

# Doelgerichte vluchtveiligheid

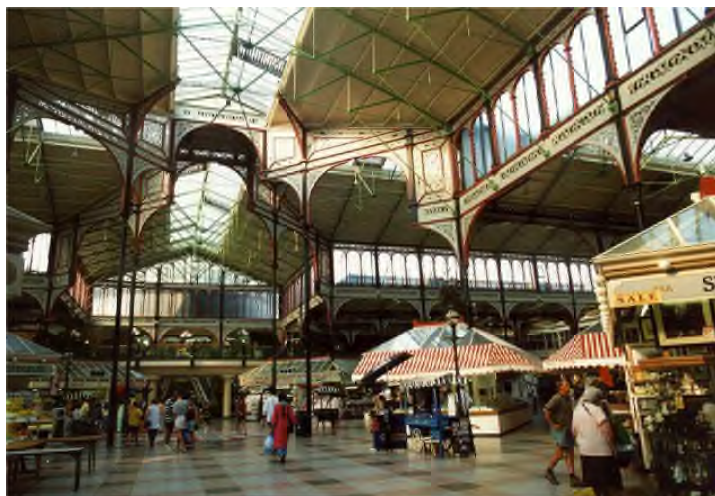
## Noodzakelijke marges als gevolg van onzekere randcondities

Ir. R.A.P. van Herpen FIFireE  
Lector Brandveiligheid in de bouw<sup>i</sup>  
Fellow Fire safety engineering<sup>ii</sup>

*Een belangrijk doel van de brandveiligheidsvoorschriften in de publiekrechtelijke regelgeving is dat een gebouw onder brandcondities veilig kan worden ontvlucht. In de prescriptieve voorschriften van Bouwbesluit 2012 leidt dat tot functionele eisen en grenswaarden aan loopafstanden, uitstroombreedten, doorstroom- en opvangcapaciteiten, aantal en kwaliteit van vluchtroutes, etc.. Echter, in grote compartimenten is het vaak niet mogelijk de vluchtveiligheid op een dergelijke wijze in te richten. Voldoen grote compartimenten dan niet aan het publiekrechtelijke veiligheidsniveau?*

*In het geval van toetsing aan publiekrechtelijke voorschriften wordt impliciet aangenomen dat met het voldoen aan die voorschriften de faalkans van het bovenliggende doel (de kans dat niet veilig kan worden gevlucht) acceptabel klein is. In een doelgerichte beschouwing wordt niet aan voorschriften getoetst, maar wordt projectspecifiek beoordeeld of de faalkans van het bovenliggende doel acceptabel klein is. Wanneer grote compartimenten niet kunnen worden ingericht conform de publiekrechtelijke voorschriften met betrekking tot vluchtveiligheid wil dat niet zeggen dat ze daarmee onveilig zijn. Een doelgerichte beschouwing kan uitkomst bieden.*

*In grote compartimenten duurt het meestal langer voordat de ruimtecondities ten gevolge van een brand tot gezondheidsschade leiden dan in kleine compartimenten. Er is dus meer tijd beschikbaar voor de ontvluchting van een groot compartiment. Vaak is er ook meer tijd nodig, omdat in grote compartimenten doorgaans ook meer gebouwgebruikers aanwezig zijn. Zolang de benodigde tijd de beschikbare tijd niet overschrijdt kan er veilig worden gevlucht. Naarmate het verschil tussen beschikbare en benodigde tijd groter is zal ook de vluchtveiligheid in het grote compartiment groter zijn. De hamvraag daarbij is: hoeveel marge is nodig tussen beschikbare en benodigde vluchttijd om te kunnen spreken van voldoende vluchtveiligheid? En welke maatregelen zijn denkbaar wanneer de marge onvoldoende is?*



Figuur 1: Markthal in Bolton (UK) als groot compartiment

## 1. Voorschriften en doelen

### Publiekrechtelijke regelgeving

De publiekrechtelijke bouwregelgeving stelt in Bouwbesluit 2012 eisen aan onder andere de brandveiligheid van zowel nieuw te bouwen als bestaande bouwwerken. Volgens de toelichting bij Bouwbesluit 2012 wordt onder brandveiligheid verstaan:

- Het beperken van slachtoffers (doden en gewonden) in geval van brand.
- Het voorkomen van branduitbreiding naar een ander perceel.

In Bouwbesluit 2012 zijn daartoe voorschriften opgenomen waarmee in geval van brand in een compartiment van het gebouw voldoende veiligheid van gebouwgebruikers en hulpverleners (zoals de brandweer) is geborgd en het overslagrisico naar buurpercelen gering is.

Die voorschriften bestaan uit functionele eisen die vervolgens per gebruiksfunctie in concrete prestatie-eisen met grenswaarden zijn vastgelegd. De functionele eisen kunnen in functionele veiligheidsdoelen worden ondergebracht (Van Herpen, 2013):

1. Voorkomen van branduitbreiding naar buurpercelen (in risicotermen: toelaatbaar falen van branduitbreiding naar buurpercelen).
2. Instandhouding bouwwerk of gebouw (in risicotermen: toelaatbaar falen van de draagstructuur).
3. Beperken uitbreidingsgebied van brand en rook (in risicotermen: toelaatbaar falen van de compartimentering).
4. Instandhouding vluchtroutes (in risicotermen: toelaatbaar falen van de vluchtroutes).
5. Instandhouding aanvalsroutes (in risicotermen: toelaatbaar falen van de aanvalsroutes).

Voor constructieve veiligheid (het tweede veiligheidsdoel in de bovenstaande opsommingslijst) geeft de Eurocode (NEN-EN 1990 c.a., 2011) handvatten voor het kwantificeren van de acceptabele faalkans van de draagconstructie. Deze is afhankelijk van de gevolgklasse (CC1, CC2 of CC3). De meeste gebruiksfuncties vallen in gevolgklasse CC2 waarbij een acceptabele faalkans van de draagconstructie hoort van  $7,23 \cdot 10^{-5}$  gedurende de levensduur van het gebouw (Van Herpen et al, 2014).

Voor andere veiligheidsdoelen is de acceptabele faalkans (nog) niet gedefinieerd. Dat levert vaak discussie op wanneer brandveiligheid doelgericht wordt uitgewerkt

In dit artikel ligt de focus op het vierde doel in de opsommingslijst, de vluchtveiligheid. Met name in grote compartimenten leidt het toepassen van de voorschriften van Bouwbesluit 2012 tot knelpunten. Om die reden is een doelgerichte beschouwing van de vluchtveiligheid onvermijdelijk.

### Doelgerichte vluchtveiligheid

De voorschriften ten aanzien van loopafstanden en vluchtroutes (aantal, redundantie, capaciteit, afwerking, e.d.) hebben tot doel om onder brandcondities de gebouwgebruikers de mogelijkheid te bieden het gebouw veilig te kunnen ontruimen. Daarmee wordt bedoeld dat de gebouwgebruikers zonder gezondheidsschade (of met een zeer laag risico van

gezondheidsschade) het gebouw kunnen ontluchten naar een veilige plaats (de openbare weg).

