

Thermische belasting door brand op scheidingsconstructies
- probabilistische equivalente brandduur



L.C. Quaas, BSc.
R.A.P. van Herpen, MSc. FIFireE

Eindhoven, februari 2017

Inhoud

| | |
|---|----|
| 1. Introductie en doelstelling | 3 |
| 1.1 Doelstelling | 3 |
| 1.2 Onderzoeksvragen..... | 3 |
| 2. Methode | 4 |
| 2.1 Geometrie en parameters | 4 |
| 2.2 Natuurlijk brandconcept en gevoeligheidsanalyse | 4 |
| 2.3. Equivalente brandduur..... | 6 |
| 2.4. Probabilistische benadering | 6 |
| 3. Resultaten..... | 7 |
| 3.1. Basisberekening en equivalente brandduur | 7 |
| 3.2 Gevoeligheidsanalyse | 9 |
| 3.3 Probabilistische uitwerking | 10 |
| 4. Conclusie | 14 |
| 5. Bibliography..... | 16 |
| Appendix..... | 17 |
| A.1 Model details..... | 18 |
| A.2 Model geometrie | 20 |
| B. Equivalente brandduur..... | 21 |
| C. Probabilistische uitwerking | 24 |

1. Introductie en doelstelling

In Bouwbesluit 2012 wordt voor brandwerende scheidingsconstructies vaak een brandwerendheid van 60 minuten geëist. Dat houdt in dat de betrokken constructies bij een thermische belasting volgens de standaard brandkromme (SBK) 60 minuten standhouden op van toepassing zijnde criteria:

- E: vlamdichtheid (integriteit)
- I: oppervlaktetemperatuur (thermische isolatie)
- W: stralingstemperatuur (warmtestralingsflux)

Onder realistische brandcondities (bepaald volgens het natuurlijk brandconcept [1]) kan de thermische belasting sterk afwijken van die volgens de standaard brandkromme (SBK). De vraag is dan ook of een constructie met een brandwerendheid van 60 min. SBK voldoende brandwerend is om de natuurlijke brand te weerstaan. Dat wordt bepaald door brandstofkenmerken en ruimtekenmerken. Door rekening te houden met onzekerheden in deze kenmerken is het mogelijk om de kans op falen onder een thermische belasting van een natuurlijke brand in te schatten.

1.1 Doelstelling

Allereerst wordt de thermische belasting van een brand in een brandcompartiment bepaald op basis van het natuurlijk brandconcept. Voor het brandcompartiment wordt als referentie een 250 m² groot compartiment met een hoogte van 3 meter gehanteerd. Die thermische belasting wordt uitgedrukt in minuten SBK. Vervolgens wordt op basis van een gevoeligheidsanalyse vastgesteld welke stochasten bepalend zijn voor de equivalente brandduur (op basis van de specifieke variantie). Door die stochasten alle afzonderlijk te variëren volgt uit de sommatie van de specifieke varianties de variantie van de uitkomst, de equivalente brandduur in minuten SBK. Daarmee ligt de kansverdeling van de thermische belasting vast. Op basis hiervan kan de faalkans van de scheidingsconstructie met een gegeven prestatie in minuten brandwerendheid SBK worden ingeschat.

1.2 Onderzoeksvragen

De doelstelling leidt tot de volgende onderzoeksvragen:

a) Wat is de thermische belasting van een natuurlijke brand op de scheidingsconstructies van het brandcompartiment?

b) Welke stochastische randcondities zijn hiervoor bepalend?

c) Wat is de kans op falen van de scheidingsconstructies van het brandcompartiment, met een gegeven prestatie in minuten brandwerendheid SBK ?

2. Methode

Op basis van bouwkundige kenmerken en brandstofkenmerken is met een natuurlijk brandconcept een basissimulatie uitgevoerd en de thermische belasting op de scheidingsconstructies bepaald.

Vervolgens worden de verschillende onzekere randcondities (stochasten) gevarieerd. De invloed van die variatie op de equivalente brandduur wordt onderzocht. Uiteindelijk gaat het om 7 varianten in twee verschillende verbrandingsmodellen (extended fire duration / external flaming), die kunnen worden gezien als de twee fysische uitersten in geval van een zuurstofbeheerste post flashover brand.

Het verbrandingsmodel extended duration houdt in dat bij een zuurstofbeheerste brand vanwege de vermogensreductie door zuurstofgebrek ook de pyrolysesnelheid van de brandstof wordt gereduceerd. Het duurt daardoor langer voordat alle brandstof gebruikt is. Het verbrandingsmodel external flaming houdt in dat bij een zuurstofbeheerste brand de pyrolysesnelheid van de brandstof niet wordt gereduceerd, waardoor de verbrandingsgassen in de brandruimte nog brandbaar product bezitten. Bij uitstroming van die gassen uit een gevelopening wordt het brandbaar product alsnog verbrand in de uitslaande vlam. De brandduur wordt nu niet verlengd; een deel van de energie komt buiten de brandruimte vrij in de uitslaande vlam.

2.1 Geometrie en parameters

Voor het natuurlijk brandconcept is gebruik gemaakt van een rechthoekig compartiment van 250 m² met een plat dak op een hoogte van 3 m. In twee tegenover liggende wanden zijn daglichtopeningen van elk 16 m² geplaatst. De precieze afmetingen van en materiaal specificaties zijn in appendix A terug te vinden.

Voor de brandstof is uitgegaan van een cellulosebrandstof, verbrandingswaarde 17,5 MJ/kg, stoichiometrische constante 1,27 kg/kg en een referentie vermogensdichtheid van 250 kW/m². Het totale referentievermogen in het compartiment bedraagt dus 62,5 MW. Vanwege de significantie van de post flashover brand is in de brandruimte uitgegaan van homogene opmenging.

2.2 Natuurlijk brandconcept en gevoeligheidsanalyse

De bouwkundige parameters en brandstofparameters zijn in een natuurlijk brandconcept volgens NEN 6055 ingevoerd. Daarvoor is het programma Ozone V.2.2 [1] gehanteerd. De risicofactoren die in Ozone kunnen worden toegepast zijn alle op 1 gesteld. Daarmee is de referentieberekening een zuiver fysisch model, waarop een apart risicomodel moet worden toegepast. Omdat de pre flashover fase van geen betekenis is, is alleen de post flashover fase beschouwd met een stationair brandvermogen (compartimentsbrand).

Het risicomodel dat nu achteraf wordt toegepast is gebaseerd op een gevoeligheidsanalyse op de belangrijkste onzekere parameters (stochasten). Voordat er verschillende variaties in randcondities onderzocht kunnen worden, moet er een standaard simulatie uitgevoerd. De waarden die gebruikt zijn voor de standaard simulatie zijn in tabel 1 terug te vinden onder de kolom "gemiddeld". De

basisinvoer is gesimuleerd voor een “extended fire duration” en “external flaming” verbrandingsmodel.

