

*Požarna odpornost jeklenih elementov skladno s  
SIST EN 1993-1-2*

avtor:  
Tomaž Hozjan

---

**KAZALO VSEBINE:**

<b>1 UVOD</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Postopki projektiranja požarnovarnih konstrukcij</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1 Metode dokazovanja</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2 Kombinacija vplivov</b> .....	<b>7</b>
<b>2.3 Projektne vrednosti lastnosti materialov</b> .....	<b>7</b>
2.3.1 Mehanske lastnosti .....	7
2.3.2 Toplotne lastnosti .....	7
<b>3 Poenostavljene računske metode</b> .....	<b>8</b>
<b>3.1 Požarni scenarij</b> .....	<b>8</b>
3.1.1 Standardna krivulja temperatura-čas (nominalna) .....	8
3.1.2 Požarna krivulja zunanjega požara (nominalna) .....	9
3.1.3 Ogljikovodikova krivulja (nominalna) .....	9
3.1.4 Parametrična krivulja (modelirana) .....	9
<b>3.2 Temperaturna analiza</b> .....	<b>12</b>
<b>3.3 Razvoj temperatur v jeklenih elementih po SIST EN 1993-1-2:2005</b> .....	<b>14</b>
3.3.1 Nezaščiteni jekleni elementi .....	14
3.3.2 Zaščiteni jekleni elementi .....	16
3.3.3 Primeri .....	18
3.3.3.1 H-prerez izpostavljen standardnemu požaru ISO 834 iz štirih strani .....	18
3.3.3.2 H-prerez izpostavljen požaru ISO 834 iz treh strani .....	18
3.3.3.3 Zaščiten H-prerez izpostavljen standardnemu požaru ISO 834 iz štirih strani .....	19
3.3.3.4 Zaščiten H-prerez izpostavljen standardnemu požaru ISO 834 iz treh strani .....	20
3.3.4 Toplotne lastnosti konstrukcijskega jekla skladno s SIST EN 1993-1-2:2005 .....	21
<b>3.4 Mehanska analiza (Določitev požarne odpornosti po poenostavljenem postopku)</b> .....	<b>22</b>
3.4.1 Določitev $E_{fi,d}$ .....	22
3.4.2 Določitev $R_{fi,d}$ .....	23
3.4.3 Nosilnost elementov po SIST EN 1993-1-2:2005 .....	23
3.4.3.1 Razvrstitev prečnih prereзов .....	23
3.4.3.2 Natezni elementi .....	24
3.4.3.3 Tlačni elementi s prečnimi prerezi v 1., 2. ali 3. razredu kompaktnosti .....	25
3.4.3.4 Nosilci s prečnim prerezom v 1., 2. in 3. razredu kompaktnosti .....	26
3.4.3.4.1 Upogibna nosilnost .....	26
3.4.3.4.1.1 Konstanten razpored temperature po prečnem prerezu .....	26
3.4.3.4.1.2 Neenakomeren razpored temperature po prečnem prerezu .....	27
3.4.3.4.2 Strižna nosilnost .....	28
3.4.3.4.3 Nosilnost v primeru bočne zvrnitve .....	28
3.4.3.5 Elementi s prečnimi prerezi v 1., 2., ali 3. razredu kompaktnosti, sočasno obremenjeni z upogibnim momentom in s tlačno osno silo .....	29
3.4.3.6 Elementi s prečnimi prerezi v 4. razredu kompaktnosti .....	30
3.4.4 Kritična temperatura .....	31
3.4.5 Mehanske lastnosti konstrukcijskega jekla pri povišanih temperaturah .....	32
3.4.6 Primeri .....	33
3.4.6.1 Element v nategu .....	33
3.4.6.2 Steber izpostavljen požaru ISO 834 in centrični tlačni osni sil .....	35
3.4.6.3 Upogni nosilec HEA 220 izpostavljen bočni zvrnitvi .....	38
<b>4 ZAKLJUČEK</b> .....	<b>41</b>
<b>5 LITERATURA</b> .....	<b>42</b>
<b>PRILOGA I – Temperature v nezaščitenih in zaščitenih jeklenih prerezih</b> .....	<b>44</b>

**PRILOGA II – Vrednosti redukcijskih faktorjev .....49**

## 1 UVOD

Požarna varnost gradbenih konstrukcij predstavlja pomemben del njihove varnosti. Z naraščanjem temperatur v konstrukcijah med požarom se njihova nosilnost zmanjšuje, deformabilnost pa povečuje. Z ustreznim projektiranjem požarne odpornosti konstrukcij zagotavljamo ustrezno varnost le teh med požarom.

Požarno odpornost konstrukcij določimo oziroma ocenimo s preizkusi ali s pomočjo računskih metod. Eksperimentalno ocenjevanje požarne odpornosti gradbenih konstrukcij poteka v požarnih laboratorijih, izjemoma pa tudi na objektu. V teh primerih moramo iz eksperimentalnih rezultatov na relativno maloštevilnih vzorcih sklepati na požarno odpornost gradbenih konstrukcij v celoti, kar pa je dokaj nezanesljivo. Splošnejši način je ocena požarne odpornosti konstrukcij s pomočjo ustreznih matematičnih modelov oziroma računskih metod. Z razvojem računalnikov postajajo te metode (požarne analize) vse bolj natančne in zanesljive, a hkrati tudi vse bolj zahtevne. S požarnimi analizami običajnih gradbenih konstrukcij obravnavamo kemijske, vlažnostne, toplotne in mehanske procese v konstrukcijah med požarom najpogosteje ločeno, kar pomeni, da časovno razporeditev temperatur gradbenih konstrukcij med požarom določimo s temperaturno analizo, ki je le posredno odvisna od preostalih kemijskih in fizikalnih procesov v konstrukcij med požarom. Taka stopenjska oziroma postopna požarna analiza je pri standardnih gradbenih materialih fizikalno upravičena, saj med požarom delo zunanjih sil prispeva bistveno manj k povečanju notranje energije konstrukcije kot dovedena toplota [Bažant, 1996]. Kljub relativno veliki poenostavitvi pa so take požarne analize, ki jih Evropski standardi Evrokod imenujejo napredne računske metode, še vedno matematično zelo zahtevne in jih pri projektiranju požarne odpornosti gradbenih konstrukcij uporabljamo le izjemoma. Pogosteje uporabljamo poenostavljene računske metode, ki pa so namenjene le približni oceni požarne odpornosti enostavnih konstrukcijskih elementov kot so to nosilci in stebri. Takšne metode zasledimo v strokovni literaturi in v številnih tehničnih predpisih, tudi Evrokodih. Vse te metode se razlikujejo predvsem v optimiziranju razmerja med natančnostjo metode in njihovo preprostostjo.

V tem prispevku podrobneje predstavimo poenostavljene računske metode za oceno požarne odpornosti enostavnih jeklenih konstrukcijskih elementov, kot jih predpisujejo standardi Evrokod.

## 2 POSTOPKI PROJEKTIRANJA POŽARNOVARNIH KONSTRUKCIJ

### 2.1 Metode dokazovanja

Študija za dokaz požarne varnosti konstrukcije oziroma njenega dela je osnovana na uporabi računskega modela konstrukcijskega sistema, ki mora skladno s standardom SIST EN 1993-1-2:2005 odražati pričakovano obnašanje konstrukcije oziroma njenega dela med požarom. Pri tem je potrebno dokazati, da v celotnem času  $t$  izpostavljenosti konstrukcije oziroma njenega dela požaru velja:

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d}, \quad (1)$$

kjer je  $E_{fi,d}$  projektna vrednost notranjih sil pri požarnem projektnejem stanju, določena v skladu z EN 1991-1-2 in ob upoštevanju vplivov toplotnih raztezkov in deformacij. Učinek vplivov v požarnem projektnejem stanju,  $R_{fi,d}$  pa pripadajoča projektna odpornost v požarnem projektnejem stanju. Požarna odpornost elementa gradbene konstrukcije je sposobnost, da določen čas izpolnjuje zahteve glede stabilnosti (nosilnosti), celovitosti in/ali toplotne izolativnosti.

Zahtevo (1) lahko zapišemo tudi v časovnem območju:

$$t_{d,fi} \geq t_{fi,req}, \quad (2)$$

kjer je  $t_{d,fi}$  projektna vrednost požarne odpornosti,  $t_{fi,req}$  pa zahtevan čas požarne odpornosti.

