



# LOCAFI+

Temperatuur beoordeling van een verticaal lid onderworpen aan  
LOCALised Fire  
Disseminatie

Subsidieovereenkomst nr. 754072

## 4. Analytische methode en validatie

## 4. Analytische methode en validatie

### 4.1. Concept van een Virtuele Volume Vlam

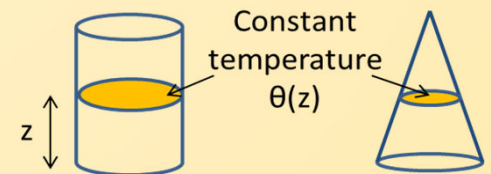
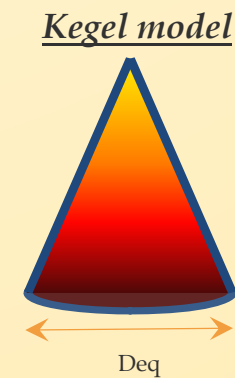
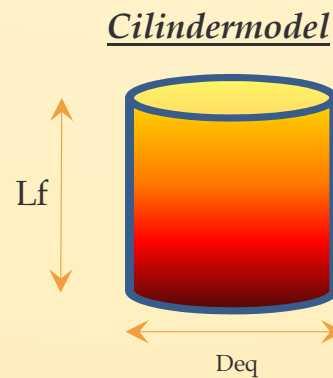
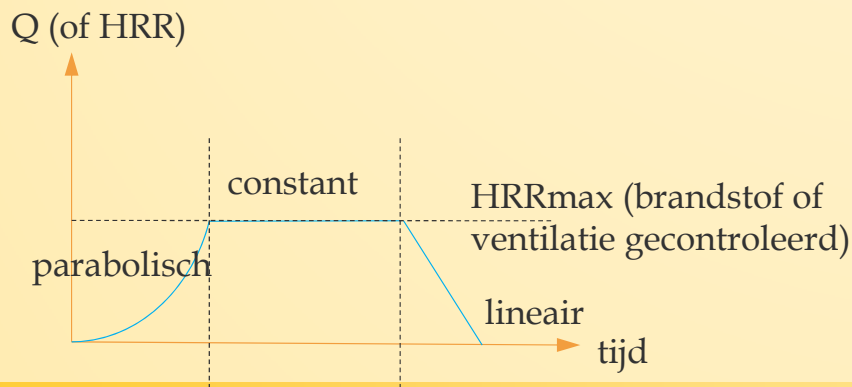
#### Modellering van de vlam

Stap 1: Het oppervlak van het vuur wordt omgevormd tot een gelijkwaardige discus  $D_{fire} = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$

Stap 2: De ontwikkeling van de warmteafgifte wordt berekend volgens EN 1991-1-2 bijlage E (groeifase, plateau, doblingsfase).

Stap 3: De vlamlengte  $L_f$  wordt berekend door toepassing van EN 1991-1-2 bijlage C  $L_f(t) = -1.02 D_{fire} + 0.0148 Q(t)^{0.4}$

Stap 4: De actie van het vuur wordt weergegeven door een virtuele vaste vlam, kegelvormig of cilindrisch, gedefinieerd door  $Deq$  en  $L_f$

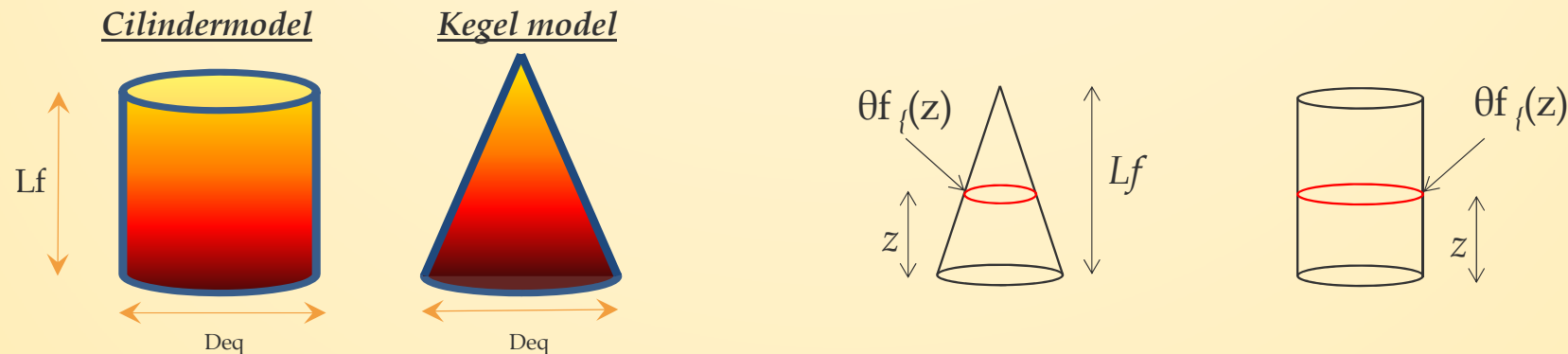


## 4. Analytische methode en validatie

### 4.1. Concept van Virtuele Volume Vlam

#### Modellering van de vlam

*Als de vlam het plafond niet raakt ( $L_f < H_{\text{ceiling}}$  of geen plafond)*



$$\theta_f(z) = \min \left( 900; 20 + 0.25 (0.8Q(t))^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \right)$$

$$z_0 = -1.02D_{fire} + 0.00524 Q(t)^{0.4}$$

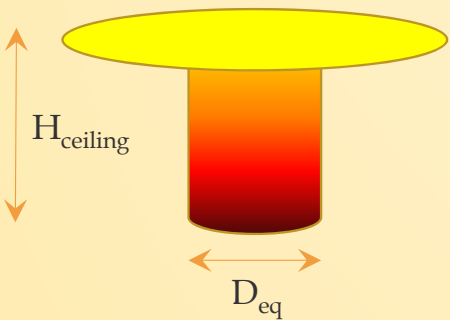
## 4. Analytische methode en validatie

### 4.1. Concept van Virtuele Volume Vlam

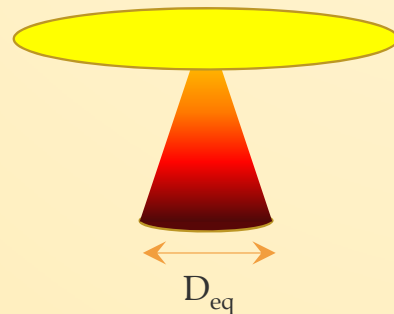
#### Modellering van de vlam

*Als de vlam het plafond raakt ( $L_f > H_{\text{ceiling}}$ )*

Cilindermodel

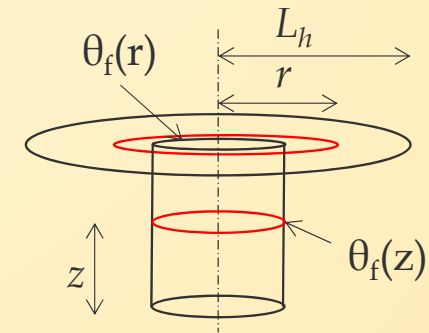
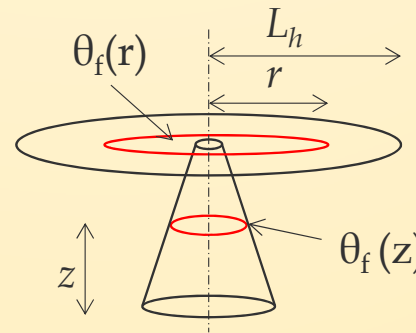