In de gevoeligheidsanalyse zijn 7 stochastische randcondities beschouwd, die verband houden met de brandstofkenmerken. De bouwkundige kenmerken bezitten minder onzekerheid. Alleen de daglichtopeningen bezitten onzekerheid in verband met het bezwijkgedrag van glas. Hiervoor is aangehouden dat alle glas bezwiken is, in elk geval na flashover. Daardoor blijven alleen stochasten over die met brandstofkenmerken te maken hebben. Daarvan is in de gevoeligheidsanalyse steeds één waarde gevarieerd ten opzichte van de basisinvoer. Dit proces wordt uitgevoerd voor beide verbrandingsmodellen.

Voor elke variant wordt de thermische belasting vanuit de brandruimte uitgedrukt in de equivalente brandduur volgens SBK, zoals beschreven in paragraaf 2.3. De variatie in equivalente brandduren leidt via een probabilistische benadering [3] tot een standaardafwijking in de equivalente brandduur. Dit is kort beschreven in paragraaf 2.4. Voor de equivalente brandduur wordt op basis van de centrale limietstelling een normale verdeling verwacht. Met de standaardafwijking kan de betrouwbaarheid van de thermische belasting worden bepaald en vervolgens de faalkans van een brandwerende scheidingsconstructie worden vastgesteld.

Tabel 1. Stochasten en variaties

| Variant | Stochast | Gemiddeld AVG | Standaardafw. (geschat) SD | Invoerwaarde AVG + SD |
|----------------|--------------------------------|--------------------------|---|----------------------------------|
| 1. | Brandduur | 30,4 min | 15,2 min | 45,6 min |
| 2. | Brandvermogen | 62,5 MW | 31,25 MW | 93,75 MW |
| 3. | Bronhoogte | 1,00 m | 0,75 m | 1,75 m |
| 4. | Brandstofhoogte | 2,00 m | 0,45 m | 2,45 m |
| 5. | Verbrandingswaarde | 17,5 MJ/kg | 5,25 MJ/kg | 22,75 MJ/kg |
| 6. | stoichiometr. const. | 1,27 kg/kg | 0,38 kg/kg | 1,65 kg/kg |
| 7. | Verbrandingsefficiëntie | 0,8 | 0,2 | 1,0 |

De vuurlast is als stochast niet herkenbaar in tabel 1, maar maakt hier wel impliciet onderdeel van uit. De vuurlast is het product van brandduur en brandvermogen en in tabel 1 daarom ook in deze stochasten uitgesplitst. In dit geval bedraagt de vuurlast dus 114 GJ (zie tabel 1), dit komt overeen met 6000 kg v.e. (vurenhoutequivalent). Bij een oppervlakte van 250 m² bedraagt de (variabele) vuurbelasting in deze casus 24 kg/m² v.e. (456 MJ/m²).

2.3. Equivalente brandduur

Het resultaat van elke simulatie wordt uitgedrukt in equivalente brandduur, de hoeveelheid energie die volgens de standaard brandkromme (SBK) wordt opgelegd. De omrekening van de energie-inhoud van een brandruimte onder een natuurlijk brandconcept volgens NEN 6055 naar de standaard brandkromme (SBK) is gebaseerd op een energievergelijking van die brandruimte. Zie hiervoor appendix B.

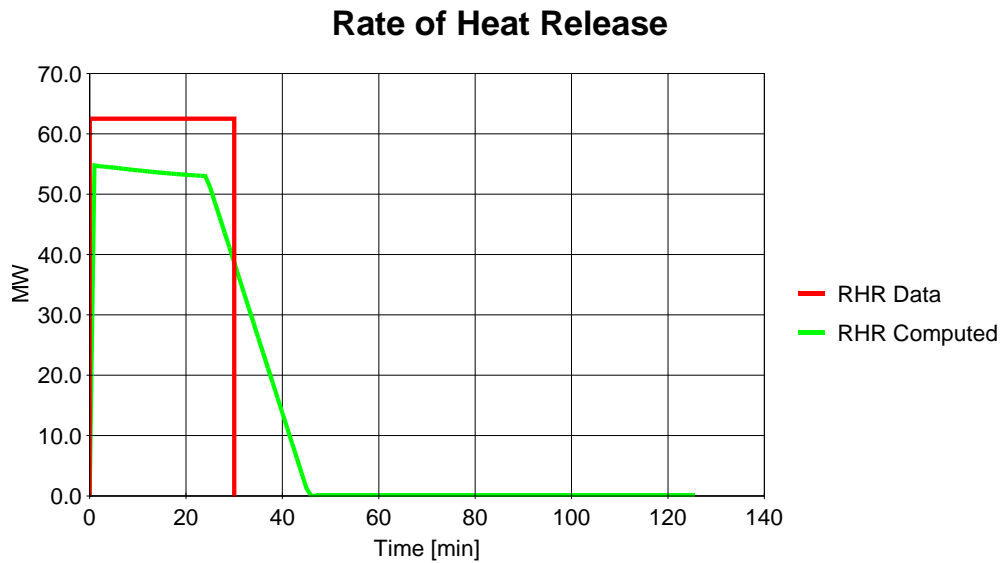
2.4. Probabilistische benadering

Iedere randconditie heeft zijn eigen standaard afwijking. Door alle randcondities afzonderlijk te variëren met hun standaardafwijking kan de standaardafwijking op het resultaat worden bepaald. Het resultaat is een normale kansverdeling van de thermische belasting. Met behulp van die normale verdeling kan de kans op falen van een (brandwerende) scheidingsconstructie worden bepaald. [g]

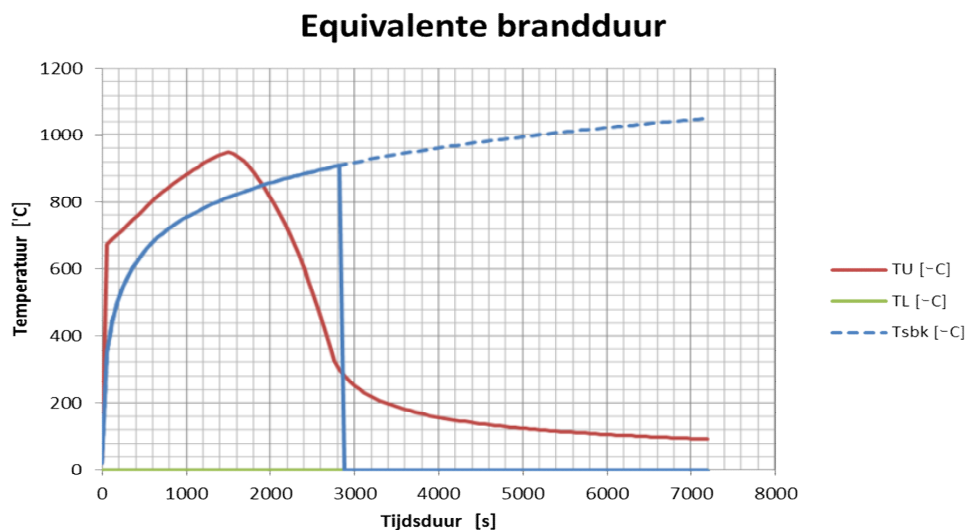
3. Resultaten

3.1. Basisberekening en equivalente brandduur

Figuur 1 laat zien dat met het verbrandingsmodel “extended fire duration” het vermogen wordt gereduceerd vanwege zuurstoftekort, waardoor de brandduur wordt verlengd. Onder er vermogenscurve is tevens de temperatuurcurve met de vertaling in equivalente brandduur weergegeven.



