20 \text{ kJ/m}^2.\text{s}$	= 141 s	(2,3 min)
15 kW/m ² , is gelijk aan 15 kJ/m ² .s	$2.825 \text{ kJ/m}^2 / 15 \text{ kJ/m}^2.\text{s}$	= 188 s	(3,1 min)
12,5 kW/m ² , is gelijk aan 12,5 kJ/m ² .s	$2.825 \text{ kJ/m}^2 / 12,5 \text{ kJ/m}^2.\text{s}$	= 226 s	(3,8 min)
10 kW/m ² , is gelijk aan 10 kJ/m ² .s	$2.825 \text{ kJ/m}^2 / 10 \text{ kJ/m}^2.\text{s}$	= 283 s	(4,7 min)
7,5 kW/m ² , is gelijk aan 7,5 kJ/m ² .s	$2.825 \text{ kJ/m}^2 / 7,5 \text{ kJ/m}^2.\text{s}$	= 377 s	(6,3 min)
5 kW/m ² , is gelijk aan 5 kJ/m ² .s	$2.825 \text{ kJ/m}^2 / 5 \text{ kJ/m}^2.\text{s}$	= 565 s	(9,4 min)

Omdat brandoverslag pas een rol speelt bij een stralingsflux die groter is dan 10 kW/m² zijn vooral de berekende tijden boven deze waarde van belang. In tabel 1 zijn de berekende waarden samengevat en hieruit kan worden afgeleid dat de verdampingstijd van het water in het blusschuim kleiner dan 5 minuten is.

⁹ Drysdale, Dougal (2011), *An Introduction to Fire Dynamics, third edition*

Tabel 1 Verdampingstijd blusschuim op gevel

Stralingsflux op gevel [kW/m ²]	Benodigde tijd om te verdampen in [sec]
20	141
15	188
12,5	226
10	283
7,5	377
5	565

Onderlinge vergelijking koeling met water of One Seven

Alvorens het gebruik van One Seven in deze toepassing te kunnen vergelijken met de gebruikelijke tactiek om met één of meer handstralen, een waterscherm of waterkanon een gevel te beschermen tegen brandoverslag, moet eerst inzicht worden verkregen in het effect hiervan. Dit kan met behulp van een theoretische benadering, maar ook door het raadplegen van de les- en leerstof van het NIBRA (tegenwoordig het Nifv). Ten aanzien van de lesboeken moet worden geconcludeerd dat er met betrekking tot dit onderwerp verbazend weinig informatie¹⁰ te vinden is – of beter, helemaal niets – wat overigens ook geldt voor het blussen van een brand. In één van mijn OvD-handboeken vond ik uiteindelijk een waarde van 2 tot 6 l/min/m², benodigd om uitbreiding te voorkomen. Een lagedruk handstraal (geen anderhalf duims) levert circa 250 l/min. Dit betekent dat er maximaal 42 tot 125 m² gevel beschermd kan worden. Dit sluit ook ongeveer aan bij de vuistregel uit de compagniestructuur dat een standaard tankautospuit¹¹ 50 m vuurfront moet kunnen beheersen.

Wanneer dit probleem theoretisch benaderd wordt kan worden berekend welke hoeveelheid water, gelijkmatig verdeeld over het te beschermen geveloppervlak, benodigd is om een gevel af te koelen tot tenminste 100 °C. Wanneer al het water, dat tegen de te beschermen gevel wordt gebracht, vrijwel meteen weer verdampt (een balans tussen opbrengen en verdamping). Dan wordt de gevel beschermt tegen een temperatuur welke hoger is dan 100 °C, het kookpunt van water. Elke druppel water die van de gevel afloopt en niet verdampt is boet dan in op het rendement.

In de overgangsfase van water naar stoom (bij 100 °C) wordt 2,26 MJ/kg (2.260 kJ/kg) energie door het water geabsorbeerd. Omwille van de eenvoud wordt het gebied boven de 100 °C buiten beschouwing gelaten.

Een stralingsflux van 15 kW/m² (15 kJ/m²) kan worden geabsorbeerd door: $2260 / 15 = 150$

Uit de uitkomst kan worden vertaald dat 1/150 deel van 1 kg of liter water dat per seconde op één vierkante meter gevel wordt gebracht in staat is de oppervlaktetemperatuur op 100 °C te houden.

1 / 150 deel van 1 kg water is 0,0067 kg/m² water. Omgerekend per minuut geeft dit:

$0,0067 \cdot 60 = 0,4$ l/min/m² (per minuut is 0,4 l water per vierkante meter benodigd)

Uit bovenstaande berekening blijkt dat bij een stralingsflux van 15 kW/m² het theoretisch voldoende is om per seconde 0,4 l/s/m² (0,4 liter per vierkante meter per seconde) op de gevel te brengen om deze afdoende, tot een temperatuur van 100 °C, af te kunnen koelen. Dit is ongeveer 1/5 deel van de

¹⁰ Geraadpleegd zijn de lesboeken van het niveau onderbrandmeester de delen 'Repressie, 'Verbranding en blussing' en 'Materieel'.