Standard SIST EN 1993-1-2:2005 omogoča dokazovanje požarne varnosti konstrukcije tudi v temperaturnem območju. Pri tem je potrebno preveriti, da je temperatura konstrukcije  $\theta_{struct}$  pri zahtevanem času požarne odpornosti  $t_{fi,req}$  manjša od kritične temperature  $\theta_{a,cr}$ . To je tista temperatura pri kateri pride do porušitve. V temperaturnem območju enačbo (1) zapišemo kot:

$$\theta_{struct} \leq \theta_{a,cr} \quad \text{pri} \quad t = t_{fi,req} \quad (3)$$

O kriteriju nosilnosti v temperaturnem območju in o njegovi uporabi bomo več povedali v nadaljevanju.

Za zadostitev zahteve (1), (2) in (3) so v standardih Evrokod dovoljene naslednje metode projektiranja:

- **detajliranje** v skladu s priznanimi projektnimi rešitvami (s tabeliranimi podatki oziroma s preizkušanjem),
- **poenostavljene računske metode** za določene vrste konstrukcijskih elementov in
- **napredne računske metode** za simulacijo mehanskega obnašanja konstrukcijskih elementov, delov konstrukcij ali celotnih konstrukcij med požarom. Napredne računske metode morajo omogočiti realno oceno obnašanja konstrukcije med požarom. Takšna ocena pa je mogoča samo v primeru, če ti modeli vsebujejo vse bistvene fizikalne in kemijske procese obnašanja konstrukcije in njenih sestavnih delov med požarom.

## 2.2 Kombinacija vplivov

Kombinirani učinek zunanjih vplivov v požarnem projektne stanju  $E_{fi,d}$  formalno zapišemo v skladu s standardom SIST EN 1990: 2004 z enačbo:

$$\sum_j G_{k,j} + A_d + \psi_{2,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}, \quad (4)$$

kjer predstavljajo  $G_{k,j}$  stalne vplive,  $A_d$  vpliv požara,  $Q_{k,1}$  predstavlja prevladujoči spremenljivi vpliv in  $Q_{k,i}$  ( $i > 1$ ) predstavlja druge spremenljive vplive zunanjih obtežb. Vrednosti faktorja za navidezno stalno vrednost spremenljivega vpliva  $\psi_2$  so za vplive v stavbah podani v standardu SIST EN 1990: 2004 v obliki preglednice. Tako je za bivalne površine (kategorija uporabe A) in pisarne (kategorija B) faktor  $\psi_2$  enak 0.3.

## 2.3 Projektne vrednosti lastnosti materialov

### 2.3.1 Mehanske lastnosti

Projektne vrednosti mehanskih (trdnostnih in deformacijskih) lastnosti materiala izračunamo na naslednji način:

$$X_{d,fi} = k_0 \cdot \frac{X_k}{\gamma_{M,fi}}, \quad (5)$$

kjer je  $k_0$  redukcijski faktor trdnosti,  $X_k$  je karakteristična vrednost mehanske lastnosti materiala za projektiranje pri običajni temperaturi,  $\gamma_{M,fi}$  pa je delni varnostni faktor za ustrezno lastnost materiala v požarnem projektne stanju. Skladno s SIST EN 1993-1-2:2005 je  $\gamma_{m,fi}$  za mehanske lastnosti jekla enak 1.

### 2.3.2 Toplotne lastnosti

Projektne vrednosti toplotnih lastnosti materiala izračunamo na naslednji način:

$$X_{d,fi} = \frac{X_{k,0}}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{oziroma} \quad X_{d,fi} = \gamma_{M,fi} \cdot X_{k,0}. \quad (6)$$

Pri tem enačbo (6) uporabimo glede na ugoden oziroma neugoden vpliv povečanja lastnosti na varnost. V enačbi (6) je  $X_{k,0}$  vrednost toplotne lastnosti materiala v požarnem projektne stanju, ki je v splošnem odvisna od temperature,  $\gamma_{m,fi}$  pa je delni varnostni faktor za ustrezno lastnost materiala v požarnem projektne stanju. Skladno s SIST EN 1993-1-2:2005 je  $\gamma_{m,fi}$  za toplotne lastnosti jekla enak 1.

### 3 POENOSTAVLJENE RAČUNSKE METODE

Kot smo že v uvodu omenili, so poenostavljene računske metode projektiranja, ki so namenjene le približni oceni požarne odpornosti enostavnih konstrukcijskih elementov gradbenih konstrukcij, razdeljene v dva nepovezana dela. To sta:

- **temperaturna analiza:** pri temperaturni analizi glede na toplotni vpliv določimo časovno razporeditev temperatur obravnavanega konstrukcijskega elementa (v nadaljevanju nosilca),
- **mehanska analiza:** v mehanski analizi preverjamo požarno varnost nosilca skladno z zahtevo (1), (2) in (3). Pri tem lahko uporabimo poenostavljene metode, ki jih podaja standard SIST EN 1993-1-2:2005.

V nadaljevanju podrobneje predstavimo oba dela analize. Pred temperaturno analizo moramo najprej določiti ustrezni požarni scenarij.

#### 3.1 Požarni scenarij

Požarni scenarij predstavlja kvalitativen opis poteka požara s časovno opredeljenimi ključnimi dogodki, ki označujejo požar in ga razlikujejo od drugih možnih požarov. Navadno definira proces vžiga in širjenja (rasti) požara, stopnjo polno razvitega požara ter stopnjo pojecanja požara upoštevajoč lastnosti okolice in sistema zgradbe, ki vplivajo na potek požara.

S spoznanjem, da je potrebno zadovoljivo oceniti obnašanje konstrukcije oziroma njenega dela med požarom in zaradi potrebe po čim večji ekonomičnosti, so bile razvite poenostavljene metode za opisovanje jakosti požara v obliki požarnih krivulj. Te podajajo spreminjanje temperature plinov v okolici površine elementa kot funkcijo časa. Ločimo med:

- **nominalnimi požarnimi krivuljami** (npr. standardna krivulja temperatura-čas, zunanja požarna krivulja, požarna krivulja ogljikovodikov): to so konvencionalne krivulje, ki so prilagojene razvrščanju ali ugotavljanju (potrjevanju) požarne odpornosti in
- **modeliranimi požarnimi krivuljami:** to so poenostavljeni modeli naravnih požarov, ki temeljijo na specifičnih fizikalnih parametrih z omejeno možnostjo uporabe. Parametri, ki določajo pogoje v požarnem sektorju so: površina sektorja, prezračevanje, toplotne lastnosti materiala oboda, gostota požarne obremenitve, hitrost razvoja požara, uporaba različnih aktivnih ukrepov gašenja in drugi.

Poznamo tudi točnejše požarne modele. Ti temeljijo na osnovi ohranjanja mase in energije. V nadaljevanju predstavimo značilne požarne krivulje za stavbe.

##### 3.1.1 Standardna krivulja temperatura-čas (nominalna)

Standardna krivulja temperatura-čas predstavlja model polno razvitega požara v sektorju v primeru celuloznega tipa požarne obtežbe in je:

$$T_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad (7)$$

kjer je  $T_g$  temperatura plinov v okolici elementa v °C,  $t$  pa je čas v minutah.



### 3.1.2 Požarna krivulja zunanjega požara (nominalna)

Zunanja požarna krivulja predstavlja model požara za zunanji del ločilnih zunanjih sten, ki so lahko izpostavljene požaru iz različnih delov fasade in je:

$$T_g = 660 \left( 1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t} \right) + 20. \quad (8)$$

### 3.1.3 Ogljikovodikova krivulja (nominalna)

Ogljikovodikova krivulja temperatura-čas predstavlja model polno razvitega požara v sektorju v primeru gorenja ogljikovodikov in je:

$$T_g = 1080 \left( 1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t} \right) + 20. \quad (9)$$

### 3.1.4 Parametrična krivulja (modelirana)

Parametrična krivulja kot poenostavljen model naravnega požara predstavlja temperaturo plinov v sektorju, ki jo določimo na podlagi fizikalnih parametrov. Veljavna je za požarne sektorje talne površine do 500 m<sup>2</sup> brez odprtih v stropu in z maksimalno višino sektorja 4 m. Predpostavljeno je, da požarna obremenitev sektorja v celoti zgori. Krivulja temperatura-čas v fazi segrevanja je podana z enačbo:

$$T_g = 20 + 1325 \left( 1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*} \right), \quad (10)$$

$$t^* = t \cdot \Gamma, \quad (11)$$

kjer je  $T_g$  temperatura plinov v požarnem sektorju v °C,  $\Gamma$  je brezdimenzijski parameter,  $t$  pa je čas v urah.