Analysis Name: Basic input sensitivity analysis - extended duration combustion model

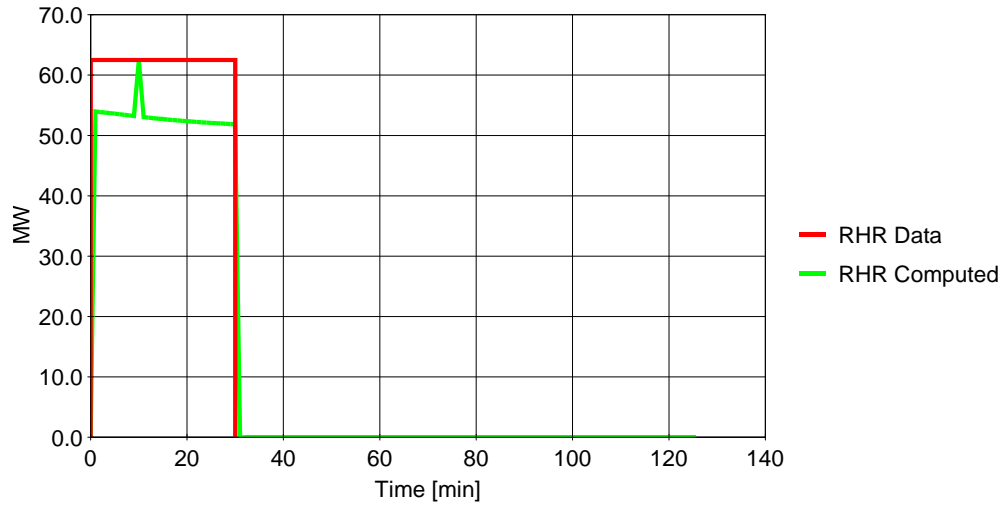


Figuur 1. Extended fire duration basis situatie

Bij het verbrandingsmodel “external flaming” wordt duidelijk dat het vermogen eveneens afneemt, maar dat de brandduur niet wordt verlengd (figuur 2). Het verschil in opgelegd en gerealiseerd

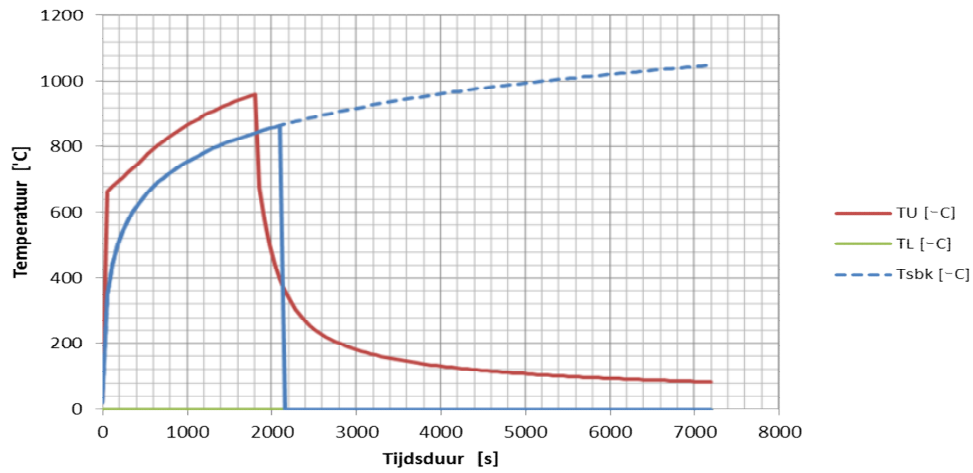
vermogen komt nu vrij in uitslaande vlammen buiten de brandruimte. Onder de vermogenscurve is de temperatuurcurve met de vertaling in equivalente brandduur weergegeven

Rate of Heat Release



Analysis Name: Basic input sensitivity analysis - extended duration combustion model

Equivalente brandduur



Figuur 2. External flaming basis situatie

3.2 Gevoeligheidsanalyse

Voor de in paragraaf 2.2 aangegeven randcondities is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. In de gevoeligheidsanalyse is de randconditie gevarieerd met de (geschatte) standaardafwijking. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn uitgedrukt in equivalente brandduur en weergegeven in tabel 2.

Tabel 2. Thermische belasting in equivalente brandduur voor basismodel en de verschillende varianten voor beide verbrandingsmodellen

| Variatie | Stochast | Extended duration Eq. brandduur t [min] | External Flaming Eq. brandduur t [min] |
|-------------|----------------------|---|--|
| Basisinvoer | - | 47 | 35 |
| 1 | Brandduur | 70 | 52 |
| 2 | Brandvermogen | 47 | 23 → 49* |
| 3 | Bronhoogte | 47 | 35 |
| 4 | brandstofhoogte | 47 | 35 |
| 5 | verbrandingswaarde | 45 → 50* | 40 |
| 6 | stoichiometr. const. | 49 | 30 → 39* |
| 7 | verbrandingseff. | 45 → 50* | 40 |

*Deze waarden zijn het resultaat van een tweede simulatie

Bij enkele randcondities bleek de toegepaste standaardafwijking een positieve invloed te hebben, dus de equivalente brandduur te verkorten. Deze simulaties werden herhaald met een negatieve standaardafwijking. Daarmee is elke randconditie in ongunstige zin gevarieerd. Het resultaat bij toepassing van een negatieve standaardafwijking is gekenmerkt met “*”.

In een onderlinge vergelijking valt het volgende op.

Voor het “extended fire duration”-model blijken een lagere verbrandingswaarde en een lagere verbrandingsefficiëntie tot een langere equivalente brandduur te leiden.

Voor het “external flaming”-model blijken een lager brandvermogen en een lagere stoichiometrische constante tot een langere equivalente brandduur te leiden.

Beide modellen worden vooral beïnvloed door de brandduur. De bronhoogte en de brandstofhoogte hebben in dit onderzoek in beide modellen een verwaarloosbare invloed.

