

# Požarna obtežba in razvoj požara v požarnem sektorju



Tomaž Hozjan

e-mail: [tomaz.hozjan@fgg.uni-lj.si](mailto:tomaz.hozjan@fgg.uni-lj.si)

soba: 503

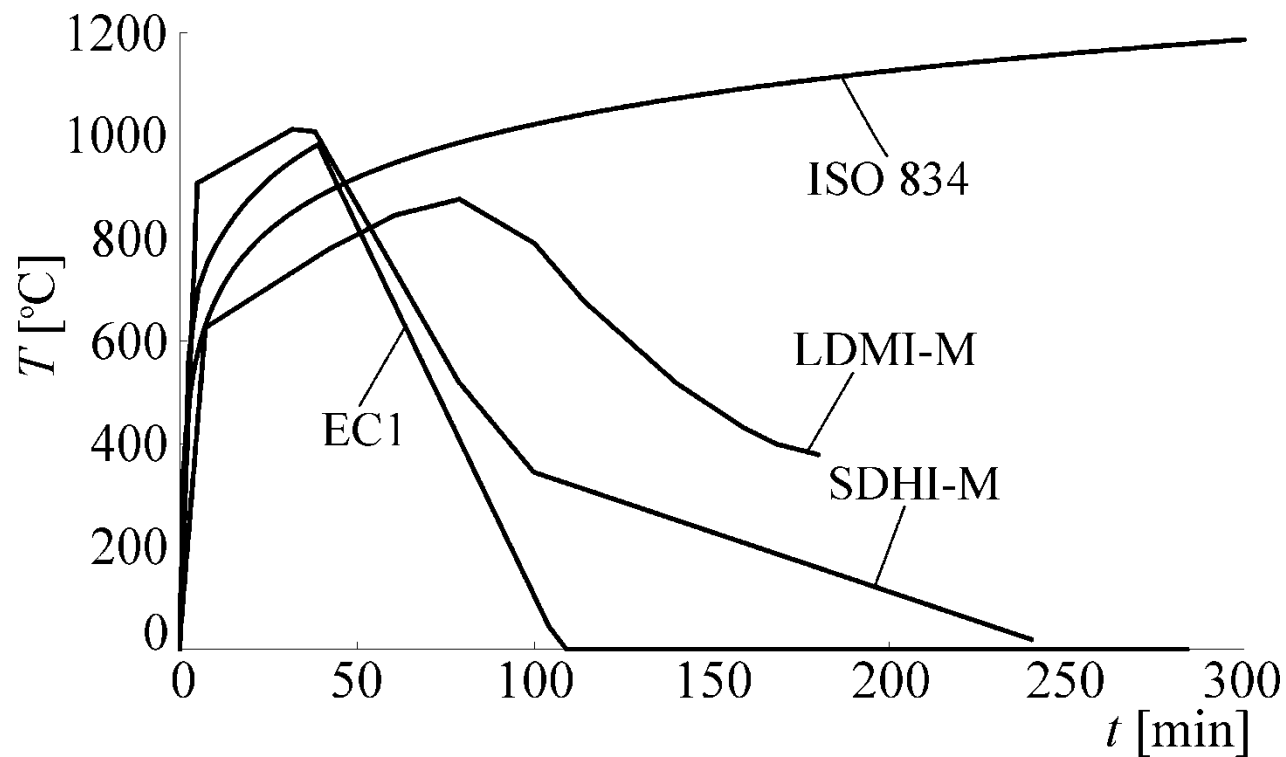
# Projektni požarni scenarij

- za določitev nezgodnih projektnih razmer, je potrebno določiti ustrezne požarne scenarije in ustrezne projektne požare
- pri konstrukcijah, kjer se nevarnost nastanka požara pri pojavu drugih nezgodnih vplivov, je treba upoštevati požarno nevarnost znotraj celotnega koncepta varnosti (potres+požar)
- obnašanja v odvisnosti od časa in obtežbe konstrukcije pred požarom ni potrebno upoštevati, razen v prejšnjem primeru

# Projektni požar

- za vsak požarni scenarij je potrebno oceniti projektni požar v požarnem sektorju
- projektni požar naj sočasno velja le za en požarni sektor stavbe, razen če je v požarnem scenariju predvideno drugače
- pri konstrukcijah, za katere nacionalne oblasti določajo zahteve požarne odpornosti konstrukcije, se predpostavi, da je ustrezen projektni požar opredeljen s standardnim požarom, če ni določeno drugače (odpornost **R**)

# Nominalne požarne krivulje

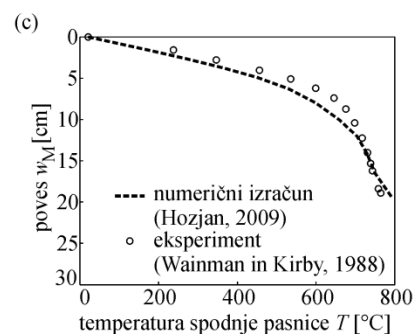
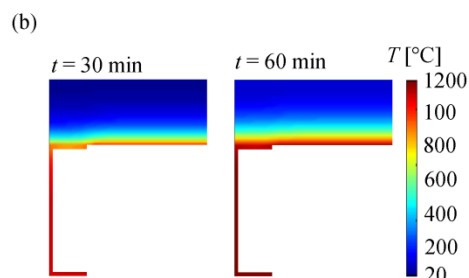
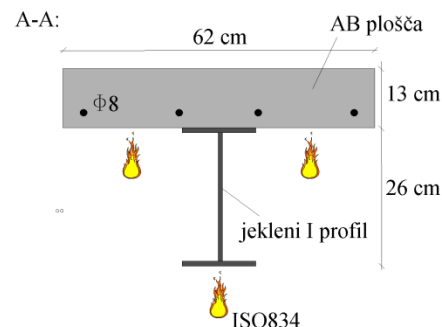
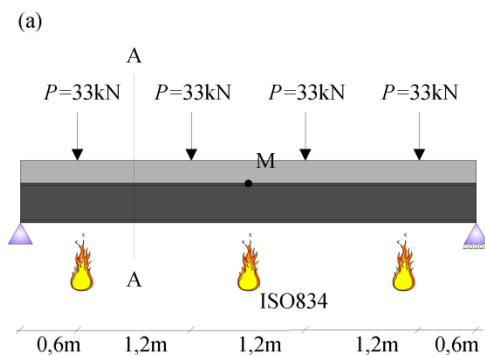


# Temperaturna (toplotna) analiza

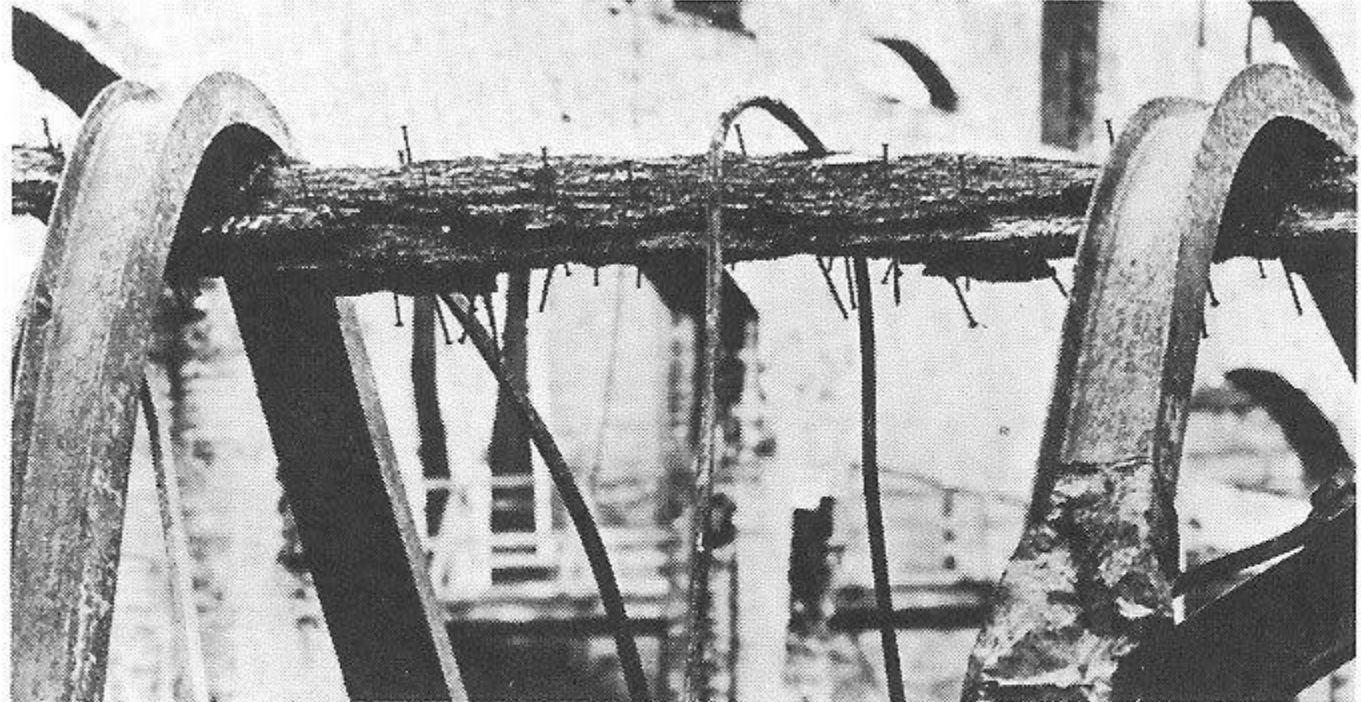
- pri temperaturni analizi je potrebno upoštevati lego projektnega požara glede na element
- pri zunanjih elementih je potrebno upoštevati izpostavljenost požaru skozi odprtine
- na izbran projektni požar izvedemo toplotno analizo brez ali s fazo ohlajevanja

# Mehanska analiza

- Mehansko analizo je treba izvesti za enak časovni interval, kot je upoštevan pri temperaturni analizi



# Primeri požarov



*Fig. 20-4. After fire scene. Shows a wood beam supporting twisted steel I-beams. (Forest Products Laboratory)*