Kegel model



$$\theta_f(z) = \min\left(900; 20 + 0.25(0.8Q(t))^{2/3}(z - z_0)^{-5/3}\right)$$

$$z_0 = -1.02D_{\text{fire}} + 0.00524 Q(t)^{0.4}$$



$$L_h(t) = H(2.9Q(t)_H^{0.33} - 1)$$

$\dot{h}(r)$  berekend volgens Hasemi

$$\theta_f(r) \text{ satisfies to } \dot{h}(r) = \sigma((\theta_f(r) + 273)^4 - 293^4) + 35(\theta_f(r) - 20)$$

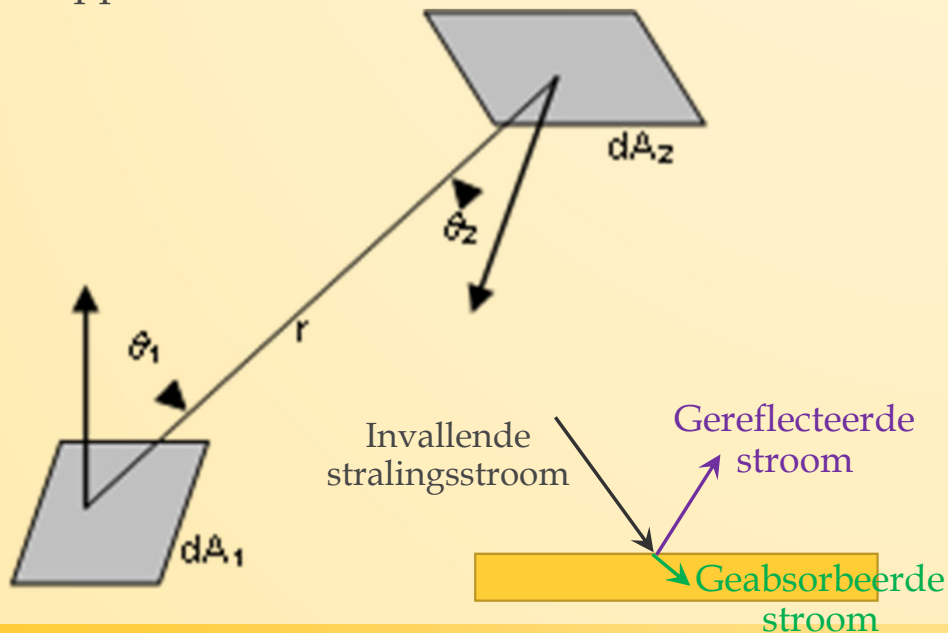
**Opmerking:** de bijdrage van de ring is laag, behalve als het element zich in de ring bevindt -> wordt enkel voor elementen op plafondniveau bekeken.

## 4. Analytische methode en validatie

### 4.2. Geometrische methode voor uitgewisselde warmtefluxen

#### Beoordeling van de stralingswarmtefluxen

De stralingswarmteflux die een bepaald stralingsoppervlak  $dA_1$  verlaat en ontvangen wordt door een oppervlak  $dA_2$  is :



$$\phi_{dA_1 \rightarrow dA_2} = \alpha_2 \varepsilon_1 \sigma \cdot T^4 \frac{\cos(\theta_1) \cos(\theta_2) dA_1 dA_2}{\pi r^2}$$

- de emissiviteit  $\varepsilon_1$  (van het emitterende oppervlak) wordt verondersteld gelijk te zijn aan 1 voor vlammen
- de absorptiecapaciteit  $\alpha_2$  is afhankelijk van de eigenschappen van het ontvangende oppervlak
- Kirchhoff Wet : absorptievermogen ( $\alpha$ ) = emissiviteit ( $\varepsilon$ )
- Voor staal,  $\varepsilon = \alpha = 0,7$

## 4. Analytische methode en validatie

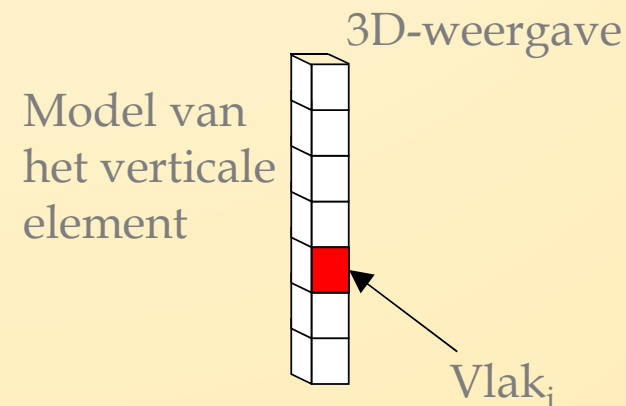
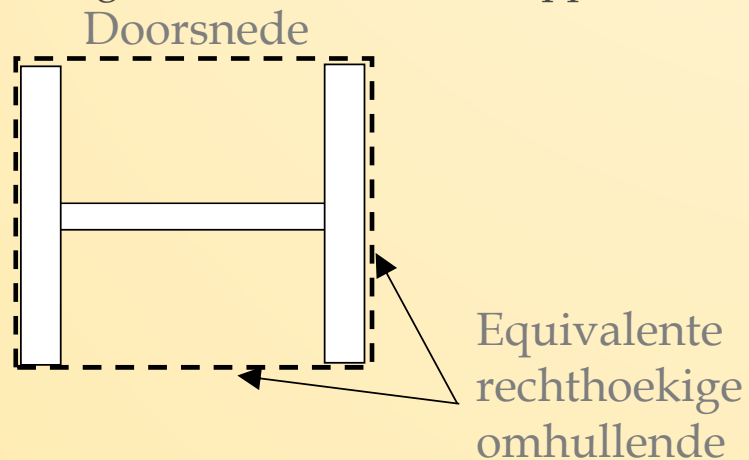
### 4.2. Geometrische methode voor de uitwisseling van warmtestromen

#### Modellering van het verticale element

Concave secties hebben een **schaduweffect** -> Ter vereenvoudiging worden warmtefluxen berekend op een convexe omtrek

Voor I- of H-profielen wordt het constructiedeel omgevormd tot een rechthoekig buisprofiel (in overeenstemming met bijlage G van EN 1991-1-2)