3.3 Probabilistische uitwerking

Op basis van deze gevoeligheidsanalyse kan bepaald worden hoe betrouwbaar 60 minuten brandwerende constructies zijn, d.w.z. hoe groot de faalkans is in een natuurlijk brandconcept.

In dit onderzoek zijn de natuurlijke brandcurves vertaald in een equivalente brandduur SBK, waardoor onderlinge vergelijking mogelijk is.

Met de equivalente brandduren van alle stochastische randcondities is het mogelijk om de standaardafwijking van het resultaat te bepalen. Hieruit kan een cumulatieve kansverdeling worden bepaald waaruit de kans is dat een 60 minuten brandwerende constructie voldoende brandwerend is voor de specifieke natuurlijke brand.

Met dezelfde cumulatieve kansverdeling kan ook de betrouwbaarheid van 20 en 30 minuten brandwerende constructies worden bepaald. Dit is een interessant onderdeel aangezien dergelijke brandwerende scheidingsconstructies ook in het Bouwbesluit worden geëist. [f]

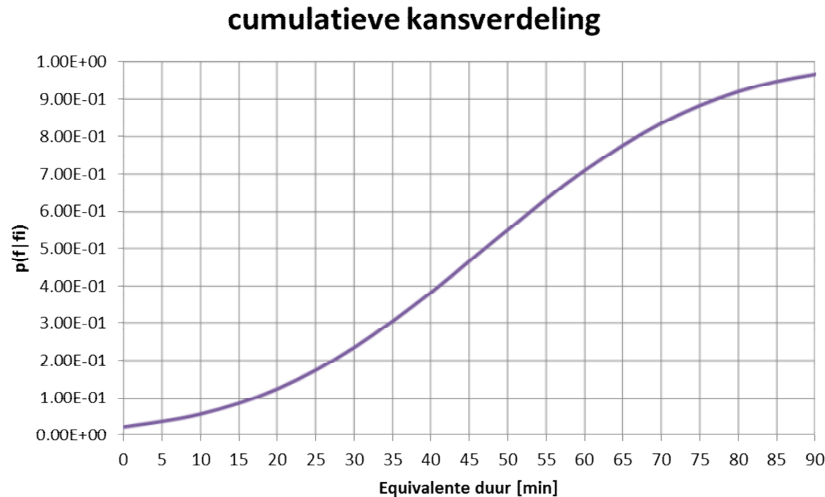
In deze paragraaf wordt de betrouwbaarheid van brandscheidingen op basis van de twee verbrandingsmodellen “extended fire duration” en “external flaming” vastgesteld.

3.3.1 Extended Fire Duration

De standaard afwijking op basis van het verbrandingsmodel extended fire duration met de toegepaste variaties bedraagt 23,5 minuten bij een gemiddelde waarde van 47 minuten (SBK). De cumulatieve kansverdeling is te vinden in tabel 3 en de bijbehorende figuur 3.

Tabel 3. Cumulatieve kansverdeling extended fire duration

| normale verdeling, gegeven de brand | | | |
|-------------------------------------|---------|------------|---------|
| t [min] | s(t) | beta(f fi) | p(f fi) |
| 0 | 23.4734 | 2.002 | 0.023 |
| 10 | 23.4734 | 1.576 | 0.057 |
| 20 | 23.4734 | 1.150 | 0.125 |
| 30 | 23.4734 | 0.724 | 0.234 |
| 40 | 23.4734 | 0.298 | 0.383 |
| 50 | 23.4734 | -0.128 | 0.551 |
| 60 | 23.4734 | -0.554 | 0.710 |
| 70 | 23.4734 | -0.980 | 0.836 |
| 80 | 23.4734 | -1.406 | 0.920 |
| 90 | 23.4734 | -1.832 | 0.967 |
| 100 | 23.4734 | -2.258 | 0.988 |



Figuur 3. Cumulatieve kansverdeling extended fire duration

Uit tabel 3 en figuur 3 blijkt dat de faalkans van een constructie die 47 minuten (SBK) brandwerend is, dus precies aansluit bij de thermische belasting van de natuurlijke brand onder gemiddelde randcondities, 50 % bedraagt. Vanwege de grote standaardafwijking is de onzekerheid in het resultaat groot.

Wanneer de constructie 60 minuten (SBK) brandwerend is neemt de betrouwbaarheid toe, er is tenslotte 13 minuten marge ten opzichte van de thermische belasting van de natuurlijke brand onder gemiddelde randcondities. De kans dat de thermische belasting ten gevolge van de natuurlijke brand niet groter is dan 60 minuten (SBK) is 71 %. Met andere woorden: een 60 minuten brandwerende constructie is in dit natuurlijk brandconcept 71 % betrouwbaar, de faalkans op thermische belasting bedraagt dus 29 %.

Op dezelfde wijze kan worden afgeleid dat een 30 minuten (SBK) brandwerende constructie een betrouwbaarheid bezit op de thermische belasting van 23 % (faalkans 77 %) en een 20 minuten (SBK) brandwerende constructie een betrouwbaarheid bezit van 13 % (faalkans 87 %).

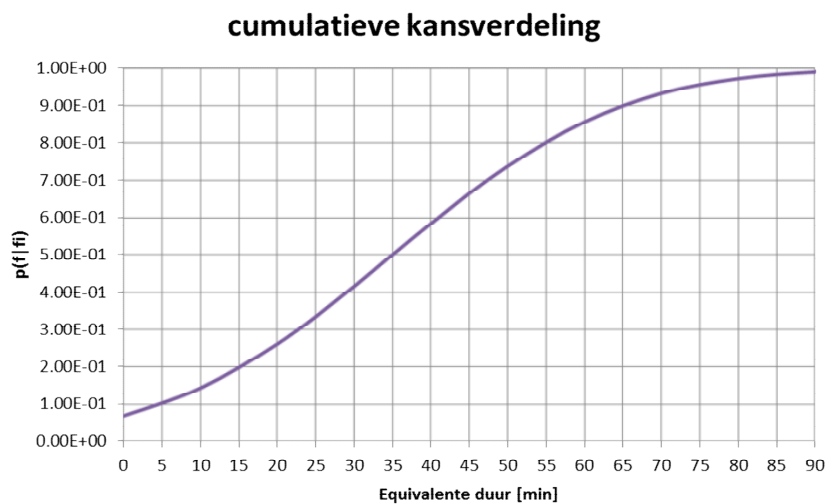
Uiteraard zijn de genoemde betrouwbaarheden en faalkansen alleen geldig voor de hier gehanteerde natuurlijke brand. Bij andere ruimten, andere openingen en andere brandstoffen zullen betrouwbaarheden en faalkansen andere waarden aannemen.