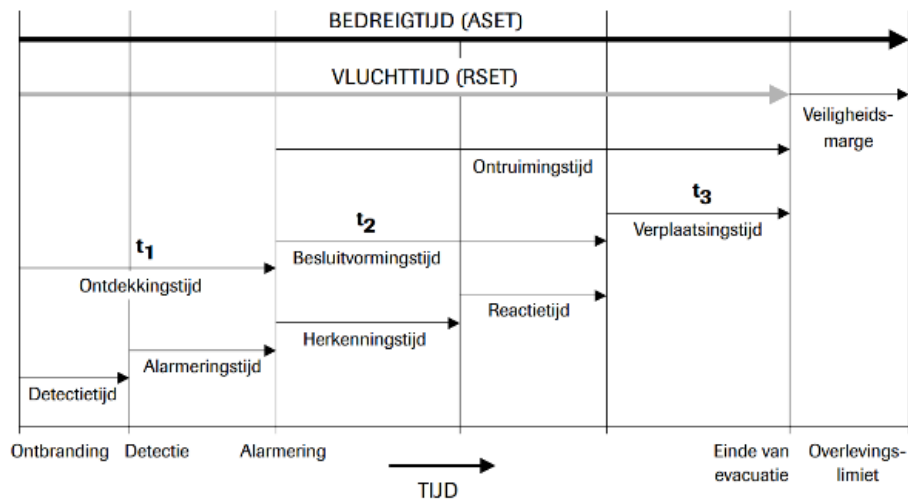
In een groot compartiment, waarin zowel brand als gebouwgebruikers aanwezig zijn, kan ook op een andere wijze invulling worden gegeven aan dit doel. In een groot compartiment kan rook worden gebufferd zonder dat daarmee de vluchtroutes worden gehinderd. De kans op gezondheidsschade voor gebouwgebruikers is vrijwel nihil als de rookbuffer voldoet aan de volgende voorwaarden:

1. De rookvrije hoogte boven de vloer van de vluchtroute bedraagt minimaal 2,5 meter;
2. De stralingsflux vanaf de rookbuffer bedraagt op 1,8 meter boven de vloer van de vluchtroute (hoofdhogte) niet meer dan  $2,5 \text{ kW/m}^2$ .

Zolang aan beide voorwaarden wordt voldaan is de kans op gezondheidsschade nihil. Dit bepaalt de beschikbare vluchttijd ASET (Available Safe Egress Time).

De benodigde vluchttijd is de tijdsduur die de gebouwgebruikers nodig hebben om het bedreigde compartiment te ontruimen RSET (Required Safe Egress Time). Zolang de benodigde tijd de beschikbare tijd niet overschrijdt kan veilig worden gevlucht.

In deze doelgerichte beschouwing van de vluchtveiligheid bevatten zowel ASET als RSET veel onzekerheid. Naarmate het interval (veiligheidsmarge) tussen ASET en RSET kleiner is neemt de faalkans (de kans dat niet veilig kan worden gevlucht) toe. Wanneer ASET en RSET in het geheel geen onzekerheid zouden bevatten is de betrouwbaarheid zo hoog dat een veiligheidsmarge tussen ASET en RSET overbodig is.



*Figuur 2: Veilig vluchten is mogelijk indien  $ASET > RSET$ . De veiligheidsmarge is het verschil tussen ASET en RSET (Kobes, 2008)*

## 2. Casus Markthal

### Kenmerken van de markthal

Ter illustratie is de vluchtveiligheid doelgericht uitgewerkt voor een grote markthal. Het kenmerk van een markthal is de gelijktijdige aanwezigheid van vuurlast en personen in een ongecompartimenteerde grote ruimte waarin brand kan ontstaan.



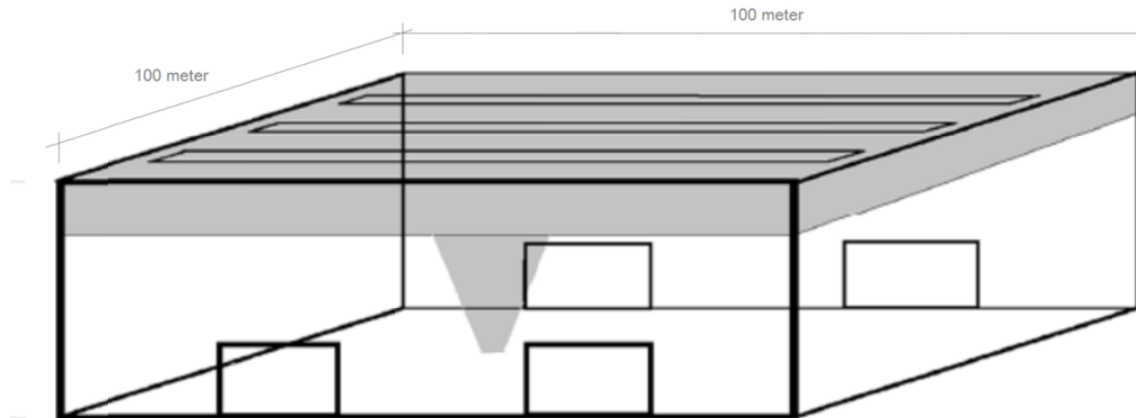
*Figuur 3: Markthal Rotterdam, combinatie van vuurlast en personen in één compartiment*

De vluchtveiligheid van het grote compartiment wordt bepaald op basis van een ASET-RSET vergelijking, rekening houdend met onzekerheden in zowel ASET als RSET. Deze uitwerking is projectspecifiek. In plaats van generieke voorschriften worden projectspecifieke kenmerken gewaardeerd in de uitwerking. Deze projectspecifieke kenmerken zijn onder te verdelen in (Hagen et al, 2014):

- Bouwkundige kenmerken (ruimte-afmetingen, daglichtopeningen, materialisering, e.d.)
- Installatietechnische kenmerken (detectie, alarmering, rookbeheersing, brandbeheersing, e.d.)
- Brandstofkenmerken (vuurlast door afwerking en inrichting)
- Gebruikerskenmerken (aantal en verdeling van personen, persoonskenmerken)

De bouwkundige kenmerken en de brandstofkenmerken zijn relevant voor ASET. De gebruikerskenmerken zijn relevant voor RSET. De installatietechnische kenmerken zijn relevant voor zowel ASET als RSET.

Voor de markthal is uitgegaan van 10.000 m<sup>2</sup> vloeroppervlakte met een inwendige hoogte van 7 meter. Alle scheidingsconstructies zijn adiabatisch verondersteld (geen warmtebuffering en geen warmtetransmissie). Er zijn 4 toegangen van elk 3 x 3 meter (9 m<sup>2</sup>), die bij brandmelding open worden gestuurd. De lichtstraten in het dak bestaan uit vast glas en zijn niet voorzien van te openen delen. Figuur 4 geeft de hal in isometrie weer..



Figuur 4: Isometrie van de casus markthal

De markthal wordt voorzien van automatische detectie die de brandmeldinstallatie aanstuurt. In geval van brandmelding worden de entrees van de markthal opengestuurd en de ontruimingsalarmering geactiveerd.

De belangrijkste brandstofkenmerken zijn:

- Cellulose brandstof met stoichiometrische constante van 1,27 kg/kg en verbrandingswaarde  $H_c=17,5$  MJ/kg
- Uniform verdeelde vuurbelasting 1200 MJ/kg
- Kwadratische ontwikkeling van het brandvermogen met  $RHR=500$  kW/m<sup>2</sup> en tijdconstante  $t_c=150$  s.
- Pluimmodel voor inmenging van omgevingslucht: Heskestad, bronhoogte 1 m boven vloerniveau
- Brand en pluim belemmeren 1 van de 4 vluchtroutes

De belangrijkste gebruikerskenmerken zijn:

- Aantal aanwezige personen: 3000, uniform verdeeld over de vloeroppervlakte
- Ontdekkingstijd: 2 min. (automatische detectie)
- Pre movement tijd (besluitvorming): 2 min.

