

# LOCAFI+

Temperature assessment of a vertical member subjected to LOCALised Fire, Dissemination

**Stanovení teploty svislých prvků  
vystavených lokálnímu požáru**

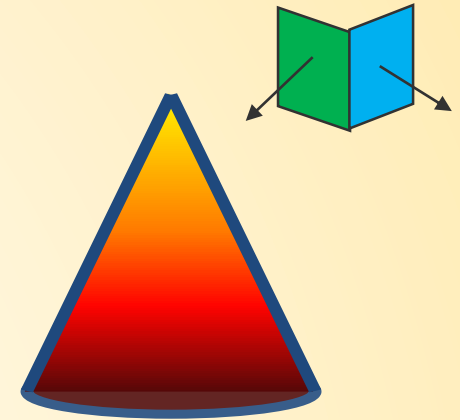
Projekt č. 754072

**Experimenty a modely  
lokálního požáru**

# Motivace

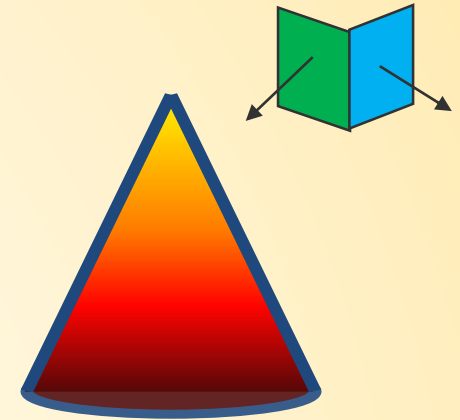
- Seznámit s výsledky
  - Experimentů
  - Modelování
    - Dynamikou plynů
    - Analytickými modely

v projektu LOCAFI



# Obsah prezentace

- Úvod
- Experimenty
- FCD model
  - Validace
  - Nomogramy radiace teplotního pole
- Analytický model
  - Obecný a zjednodušený
  - Validace
- Shrnutí



# Modelování požáru

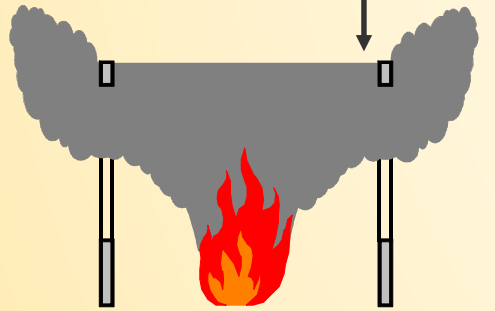
Lokální požár

Bez  
prostorového  
vzplanutí

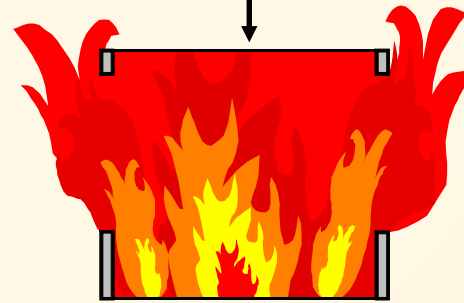
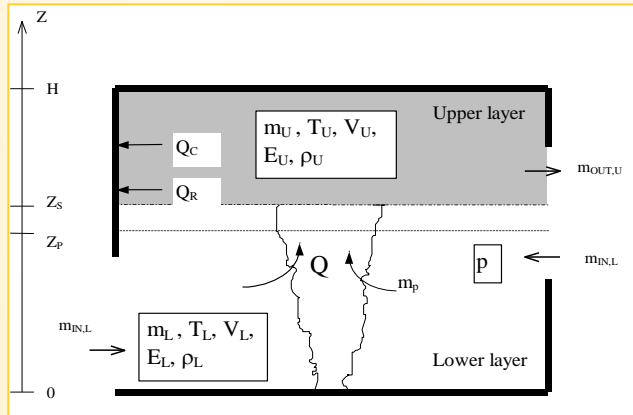
Prostorové  
vzplanutí

Požár pouze lokální

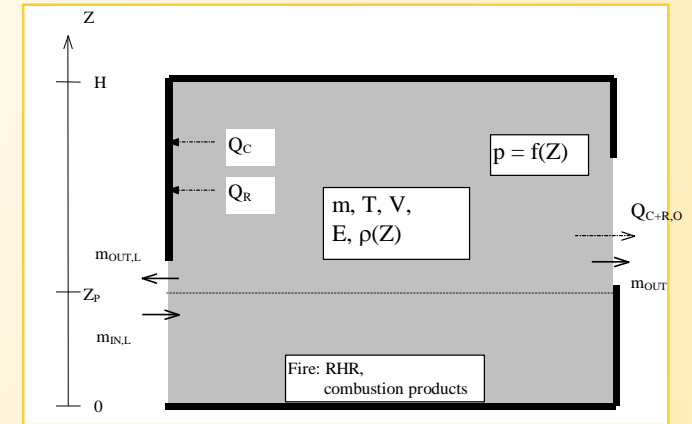
Požár zachvátí  
celý požární úsek



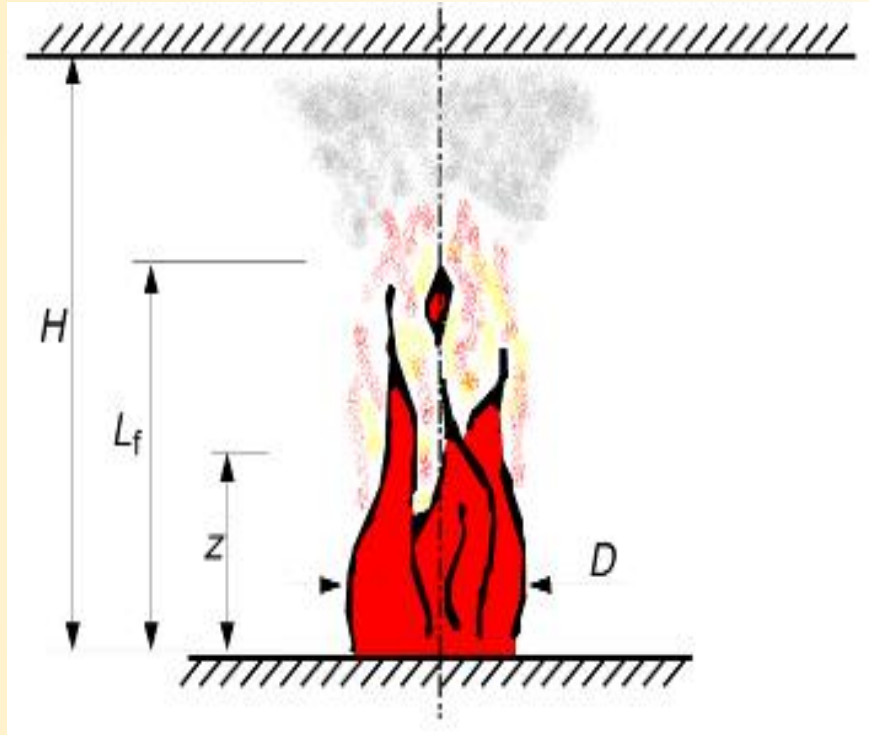
LOKÁLNÍ POŽÁR



PROSTOROVÝ  
POŽÁR

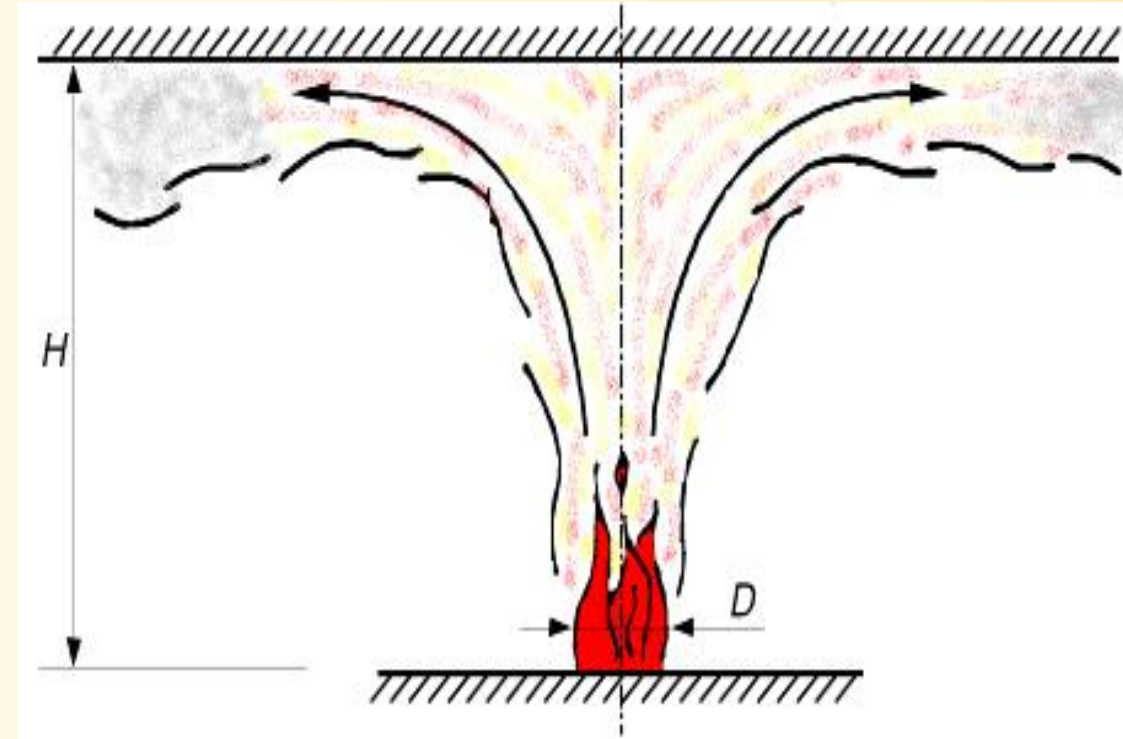


# Lokální požár



Heskestad model

Plameny **nedosahují** ke stropu



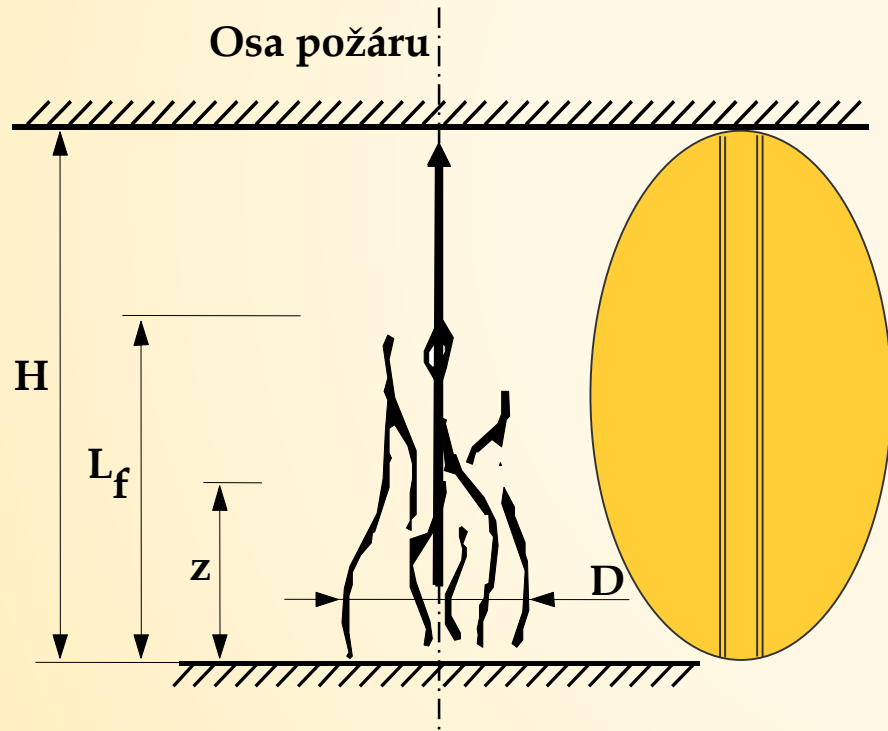
Hasemi model

Plameny **dosahují** ke stropu

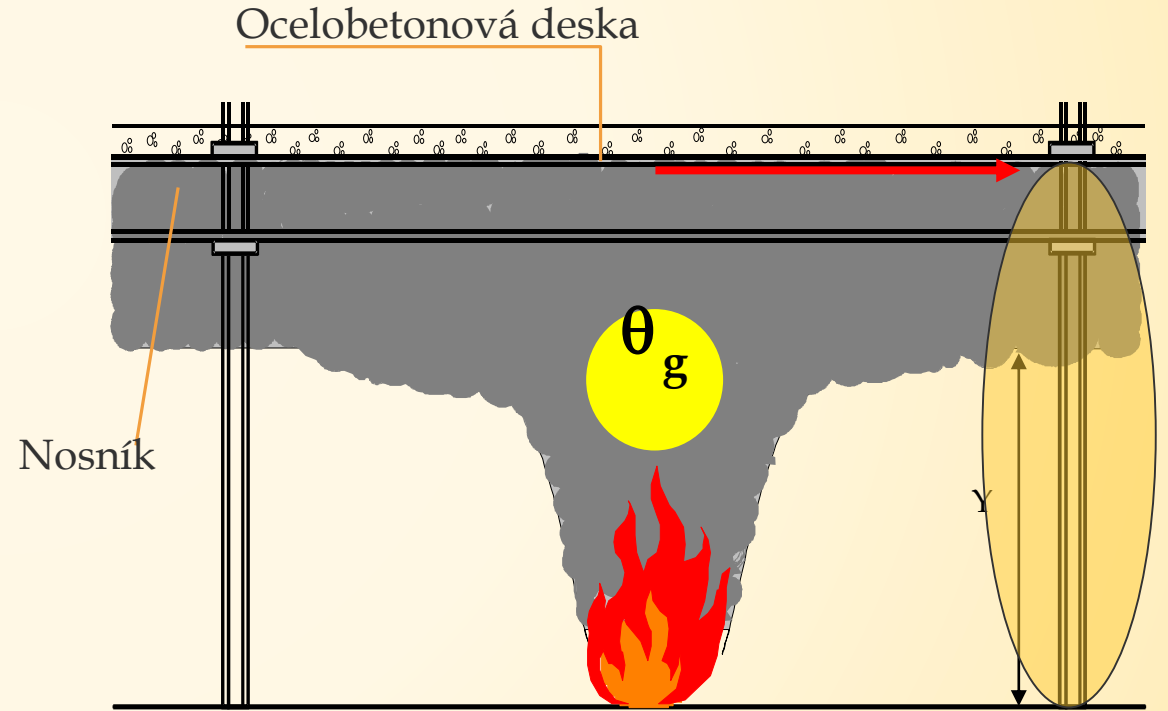
Příloha C v EN1991-1-2:2005

# Sloup vystavený sálání lokálního požáru

Plameny nedosahují ke stropu



Plameny dosahují ke stropu



Sloup vystaven sálání

$Y$  = výška oblasti bez kouře

## Zkoušky v Liège

### Sálání tepla z požáru



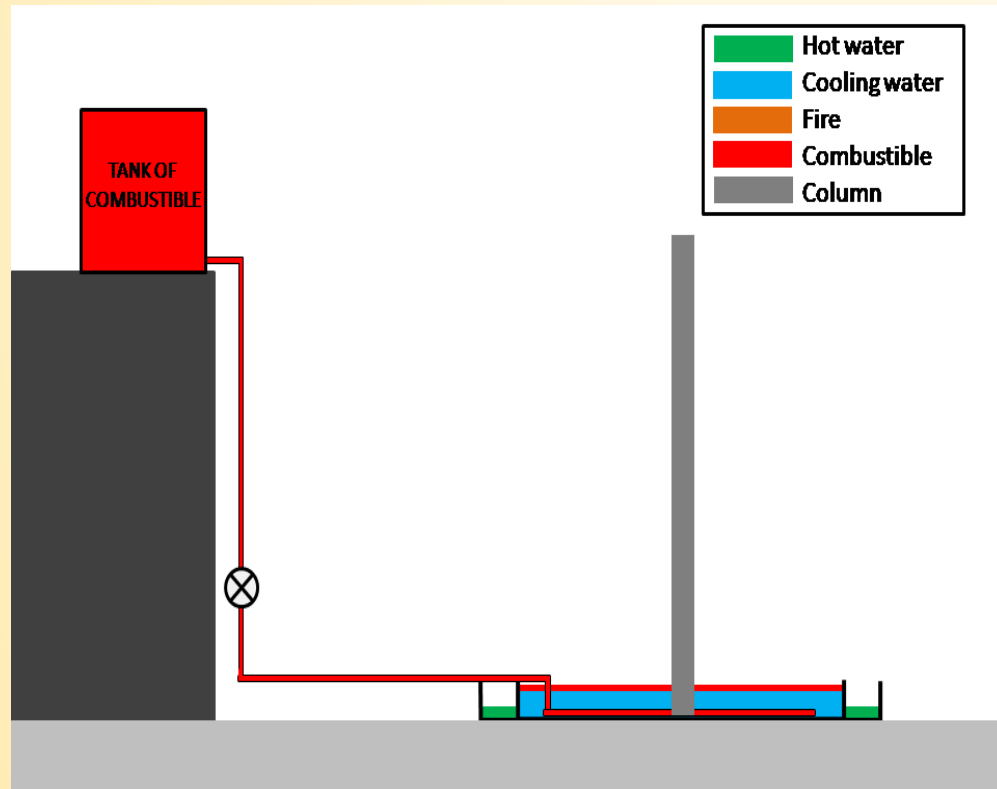
- **24 zkoušek**

Měnilo se

- Průměr požáru (*0,6 m, 1,0 m, 1,4 m, 1,8 m a 2,2 m*)
- Hořlavina (*nafta a N-heptan a celulóza*)
- Plocha sloupu
- Pro každý průměr a dvě hořlaviny byl připraven
  - Jeden sloup mimo požár
  - Jeden sloup ve středu požáru