3.3.2 External Flaming

De standaard afwijking op basis van het verbrandingsmodel external flaming met de toegepaste variaties bedraagt 23,5 minuten bij een gemiddelde waarde van 35 minuten (SBK). De cumulatieve kansverdeling is te vinden in tabel 4 en de bijbehorende figuur 4.

Tabel 4. Cumulatieve kansverdeling external flaming

| normale verdeling, gegeven de brand | | | |
|-------------------------------------|---------|------------|---------|
| t [min] | s(t) | beta(f fi) | p(f fi) |
| 0 | 23.4734 | 1.491 | 0.068 |
| 10 | 23.4734 | 1.065 | 0.143 |
| 20 | 23.4734 | 0.639 | 0.261 |
| 30 | 23.4734 | 0.213 | 0.416 |
| 40 | 23.4734 | -0.213 | 0.584 |
| 50 | 23.4734 | -0.639 | 0.739 |
| 60 | 23.4734 | -1.065 | 0.857 |
| 70 | 23.4734 | -1.491 | 0.932 |
| 80 | 23.4734 | -1.917 | 0.972 |
| 90 | 23.4734 | -2.343 | 0.990 |
| 100 | 23.4734 | -2.769 | 0.997 |



Figuur 4. Cumulatieve kansverdeling external flaming

Uit tabel 4 en figuur 4 blijkt dat de faalkans van een constructie die 35 minuten (SBK) brandwerend is, dus precies aansluit bij de thermische belasting van de natuurlijke brand onder gemiddelde randcondities, 50 % bedraagt. Vanwege de grote standaardafwijking is de onzekerheid in het resultaat groot.

Wanneer de constructie 60 minuten (SBK) brandwerend is neemt de betrouwbaarheid toe, er is tenslotte 25 minuten marge ten opzichte van de thermische belasting van de natuurlijke brand onder gemiddelde randcondities. De kans dat de thermische belasting ten gevolge van de natuurlijke brand niet groter is dan 60 minuten (SBK) is 86 %. Met andere woorden: een 60 minuten brandwerende constructie is in dit natuurlijk brandconcept 86 % betrouwbaar, de faalkans op thermische belasting bedraagt dus 14 %.

Op dezelfde wijze kan worden afgeleid dat een 30 minuten (SBK) brandwerende constructie een betrouwbaarheid bezit op de thermische belasting van 42 % (faalkans 58 %) en een 20 minuten (SBK) brandwerende constructie een betrouwbaarheid bezit van 26 % (faalkans 74 %).

Uiteraard zijn de genoemde betrouwbaarheden en faalkansen alleen geldig voor de hier gehanteerde natuurlijke brand. Bij andere ruimten, andere openingen en andere brandstoffen zullen betrouwbaarheden en faalkansen andere waarden aannemen.

3.3.3 Evaluatie

Het verbrandingsmodel external flaming levert een lagere gemiddelde waarde op voor de thermische belasting (AVG: in minuten SBK) dan het verbrandingsmodel extended fire duration. Dit is niet verwonderlijk, de thermische belasting is bij external flaming lager omdat een deel van de energie vrijkomt buiten de brandruimte in de uitslaande vlam.

De standaard afwijking in het resultaat (SD: in minuten SBK) is bij external flaming en extended fire duration exact gelijk. Dat is min of meer toevallig; relatief gezien is de standaard afwijking bij toepassing van het verbrandingsmodel external flaming ($SD/AVG= 0,67$) groter dan bij toepassing van het verbrandingsmodel extended fire duration ($SD/AVG= 0,50$).

Daarnaast valt op dat de standaard afwijking bij toepassing van het verbrandingsmodel extended fire duration vrijwel volledig bepaald wordt door de onzekerheid in de brandduur, bepaald door de vuurbelasting. Bij toepassing van het verbrandingsmodel external flaming is de onzekerheid in vuurbelasting eveneens bepalend, maar wordt die onzekerheid verdeeld over brandduur en referentievermogen. Ook verbrandingswaarde (MJ/kg), verbrandingsefficiëntie (-) en stoichiometrische constante (kg/kg) spelen nog een kleine rol bij het verbrandingsmodel external flaming.

In de praktijk ligt de werkelijkheid tussen beide verbrandingsmodellen. Bij grote openingen is het external flaming verbrandingsmodel het meest waarschijnlijk, terwijl bij kleine openingen in de scheidingsconstructie van de brandruimte het extended fire duration verbrandingsmodel meer waarschijnlijk is.

4. Conclusie

Op basis van de resultaten in hoofdstuk 3 en de daarin opgenomen probabilistische uitwerking (paragraaf 3.3) kunnen voor de beschouwde casus de geformuleerde onderzoeksvragen (paragraaf 1.2) worden beantwoord.

a) Wat is de thermische belasting van een natuurlijke brand op de scheidingsconstructies van het brandcompartiment?

De thermische belasting is niet alleen projectspecifiek maar hangt ook af van het gehanteerde verbrandingsmodel. Samengevat kan in deze casus worden gesteld:

- extended fire duration: gemiddelde thermische belasting 47 min. SBK met standaard afwijking van 23,5 min. SBK.
- external flaming: gemiddelde thermische belasting 35 min. SBK met standaard afwijking van 23,5 min. SBK.

b) Welke stochastische randcondities zijn hiervoor bepalend?

Bij beide verbrandingsmodellen is de vuurbelasting de maatgevende randconditie. Bij extended fire duration vertaalt zich dat in een thermische belasting met een grote gevoeligheid voor de brandduur; bij external flaming vertaalt zich dat in een thermische belasting met een belangrijke gevoeligheid voor brandduur en referentievermogen. Ook spelen brandstofkenmerken bij external flaming nog een kleine rol (verbrandingswaarde, stoichiometrische constante en verbrandingsefficiëntie).

c) Wat is de kans op falen van de scheidingsconstructies van het brandcompartiment, met een gegeven prestatie in minuten brandwerendheid SBK ?

Ook voor de kans op falen van de scheidingsconstructie met een gegeven prestatie in brandwerendheid (min. SBK) geldt dat de faalkans als gevolg van de in deze casus vastgestelde projectspecifieke thermische belasting afhankelijk is van het verbrandingsmodel. Zie tabel 5.

Tabel 5. Faalkans scheidingsconstructie als gevolg van de thermische belasting

| Constructie | Brandwerendheid [min. SBK] | Extended duration | External Flaming |
|----------------|-------------------------------|-------------------|------------------|
| | | Faalkans | Faalkans |
| Scheidingswand | 60 | 0.29 | 0.14 |
| | 30 | 0.77 | 0.58 |
| | 20 | 0.88 | 0.74 |

Nuancing

Bij de resultaten moet worden opgemerkt dat met een conservatieve inschatting van de spreiding in de verschillende stochasten gerekend is. Wanneer de belangrijkste stochasten in de gevoeligheidsanalyse met minder onzekerheid ingeschat kunnen worden neemt de onzekerheid in de uitkomst van de thermische belasting ook af.