Parameter  $\Gamma$  se izračuna z enačbo:

$$\Gamma = [O/b]^2 / (0.04/1160)^2, \quad (12)$$

kjer je  $O$  faktor odprtih v m<sup>1/2</sup>,  $b$  pa upošteva toplotne lastnosti oboda. Izračunata se z enačbama:

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t; \quad 0.02 \leq O \leq 0.2 \text{ m}^{1/2}, \quad (13)$$

$$b = \sqrt{\rho c \lambda}; \quad 100 \leq b \leq 2000 \text{ J} / (\text{m}^2 \text{ s}^{1/2} \text{ K}). \quad (14)$$

Pri tem je  $A_v$  celotna površina vertikalnih odprtih v vseh stenah v m<sup>2</sup>,  $h_{eq}$  je uteženo povprečje višin oken v vseh stenah v metrih,  $A_t$  je celotna površina oboda v m<sup>2</sup>, t.j. sten, stropov in tal vključno z odprtinami,  $\rho$  je gostota ločilnega oboda v kg/m<sup>3</sup>,  $c$  je specifična toplota v J/kgK,  $\lambda$  pa je toplotna prevodnost oboda v W/mK.

V fazi segrevanja nastopi najvišja temperatura plina  $T_{max}$  pri času  $t^* = t^*_{max}$ . Čas  $t^*_{max}$  izračunamo z enačbo:

$$t^*_{max} = t_{max} \cdot \Gamma = \max \left\{ \frac{0.0002 \cdot q_{t,d}}{O} \right\} \cdot \Gamma, \quad (15)$$

kjer je  $q_{t,d}$  projektna vrednost gostote požarne obremenitve v  $\text{MJ}/\text{m}^2$ ,  $t_{\text{lim}}$  pa čas v urah, ki je odvisen od hitrosti razvoja požara. Določata ju naslednji enačbi:

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f / A_t; \quad 50 \leq q_{t,d} \leq 1000 \text{ MJ}/\text{m}^2, \quad (16)$$

$$t_{\text{lim}} = \begin{cases} 25 \text{ min za počasi razvijajoči požar,} \\ 20 \text{ min za razvoj požara srednje hitrosti,} \\ 15 \text{ min za hitro razvijajoči požar,} \end{cases} \quad (17)$$

kjer je  $A_f$  površina tal sektorja v  $\text{m}^2$ . Kadar je  $t_{\text{max}} = t_{\text{lim}}$  se čas  $t^*$  v enačbi (10) nadomesti z:

$$t^* = t \cdot \Gamma_{\text{lim}}, \quad (18)$$

$$\Gamma_{\text{lim}} = [O_{\text{lim}} / b]^2 / (0.04 / 1160)^2, \quad (19)$$

$$O_{\text{lim}} = 0.0002 \cdot q_{t,d} / t_{\text{lim}}. \quad (20)$$

Parameter  $q_{f,d}$  v enačbi (16) je projektna vrednost gostote požarne obremenitve in se izračuna z enačbo:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n. \quad (21)$$

Pomen oznak v enačbi (21) je sledeč:  $m$  je faktor izgorevanja in za pretežno celulozne materiale lahko predpostavimo  $m = 0.8$ ,  $\delta_{q1}$  je faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na velikost sektorja (preglednica 1),  $\delta_{q2}$  je faktor, ki upošteva nevarnost požara glede na rabo (za pisarne, stanovanja, hotele in papirno industrijo je  $\delta_{q2} = 1.0$ ),  $\delta_n$  je faktor, ki upošteva uporabo različnih aktivnih ukrepov gašenja (pršilci, detektorji, avtomatski prenos alarma, gasilci in drugi),  $q_{f,k}$  pa je karakteristična gostota požarne obtežbe na enoto ploščine tal v  $\text{MJ}/\text{m}^2$  (glej preglednico 2).

Preglednica 1: Faktor nevarnosti nastanka požara  $\delta_{q1}$

Talna površina sektorja $A_f$ [ $\text{m}^2$ ]	$\delta_{q1}$
25	1.1
250	1.5
2500	1.9

Preglednica 2: Karakteristična gostota požarne obtežbe  $q_{f,k}$  v  $\text{MJ}/\text{m}^2$

raba	Povprečje	80% kvantil
Stanovanje	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
----------------------------	-----	-----

Krivulja temperatura-čas za fazo ohlajanja je podana z enačbo:

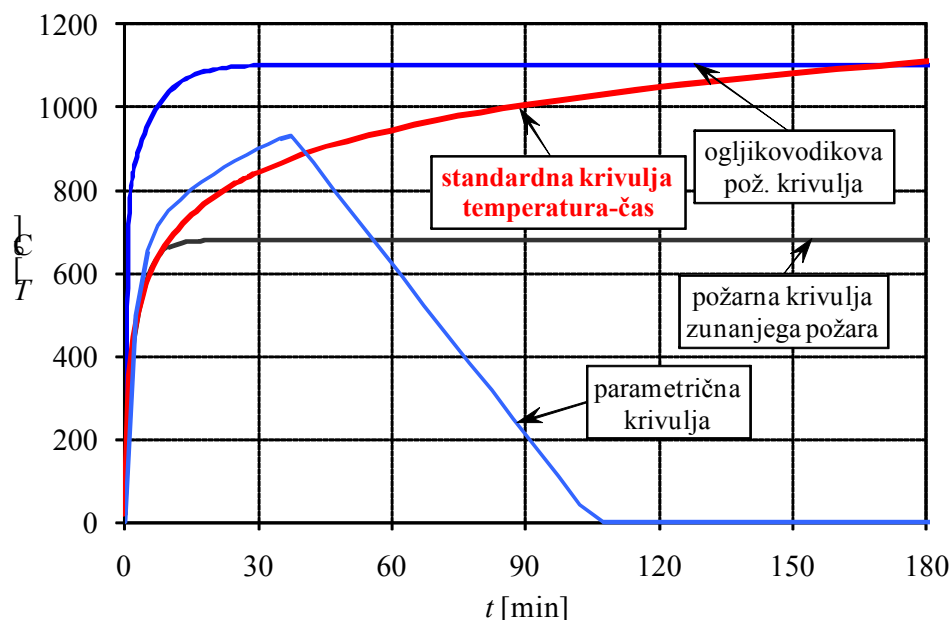
$$T_g = \begin{cases} T_{\max} - 625 \cdot (t^* - t_{\max}^* \cdot x) & \text{za } t_{\max}^* \leq 0.5, \\ T_{\max} - 250 \cdot (3 - t_{\max}^*) \cdot (t^* - t_{\max}^* \cdot x) & \text{za } 0.5 \leq t_{\max}^* \leq 2, \\ T_{\max} - 250 \cdot (t^* - t_{\max}^* \cdot x) & \text{za } t_{\max}^* \geq 2. \end{cases} \quad (22)$$

Pri tem je:

$$t_{\max}^* = 0.0002 \cdot q_{t,d} / O \cdot \Gamma, \quad (23)$$

$$x = \begin{cases} 1 & \text{za } t_{\max} > t_{\lim}, \\ t_{\lim} \cdot \Gamma_{\lim} / t_{\max}^* & \text{za } t_{\max} = t_{\lim}. \end{cases} \quad (24)$$

Na sliki 1 prikazujemo požarne krivulje še v grafični obliki.



Slika 1: Požarne krivulje v skladu s SIST EN 1991-1-2:2002

Kadar projektiranje elementov temelji na tabeliranih podatkih ali drugih poenostavljenih postopkih v povezavi s standardno izpostavljenostjo požaru, lahko vpliv parametrične požarne krivulje prevedemo v enakovreden čas izpostavljenosti standardnemu požaru in sicer z izrazom:

$$t_{e,d} = (q_{f,d} \cdot k_b \cdot w_f) k_c, \quad (25)$$

kjer je  $k_b$  faktor pretvorbe skladno s preglednico 3,  $w_f$  je faktor prezračevanja in se izračuna z enačbo (24),  $k_c$  pa je korekcijski faktor za material nosilnega prečnega prereza in je za armiran beton enak 1. Pri tem je potrebno dokazati, da velja:

$$t_{e,d} < t_{d,fi}. \quad (26)$$

Pri tem je  $t_{d,fi}$  projektna vrednost standardne požarne odpornosti (glej tudi enačbo (2)).