¹¹ Tankautospuit met één aanvalskorf.

minimaal benodigde capaciteit (2 l/m^2 per minuut) uit het eerder genoemde handboek van de Ovd. Het zal logisch zijn dat bij een hogere stralingsflux of direct vlamcontact een hogere opbrengst benodigd is.

Het zal geen verrassing zijn, maar de berekende uitkomst is exact gelijk aan die van One Seven. Bij een stralingsflux van 15 kW/m^2 is berekend dat met de toepassing van One Seven in 188 seconden 1,25 liter water in het schuim verdampt. Bij gebruik van bluswater kan de volgende uitkomst worden gevonden: $0,0067 \text{ kg/m}^2 \times 188 \text{ seconden} = 1,25 \text{ liter water}$. In exact dezelfde tijd is evenveel water benodigd om de gevel te beschermen.

Natuurlijk is dit niet de praktijk, alleen in de ideale wereld is dit haalbaar. Bij beide systemen is er sprake van (rendements)verlies. Bijvoorbeeld bij het gebruik van bluswater is een minimum hoeveelheid water en druk benodigd om voldoende worplengte te krijgen. Een gedeelte zal daarom ook van de gevel afvloeien en geen functie vervullen anders dan de gevel verder – tot onder de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ – af te koelen. Feitelijk wordt het rendement bepaald door diegene die aan de straalpijp staat. Door met kennis bewust gebruik te maken van de mogelijkheden (dosering en op de juiste plaats(en) water opbrengen met behulp van een handstraal (HD of LD) kan een gevel zeer effectief worden beschermd.

Ook de toepassing One Seven geeft verlies met het opbrengen van het schuim tegen de gevel. **Afbeelding 23** laat zien dat als gevolg van de enorme kracht van de straal een deel van het schuim wegspat en op de grond valt. Ook zal het schuim wat tegen een glad geveloppervlak is opgebracht uitzakken als gevolg van een matige aanhechting. Mogelijk heeft droog schuim in die toepassing meer hechtkracht, maar dit bevat weer minder water dat noodzakelijk is voor het koelen van de gevel. Tot slot kost het de nodige tijd om een te beschermen gevel volledig te 'schilderen', (laagsgewijs aanbrengen) wat – bij een grote hittebelasting – herhaald zal moeten worden en bij onvoldoende zichtlengte door rook niet mee zal vallen.



Afbeelding 23 Schuimverlies One Seven (foto 112-Fryslan)

Onderzoek Efectis

In opdracht van brandweer Eindhoven en de Regionale brandweer Zuidoost Brabant is in 2008 een vergelijkend onderzoek uitgevoerd naar verschillende druklucht schuimsystemen¹². Dit onderzoek is uitgevoerd door Efectis. In het rapport zijn drie druklucht schuimsystemen onderzocht waarbij in overleg met brandweer Eindhoven een vijftal te onderzoeken brandscenario's zijn vastgesteld waaronder een in te schuimen object. In **bijlage 1** is door de schrijver van deze rapportage een analyse van het onderzoek van Efectis te lezen. Hieruit blijkt overduidelijk dat een 'nat' blusschuim een groter effect heeft op het snel afkoelen van het te beschermen oppervlak.

¹² Efectis Nederland BV (juli 2008), *Vergelijkend onderzoek druklucht schuimsystemen*.

Waterscherm

Specifiek wordt kort ingezoomd op het gebruik van een waterscherm. Een waterscherm is een grootverbruiker van water met een beperkt bereik die nagenoeg de volledige capaciteit van een TS gebruikt. Wanneer het water – in een situatie waarbij brandoverslag gevaar aanwezig is – niet op de te beschermen gevel terecht komt is het minder effectief. De hittestraling van de brand wordt in dat geval slechts deels geabsorbeerd. Het effect en rendement is het grootst wanneer het water op de te beschermen gevel terecht komt.