# Primeri požarov

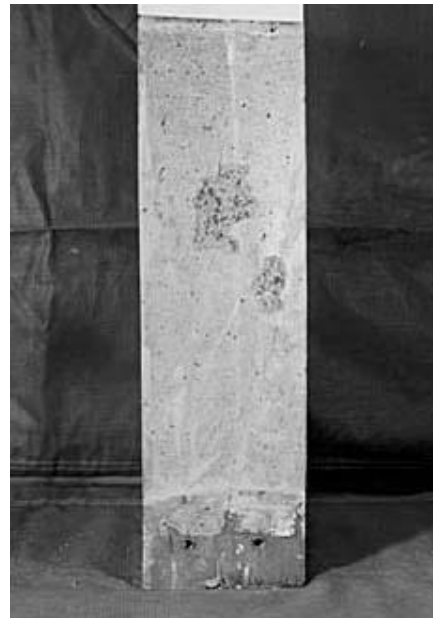


www.shutterstock.com · 38334373



# Primeri požarov

Luščenje pri betonskih konstrukcijah



# Primeri požarov



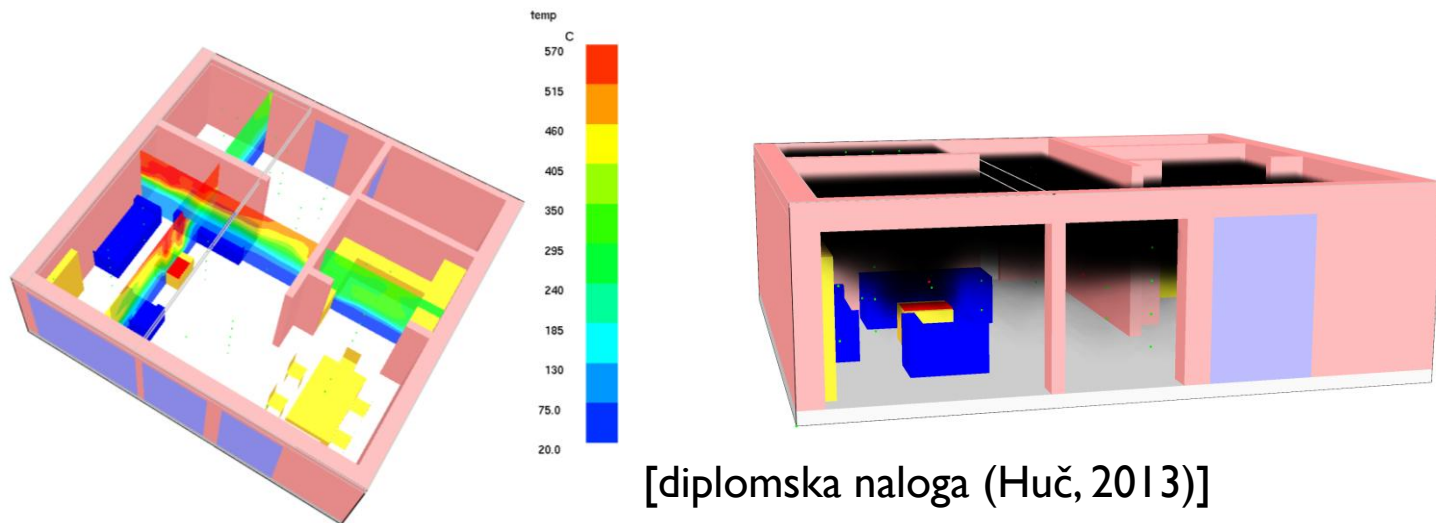
# Primeri požarov

Vpliv dveh nezgodnih  
situacij: potres+požar, San  
Franciso (1906)



# Termini (SIST EN 1992-1-2)

- **požarni scenarij** – kvalitativni opis poteka požara s časovno opredeljenimi ključnimi dogodki, ki označujejo požar in ga razlikujejo od drugih možni požarov (proces vžiga, širjenje požara, stopnja polno razvitega in pojemanja požara z upoštevanjem lastnosti ambienta)



# Termini (SIST EN 1992-1-2)

- **požarna obtežba** – vsota toplotnih energij, ki se sproščajo pri zgorevanju vseh vnetljivih snovi v prostoru
- **hitrost sproščanja toplote** – toplota sproščena pri zgorevanju snovi v enoti časa
- **gostota požarne obtežbe** – požarna obtežba na enoto površine tal ali na enoto površine plašča celotnega sektorja vključno z odprtiniami
- **požarni sektor** – prostor znotraj stavbe, ki sega preko enega ali več nadstropij in je ograjen z ločilnimi elementi, ki preprečujejo širitev požara izven sektorja

# Požarna obtežba

- SIST EN 1992-1-2

- $q_{fd} = q_{fk} m \delta_{q1} \delta_{q2} \delta_n$  [MJ/m<sup>2</sup>]

- $m$  – zgorevalni faktor

- $\delta_{q1}$  – faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na velikost sektorja

- $\delta_{q2}$  – faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na rabo

- $\delta_n$  – faktor, ki upošteva uporabo aktivnih in pasivnih ukrepov

# Vpliv aktivnih in pasivnih ukrepov na velikost projektne vrednosti požarne obtežbe

Tabela E.2: Faktorji  $\delta_{ni}$

$\delta_{ni}$ Funkcija aktivnih ukrepov za preprečevanje požara									
Avtomatsko preprečevanje požara		Avtomatsko zaznavanje požara		Ročno preprečevanje požara					
Avtomatski vodni gasilni sistem	Neodvisna preskrba z vodo	Avtomatsko zaznavanje požara in alarm	Avtomatska povezava alarma z gasilsko enoto	Lastna gasilska enota	Zunanja gasilska enota	Varne intervencijske poti	Gasilski pripomočki	Sistem za odvod dima	
$\delta_{n1}$	0   1   2 $\delta_{n2}$	s toploto $\delta_{n3}$	z dimom $\delta_{n4}$	$\delta_{n5}$	$\delta_{n6}$	$\delta_{n7}$	$\delta_{n8}$	$\delta_{n9}$	$\delta_{n10}$
0,61	1,0   0,87   0,7	0,87 ali 0,73		0,87	0,61 ali 0,78		0,9 ali 1,0 ali 1,5	1,0 ali 1,5	1,0 ali 1,5

# Določanje gostote požarne obtežbe

- zajeti vse gorljive snovi v prostoru, vključno z gorljivimi deli konstrukcije
- velikost določimo glede na namembnost prostora ali
- glede na karakteristično požarno obtežbo, kjer je potrebno izračunati velikost požarne obtežbe glede na količino gorljivega materiala v prostoru



# Določanje gostote požarne obtežbe, glede na količino gorljive snovi

- (1) Karakteristična požarna obtežba je opredeljena z izrazom:

$$Q_{f,k} = \sum M_{k,i} \cdot H_{ui} \cdot \Psi_i = \sum Q_{f,k,i} \quad [\text{MJ}] \quad (\text{E.2})$$

kjer so:

$M_{k,i}$  količina gorljivega materiala [kg], skladno s (3) in (4)

$H_{ui}$  neto kalorična vrednost [MJ/kg], glej (E.2.4)

$[\Psi_i]$  možni faktor za oceno zaščitenosti požarne obtežbe, glej (E.2.3)

- (2) Karakteristična gostota požarne obtežbe  $q_{f,k}$  na enoto ploščine je opredeljena kot:

$$q_{f,k} = Q_{f,k} / A \quad [\text{MJ/m}^2] \quad (\text{E.3})$$

kjer je:

$A$  površina tal ( $A_f$ ) požarnega sektorja, referenčnega prostora ali notranja površina ( $A_i$ ) požarnega sektorja za določitev  $q_{f,k}$  ali  $q_{f,l}$

# Neto kalorične vrednosti gorljivih materialov

Tabela E.3: Neto kalorične vrednosti  $H_u$  [MJ/kg] gorljivih materialov za izračun požarne obtežbe

Trdne snovi	
Les	17,5
Drugi celulozni materiali <ul style="list-style-type: none"><li>• Oblačila</li><li>• Pluta</li><li>• Bombaž</li><li>• Papir, karton</li><li>• Svila</li><li>• Slama</li><li>• Volna</li></ul>	20
Ogljik <ul style="list-style-type: none"><li>• Antracit</li><li>• Oglje</li><li>• Premog</li></ul>	30

nadaljevanje tabele

Alkoholi <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metanol</li> <li>• Etanol</li> <li>• Etilni alkohol</li> </ul>	30
Goriva <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bencin, petrolej, kerozin</li> <li>• Nafta, dizelsko gorivo</li> </ul>	45
Čisti ogljikovodikovi polimerni materiali <ul style="list-style-type: none"> <li>• Polietilen</li> <li>• Polistiren</li> <li>• Polipropilen</li> </ul>	40
<b>Drugi proizvodi</b>	
ABS plastike	35
Poliestrške plastike	30
Polisocianatske in poliuretanske plastike	25
Polivinilkloridne, PVC plastike	20
Bitumen, asfalt	40
Usnje	20
Linolej	20
Gumaste pnevmatike	30

nadaljevanje tabele

Alkoholi <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metanol</li> <li>• Etanol</li> <li>• Etilni alkohol</li> </ul>	30
Goriva <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bencin, petrolej, kerozin</li> <li>• Nafta, dizelsko gorivo</li> </ul>	45
Čisti ogljikovodikovi polimerni materiali <ul style="list-style-type: none"> <li>• Polietilen</li> <li>• Polistiren</li> <li>• Polipropilen</li> </ul>	40
<b>Drugi proizvodi</b>	
ABS plastike	35
Poliestrške plastike	30
Polisocianatske in poliuretanske plastike	25
Polivinilkloridne, PVC plastike	20
Bitumen, asfalt	40
Usnje	20
Linolej	20
Gumaste pnevmatike	30

# Določanje gostote požarne obtežbe, glede na namembnost, statistični pristop

Tabela E.4: Gostote požarne obtežbe  $q_{f,k}$  [MJ/m<sup>2</sup>] za različne rabe (naseljenosti)

Raba	Povprečje	80 % kvantil
Stanovanja	780	948
Bolnišnice (sobe)	230	280
Hoteli (sobe)	310	377
Knjižnice	1500	1824
Pisarne	420	511
Šolski razredi	285	347
Nakupovalna središča	600	730
Dvorane (kino)	300	365
Transport (javni prostori)	100	122

OPOMBA: Za 80 % kvantil se predpostavlja Gumbelova porazdelitev.