Preglednica 3: Faktor pretvorbe  $k_b$ 

Toplotne lastnosti oboda $b$ [ $\text{J}/(\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K})$ ]	$k_b$ [ $\text{min}\cdot\text{m}^2/\text{MJ}$ ]
$b > 2500$	0.04
$720 \leq b \leq 2500$	0.055
$b < 720$	0.07

Faktor prezračevanja izračunamo z enačbo:

$$w_f = (6/H)^{0.3} \left[ 0.62 + 90 \cdot (0.4 - \alpha_v)^4 / (1 + b_v \alpha_h) \right] \geq 0.5, \quad (27)$$

kjer je  $H$  višina požarnega sektorja v metrih, ostale parametre pa izračunamo z izrazi:

$$\alpha_v = A_v / A_f; \quad 0.025 \leq \alpha_v \leq 0.25, \quad (28)$$

$$\alpha_h = A_h / A_f, \quad (29)$$

$$b_v = 12.5 \cdot (1 + 10 \cdot \alpha_v - \alpha_v^2) \geq 10. \quad (30)$$

$A_v$  je ploščina navpičnih odprtih stenah sektorja,  $A_h$  je ploščina vodoravnih odprtih strehi,  $A_f$  pa je ploščina tal sektorja.

### 3.2 Temperaturna analiza

V splošnem moramo za določitev časovnega spreminjanja temperatur nosilcev med požarom upoštevati vse tri načine prenosa toplote:

- i) sevanje oziroma radiacijo, pri katerem se energija prenaša z elektromagnetnim valovanjem,
- ii) konvekcijo, pri kateri se energija prenaša z gibanjem snovi z različnimi temperaturami in
- iii) prevajanje ali kondukcijo, pri katerem potuje energija v obliki toplote skozi snov z mest z višjo temperaturo na mesta z nižjo.

Pri običajnih gradbenih konstrukcijah iz betona, jekla ali lesa se seveda med požarom največ toplote po konstrukciji prenaša s kondukcijo. To opišemo s parcialno diferencialno enačbo za prevajanje toplote, znane kot Fourierjeva parcialna diferencialna enačba za prenos toplote po trdni snovi:

$$V: \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (i, j = 1, 2, 3). \quad (31)$$

V enačbi (31) s  $T$  označujemo temperaturo posamezne točke elementa konstrukcije pri času  $t$ ,  $\lambda_{ij}$  so komponente prevodnostnega tenzorja snovi (v primeru izotropnega in homogenega materiala je  $\lambda_{ij} = \lambda$ ),  $Q$  je specifični prostorninski toplotni tok,  $\rho$  je gostota snovi,  $c$  pa specifična toplota snovi.

Prehod toplote skozi zunanje površine nosilca zaradi konvekcije in radiacije v požarnem prostoru pa upoštevamo z ustreznimi robnimi pogoji. Ti so:

$$S_T : T_s - T_m = 0, \quad (32)$$

$$S_q : \lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_i} n_i - q_s = 0, \quad (33)$$

$$V : T(x_i, 0) = T_0(x_i). \quad (34)$$

Z  $V$  označimo območje prostora, ki ga zavzema obravnavan element,  $S_T$  je mejna ploskev elementa, na kateri je s temperaturnim režimom okolja predpisano spreminjanje temperature  $T_s$ ,  $S_q$  je mejna ploskev elementa, na kateri je predpisan specifični površinski toplotni pretok  $q_s$  (povzročajo ga zunanji vplivi, npr. požar),  $n_i$  so komponente enotskega vektorja normale na mejno ploskev elementa,  $T_0$  pa je začetna temperatura v poljubni točki obravnavanega območja. Specifični površinski toplotni pretok  $q_s$  je sestavljen iz deleža  $q_c$ , ki ga prispeva izmenjava toplote med telesom in okolico s konvekcijo, ter iz deleža  $q_r$ , ki je posledica radiacije. Pozitiven je takrat, kadar toplota priteka v telo. Omenimo še, da so toplotni vplivi skladno s standardom SIST EN 1991-1-2:2005 navedeni z neto toplotnim tokom, ki ga standard označuje kot  $\dot{h}_{net}$ . Gre za isti pojem, ki smo ga mi v enačbi (33) označili z  $q_s$ . Zaradi skladnosti s standardom SIST EN 1991-1-2:2005 v nadaljevanju uporabljamo oznako  $\dot{h}_{net}$ . Na površini izpostavljeni ognju, je potrebno toplotni tok  $\dot{h}_{net}$  določiti ob upoštevanju prenosa zaradi konvekcije ter sevanja:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (35)$$

Toplotni pretok zaradi konvekcije  $\dot{h}_{net,c}$  je sorazmeren temperaturni razliki okolice in površine in ga zapišemo z izrazom:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (T_A - T_m) \quad (36)$$

kjer  $\alpha_c$  označuje prestopni koeficient. Skladno s SIST EN 1991-1-2:2005 je prestopni koeficient odvisen od krivulje temperatura-čas. Odvisnost prikazujemo v preglednici

Preglednica 4: Prestopni koeficient  $\alpha_c$

Krivulja temperatura-čas	$\alpha_c$ [W/(m <sup>2</sup> K)]
Standardna	25
Krivulja zunanjega požara	25
Ogljikovodikova	50
Modeli naravnih požarov	35

Toplotni pretok zaradi sevanja pa je določen z izrazom:

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot B \cdot [(T_r + 273)^4 - (T_m + 273)^4], \quad (37)$$

kjer je  $\Phi$  faktor oblike,  $\varepsilon_m$  je emisivnost površine elementa,  $\varepsilon_f$  je emisivnost plamenskega telesa,  $B$  je Stefan-Boltzmanova konstanta,  $T_r$  je efektivna temperatura sevanja požara,  $T_m$  pa površinska temperatura elementa. Skladno s SIST EN 1992-1-2:2005 je privzeti faktor oblike

$\Phi = 1$ , ob upoštevanju učinkov lokacije in senčenja pa lahko upoštevamo tudi nižje vrednosti faktorja oblike.

Analitično rešitev osnovne enačbe nestacionarnega prostorskega prevajanja toplote s pripadajočimi robnimi in začetnimi pogoji (enačbe (31)–(34)) poznamo le za najenostavnejše enodimenzionalne ali dvodimenzionalne probleme. V splošnem pa sistem rešimo z uporabo numeričnih metod in sicer z metodo končnih elementov, z diferenčno metodo ali pa z empiričnimi formulami, ki so na voljo v literaturi.

Pri določanju temperatur nosilca med požarom ne naredimo velike napake, če predpostavimo, da je temperatura celotnega požarnega prostora ali pa vsaj dela na območju vzdolž nosilca enakomerna, kar bistveno poenostavi temperaturno analizo. V tem primeru izračunamo časovno razporeditev temperatur med požarom le v karakterističnem prečnem prerezu nosilca, saj se temperatura vzdolž nosilca ne spreminja.

### 3.3 Razvoj temperatur v jeklenih elementih po SIST EN 1993-1-2:2005

Ob predpostavki, da je potek temperature po jeklenem prerezu enakomeren, podaja standard SIST EN 1993-1-2:2005 poenostavljen postopek za račun razvoja temperature jeklenih elementov za primer nezaščitenih ter zaščitenih jeklenih elementov

#### 3.3.1 Nezaščiteni jekleni elementi.

V nezaščitenih jeklenih elementih prirastek temperature  $\Delta\theta_{a,t}$  v časovnem intervalu  $\Delta t$  določimo z naslednjo enačbo:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m / V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t \quad (38)$$

kjer je:

$k_{sh}$  korekcijski faktor za vplive zasenčenja,

$A_m / V$  faktor prereza za nezaščiten jekleni element [ $\text{m}^{-1}$ ],

$A_m$  površina elementa na enoto dolžine [ $\text{m}^2/\text{m}$ ],

$V$  volumen elementa na enoto dolžine [ $\text{m}^3/\text{m}$ ],

$c_a$  specifična toplota jekla [ $\text{J}/\text{kgK}$ ],

$\rho_a$  gostota jekla [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$\dot{h}_{net}$  projektna vrednost neto toplotnega toka,

$\Delta t$  časovni interval [s].