Samengevat

Alles overwegende kan worden geconcludeerd dat de toegevoegde waarde van blusschuim in deze specifieke toepassing niet aangetoond is. Theoretisch is er geen verschil tussen beide toepassingen. In beide systemen vormt water de basis waardoor een gevel wordt gekoeld. Water onttrekt – door verdamping – energie aan de hittestraling van de brand waardoor de temperatuur van de ondergrond voldoende laag blijft om te kunnen ontgassen en ontbranden. Uit de – beperkte – test van Efectis kan eveneens worden geconcludeerd dat met een waterig blusschuim het oppervlak sneller afkoelt in vergelijking met een droog schuim. Ook speelt de ondergrond een rol in de aanhechting – en daarmee de standtijd – van het schuim. Op foto's in deze rapportage is zichtbaar dat het schuim binnen korte tijd van de gevel zakt en volledig haar werking verliest. Een 'droogschuim' hecht waarschijnlijk beter aan de gevel, maar bevat weer minder water waarmee dit mogelijke voordeel dan weer wegvalt. Tot slot kost het opbrengen en daarna het in stand houden van de schuimlaag de nodige tijd en concentratie door de laagsgewijze opbouw bij het aanbrengen ervan (zie ook **afbeelding 23**). Het ontbreken van zichtlengte kan de uitvoering hiervan beïnvloeden en onmogelijk maken.

Ook water heeft nadelen. Het loopt gemakkelijk van de gevel af, wat nadelig is ten aanzien van het rendement. Het opbrengen daarentegen is minder kritisch omdat water zich gemakkelijk over de gevel verspreidt. Het rendement hangt vooral af van diegene die de straalpijp bedient. Wanneer, vanuit een achtergrond met kennis, bewust en gedoseerd de straalpijp wordt gehanteerd kan zeer effectief een gevel of ander oppervlak worden beschermd. Het is veelal niet eens nodig om de straal continue te gebruiken.

Conclusies en aanbevelingen

In dit rapport is zowel het brandverloop als de hierop volgende brandbestrijding geanalyseerd en beschreven. Daarbij kende zowel het brandverloop als de brandbestrijding een kantelmoment welke een nieuwe fase inleidde. Omdat herkenning van deze fases bijdraagt aan de veiligheid en een efficiënt en professioneel brandweeroptreden zijn deze aan het papier toevertrouwd.

Uitdrukkelijk is alleen het brandverloop en de tactiek en effectiviteit van de brandbestrijding onderzocht en niet de daadwerkelijke inzet van voertuigen (afleggen en opstellen e.d.). Dit zijn basistaken welke zelf door de ingezette ploegen kunnen worden geëvalueerd.

Conclusies

- Na een aanvankelijk brandstofbeheerst verloop van de brand, ontstaat er als gevolg van de dichte omhulling van de bedrijfshal een ventilatiebeheerste fase.
- Niet kan worden uitgesloten, gelet op het bereikte brandvermogen en de rookgastemperatuur in de bedrijfshal, dat er onverbrande gassen in de bedrijfshal zijn verzameld als gevolg van het blijvend pyrolyseren van het aanwezige papier. In de brandruimte zelf vormden de onverbrande gassen niet een onmiddellijk gevaar omdat voor (een plotselinge) verbranding de benodigde zuurstof in de ruimte ontbrak. In een naastgelegen ruimte kon echter wel gevaar ontstaan wanneer deze onverbrande gassen door openingen in de wand- of plafondconstructie naar binnen stromen en vervolgens inmengen met de aanwezige lucht (zuurstof). Dit vergt echter meer onderzoek.
- Er ontstaat (versneld) een kantelmoment in het brandverloop op het moment dat de brandweer toegangsopeningen maakt om zicht op de brand te krijgen. De brand ontwikkelt zich vanaf dat moment opnieuw, tot een uitslaande brandstofbeheerste brand.
- Er kan, direct na de eerste verkenning en het forceren van meerdere openingen, meer slagkracht in stelling worden gebracht bedoeld om een ultieme poging te kunnen ondernemen de brand onder controle te krijgen.
- Op het moment dat een brand uitgroeit tot een onbeheersbare brand welke, met de op dat moment beschikbare middelen, niet meer onder controle gebracht kan worden hoeft deze niet meer bestreden te worden. Er moet dan een nieuwe grens worden bepaald vanuit de gedachte 'uitbreiding voorkomen'. Het vergt moed en overtuigingskracht om een dergelijk besluit te durven nemen, maar wanneer er slechts beperkt bluswater beschikbaar is moet deze keuze worden gemaakt. Met de huidige inrichting van industrieterreinen, het beleid van de waterleidingbedrijven en de *'Handleiding Bluswatervoorziening en bereikbaarheid'* van het NVBR is er steeds vaker een 'beperkte' primaire bluswatervoorziening beschikbaar.
- Het gebruik van One Seven blusschuim heeft geen meerwaarde wanneer het gebruikt wordt om een gebouw 'in te pakken'. Het verlengt de 'levensduur' van de gevel- en/of dakconstructie op geen enkele wijze. Een geïsoleerd sandwichpaneel laat geen hitte door zolang het PUR-schuim in de kern door de brand niet verteerd is. In de situatie waarbij het PUR-schuim wel door de brand verteerd is en alleen een dunne metalen schil resteert, verdampt het blusschuim binnen korte tijd (berekend op anderhalve minuut), mits deze beplating dan nog aan de gevel hangt.
- In de toepassing om belendingen te beschermen tegen brandoverslag is er theoretisch geen verschil in de toepassing van One Seven of het gebruik van een reguliere handstraal met water. Het te behalen effect (rendement) met water hangt vooral af van een bewuste toepassing (dossering en juiste plaats), vanuit een achtergrond van kennis en kunde door de straalpijpvoerder. Wel zou aanvullend onderzoek (praktijktesten) meer inzicht kunnen geven in het verschil tussen deze beide methoden.

