



# LOCAFI+

Določitev temperatur navpičnih elementov izpostavljenih lokaliziranim  
požarom (LOCALised FIRE)  
Diseminacija  
Grant Agreement n° 754072

## 6. Določitev požarne odpornosti

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.1. Splošni postopek

Korak 1 : Opredelitev toplotne obremenitve

Korak 2 : Toplotna Analiza

Korak 3 : Mehanska Analiza

Splošni postopek je korak za korakom (Korak 1 → Korak 2 → Korak 3) ampak bolj natančno mora biti postopek povezan v obe smeri. Če postopek ni povezan se mora inženir zavedati predpostavk!

- Povesi/pomiki konstrukcijskega elementa lahko vplivajo na razvoj požara
- Povesi/pomiki konstrukcijskega elementa lahko vplivajo na toplotno obremenitev
- Dvig temperature v elementih lahko vpliva na absorbirano energijo v zidovih/tleh
- Plastifikacija in razpoke lahko povzročijo vir ali ponor toplote
- ...

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.2. Izbira ustreznih požarnih scenarijev

#### 6.2.1. Sektorski požar

- Standardna požarna krivulja (ISO-834, Ogljikovodikova,...)
- Naravne požarne krivulje (parametrična krivulja skladno z Dodatkom A EN 1991-1-2, programska oprema Ozone, ki temelji na EN 1991-1-2 dodatka D in E)

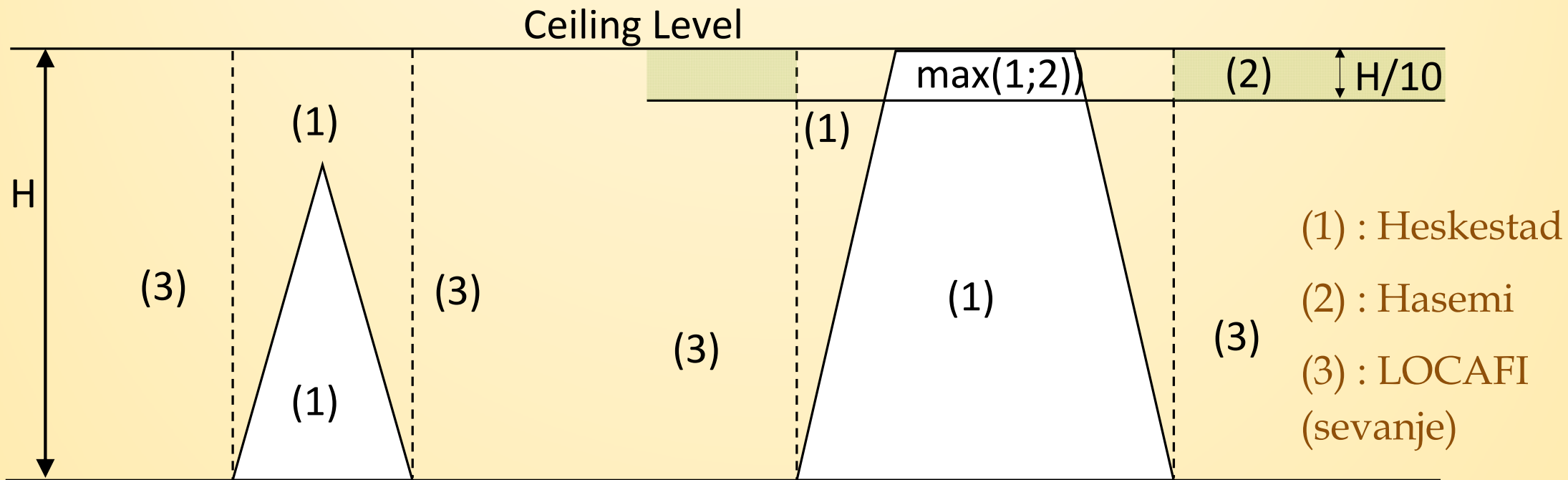
#### 6.2.2. Lokaliziran požar

- Projektni požar določen s strani inženirja/ oblasti (premer, RHR)

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.2. Izbira ustreznih požarnih scenarijev

#### 6.2.2. Lokaliziran požar



## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.3. Toplotna analiza

#### 6.3.1. Temperatura ravnovesnega stanja

Temperatura ravnovesnega stanja  $\theta$  je temperatura pri kateri je absorbiran toplotni tok v ravnovesju z oddanim toplotnim tokom (konvekcijski in sevalni)

$$0 = \underbrace{\alpha_c(\theta - 20)}_{\text{Oddani konvekcijski toplotni tok}} + \underbrace{\sigma\varepsilon[(\theta + 273)^4 - (20 + 273)^4]}_{\text{Oddani sevalni toplotni tok}} - \underbrace{\varepsilon * \dot{h}_{m,r}}_{\text{Absorbirani toplotni tok}}$$

