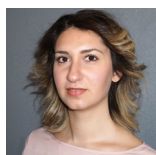


## AFSTUDEERARTIKEL

# NUMERIEKE SIMULATIE VAN UITSLAANDE VLAMMEN BIJ VENTILATIEBEHEERSTE BRANDEN

DE INVLOED VAN VERSCHILLENDE GEBOUW- EN BRANDPARAMETERS OP DE VLAMLENGTE MET BEHULP VAN EEN GEVALIDEERD CFD MODEL VAN DE UITSLAANDE VLAM

Verticale brandoverslag in hoogbouw heeft de afgelopen tijd veel aandacht gekregen in de media. Met name vlammen die zich vanuit een ondergelegen naar een bovengelegen brandcompartiment via de gevelopeningen verder kunnen uitbreiden door inmenging van zuurstof (figuur 1). Doordat uitslaande vlammen via de gevelopeningen één van de snelste wegen voor branduitbreiding is, worden gebouwgebruikers hierdoor verrast. Om slachtoffers ten gevolge van brandoverslag te kunnen voorkomen is onderzoek nodig om het gedrag van uitslaande vlammen te kunnen voorspellen. De vraag is of dit mogelijk is met CFD modellen (Computational Fluid Dynamics). Daartoe zijn in dit onderzoek uitslaande vlammen met behulp van het CFD pakket FDS (Fire Dynamics Simulator) gemodelleerd en gevalideerd met experimenten uit de literatuur. Daarnaast is de invloed van verschillende gebouw- en brandparameters op het gedrag van een uitslaande vlam onderzocht.



ir. R. (Reem) Shakerchi - Ritmeijer, LBP | SIGHT

Dit artikel is een samenvatting van een afstudeeronderzoek [4] aan de Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Bouwkunde, unit Building Physics & Services in samenwerking met de stichting Fellowship FSE (fire safety engineering).



ir. R.A.P. (Ruud) van Herpen FIFireE, fellow Fire Safety Engineering TU Eindhoven

## ACHTERGROND

Een brand in een ruimte ontwikkelt zich niet volgens een standaard brandkromme, maar op een meer natuurlijke wijze, afhankelijk van gebouw- en brandstofparameters. In het algemeen zijn daarin drie stadia te definiëren: de groeifase, de volledig ontwikkelde brand en de dooffase. Brand breidt zich uit van de groeifase tot een volledig ontwikkelde brand wanneer er voldoende zuurstof en brandstof in een ruimte aanwezig is. Hierdoor zal het brandvermogen toenemen. Dat leidt tot ruimtecondities die op een gegeven moment alle aanwezige brandstof in de brand-

ruimte aansteken (flashover). Vanaf dat moment spreken we van een volledig ontwikkelde brand, die in de meeste gevallen ventilatiebeheerst is. Dat houdt in dat door een tekort aan zuurstof het brandvermogen wordt gesmoord.

De mate van smoring hangt af van hoeveel glas in de gevelopeningen bezwijkt. Immers, via de bezweken gevelopeningen zal toevoer van zuurstof plaats vinden. Deze toevoerstroam zuurstof bepaalt het brandvermogen dat in de brandruimte kan ontwikkelen. Het vermogensdeficiet ten opzichte van een niet-gesmoorde (brandstofbeheerste) brand komt vrij in de uitslaande vlam. De verbranding vindt dus niet meer volledig plaats in de brandruimte maar voor een deel ook buiten de brandruimte in de uitslaande vlam. Deze vlam is de onderwerp van dit onderzoek.