## Zkoušky v Liège

### Zkušební sestava



- Dvě nádrže s heptanem a naftou hořáky se plnily gravitací
- Rychlost rozvoje požáru kontrolována ručně
- Pro zajištění stálého hoření, nádrž chlazena vodou



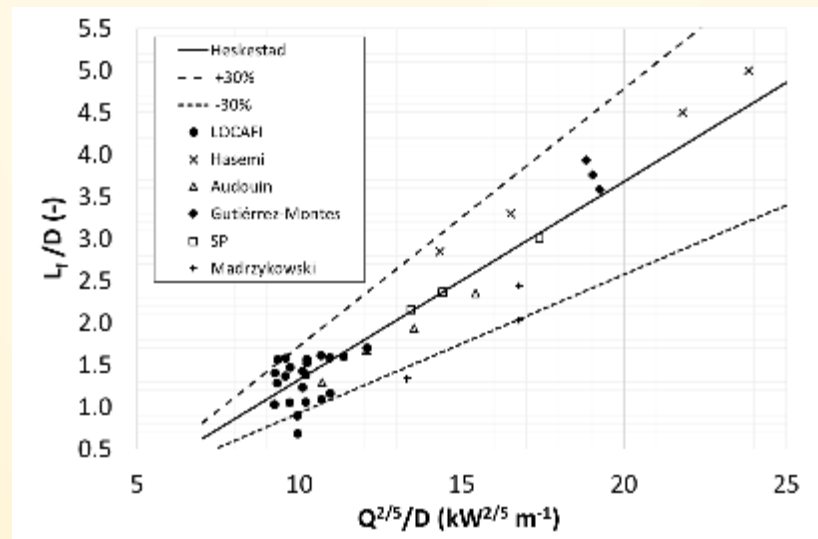
## Zkoušky v Liège

### Měření výšky plamene



Průměrná výška plamene  $L$  je definovaná jako vzdálenost nad zdrojem hoření, kde se **plameny přerušují na polovinu**, přerušování plamenů  $I(z)$  je definováno časem  $s$  a bez plamene.

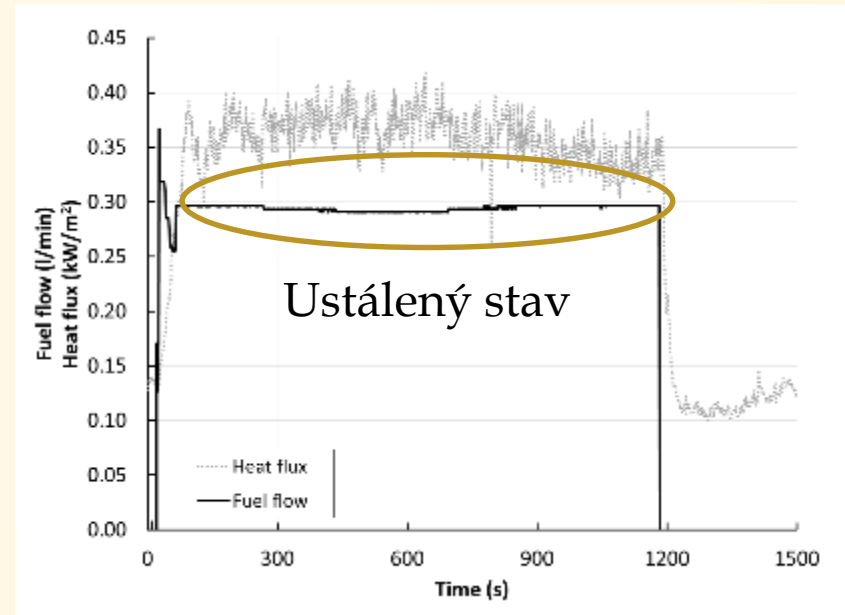
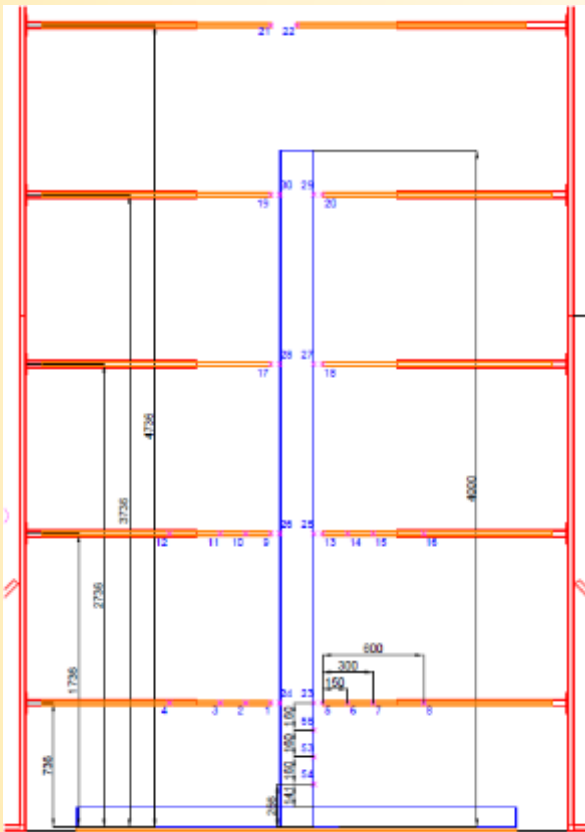
K měření digitální kamera



Rozdíl mezi změřenou a předpovězenou výškou plamene v Heskestad modelu byl +30% a -30%, což odpovídá nejistotám účinnosti hoření a výhřevnosti.

## Zkoušky v Liège

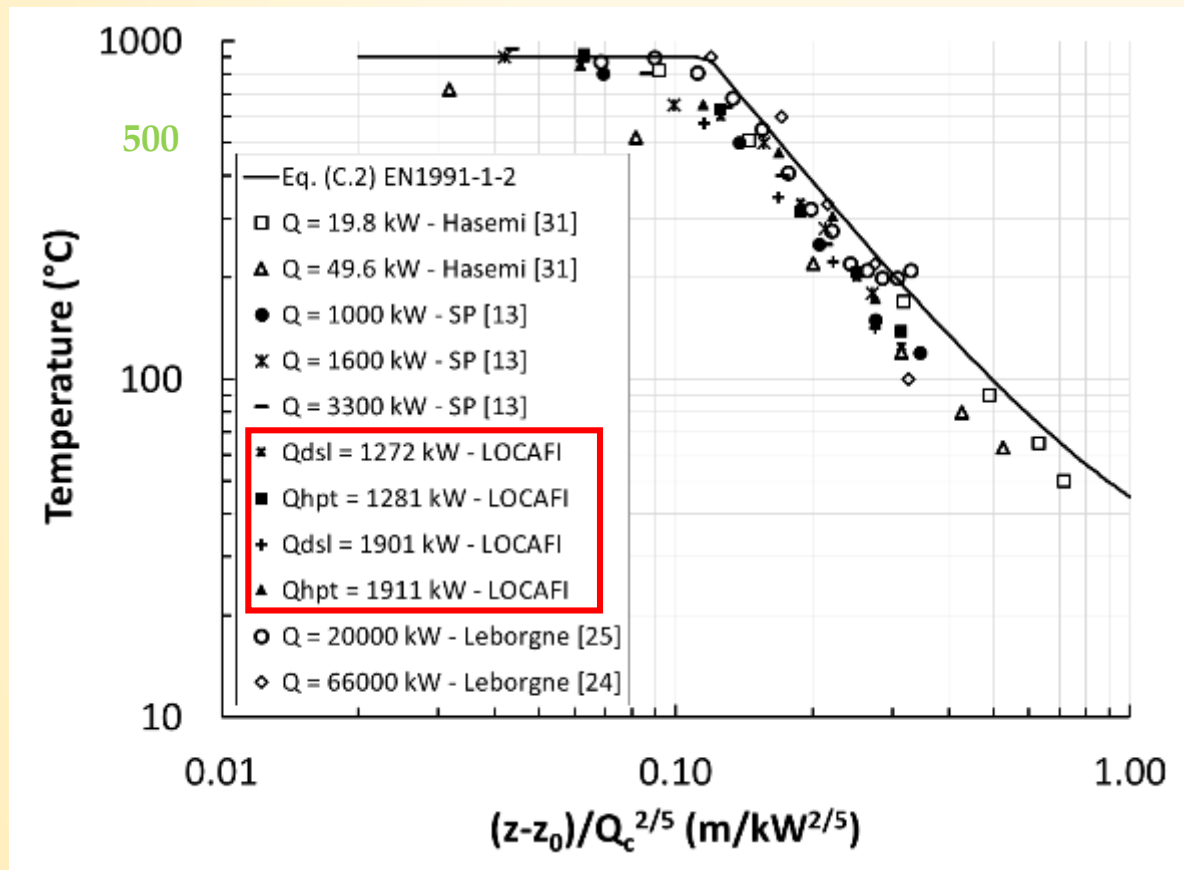
### Měření teploty a plamenů



- Měřilo se do ustáleného stavu teploty a sálání
- Ve sloupu se měřil termočlánky rozvoj teploty

## Zkoušky v Liège

### Změřené teploty a sálání



Model v EN1991-1-2  
dobře předpovídá  
teplotu plamene  
( $q_g \geq 500^\circ\text{C}$ ) a  
oblaku hořících plynů  
( $q_g < 500^\circ\text{C}$ )

## Zkoušky v Ulsteru

### Sálání na prvky mimo lokální požár

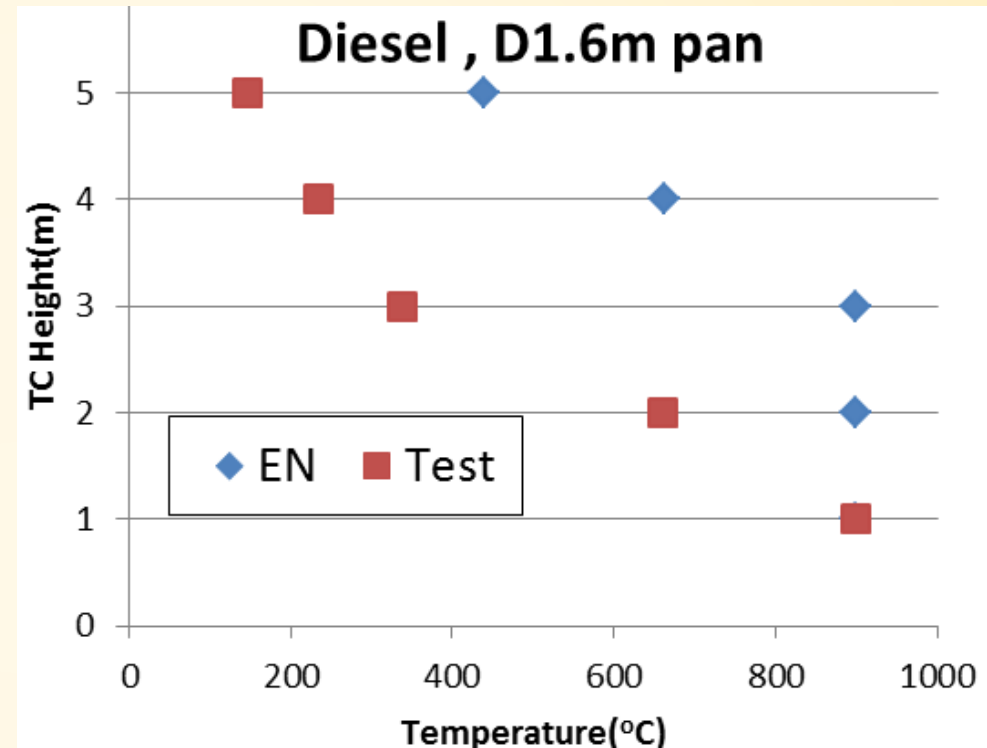
- 58 zkoušek
- Měnilo se
  - Bez stropu 37 a se stropem 21
  - Počet zdrojů (od 1 po 4) a průměr zdroje (průměry 0,7 m a 1,6m)
  - Hořlavina (nafta a kerozin a celulóza)
- Konstrukce 9 m x 9 m sestávala ze **tří průřezů sloupů** (průřezy I, H a dutý)
- Průběh HRR měřen kalorimetrem v odtahu
- Délka plamenů měřena kamerou a vyhodnocena pravděpodobnost



## Zkoušky v Ulsteru

### Změřená teplota plamene

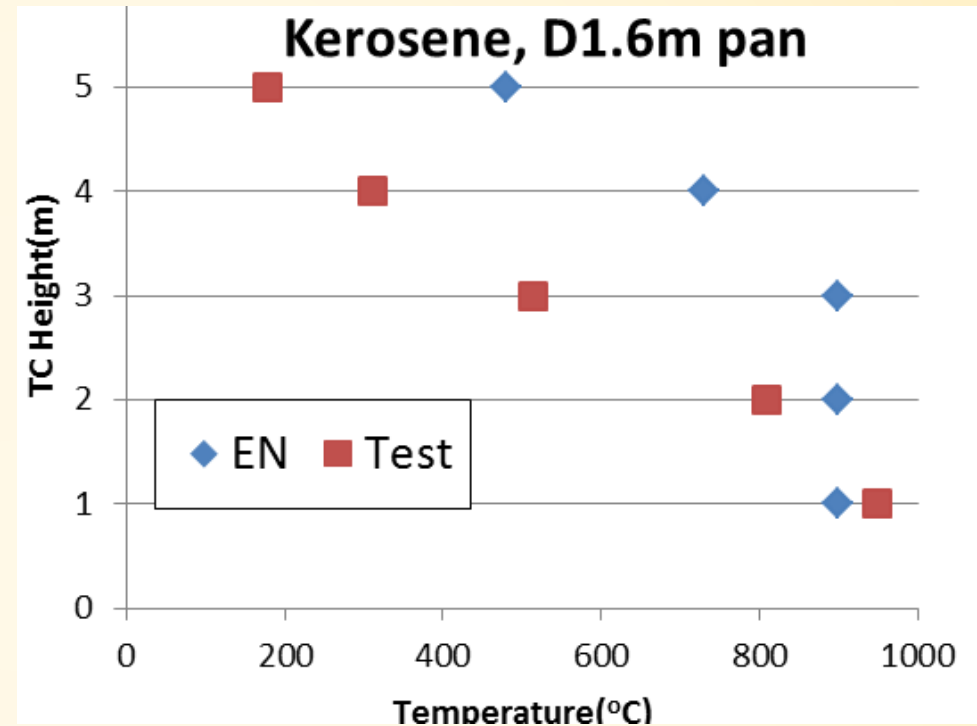
Zkoušky potvrdily, že Heskestad model v EN 1991-1-2 přeceňuje teplotu plamene ( $q_g \geq 500^\circ\text{C}$ ) a oblaku hořících plynů ( $q_g < 500^\circ\text{C}$ )