### **Vluchten uit de markthal: ASET > RSET**

Voor de beschikbare vluchttijd ASET gelden als toetscriteria:

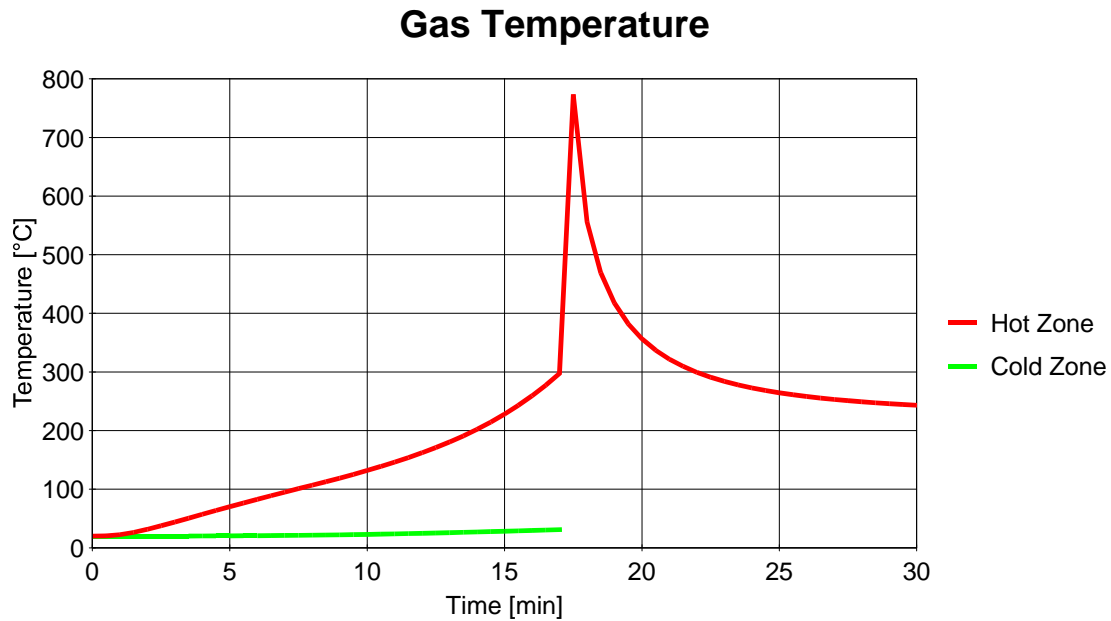
- Rookvrije hoogte boven vloer vluchtroute > 2,5 m
- Rooklaagtemperatuur < 200 °C (overeenkomend met een stralingsflux van circa 2,5 kW/m<sup>2</sup>)

Voor de benodigde vluchttijd RSET geldt als toetscriterium:

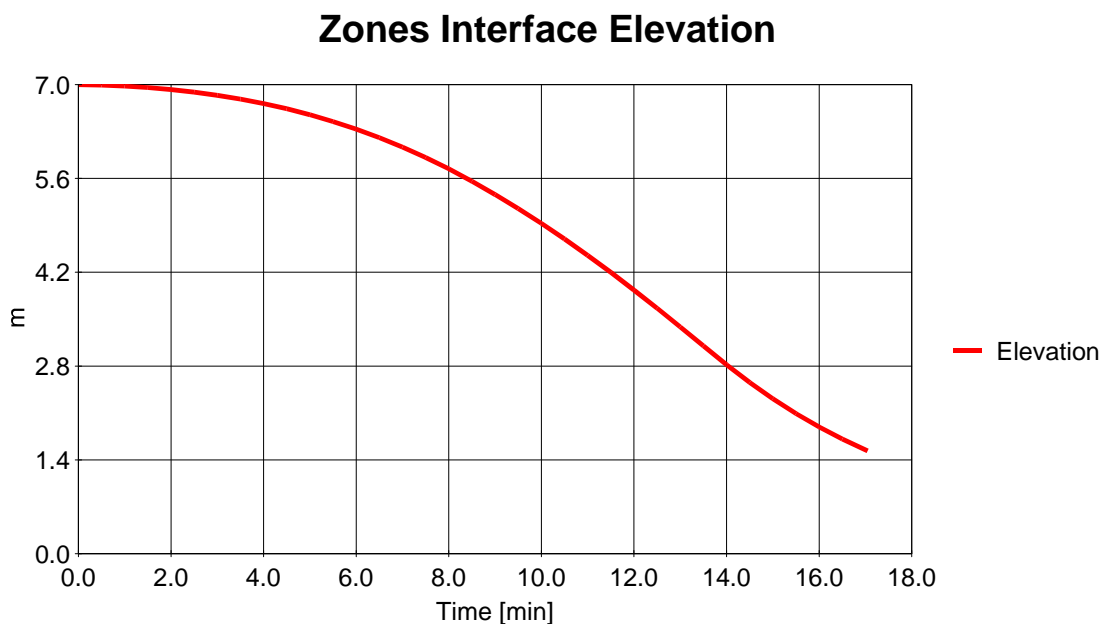
- 100% van de gebouwgebruikers evacueert naar buiten

De condities van de rooklaag (van belang voor ASET) kunnen worden bepaald op basis van een natuurlijk brandconcept (NEN 6055, 2011), met behulp van een zonemodel (Ozone V.2.2.6). Met de gegeven kenmerken voor brandstof, gebouw, installaties en gebouwgebruikers levert dat een ASET voor het criterium rookvrije hoogte van 14,6 minuten

(figuur 6). Dat wordt veroorzaakt door flashover op dit tijdstip: de lokale brand gaat dan over in een volledig ontwikkelde compartimentsbrand. Voor het criterium rooklaagtemperatuur bedraagt ASET 13,9 minuten (figuur 5). De rooklaagtemperatuur is in dit geval dus het maatgevende criterium.



Figuur 5: Gastemperatuur van de hete en de koude zone.



Figuur 6: Rookvrije hoogte boven vloerniveau

De RSET kan worden bepaald met een evacuatiesimulatie. Omdat in dit geval de uitstroombreedte van het compartiment bepalend is voor de snelheid van evacueren, is de verplaatsingstijd aan de hand hiervan bepaald. Uitgaande van 3 beschikbare toegangen van elk 3 meter breed, met een capaciteit van 90 pers/(min.m), duurt het 3,7 minuten voordat alle

3000 aanwezigen buiten het compartiment zijn. De op deze wijze bepaalde verplaatsingstijd gaat uit van een optimale verdeling van gebouwgebruikers over vluchtroutes en kan daarom als optimistisch worden gezien.

Voor de ontdekkingsstijd wordt uitgegaan van automatische detectie met een detectietijd van 2 minuten. Dit is een conservatief uitgangspunt, bij een volle bezetting van de markthal is ook een detectietijd van 0 minuten voorstelbaar. Er zijn zoveel gebouwgebruikers binnen dat een beginnende brand onmiddellijk wordt opgemerkt. Desondanks is hier gekozen voor een conservatieve ontdekkingsstijd van 2 minuten.

Voor de besluitvormingstijd wordt eveneens 2 minuten aangehouden. Deze waarde wordt ook internationaal veel gehanteerd en is nodig omdat de start van de evacuatie vaak gepaard gaat met conflicterende personenstromen en daardoor niet efficiënt is.

De totale RSET bestaat uit de sommatie van ontdekkingsstijd, besluitvormingstijd en verplaatsingstijd (zie figuur 2). In dit geval:  $RSET = 2 + 2 + 3,7 = 7,7$  min.