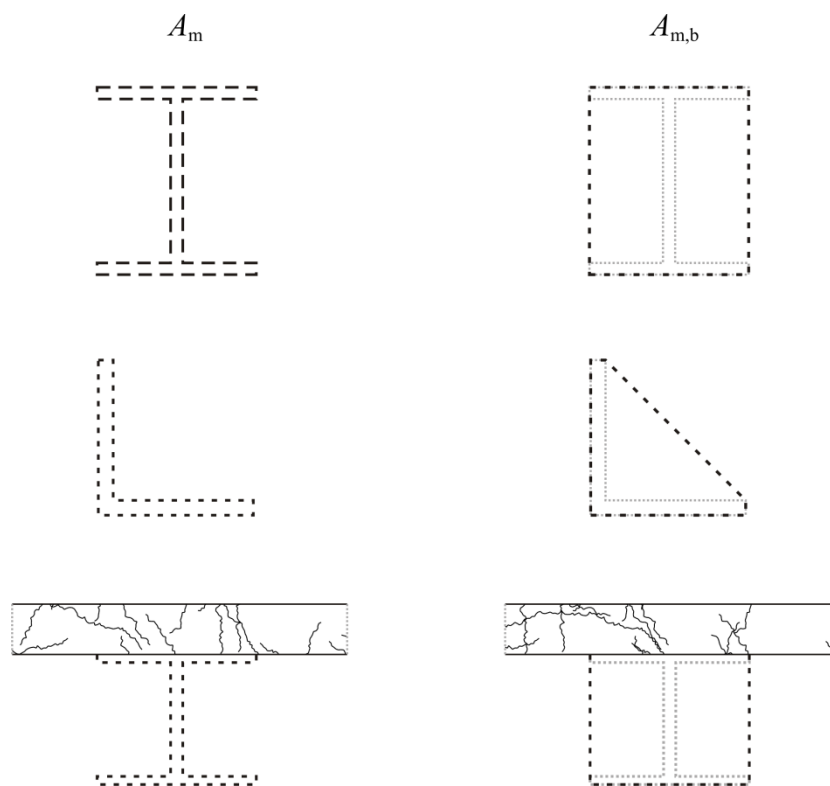
Za I- prereze korekcijski faktor za vplive zasenčenja pod vplivom standardnega požara, kot je ISO 834 določimo kot:

$$k_{sh} = 0.9[A_m/V]_b/[A_m/V] \quad (39)$$

kjer je  $[A_m/V]_b$  faktor prereza za namišljeno škatlo, ki objema I-prerez. Za preostale prečne prereze korekcijski faktor izračunamo na naslednji način:

$$k_{sh} = [A_m/V]_b/[A_m/V]. \quad (40)$$

Na sliki 2 je prikazana razlika med faktorjem prereza in faktorjem prereza za namišljeno škatlo. Za prečne prereze z izbočeno obliko (pravokotni ali okrogli votli prerezi), ki so z vseh strani izpostavljeni požaru je korekcijski faktor enak 1. V primeru da korekcijski faktor ne upoštevamo ( $k_{sh} = 1$ ) vodi to h konservativnim rezultatom.



Slika 2: Površina prereza  $A_m$  in površina namišljene škatle  $A_{m,b}$ .

Projektno vrednost neto toplotnega toka  $\dot{h}_{net}$  določimo v skladu s standardom SIST EN 1991-1-2:2005 in je opisan v razdelku temperaturna analiza z enačbo (35). Pri tem upoštevamo, da je emisivnost plamenskega telesa  $\varepsilon_f = 1$  in emisivnost jeklenih površin enaka 0.7 za ogljikovo jeklo ter 0.4 za nerjavno jeklo.

V enačbi (38) je parameter  $A_m/V$  tisti, ki opisuje lastnosti prečnega prereza katerega ogrevamo. Večja kot je vrednost faktorja prereza  $A_m/V$ , tanjši je prerez in posledično se ogreva hitreje. V standardu SIST EN 1993-1-2:2005 (Preglednica 4.2) so podani primeri, kako določiti faktor prereza za nezaščitene jeklene elemente. Faktor  $A_m/V$  ne sme biti manjši od 10.

Ob upoštevanju enačb za korekcijski faktor zaradi vpliva zasenčenja lahko enačbo (38) zapišemo v drugačni obliki:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_m^*/V}{c_a\rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t \quad (41)$$

kjer je  $A_m^*/V$  določen na osnovi  $A_m$ ,  $A_{m,b}$  ali  $0.9 A_{m,b}$  odvisno v primeru kateri element ogrevamo. Sedaj lahko s pomočjo enačbe (41) v odvisnosti od faktorja  $A_m^*/V$  izračunamo družino krivulj, ki prikazujejo razvoj temperature jeklenih elementov v odvisnosti od časa. S tem izračunom se izognemo vsakokratnemu reševanju enačbe za račun nezaščitenih jeklenih elementov, ki jo moramo v osnovi rešiti iterativno. Pri tem velikost časovnega intervala  $\Delta t$  ne sme biti večji od 5. sekund.

V prilogi I-1 so narisane krivulje razvoja temperatur nezaščitenih jeklenih elementov za različne faktorje  $A_m^*/V$ . Poleg grafičnega prikaza je v preglednici I-1 podan razvoj temperatur nezaščitenih jeklenih elementov tudi v tabelarni obliki.

### 3.3.2 Zaščiteni jekleni elementi

V zaščitenih jeklenih elementih prirastek temperature  $\Delta\theta_{a,t}$  v časovnem intervalu  $\Delta t$  določimo z naslednjo enačbo:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{1 + \phi/3} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t}, \quad (42)$$

kjer s  $\phi$  označimo izraz:

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V,$$

Pri tem je:

- $A_p / V$  faktor prereza zaščitenega jeklenega elementa [ $\text{m}^{-1}$ ],
- $A_p$  ustrezna površina materiala požarne zaščite elementa na enoto dolžine elementa [ $\text{m}^2/\text{m}$ ],
- $V$  volumen elementa na enoto dolžine [ $\text{m}^3/\text{m}$ ],
- $c_a$  specifična toplota jekla [ $\text{J}/\text{kgK}$ ],
- $c_p$  specifična toplota materiala za požarno zaščito [ $\text{J}/\text{kgK}$ ],
- $d_p$  debelina materiala za požarno zaščito,
- $\Delta t$  časovni interval [s],
- $\theta_{a,t}$  temperatura jekla v času  $t$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],



- $\theta_{g,t}$  temperatura plinov v požarnem sektorju v času  $t$  [°C],
- $\Delta\theta_{g,t}$  povečanje temperature plinov v požarnem sektorju v časovnem intervalu  $\Delta t$  [K],
- $\lambda_p$  toplotna prevodnost sistema požarne zaščite [W/mK],
- $\rho_a$  gostota jekla [kg/m<sup>3</sup>],
- $\rho_p$  gostota materiala požarne zaščite.

Časovni interval v enačbi (42) ne sme biti večji od 30 sekund. Za površino  $A_p$  je potrebno vzeti površino notranjega oboda izolacije. Za nekatere primere standard SIST EN 1993-1-2:2005 (preglednica 4.3) podaja izraze za izračun faktorja  $A_p / V$  za zaščitene jeklene elemente.

Toplotne lastnosti izolativnih materialov v enačbi (42) je potrebno določiti eksperimentalno skladno s standardom ENV 13381-4. Omenimo še, da so tako pridobljene toplotne lastnosti izolativnih materialov direktno uporabne za I in H prereze. Dodatne korekcije so potrebne v primeru, da ta postopek uporabimo za prereze ostalih oblik, kot so U in T ali pravokotne in okrogle votle prereze. V primeru uporabe intumescentnih premazov za votle prereze je potrebno opraviti dodatne teste. Kadar za toplotno zaščito uporabimo vlažne izolacijske materiale se lahko izračun prirastka temperature jekla  $\Delta\theta_{a,t}$  dopolni s časovnim zamikom pri doseženi temperaturi jekla 100 °C. Ta časovni zamik pa je potrebno določiti skladno s standardom ENV 13381-4. Posebno previdnost je potrebno posvetiti določitvi toplotne prevodnosti požarne zaščite. Namreč dokaj hitro lahko to materialno lastnost zamenjamo za tisto, ki jo uporabimo pri analizah pri sobnih temperaturah kot so določitev debeline toplotne zaščite v zgradbah. Tako dobimo v primeru požarne analize rezultate, ki so na nevarni strani, saj ima toplotna prevodnost v večini izolativnih materialov lastnost, da z naraščanjem temperature raste.

Enačbo (42) lahko dodatno poenostavimo, s tem da zanemarimo specifično toploto materiala za požarno zaščito  $c_p$ , s tem je člen  $\phi$ , ki nastopa v enačbi (42) enak 0, in dobimo naslednjo poenostavljeno enačbo:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p}{d_p V} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{c_a \rho_a} \Delta t. \quad (43)$$

Parametre, ki v enačbi (43) opisujejo jeklen prečni prerez in lastnosti materiala za požarno zaščito lahko združimo v en sam parameter

$$k_p = \frac{\lambda_p A_p}{d_p V}. \quad (44)$$

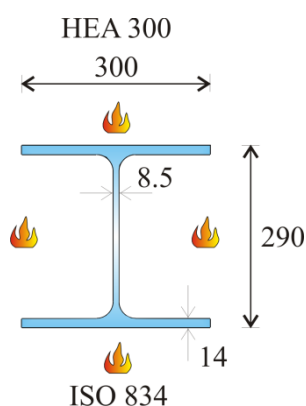
Podobno, kot smo to storili v primeru nezaščitene jeklene elementov, lahko tudi sedaj v odvisnosti od parametra  $k_p$  določimo družino krivulj ki določa razvoj temperatur zaščitene jeklene elementov. V prilogi (preglednica I-2 in slika I-2) so v tabelarni in grafični obliki podani rezultati za različne faktorje  $k_p$  v primeru standardnega požara ISO 834. Prav tako so ti

rezultati določeni ob predpostavki, da je parameter  $k_p$  neodvisen od temperature. Zavedati se moramo, da so tako pridobljeni rezultati za določitev temperatur zaščitnih jeklenih elementov nekoliko na konservativni strani, saj smo zanemarili vpliv specifične toplote zaščite ter vpliv vlage, ki bi se lahko pojavila v zaščitnem materialu.