Aanbevelingen

- In oefeningen aandacht schenken aan het fenomeen òf een brand in een brandstofbeheerste fase òf in een ventilatiebeheerste fase verkeert, samen met bijbehorende kansen en gevaren.
- Geef in oefeningen expliciet aandacht aan de basisprincipes van het verbrandingsproces gekoppeld aan brandbestrijdingstactieken zodat er (bewust) inzicht ontstaat in het effect van het gekozen brandbestrijdingsmiddel.
- Schenk in oefeningen – met name bij grote industriepanden – aandacht aan het kantel-moment waarbij een lokale brand overgaat in een onbeheersbare brand, waarbij de op dat moment beschikbare middelen ontoereikend zijn om de brand onder controle te krijgen¹³. Een actieve, directe, inzet op de brandhaard draagt dan niet meer bij aan het onder controle krijgen van de brand en moet stoppen in die situatie wanneer er een beperkte bluswatervoor-ziening is. Vanuit de gedachte ‘uitbreiding voorkomen’ moet dan een nieuwe grens bepaald worden waarop wordt ingezet. Dit kan een brandscheiding zijn maar ook het actief beschermen van belendingen indien deze gevaar lopen¹⁴. Deze strategie beperkt ook de brandduur van de brandstof in de brandruimte en draagt bij aan een professionele aanpak van bewust en effectief handelen.
- Overweeg om voldoende slagkracht – handstralen en/of een oscillerend waterkanon – in gereedheid te brengen zodra het beeld groeit dat er in de brandruimte een forse hitte met bijbehorende vuurhaard aanwezig is om deze door de (geforceerde) openingen in de omhulling in te kunnen zetten. Stem daarbij de slagkracht af op het vermoedde brandvermogen in de brandruimte. Vaak wordt standaardprocedure gevolgd waarbij een HD, of tegenwoordig One Seven, wordt uitgelegd. Deze beide schieten tekort wanneer het brandvermogen groter is dan een ‘standaardbrandje’.
- Probeer, in een vergelijkbare situatie, wanneer uit de verkenning blijkt dat er mogelijkheden zijn voor een buitenaanval, de geforceerde openingen niet langer open te houden dan noodzakelijk totdat er voldoende slagkracht is opgesteld.
- Stop met de toepassing om een buitengevel van een industriepand preventief ‘in te pakken’ met een blusschuim zoals One Seven o.i.d. Er is geen aangetoonde meerwaarde in het beschermen van het brandende gebouw of de belendingen.
- Er lijkt geen voordeel te zijn in het gebruik van One Seven om brandoverslag naar een belendend gebouw te voorkomen. Het koelend vermogen van water is hoger (zie ook het onderzoek van Efectis) in vergelijking met blusschuim. Wanneer een straalpijpvoerder vanuit een achtergrond met kennis, bewust en gedoseerd een straalpijp (HD of LD anderhalf- of tweeduims) hanteert kan (zeer) effectief een gevel of ander oppervlak tegen brandoverslag worden beschermd.

Stiens, 11 mei 2012

ing. J.J. Crossen GIFireE

¹³ Hieraan toevoegend dat er een relatie moet zijn tussen de aanwezige vuurlast en de verwachte brandomvang, of er moet sprake zijn van het fenomeen ‘gebouw in brand’ in plaats van ‘brand in een gebouw’.

¹⁴ Dit kan ook zijn: het letterlijk 180 graden draaien van de straalpijp zodat de tegenover liggende belending wordt beschermd.