## Zkoušky v Ulsteru

### Změřená teplota plamene

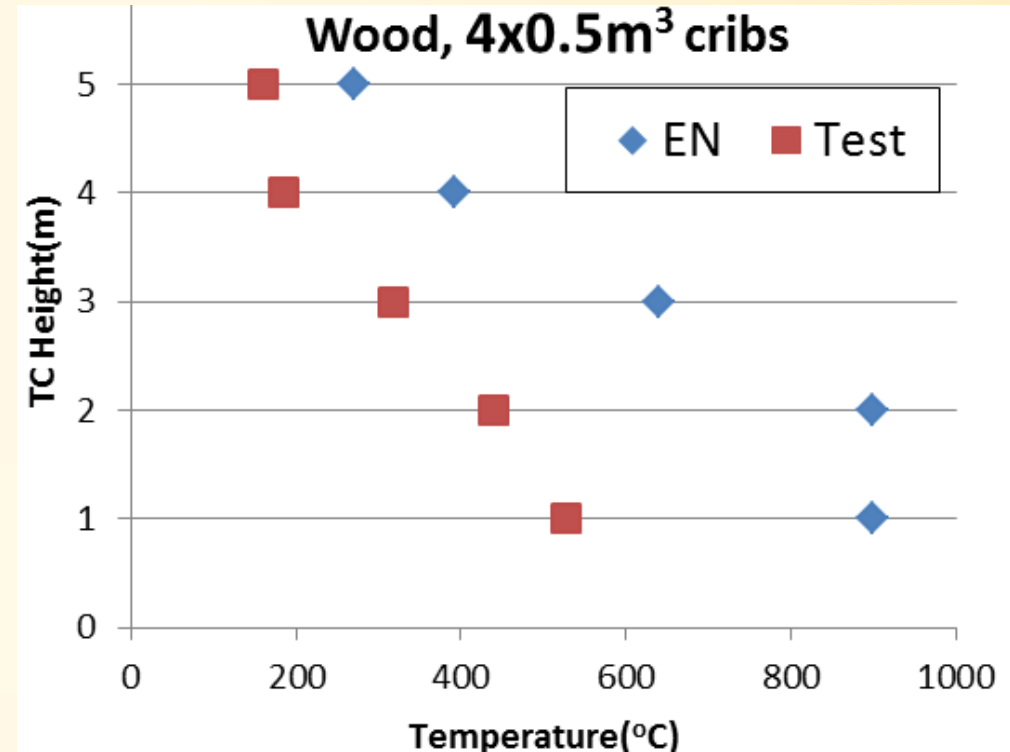
Zkoušky potvrdily, že Heskestad model v EN 1991-1-2 přeceňuje teplotu plamene ( $q_g \geq 500^\circ\text{C}$ ) a oblaku hořících plynů ( $q_g < 500^\circ\text{C}$ )



## Zkoušky v Ulsteru

### Změřená teplota plamene

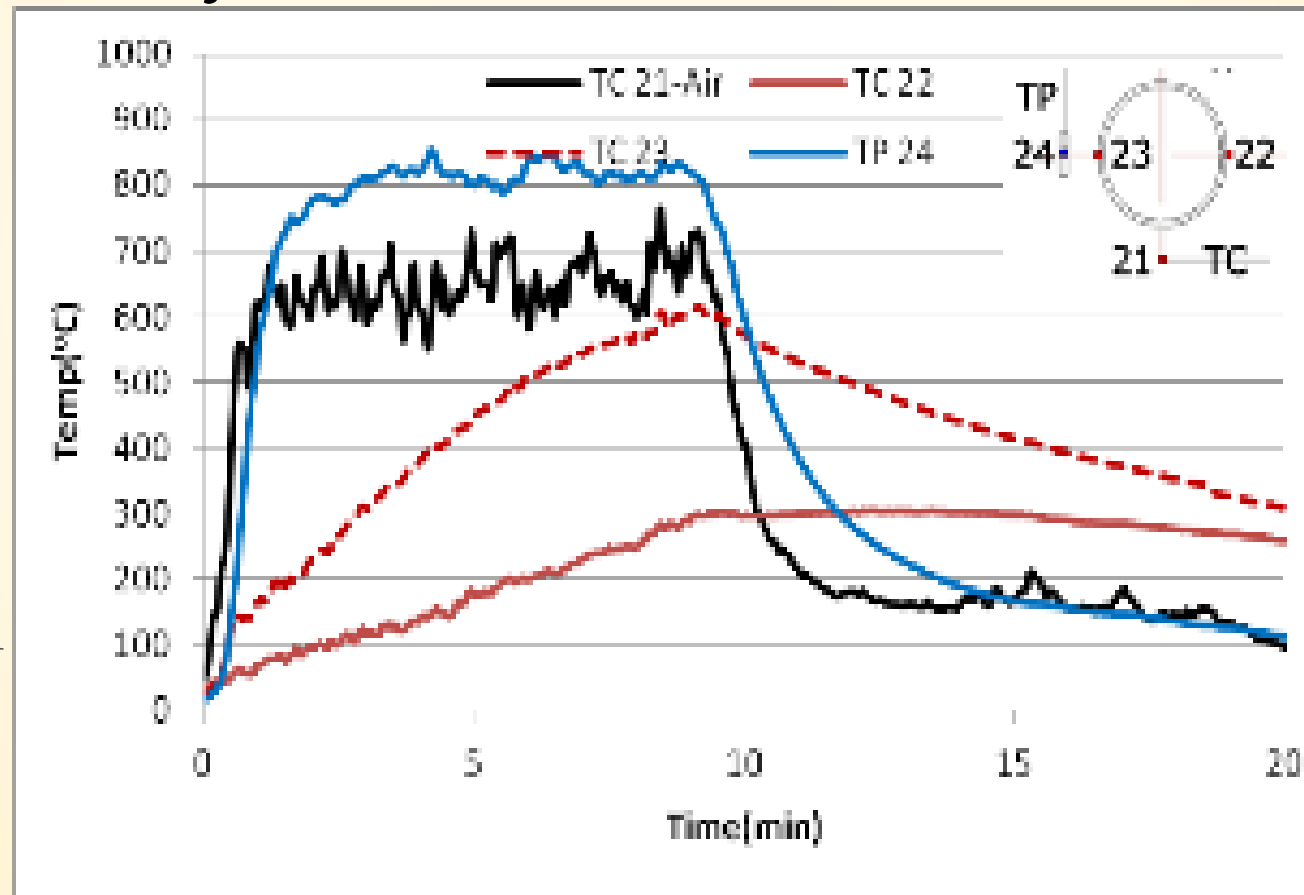
Zkoušky potvrdily, že  
Heskestad model  
v EN 1991-1-2  
přeceňuje teplotu  
plamene ( $q_g \geq 500^\circ\text{C}$ )  
a oblaku hořících plynů  
( $q_g < 500^\circ\text{C}$ )



## Zkoušky v Ulsteru

### Výsledky zkoušky O8

- Počet zdrojů 1
- Velikost zdroje 1,6 m
- Palivo kerozin
- Objem 60 l
- Vzdálenost ke zdroji 0 m
- Termočlánky na sloupu po 1.5 m
- Bez stropu

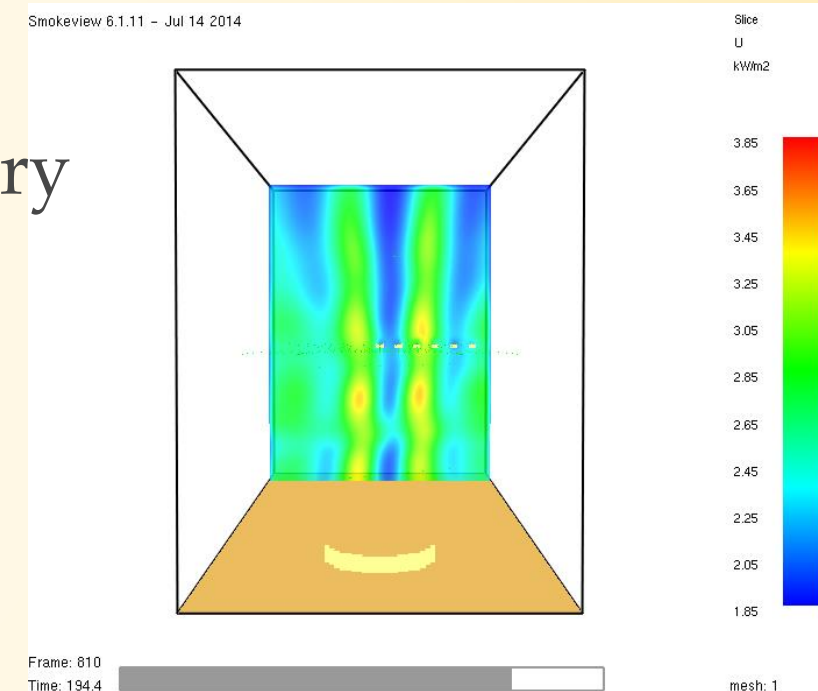




## FDS (NIST)

### Použito

- Model turbulence (Smagorinski,  $C_s = 0,1$ )
- vlastnosti paliva a vydatnost plamene z literatury
- Počet úhlů sálání 200
- Radiační ztráty 0,2 až 0,5 podle paliva a průměru ohně
- Vítr podle změřených rychlostí
- Velikost sítě hrubá



Příklad změny sálání  
vlivem nedostatečného počtu  
radiačních úhlů

## $D = 1$ m, Heptan, bez sloupu - test ULG 06

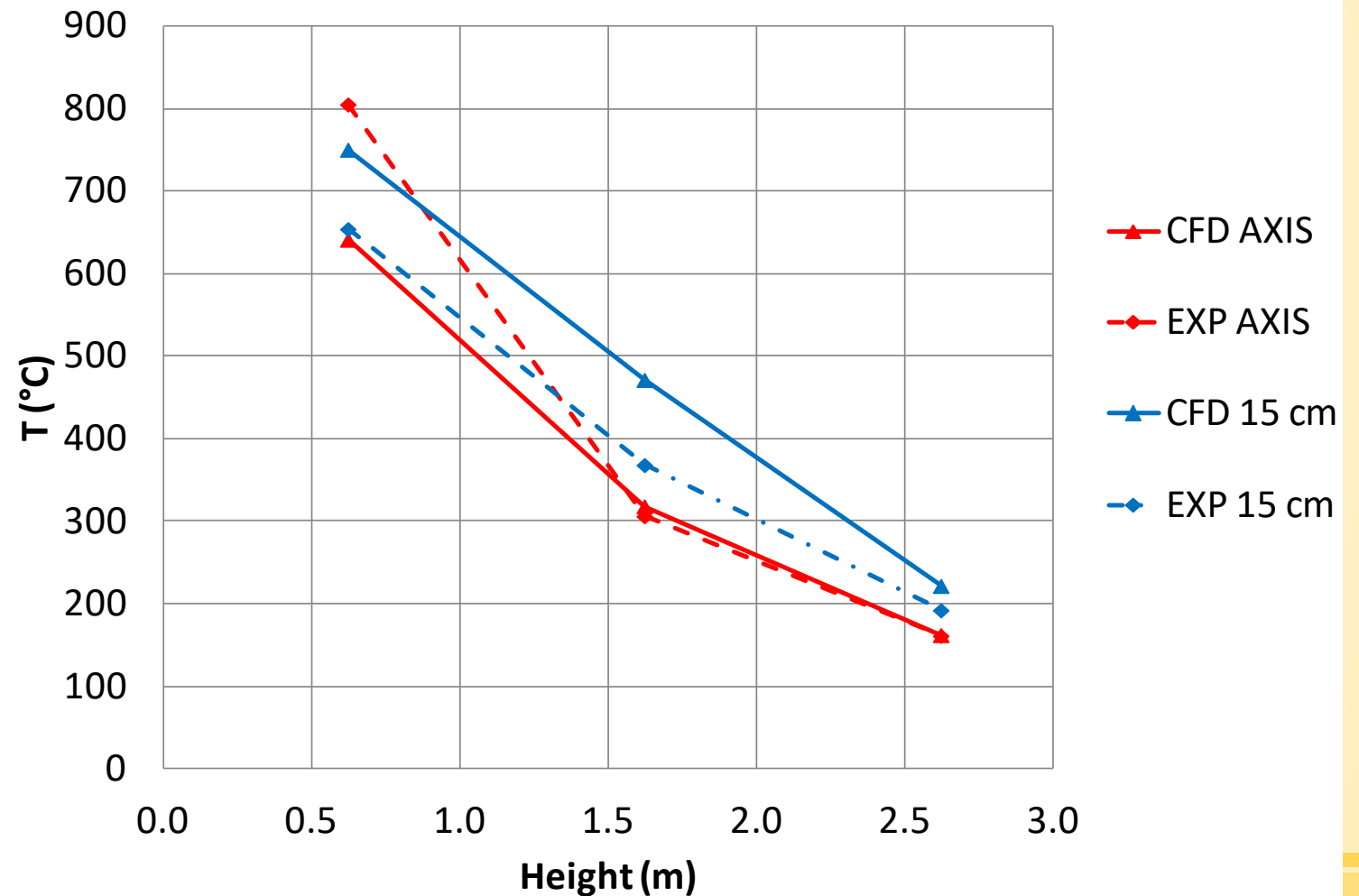
Průměrný přívod paliva $q_{\text{fuel}}$	0.98 l/min
Měrná hmotnost paliva $\rho$	675 kg/m <sup>3</sup>
Vydatnost plamene $y_{\text{soot}}$	0.037
Ideální spalovací teplo $\Delta H_{\text{c,ideal}}$	44600 kJ/kg
Spalovací teplo $\Delta H_{\text{c}}$	41200 kJ/kg
RHR stanovené pro $\Delta H_{\text{c,ideal}}$	491.7 kW (626.1 kW/m <sup>2</sup> )

- Velikost CFD modelu 5,75 m x 3 m x 4 m
- Velikost sítě 5cm x 5 cm x 5 cm
- Rychlost větru 0,22 m/s
- Ztráta radiací 0,45 (SFPE)