V primeru sektorskega požara je potrebno povprečni skupni sevalni toplotni tok  $\dot{h}_{m,r}$  nadomestiti z  $\dot{h}_{m,tot}$ , ki zajema konvekcijski in sevalni toplotni tok.

$$\dot{h}_{m,tot} = \min(\dot{h}_{m,r} + \dot{h}_{m,c}; 100000) \quad [\text{W m}^{-2}]$$

Ta poenostavljen pristop zanemara toplotno vztrajnost elementa

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.3. Toplotna analiza

#### 6.3.2. Inkrementni pristop (enakomerna temperatura)

Temperatura v elementu se izračuna iz toplotne bilance elementa

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

$\rho_a$ ,  $c_a$ , in  $A_m/V$  so gostota [ $\text{kg m}^{-3}$ ], specifična toplota [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ] in faktor prereza elementa [ $\text{m}^{-1}$ ]

EN 1993-1-2 predlaga za  $\Delta t$  manj kot 5 sekund

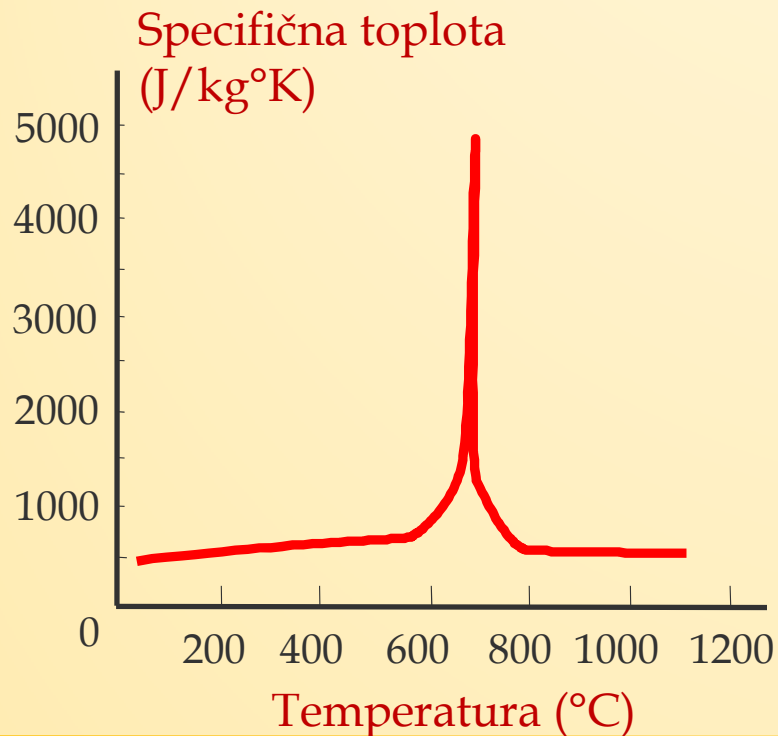
V primeru sektorskega požara je potrebno povprečni skupni sevalni toplotni tok  $\dot{h}_{m,r}$  nadomestiti z  $\dot{h}_{m,tot}$ , ki zajema konvekcijski in sevalni toplotni tok.

$$\dot{h}_{m,tot} = \min(\dot{h}_{m,r} + \dot{h}_{m,c}; 100000) \quad [\text{W m}^{-2}]$$