# Razvoj požara v požarnem sektorju

- Parametri za opis razvoja požara v požarnem sektorju:

- Velikost požarnega sektorja

- Lastnosti obodnih sten

- Višina stropa

- Odprtine

- Površina požara

- Hitrost sproščanja toplote, HRR



**Geometrijske karakteristike**

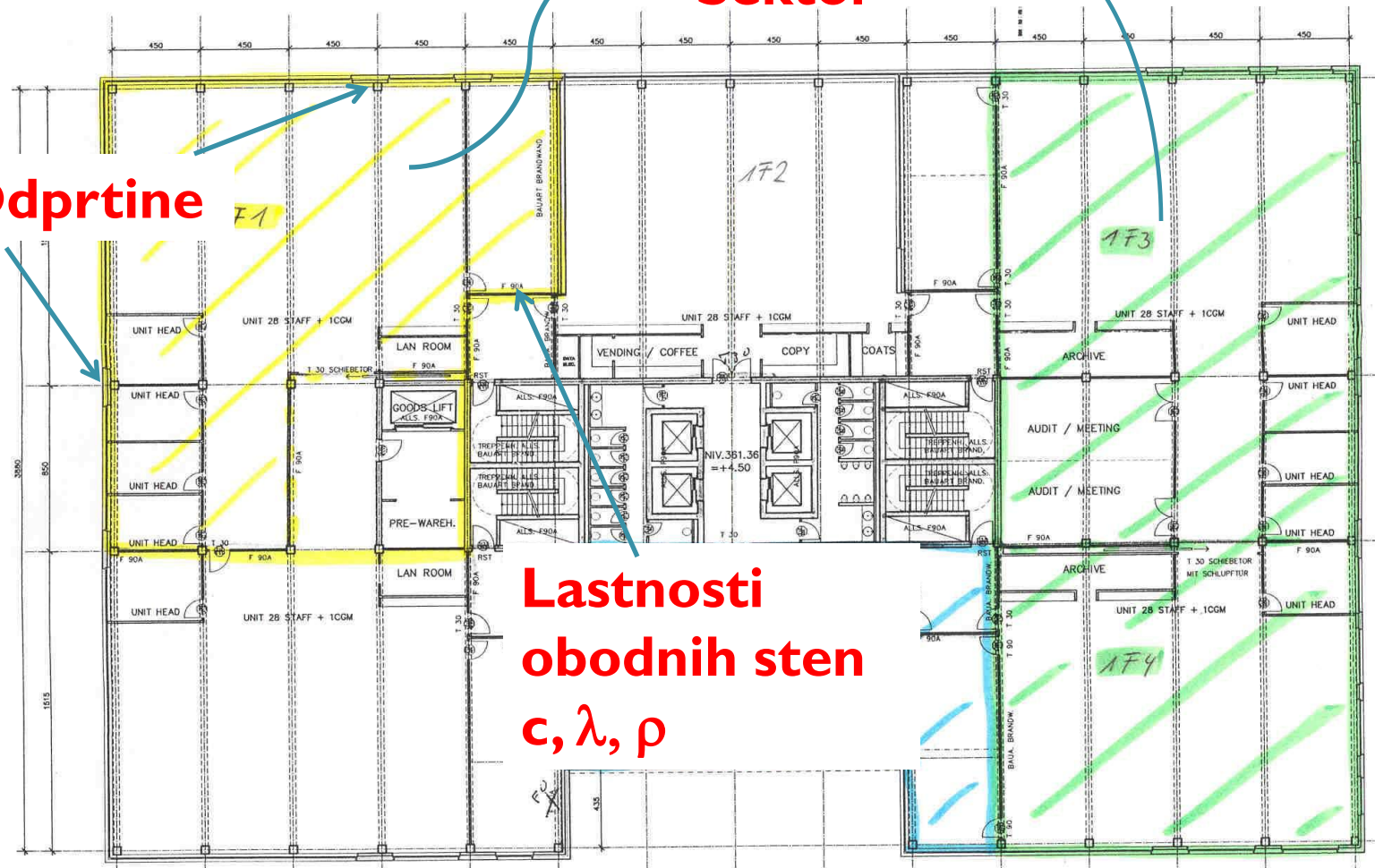


**Požarne karakteristike**

# Razvoj požara v požarnem sektorju

Požarni Sektor

Odpertine



Lastnosti obodnih sten  
 $c, \lambda, \rho$

# Razvoj požara v požarnem sektorju

- Pri konceptu požarne varnosti na osnovi naravnega požara je razvoj požara obravnavan v enem požarnem sektorju.
- Predpostavimo, da se požar ne bo razširil v druge sektorje. **ALI JE TO RES?**
  - To, je odvisno od obnašanja mejnih konstruktivnih elementov pri požaru (tla, stene (vključno z vrati), itd.).
  - Zahteve: **R** (odpornost), **E** (celovitost), **I** (izolativost)
- Razumevanje obnašanja teh elementov je zelo pomembno za oceno njihove sposobnosti delovanja kot požarne pregrade.



# Razvoj požara v požarnem sektorju

- Razpoložljive so naslednje možnosti:
  - **Ad-hoc testi:** element se v peči izpostavi krivulji Temperatura-čas, ki jo določimo s požarnimi modeli, ki temeljijo na najhujšem požarnem scenariju.
  - **Strokovna ocena:** ta pristop temelji na rezultatih ISO-odpornostnih testov na posameznih elementih
  - **Direktna uporaba ISO-zahtev:** nacionalni predpisi definirajo požarne sektorje z ISO požarno odpornostjo za zidove, strope, vrata in tla, glede na uporabo in geometrijo stavbe.
- Prvi dve možnosti se lahko uporabita pri omejenem številu ločilnih elementov in bosta vodili do visokih stroškov. **V praksi se pogosto uporablja tretja možnost.**

# Hitrost sproščanja toplote

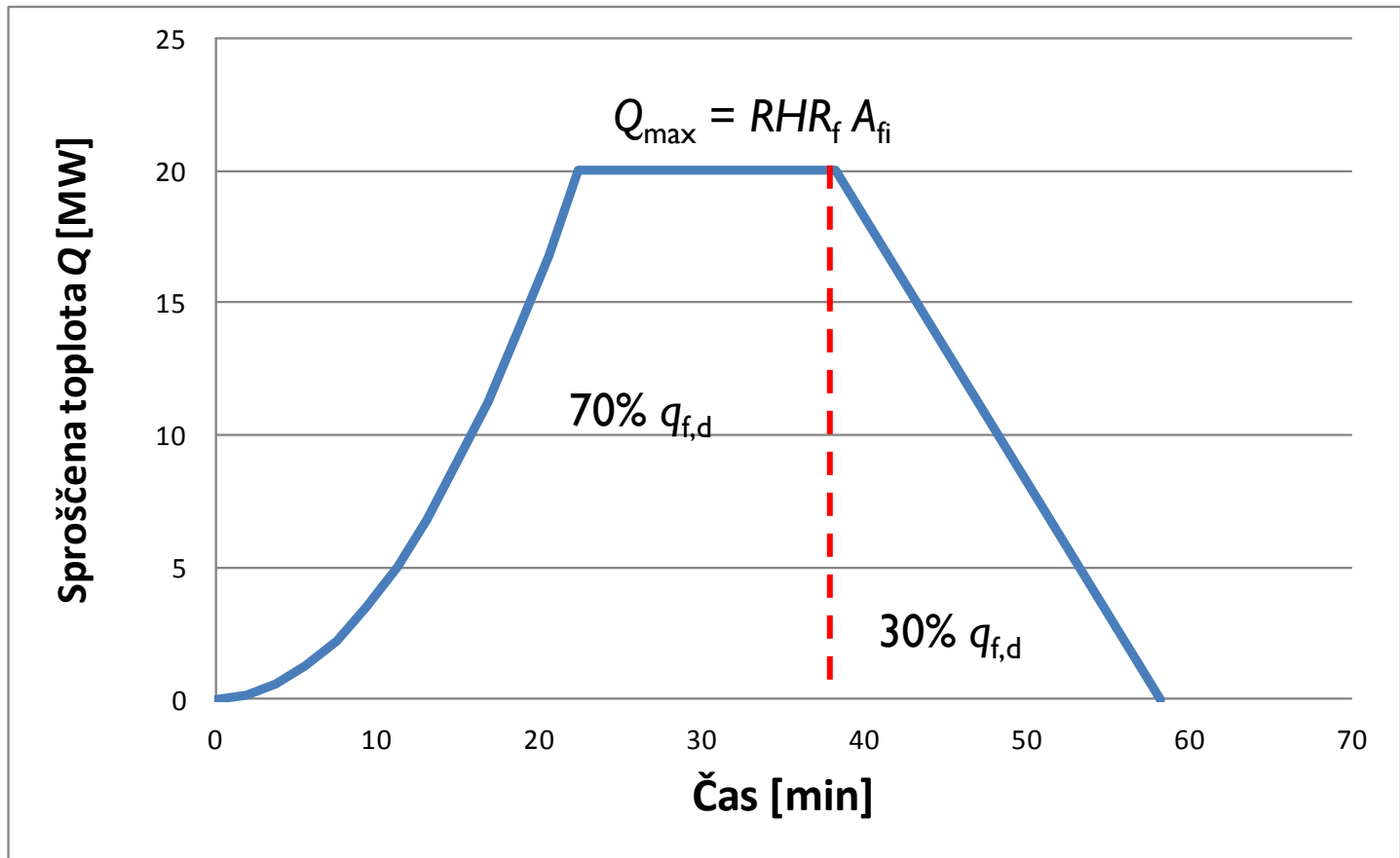
- $Q = (t/t_{\alpha})^2$  [MW]
  - $t$  – čas v [s]
  - $t_{\alpha}$  – čas, v katerem se doseže hitrost sproščanja toplote 1 MW; enota: [s]
- Razvoj požara, oziroma hitrost sproščanja toplote je odvisna od materialov in skladno s tem lahko odvisnost povežemo z namembnostjo prostorov
  - $RHR_f$  – največja hitrost sproščanja toplote na 1 m<sup>2</sup> požara

# Hitrost sproščanja toplote

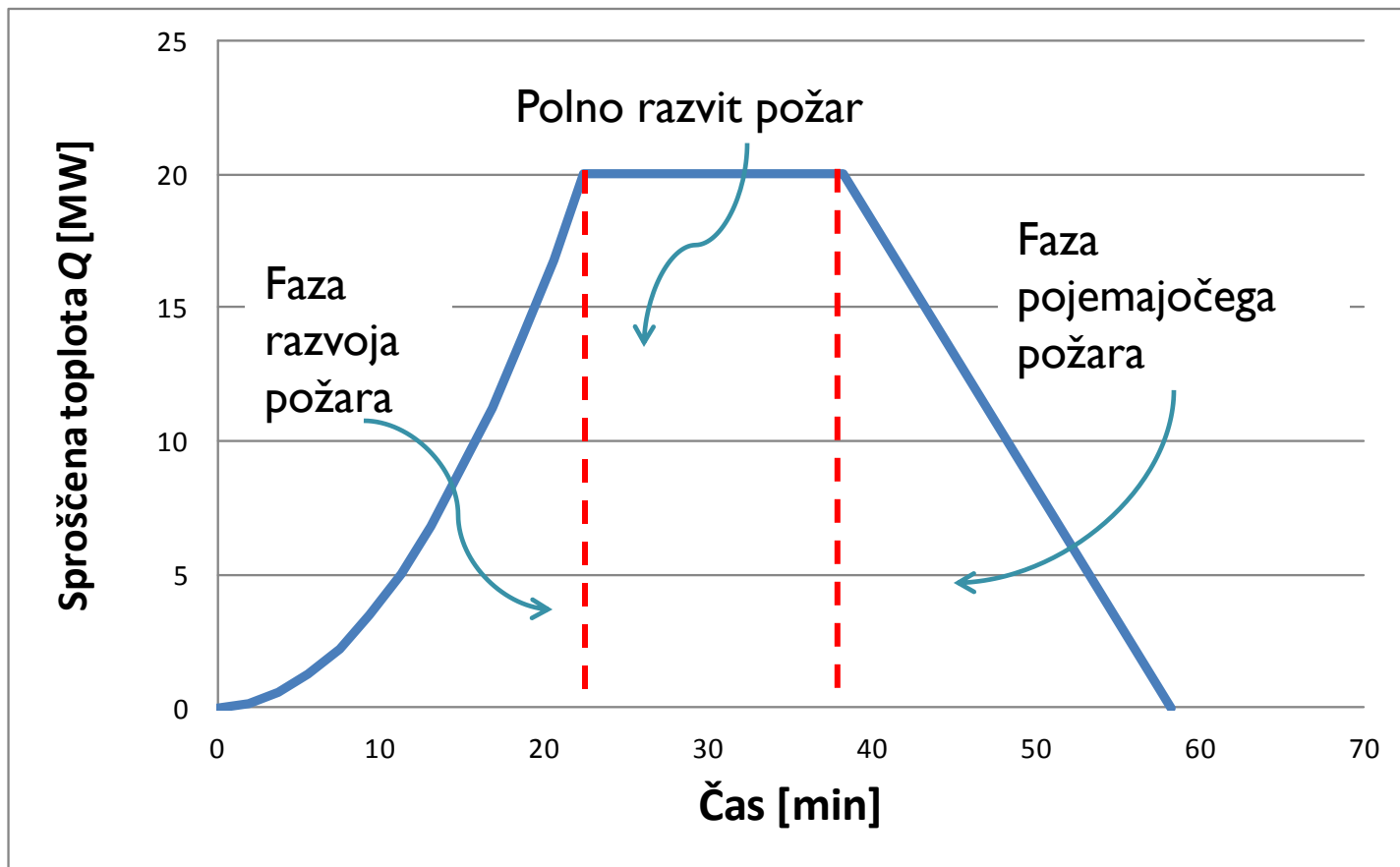
Tabela E.5: Stopnja rasti požara  $RHR_f$  za različne nastanitve