Bijlage 1

OZone V 2.2.6 Report

Analysis Name: **Boekenopslag 300 sec**
File Name: C:\Users\user2\Documents\JOHAN\Data
OZone\Marconistraat\Boekenopslag Marconistraat 300 sec DEF.ozn
Created: 14-4-2012 at 16:43:36

ANALYSIS STRATEGY

Selected strategy: Combination 2Zones - 1 Zone Model
Transition criteria from 2 Zones to 1 Zone
Upper Layer Temperature $\geq 500^{\circ}\text{C}$
Combustible in Upper Layer + U.L. Temperature \geq Combustible Ignition Temperature = 300°C
Interface Height $\leq 0,05$ Compartment Height
Fire Area $\geq 0,5$ Floor Area

PARAMETERS

Openings

Radiation Through Closed Openings: 0,8
Bernoulli Coefficient: 0,7

Physical Characteristics of Compartment

Initial Temperature: 293 K
Initial Pressure: 100000 Pa

Parameters of Wall Material

Convection Coefficient at the Hot Surface: 25 W/m²K
Convection Coefficient at the Cold Surface: 9 W/m²K

Calculation Parameters

End of Calculation: 2700 sec
Time Step for Printing Results: 60 sec
Maximum Time Step for Calculation: 10 sec

Air Entrained Model: Heskestad

Temperature Dependent Openings

All openings activated at: 400 °C

Stepwise Variation

Temperature [°C]	% of Total Openings [%]
20	10
400	50
500	100

Linear Variation

Temperature [°C]	% of Total Openings [%]
20	10
400	50
500	100

Time Dependent Openings

Time [sec]	% of Total Openings [%]
0	5
1200	100

COMPARTMENT

Form of Compartment: Rectangular Floor
Height: 9 m
Depth: 16 m

Length: 33 m
 Roof Type: Double Pitch Roof
 Ceilling Height: 7

DEFINITION OF ENCLOSURE BOUNDARIES

Floor

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m ³]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Normal weight Concrete [EN1994-1-2]	20	2300	1,6	1000

Ceiling

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m ³]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Steel [EN1994-1-2]	0,1	7850	45	600
PIR	6	35	0,019	1470
Steel [EN1994-1-2]	0,1	7850	45	600

Wall 1

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m ³]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Steel [EN1994-1-2]	0,1	7850	45	600
PIR	6	35	0,019	1470
Steel [EN1994-1-2]	0,1	7850	45	600

Openings

Sill Height [m]	Soffit Height [m]	Width [m]	Variation	Adiabatic
0	2	1	Constant	no

Wall 2

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m ³]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Steel [EN1994-1-2]	0,1	7850	45	600
PIR	6	35	0,019	1470
Steel [EN1994-1-2]	0,1	7850	45	600

Wall 3

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m ³]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Steel [EN1994-1-2]	0,1	7850	45	600
PIR	6	35	0,019	1470
Steel [EN1994-1-2]	0,1	7850	45	600

Openings

Sill Height [m]	Soffit Height [m]	Width [m]	Variation	Adiabatic
0	2	1	Constant	no

Wall 4

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m ³]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Steel [EN1994-1-2]	0,1	7850	45	600
PIR	6	35	0,019	1470
Steel [EN1994-1-2]	0,1	7850	45	600

FIRE

Fire Curve:	NFSC Design Fire	
Maximum Fire Area:	528	m ²
Fire Elevation:	0	m
Fuel Height:	0	m

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf [kw/m ²]	Fire Load qf, k [MJ/m ²]	Danger of Fire Activation
User Defined	300	1250	3000	1

Active Measures

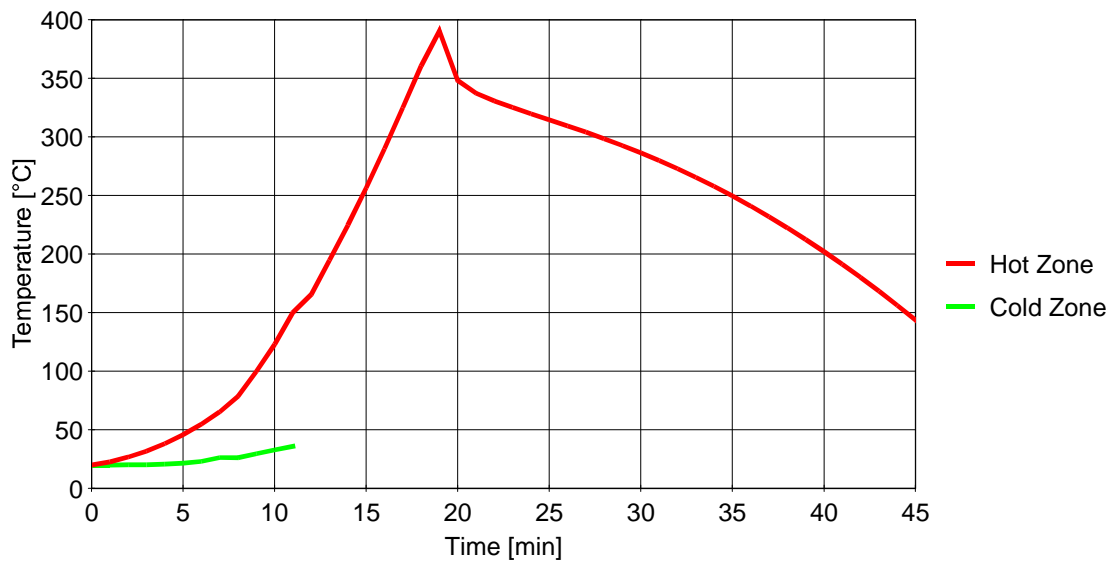
Description	Active	Value
Automatic Water Extinguishing System	No	$\delta_{n,1} = 1$
Independent Water Supplies	No	$\delta_{n,2} = 1$
Automatic Fire Detection by Heat	No	$\delta_{n,3} = 1$
Automatic Fire Detection by Smoke	No	
Automatic Alarm Transmission to Fire Brigade	No	$\delta_{n,5} = 1$
Work Fire Brigade	No	$\delta_{n,6} = 1$
Off Site Fire Brigade	No	
Safe Access Routes	Yes	$\delta_{n,8} = 1$
Staircases Under Overpressure in Fire Alarm	No	
Fire Fighting Devices	Yes	$\delta_{n,9} = 1$
Smoke Exhaust System	Yes	$\delta_{n,10} = 1$
Fire Risk Area:	528	m ²
Danger of Fire Activation:		$\delta_{q,1} = 1,63$
$q_{f,d}$	3912,0	MJ/m ²
Combustion Heat of Fuel:	17,5	MJ/kg
Combustion Efficiency Factor:	0,8	
Combustion Model:	External flaming	