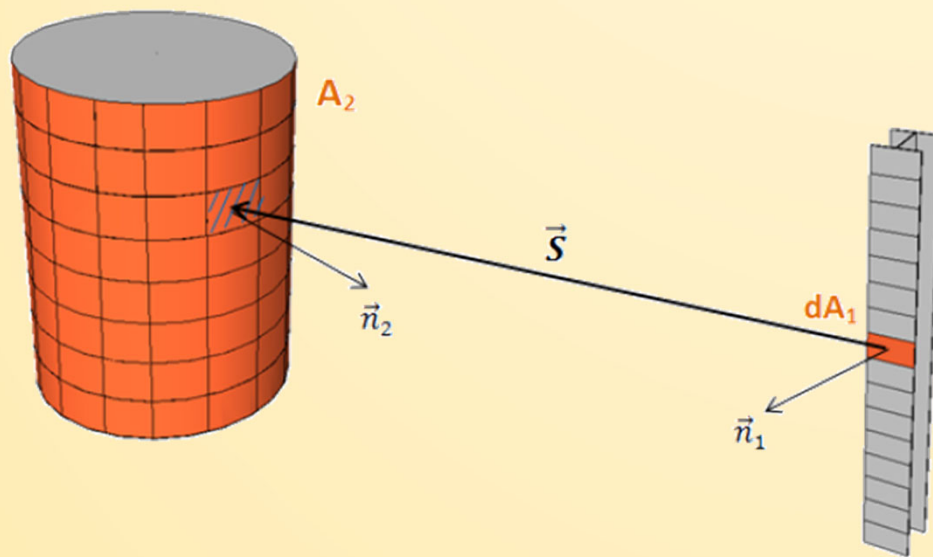
Vervolgens wordt de omtrek oppervlak onderverdeeld in gezichten



## 4. Analytische methode en validatie

### 4.2. Geometrische methode voor de uitwisseling van warmtestromen

#### Numerieke integratie



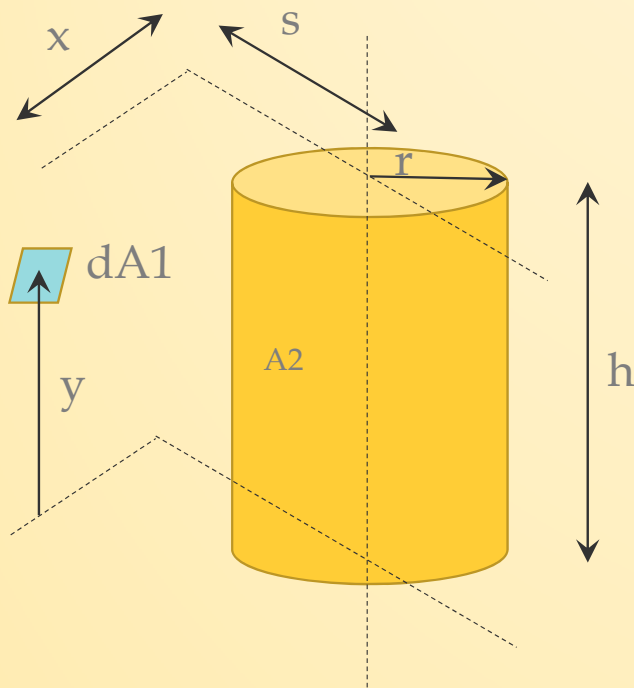
$$F_{d1-2} \simeq \frac{-1}{\pi} \sum_i \frac{(\vec{S} \cdot \vec{n}_1)(\vec{S} \cdot \vec{n}_2)}{S^4} \Delta A_i$$

- Elke "individuele" stralingsuitwisseling wordt berekend (bij elke stap).
- Vereist een programma voor echte toepassingen.
- Maakt het mogelijk niet-uniforme omstandigheden (stralingsfluxen) toe te passen op de omtrek van de sectie.

## 4. Analytische methode en validatie

### 4.3. Vereenvoudigd model

#### Deelzicht tussen een oneindig klein oppervlak en een cilinder



$$F_{dA_1 \rightarrow A_2} = \frac{S}{B} - \frac{S}{2B\pi} \left\{ \begin{aligned} &\cos^{-1} \left( \frac{Y^2 - B + 1}{A - 1} \right) + \cos^{-1} \left( \frac{C - B + 1}{C + B - 1} \right) \\ &- Y \left[ \frac{A + 1}{\sqrt{(A - 1)^2 + 4Y^2}} \cos^{-1} \left( \frac{Y^2 - B + 1}{\sqrt{B}(A - 1)} \right) \right] \\ &- \sqrt{C} \frac{C + B + 1}{\sqrt{(C + B - 1)^2 + 4C}} \cos^{-1} \left( \frac{C - B + 1}{\sqrt{B}(C + B - 1)} \right) \\ &+ H \cos^{-1} \left( \frac{1}{\sqrt{B}} \right) \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned} S &= s/r \\ X &= x/r \\ H &= h/r \\ A &= X^2 + Y^2 + S^2 \\ B &= S^2 + X^2 \\ C &= (H - Y)^2 \end{aligned}$$

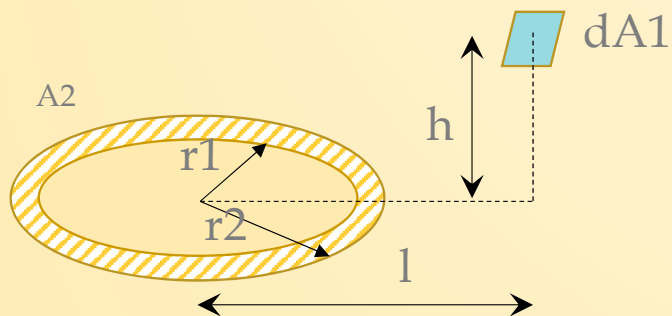
Alleen geldig indien het door  $dA_1$  gedefinieerde vlak de cilinder niet snijdt !



## 4. Analytische methode en validatie

### 4.3. Vereenvoudigd model

Deelzicht tussen een oneindig klein oppervlak en een ring



$$F_{dA_1 \rightarrow A_2} = \frac{H}{2} \left( \frac{H^2 + R_2^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_2^2 + 1)^2 - 4R_2^2}} - \frac{H^2 + R_1^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_1^2 + 1)^2 - 4R_1^2}} \right)$$

$$H = h/l$$
$$R = r/l$$

Alleen geldig indien  $l > r_2$  !