Največja hitrost sproščanja toplote $RHR_f$			
Raba	Hitrost razvoja požara	$t_a$ [s]	$RHR_f$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Stanovanja	srednja	300	250
Bolnišnice (sobe)	srednja	300	250
Hoteli (sobe)	srednja	300	250
Knjižnice	hitra	150	500
Pisarne	srednja	300	250
Šolski razredi	srednja	300	250
Nakupovalna središča	hitra	150	250
Dvorane (kino)	hitra	150	500
Transport (javni prostori)	počasna	600	250

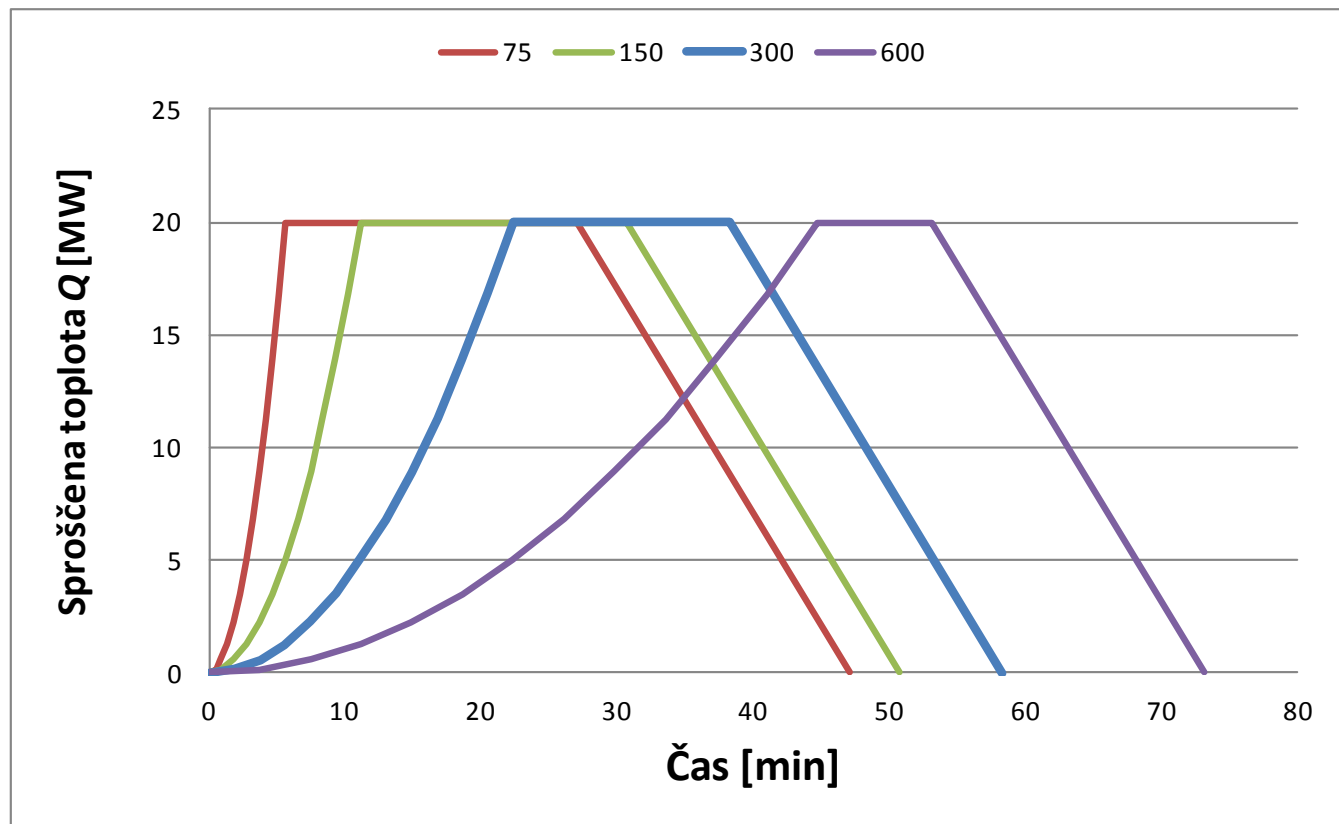
# Hitrost sproščanja toplote



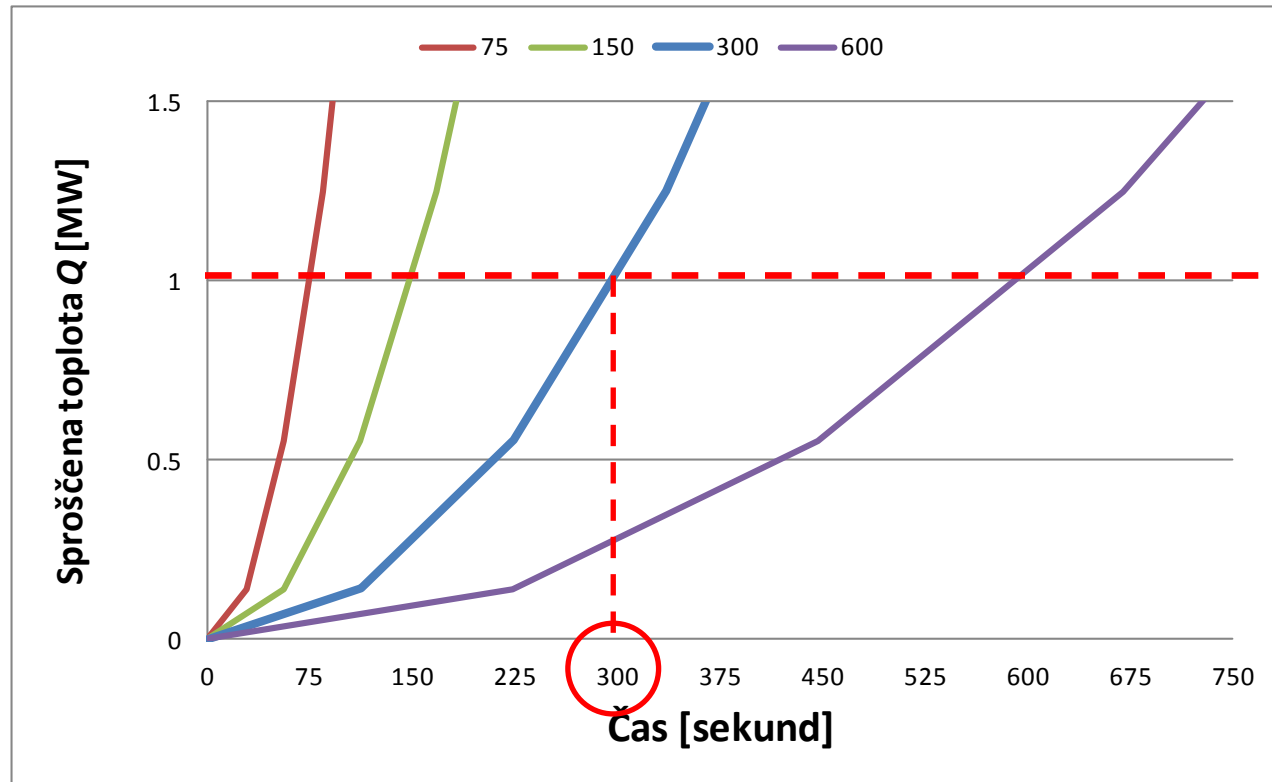
# Hitrost sproščanja toplote



# Hitrost sproščanja toplote vpliv $t_{\alpha}$



# Hitrost sproščanja toplote pomen $t_\alpha$



# Razvoj požara

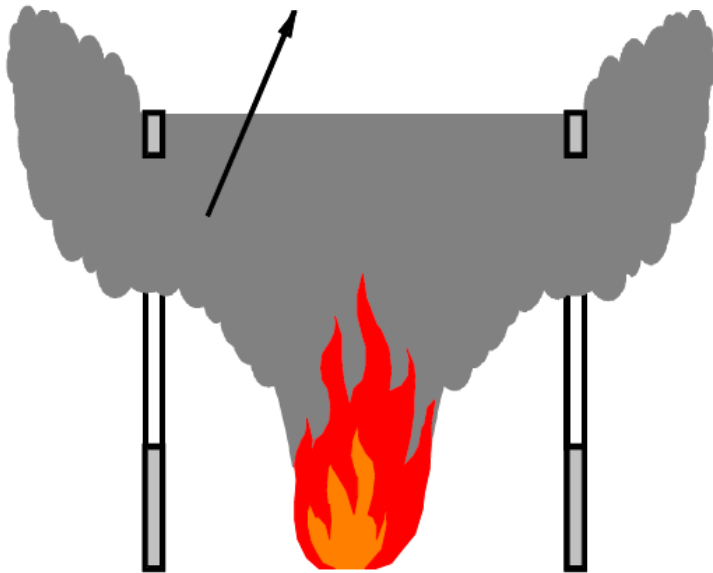
- *Lokalni požar*
  - *Del požarnega sektorja je zajel požar.*
  - *Sloj toplega in hladnega zraka.*
- *Polno razvit požar*
  - *Požar je zajel celotni požarni sektor, požarna obtežba je enakomerno porazdeljena po celem sektorju.*
  - *Temperatura je enakomerna po celem prostoru.*