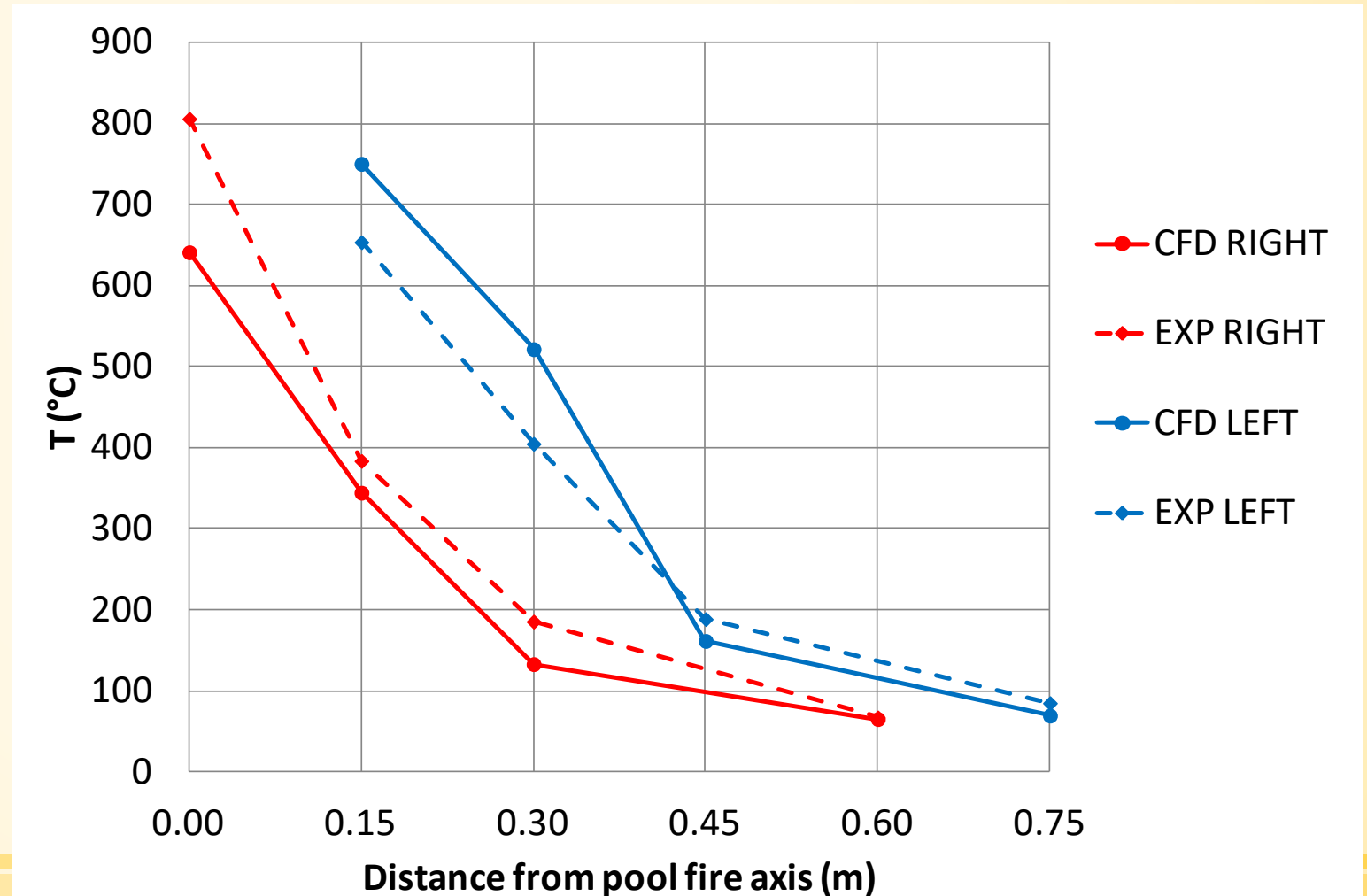
$D = 1$  m, Heptan, bez sloupu - test ULG 06

Výška x teplota



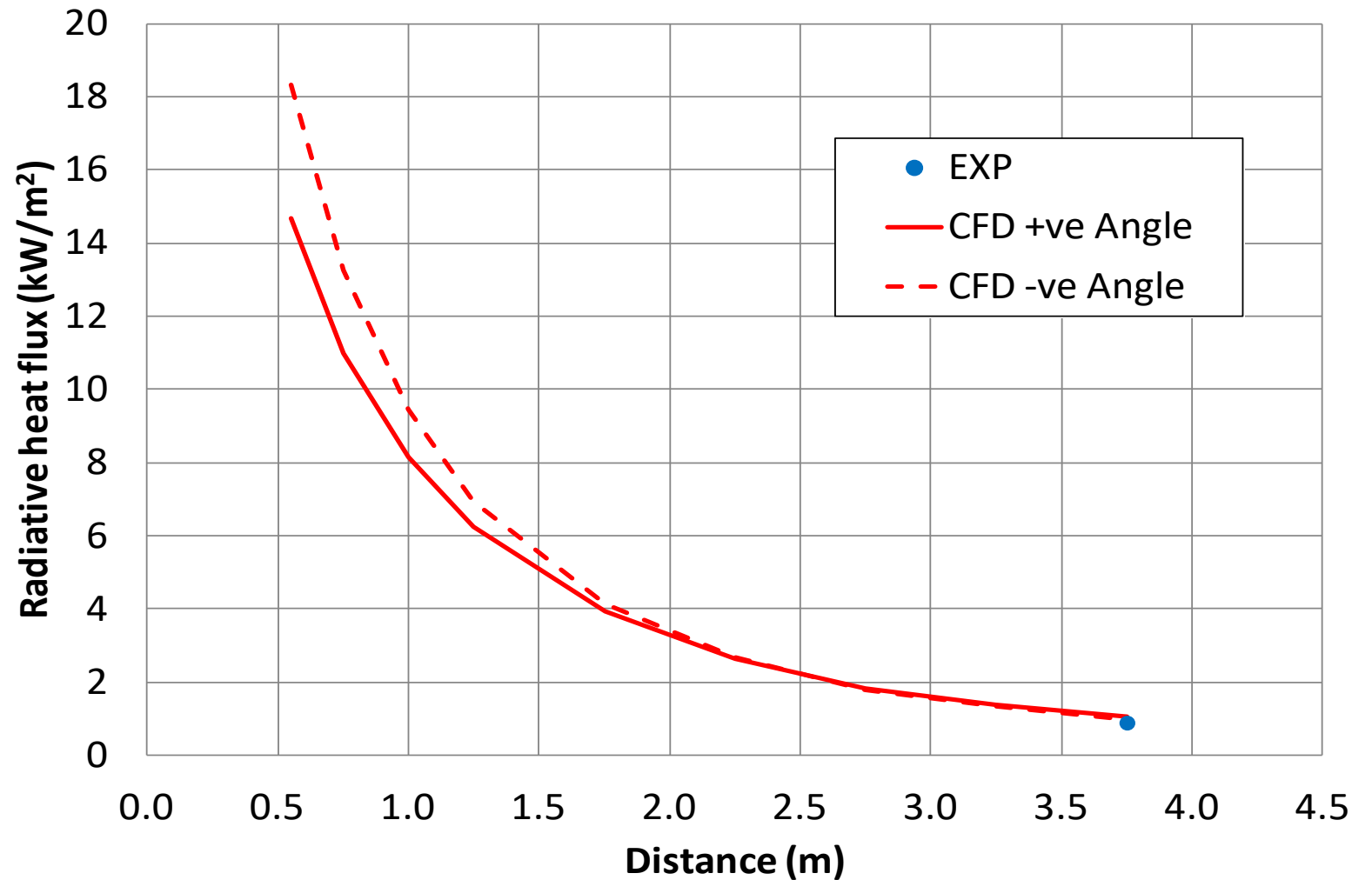
## $D = 1$ m, Heptan, bez sloupu - test ULG 06

Teplota x vzdálenost



$D = 1$  m, Heptan, bez sloupu - test ULG 06

Sálání x vzdálenost



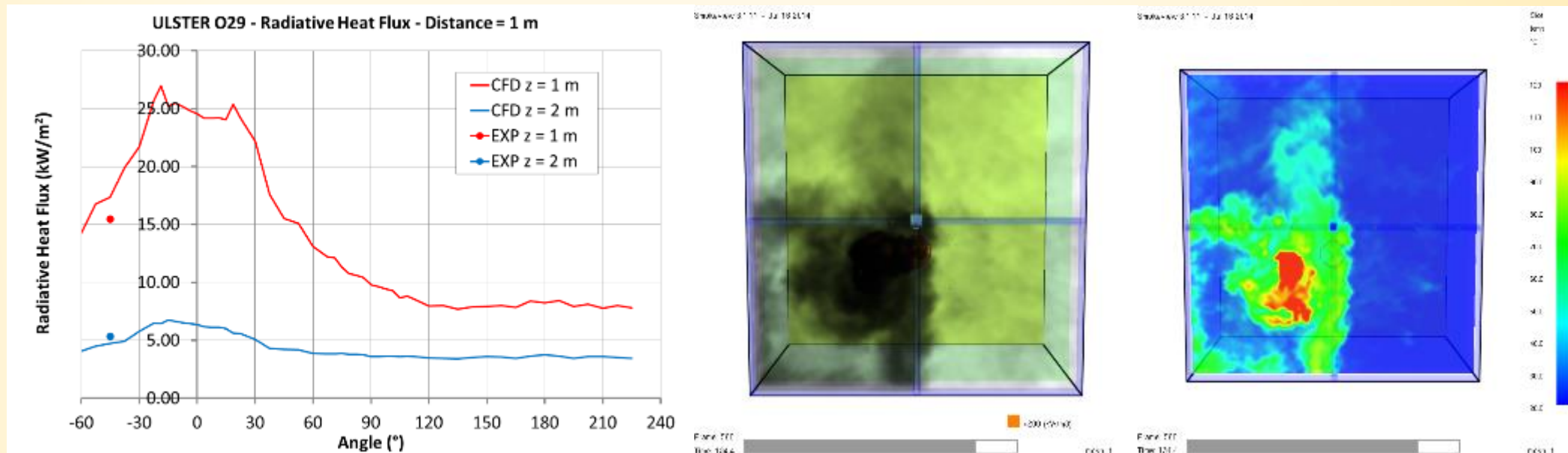
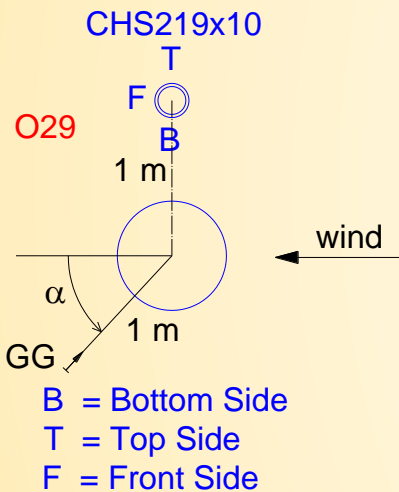
**$D = 0,7$  m, nafta, strop 3,5 m - zkouška O29**

Průměrný přívod paliva $q_{\text{fuel}}$	823 kg/m <sup>3</sup>
Měrná hmotnost paliva $\rho$	0,10
Vydatnost plamene $y_{\text{soot}}$	44 000 kJ/kg
Ideální spalovací teplo $\Delta H_{\text{c,ideal}}$	41 200 kJ/kg
Spalovací teplo $\Delta H_{\text{c}}$	491,5 kW (1 277,1 kW/m <sup>2</sup> )

- Velikost CFD modelu 7,m x 7,m x 3,5,m
- Velikost sítě 50 mm x 50 mm x 50 mm
- Rychlost větru 0,76 m/s
- Ztráta radiací 0,45 (SFPE)



$D = 0,7$  m, nafta, strop 3,5 m - zkouška O29



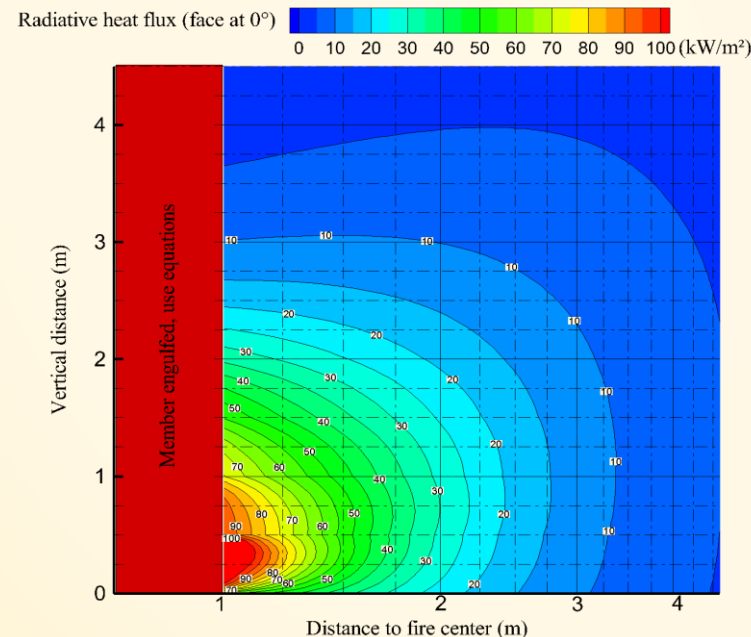
z (m)	CFD RHFG GG (kW/m <sup>2</sup> )	EXP GG (kW/m <sup>2</sup> )	Chyba (%)
1	17.35	15.45	12.3
2	4.71	5.32	-11.5

# Nomogramy radiace teplotního pole

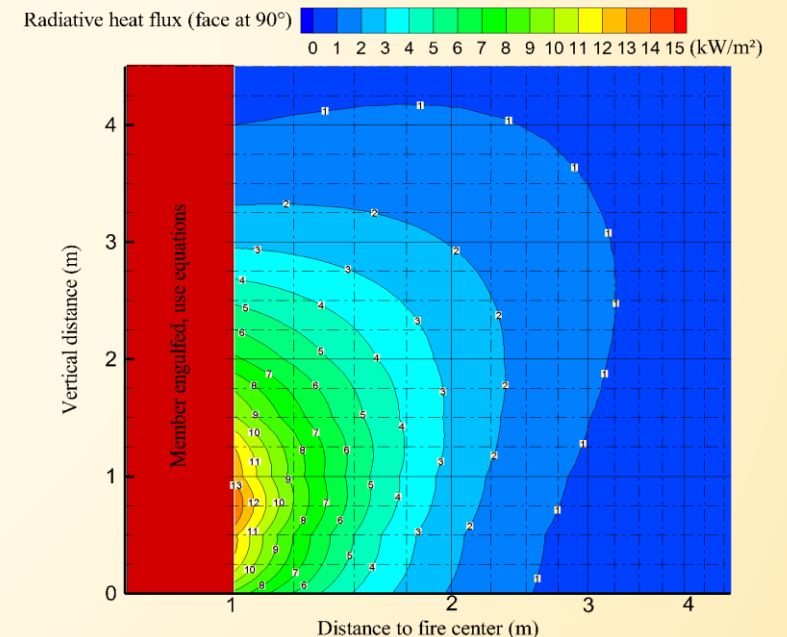
## Teplotní pole

- Pro výpočet pomocí zónového modelu (Ozone)
- Interpolací širší rozsah konfigurací požáru
- Možnost verifikace modelů