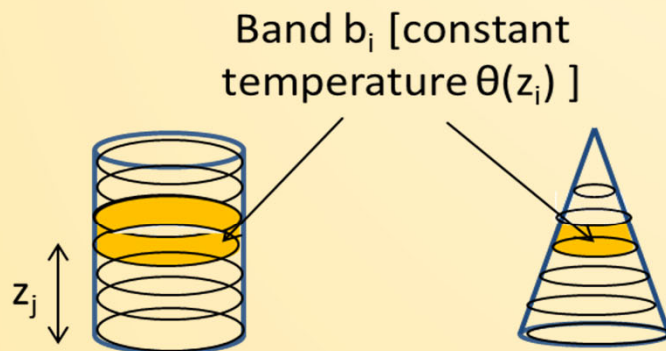
## 4. Analytische methode en validatie

### 4.3. Vereenvoudigd model

#### Onderverdeling van de vlam in cilinders en ringen

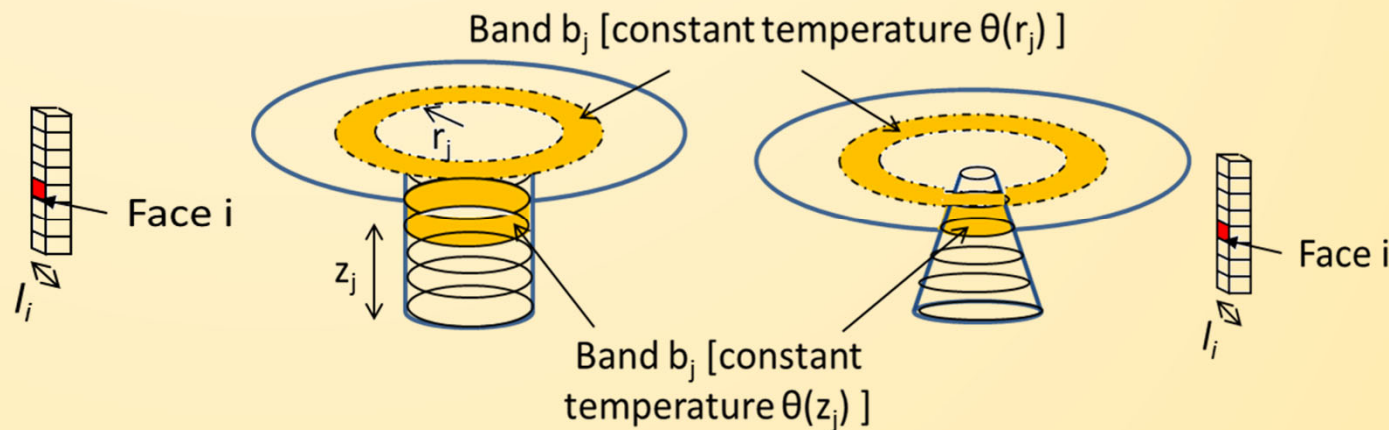
*Als de vlam het plafond niet raakt*

*( $L_f < H_{\text{ceiling}}$  of geen plafond)*



*Als de vlam het plafond niet beïnvloedt*

*( $L_f > H_{\text{ceiling}}$ )*

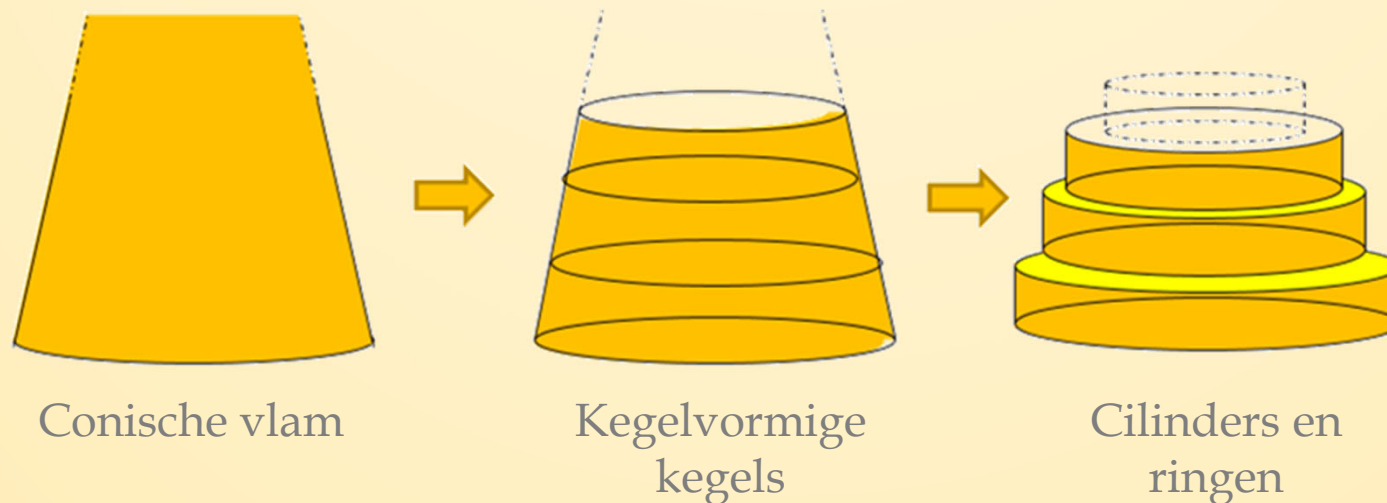


*Opmerking: de bijdrage van de ring is echt laag, behalve als het lid zich in de ring bevindt -> alleen overwogen voor elementen op het plafondniveau*

## 4. Analytische methode en validatie

### 4.3. Vereenvoudigd model

Onderverdeling van de vlam in cilinders en ringen (aanpassing 1)

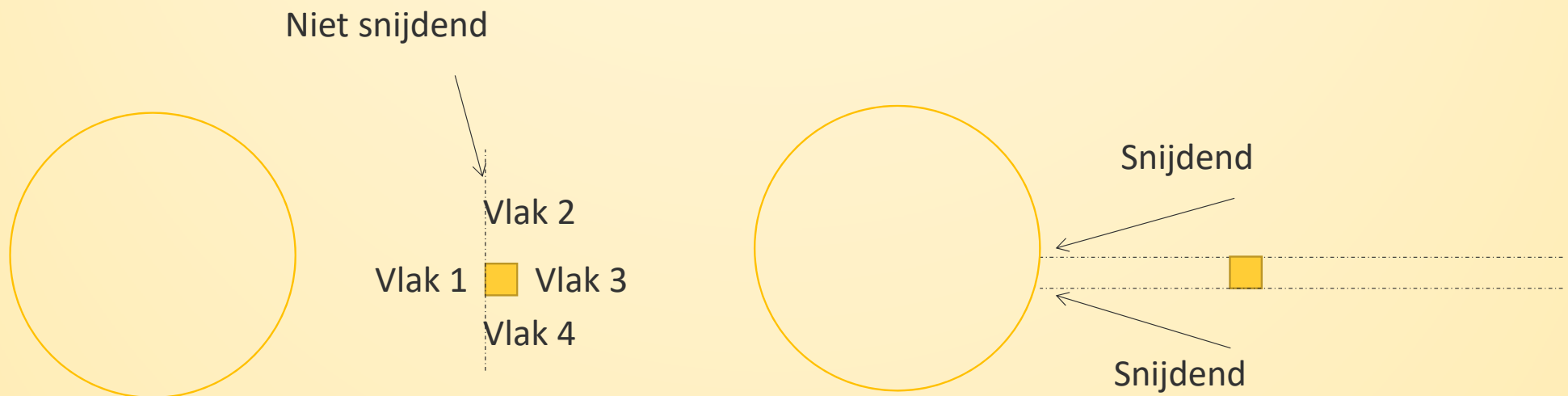


Door de bijdrage van ringen te verwaarlozen, onderschatten we de invallende flux en kunnen we zelfs een invallende flux gelijk aan 0 boven de brand bekommen !