# Razvoj požara

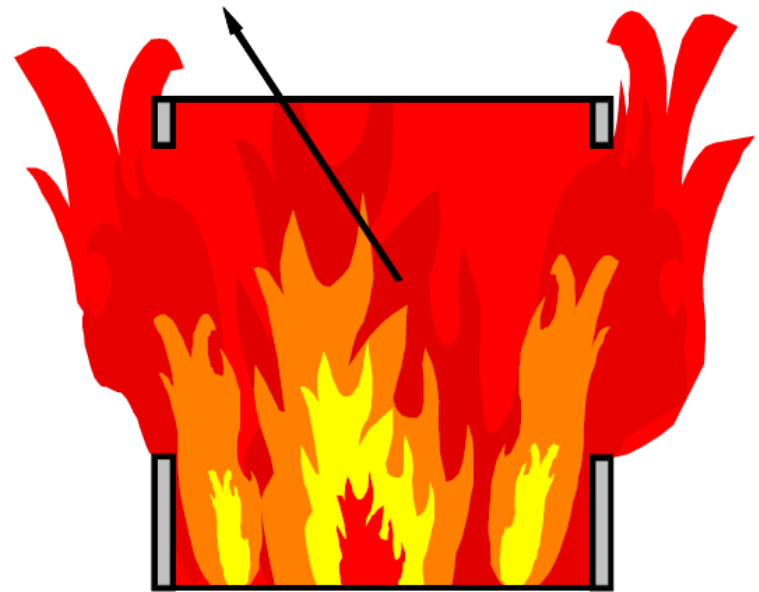
## LOKALNI POŽAR

$T(x,y,z,t)$  je neenakomerna po celem požarnem sektorju



## POLNO RAZVIT POŽAR

$T(t)$  je enakomerna po celem požarnem sektorju



# Računski modeli za račun razvoja požara

- Obstajajo različni nivoji računskih modelov za določanje razvoja požara:
  - Enostavni modeli: večinoma parametrične požarne krivulje
  - **Sektorski conski modeli:** ti modeli upoštevajo glavne parametre za razvoj in nadzor požara (odprtine, lastnosti obodnih sten, HRR)
  - Napredni modeli: preveč kompleksni za splošno uporabo. Najbolj realno opišejo razvoj temperature po prostoru, pri čemer lahko zajamemo realno geometrijo prostora.

# Conski Modeli

- **Eno-conski:**

- Predpostavke eno-conskih modelov se nanašajo na posplošen požar z enakomerno temperaturo v požarnem sektorju.

- **Dvo-conski modeli:**

- se nanašajo na slojevit dimni pas zaradi lokaliziranega požara, dve območji temperatur, vroč in hladen zrak.
- Programsko orodje **OZONE**.

# Lokalni požar

- SIST EN 1991-1-2, Annex C



# Polno razvit požar

Eksperimenti v naravnem merilu 1:1,  
Cardington (VB), v 90-ih, prejšnje stoletje in  
začetku tega stoletja



Povezava:

<http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/DataBase/TestData/BRETest/default.htm>