$D = 2 \text{ m}$ ,  
 $RHR = 500 \text{ kW/m}^2$



$\theta = 0^\circ$



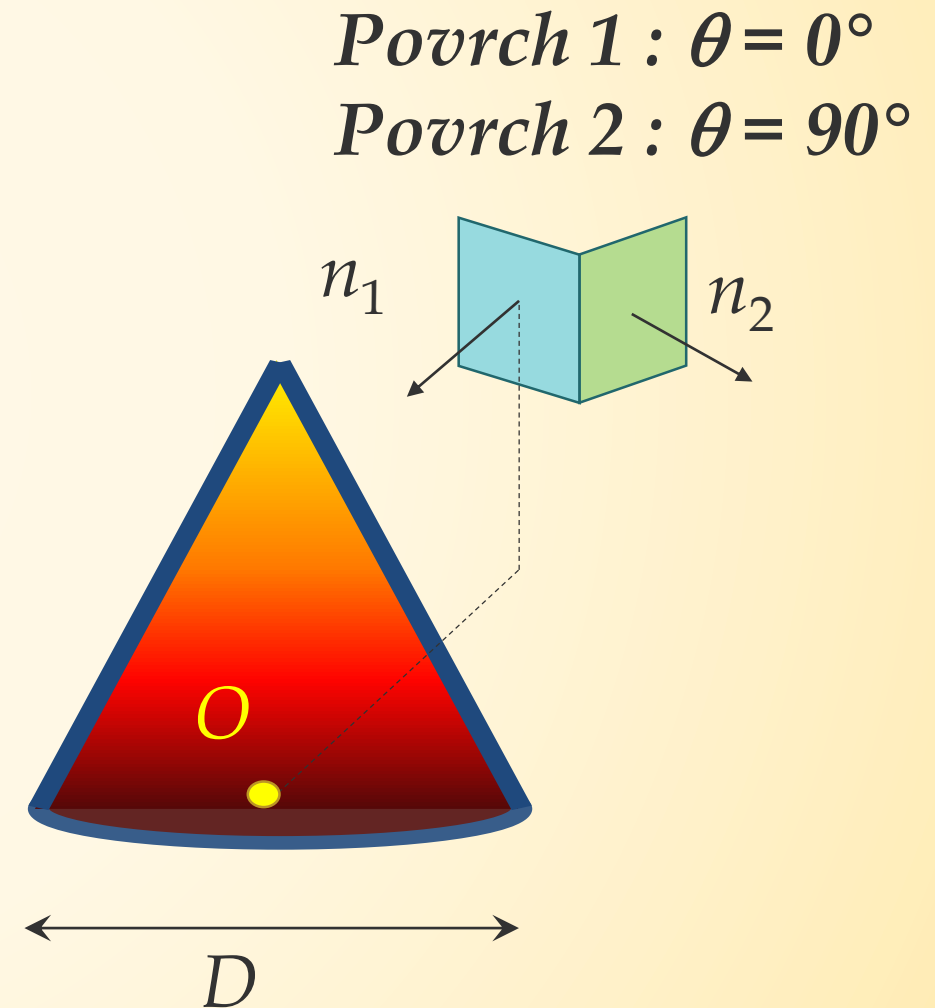
$\theta = 90^\circ$



# Nomogramy radiace teplotního pole

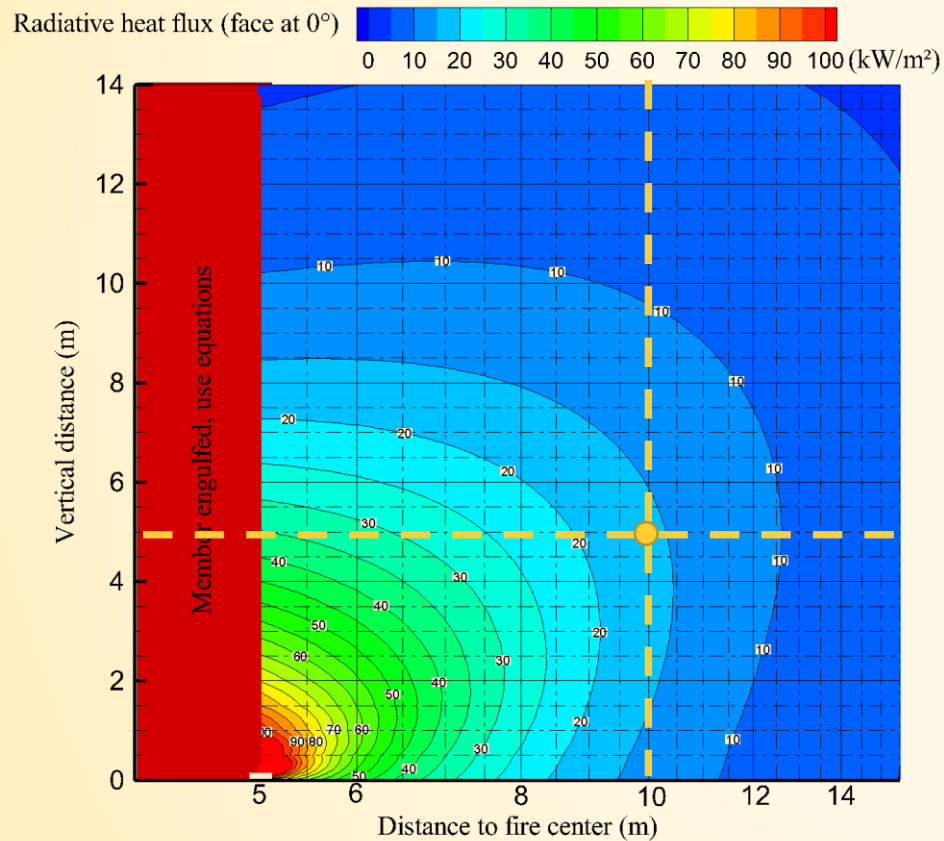
## Studie teplotního pole

- Nomogram
  - Průměr požáru (m)
  - RHR ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )
  - Orientace ozařované plochy ( $^\circ$ )
- Pouze radiace
- Emisivita plamene 1,0



# Nomogramy radiace teplotního pole

## Využití nomogramu



○ Charakteristiky lokálního požáru

-  $D = 10$  m

- RHR : 500 kW/m<sup>2</sup>

○ Pozice

-  $Z = 5$  m

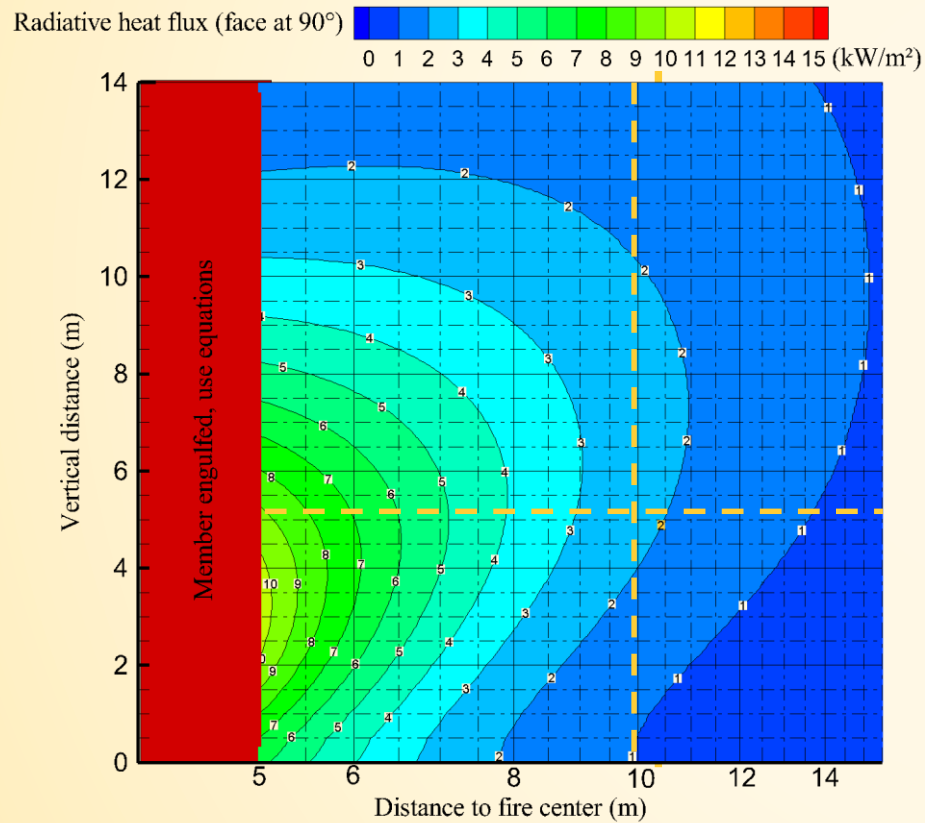
-  $X = 10$  m

- Orientace : 0°

● **Přijatý tepelný tok asi  
16 kW/m<sup>2</sup>**

# Nomogramy radiace teplotního pole

## Využití nomogramu



- Charakteristiky lokálního požáru
  - $D = 10 \text{ m}$
  - $\text{RHR} : 500 \text{ kW/m}^2$
- Pozice
  - $Z = 5 \text{ m}$
  - $X = 10 \text{ m}$
  - Orientace :  $90^\circ$

**Přijatý tepelný tok asi  
2,4 kW/m<sup>2</sup>**

# Analytický model

## Analytický model sálání z plamene

Plocha požáru jako kruh

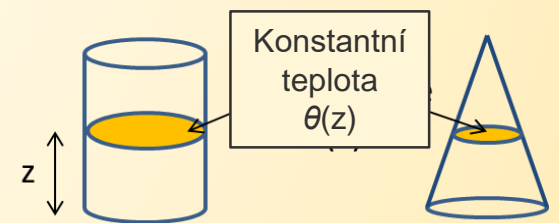
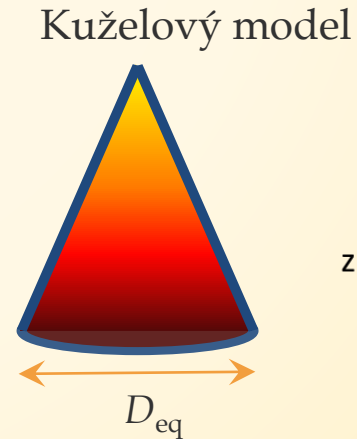
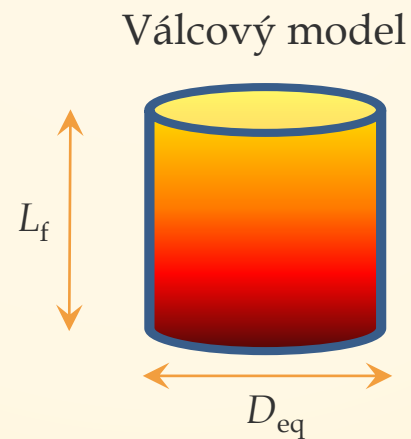
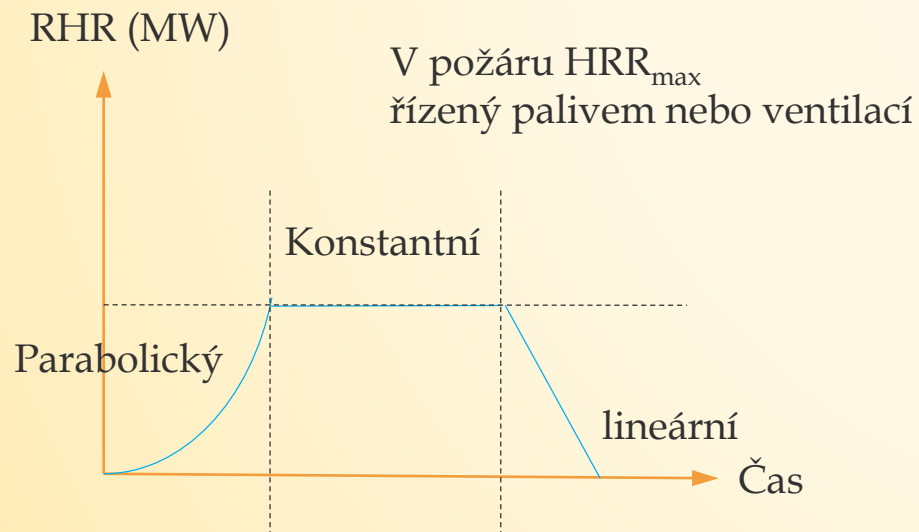
Rychlost rozvoje požáru ČSN EN 1991-1-2 Přílohy E

Délka plamene  $L_f$  ČSN EN 1991-1-2 Přílohy C

Sálání z válce nebo kužele s  $D_{eq}$  a  $L_f$

$$D_{fire} = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$$

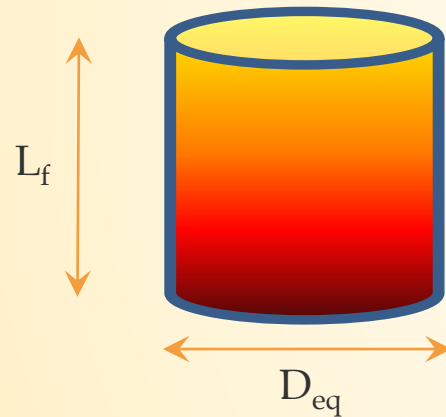
$$L_f(t) = -1,02 D_{fire} + 0,0148 Q(t)^{0,4}$$



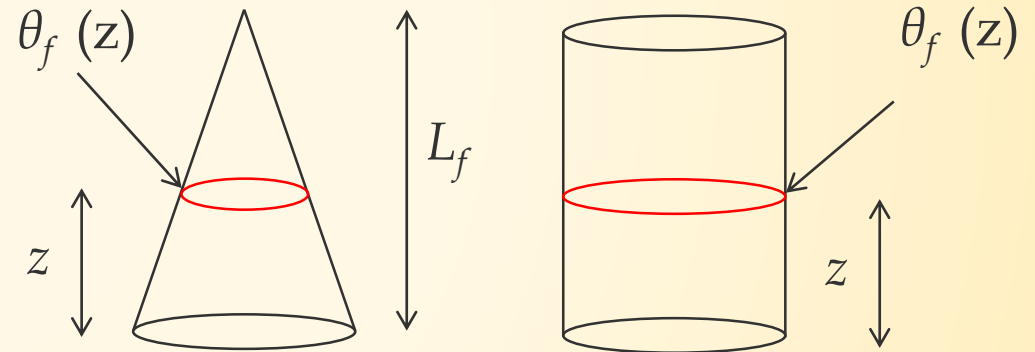
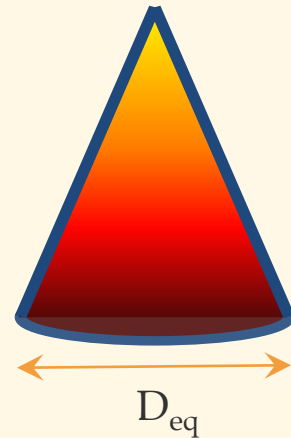
## Plamen nedosahuje stropu

$$L_f < H_{\text{stropu}}$$

Válcový model



Kuželový model



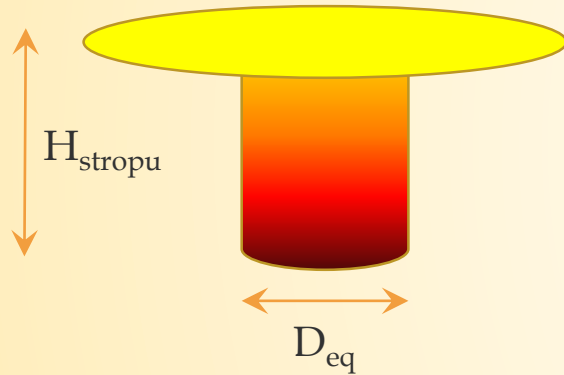
$$\theta_f(z) = \min\left(900; 20 + 0.25(0.8Q(t))^{2/3}(z - z_0)^{-5/3}\right)$$