## 4. Analytische methode en validatie

### 4.3. Vereenvoudigd model

#### Onderverdeling van de vlam in cilinders en ringen (aanpassing 2)

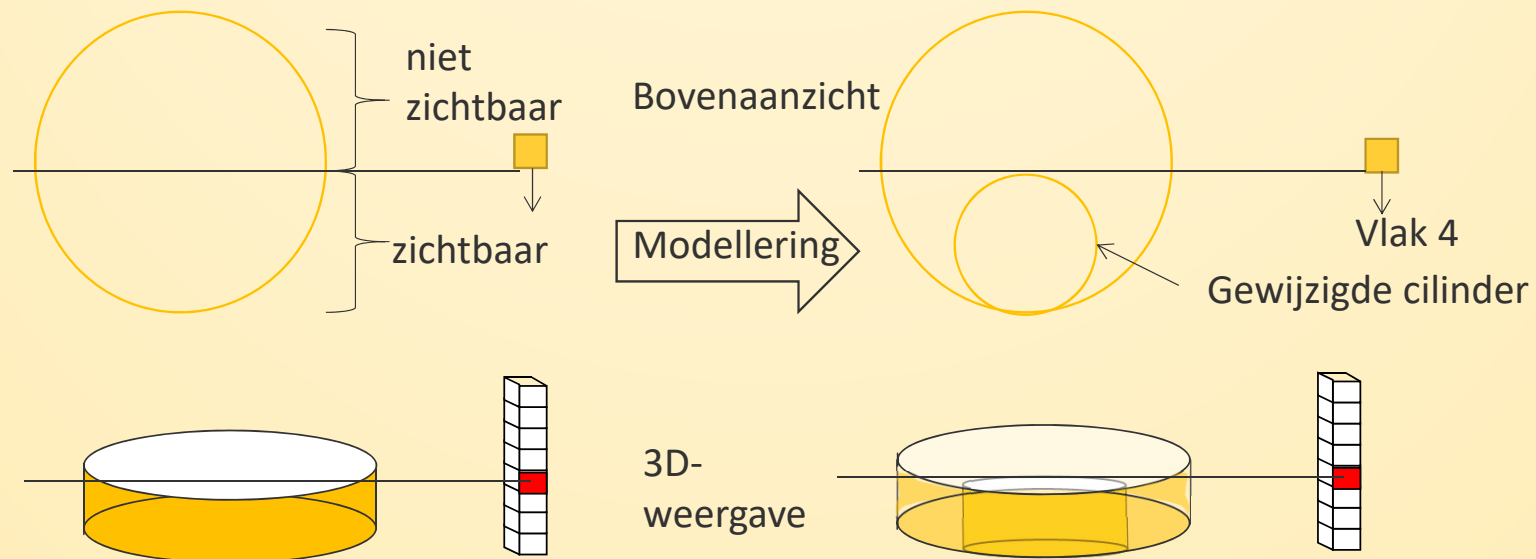


De formule voor cilinder is niet geldig als het ontvangende oppervlak de cilinder snijdt !

## 4. Analytische methode en validatie

### 4.3. Vereenvoudigd model

#### Onderverdeling van de vlam in cilinders en ringen (aanpassing 2)

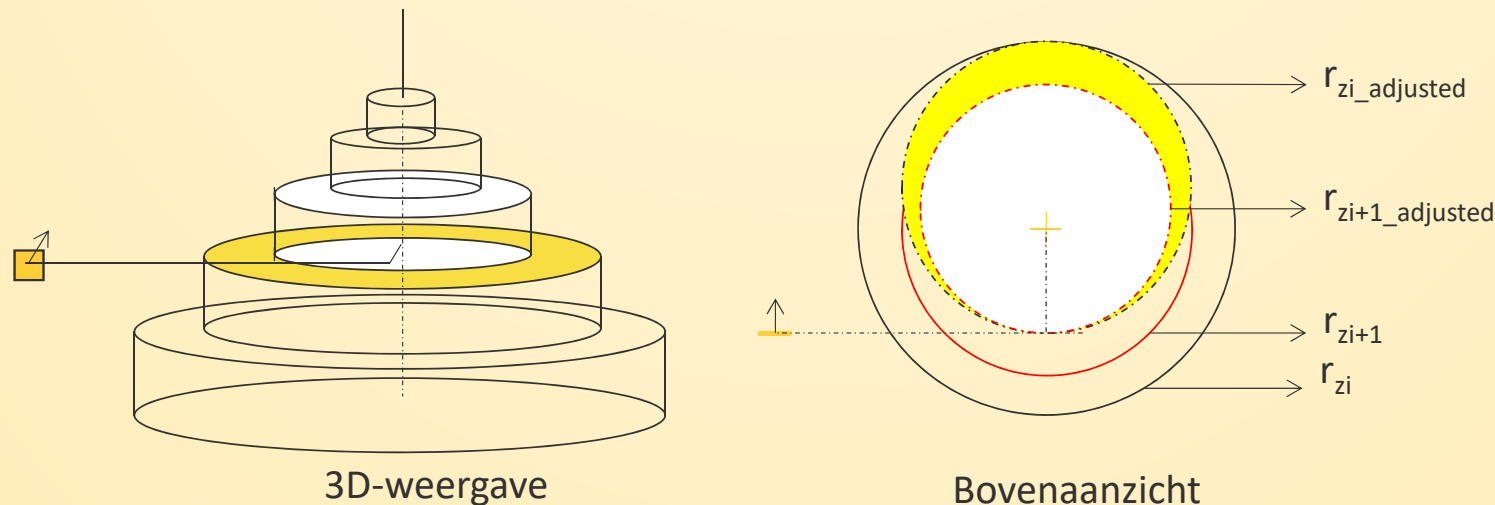


In dit geval wordt de initiële cilinder omgevormd tot een gewijzigde cilinder in de zichtbare zone.

## 4. Analytische methode en validatie

### 4.3. Vereenvoudigd model

#### Onderverdeling van de vlam in cilinders en ringen (aanpassing 3)



Een deel van de ringen is " verborgen " door de cilinder boven Een verkleinde zone moet worden beschouwd (aan de veilige kant om om deze vermindering te negeren...)

## 4. Analytische methode en validatie

### 4.3. Vereenvoudigd model

#### Bijkomende opmerkingen

- Aanbevolen breedte van de cilinder is 50 cm
- Voor elementen die zich onder het plafond bevinden, moet convectie worden toegevoegd -> Hasemi
- Bij meerdere branden moeten de van elke brand ontvangen fluxen worden toegevoegd. De totale invallende stroom is beperkt tot 100 kW/m<sup>2</sup>.  $\dot{h}_{tot} = \min(\dot{h}_{rad\_section} + \dot{h}_{conv}; 100000) \text{ [W.m}^{-2}\text{]}$
- De temperatuur van het element wordt berekend door de thermische balans van het element op te geven.

$$\rho_a c_a(T) \frac{dT}{dt} = \frac{A_m}{V} [\varepsilon * \dot{h}_{tot} + \alpha_c(20 - \theta) + \varepsilon(\sigma(293^4 - (\theta + 273)^4))] \quad [\text{W.m}^{-2}]$$

$\rho_a$ ,  $c_a$  en  $A_m/V$  zijn dichtheid [kg.m<sup>-3</sup>], specifieke warmte [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] en massiviteit [m<sup>-1</sup>] van het lid.