## VALIDATIESTUDIE

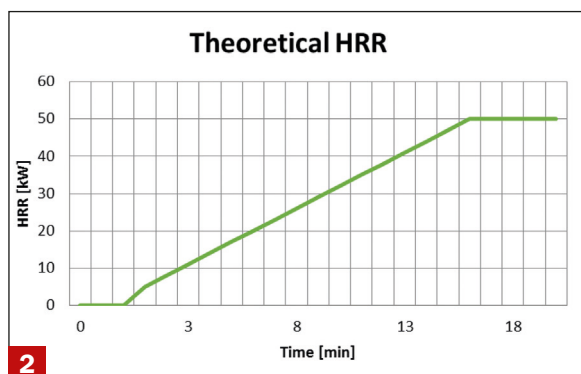
Om de nauwkeurigheid van de simulatieresultaten te bepalen, is eerst een validatiestudie en een grid-gevoelighedsanalyse uitgevoerd waarbij de CFD-resultaten zijn vergeleken met experimenten van schaalmodellen met uitslaande vlammen [1][2][3][5]. Het gevalideerde model met de uitslaande vlam is met behulp van het CFD softwarepakket FDS 6.5.2 en SMV 6.3.12 onderzocht. Het betreft een schaalmodel met de volgende dimensies: 0,5 m x 0,5 m x 0,5 m. De gevelopening is op vloerhoogte gepositioneerd met een breedte van 0,2 m en een hoogte van 0,2 m. Alle wanden bestaan uit een houtvezelplaat met een dikte van 2,5 cm. Het schaalmodel is in het midden van de ruimte voorzien van een propaanbrander (0,1 m x 0,2 m) met een maximaal brandvermogen van 50 kW, zie figuur 2. In figuur 3 is de meetopstelling van het schaalmodel schematisch weergegeven. ►



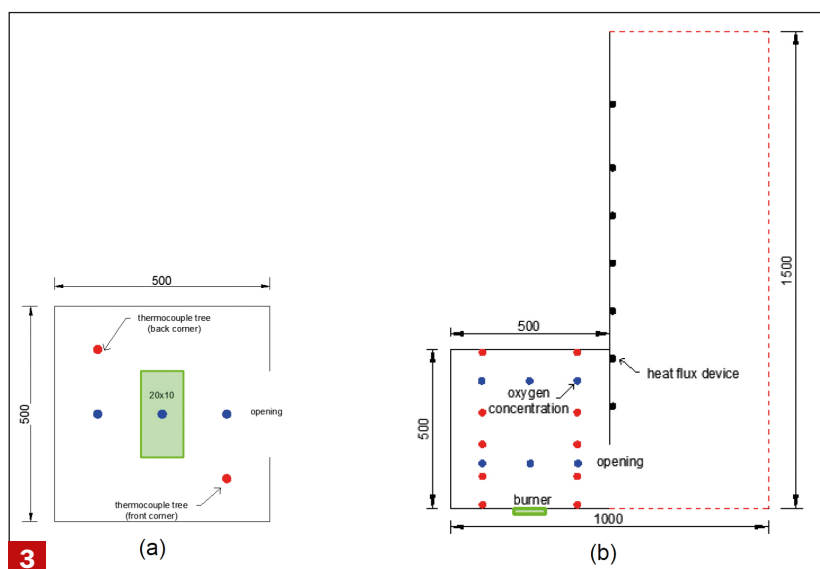
ir. I.M.M.C. (Ingrid) Naus, Brain of buildings, Eersel



Een voorbeeld van uitslaande vlammen in woningen



2 Het theoretische brandvermogen van de brander binnen in het schaalmodel



3 Schets van de meetopstelling. In het blauw, rood en zwart is de positie van het gemeten zuurstofgehalte, temperatuur en de warmtestraling weergegeven. (a) horizontale doorsnede (b) verticale doorsnede

Bij de validatiestudie is een basis CFD model met uit-slaande vlammen van de Universiteit Gent gehanteerd [6]. Dit model is vervolgens uitgebreid en verfijnd met aanvullende parameters. In het betreffende onderzoek [6] is met behulp van vergelijking 1 bepaald welke gridafmeting maximaal gebruikt kan worden voor nauwkeurige rekenresultaten. Dit resulteerde in het gebruik van een 2 cm grid voor voldoende nauwkeurige rekenresultaten, overeenkomstig onderstaande vergelijking.

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} T_{\infty} C_p \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (\text{McGrattan}) \quad (1)$$

Waarin:

$D^*$	= gridafmeting [m]
$\dot{Q}$	= brandvermogen [kW]
$\rho_{\infty}$	= atmosferische dichtheid [kg/m <sup>3</sup> ]
$T_{\infty}$	= atmosferische temperatuur [K]
$C_p$	= soortelijke warmte van lucht [kJ/kg.K]
$g$	= zwaartekrachtversnelling [m/s <sup>2</sup> ]