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

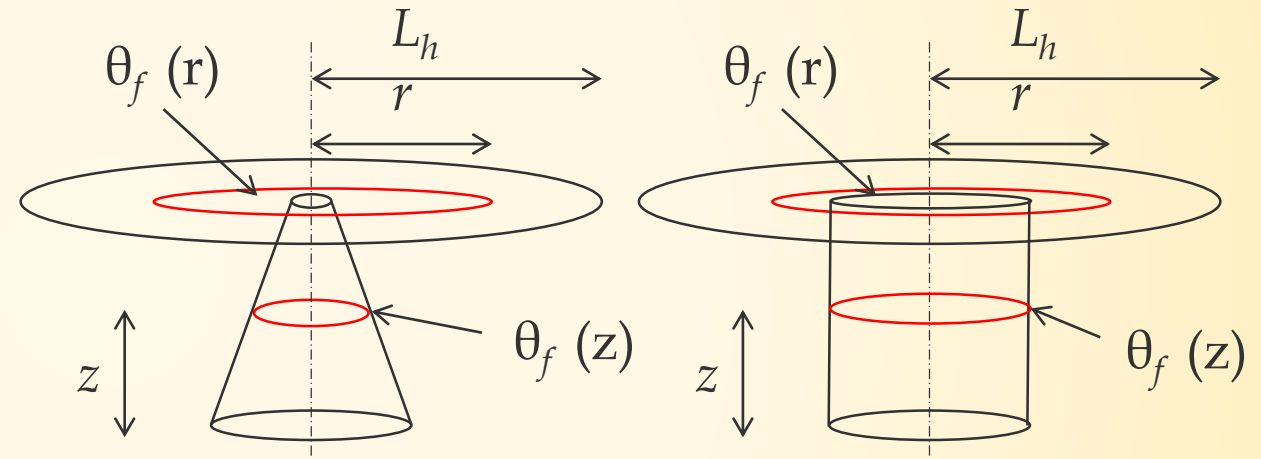
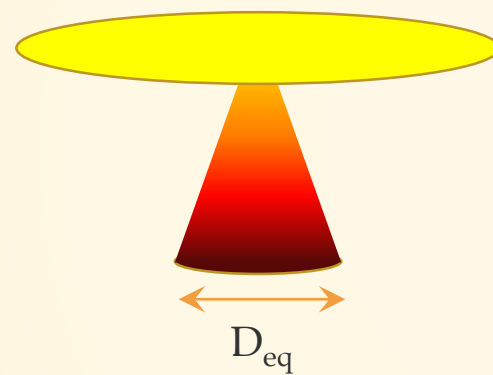
## Plamen dosahuje stropu

$$L_f > H_{\text{stropu}}$$

Válcový model



Kuželový model



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

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

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

$\dot{h}(r)$  počítáno modelem Hasemi

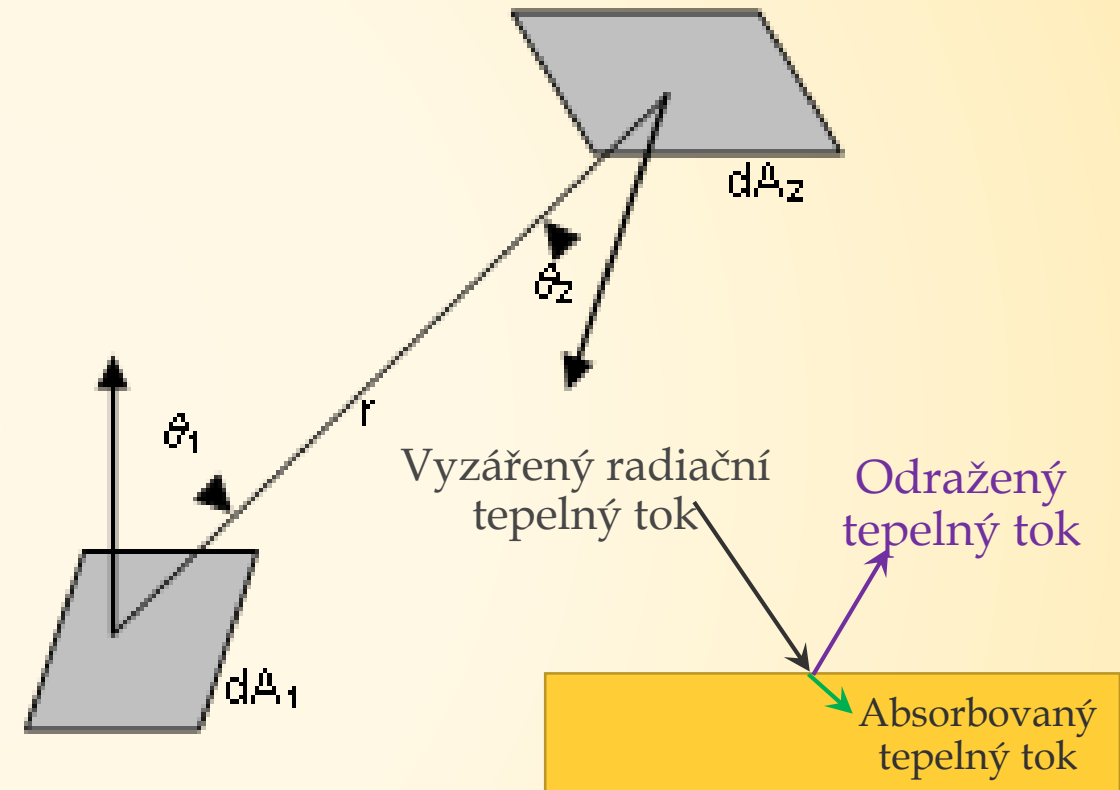
$$\theta_f(r) \text{ splňuje } \dot{h}(r) = \sigma \left( (\theta_f(r) + 273)^4 - 293^4 \right) + 35(\theta_f(r) - 20)$$

## Radiační tepelný tok

Vyzářený povrchem  $dA_1$  a přijatý povrchem  $dA_2$

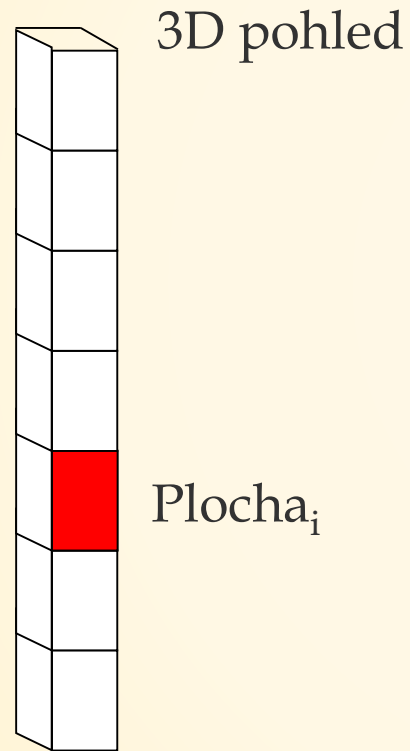
$$\Phi_{dA_1 \rightarrow dA_2} = \alpha_2 \varepsilon_1 \sigma \cdot T^4 \frac{\cos(\theta_1) \cos(\theta_2) dA_1 dA_2}{\pi r^2}$$

- Emisivita vyzařujícího povrchu  $\varepsilon_1$  rovna 1,0
- Absorpční schopnost  $\alpha_2$  ozařovaného povrchu
- Kirchoffův zákon  
absorpční schopnost ( $\alpha$ ) = emisivita ( $\varepsilon$ )
- Pro ocel,  $\varepsilon = \alpha = 0,7$



## Svislé části konstrukce

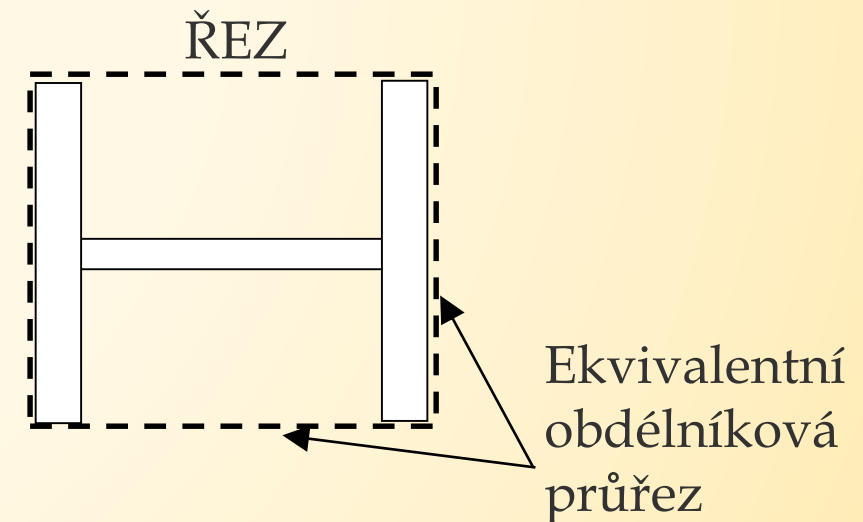
Modelování svislé části konstrukce



## Zastínění

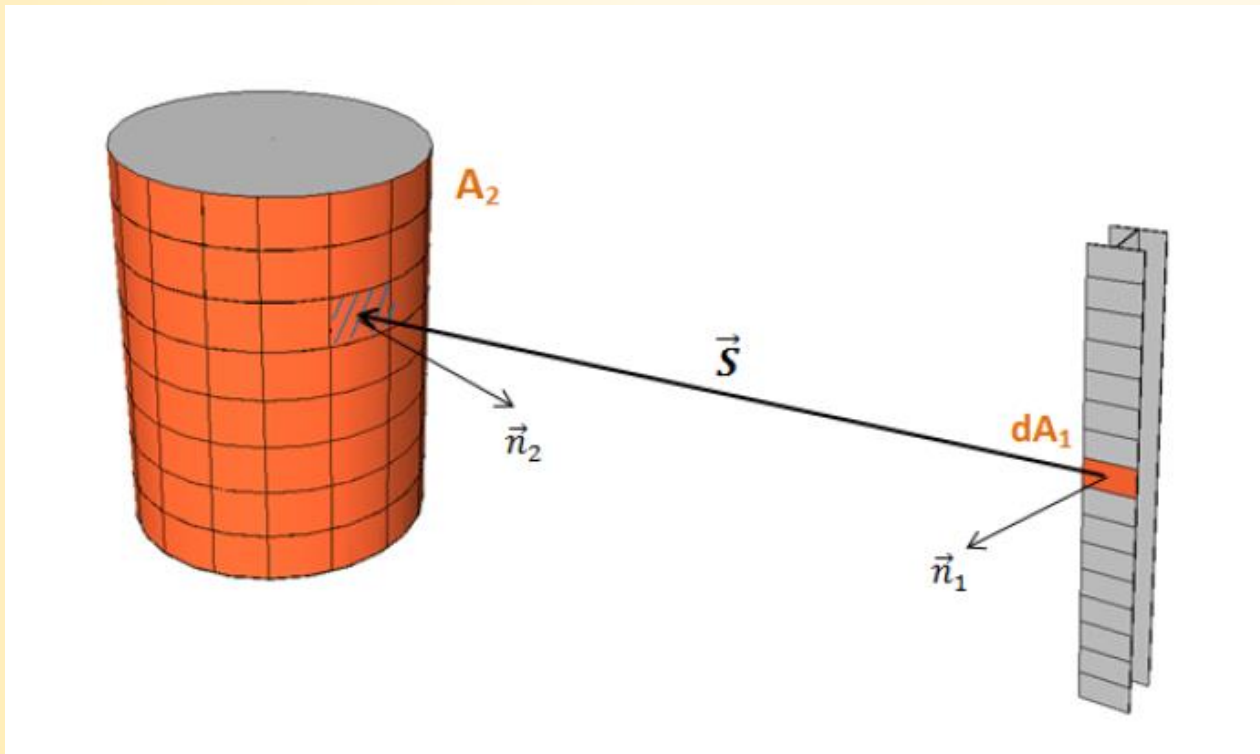
Uvažuje se konvexní délka obvodu

Pro I- nebo H-průřez s příloha GČSN EN 1991-1-2





## Obecný model Numerická integrace

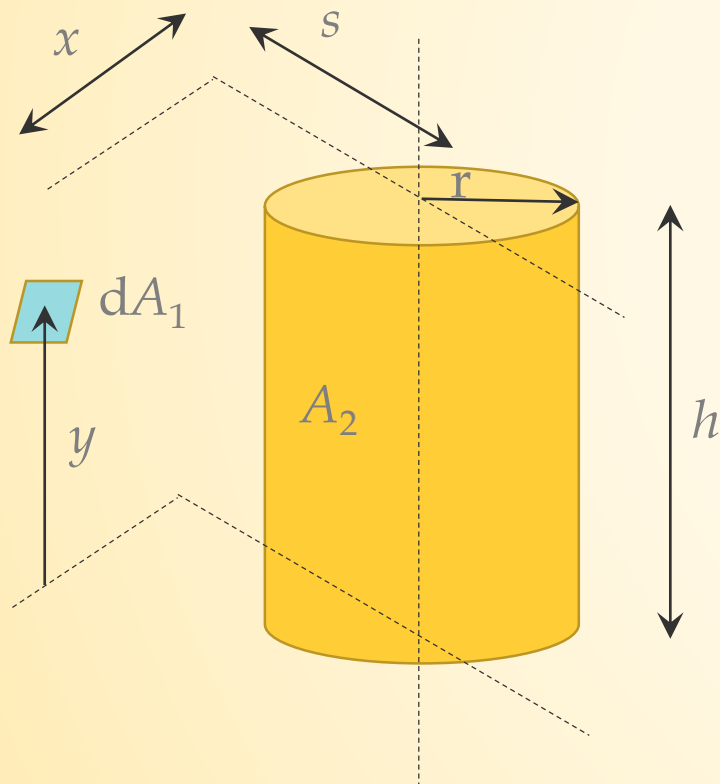


$$F_{d1-2} \simeq \frac{-1}{\pi} \sum_i \frac{(\vec{S} \cdot \vec{n}_1)(\vec{S} \cdot \vec{n}_2)}{S^4} \Delta A_i$$

- Po krocích je počítána radiální výměna tepla
- Pro reálné aplikace program
- Zahrnuje nerovnoměrné radiální toky na obvod průřezu

## Zjednodušený model

Součinitel sálání nekonečně malé plochy na válec



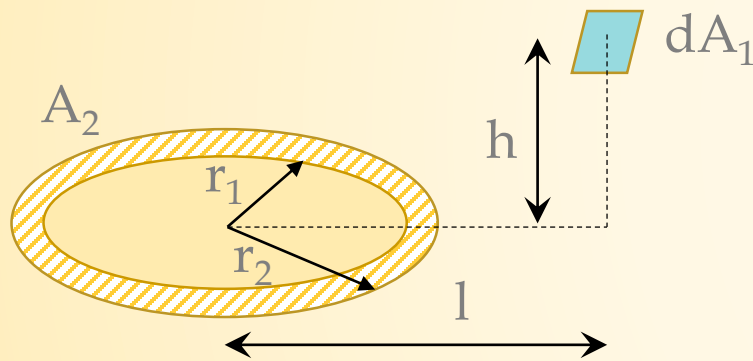
$$F_{dA_1 \rightarrow A_2} = \frac{S}{B} - \frac{S}{2B\pi} \left\{ \begin{aligned} & \cos^{-1} \left( \frac{Y^2 - B + 1}{A - 1} \right) + \cos^{-1} \left( \frac{C - B + 1}{C + B - 1} \right) \\ & - Y \left[ \frac{A + 1}{\sqrt{(A - 1)^2 + 4Y^2}} \cos^{-1} \left( \frac{Y^2 - B + 1}{\sqrt{B}(A - 1)} \right)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