In de beschouwde markthal bedraagt de maatgevende ASET 13,9 min en de RSET 7,7 min. Er is dus een marge aanwezig van  $ASET - RSET = 6,2$  min. De marge is relatief groot, waardoor de kans op falen (de kans dat  $ASET < RSET$ ) gering is. Welke marge precies nodig is om de kans op falen nog juist als acceptabel te kwalificeren, hangt af van de onzekerheid in randcondities. Randcondities die door de brand en de omgeving worden geïntroduceerd zijn niet controleerbaar, waardoor met onzekerheid in deze randcondities (stochasten) rekening moet worden gehouden.

### 3. Onzekerheden en betrouwbaarheid van ASET-RSET

In de bepaling van de ASET zijn de belangrijkste stochasten:

- Vuurbelasting:  $q = 1200 \text{ MJ/m}^2$ , variatiecoëfficiënt 0,3
- Brandvermogensdichtheid:  $\text{RHR} = 500 \text{ kW/m}^2$ , variatiecoëfficiënt 0,5
- Tijdconstante:  $t_c = 150 \text{ s}$ , variatiecoëfficiënt 0,3
- Pluimmodel: Heskestad met bronhoogte 1 m, variatiecoëfficiënt 0,5
- Stoichiometrische constante:  $r = 1,27 \text{ kg/kg}$ , niet gevarieerd

In de bepaling van de RSET zijn de belangrijkste stochasten:

- Ontdekkingstijd: 2 min, variatiecoëfficiënt 0,3
- Besluitvormingstijd: 2 min, variatiecoëfficiënt 0,5
- Aantal personen: 3000, variatiecoëfficiënt 0,5
- Aantal toegangen: 3, variatiecoëfficiënt 0,3

In de bovenstaande opsommingslijstjes is bij de referentiewaarden een variatiecoëfficiënt aangegeven. De variatiecoëfficiënt stelt de relatieve marge voor bij de referentiewaarde, die als (geschatte) standaard afwijking op die referentiewaarde wordt beschouwd.

Vervolgens is in een gevoeligheidsanalyse van elke stochast afzonderlijk de invloed van die variatie op het resultaat (ASET of RSET) bepaald. Uit de afwijking die dit geeft in het resultaat is per stochast de variantie bepaald (tabellen 1 en 2). Door de varianties van alle stochasten te sommeren wordt de totale variantie in het resultaat verkregen (Van Herpen et al, 2014).

Tabel 3 geeft tenslotte de gemiddelde waarden, de totale varianties en de bijbehorende standaardafwijkingen op de gecombineerde (ASET-RSET) voor de twee toetscriteria.

Tabel 1: Gevoeligheidsanalyse op ASET

ASET	T < 200 °C	H > 2,5 m
Referentiecondities, ASET (gemiddeld)	13,9 min	14,6 min
<b>Variantie per stochast:</b>		
- Vuurbelasting	0,00	0,00
- Brandvermogensdichtheid	1,78	1,00
- Tijdconstante	9,51	8,03
- Bronhoogte	0,50	0,25
<b>Variantie totaal:</b>	11,79	9,28

Tabel 2: Gevoeligheidsanalyse op RSET

RSET		100 % buiten
Referentiecondities	$2 + 2 + 3,7 =$	7,7 min
<b>Variantie per stochast:</b>		
- Detectietijd	0,36	$\text{min}^2$
- Besluitvormingstijd	1,00	$\text{min}^2$
- Aantal aanwezigen	3,43	$\text{min}^2$
- Aantal toegangen	3,43	$\text{min}^2$
<b>Variantie totaal:</b>	8,22	$\text{min}^2$



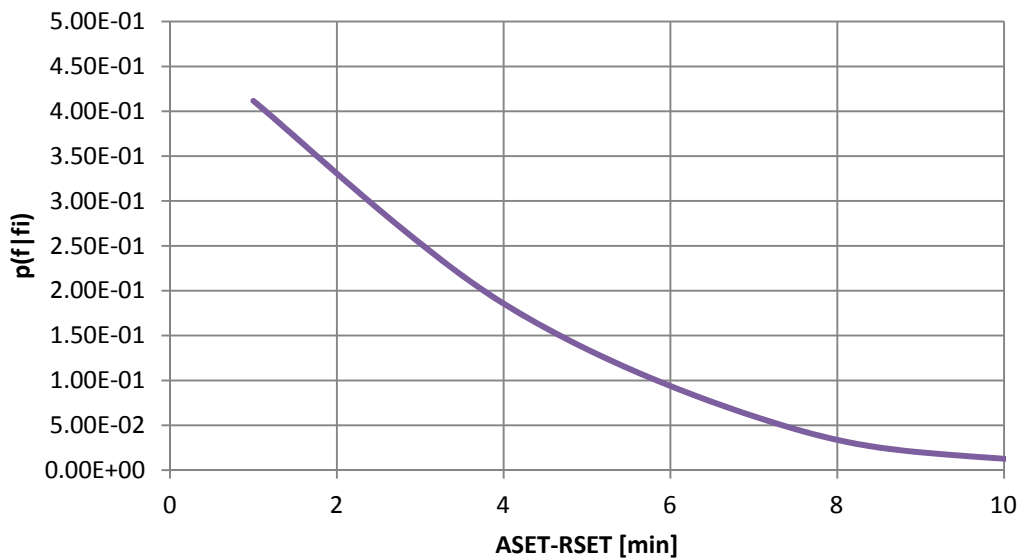
Tabel 3: Betrouwbaarheid van (ASET-RSET)

ASET-RSET	T < 200 °C	H > 2,5 m
Referentiecondities, ASET-RSET	6,2 min	6,9 min
<b>Variatie:</b>		
- Variantie (Var)	20,01 min <sup>2</sup>	17,50 min <sup>2</sup>
- Standaardafwijking ( $\sigma$ )	4,47 min	4,18 min

Uit tabel 3 blijkt het criterium rooklaagtemperatuur ( $T < 200$  °C) maatgevend te zijn. De marge (ASET-RSET) bedraagt hier 6,2 min. met een standaardafwijking van 4,47 min.