Het model voor de validatiestudie is opgebouwd uit twee rekendomeinen, zie figuur 4. De indeling in twee rekendomeinen geeft de invloed van de uitslaande vlammen op de gevel van het bovenliggende brandcompartiment. De invloed van de randvoorwaarden aan de buitenzijde (rand van het model) wordt hiermee verwaarloosd, zie figuur 5. Omdat in dit onderzoek een uitslaande vlam is gesimuleerd, is voor beide rekendomeinen (binnen en buiten) eenzelfde grid gebruikt. Afhankelijk van de gridafmetingen wordt de rekentijd beïnvloed. Uiteindelijk zijn er voor dit onderzoek gridafmetingen van 2 cm en 1 cm gebruikt. Dit is een fijner grid dan op basis van vergelijking (1) noodzakelijk zou zijn. Echter, voor de uitslaande vlam is dat ook noodzakelijk, omdat de uitslaande vlam niet het totale brandvermogen  $\dot{Q}$  betreft, maar alleen het vermogensdeficiet tussen een brandstofbeheerste en ventilatiebeheerste verbranding.

Met de validatiestudie zijn verschillende simulatie-instellingen onderzocht zodat de CFD resultaten goed met de resultaten van de experimenten overeenkomen. Een van

de belangrijkste instellingen in het CFD model is het uitdovingsmodel. Dit is afhankelijk van de ontbrandingstemperatuur en het zuurstofgehalte die minimaal nodig zijn voor het ontstaan van brand. Overige simulatieparameters die gebruikt zijn bij deze validatiestudie zijn terug te vinden in het afstudeerrapport [4].

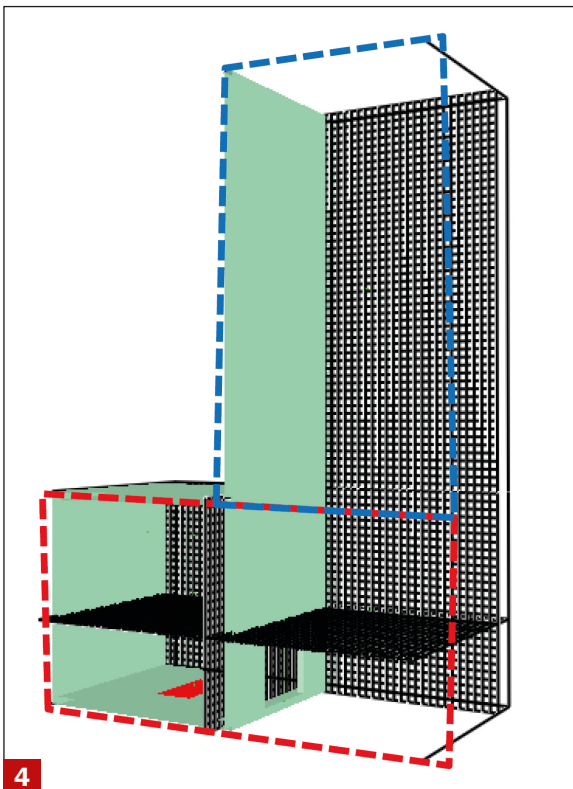
De verschillende rekenparameters in het CFD model die zijn gevalideerd met de meetresultaten uit de experimenten zijn onderstaand weergegeven:

- brandvermogen binnen het schaalmodel (HRR);
- massa-instroom door de opening;
- gastemperatuur binnen het schaalmodel;
- luchtsnelheid in de opening;
- warmtestraling buiten het schaalmodel;
- vlamlengte van de uitslaande vlam.