# Polno razvit požar



Odprtine z  
običajnim steklom

Realna požarna  
obtežba



# Polno razvit požar

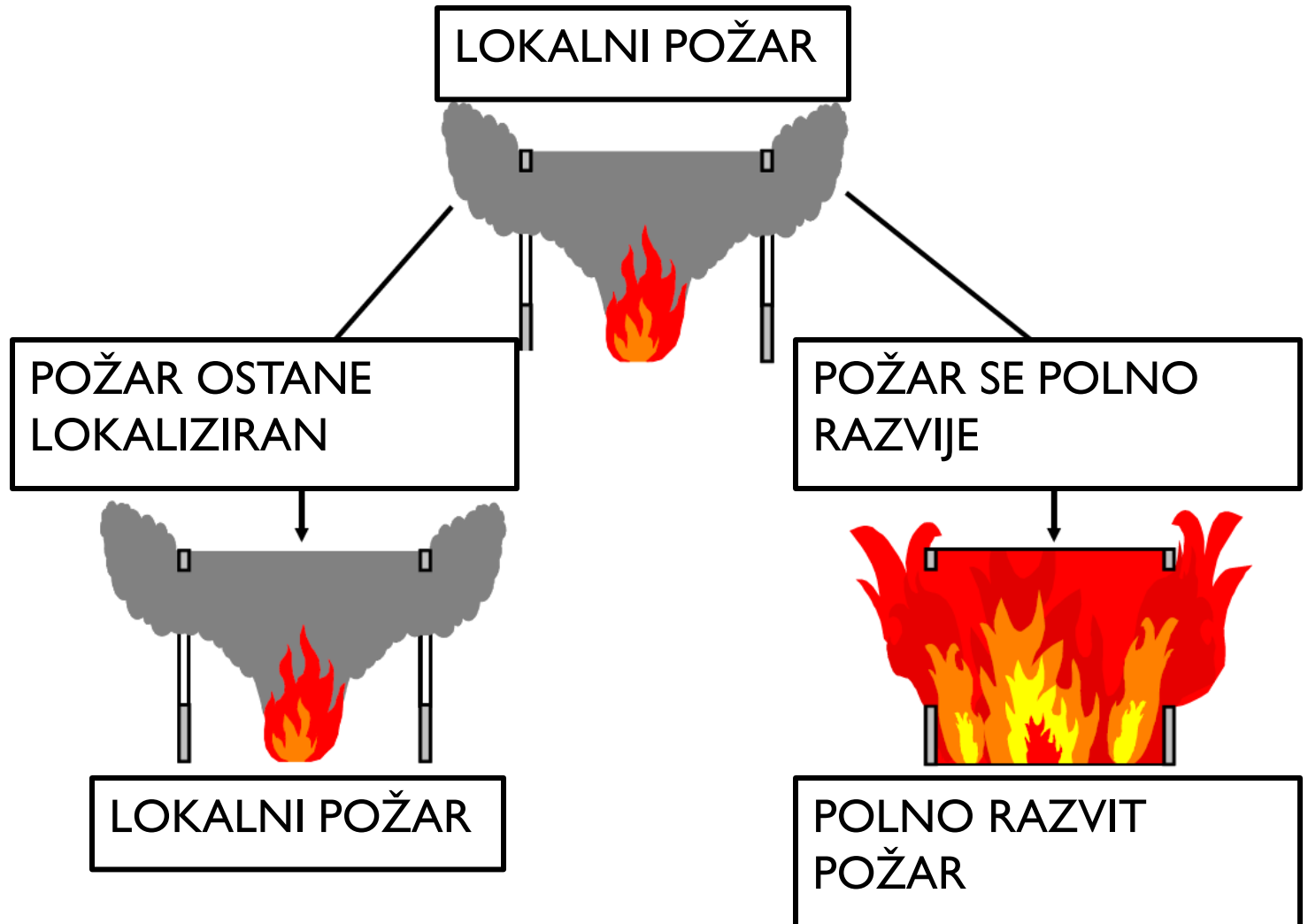


Začetek oziroma  
razvoj požara

Polno razvit požar

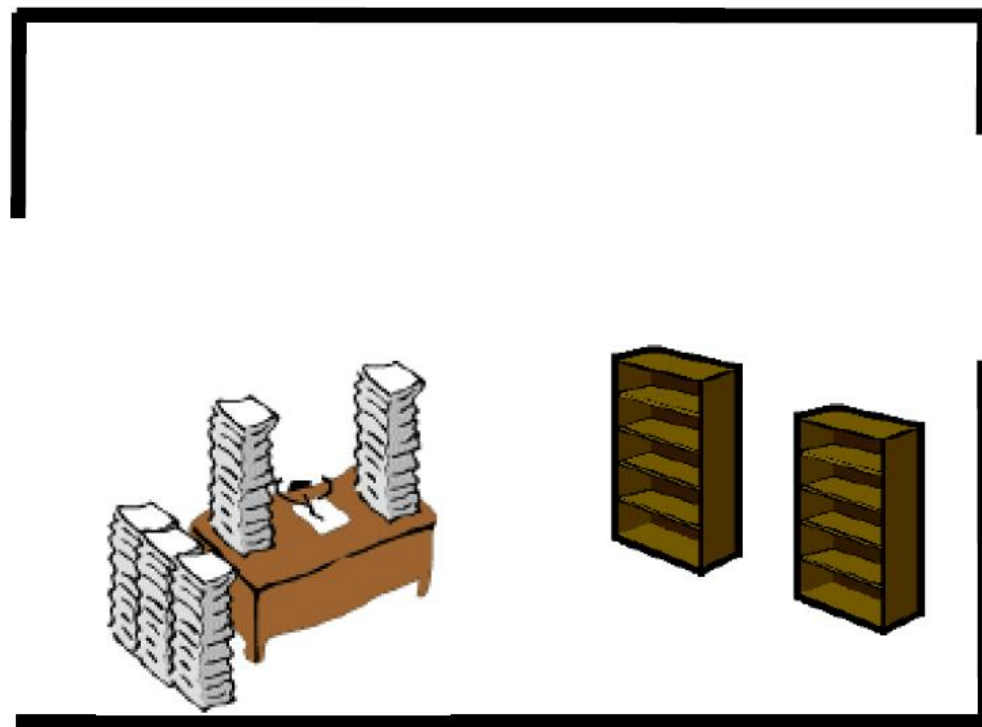


# Razvoj požara



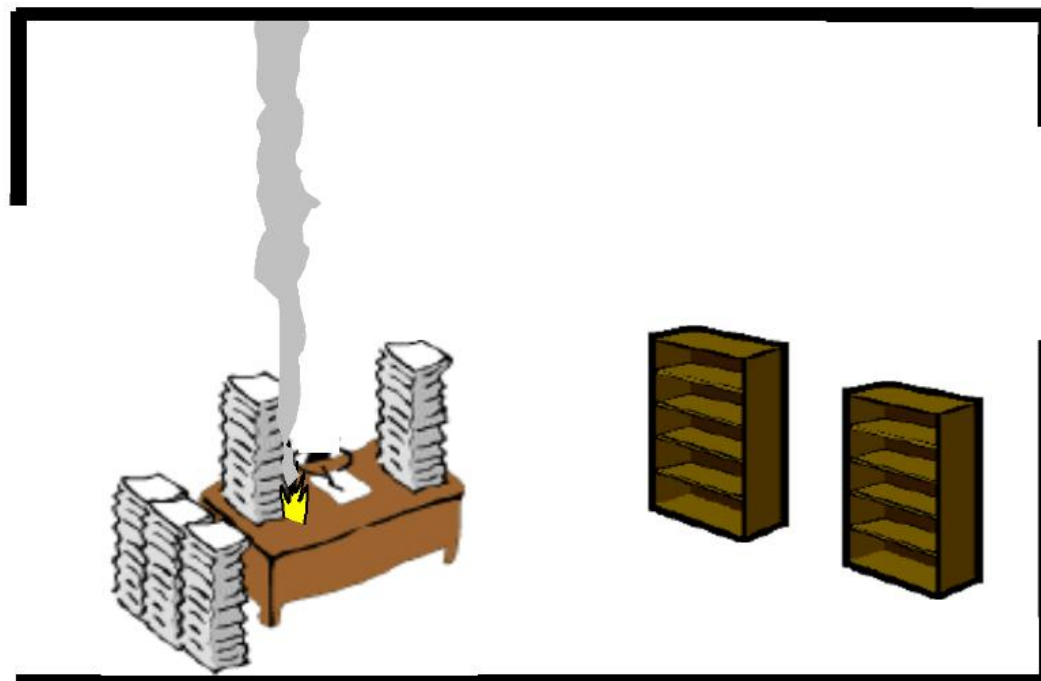


# Razvoj požara

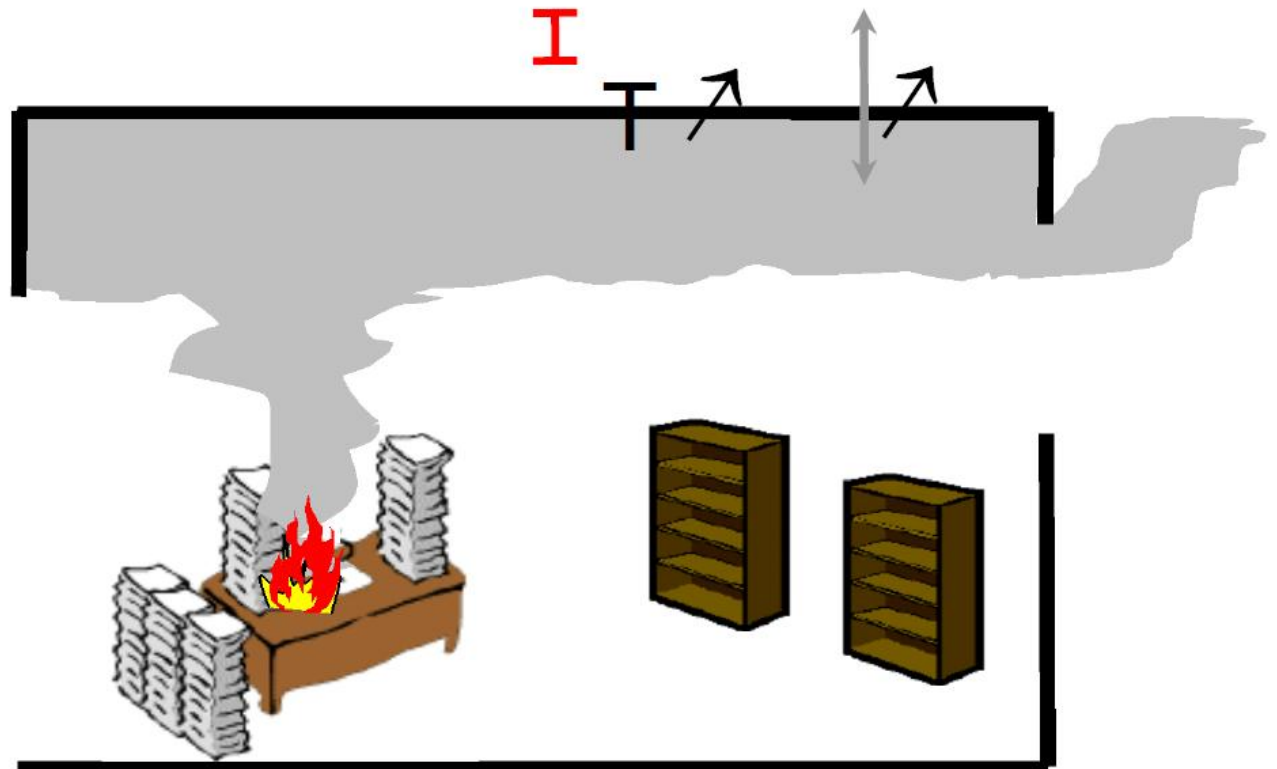


# Razvoj požara

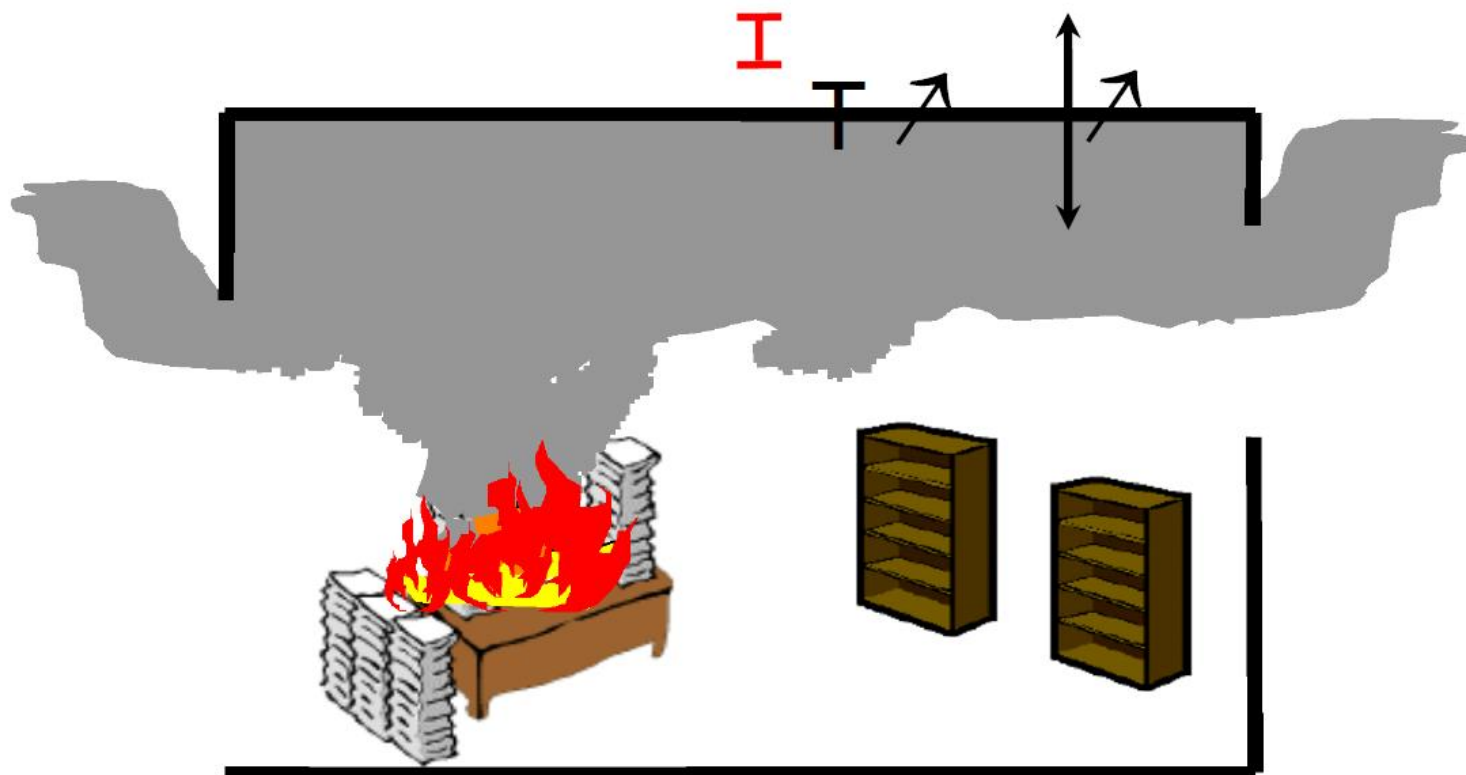
I



# Razvoj požara

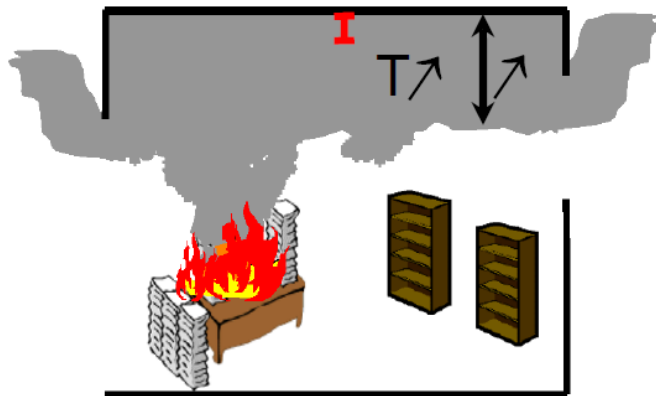


# Razvoj požara

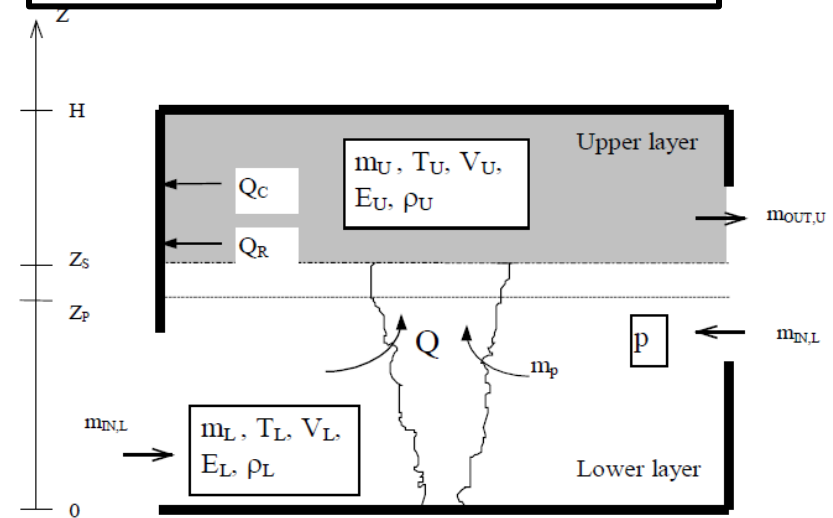


# Razvoj požara – dvo-coski model

LOKALNI POŽAR

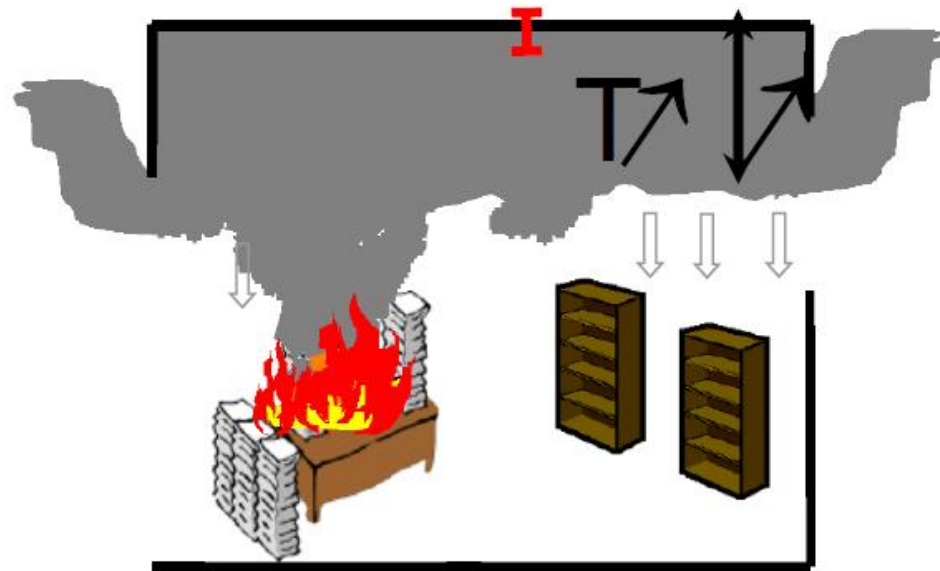


Ozone - Računski model



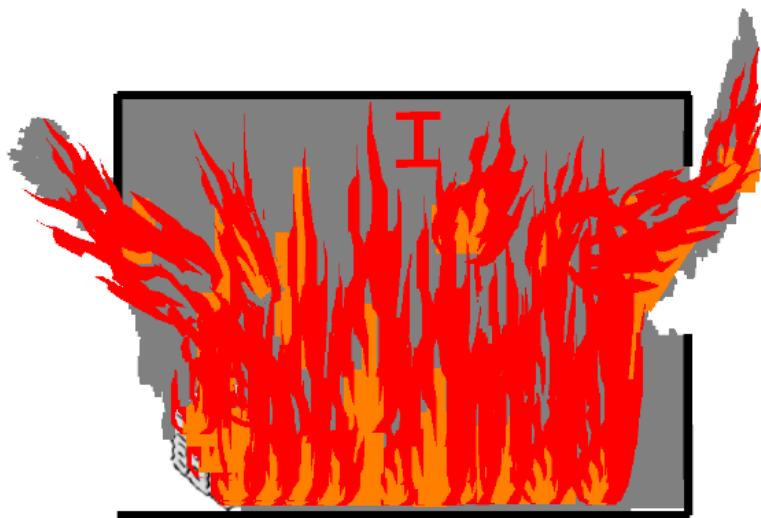
# 2 coni → 1 cona

- $T$  vročega sloja  $> 500$  °C
- Vnetljivi delci v dimu in  $T$  dima  $> 300$  °C
- $A_f > 25\%$
- Višina dima  $> 80\%$  celotne višine

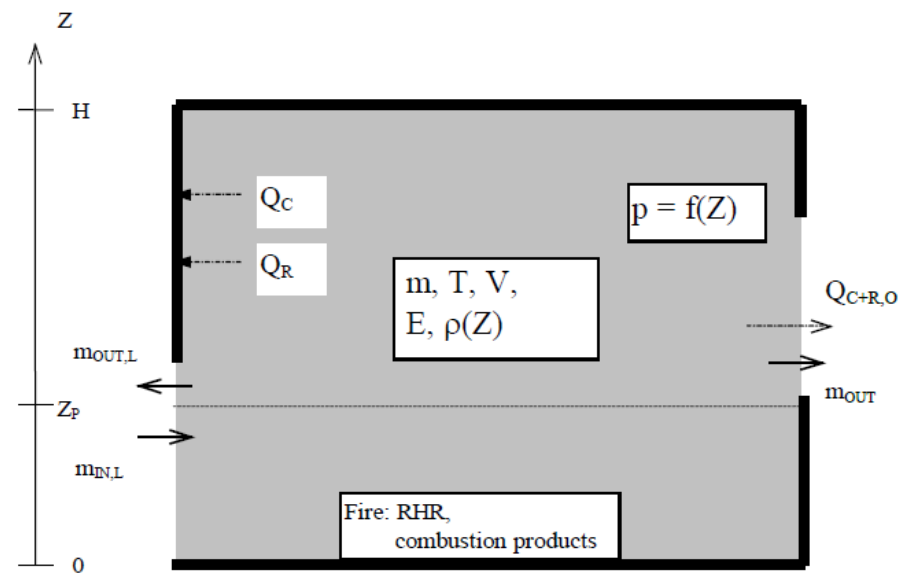


# 2 coni → 1 cona

Polno razvit požar



Ozone - Računski model



# Toplotne karakteristike zidov

- Izguba toplote v požarnem sektorju je pomemben faktor pri določanju temperature (kondukcija). Mejni element požarnega sektorja se ogreje s pomočjo konvekcije in radiacije.
- Glavni parametri, ki opisujejo toplotne lastnosti materiala so:
  - toplotna kapaciteta  $c_p$ ,
  - gostota  $\rho$
  - prevodnost  $\lambda$
- Materialni parametri so odvisni od temperature in s tem tudi toplotna kapaciteta zidu.



# Toplotne karakteristike zidov

- V poenostavljenih modelih je uporabljena le tako imenovana toplotna vztrajnost,  $b$ -faktor, ki se izračuna iz toplotnih karakteristik po naslednji enačbi

$$b = \lambda \cdot \rho \cdot c_p$$

- Za izračun koeficienta  $b$  se lahko za vrednosti gostote  $\rho$ , specifične toplotne  $c_p$  in toplotne prevodnosti  $\lambda$  mejnih elementov privzamejo vrednosti pri sobni temperaturi [1].