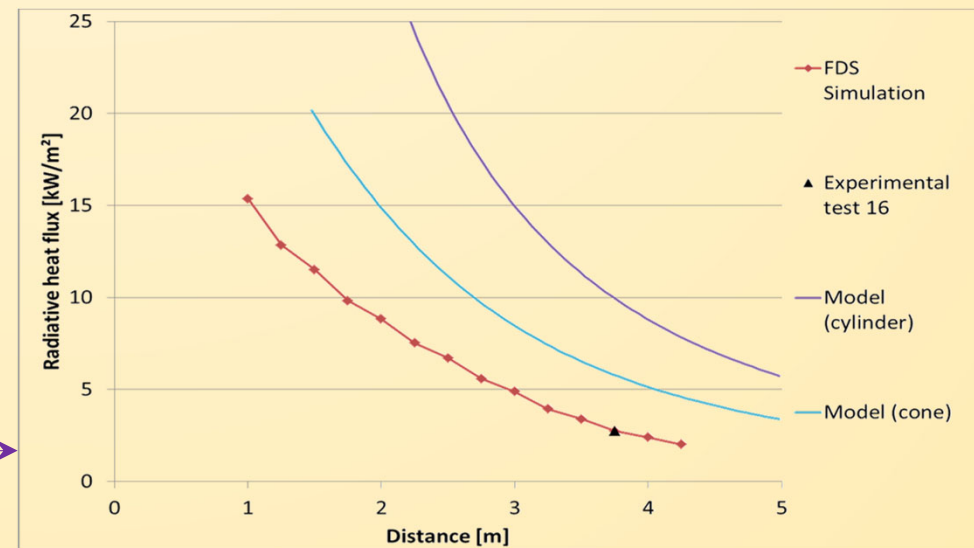
## 4. Analytische methode en validatie

### 4.3. Vereenvoudigd model

#### Modelvalidatie op basis van testen in Luik (en FDS-modellering)

- Meetinstrument gelegen op 3,75 m van de vuurbron (hoogte : 1,75 m)
- Oriëntatie van het meetinstrument: loodrecht op de as brand-instrument

Diam.	Gemiddelde waarde experiment	Tests nr	Cilinder vlam	Conische vlam
[m]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[-]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]
0.60	0.31	1 tot 4	1.20	0.74
1.00	0.73	5 tot 8	3.23	1.95
1.40	1.36	9 tot 14	6.19	3.67
1.80	2.12	15 tot 18	9.95	5.78
2.20	3.39	19 tot 22	14.55	8.30

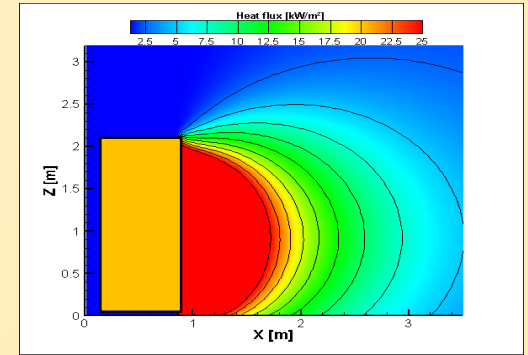
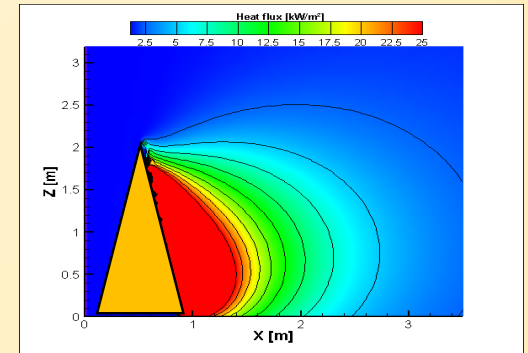
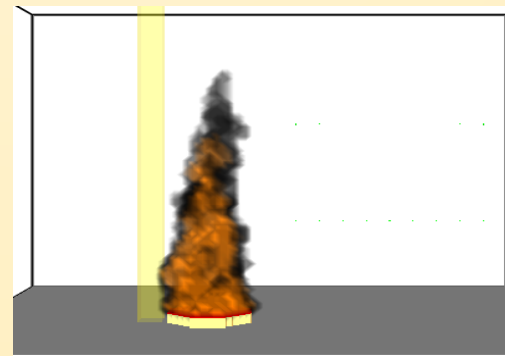
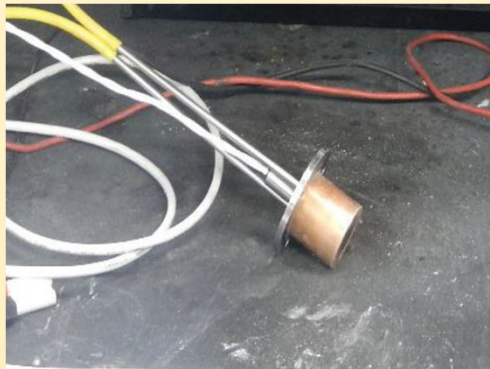
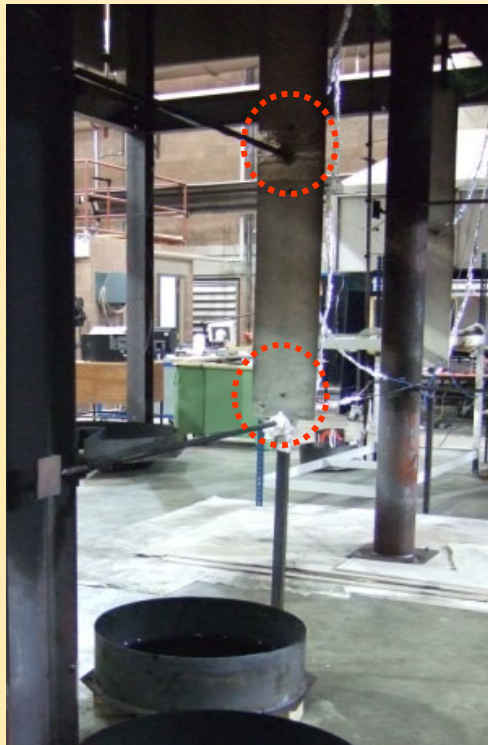




## 4. Analytische methode en validatie

### 4.3. Vereenvoudigd model

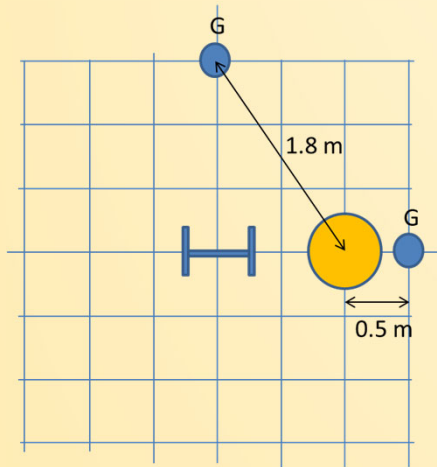
Modelvalidering op basis van testen in Ulstert (en FDS-modellering)