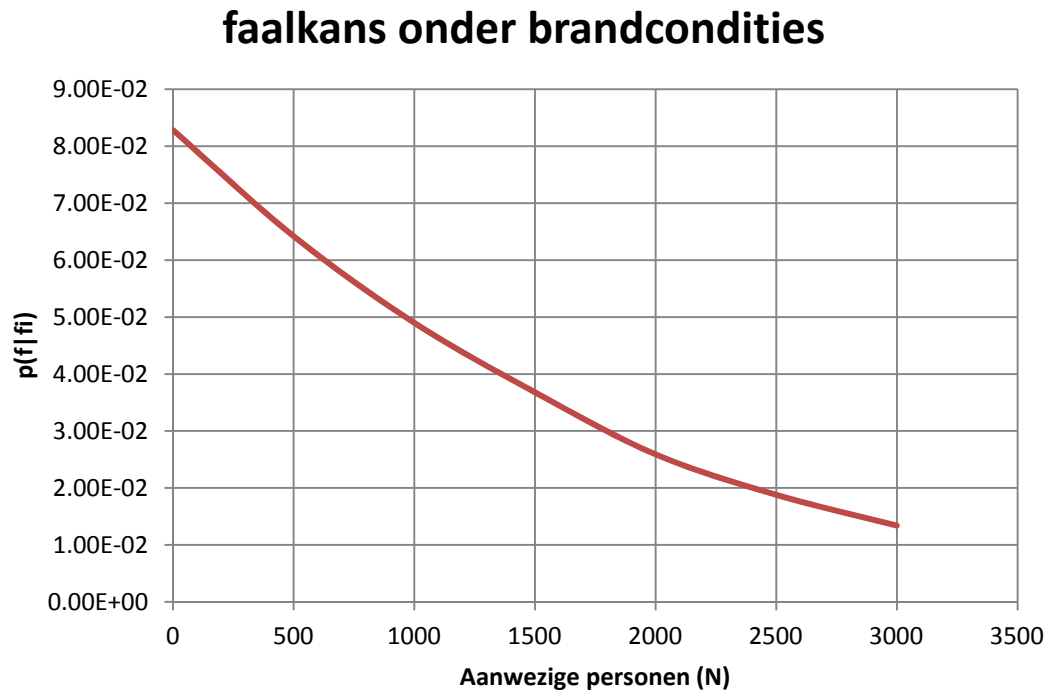
Met dit resultaat kan voor het criterium rooklaagtemperatuur de cumulatieve kansverdeling voor (ASET-RSET) worden vastgesteld. Dit is grafisch weergegeven in figuur 7. Daarin is, op basis van de centrale limietstelling, een normale verdeling aangehouden. De faalkans van veilig vluchten komt overeen met de onderschrijdingskans (ASET-RSET) < 0 min. Deze bedraagt in dit geval bij een marge van (ASET-RSET) = 6,2 min. circa 0,083 (betrokken op de laatste gebouwgebruiker die de ruimte verlaat).

### faalkans onder brandcondities



Figuur 7: Faalkans van het criterium rooklaagtemperatuur in geval van brand, in relatie tot de marge tussen ASET en RSET.

De marge (ASET-RSET) van 6,2 minuten is het tijdsinterval tussen de laatste gebouwgebruiker die de ruimte ontvlucht en het bereiken van onacceptabele randcondities in de ruimte. Voor alle andere gebouwgebruikers is dat interval groter en daarmee de faalkans voor vluchtveiligheid kleiner. Zo is voor de eerste gebouwgebruiker die weet te vluchten de marge (ASET-RSET) 9,9 minuten. Het is dus ook mogelijk de faalkans uit te zetten tegen het aantal nog aanwezige gebouwgebruikers, zie figuur 8.



*Figuur 8: Faalkans van het criterium rooklaagtemperatuur in geval van brand, in relatie tot het aantal aanwezige gebouwgebruikers.*

## 4. Doelkwantificering en toetsing

### Acceptabele faalkans van ASET-RSET > 0

Nu de faalkans van de vluchtveiligheid kan worden gekwantificeerd moet ook het doel gekwantificeerd worden in een acceptabele faalkans. De publiekrechtelijke regelgeving biedt hiervoor geen handvatten.

Voor constructieve veiligheid biedt de Eurocode enig houvast. Uitgaande van gevolgklasse CC2 voor deze casus is een faalkans van constructieve veiligheid (constructiefalen) acceptabel van (NEN-EN 1990 c.a., 2011):

$p(f) = 7,23 \cdot 10^{-5}$ , gedurende de levensduur (50 jaar) van het gebouw.

Falen ten gevolge van de thermische belasting door brand is hierin een bijzondere belasting, die incidenteel aanwezig kan zijn. De ontstaanskans op brand in het compartiment is hiervoor van belang. Voor grote compartimenten met een niet-slaap functie kan een kans op een potentieel bedreigende brand worden gehanteerd van (Van Herpen et al, 2014):

$p(f_i) = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ , gedurende de levensduur (50 jaar) van het gebouw.

De markthal in deze casus bezit een oppervlakte van  $10.000 \text{ m}^2$ . Dat leidt tot een ontstaanskans op brand van 0,02 gedurende de boogde levensduur van het gebouw. Voor de acceptabele kans op constructiefalen onder brandcondities kan dan worden geschreven:

$p(f|f_i) = p(f) / p(f_i) = 3,615 \cdot 10^{-3}$  gedurende de levensduur van het gebouw.

Hierin is:

$p(f)$ : acceptabele faalkans

$p(f_i)$ : kans op het ontstaan van brand

$p(f|f_i)$ : acceptabele faalkans, gegeven brandcondities (voor bezwijken draagconstructies)

Constructiefalen leidt tot overlijden van aanwezige gebouwgebruikers. Dat is bij falen van de vluchtveiligheid niet het geval. Het falen van de vluchtveiligheid leidt tot gezondheidsschade aan gebouwgebruikers (variërend van huidverbranding en schade aan ademhalingsorganen tot lethaliteit). Het aantal brandgewonden per jaar is een factor 14,5 groter dan het aantal branddoden, gemiddeld over de periode 2000 – 2012 (CBS Statline, 2015). Dit is blijkbaar een maatschappelijk acceptabel gegeven. Dat houdt in dat de faalkans van de vluchtveiligheid op het criterium rooklaagtemperatuur een factor 14,5 groter mag zijn dan de acceptabele faalkans van constructiefalen. In dit geval dus:

$p(f|f_i) = 3,615 \cdot 10^{-3} \times 14,5 = 5,24 \cdot 10^{-2}$  gedurende de levensduur van het gebouw.

Hierin is:

$P(f|f_i)$ : acceptabele faalkans, gegeven brandcondities (voor overschrijding rooklaagtemperatuur)

### Consequenties voor de vluchtveiligheid

Nu de acceptabele faalkans is gedefinieerd, blijkt dat de aanwezige marge tussen ASET en RSET van 6,2 min onvoldoende is. De faalkans bij de aanwezige marge bedraagt  $8,28 \cdot 10^{-2}$ ; deze overschrijdt de acceptabele faalkans onder brandcondities van  $5,24 \cdot 10^{-2}$ . Er is dus een grotere marge noodzakelijk om de faalkans te verkleinen.

Bij een marge tussen ASET en RSET van tenminste 7,26 min voldoet de onderschrijdingskans (ASET-RSET)  $< 0$  min aan de acceptabele faalkans van  $5,24 \cdot 10^{-2}$ .

De (ASET-RSET) vergelijking gaat echter uit van het tijdstip dat de laatste gebouwgebruiker de brandruimte ontvlucht. Het ligt voor de hand de acceptabele faalkans toe te passen op de totale populatie gebouwgebruikers in plaats van op de laatste gebouwgebruiker. De faalkans voor de totale populatie gebouwgebruikers bedraagt  $2,63 \cdot 10^{-2}$  in plaats van  $8,28 \cdot 10^{-2}$  voor de laatste individuele gebouwgebruiker. Deze faalkans is bepaald op basis van figuur 8.

Voor de totale populatie gebouwgebruikers wordt dus ruimschoots voldaan aan de gestelde acceptabele faalkans van  $5,24 \cdot 10^{-2}$ .

### **Verbetering van de vluchtveiligheid**

Wanneer het noodzakelijk is om de vluchtveiligheid te verbeteren (dus de faalkans te verkleinen) moet ófwel de marge (ASET-RSET) worden vergoot, ófwel de betrouwbaarheid van (ASET-RSET) worden vergroot.

Een grotere marge kan worden bereikt door verlenging van ASET of verkorting van RSET. Een verlenging van ASET is mogelijk door toepassing van bijvoorbeeld een RWA-installatie of een sprinklerinstallatie. Een verkorting van de RSET is mogelijk door minder bezoekers toe te staan in de markthal of door meer uitstroomb capaciteit ter plaatse van toegangen en nooduitgangen te realiseren.