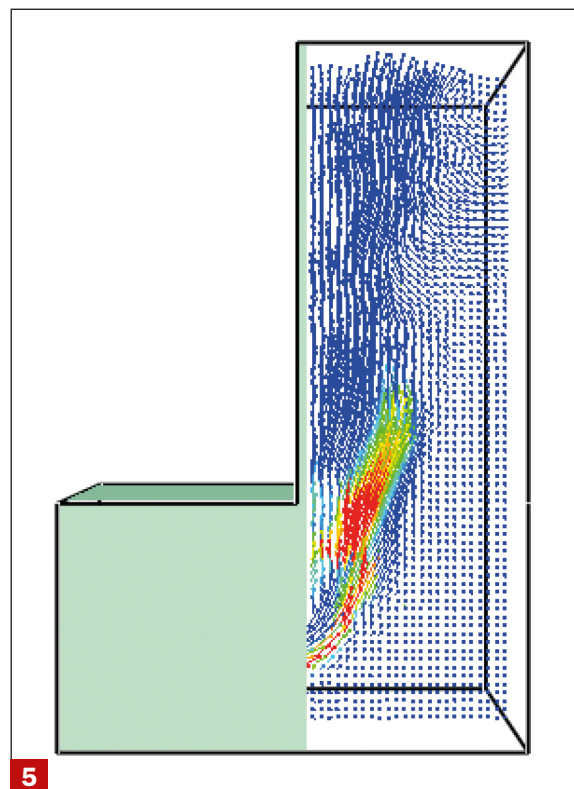
Om de vlamlengte te kunnen valideren met het CFD model is een rekenmethode ontwikkeld waarbij de CFD resultaten van de gesimuleerde vlamlengte over een bepaalde periode wordt weergegeven. Hiermee wordt de vlamlengte van een uitslaande vlam bepaald die 50% van de tijd voorkomt (met  $\Delta T \geq 500$  °C). Hierbij is de temperatuurverdeling van de uitslaande vlammen per gridcel van elke opname (seconde) met Matlab verwerkt met behulp van een boxplot (Q1-Q3). Per gridcel wordt een gemiddelde temperatuur berekend, zodat een virtuele vlam wordt gemodelleerd. Op basis van deze virtuele vlam is de vlamlengte te bepalen die 50% van de tijd voorkomt, zie figuur 6. In dit afstudeeronderzoek is deze methode gebruikt om de CFD resultaten met de meetresultaten te vergelijken.

## RESULTATEN VALIDATIESTUDIE

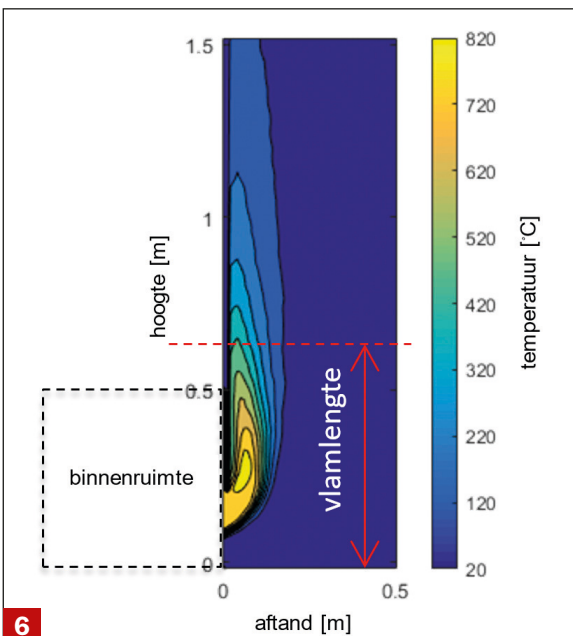
De rekenresultaten van de validatiestudie met de verschillende rekenparameters zijn in de figuren 7 tot en met 10 weergegeven. Hierbij is duidelijk het verschil te zien tussen beide gehanteerde gridafmetingen (1 cm en 2 cm grid). De resultaten voor de afwijking met de meetresultaten per onderzochte parameter zijn met behulp van een staafdiagram weergegeven in figuur 11. Bij de simulatie-



4 CFD model met twee rekendomeinen (x,y en z richting) in blauw en rood omkaderd



5 Een weergave van de stroming ten gevolge van uitslaande vlammen aan de buitenzijde van het CFD model



6 Grafische weergave van de vlamlengthe die 50% van de tijd voorkomt

resultaten van het 2 cm grid kan de afwijking variëren tussen een maximale en een minimale afwijking met de meetresultaten.

Uit de rekenresultaten blijkt dat het gebruik van een fijner grid een kleinere onzekerheid ten opzichte van de meetresultaten geeft. Met een 1 cm grid voor beide rekendomeinen is een onzekerheid geconstateerd van maximaal circa 10% voor het optredende brandvermogen in de experimenten. Met een grid van 2 cm is de onzekerheid significant groter. Derhalve is voor de uitwerking een grid van 1 cm gehanteerd.

De gesimuleerde gastemperatuur op verschillende hoogten heeft relatief de grootste onzekerheid ( $\Delta T = 16\%$ ) met de meetresultaten. De gesimuleerde gastemperatuur in de ruimte is lager dan de gemeten gastemperatuur. Dit komt doordat het gesimuleerde brandvermogen in de ruimte ook lager is dan het gemeten brandvermogen.