## 4. Analytische methode en validatie

### 4.3. Vereenvoudigd model

#### Modelvalidering op basis van testen in Ulster (en FDS-modellering)

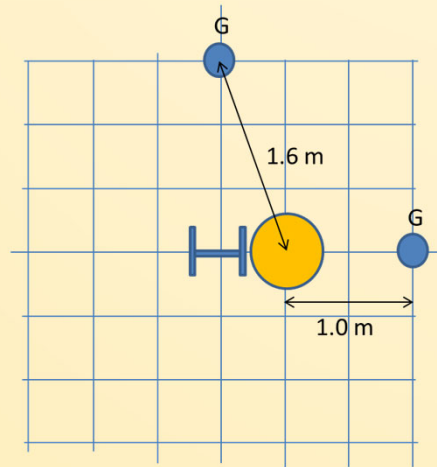


Geval 1 bis

1 pan

$D = 0,7 \text{ m}$

Meters op 0,5/1,8 m



Geval 1b

1 pan

$D = 0,7 \text{ m}$

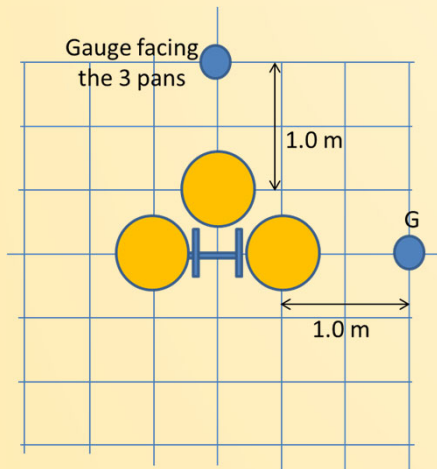
Meters op 1,0/1,6 m

Plaats van de meter		Experiment gemiddelde	FDS- simulatie	Cilinder vlam	Conische vlam
Hoogte	Afstand				
m	m	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>
1.0	<u>0.5</u>	30.6	28.5	74.0	39.0
1.0	<u>1.0</u>	13.8	12.9	33.2	17.9
1.0	<u>1.6</u>	5.9	5.5	15.5	8.5
1.0	<u>1.8</u>	4.2	3.8	10.8	6.0
2.0	<u>0.5</u>	6.2	11.2	22.0	5.9
2.0	<u>1.0</u>	4.5	5.9	14.1	5.5
2.0	<u>1.6</u>	3.0	3.7	8.8	4.1
2.0	<u>1.8</u>	2.3	2.6	6.7	3.3

## 4. Analytische methode en validatie

### 4.3. Vereenvoudigd model

#### Modelvalidering op basis van testen in Ulster (en FDS-modellering)

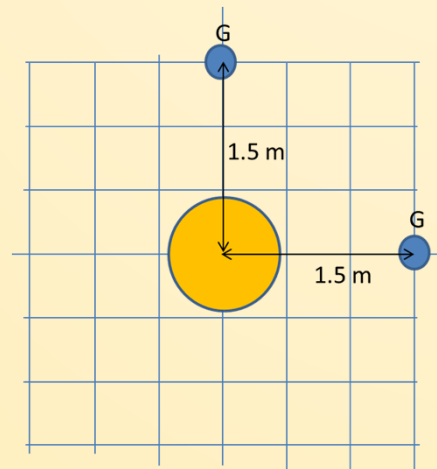


Geval 3

3 pannen

$D = 0,7 \text{ m}$

Meters op 1,0 m



Geval 5

1 pan

$D = 1,6 \text{ m}$

Meters op 1,5 m

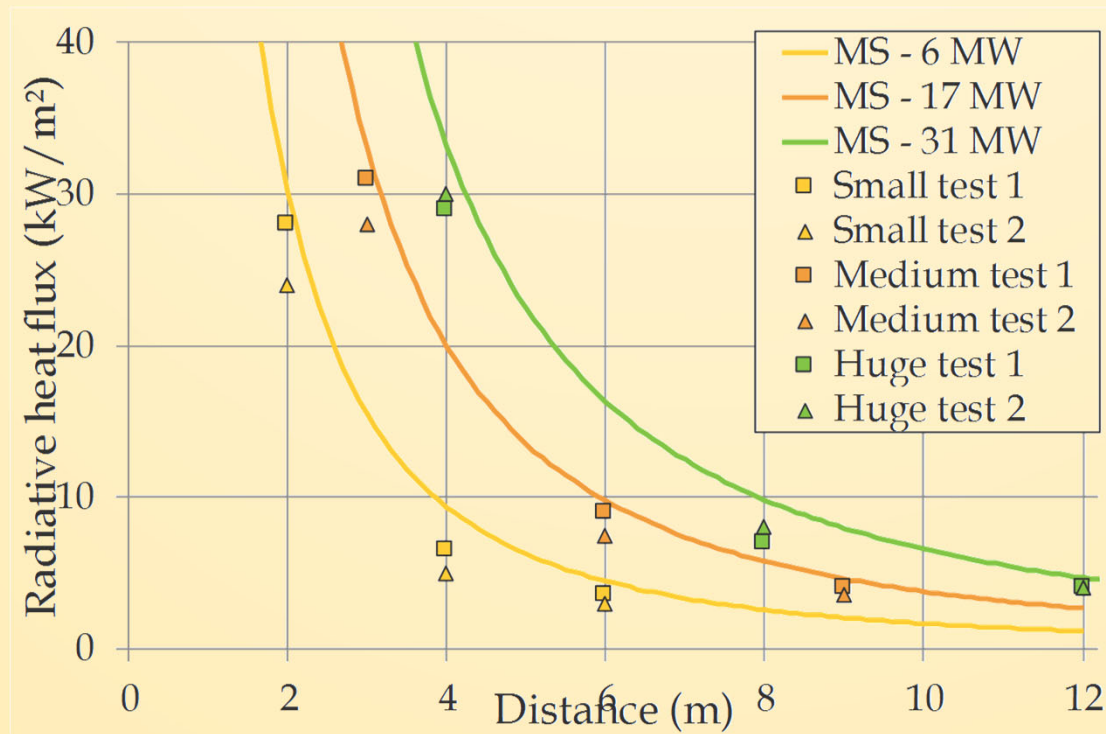
Plaats van de meter		Experiment gemiddelde	Gemiddeld e simulatie	Cilinder vlam	Conische vlam
Hoogte	Afstand				
m	m	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>
1.0	<u>1.0</u>	31.0	26.6	66.3	37.4
1.0	<u>1.0</u>	24.3	21.6	62.0	34.6
2.0	<u>1.0</u>	15.0	17.7	40.9	16.2
2.0	<u>1.0</u>	13.0	13.6	38.5	15.9

Plaats van de meter		Experiment gemiddeld e	Gemiddeld e simulatie	Cilinder vlam	Conische vlam
Hoogte	Afstand				
m	m	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>
1.0	<u>1.5</u>	37.6	33.6	53.9	38.9
2.0	<u>1.5</u>	26.5	24.5	55.2	29.7

## 4. Analytische methode en validatie

### 4.3. Vereenvoudigd model

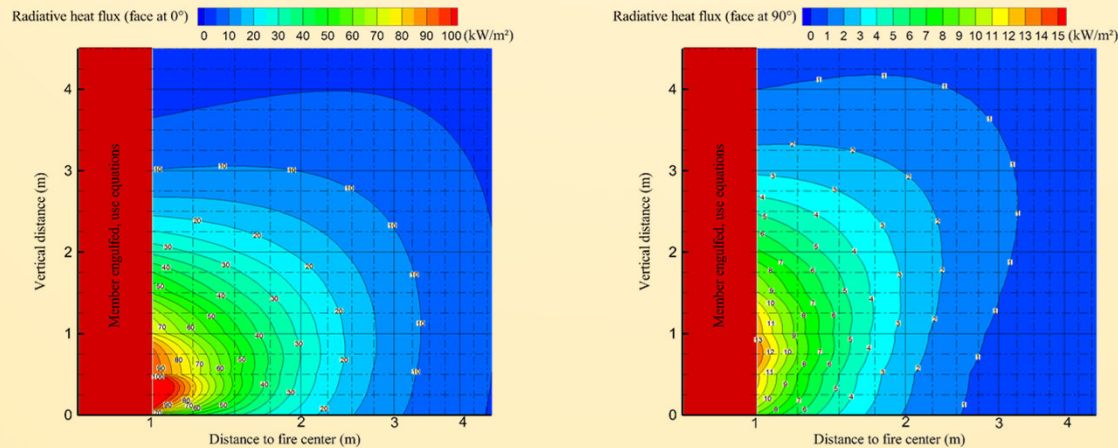
#### Modelvalidering voor grote diameters (LCPP-tests)