### 3.3.3 Primeri

#### 3.3.3.1 H-prerez izpostavljen standardnemu požaru ISO 834 iz štirih strani

Določi vrednost efektivnega faktorja masivnosti  $A_m^* / V$  za prerez HEA 300, ki je izpostavljen standardnemu požaru ISO 834 požaru iz vseh štirih strani.



Slika 3: Skica obravnavanega prereza.

Vrednost efektivnega faktorja masivnosti  $A_m^* / V$  za prerez HEA 300 je določen na osnovi faktorja prereza za namišljeno škatlo, ki objema I-prerez. Ker je prerez izpostavljen standardnemu požaru upoštevamo tudi faktor senčenja 0.9 za I-prereze.

$$A_{m,b} = 2(h + b) = 2(0.29 + 0.3) = 1.18 \text{ m}$$

$$V = 113 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ (iz tabel)}$$

$$A_m^* / V = 0.9 \cdot 1.18 / 113 \cdot 10^{-4} = 94 \text{ m}^{-1}$$

Efektivni faktor masivnosti za prerez HEA 300 znaša  $A_m^* / V = 94 \text{ m}^{-1}$ .

#### 3.3.3.2 H-prerez izpostavljen požaru ISO 834 iz treh strani

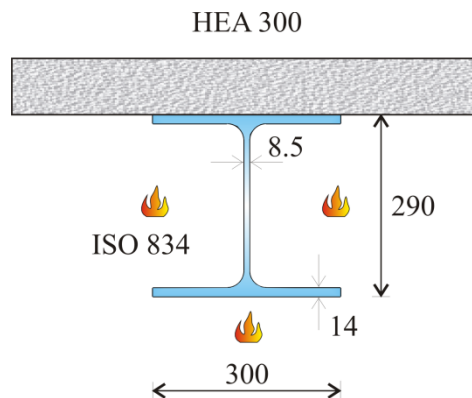
Določi vrednost efektivnega faktorja masivnosti  $A_m^* / V$  v primeru poljubnega požara za prerez HEA 300, ki je izpostavljen standardnemu požaru ISO 834 požaru iz treh strani, na vrhnji strani pa ga obdaja betonska plošča.

Vrednost faktorja efektivnega faktorja masivnosti  $A_m^* / V$  v tem primeru določimo na osnovi faktorja prereza za namišljeno škatlo za tisti del prereza HEA 300, ki je izpostavljen požaru.

$$A_{m,b} = 2h + b = 2 \cdot 0.29 + 0.3 = 0.88 \text{ m}$$

$$V = 113 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ (iz tabel)}$$

$$A_m^* / V = 0.88 / 113 \cdot 10^{-4} = 78 \text{ m}^{-1}$$

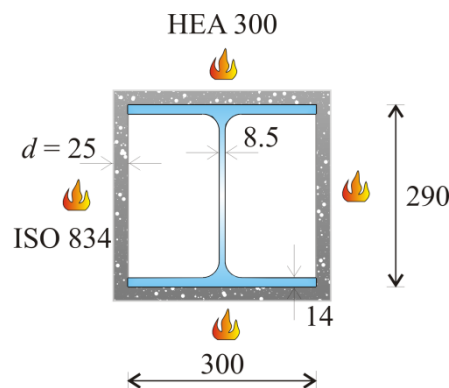


Slika 4: Skica obravnavanega prereza.

Efektivni faktor masivnosti za prerez HEA 300 znaša  $A_m^* / V = 78 \text{ m}^{-1}$ . Vidimo, da je efektivni faktor masivnosti v tem primeru manjši kar pomeni, da se bo prerez v tem primeru, ko je ogrevan iz treh strani ogrel počasneje.

### 3.3.3.3 Zaščiten H-prerez izpostavljen standardnemu požaru ISO 834 iz štirih strani

Kolikšno temperaturo doseže jeklen element prereza HEA 300, ki je toplotno zaščiten in izpostavljen standardnemu požaru ISO 834 60 minut? Toplotno zaščitni material je debeline 25mm in njegova toplotna prevodnost je temperaturno neodvisna in znaša 0.25 W/mK. Obravnavamo dva primera, v prvem primeru je element zaščiten s premazom, v drugem primeru pa s protipožarno oblogo.



Slika 5: Skica obravnavanega prereza.

#### Protipožarni premaz

Ustrezno površino protipožarne zaščite  $A_p$  običajno pridobimo s strani proizvajalca, če tega podatka nimamo lahko za dober približek vzamemo površino H prereza.

$$A_p = 2h + 2b = 2 \cdot 0.29 + 2 \cdot 0.3 = 1.78 \text{ m}$$

$$V = 113 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ (iz tabel)}$$

$$k_p = (0.25 / 0.025) \cdot (1.78 / 0.0113) = 1575 \text{ W/m}^3\text{K}$$

Iz preglednice I-2(b) z interpolacijo med vrednostmi za  $k_p = 1300$  in  $k_p = 2000$  izračunamo, da je temperatura v tem primeru enaka  $585\text{ }^\circ\text{C}$ .

*Protipožarna obloga*

$$A_p = 2h + 2b = 2 \cdot 0.29 + 2 \cdot 0.3 = 1.18\text{ m}$$

$$V = 113 \cdot 10^{-4}\text{ m}^3 \text{ (iz tabel)}$$

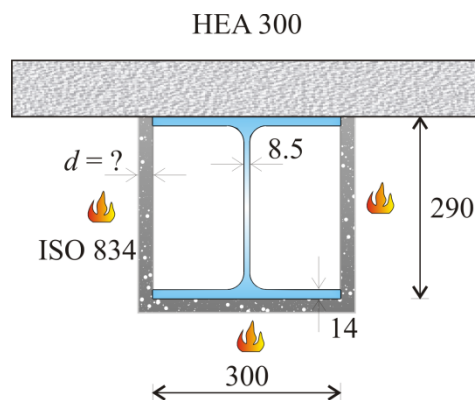
$$k_p = (0.25 / 0.025) \cdot (1.18 / 0.0113) = 1044\text{ W/m}^2\text{K}$$

Iz preglednice I-2(b) z interpolacijo med vrednostmi za  $k_p = 1000$  in  $k_p = 1300$  izračunamo, da je temperatura v tem primeru enaka  $482\text{ }^\circ\text{C}$ .

Vidimo, da ima nosilec v primeru požarne zaščite s sistemom protipožarne obloge občutno manjšo temperaturo po enournem standardnem požaru ISO 834.

### 3.3.3.4 Zaščiten H-prerez izpostavljen standardnemu požaru ISO 834 iz treh strani

Mehanska analiza nam pokaže da nosilec HEA 400 v primeru požarnega projektne stanja izgubi svojo nosilnost, ko temperatura doseže  $680\text{ }^\circ\text{C}$ . Kolikšna je požarna nosilnost nosilca HEA 400 v primeru, da je nosilec nezaščiten? Ter kako debelo požarno zaščito potrebujemo, če želimo doseči požarno odpornost R120 v primeru, da nosilec zaščitimo s protipožarnimi oblogami? Element je v obeh primerih ogrevan iz treh strani. Toplotna prevodnost požarne zaščite je temperaturno neodvisna in znaša  $0.18\text{ W/mK}$ .



Slika 6: Skica obravnavanega prereza.

*Nezaščiten prerez*

$$A_m^* / V = 0.9(2h + b) / V = 0.9(2 \cdot 0.39 + 0.3) / 159 \cdot 10^{-4} = 61\text{ m}^{-1}$$

Iz slike I-1 odčitamo požarno odpornost za točko ( $61\text{ m}^{-1}$ ;  $680\text{ }^\circ\text{C}$ ) okoli 26 minut.