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.3. Toplotna analiza

#### 6.3.2. Inkrementni pristop (enakomerna temperatura)



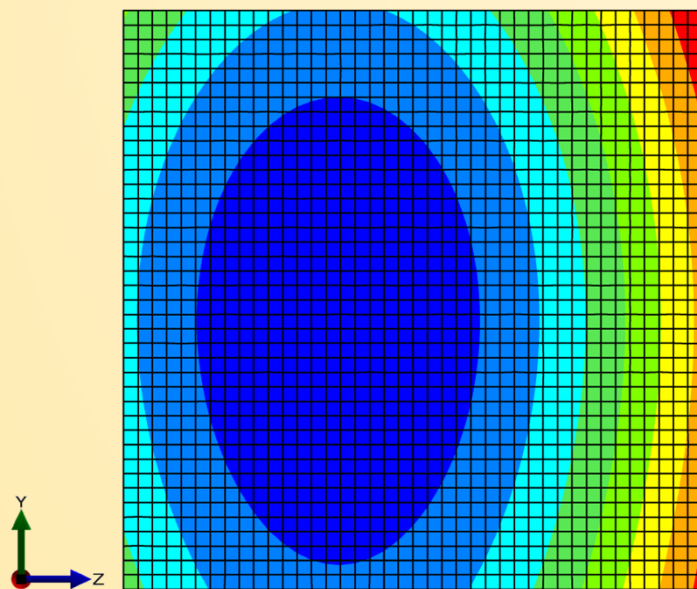
Gostota jekla: 7850 kg/m<sup>3</sup>

Neodvisna od temeprature

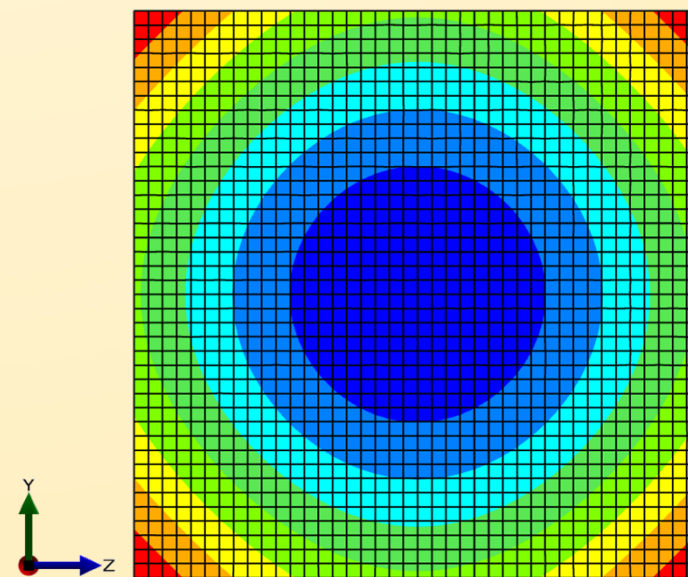
## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.3. Toplotna analiza

#### 6.3.3. MKE toplotna analiza (neenakomerna temperatura)



TEMPERATURE :	
Red	289,2°C to 294,4°C
Orange	284,1°C to 289,2°C
Yellow	278,9°C to 284,1°C
Light Green	273,7°C to 278,9°C
Green	268,5°C to 273,7°C
Cyan	263,4°C to 268,5°C
Blue	258,2°C to 263,4°C
Dark Blue	253°C to 258,2°C



TEMPERATURE :	
Red	494,6°C to 499,5°C
Orange	489,7°C to 494,6°C
Yellow	484,9°C to 489,7°C
Light Green	480°C to 484,9°C
Green	475,1°C to 480°C
Cyan	470,3°C to 475,1°C
Blue	465,4°C to 470,3°C
Dark Blue	460,5°C to 465,4°C

Razporeditev temperatur [°C] po 33 minutah za 3.36 [m] visok steber s kvadratnim prerezom 130[mm]x130[mm] obdan z 3 avtomobili in 1 kombiniranim vozilom na a) višini 0.94[m] ; b) višini 3.1[m]

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.1. Splošna pravila EN 1993-1-2

Samo kriterij nosilnosti  $R$  jeklenih konstrukcij je zajet z postopki projektiranja v požarnem delu Evrokod 3

Nosilnost konstrukcije je zagotovljena, če med trajanjem izpostavljenosti požaru  $t$  velja

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t}$$

Kjer je  $E_{fi,d,t}$  : projektna vrednost učinka (Eurocodes 0 and 1)  
 $R_{fi,d,t}$  : pripadajoča projektna nosilnost konstrukcije pri času  $t$

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.1. Splošna pravila EN 1993-1-2

##### MSN kombinacija

$$E_d = 1.35 * \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1.5 * Q_{k,1} + 1.5 * \sum_{i \geq 2} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

##### Nezgodna kombinacija

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{2,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Opomba :  $\psi_{1,1}$  in  $\psi_{2,1}$  je potrebno uporabiti glede na nacionalni dodatek

Vplivi	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
Kategorija A : bivalni prostori	0.7	0.5	0.3
Kategorija B : pisarne	0.7	0.5	0.3
Kategorija C : stavbe kjer se zbirajo ljudje	0.7	0.7	0.6
Kategorija D : trgovine	0.7	0.7	0.6
Kategorija E : skladišča	1	0.9	0.8
...	...	...	...

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.1. Splošna pravila EN 1993-1-2