RESULTS

Fire Area: The maximum fire area (528.00m²) is greater than 25% of the floor area (528.00m²). The fire load is uniformly distributed.

Switch to one zone: Lower layer Height < 5.0% ocompartment height at time [s] 710.00

Gas Temperature



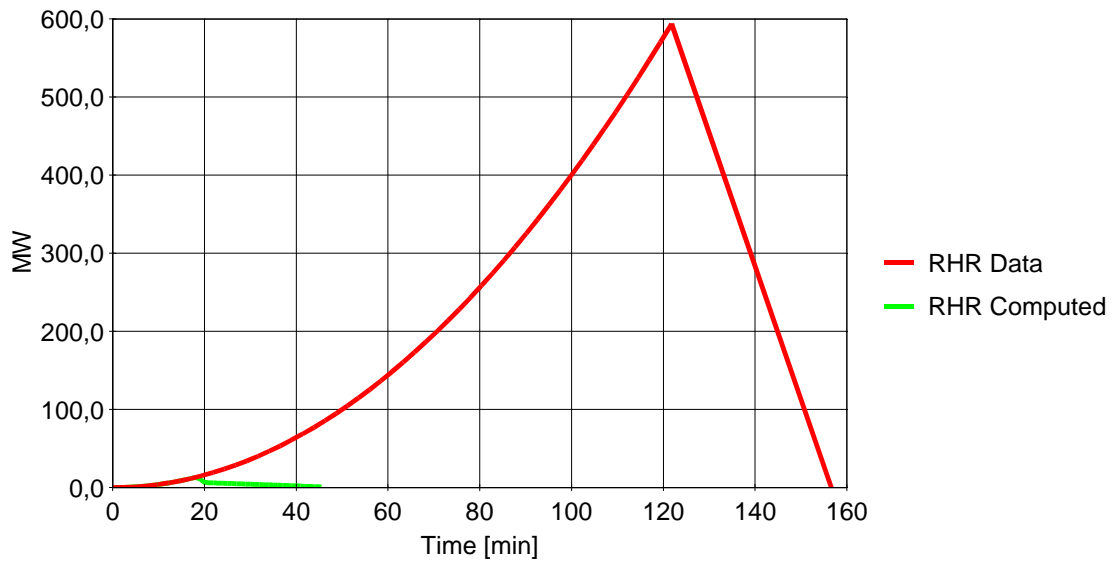
Analysis Name: Boekenopslag 300 sec

Peak: 390 °C

At: 19 min

Figure 1. Hot and Cold Zone Temperature

Rate of Heat Release



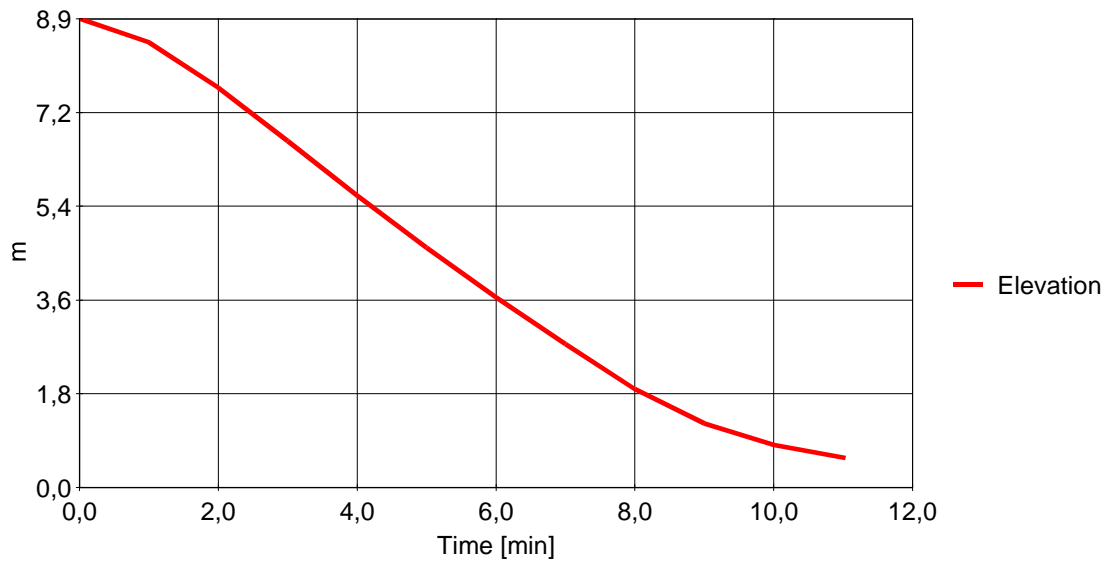
Analysis Name: Boekenopslag 300 sec

Peak: 593,57 MW

At: 121,8 min

Figure 2. RHR Data and Computed

Zones Interface Elevation



Analysis Name: Boekenopslag 300 sec

h = 0,57 m

At: 11,00 min

Figure 4. Zones Interface Elevation

Bijlage 2

Scenario 5, inschuimen object. De proefneming werd uitgevoerd met Heptaan als brandstof in een stookbak met een diameter van 1,9 m. Zoals onderstaand