Daarnaast is het van belang om in te kunnen schatten wat de waarschijnlijkheid van de verschillende verbrandingsmodellen is. External flaming lijkt het meest realistisch voor licht gesmoorde branden, terwijl extended fire duration het meest realistisch lijkt voor sterk gesmoorde branden.

5. Bibliography

- [a] Basis Brandveiligheid ,<http://www.brandveiligmetstaal.nl/pag/310/pagina.html>, geraadpleegd op 18/11/2016
- [b] W. van Ravenstein - Lesbrief normale verdeling - 2010
- [c] R.A.P. van Herpen - Begeleiding, mondelinge overdracht - 31/10/2016
- [d] R.A.P. van Herpen - Begeleiding, mondelinge overdracht - 17/11/2016
- [e] R.A.P. van Herpen - Begeleiding, digitale overdracht - 06/01/2017
- [f] Bouwbesluit 2012 - Hoofdstuk 2. Technische bouwvoorschriften uit het oogpunt van veiligheid, Afdeling 2.10. Beperking van uitbreiding van brand
- [g] R. van Herpen, P. van de Leur, R. Hamerlinck, N. Scholten, A. Vrouwenvelder – Risicogebaseerde brandveiligheid van draagconstructies – Nieman Zwolle, 2014

Tools

- [1] J. F. Carodin, J. M. Franssen, and D. I. Pintea, "Ozone v2.2." University of Liege, 2009.
- [2] R. A. P. van Herpen, excel spreadsheet "Equivalent fire duration." 06/10/2016.
- [3] R. A. P. van Herpen, excel spreadsheet "Probabilistische benadering." 06/10/2016.

Appendix

Thermische belasting door brand op scheidingsconstructies
- probabilistische equivalente brandduur

A.1 Model details

ANALYSIS STRATEGY

Selected strategy: 1 Zone Model

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: 7500 sec

Time Step for Printing Results: 60 sec

Maximum Time Step for Calculation: 10 sec

COMPARTMENT

Form of Compartment: Rectangular Floor

Height: 3 m

Depth: 10 m

Length: 25 m

Roof Type: Flat Roof

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] |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------|
|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------|

| | | | | |
|-------------------------------------|----|------|-----|------|
| Normal weight Concrete [EN1994-1-2] | 20 | 2300 | 1,6 | 1000 |
|-------------------------------------|----|------|-----|------|

Wall 1

| 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] | 10 | 2300 | 1,6 | 1000 |
|-------------------------------------|----|------|-----|------|

Openings

| Sill Height [m] | Soffit Height [m] | Width [m] | Variation |
|--------------------|----------------------|--------------|-----------|
|--------------------|----------------------|--------------|-----------|

| | | | |
|-----|-----|---|----------|
| 0,5 | 2,5 | 8 | Constant |
|-----|-----|---|----------|

Wall 2

| 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] | 10 | 2300 | 1,6 | 1000 |

Wall 3

| 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] | 10 | 2300 | 1,6 | 1000 |

Openings

| Sill Height [m] | Soffit Height [m] | Width [m] | Variation |
|--------------------|----------------------|--------------|-----------|
| 0,5 | 2,5 | 8 | Constant |

Wall 4

| 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] | 10 | 2300 | 1,6 | 1000 |

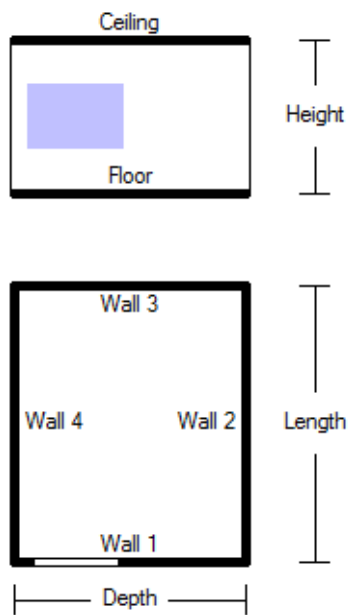
FIRE

| Fire Curve: | User Defined Fire | |
|--------------------|-------------------|----------------|
| Maximum Fire Area: | 250 | m ² |
| Fire Elevation: | 1 | m |
| Fuel Height: | 2 | m |

| Point | Time [sec] | RHR [MW] | mf [kg/sec] | Fire Area [m ²] |
|-------|---------------|-------------|----------------|--------------------------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 62.5 | 4.464 | 250 |
| 3 | 1800 | 62.5 | 4.464 | 250 |
| 4 | 1801 | 0 | 0 | 0 |

| | | |
|-------------------------------|------|-------|
| Combustion Heat of Fuel: | 17.5 | MJ/kg |
| Combustion Efficiency Factor: | 0.8 | |

A.2 Model geometrie



| | |
|-------------------------------|--------------|
| Height | 3 m |
| Length | 25 m |
| Depth | 10 m |
| Thickness Walls | 0.1 m |
| Thickness Floor | 0.2 m |
| Opening in Wall 1 and Wall 3: | |
| <i>Sill height</i> | <i>0.5 m</i> |
| <i>Soffit height</i> | <i>2.5 m</i> |
| <i>Width</i> | <i>8 m</i> |

Bouwkundige geometrie en afmetingen.

B. Equivalente brandduur

Thermische belasting van een natuurlijk brandconcept Equivalente brandduur volgens de standaard brandkromme

R.A.P. van Herpen
Nieman Raadgevende Ingenieurs BV

Gasenergie en blootstellingsduur

De thermische belasting wordt bepaald door de interne energie van het gasvolume in de brandruimte en de tijdsduur van blootstelling. De interne energie in het gasvolume, gewogen in tijd, voor de totale blootstellingsduur aan het natuurlijk brandconcept kan worden vergeleken met de interne energie in het gasvolume, gewogen in tijd, voor de equivalente blootstellingsduur aan de standaard brandkromme. Uit die vergelijking kan de equivalente brandduur volgens de standaard brandkromme worden bepaald:

$$\frac{\int_0^{t_{end,nfc}} E_{g,nfc} dt}{t_{eq,sfc}} = \frac{\int_0^{t_{eq,sfc}} E_{g,sfc} dt}{t_{eq,sfc}} \quad [\text{J}] \quad (1)$$

Met:

| | |
|---------------|---|
| $E_{g,nfc}$ | interne energie in het gasvolume, volgens het natuurlijk brandconcept [J] |
| $E_{g,sfc}$ | interne energie in het gasvolume, volgens de standaard brandkromme [J] |
| $t_{end,nfc}$ | brandduur van het natuurlijk brandconcept [s] |
| $t_{eq,sfc}$ | equivalent brandduur volgens de standaard brandkromme [s] |