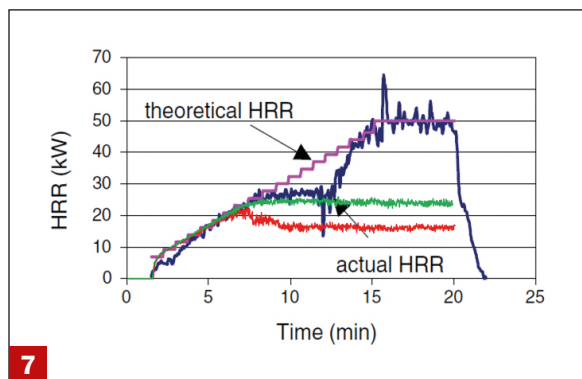
Daarnaast zijn de resultaten van de gesimuleerde warmtestraling op de gevel en de gesimuleerde vlamlengthe met 1 cm grid vergeleken met de meetresultaten. De gesimuleerde warmtestraling op de gevel van het CFD model op verschillende hoogten heeft een onzekerheid van 8% ten opzichte van de meetresultaten. De gesimuleerde vlamlengthe die 50% van de tijd voorkomt wijkt 15% af van de gemeten vlamlengthe. Dit heeft te maken met de gekozen bepalingmethode (boxplot). Wanneer de gemiddelde vlamlengthe wordt gebruikt in plaats van de boxplot methode (Q1-Q3) is er een afwijking van 10% tussen de gemeten en de simulatieresultaten. De vlamlengthe uit de metingen is gebaseerd op basis van opnames waarbij visueel de zichtbaarheid van de vlam wordt bepaald en dus niet op basis van een constante temperatuur ( $\Delta T \geq 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Uit de resultaten van de verrichte gridgevoeligheidsanalyse blijkt echter dat een grid van 1 cm de voorkeur heeft. Dit dus in afwijking van de voorgestelde standaardvergelijking voor het grid (vergelijking 1).

### GEVOELIGHEIDSANALYSE

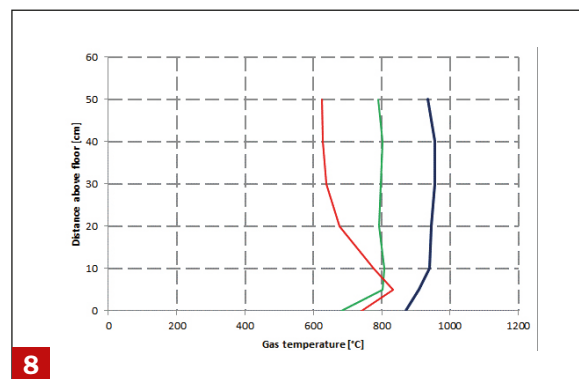
Het gevalideerde model is als basismodel gebruikt voor het onderzoek naar de gevoeligheid van verschillende gebouw- en brandparameters op de vlamlengthe van de uitslaande vlam, zie figuur 12.





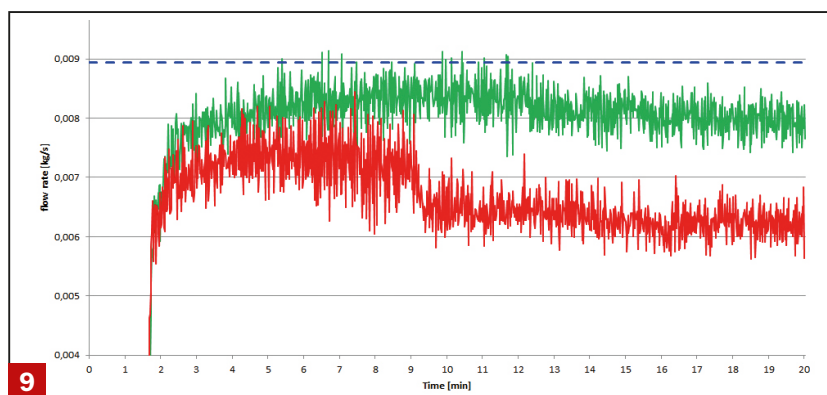
7

Het brandvermogen gemeten gedurende 20 minuten (donker blauwe lijn) in het schaalmodel vergeleken met de simulatieresultaten van 2 cm (rode lijn) en 1 cm grid (groene lijn)