## 4. Analytische methode en validatie

### 4.4. Contourplots

- Een nieuwe reeks resultaten verstrekken voor de validering van SAFIR- en OZone-toepassingen.
- Snelle en veilige resultaten bieden voor een breed scala van configuraties (predesign) en een interpolatiemethode om ze toe te passen op een veel breder scala van configuraties
- Verstrekken van een reeks referentie-resultaten voor de validering van de toepassing van Analytische methoden door toepassers (rekenbladen of software)

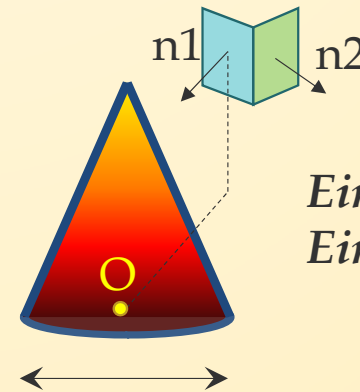


$D = 2\text{m}$ ,  $\text{RHR} = 500 \text{ kW/m}^2$ ,  $\theta = 0^\circ$  (links) of  $\theta = 90^\circ$  (rechts).

## 4. Analytische methode en validatie

### 4.4. Contourplots

- Elk nomogram wordt gekenmerkt door :
  - de diameter van de brand (m)
  - de RHR (kW/m<sup>2</sup>)
  - de oriëntatie van het ontvangende oppervlak (°)
- Nomogrammen hebben alleen betrekking op straling, niet gebruikt :
  - In het vuur HESKESTAD
  - Op plafondniveau HASEMI
- Gaat ervan uit dat de vlamemissie 1,0 is.
- Geeft de invallende flux, niet de geabsorbeerde flux (moet vermenigvuldigd worden met de emissiviteit !)



*Eindige Oppervlakte 1 :  $\theta = 0^\circ$   
Eindige Oppervlakte 2 :  $\theta = 90^\circ$*



## 4. Analytische methode en validatie

### 4.4. Contourplots

Geval	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D m)	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4
HRR (kW/m <sup>2</sup> )	250	500	1000	1500	250	500	1000	1500	250	500	1000	1500
Vermogen (MW)	0.8	1.6	3.1	4.7	1.8	3.5	7.1	10.6	3.1	6.3	12.6	18.8

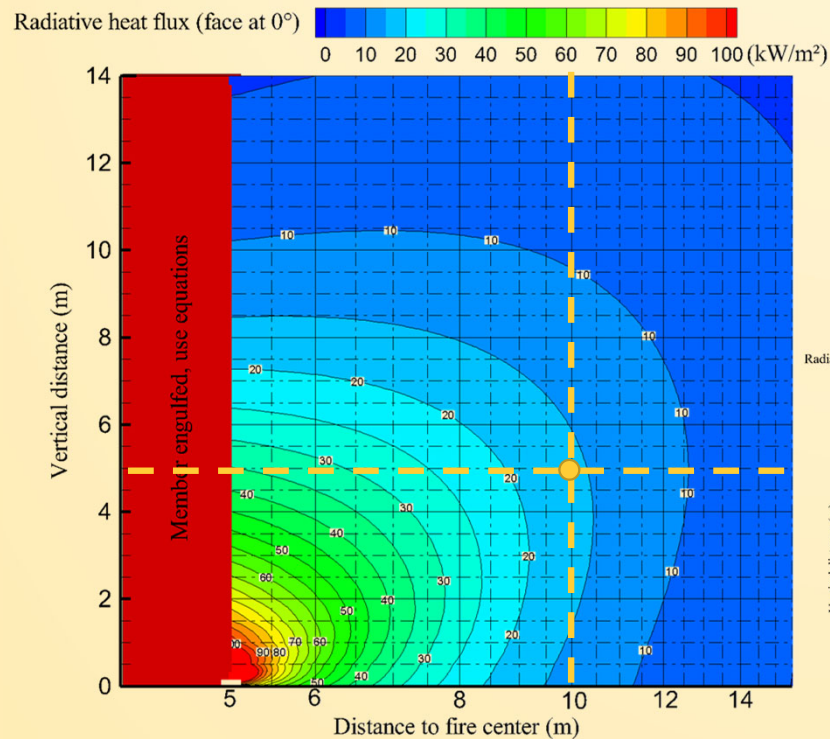
Geval	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
D m)	6	6	6	6	8	8	8	9	9	9	10	10
HRR (kW/m <sup>2</sup> )	250	500	1000	1500	250	500	1000	250	500	750	250	500
Vermogen (MW)	7.1	14.1	28.3	42.4	12.6	25.1	50.3	47.7	15.9	31.8	19.6	39.3

*Toepassingsgebied van de methode (idem bijlage C van EN 1991-1-2):  $D \leq 10$  m;  $Q \leq 50$  MW*

*-> De gekozen configuraties beslaan het toepassingsgebied van de berekeningsmethode*

## 4. Analytische methode en validatie

### 4.4. Contourplots



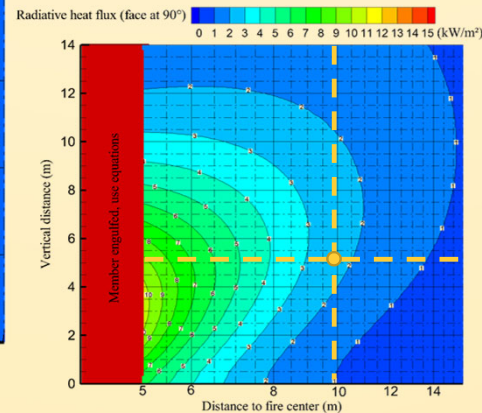
➤ Kenmerken lokale brand :

- $D = 10 \text{ m}$
- $RHR : 500 \text{ kW/m}^2$

➤ Doelpositie

- $Z = 5 \text{ m}$
- $X = 10 \text{ m}$
- Oriëntatie:  $0^\circ$

Invallende Flux  
=  $16 \text{ kW/m}^2$



➤ Doelpositie

- $Z = 5 \text{ m}$
- $X = 10 \text{ m}$
- Oriëntatie:  $90^\circ$

Invallende Flux  
=  $2,4 \text{ kW/m}^2$



## 4. Analytische methode en validatie

### 4.5. Conclusies

- LOCAFI project introduceert het nieuwe concept van Virtuele Volume Vlam.
- De temperatuurverdeling op de omtrek van de Virtuele Volume Vlam is gebaseerd op bestaande vergelijkingen van EN 1991-1-2 bijlage C (Heskestad, Hasemi).
- De uitwisseling van stralingsfluxen is gebaseerd op de configuratiefactor van bijlage G van EN 1991-1-2.
- Het vereenvoudigde model is gebaseerd op wiskundige vergelijkingen die de stralingsflux leveren die door een oneindig klein oppervlak wordt ontvangen uit cilinders en ringen.
- De convectieve stromen moeten afzonderlijk berekend worden. Ze hebben een significant effect bij configuraties die al onder bijlage C van EN 1991-1-2 vallen (in een brand gelegen of zich op plafondniveau bevindende elementen).