In plaats van een grotere marge kan ook worden gestreefd naar een grotere betrouwbaarheid van (ASET-RSET). Dat wordt bereikt met minder onzekerheid in randcondities. De tijdconstante en de referentie vermogensdichtheid zijn de belangrijkste randcondities in de betrouwbaarheid van (ASET-RSET). Hierin kan de onzekerheid alleen worden verminderd wanneer beperkingen aan de inrichting en verkoopgoederen worden gesteld. Dit is vaak niet wenselijk, maar het spreekt voor zich dat van een markthal, bedoeld voor alleen fresh-food, de onzekerheid in tijdconstante en referentie vermogensdichtheid kleiner is dan van een markthal, bedoeld voor food en non-food, winkelen en horeca. Een fresh-food markthal zal dan ook met een kleinere marge in (ASET-RSET) kunnen voldoen aan de acceptabele faalkans van vluchtveiligheid dan een markthal met food en non-food.

## 5. Vergroting van de vluchtveiligheid met installatietechnische voorzieningen

### Verbetering van de vluchtveiligheid met een RWA-installatie

Het toepassen van een Rook- en Warmte-Afvoer (RWA) installatie betekent een verbetering van de vluchtveiligheid door vergroting van de ASET. Immers, door naast rook en warmte te bufferen in de hete zone bovenin de brandruimte ook rook en warmte af te voeren wordt de buffer voor rook en warmte groter en zal het langer duren voordat in de ruimte niet meer aan de toetscriteria voor veilig vluchten wordt voldaan.

In dit geval wordt een natuurlijke RWA-installatie toegepast als verbetermaatregel. Dit houdt in dat rook- en warmte-afvoer op basis van natuurlijke trek (thermische drukverschillen) tot stand komt en dat ook de luchttoevoer tot de brandruimte op natuurlijke wijze plaatsvindt.

De luchttoevoer kan worden gerealiseerd via de via entreepartijen van de markthal, waardoor in totaal  $4 \times 9 = 36 \text{ m}^2$  netto doorlaat voor luchttoevoer aanwezig is. Bij een dergelijke luchttoevoeroppervlakte kan als maximale RWA-oppervlakte in het dak circa  $108 \text{ m}^2$  netto doorlaat worden gerealiseerd. Een grotere netto doorlaat voor de RWA is niet efficiënt meer.

De aerodynamische oppervlakte is kleiner dan de geometrische netto doorlaat. Dat wordt veroorzaakt door de contractiecoëfficiënt (Bernouilli coëfficiënt). Hiervoor wordt een realistische waarde van 0,7 gehanteerd.

De RWA installatie wordt opengestuurd op basis van automatische detectie. Voor detectie en aansturing van de RWA installatie wordt een tijdsbestek van 2 minuten gehanteerd, met een variatiecoëfficiënt van 0,3

Bij toepassing van de bovenstaande kenmerken voor de RWA installatie bedraagt de maatgevende ASET 15,2 min. De RSET blijft onveranderd op 7,7 min. Er is dus een marge aanwezig van  $ASET-RSET = 7,5 \text{ min}$ .

Voor de ASET is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de rooklaagtemperatuur, het maatgevende criterium.

Tabel 4: Gevoeligheidsanalyse op ASET bij toepassing van RWA

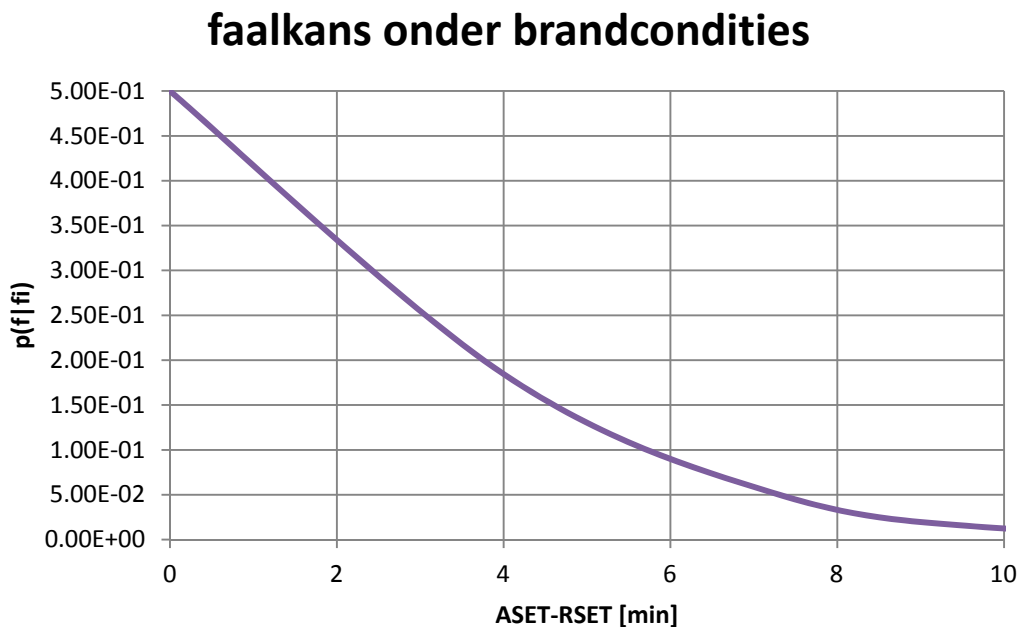
ASET	T < 200 °C
Referentiecondities, ASET (gemiddeld)	15,2 min
<b>Variantie per stochast:</b>	
- Vuurbelasting	0,00
- Brandvermogensdichtheid	2,25
- Tijdconstante	8,51
- Bronhoogte	0,84
- Detectie en aansturing RWA	0,00
<b>Variantie totaal:</b>	11,60

Tabel 5: Betrouwbaarheid van (ASET-RSET) bij toepassing van RWA

ASET-RSET	T < 200 °C
Referentiecondities, ASET-RSET	7,5 min
<b>Variantie:</b>	
- Variantie (Var)	19,82 min <sup>2</sup>
- Standaardafwijking ( $\sigma$ )	4,45 min

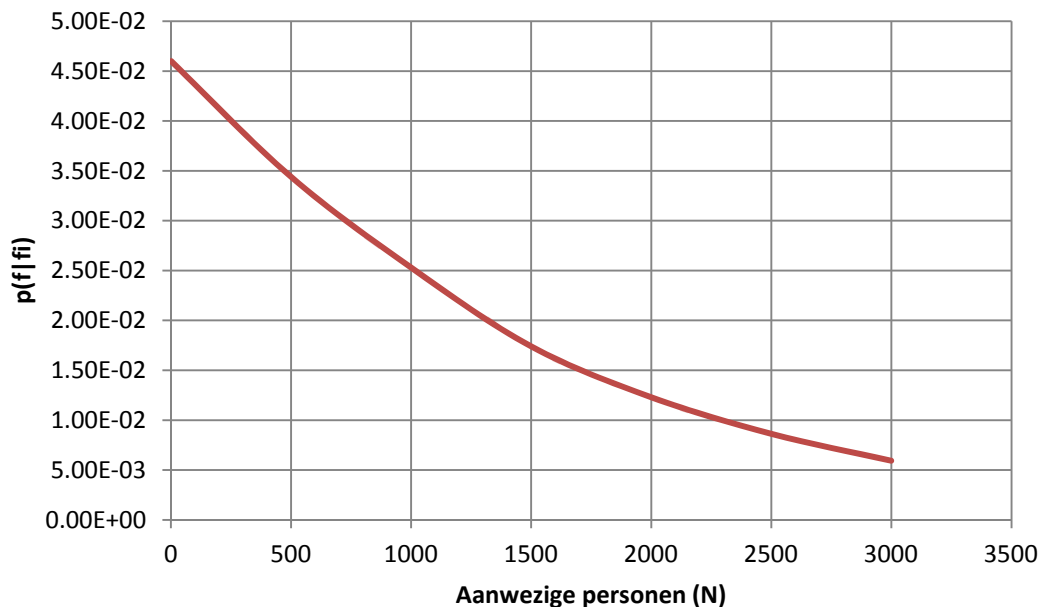
Met dit resultaat kan voor het criterium rooklaagtemperatuur de cumulatieve kansverdeling voor (ASET-RSET) worden vastgesteld. Dit is grafisch weergegeven in figuur 9. Wanneer (ASET-RSET) wordt toegepast op de laatste individuele gebouwgebruiker leidt de marge van 7,5 min. tot een faalkans van circa  $4,60 \cdot 10^{-2}$ . Wanneer (ASET-RSET) wordt toegepast op de totale populatie gebouwgebruikers bedraagt de faalkans circa  $1,26 \cdot 10^{-2}$ .