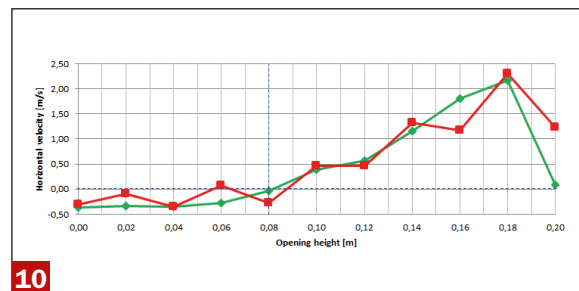
8

De gemeten gastemperatuur binnen het schaalmodel op verschillende hoogtes tijdens het ontstaan van uitslaande vlammen (donker blauwe lijn) in vergelijking met de gesimuleerde resultaten van 2 cm (rode lijn) en 1 cm grid (groene lijn)



9

De gemeten massa-instroom door de opening gedurende 20 minuten (donker blauwe stippellijn) in vergelijking met de gesimuleerde resultaten met 2 cm (rode lijn) en 1 cm grid (groene lijn)



10

De gemeten luchtsnelheid in de opening op verschillende hoogtes tijdens het ontstaan van uitslaande vlammen (donker blauwe stippellijn) in vergelijking met de gesimuleerde resultaten met 2 cm (rode lijn) en 1 cm grid (groene lijn)

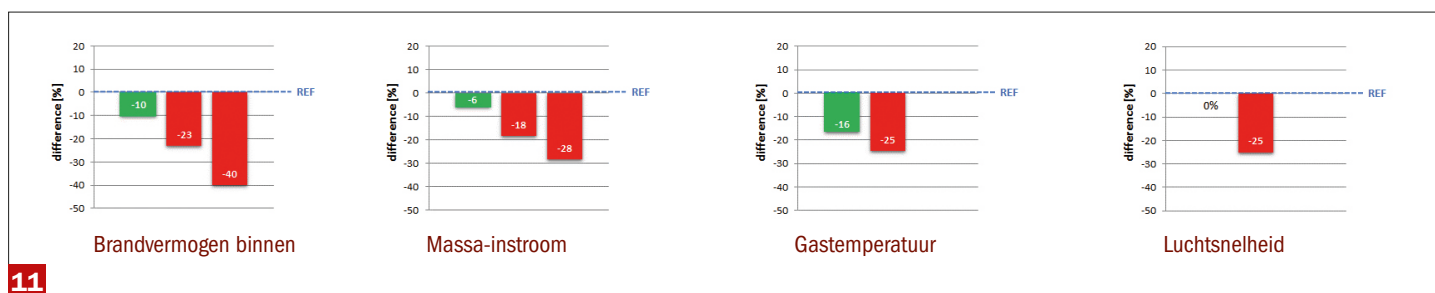
De verschillende parameters die zijn gehanteerd voor de gevoeligheidsstudie op de vlamlengte zijn:

- raamopening van 0,2 x 0,2 m op vloerpeilhoogte met een HRR van 50 kW als referentie;
- idem referentie, maar met een raamopening met borstwering;
- idem referentie, maar met een smalle raamopening;
- idem referentie, maar met adiabatische gebouwschil;
- idem referentie, maar met een hoger brandvermogen.

De simulatieresultaten van de verschillende modellen zijn hieronder weergegeven. Het gevalideerde model is als referentiemodel gebruikt. De resultaten laten zien dat de onderzochte parameters resulteren in een hogere vlamlengte vanaf het moment dat uitslaande vlammen ontstaan. De grootste invloed op de vlamlengte is de variant met een raamopening (borstwering). De vlamlengte wijkt met circa 41% af van het referentiemodel, zie figuur 13. Dit heeft mede te maken met de verschuiving van het drukneutrale vlak in de brandruimte naar boven.