berekend is, bedraagt de theoretische brandduur van de 50 liter Heptaan 120 seconden. De praktische brandduur zal langer zijn maar sterk worden gereduceerd tot ongeveer 80 % van het oorspronkelijke brandvermogen¹⁵. De reductie is het gevolg van de ondergrond die energie onttrekt aan de verdampende brandstof. Blijkens de grafiek in het rapport wordt met het opbrengen van het schuim begonnen ongeveer 138 seconden na ontsteking (het tijdstip van ontsteking is niet in het rapport vastgelegd). Gelet op de berekende brandduur is de brand dan in de dooffase. Dit betekent dan ook dat het brandvermogen, en bijbehorende vlamhoogte, met het opbrengen van het schuim aanzienlijk gereduceerd is en eventueel vlamcontact het schuim slechts beperkt zal aantasten.



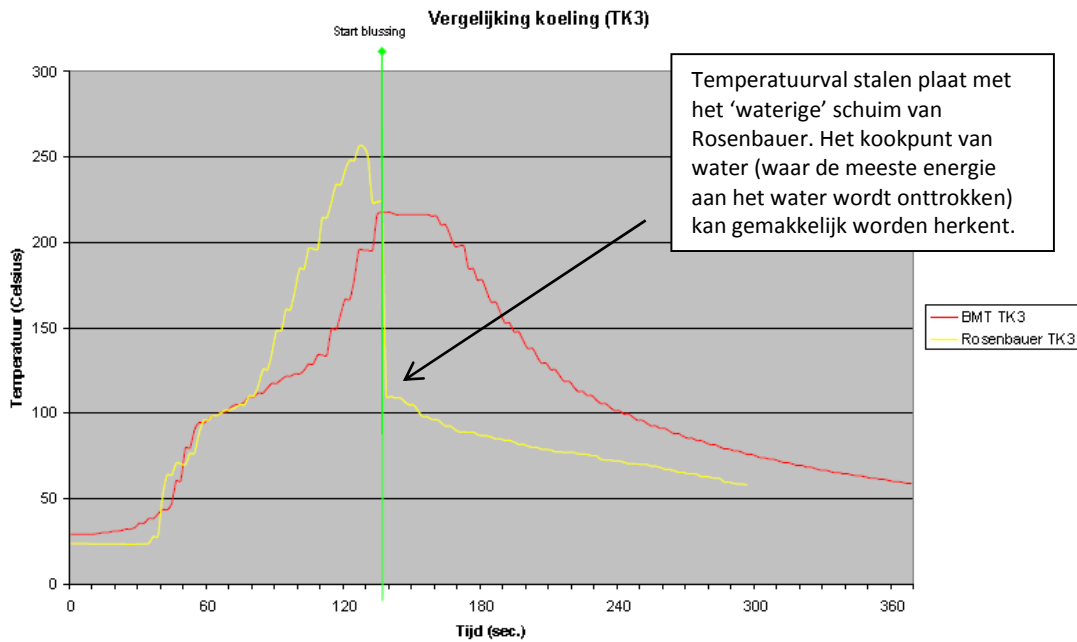
Afbeelding 24 Opstelling test 'inschuimen object'