Vergelijking (1) komt neer op het vergelijken van de ‘energiedosis’ bij blootstelling aan het natuurlijk brandconcept met de ‘energiedosis’ bij blootstelling aan de standaard brandkromme:

$$\int_0^{t_{end,nfc}} E_{g,nfc} dt = \int_0^{t_{eq,sfc}} E_{g,sfc} dt \quad [\text{Js}] \quad (2)$$

De interne gasenergie wordt hierin gedefinieerd door:

$$E_g(T_g) = m_g \cdot c_v(T_g) \cdot T_g \quad [\text{J}] \quad (3)$$

Met:

| | |
|------------|--|
| E_g | interne energie in het gasvolume [J] |
| m_g | massa van het gasvolume [J] |
| T_g | temperatuur van het gasvolume [K] |
| $c_v(T_g)$ | soortelijke warmte van het gasvolume [J/kgK] |

De interne gasenergie onder brandcondities wordt vergeleken met een referentie gasenergie (geen brand). Het verschil van de interne gasenergie met de referentie gasenergie is de bijdrage ten gevolge van de brand:

$$\Delta E_g = E_g(T_g) - E_g(T_{ref}) \quad [\text{J}] \quad (4)$$

Het is gebruikelijk om het referentieniveau te definiëren bij een temperatuur van 293 K (20 °C). Echter, de gasenergie in de pre flashover fase levert voor de constructies in de brandruimte geen thermische belasting (behalve lokale invloeden). Om die reden lijkt een referentietemperatuur van 573 K (300 °C) realistischer. De pre flashover fase blijft dan buiten beschouwing.

Consequenties van de interne gasenergie voor warmtetransport

De interne gasenergie is de potentiële energie voor het warmtetransport dat door straling en convectie aan de constructie wordt toegevoerd. Dit warmtetransport is niet alleen afhankelijk van de gastemperatuur, maar ook van de materiaaltemperatuur van de constructie, en vormt zodoende de verbinding tussen thermische belasting en thermische respons van een constructie. Bij gelijke gastemperatuur zal het thermisch vermogen dat aan een constructie-element wordt toegevoerd voor elk constructiemateriaal verschillend zijn.

Warmtetransport door straling:

$$q_{rad} = \epsilon_{res} \sigma (T_g^4 - T_m^4) \quad [\text{W/m}^2] \quad (5)$$

Warmtetransport door convectie:

$$q_{conv} = h_c (T_g - T_m) \quad [\text{W/m}^2] \quad (6)$$

Met:

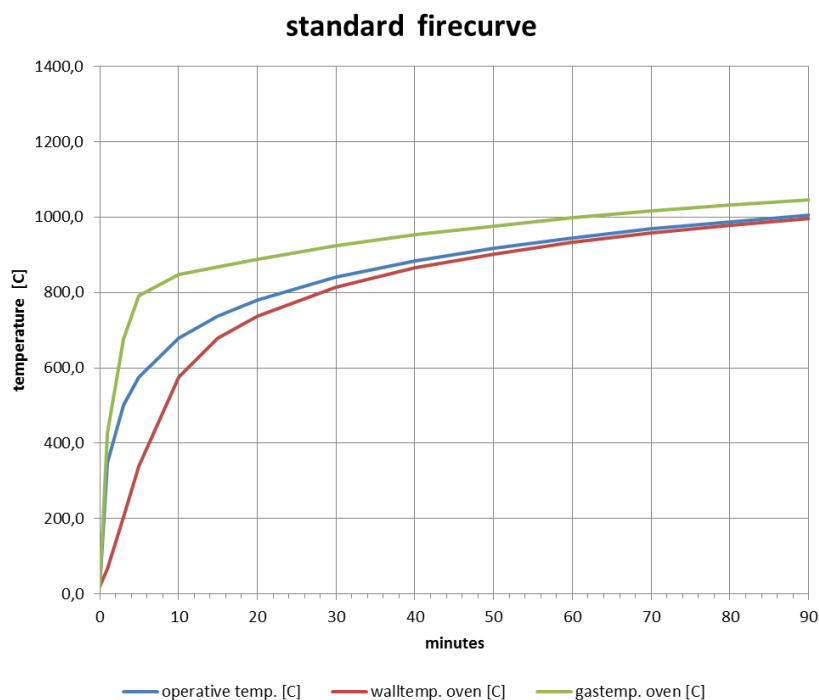
| | |
|------------------|---|
| q | warmtestroomdichtheid door straling (rad) of convectie (conv) [W/m ²] |
| T | temperatuur van het gas (g) of het constructiemateriaal (m) [K] |
| h_c | convectieve overgangcoëfficiënt [W/(m ² K)] |
| ϵ_{res} | resultante emissie/absorptie coëfficiënt voor straling [-] |
| σ | constante van Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8}$) [W/(m.K ²) ²] |

Het bovenstaande geeft aan dat het niet wenselijk is de thermische belasting en thermische respons (en daarmee ook de mechanische respons) los van elkaar te beschouwen. Echter, soms is dat onvermijdelijk, bij voorbeeld wanneer de thermische belasting volgens een natuurlijk brandconcept wordt beschouwd en de respons van de constructie getest is op basis van de standaard brandkromme.

In een test volgens de standaard brandkromme spelen dezelfde warmtetransportmechanismen een rol als gegeven in (5) en (6), alleen met dat verschil dat de warmtestraling vrijwel geheel

bepaald wordt door de wanden van de testoven in plaats van door de gastemperatuur. Dat wordt veroorzaakt doordat het gas in de oven, in vergelijking met het gas in een brandruimte, vrijwel geen roetdeeltjes bevat.

De ovenwanden bezitten een thermische traagheid, de materiaalt temperatuur van de wanden is lager dan de gastemperatuur in de oven. Omdat in de testoven met plaatthermokoppels een operationele temperatuur wordt gemeten, die vervolgens overeen moet komen met de temperatuur volgens de standaard brandkromme, moet het achterblijven van het stralingstransport worden gecompenseerd door het convectieve warmtetransport. De gastemperatuur in de oven moet daardoor hoger zijn dan de temperatuur volgens de standaard brandkromme.



Figuur: De operationele temperatuur in een testoven volgt de standaard brandkromme. Het stralingstransport blijft hierbij achter (in dit voorbeeld met een vertraging van 5 minuten). Dat moet worden gecompenseerd in de convectieve gastemperatuur. Ter vergelijking: in een brandruimte (natuurlijk brandconcept) vallen de drie temperatuurlijnen nagenoeg samen.

De bovenstaande figuur maakt duidelijk dat het warmtetransport ten gevolge van de standaard brandkromme in een testoven een andere verdeling in straling en convectie kent dan het warmtetransport ten gevolge van een natuurlijk brandconcept in de brandruimte. Door de operationele temperatuur te beschouwen, waarin straling en convectie zijn gecombineerd, is deze verdeling in de thermische belasting van ondergeschikt belang.