*Zaščiten prerez*

Z interpolacijo vrednosti  $709\text{ }^\circ\text{C}$  za  $k_p = 1000$  in  $654\text{ }^\circ\text{C}$  za  $k_p = 800$  dobimo vrednost za faktor  $k_p = 894$ . Za ta faktor je temperatura v jeklenem elementu po 120 minutah enaka  $680\text{ }^\circ\text{C}$ . Za zaščiten prerez z požarnimi oblogami izračunamo najprej ustrezno površino materiala požarne zaščite elementa ter nato ustrezno debelino požarne zaščite:

$$A_p = 2h + b = 2 \cdot 0.29 + 0.3 = 0.88\text{ m}$$

$$V = 159 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ (iz tabel)}$$

$$k_p = \frac{\lambda_p A_p}{d_p V} \Rightarrow d_p = 0.18 \cdot (0.88 / 0.0159) / 894 = 0.0111 \text{ m} \approx 12 \text{ mm.}$$

Požarna zaščita debeline 12 mm zadostuje, da prerez HEA 400 pri podani projektni požarni obtežbi zdrži 120 minut požara ISO 834.

### 3.3.4 Toplotne lastnosti konstrukcijskega jekla skladno s SIST EN 1993-1-2:2005

Znano je, da se toplotni parametri jekla in drugih gradbenih materialov spreminjajo s temperaturo. V nadaljevanju prikazujemo spreminjaje termičnih parametrov jekla skladno s SIST EN 1993-1-2:2005.

#### Specifična toplota

Specifična toplota jekla  $c_a$  se v odvisnosti od temperature spreminja po naslednjem zakonu:

za  $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$ :

$$c_a = 425 + 7.73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1.69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3 \text{ J/kgK}, \quad (45)$$

za  $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$ :

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \text{ J/kgK}, \quad (46)$$

za  $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$ :

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \text{ J/kgK}, \quad (47)$$

za  $900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$

$$c_a = 650 \text{ J/kgK}, \quad (48)$$

kjer je  $\theta_a$  temperatura jekla.

#### Koeficient toplotne prevodnosti

Koeficient toplotne prevodnosti jekla  $\lambda_a$  se v odvisnosti od temperature spreminja po naslednjem zakonu:

za  $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C}$ :

$$\lambda_a = 54 - 3.33 \cdot 10^{-2} \theta_a \text{ W/mK}, \quad (49)$$

za  $800^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$ :

$$\lambda_a = 27.3 \text{ W/mK}, \quad (50)$$

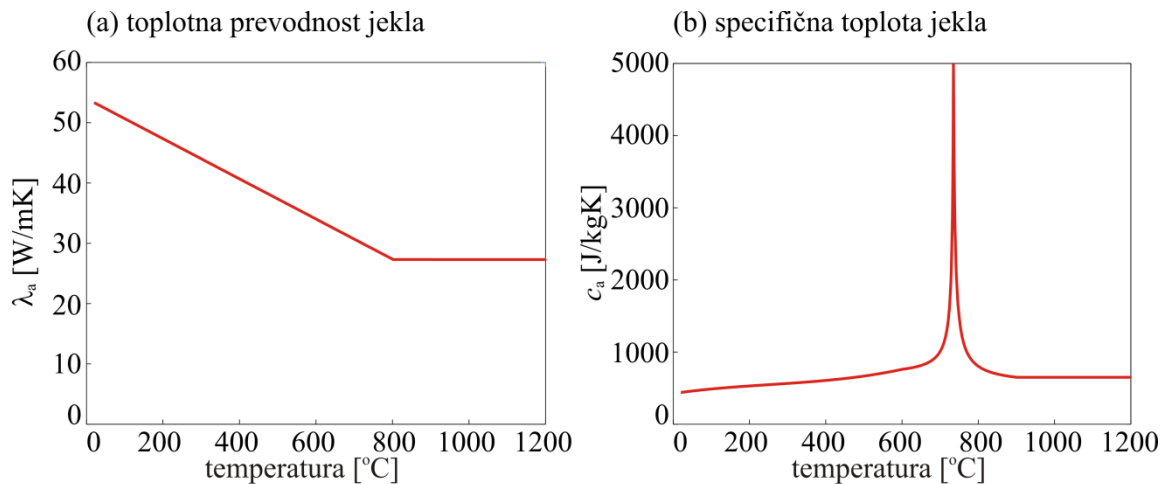
kjer je  $\theta_a$  temperatura jekla.

#### Gostota jekla

Za gosto jekla  $\rho_a$  se predpostavi, da je neodvisna od temperature:

$$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3. \quad (51)$$

Zaradi večje preglednosti na sliki 3 grafično prikazujemo spreminjanje toplotne prevodnosti in specifične toplote jekla v odvisnosti od temperature.



Slika 7: (a) Spreminjanje toplotne prevodnosti jekla v odvisnosti od temperature.

(b) Spreminjanje specifične toplote jekla v odvisnosti od temperature.

### 3.4 Mehanska analiza (Določitev požarne odpornosti po poenostavljenem postopku)

Skladno s standardom SIST EN 1993-1-2: 2005 požarno odpornost ocenimo s pomočjo poenostavljenih računskih modelov. Ti modeli so primerni za dokazovanje nosilnosti posameznih elementov jeklenih konstrukcij ter v določenih primerih tudi enostavnih podkonstrukcijskih sistemov. Nikakor pa te metode niso primerne za analizo celotne konstrukcije kot celote, ki je izpostavljena požaru. Enostavni računski modeli temeljijo na predpostavkah, ki so konservativne. Požarno odpornost pa dokažemo skladno z enačbami (1), (2) in (3).

#### 3.4.1 Določitev $E_{fi,d}$

Kot smo že omenili projektno vrednost notranjih sil pri požarnem projektnejem stanju  $E_{fi,d}$ , določimo skladno z nezgodnim projektnejm stanjem po standardu SIST EN 1990: 2004. Nezgodno projektnejm stanje je določene pri času  $t = 0$ . Sam Evrokod pa pri tem ne daje nadaljnjih napotkov kakšno analizo naj bi pri tem uporabili za določitev notranjih sil pri požarnem projektnejm stanju. Običajno v praksi to storimo z elastično analizo. Taka analiza je tudi smiselna saj je obtežba v tem primeru znatno manjša v primerjavi z obtežbo, ki jo uporabimo za običajno dimenzioniranje pri sobni temperaturi.

Če imamo opravka z analizo enostavnih konstrukcij je določitev notranjih sil več ali manj trivialna naloga. V primeru da imamo zahtevnejšo konstrukcijo lahko uporabimo računalniške

programe, ki omogočajo analizo konstrukcij pri sobni temperaturi. Seveda moramo pri tem za določitev notranjih sil pri požarnem projektnejem stanju upoštevati ustrezno obremenitev.

### 3.4.2 Določitev $R_{fi,d}$

Postopki za določitev pripadajoče projektne odpornosti jeklenega elementa v požarnem projektnejem stanju  $R_{fi,d}$  v standardu SIST EN 1993-1-2:2005 temeljijo na istih metodah in enačbah, ki ji uporabimo pri dimenzioniranju jeklenih elementov pri sobni temperaturi. Razlika je le v tem, da sedaj pri požarnem projektnejem stanju zajamemo vpliv povišanja temperature z upoštevanjem zmanjšane mehanske lastnosti konstrukcijskega jekla.

Tak postopek je mogoč samo zato, ker materialni model konstrukcijskega jekla pri povišanih temperaturah, ki ga predlaga standard SIST EN 1993-1-2:2005, eksplicitno ne upošteva vpliv viskoznega lezenja jekla pri povišanih temperaturah. V tem modelu je vpliv viskoznega lezenja jekla zajet implicitno v napetostno deformacijski zvezi. Posledično je tak materialni model časovni neodvisen, kar pomeni, da je kritična temperatura, ki povzroči porušitev jeklenega elementa neodvisna od časa kadar je ta temperatura dosežena. Poleg tega, da lahko ločimo temperaturno in mehansko analizo, lahko zamenjamo tudi njun vrstni red, npr. najprej določimo kritični temperaturo iz mehanske analize in naknadno določimo ustrezno požarno zaščito iz temperaturne analize. Tak materialni model ima seveda svoje omejitve. Standard SIST EN 1993-1-2:2005 omejuje hitrost naraščanja temperatur v jeklenem elementu, in sicer ta ne sme biti manjša od 2 K/min ter večja od 50 K/min. Temu kriteriju pa je zadoščeno v večini požarov, ki se lahko razvijejo v stavbah.

V nadaljevanju predstavimo postopke in enačbe, ki jih podaja standard SIST EN 1993-1-2:2005 za določitev nosilnosti elementov v požarnem projektnejem stanju  $R_{fi,d}$ . Tako kot pri sobni temperaturi, se ti postopki pri požarni analizi ločijo glede na različne tipe obremenitve.