Blusschuim bevat relatief weinig water, dat benodigd is om het oppervlak van een te beschermen object af te koelen. Lucht heeft in vergelijking met water slechts een zeer beperkte soortelijke warmte coëfficiënt. Het water dat in de schuimbellen is opgesloten zal bij een temperatuur hoger dan 100 °C verdampen en het schuim afbreken. Om af te koelen onttrekt de hete stalen plaat energie aan het water, waardoor deze verdampst.

Uit de test blijkt dat het relatief droge schuim (One Seven, van BMT) beter blijft hangen dan het nattere schuim van het systeem van Rosenbauer. Uit het gemeten temperatuurverloop van de thermokoppels kan (zie **afbeelding 25**) vervolgens worden afgeleid dat het koelend vermogen van het nattere schuim beduidend beter is.

In de overgangsfase (kookpunt) van water naar stoom of omgekeerd kan het staal aan elke kilogram of liter verdampend water 2.260.000 Joules (2,26 MJ) energie onttrekken. Onder het kookpunt loopt dit terug tot 4.180 Joules per graad Celsius. (Dus per 10 graden verschil $10 \times 4.180 = 41.800$ Joules). De overgangsfase van water naar stoom (verdamping) en het verdere verloop kan goed uit **afbeelding 25** worden afgeleid.

¹⁵ SFPE, 3^e editie (2002), *Handbook of Fire Protection Engineering*.



Afbeelding 25 **Temperatuurverloop door schuim beschermde stalen plaat**

Berekening benodigde verbrandingstijd en vlamhoogte van 50 liter Heptaan

Verbrandingstijd bedraagt

Het oppervlak van een stookbak met een diameter van 1,9 m bedraagt:

$$d = 1,9 \text{ m} \quad \text{opp.} = (1,9 / 2)^2 \cdot 3,14 = 2,8 \text{ m}^2$$

De vloeistoflaagdikte bedraagt bij 50 liter heptaan:

$$50.000 \text{ cm}^3 / 28.000 \text{ cm}^2 = 1,8 \text{ cm} \text{ is gelijk aan } 18 \text{ mm.}$$

De brandduur bedraagt ongeveer:

$$t_b = V \cdot \rho / m'' \cdot A$$

$$t_b = (0,05 \text{ m}^3 \cdot 675 \text{ kg/m}^3) / (0,101 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot 2,8 \text{ m}^2)$$

$$t_b = 119 \text{ sec.}$$

Ook hier geldt dat de brandduur in de praktijk wat langer is als gevolg van het reducerende brandvermogen door energieonttrekking van het water aan de brandstof. Vast staat dat binnen twee minuten na ontsteking het brandvermogen aanzienlijk gereduceerd is.

De maximale vlamhoogte kan met de methode van Heskestad als volgt worden berekend.

Eerst moet het brandvermogen (Q) worden berekend door de afbrandsnelheid te vermenigvuldigen met de verbrandingswaarde van de vloeistof. Dit geldt echter niet voor kleine 'pool fires' hier moet een correctie op worden toegepast volgens onderstaande formule:

$$Q = m'' \cdot \Delta H_c \cdot A \cdot (1 - e^{-k_{\beta} \cdot D}) \rightarrow Q = 0,101 \cdot 44.600 \cdot 2,8 \cdot (1 - e^{-1,1 \cdot 1,9}) \rightarrow Q = 11.000 \text{ kW}$$

De formule voor het berekenen van de vlamhoogte volgens de methode van Heskestad luidt vervolgens:

$$L = 0,235 \cdot Q^{2/5} - 1,02 \cdot D$$

$$L = 0,235 \cdot 11.000^{2/5} - 1,02 \cdot 1,9$$

$$L = 7,8 \text{ m}$$

Conclusie: de vlamhoogte bedraagt maximaal 7,8 m.

Waarin:

m''	= afbrandsnelheid (Heptaan ¹⁶ 0,101 kg/m ² .s)	[kg/m ² .s]
ΔH_c	= verbrandingswaarde	[MJ/kg]
k_{β}	= factor (Heptaan)	1,1
D	= diameter vloeistofplas	[m]
Q	= brandvermogen	[kW]
t_b	= opbrandtijd	[s]
V	= volume	[m ³]
ρ	= soortelijke massa	[kg]
A	= oppervlak	[m ²]
L	= vlamhoogte	[m]

¹⁶ SFPE, 3^e editie (2002), *Handbook of Fire Protection Engineering*.