### REAL-SCALE MODEL

De meetopstelling en simulatiemodellen zijn een geschaalde versie van de werkelijkheid. De laatste stap van deze studie is om te onderzoeken of een real-scale model (ongeschaald) eenzelfde betrouwbaar resultaat geeft. Het schaalmodel is hiertoe met een factor van 10 vergroot tot een real-scale model (ruimte van 5 meter bij 5 meter en 5 meter hoog). De resultaten van het brandvermogen in de ruimte, de massa instroom door de opening en het drukneutrale vlak van het real-scale model zijn weergegeven in figuur 14. De resultaten liggen in dezelfde range als van een geschaald model. Er is een grid van zowel 10 cm als 5 cm gehanteerd. De rekestijd tussen een geschaald model en het real-scale model is nagenoeg hetzelfde, aangezien het aantal rekencellen ook hetzelfde is (grid van 1 cm in het geschaald model versus een grid van 10 cm in het real-scale model). Hiermee is aangetoond dat de onderzoeksresultaten met de geschaalde modellen ook toepasbaar zijn op een real-scale model.



11

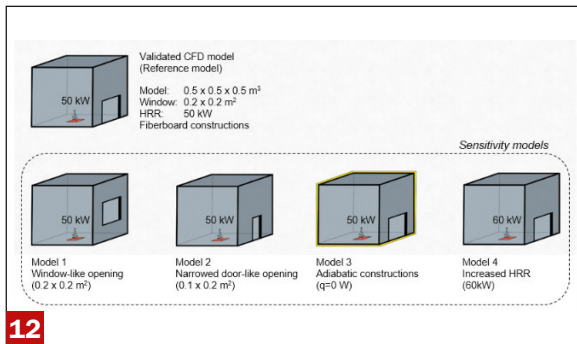
De afwijking tussen de CFD resultaten en de meetresultaten - rood geeft de afwijking met een 2 cm grid (maximale en minimale afwijking) en groen de afwijking met een 1 cm grid



**CONCLUSIES**

Uit dit onderzoek is gebleken dat het mogelijk is om uitlaande vlammen van ventilatiebeheerste branden te kunnen modelleren mits de randvoorwaarden goed ingesteld worden. Hierbij speelt het gehanteerde grid een belangrijke rol. Voor de modellering van de uitlaande vlam is een fijner grid noodzakelijk dan op basis van het brandvermogen in de brandruimte verwacht zou worden. Dit wordt veroorzaakt doordat het vermogen in de uitlaande vlam kleiner is dan het vermogen in de brandruimte. Om de vlamlengte vanuit CFD simulaties te kunnen valideren is een nieuwe rekenmethode ontwikkeld en gevalideerd. Er wordt op basis van de temperatuurverdeling een virtuele vlamlengte berekend die 50% van de tijd (uitslaande vlam) voorkomt.

De invloed van de verschillende gebouw- en brandparameters op de vlamlengte is het grootst wanneer de gevelopening een borstwering krijgt. Dit heeft te maken met de hoogte van het drukneutrale vlak in de brandruimte.