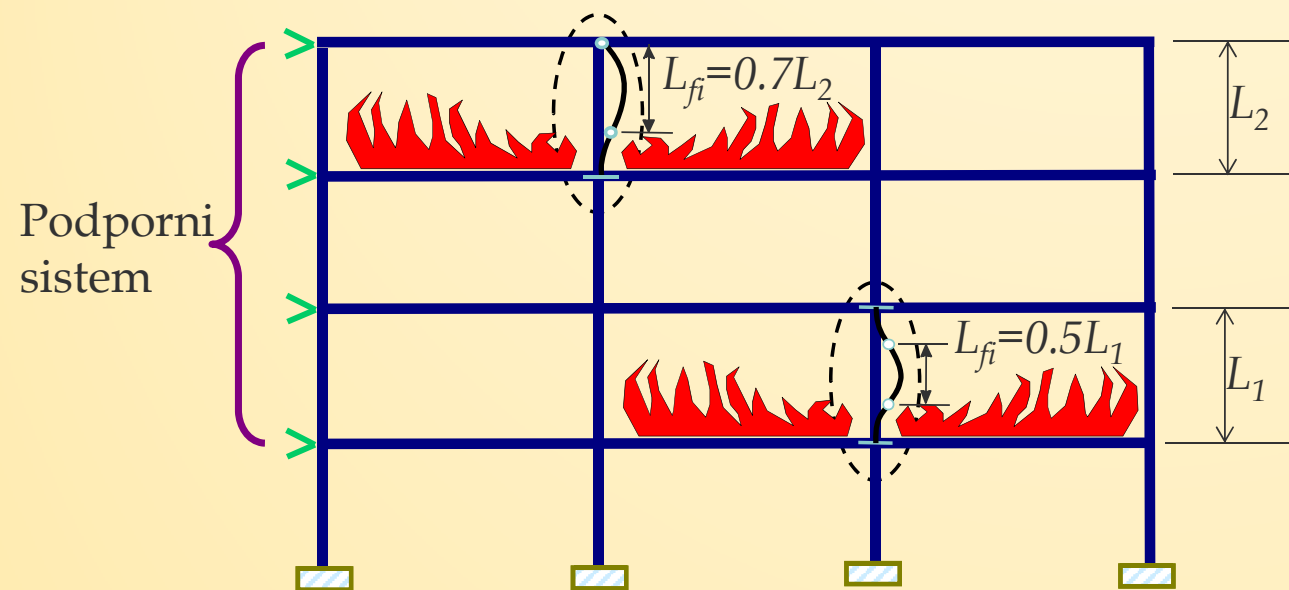
Delni faktorji za jeklo pri povišanih temperaturah

Tip elementa	Običajno stanje	Požarno stanje
Prečni prerez	$\gamma_{M0} = 1.0$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$
Element z upoštevanjem nestabilnosti	$\gamma_{M1} = 1.0$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$
Natezni elementi do pretrga	$\gamma_{M2} = 1.25$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$
Stiki	$\gamma_{M2} = 1.25$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.1. Splošna pravila EN 1993-1-2



#### Pogoji:

- Podprte konstrukcije
- Kontinuirni ali končni stebri
- Enaka požarna odpornost  $R$  za stebre in etažne elemente

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.1. Splošna pravila EN 1993-1-2

Kontrola požarne odpornosti skladno z  
enim od 3 območij:

**Temperaturno :**  $\theta_{cr,d} \geq \theta_d$

**Odpornostno :**  $R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$

**Časovno :**  $t_{fi,d} \geq t_{fi,required}$

Najbolj preprosta in pogosto uporabljena metoda, veljavna le za enakomerno  $T^\circ$

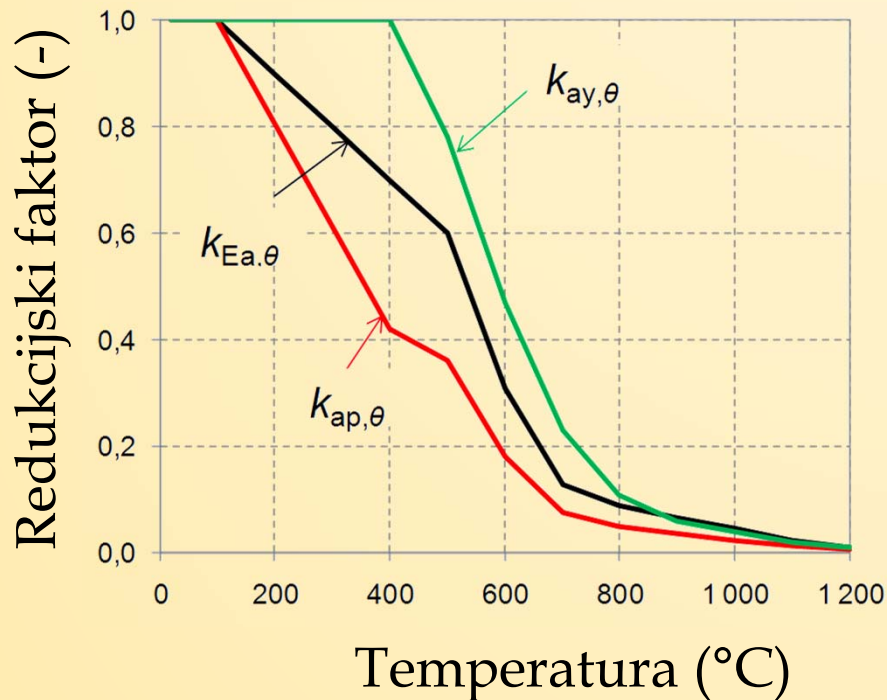
Izvedljiva s 'peš' računom (reducirana nosilnost pri zahtevanem času)