In beide gevallen wordt voldaan aan de acceptabele faalkans onder brandcondities van  $5,24 \cdot 10^{-2}$ .



Figuur 9: Faalkans van het criterium rooklaagtemperatuur in geval van brand bij toepassing van een RWA installatie, in relatie tot de marge tussen ASET en RSET.

## faalkans onder brandcondities



*Figuur 10: Faalkans van het criterium rooklaagtemperatuur in geval van brand bij toepassing van een RWA installatie, in relatie tot het aantal aanwezige gebouwgebruikers.*

### Verbetering van de vluchtveiligheid met een automatische blusinstallatie

Het toepassen van een automatische blusinstallatie (sprinklerinstallatie) betekent eveneens een verbetering van de vluchtveiligheid door vergroting van de ASET. Immers, doordat de brand na sprinkleractivering beheerst blijft tot een lokale brand van beperkte omvang zal het langer duren voordat in de ruimte niet meer aan de toetscriteria voor veilig vluchten wordt voldaan.

Vanwege de hoogte van de ruimte wordt een quick-response sprinkler toegepast met een response time index (RTI) van maximaal  $50 \text{ (m.s)}^{0.5}$ . Als activeringstemperatuur wordt  $79 \text{ }^\circ\text{C}$  gehanteerd. Het sprinklernet bevindt zich op 7 meter boven de vloer. De sprinklerkoppen zijn geprojecteerd in een raster van  $3 \times 3$  meter. Dit levert volgens het Detact algoritme (Alpert, 1972) een activeringstijd op van 209 s (3:29). RTI en activeringstemperatuur zijn in de gevoeligheidsanalyse niet gevarieerd omdat het om producteigenschappen gaat die relatief betrouwbaar zijn.

Bij toepassing van de bovenstaande kenmerken voor de automatische blusinstallatie bedraagt de maatgevende ASET 60 min. De RSET blijft onveranderd op 7,7 min. Er is dus een marge aanwezig van  $\text{ASET-RSET} = 52,3$  min.

Voor de ASET is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de rookvrije hoogte, in dit geval het maatgevende criterium.

Tabel 6: Gevoeligheidsanalyse op ASET bij toepassing van automatische blusinstallatie

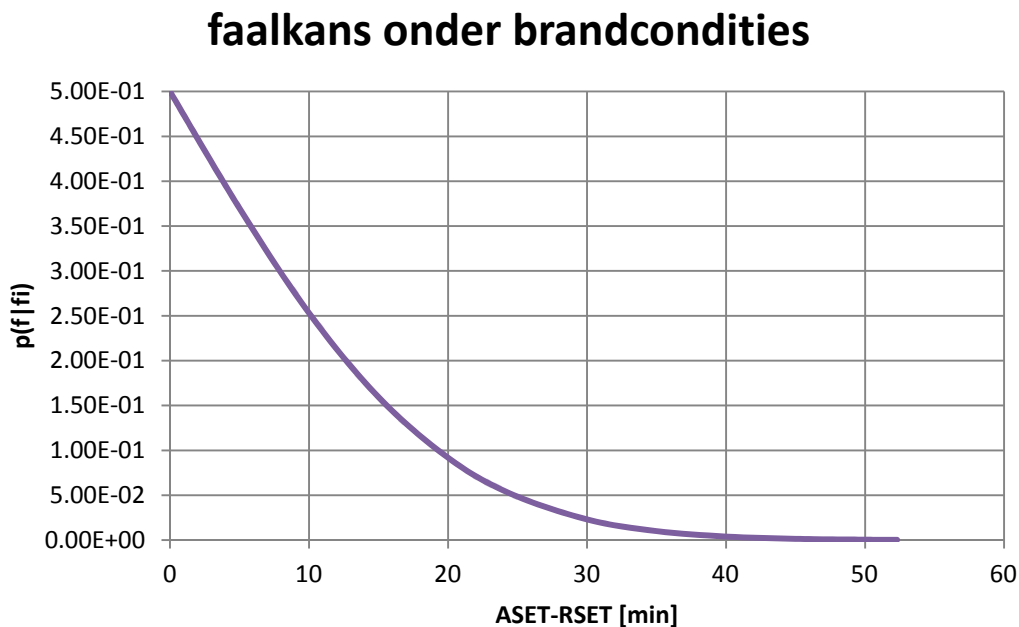
ASET	H > 2,5 m
Referentiecondities, ASET (gemiddeld)	60,0 min
<b>Variantie per stochast:</b>	
- Vuurbelasting	0,00
- Brandvermogensdichtheid	144,0
- Tijdconstante	25,0
- Bronhoogte	49,0
<b>Variantie totaal:</b>	218,0

Tabel 7: Betrouwbaarheid van (ASET-RSET) bij toepassing van automatische blusinstallatie

ASET-RSET	H > 2,5 m
Referentiecondities, ASET-RSET	52,3 min
<b>Variantie:</b>	
- Variantie (Var)	226,2 min <sup>2</sup>
- Standaardafwijking ( $\sigma$ )	15,0 min

Met dit resultaat kan voor het criterium rookvrije hoogte de cumulatieve kansverdeling voor (ASET-RSET) worden vastgesteld. Dit is grafisch weergegeven in figuur 11. Wanneer (ASET-RSET) wordt toegepast op de laatste individuele gebouwgebruiker leidt de marge van 52,3 min. tot een faalkans van circa  $2,53 \cdot 10^{-4}$ . Wanneer (ASET-RSET) wordt toegepast op de totale populatie gebouwgebruikers bedraagt de faalkans circa  $1,32 \cdot 10^{-4}$ .