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

Platí pokud rovina  $dA_1$  neprotíná válec

## Zjednodušený model

Součinitel sálání nekonečně malé plochy na válec



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

$$H = h/l$$

$$R = r/l$$

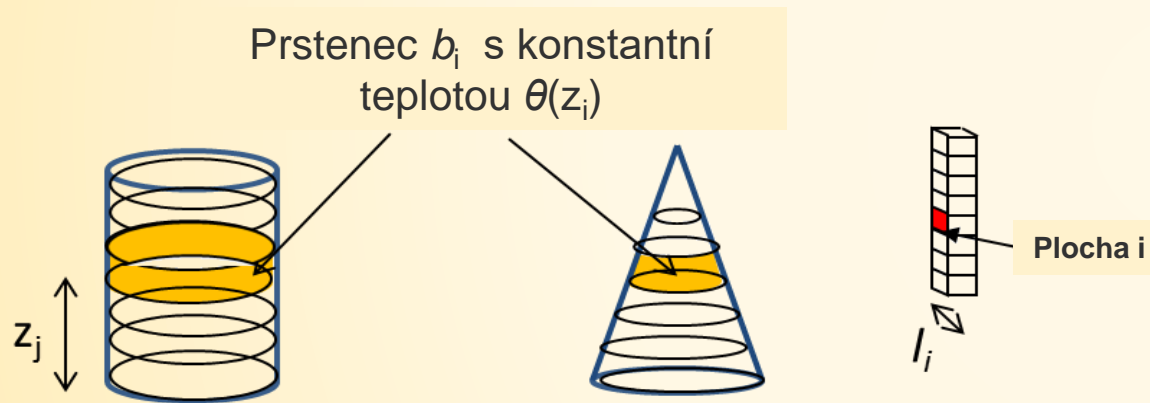
Platí pouze pokud  $l > r_2$

# Rozdělení požáru po výšce kužele/válce na prstence

## Analytický model

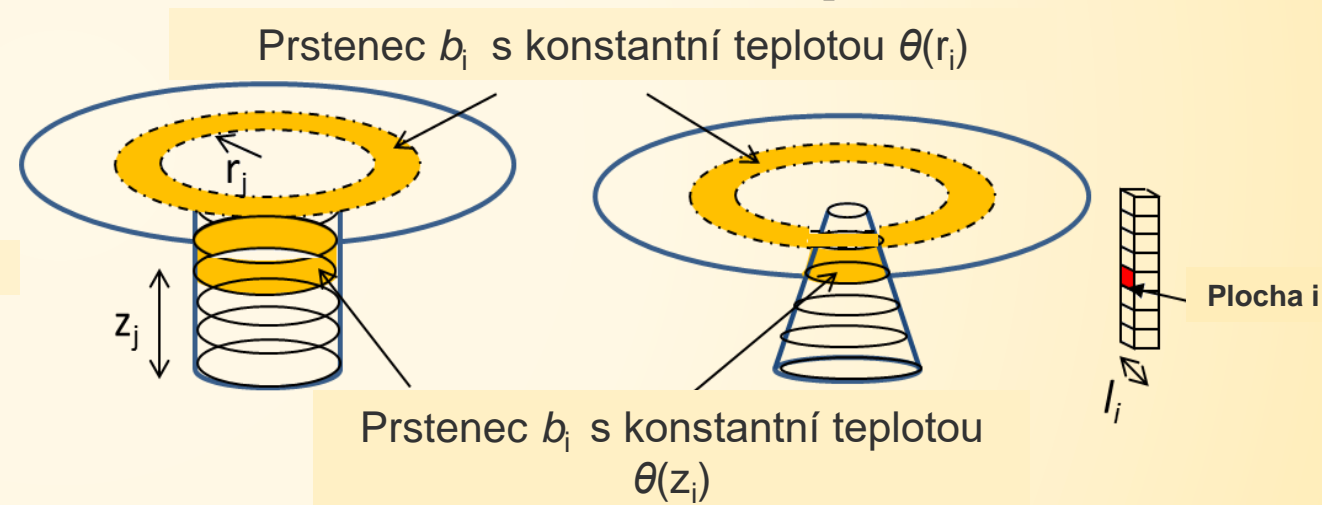
Plamen nedosahuje stropu

$L_f < H_{\text{stropu}}$  nebo strop není



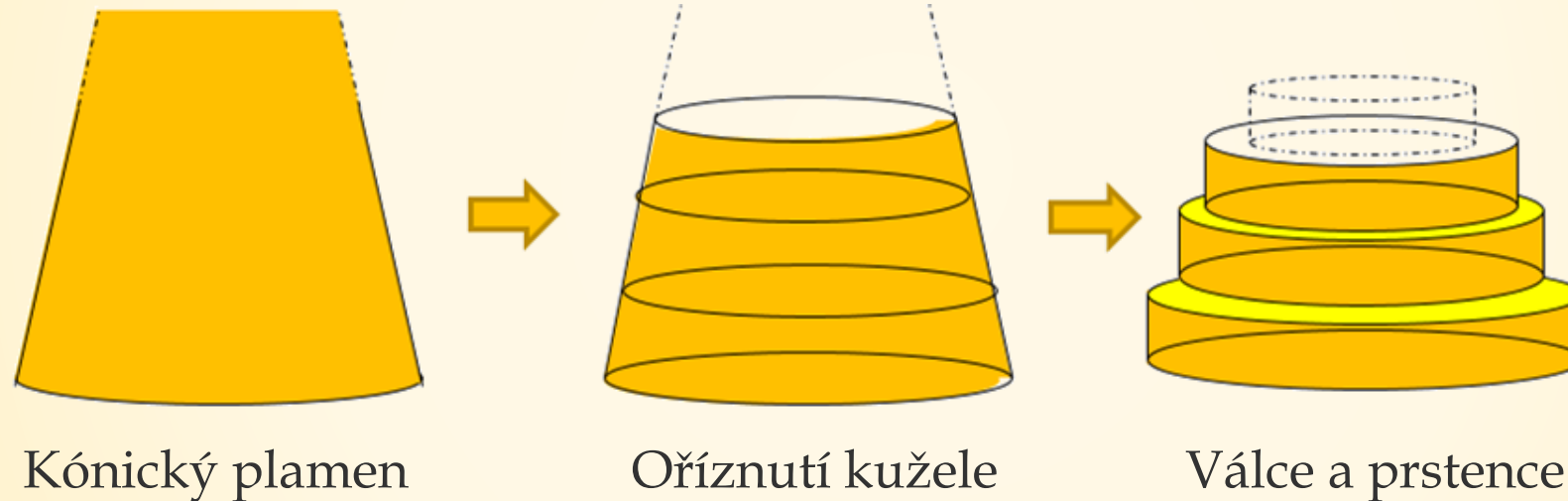
Plamen dosahuje stropu

$L_f > H_{\text{stropu}}$



Příspěvek prstence je malý, pokud není prvek umístěn v prstenci

## Rozdělení požáru po výšce kužele/válce na prstence



Příspěvek prstenců zanedbán – zanedbán tepelný tok nad ohněm

# Rozdělení požáru po výšce kužele/válce na prstence

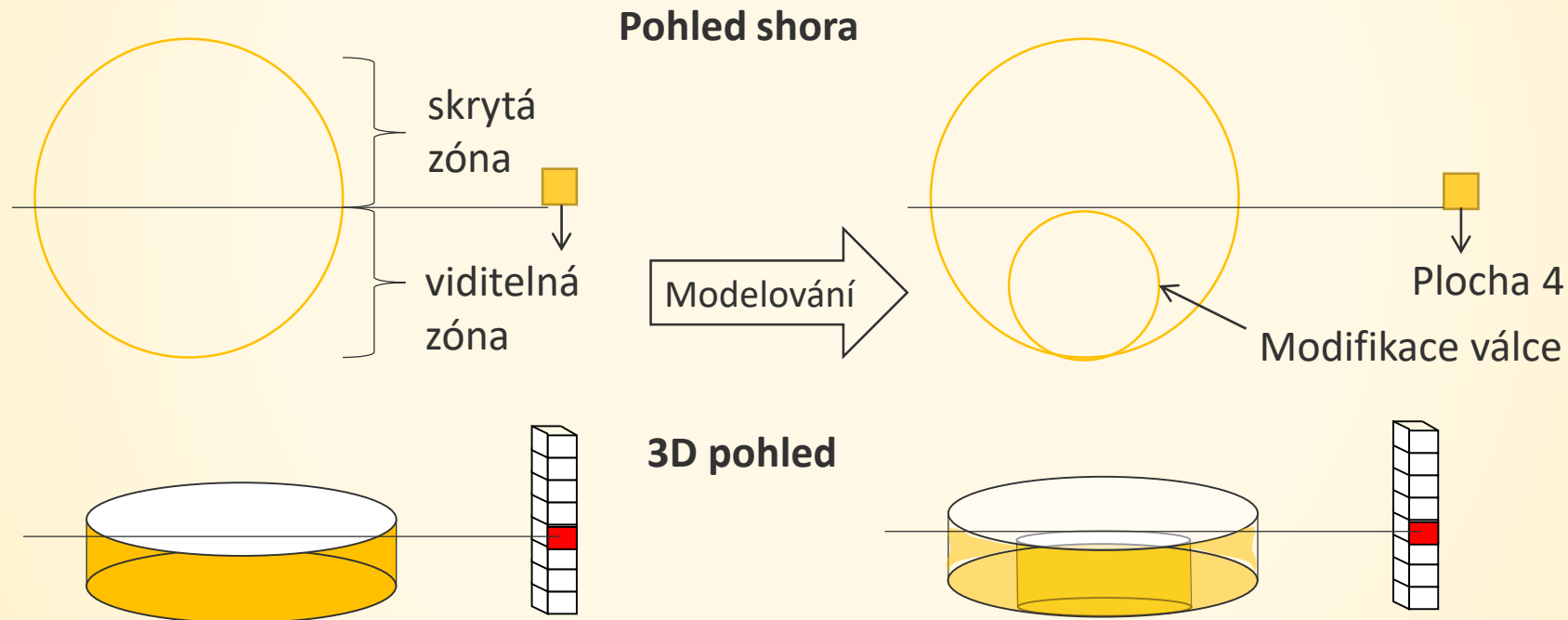
Analytický model



Pokud ozařovaná plocha protíná válec vztahy neplatí

## 4.3. Zjednodušený model

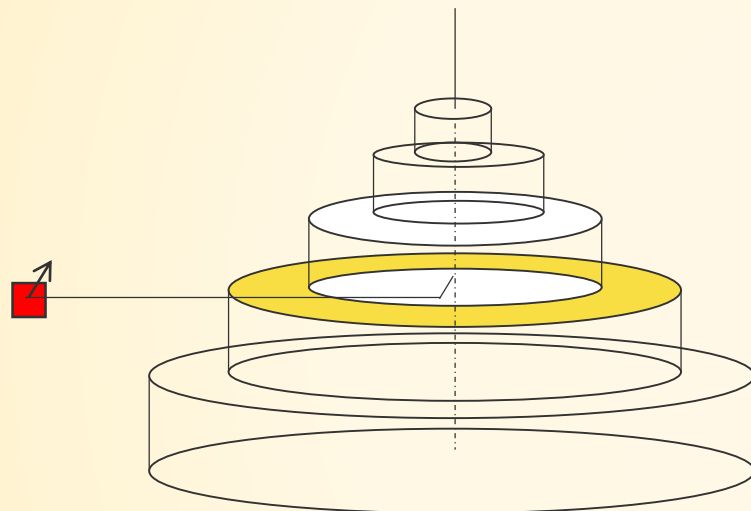
### Rozdělení požáru po výšce kužele a válce na prstence (Přizpůsobení 2)



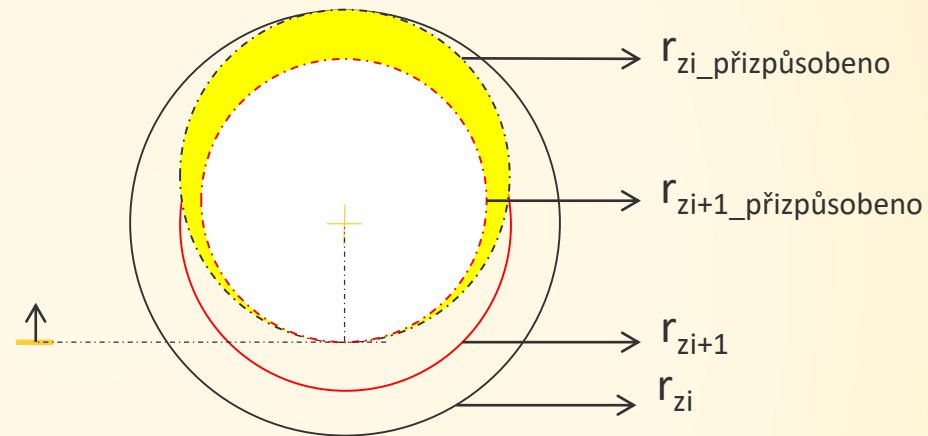
V tomto případě se počáteční válec transformoval na upravený válec ve viditelné zóně.

# Rozdělení požáru po výšce kužele/válce na prstence

Analytický model



3D pohled



Půdorys

Část prstenců, která je zakryta válcem umístěným nad, se redukuje.



## Omezení modelu

- Doporučená šířka válce je 500 mm
- Pro prvky umístěné pod stropem započítán konvekční tepelný tok Hasemi modelem
- Celkový přijatý tepelný tok omezen na 100 kW/m<sup>2</sup>
- Teplota prvku na základě tepelné bilance

$$\dot{h}_{tot} = \min(\dot{h}_{rad\_section} + \dot{h}_{conv}; 100000) \quad [\text{W.m}^{-2}]$$

$$\rho C_p(T) \frac{dT}{dt} = \frac{A_m}{V} \left[ \dot{h}_{z_j} + \alpha_c(20 - \theta) + \varepsilon(\sigma(293^4 - (\theta + 273)^4)) \right] \quad [\text{W.m}^{-2}]$$

Pro prut

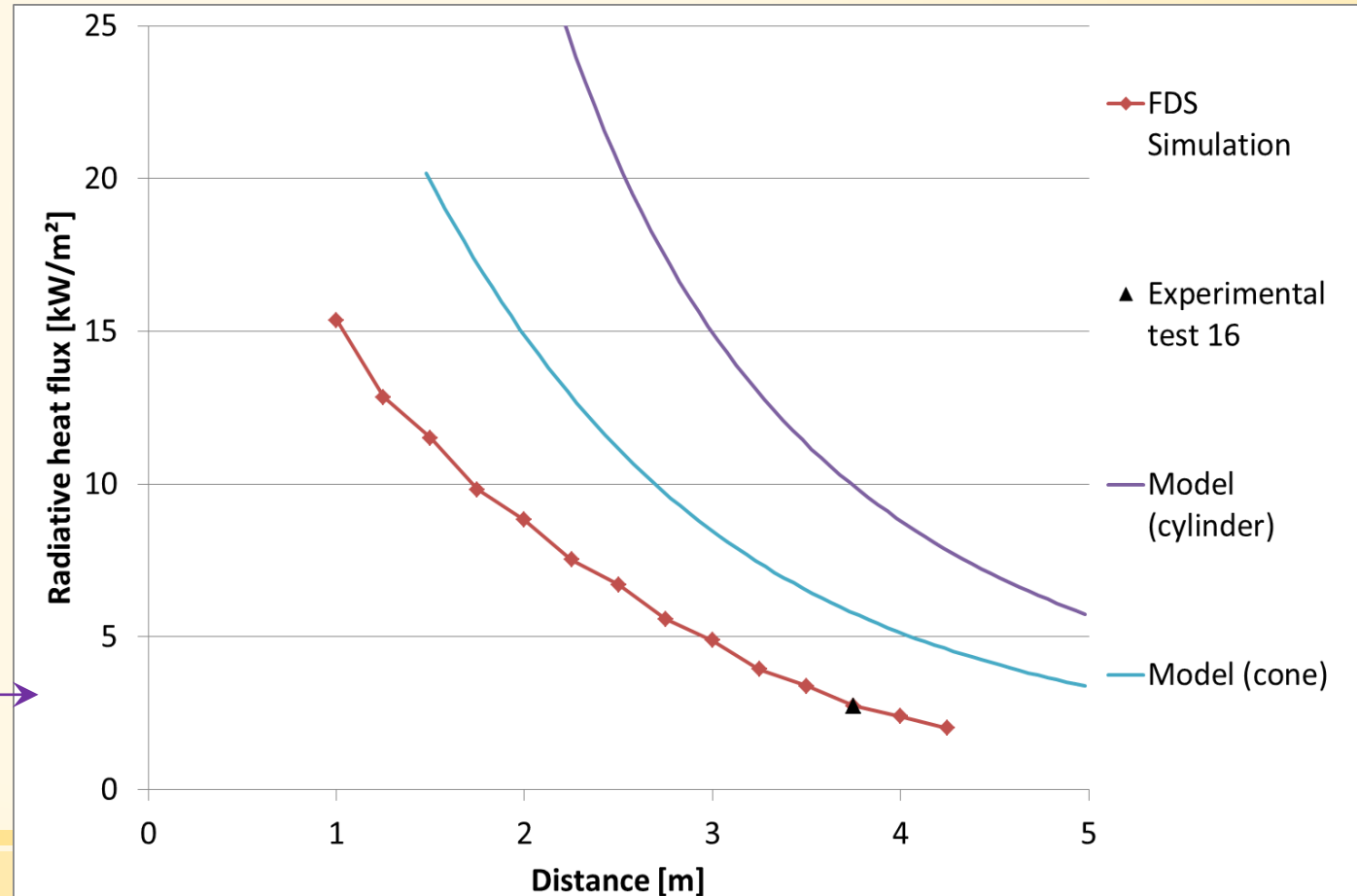
$\rho$	hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
$C_p$	měrná tepelná kapacita [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$A_m/V$	součinitel průřezu [m <sup>-1</sup> ]