Izvedljiva samo z naprednimi orodji, kot so MKE modeli

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.2. Analitična kontrola stebra skladno z EN 1993-1-2



#### Temperaturno območje

$k_{y,\theta}$  : redukcija meje tečenja

$k_{E,\theta}$  : redukcija modula elastičnosti

$k_{p,\theta}$  : redukcija meje proporcionalnosti

**Trenutna verzija EN 1993-1-2 aplicira  
na jekla razreda S235 do S460**

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.2. Analitična kontrola stebra skladno z EN 1993-1-2

#### Temperaturno območje

*Nezgodna obtežna kombinacija*

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{2,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

*Opomba :  $\Psi_{1,1}$  in  $\Psi_{2,1}$  je potrebno uporabiti glede na nacionalni dodatek*

*Redukcijski faktor za projektno vrednost ravni obtežbe*

$$\eta_{fi} = \frac{E_{fi,d,t}}{E_d}$$

$$E_d = 1.35 * \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1.5 * Q_{k,1} + 1.5 * \sum_{i \geq 2} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.2. Analitična kontrola stebra skladno z EN 1993-1-2

#### Temperaturno območje

Redukcijski faktor odvisen od nivoja obtežbe

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} G_k + \psi_{2.1} Q_{k.1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q.1} Q_{k.1}}$$

#### Požarno projektno stanje, nezgodno

$\gamma_{GA}$  = 1.0 Stalna obtežba;

$\psi_{2.1}$  = 0.3 Kombinacijski faktor; spremenljiva obtežba, pisarne

#### Analiza pri sobni temperaturi, MSN

$\gamma_G$  = 1.35 Stalna obtežba;

$\gamma_{Q.1}$  = 1.50 Kombinacijski faktor; spremenljive obtežbe

Opomba :  $\psi_{1.1}$  in  $\psi_{2.1}$  je potrebno uporabiti glede na nacionalni dodatek

$Q_{k.1}/G_k$	$\eta_{fi}$
0	0.74
1	0.53
2	0.46
4	0.41

EN 1993-1-2 priporoča za  $\eta_{fi} = 0.65$  (razen za kategorijo E,  $\eta_{fi} = 0.7$ )

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.2. Analitična kontrola stebra skladno z EN 1993-1-2

#### Temperaturno območje

*Nezgodna obtežna kombinacija*

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{2,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

*Opomba :  $\psi_{1,1}$  in  $\psi_{2,1}$  je potrebno uporabiti glede na nacionalni dodatek*

*Redukcijski faktor za projektno vrednost ravni obtežbe*

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{fi,d,t}}{R_d} < \eta_{fi}$$

**Odpornost pri sobni temperaturi**

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.2. Analitična kontrola stebra skladno z EN 1993-1-2

#### Temperaturno območje

Stopnja izkoriščenosti

$$\mu_0 = \left( \frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi,0}} \right) = \eta_{fi,t} \left( \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M0}} \right)$$

- Zajema delne varnostne faktorje pri sobni in povišani T (običajno sta oba enaka 1.0)
- Omogoča neposreden izračun kritične T
- V primeru nestabilnosti je potrebno upoštevanje reducirane brezdimenzijske vitkosti

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.2. Analitična kontrola stebra skladno z EN 1993-1-2

#### Temperaturno območje

$\bar{\lambda}_{fi,0}$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
$\mu_0$											
0.04	1000	977	949	913	880	839	787	742	696	678	659
0.06	900	885	866	837	795	756	700	679	656	630	602
0.08	860	839	811	785	749	697	674	647	616	588	564
0.10	820	797	780	752	703	677	648	614	585	557	527
0.12	792	777	755	719	685	656	622	588	559	526	474
0.14	775	757	730	694	668	636	597	567	533	487	373
0.16	758	737	705	681	652	615	580	546	507	408	
0.18	742	717	691	668	636	596	563	524	453		
0.20	725	698	680	655	619	582	545	503	384		
0.22	708	689	669	641	603	568	528	457			
0.24	696	679	658	628	591	554	511	406			
0.26	688	670	647	615	579	540	485				
0.28	679	660	636	602	568	526	446				
...	...	...	...	...	...	...	...				