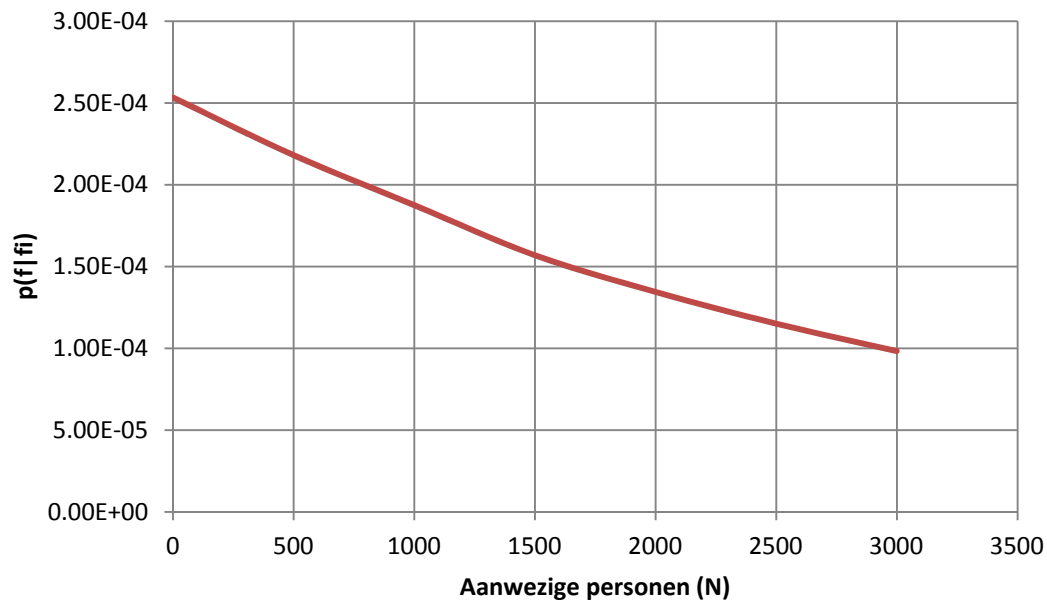
In beide gevallen wordt ruimschoots voldaan aan de acceptabele faalkans onder brandcondities van  $5,24 \cdot 10^{-2}$ .



Figuur 11: Faalkans van het criterium rooklaagtemperatuur in geval van brand bij toepassing van een automatische blusinstallatie, in relatie tot het aantal aanwezige gebouwgebruikers.



## faalkans onder brandcondities



Figuur 12: Faalkans van het criterium rooklaagtemperatuur in geval van brand bij toepassing van een automatische blusinstallatie, in relatie tot de marge tussen ASET en RSET.

### Conclusie

In de beschouwde casus markthal wordt bij toepassing van zowel een actieve rookbeheersingsinstallatie (RWA) als een actieve brandbeheersingsinstallatie (sprinkler) de vluchtveiligheid verbeterd ten opzichte van de situatie met enkel passieve rookbuffering. De mate van verbetering (verkleining van de faalkans) is weergegeven in tabel 8. Die vergelijking is uitgevoerd op basis van de berekende faalkansen voor de totale gebouwpopulatie.

Tabel 8: Vergelijking van passieve rookbuffering (referentie) met additionele actieve brandbeveiligingsinstallatie

	ASET [min]	ASET/RSET [-]	ASET-RSET [min]	P(f fi) (totale populatie) [-]	P/Pref (risicofactor) [-]
rookbuffering	13.9	1,81	6.2	$2,63 \cdot 10^{-2}$ (Pref)	<b>1</b>
Automatische brandbeheersingsinstallatie (sprinkler)	60.0	7,79	52.3	$1,32 \cdot 10^{-4}$	<b>0,005</b>
Automatische rookbeheersingsinstallatie (RWA)	15.2	1,97	7.5	$1,26 \cdot 10^{-2}$	<b>0,48</b>

Uit tabel 8 blijkt dat de opvatting dat een automatische brandbeheersingsinstallatie alleen waarde heeft voor vermindering van de thermische belasting op draag- en scheidingsconstructies en niet van waarde is voor de vluchtveiligheid een misvatting is. De

vluchtveiligheid in de markthal wordt juist het meest verbeterd bij toepassing van een automatische brandbeheersingsinstallatie. De verbetering is zo groot dat ook de veiligheid van hulpverleners (brandweer) daardoor geborgd kan worden, zodat een offensieve brandweerinzet mogelijk is. Wellicht is dat met een automatische rookbeheersingsinstallatie ook mogelijk, wanneer de toevoer- en afvoeropeningen groter worden gedimensioneerd.

Uiteraard moet het resultaat van tabel 8 genuanceerd worden. Het resultaat is alleen geldig voor de beschouwde casus. Voor de ASET is gebruik gemaakt van een twee zone model, terwijl er na activering van de automatische brandbeheersingsinstallatie kans op opmenging is en verstoring van de pluim. Dit effect is buiten beschouwing gelaten. De RSET is op basis van eenvoudige rekenregels bepaald. Een meer geavanceerd evacuatiemodel kan tot afwijkende resultaten leiden en bovendien ook meer onzekere randcondities (stochasten) impliceren.

Echter, dit doet geen afbreuk aan de hier gepresenteerde methodiek. De methodiek geeft duidelijk weer dat een gevoeligheidsanalyse voor de aanwezige onzekere randcondities (stochasten) onontbeerlijk is in een doelgerichte beschouwing en toetsing.

## Disclaimer

De hier gegeven consequenties zijn alleen geldig voor de beschouwde casus en mogen niet generiek worden geïnterpreteerd. De gehanteerde modellen voor de bepaling van de ASET en RSET zijn eenvoudig en voor discussie vatbaar. De stochasten in de probabilistische uitwerking zijn lineair verondersteld, hierop is geen specifieke verdeling toegepast.

© TU Eindhoven, Saxion Enschede, april 2017.

## Bibliografie

Alpert, R.L. (1972): *Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors*; Fire Technology 8, pp. 181 – 195

Hagen, R.R., L. Witloks (2014): *The basis for fire safety – substantiating fire protection in buildings*; Arnhem, Instituut Fysieke Veiligheid

Herpen, R.A.P. van (2013): *Doelen en regelgeving voor brandveiligheid – consequenties voor een FSE-benadering*; Bouwregels in de praktijk 2013-sept, pp. 32 – 36

Herpen, R.A.P. van, P.H.E. van de Leur, A.C.W.M. Vrouwenfelder, N.P.M. Scholten, A.F. Hamerlinck (2014): *Risicogebaseerde brandveiligheid van draagconstructies*; Zwolle, Nieman R.I.

Kobes, M. (2008): *Zelfredzaamheid bij brand; kritische factoren voor het veilig vluchten uit gebouwen*; Den Haag, Boom Juridische Uitgevers

Ministerie van VROM (2008): *Visie op brandveiligheid; Gedeelde verantwoordelijkheid en heldere kaders vanuit een risicobenadering*; Den Haag, Ministerie van VROM

NEN 6055 (2011): *Thermische belasting op basis van het natuurlijk brandconcept – Bepalingsmethode*; Delft, Nederlands Normalisatie Instituut

NEN-EN 1990+A1+A1/C2+NB (2011): *Eurocode – Grondslag van het constructief ontwerp*; Delft, Nederlands Normalisatie Instituut

CBS Statline (2015): *Brandweer; branden, slachtoffers en reddingen, personeel, materieel, kosten*; <http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?DM=SLNL&PA=37511&D1=0-149&D2=0&D3=15-27&VW=T>

---

<sup>i</sup> Onderzoekslijn 2014-2016: Doelgerichte brandveiligheid, Saxion Hogeschool, Enschede. [http://www.saxion.nl/leefomgeving/site/onderzoek/lectoraten/innovatieve\\_technologie\\_in\\_de\\_bouw/brandveiligheid-in-de-bouw/](http://www.saxion.nl/leefomgeving/site/onderzoek/lectoraten/innovatieve_technologie_in_de_bouw/brandveiligheid-in-de-bouw/)

<sup>ii</sup> Onderzoekslijn 2013-2016: Risicodoelen voor brandveiligheid, kwantificering en relatie met prescriptieve voorschriften, Technische Universiteit Eindhoven. <http://www.fellowfse.nl/>