- V primeru, da imamo steno iz več slojev izračunamo nadomestni faktor  $b$ .
- SIST EN 1991-1-2 Annex A (Parametrična požarna krivulja)

# Karakteristike odprtin

- Stopnja razvitost požara v zaprtem prostoru je odvisna od velikosti odprtin v prostoru.
- Koeficient odprtin  $O$ , uporabljen v poenostavljenih modelih, je za eno vertikalno odprtino definiran z naslednjo enačbo

$$O = A_w \sqrt{H}$$

$A_w$  je površina odprtine

$H$  je višina odprtine

- Kadar je potrebno upoštevati več vertikalnih odprtin, je potrebno upoštevati celotno površino in ekvivalentno višino.

# Ozone, Eksperimenti (54 eksperimentov, Univerza v Liegu)



# Ozone, Eksperimenti



# Ozone, Eksperimenti



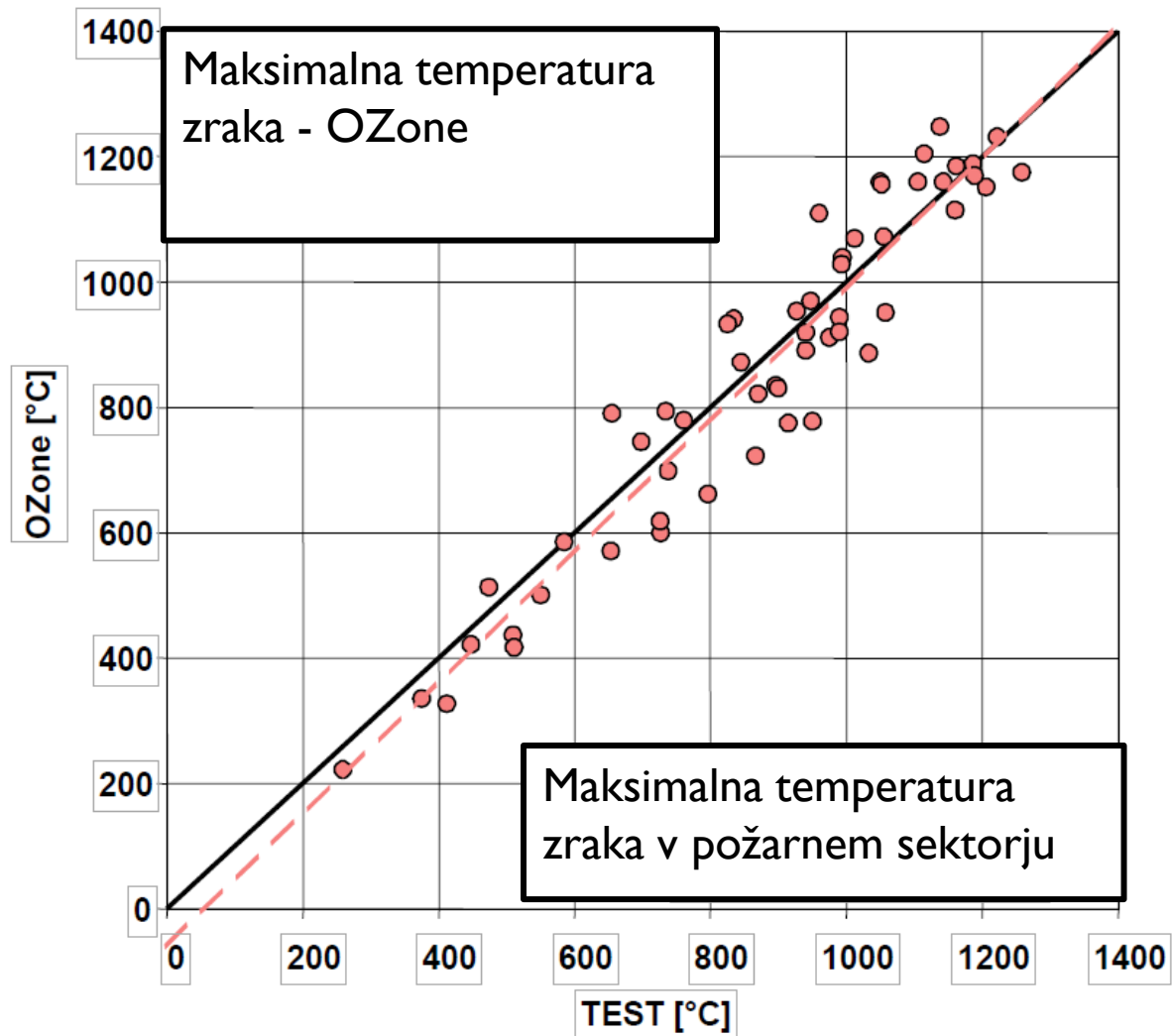
# Ozone, Eksperimenti



# Ozone, Eksperimenti



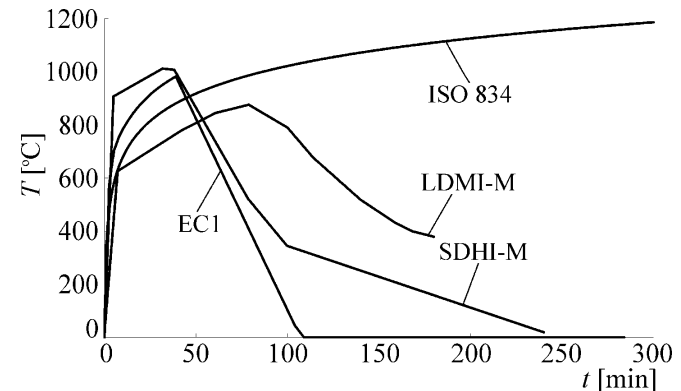
# Ozone, Primerjava model - eksperimenti





# Polno razvit požar

- Za modeliranje polno razvitega požara obstaja več modelih:
  - Parametrične krivulje
  - Conski modeli
  - Napredni modeli (termodinamika,...) - FDS
- Modeli naravnega požara predstavljajo realnejšo alternativo standardnim požarnim krivuljam
  - Performančni pristop k projektiranju



# Parametričen požar

- Bistvo parametričnega požara je upoštevanje najpomembnejšega fizikalnega parametra, ki lahko vpliva na razvoj požara v določenem objektu.
- Tako, kot nominalni požari, tudi parametrične požarne krivulje **opisujejo razvoj temperature v odvisnosti od časa**, vendar pa te odvisnosti vsebujejo nekaj dodatnih parametrov, ki domnevno predstavljajo **določeno povezavo z realnostjo**.
- Modeli parametričnega požara na takšen ali drugačen način upoštevajo naslednje parametre:
  - geometrija požarnega sektorja,
  - požarna obtežba znotraj požarnega sektorja,
  - odprtine v stenah in/ali strehi in
  - vrsta in lastnosti različnih konstrukcijskih elementov, ki sestavljajo obod požarnega sektorja.