# Validace analytického modelu

## Validace na zkouškách v Liege Verifikace na FDS modelu

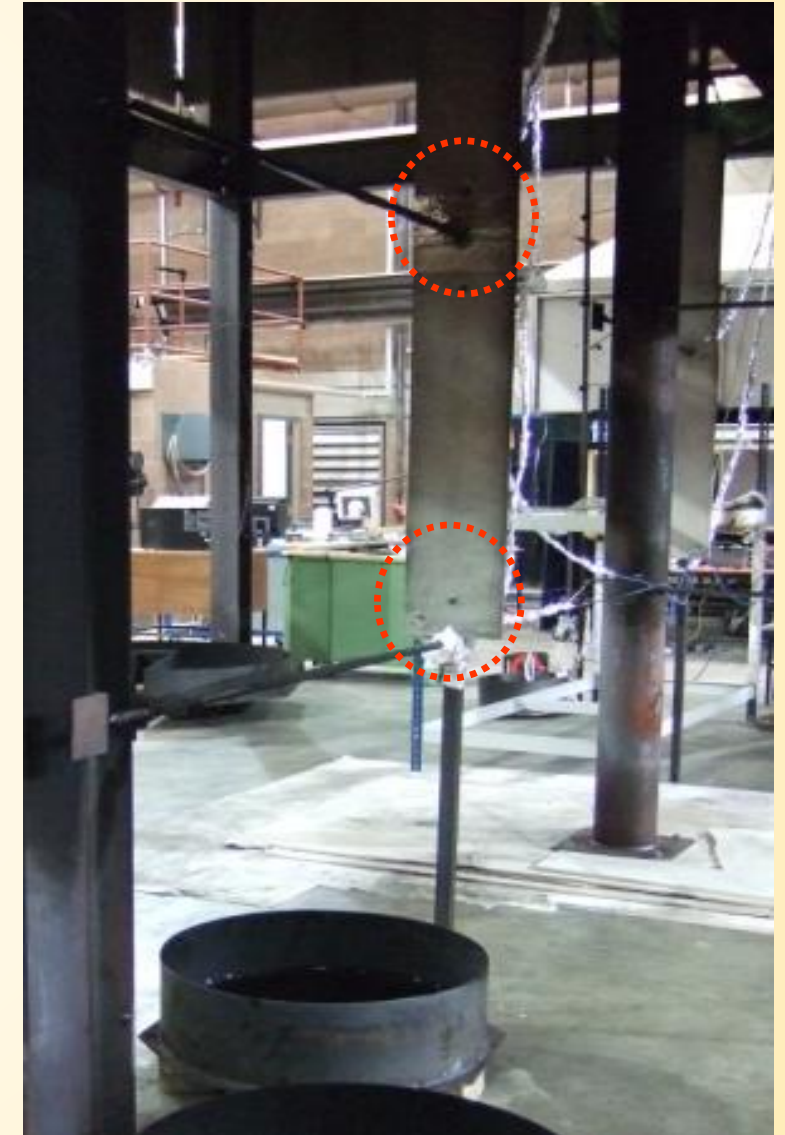
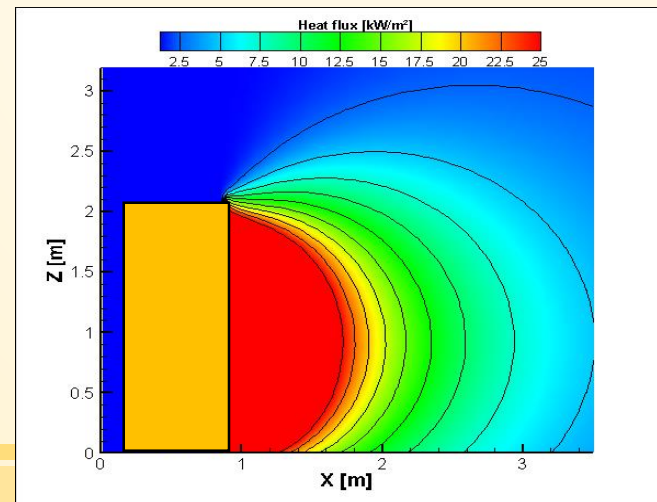
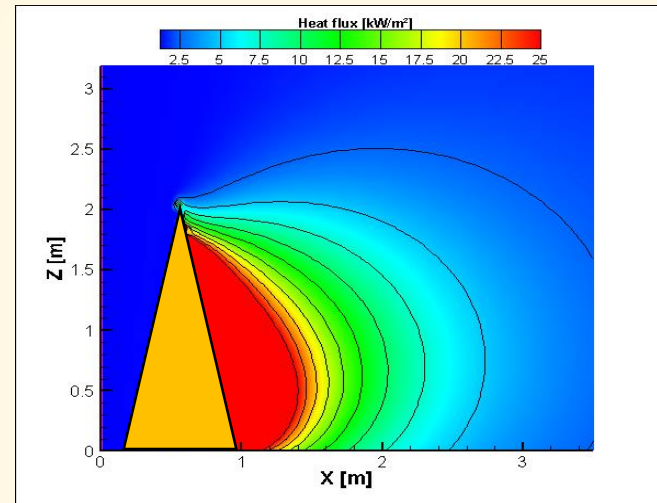
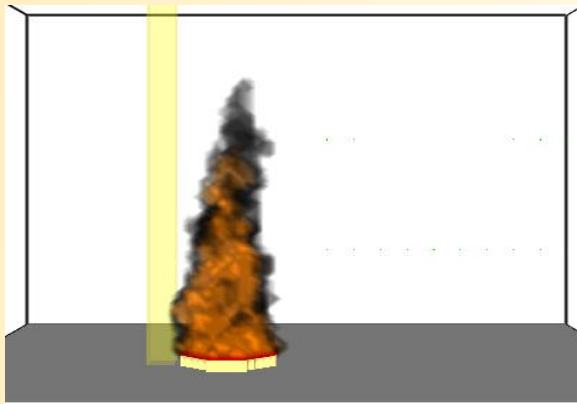
- Měřicí bod umístěn 3,75 m od zdroje požáru ve výšce 1,75 m
- Orientace kolmo na osu požárního měřiče

Průměr	Experiment průměrná hodnota	Zkouška č.	Válcový požár	Kónický požár
[m]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[-]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]
0.60	0.31	1 to 4	1.20	0.74
1.00	0.73	5 to 8	3.23	1.95
1.40	1.36	9 to 14	6.19	3.67
1.80	2.12	15 to 18	9.95	5.78
2.20	3.39	19 to 22	14.55	8.30



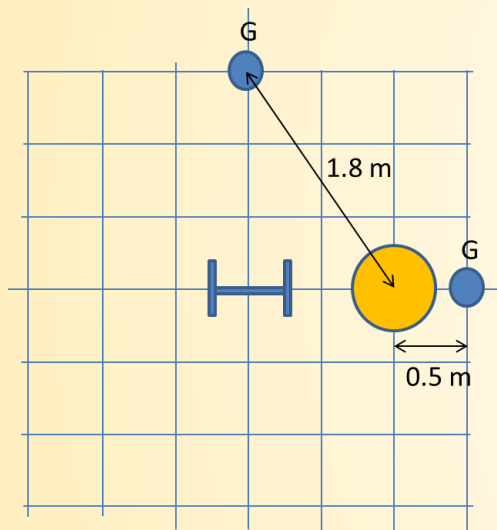
# Validace analytického modelu

## Validace na zkouškách v Ulsteru Verifikace na FDS modelu



# Validace analytického modelu

## Validace na zkouškách v Ulsteru Verifikace na FDS modelu



1 zdroj

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

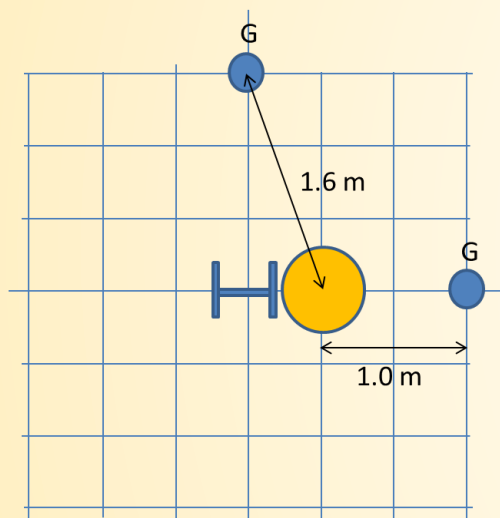
Měření 0,5/1,8 m

Pozice měřiče		Exp.	Modely		
Výška	Vzdálen.		FDS	Válcový	Kuželový
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>1,8</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>1,8</u>	2,3	2,6	6,7	3,3

# Validace analytického modelu

## Validace na zkouškách v Ulsteru

### Verifikace na FDS modelu



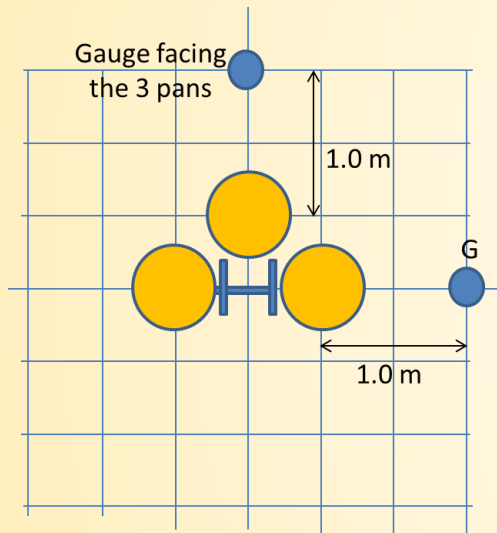
1 zdroj

$D = 0.7 \text{ m}$

Měření 1.0/1.6 m

Pozice měřiče		Exp.	Modely		
Výška	Vzdál.		FDS	Válcový	Kuželový
m	m	$\text{kW/m}^2$	$\text{kW/m}^2$	$\text{kW/m}^2$	$\text{kW/m}^2$
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
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

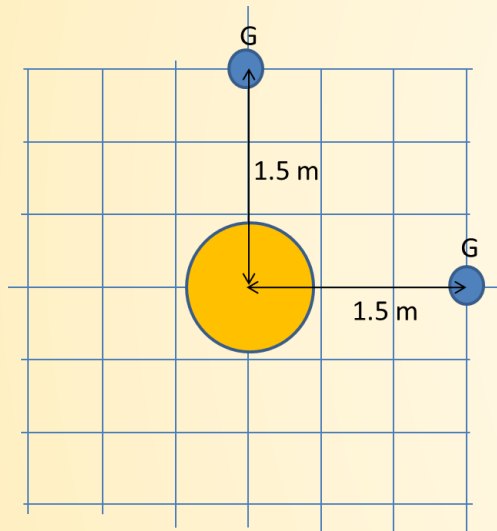
## Validace na zkouškách v Ulsteru Verifikace na FDS modelu



3 zdroje  
D = 0.7 m  
Měření 1.0 m

Pozice měřiče		Exp.	Model		
Výška	Vzdál.		FDS	Válcový	Kuželový
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

## Validace na zkouškách v Ulsteru Verifikace na FDS modelu



1 zdroj

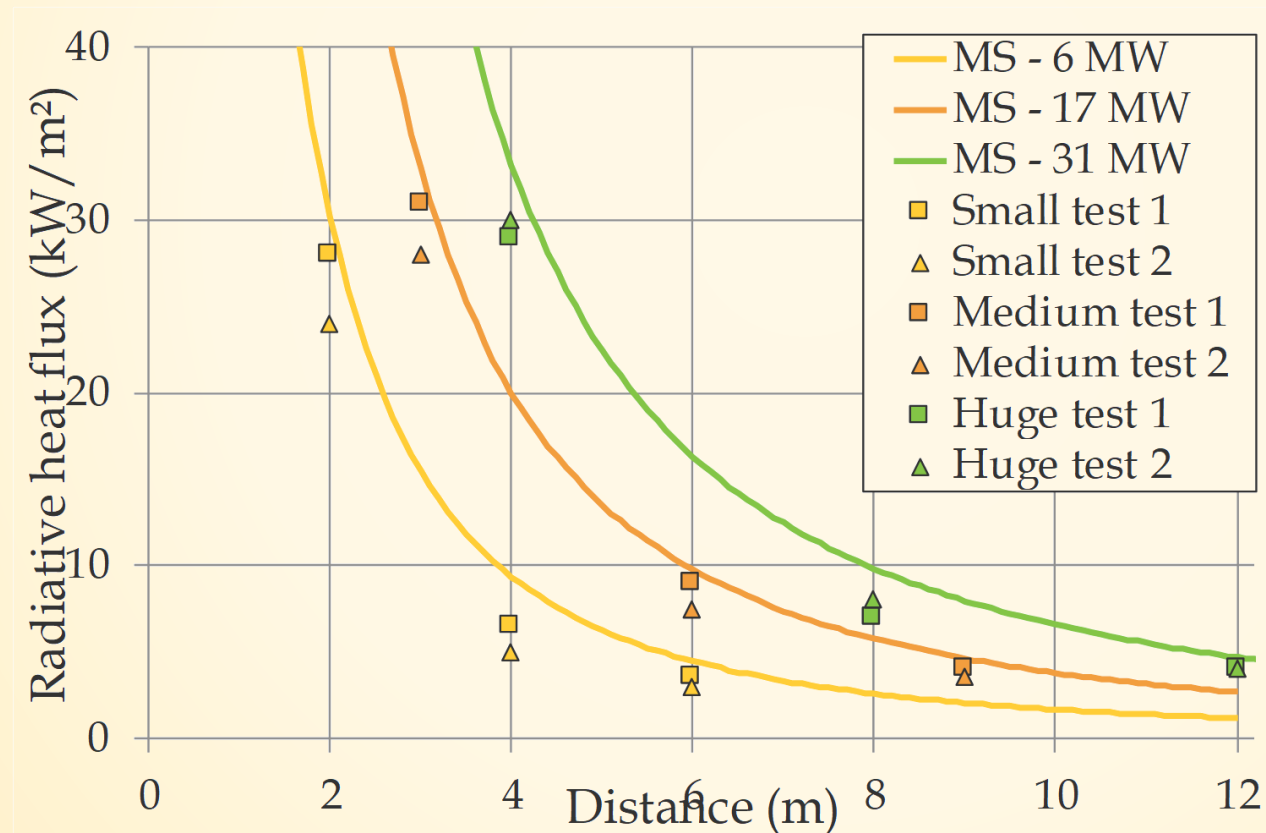
$D = 1.6 \text{ m}$

Měření 1.5 m

Pozice měřiče		Exp.	Modely		
Výška	Vzdál.		FDS	Válcový	Kuželový
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

# Validace zjednodušeného analytického modelu

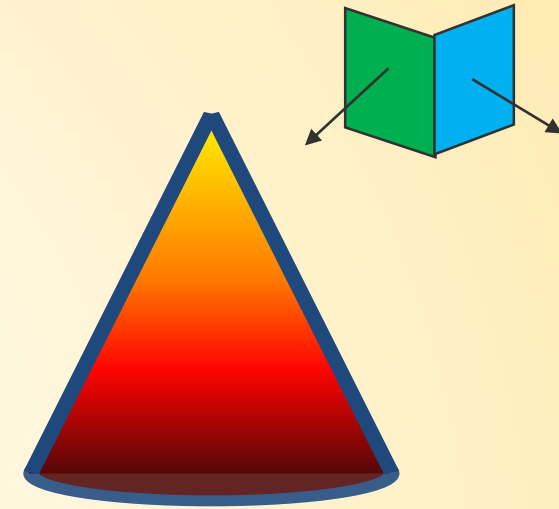
## Pro velké průměry požáru, LCPP testy z literatury





# Shrnutí

- Projekt LOCAFI přináší výpočet teploty sloupu, který je vystaven sálání od lokálního požáru
- Rozložení teploty na obvodu tělesa požáru se uvažuje podle vztahů Přílohy C v EN 1991-1-2:2005
- Radiace se počítá pomocí konfiguračního součinitele v příloze G v EN 1991-1-2:2005
- Zjednodušený model je založen na vztazích pro radiální tepelný tok přijatý nekonečně malým povrchem z válců a prstenců
- Konvekční tepelné toky je třeba vypočítat zvlášť
- Konvekční tepelné toky jsou významné pouze pro prvky konstrukcí, které se nacházejí přímo v plameni nebo na úrovni stropu, viz příloha C normy EN 1991-1-2:2005.



# LOCAFI+

Temperature assessment of a vertical member subjected to LOCALised Fire, Dissemination

## Stanovení teploty svislých prvků vystavených lokálnímu požáru

Projekt č. 754072

# Děkuji za pozornost