Conclusie

Wanneer het natuurlijk brandconcept wordt gehanteerd als thermische belasting, maar de thermische en mechanische respons niet rechtstreeks aan die thermische belasting gekoppeld kunnen worden, levert het uitdrukken van de belasting in equivalente minuten standaard brandkromme via vergelijking (1) of (2) een energetisch zinvolle vertaalslag.

C. Probabilistische uitwerking

PROBABILISTISCHE BEREKENING POST FLASHOVER BRAND GEVOELIGHEIDSANALYSE EQUIVALENDE BRANDDUUR

Verbrandingsmodel Extended duration
Rechthoekige ruimte 10 x 25 m
Hoogte: 3 m

| stochastische randcondities | | deterministisch | |
|-----------------------------|-------|-----------------|---------------------|
| | | gemiddeld x | Equiv. duur t [min] |
| t | min | 30.4 | |
| RHR | MW | 62.5 | |
| Hfi | m | 1 | |
| Hfu | m | 2 | |
| Hc | MJ/kg | 17.5 | |
| r | - | 1.27 | |
| eff | - | 0.8 | |
| | | Equiv. duur | 47.0 |

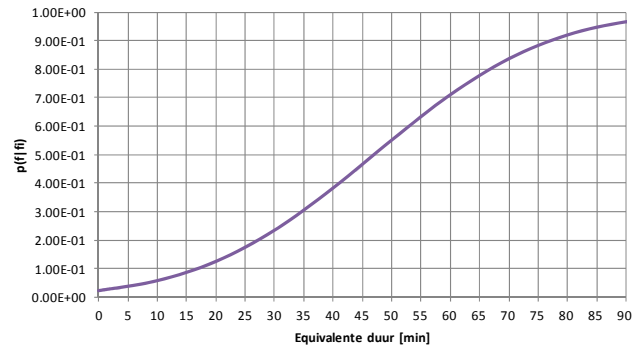
| gevoeligheidsanalyse | | | |
|----------------------|----------------|----------------|---------------------|
| variatie v | st. deviatie s | variant x + dx | Equiv. duur t [min] |
| 0.50 | 15.20 | 45.60 | 70.00 |
| 0.50 | 31.25 | 93.75 | 47.00 |
| 0.25 | 0.75 | 1.75 | 47.00 |
| 0.15 | 0.45 | 2.45 | 47.00 |
| 0.30 | 5.25 | 22.75 | 50.00 |
| 0.30 | 0.38 | 1.65 | 49.00 |
| 0.25 | 0.20 | 1.00 | 50.00 |

| standaardafwijking | | |
|--------------------|---------|------------------------|
| dt/dx | s-dt/dx | (s-dt/dx) ² |
| 1.51 | 23.00 | 529.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.57 | 3.00 | 9.00 |
| 5.25 | 2.00 | 4.00 |
| 15.00 | 3.00 | 9.00 |
| variantie(t) = | | 551.000 |
| s(t) = | | 23.473 |

CUMULATIEVE KANS

| normale verdeling, gegeven de brand | | | |
|-------------------------------------|----------|------------|----------|
| t [min] | s(t) | beta(f fi) | p(f fi) |
| 0 | 23.47339 | 2.002 | 2.26E-02 |
| 10 | 23.47339 | 1.576 | 5.75E-02 |
| 20 | 23.47339 | 1.150 | 1.25E-01 |
| 30 | 23.47339 | 0.724 | 2.34E-01 |
| 40 | 23.47339 | 0.298 | 3.83E-01 |
| 50 | 23.47339 | -0.128 | 5.51E-01 |
| 60 | 23.47339 | -0.554 | 7.10E-01 |
| 70 | 23.47339 | -0.980 | 8.36E-01 |
| 80 | 23.47339 | -1.406 | 9.20E-01 |
| 90 | 23.47339 | -1.832 | 9.67E-01 |
| 100 | 23.47339 | -2.258 | 9.88E-01 |

cumulatieve kansverdeling



PROBABILISTISCHE BEREKENING POST FLASHOVER BRAND GEVOELIGHEIDSANALYSE EQUIVALENDE BRANDDUUR

Verbrandingsmodel External flaming
Rechthoekige ruimte 10 x 25 m
Hoogte: 3 m

| stochastische randcondities | | deterministisch | |
|-----------------------------|-------|-----------------|---------------------|
| | | gemiddeld x | Equiv. duur t [min] |
| t | min | 30.4 | |
| RHR | MW | 62.5 | |
| Hfi | m | 1 | |
| Hfu | m | 2 | |
| Hc | MJ/kg | 17.5 | |
| r | - | 1.27 | |
| eff | - | 0.8 | |
| | | Equiv. duur | 35.0 |

| gevoeligheidsanalyse | | | |
|----------------------|----------------|----------------|---------------------|
| variatie v | st. deviatie s | variant x + dx | Equiv. duur t [min] |
| 0.50 | 15.20 | 45.60 | 52.00 |
| 0.50 | 31.25 | 93.75 | 49.00 |
| 0.25 | 0.75 | 1.75 | 35.00 |
| 0.15 | 0.45 | 2.45 | 35.00 |
| 0.30 | 5.25 | 22.75 | 40.00 |
| 0.30 | 0.38 | 1.65 | 39.00 |
| 0.25 | 0.20 | 1.00 | 40.00 |

| standaardafwijking | | |
|--------------------|---------|------------------------|
| dt/dx | s-dt/dx | (s-dt/dx) ² |
| 1.12 | 17.00 | 289.00 |
| 0.45 | 14.00 | 196.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.95 | 5.00 | 25.00 |
| 10.50 | 4.00 | 16.00 |
| 25.00 | 5.00 | 25.00 |
| variantie(t) = | | 551.000 |
| s(t) = | | 23.473 |

CUMULATIEVE KANS

| normale verdeling, gegeven de brand | | | |
|-------------------------------------|----------|------------|----------|
| t [min] | s(t) | beta(f fi) | p(f fi) |
| 0 | 23.47339 | 1.491 | 6.80E-02 |
| 10 | 23.47339 | 1.065 | 1.43E-01 |
| 20 | 23.47339 | 0.639 | 2.61E-01 |
| 30 | 23.47339 | 0.213 | 4.16E-01 |
| 40 | 23.47339 | -0.213 | 5.84E-01 |
| 50 | 23.47339 | -0.639 | 7.39E-01 |
| 60 | 23.47339 | -1.065 | 8.57E-01 |
| 70 | 23.47339 | -1.491 | 9.32E-01 |
| 80 | 23.47339 | -1.917 | 9.72E-01 |
| 90 | 23.47339 | -2.343 | 9.90E-01 |
| 100 | 23.47339 | -2.769 | 9.97E-01 |

cumulatieve kansverdeling