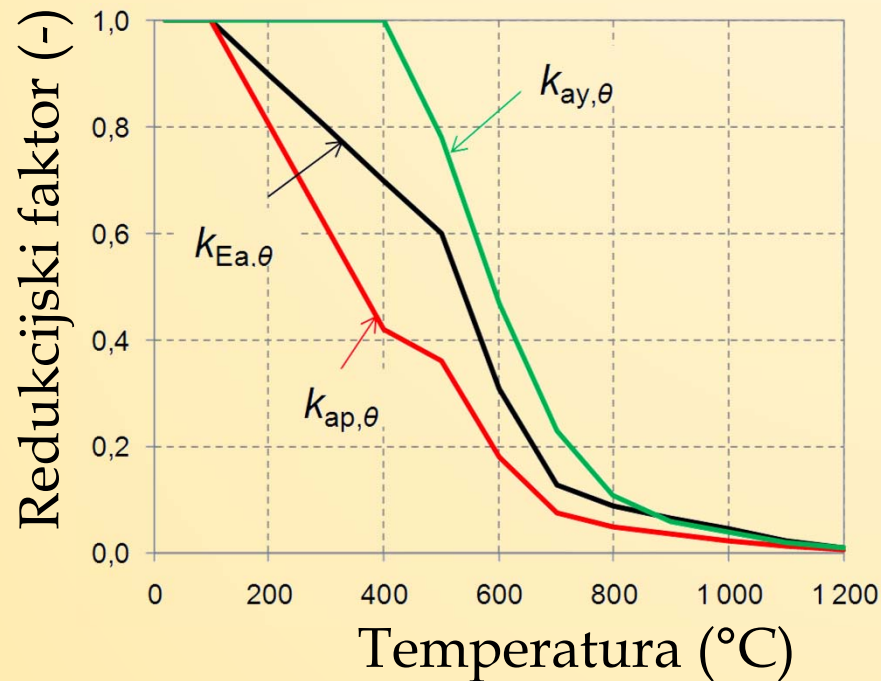
Kritična temperatura jeklenih elementov z vplivi nestabilnosti na z uporabo tabelarnih podatkov na podlagi:

- Brezdimenzijske vitkost pri času 0
- in stopnje izkoriščenosti  
 $\mu_0 = N_{fi,d,t} / N_{pl,fi,0}$
- Za vsak razred jekla svoji tabelarni podatki

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.2. Analitična kontrola stebra skladno z EN 1993-1-2



### Območje odpornosti

$k_{y,\theta}$  : redukcija meje tečenja

$k_{E,\theta}$  : redukcija modula elastičnosti

$k_{p,\theta}$  : redukcija meje proporcionalnosti

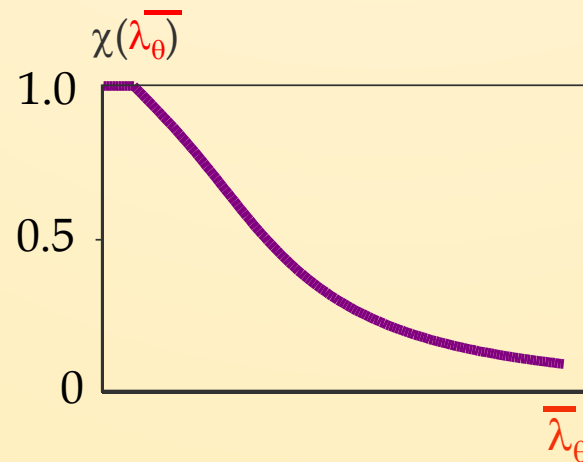
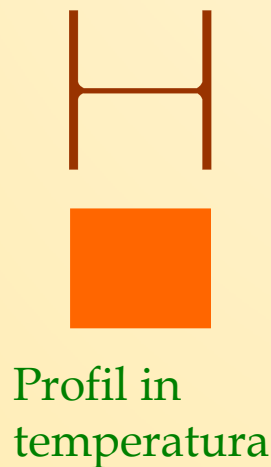
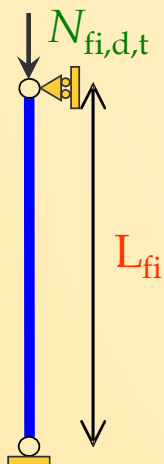
**Trenutna verzija EN 1993-1-2 aplicira  
na jekla razreda S235 do S460**

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.2. Analitična kontrola stebra skladno z EN 1993-1-2

#### Območje odpornosti



Uklonska krivulja

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}}$$

$$\varphi_{\theta} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right]$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}}$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.2. Analitična kontrola stebra skladno EN 1993-1-2

#### Območje odpornosti

*Nezgodna obtežna kombinacija*

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{2,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

*Opomba :  $\psi_{1,1}$  in  $\psi_{2,1}$  je potrebno uporabiti glede na nacionalni dodatek*