# Parametričen požar

- Parametrični požari temeljijo na hipotezi enakomerne temperature v požarnem sektorju, kar omejuje njihovo možnost uporabe pri polno razvitih požarih. V požarnih sektorjih večjih dimenzij.
- Navsezadnje, predstavljajo pomemben korak k upoštevanju realnega stanja določenega požara v primerjavi z naravnim požarom, medtem ko še vedno vsebujejo poenostavitve nekaterih analitičnih izrazov, zato za njihovo uporabo ne potrebujemo naprednejšega računalniškega orodja.
- SIST EN 1991-1-2 Annex A, Parametrična krivulja

# Parametrična krivulja skladno s SIST EN 1991-1-2, Dodatek A

(3) Krivulje temperatura-čas v fazi segrevanja so podane z enačbo:

$$\theta_g = 20 + 1\,325 \left( 1 - 0,324 e^{-0,2t^*} - 0,204 e^{-17t^*} - 0,472 e^{-19t^*} \right) \quad (\text{A.1})$$

kjer je:

$\theta_g$	temperatura plinov v požarnem sektorju	[°C]	
$t^*$	$= t \cdot \Gamma$	[h]	(A.2a)

Pri tem je:

$t$	čas	[h]	
$\Gamma$	$= [O/b]^2 / (0,04/1\,160)^2$	[-]	
$b$	$= \sqrt{(\rho c \lambda)}$		
	z naslednjimi omejitvami: $100 \leq b \leq 2200$	[J/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> K]	
$\rho$	gostota ločilnega oboda	[kg/m <sup>3</sup> ]	
$c$	specifična toplota ločilnega oboda	[J/kgK]	
$\lambda$	toplotna prevodnost ločilnega oboda	[W/mK]	
$O$	faktor odprtin: $A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t$	[m <sup>1/2</sup> ]	
	z naslednjimi omejitvami: $0,02 \leq O \leq 0,20$		
$A_v$	celotna površina vertikalnih odprtin v vseh stenah	[m <sup>2</sup> ]	
$h_e$	uteženo povprečje višin oken v vseh stenah	[m]	
$A_t$	celotna površina oboda (stene, stropovi in tla, vključno z odprtinami)	[m <sup>2</sup> ]	

OPOMBA: V primeru da je  $\Gamma = 1$ , se enačba (A.1) približa standardni krivulji temperatura-čas.

# Parametrična krivulja skladno s SIST EN 1991-1-2, Dodatek A

- Omejitve:
  - za požarne sektorje talne površine do 500 m<sup>2</sup>
  - brez odprtin v stropu
  - maksimalna višina sektorja znaša 4 m.
  - požarni sektorje s pretežno celuloznim tipom požarne obtežbe
  - obodne stene:  $100 \leq b \leq 2200$
  - faktor odprtin:  $0,02 \leq O \leq 0,20$
- Predpostavljeno je, da požarna obremenitev sektorja v celoti zgori.

# Parametrična krivulja skladno s SIST EN 1991-1-2, Dodatek A

- Faza ohlajevanja, ločeni izrazi:

(11) Krivulje temperatura-čas za fazo ohlajevanja so podane z enačbami:

$$\theta_g = \theta_{\max} - 625 (t^* - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{za} \quad t_{\max}^* \leq 0,5$$

$$\theta_g = \theta_{\max} - 250 (3 - t_{\max}^*) (t^* - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{za} \quad 0,5 < t_{\max}^* < 2$$

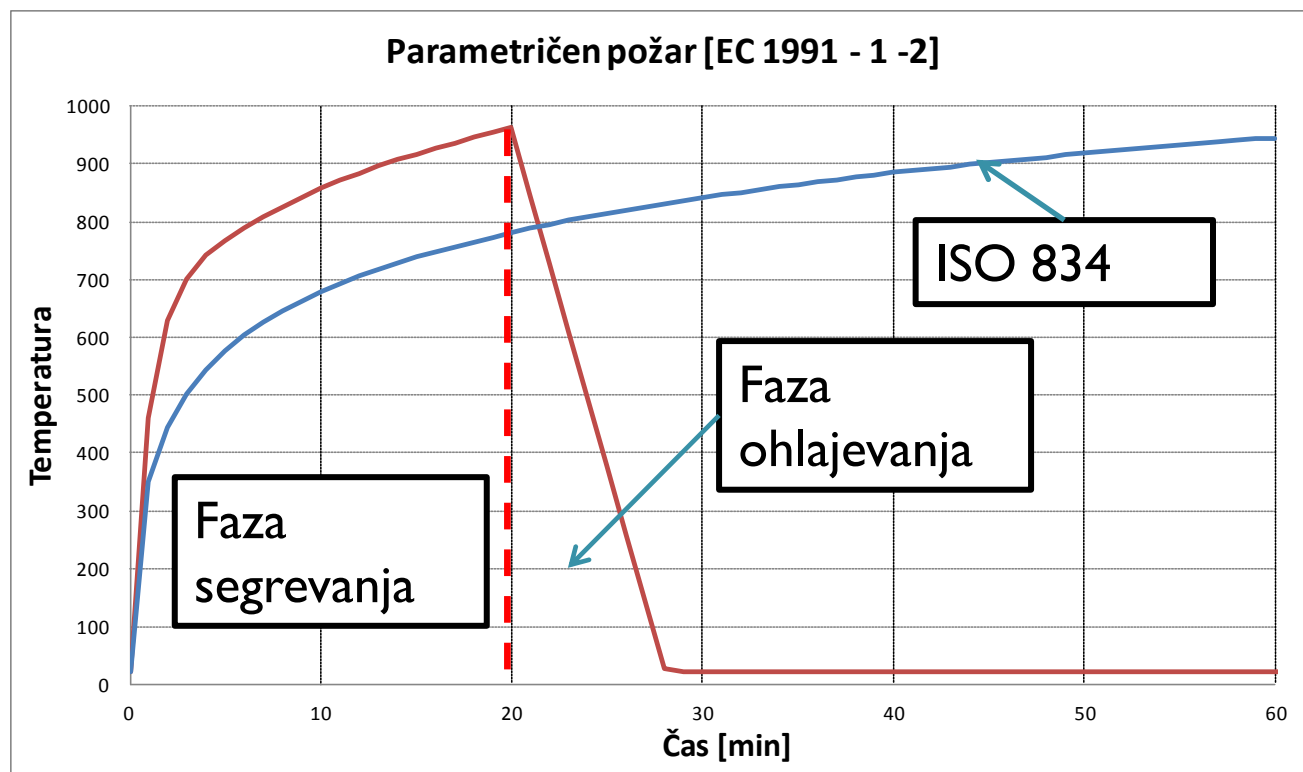
$$\theta_g = \theta_{\max} - 250 (t^* - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{za} \quad t_{\max}^* \geq 2$$

kjer je  $t^*$  podan v (A.2a)

$$t_{\max}^* = (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / \theta) \cdot \Gamma$$

$x = 1,0$  če je  $t_{\max} > t_{\lim}$ , ali  $x = t_{\lim} \cdot \Gamma / t_{\max}^*$  če je  $t_{\max} = t_{\lim}$

# Parametrična krivulja skladno s SIST EN 1991-1-2, Dodatek A



# Ostali modeli parametričnih požarov

- Model, ki ga je predstavil LIE (1974)
- Model avtorjev Ma & Mäkeläinen
- “Švedske krivulje”
  - Osnova, hitrost sproščanja toplote lesenega goriva, Kawagoe (1958)  
$$m = 0.092 A_v (H_v)^{1/2}$$
  - Ventilacijsko kontroliran požar ( $F_v$ )
  - Količina gorljivega materiala ( $q_{f,d}$ )



# “Švedske krivulje”, Magnusson in Thelandersson

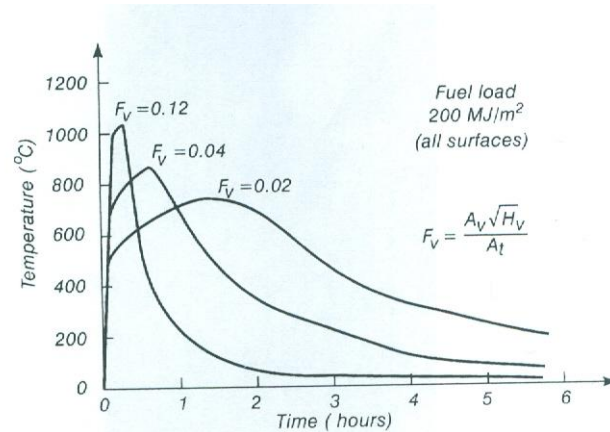


Figure 4.9 Time-temperature curves for varying ventilation and constant fuel load (MJ/m<sup>2</sup> total surface area)

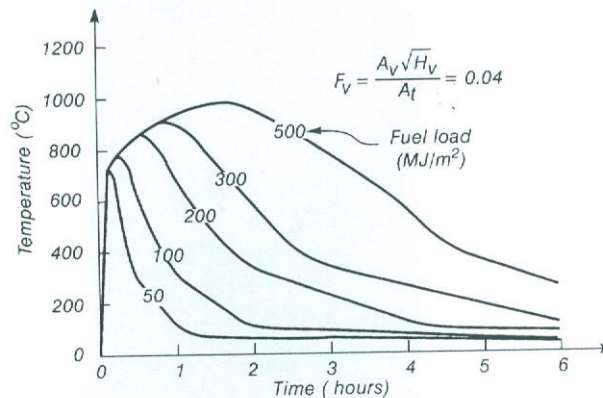


Figure 4.10 Time-temperature curves for varying fuel load (MJ/m<sup>2</sup> total surface area) and constant ventilation