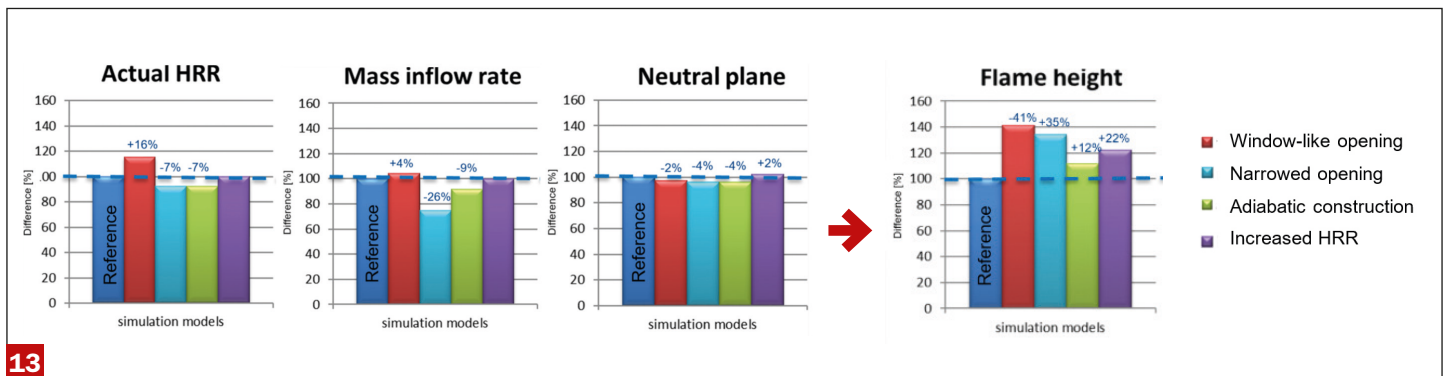
12

De verschillende modellen met de onderzochte gebouw- en brandparameters

Tenslotte zijn er aanbevelingen gedaan om het gevalideerde schaalmodel te extrapoleren om uitlaande vlammen in een real-scale model te modelleren. Hierbij is onderzocht of voor een real-scale model volstaan kan worden met eenzelfde gridnauwkeurigheid. Uit het onderzoek is gebleken dat het grid ook geschaald mag worden wanneer de brandruimte geschaald wordt. ■

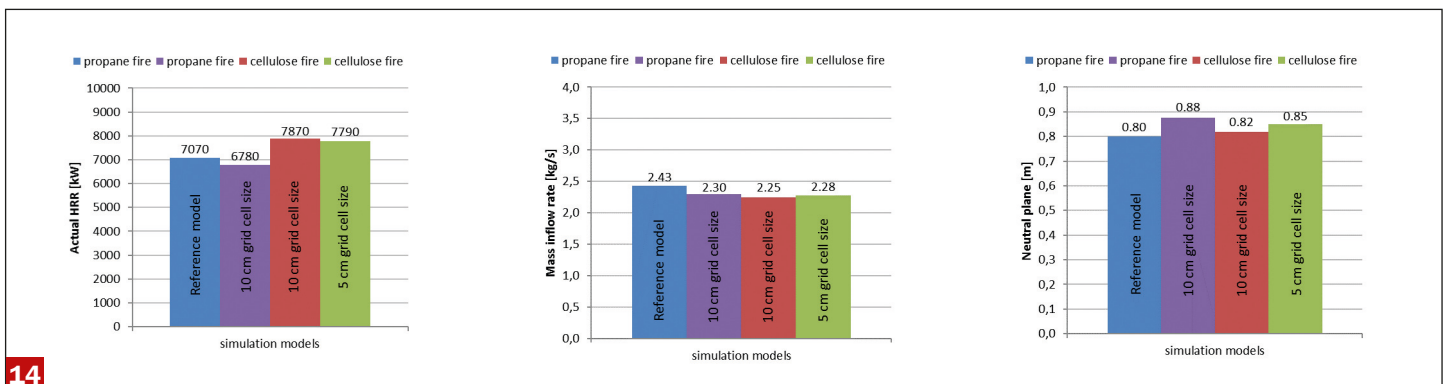
**BRONNEN**

- ▶ [1] Lee, Y., Delichatsios, M., Ohmiya, Y., Wakatsuki, K., Yanagisawa, A., & Goto, D. (2007), Flame heights and heat fluxes on a building facade and an opposite building wall by flames emerging from an opening, International Association for fire safety science, 202-210
- ▶ [2] Lee, Y.-P., Delichatsios, M. A., & Silcock, G. (2007), Heat fluxes and flame heights infacades from fires in enclosures of varying geometry, Proceedings of the combustion institute 31, 2521-2528
- ▶ [3] Lee, Y.-p., Delichatsios, M. A., & Silcock, G. (2008), Heat flux distribution and flame shapes on the inert façade, International association for fire safety science, 193-204
- ▶ [4] Shakerchi-Ritmeijer, R. (2017), Numerical simulation of external flames in ventilation-controlled fires, Eindhoven: Eindhoven University of Technology
- ▶ [5] Unkleja, S., Delichatsios, M. A., Delichatsios, M. M., & Lee, Y.-p. (2008), Carbon monoxide and smoke production downstream of a compartment for under-ventilated fires, International association for fire safety science, 849-860
- ▶ [6] Zhao, G., Beji, T., & Merci, B. (2015), Application of FDS to Under-ventilated enclosure fires with external flaming, Fire Technology, 2117-2142



13

De gesimuleerde modellen met verschillende gebouw- en brandparameters worden vergeleken met de vlamlengte van het gevalideerde referentiemodel. Hiermee wordt de invloed van de verschillende parameters op de vlamlengte weergegeven



14

Het verschil in brandvermogen, massa-instroom en het drukneutrale vlak van een real-scale model (propanaan en cellulose brandstof) met 5 cm en 10 cm grid