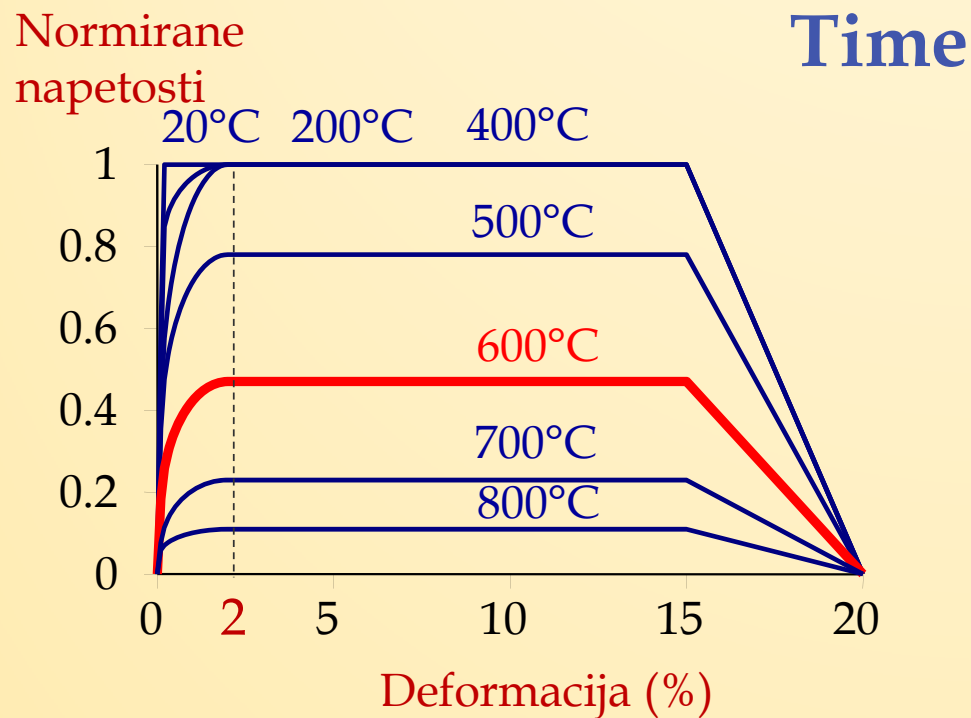
*Projektni kriterij*

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$$

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.3. Metoda končnih elementov

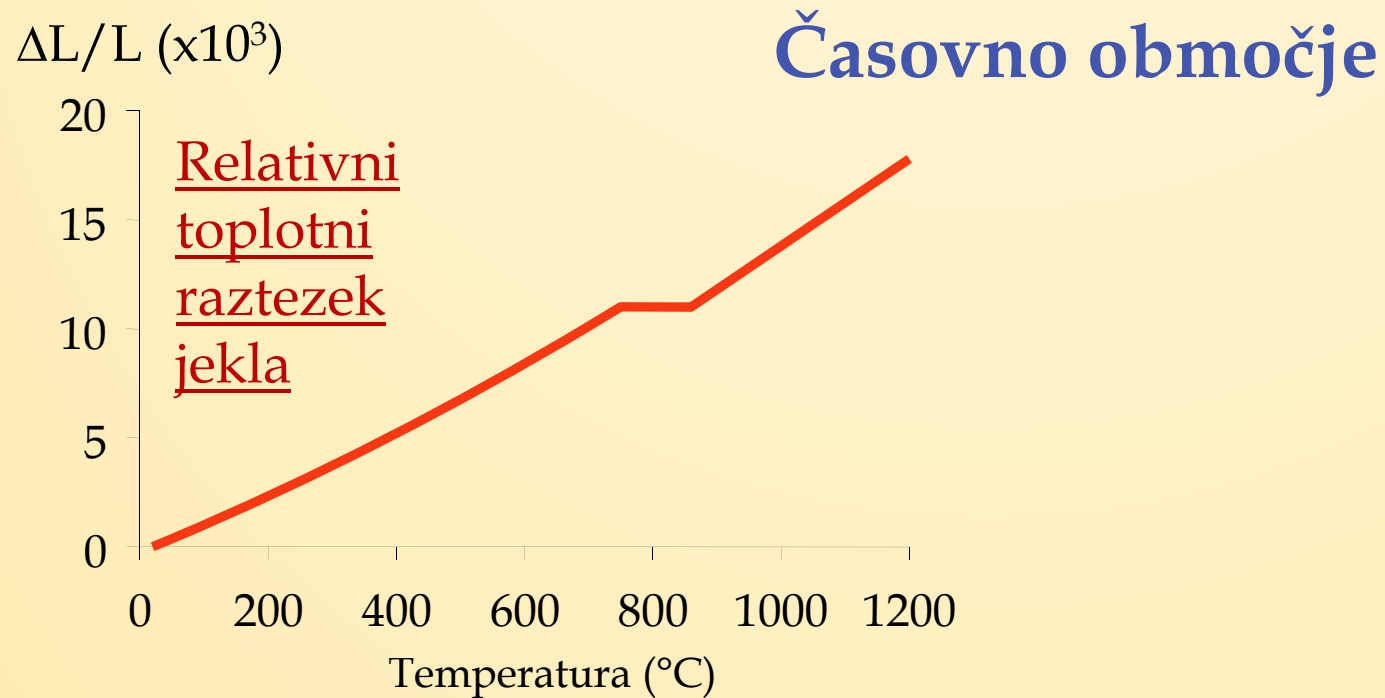


- ◆ Napetostno-deformacijska zveza jekla je nelinearna (elasto-plastičen diagram s platojem ter padajočim delom)
- ◆ Trdnost pri 600°C zmanjšanja za več kot 50%

## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.3. Metoda končnih elementov



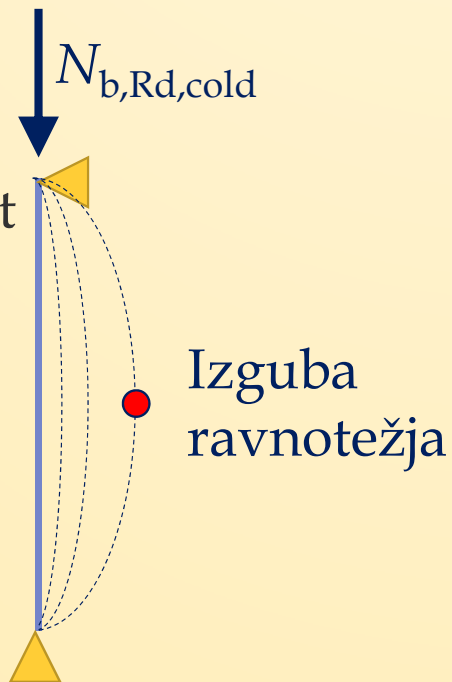
## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.3. Metoda končnih elementov

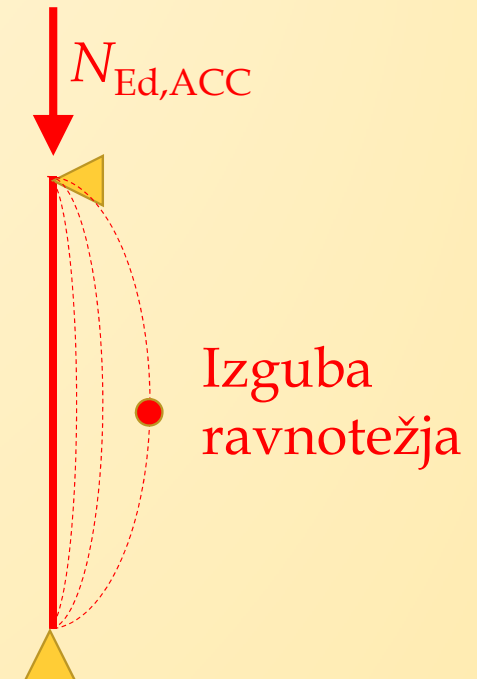
##### Običajno stanje

- Začetna nepopolnost
- Naraščanje obtežbe do porušitve



##### Požarno stanje

- Začetna nepopolnost
- Začetna obtežba
- Naraščanje temperature do porušitve

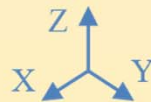
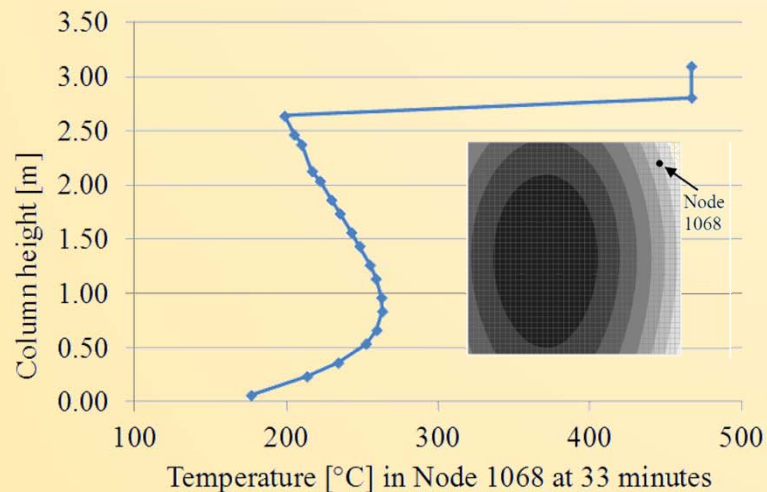


## 6. Določitev požarne odpornosti

### 6.4. Mehanska analiza

#### 6.4.3. Metoda končnih elementov

#### Časovno območje



Levo : Razporeditev temperature v vozlišču (Node) 1068 pri času 33 minut vzdolž 3.36 [m] visokega stebra s kvadratnim prečnim prerezom 130[mm]x130[mm] obdanim s 3 avtomobili in 1 kombiniranim vozilom

Desno : Deformirana oblika pri porušitvi (faktor povečave 1) 3.36 [m] visokega stebra s kvadratnim prečnim prerezom 130[mm]x130[mm] obdanim s 3 avtomobili in 1 kombiniranim vozilom