### 3.4.3 Nosilnost elementov po SIST EN 1993-1-2:2005

#### 3.4.3.1 Razvrstitev prečnih prerezov

Za potrebe poenostavljenih pravil se lahko prečne prereze razvrsti v različne razrede kompaktnosti na enak način kot pri sobni temperaturi, vendar ob upoštevanju zmanjšane parametra  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = 0.85 \sqrt{\frac{235}{f_y}}, \quad (52)$$

kjer je  $f_y$  napetost tečenja pri 20 °C. Kot vidimo je potrebno v požarnem projektnejem stanju na novo določiti kompaktnost posameznih prečnih prerezov, ki seveda ni nujno enaka kompaktnosti prereza pri analizah pri sobni temperaturi.

### 3.4.3.2 Natezni elementi

V primeru enakomerne temperature  $\theta_a$  projektno natezno nosilnost  $N_{fi,\theta,Rd}$  natezno obremenjenega elementa določimo kot:

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,0} N_{Rd} \left[ \gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi} \right], \quad (53)$$

kje je:

$k_{y,0}$  redukcijski faktor za napetost tečenja jekla pri temperaturi jekla  $\theta_a$ , doseženi v času  $t$ ,

$N_{Rd}$  projektna plastična nosilnost prečnega prereza pri normalni temperaturi v skladu z SIST EN 1993-1-2:2005,

$\gamma_{M,0}$  delni faktor obravnavane mehanske lastnosti pri običajnem projektne stanju,

$\gamma_{M,fi}$  delni faktor obravnavane mehanske lastnosti v požarnem projektne stanju.

V primeru neenakomerne razporeditve temperature  $\theta_a$  po prerezu, projektno natezno nosilnost  $N_{fi,\theta,Rd}$  natezno obremenjenega elementa določimo z enačbo (54) ali z enostavnejšo, a bolj konservativno enačbo (55). Slednja predstavlja konservativen način določitve :

$$N_{fi,\theta,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i k_{y,\theta,i} \left[ f_y / \gamma_{M,fi} \right], \quad (54)$$

kjer je:

$A_i$  del površine prečnega prereza s temperaturo  $\theta_i$ ,

$k_{y,\theta,i}$  redukcijski faktor za napetost tečenja jekla pri temperaturi  $\theta_i$ ,

$\theta_i$  temperatura v delu prečnega prereza  $A_i$ ,

$f_y$  napetost tečenja jekla pri sobni temperaturi.

V enačbi (54) indeks  $i$  označuje območje prečnega prereza, kjer privzamemo, da je temperatura konstantna.

$$N_{fi,\theta,Rd} = A k_{y,\theta,\max} \left[ f_y / \gamma_{M,fi} \right], \quad (55)$$

kjer je  $A$  površina prečnega prereza in  $k_{y,\theta,\max}$  redukcijski faktor za napetost tečenja jekla pri najvišji doseženi temperaturi jekla  $\theta_{a,\max}$  v času  $t$ .

Omenimo še, da je enačbo (54) smiselno uporabiti le v primeru kadar je potek temperature po prečnem prerezu simetričen. V nasprotnem primeru namreč temperaturni gradient zaradi neenakomernega poteka temperature po prečnem prerezu povzroča dodatne tlačne in natezne napetosti v prečnem prerezu. V tem primer je za določitev projektne natezne nosilnosti  $N_{fi,\theta,Rd}$  temperaturno neenakomerno obremenjenega nateznega elementa, smiselnejše



predpostaviti konstanten potek temperature po prerezu in uporabiti enačbo (53) ali enačbo (55)

### 3.4.3.3 Tlačni elementi s prečnimi prerezi v 1., 2. ali 3. razredu kompaktnosti

Projektno uklonsko nosilnost  $N_{b,fi,t,Rd}$  v času  $t$  tlačno obremenjenih elementov s prečnim prerezom v 1., 2. ali 3. razredu kompaktnosti s konstantnim razporedom temperatur določimo z naslednjim izrazom:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,0} f_y / \gamma_{M,fi}, \quad (56)$$

kjer je:

$\chi_{fi}$  redukcijski faktor za upogibni uklon pri požarnem projektne stanju,

$k_{y,0}$  redukcijski faktor za napetost tečenja jekla pri temperaturi jekla  $\theta_a$  doseženi v času  $t$ .

Za vrednost redukcijskega faktorja  $\chi_{fi}$  je potrebno vzeti manjšo od vrednosti  $\chi_{y,fi}$  in  $\chi_{z,fi}$  določenih z izrazom:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_0 + \sqrt{\varphi_0^2 - \bar{\lambda}_0^2}}. \quad (57)$$

Koeficient  $\varphi_0$  izračunamo kot:

$$\varphi_0 = 0.5 \left( 1 + \alpha \bar{\lambda}_0 + \bar{\lambda}_0^2 \right), \quad (58)$$

kjer je faktor nepopolnosti  $\alpha$  določen kot:

$$\alpha = 0.65 \sqrt{235 / f_y}. \quad (59)$$

Relativna vitkost  $\bar{\lambda}_0$  pri temperaturi  $\theta_a$ , ki nastopa v izrazu (57) je podana z:

$$\bar{\lambda}_0 = \bar{\lambda} \sqrt{k_{y,0} / k_{E,0}}, \quad (60)$$

kjer je:

$k_{E,0}$  redukcijski faktor za modul elastičnosti pri temperaturi jekla  $\theta_a$  doseženi v času  $t$ ,

$k_{y,0}$  redukcijski faktor za napetost tečenja jekla pri temperaturi jekla  $\theta_a$  doseženi v času  $t$ .

Faktor relativne vitkosti  $\bar{\lambda}$  v izrazu (60) določimo na enak način kot pri sobni temperaturi, to je:

$$\bar{\lambda} = \frac{l_{fi} / \sqrt{I / A}}{\pi \sqrt{E / f_y}}, \quad (61)$$

kjer je:

$l_{fi}$  uklonska dolžina stebra v projektnej požarni stanju,

$I$  vztrajnostni moment prečnega prereza,

$A$  površina prečnega prereza.

Uklonsko dolžino stebrov  $l_{fi}$  v požarni projektnej stanju je v splošnem potrebno določiti na enak način kot pri projektiranju pri sobni temperaturi. V primeru nepomičnih okvirjev, kadar stebel poteka neprekinjeno skozi več etaž in vsaka etaža zase tvori požarni sektor, lahko za uklonsko dolžino stebrov v vmesnem nadstropju vzamemo vrednost  $l_{fi} = 0.5L$  in v zgornjem nadstropju vrednost  $l_{fi} = 0.7L$ . Tukaj je  $L$  sistemska dolžina stebra v obravnavanem nadstropju, ki je v požaru. V prvem nadstropju pa je uklonska dolžina bodisi enaka  $0.7L$  ali  $0.5L$  odvisno od robnih pogojev na dnu stebra.

V primeru da je potek temperature po prečnem prerezu jeklenega elementa neenakomeren lahko projektno uklonsko nosilnost  $N_{b,fi,t,Rd}$  tlačno obremenjenega elementa določimo na prej prikazan način (enačbe (57)–(61)). Podobni kot pri analizi nateznih elementov, tudi tu v tem primeru za temperaturo jekla  $\theta_a$  vzamemo temperaturo, ki je enaka najvišji temperaturi  $\theta_{a,max}$  doseženi v času  $t$ .

Kadar na osnovi znane obtežbe želimo za izbran tlačni jeklen element določiti kritično temperaturo, moramo le to na osnovi enačb (57)–(61) določiti iterativno. Razlog je v relativni vitkosti  $\bar{\lambda}_\theta$  pri temperaturi  $\theta_a$ , ki je temperaturno odvisno. Izkaže se, da je konvergenca tega postopka zelo hitra, če v prvi iteraciji za začetni približek relativne vitkosti  $\bar{\lambda}_\theta$  (en. (60)) izberemo  $\bar{\lambda}_\theta = 1.2\lambda$ . Običajno sta za izračun kritične temperature z omenjenim približkom potrebni le dve iteraciji.

### 3.4.3.4 Nosilci s prečnim prerezom v 1., 2. in 3. razredu kompaktnosti

#### 3.4.3.4.1 Upogibna nosilnost

##### 3.4.3.4.1.1 Konstanten razpored temperature po prečnem prerezu

Kljub temu, da standard SIST EN 1993-1-2:2005 loči določitev nosilnosti za nosilce s prečnim prerezom v 1. in 2. razredu kompaktnosti ter za nosilce v 3. razredu kompaktnosti kot samostojni točki. Lahko ti dve točki združimo, saj gre za izraze, ki se med seboj razlikujejo večinoma le v tem, ali gre za plastično (1. in 2. razred kompaktnosti) ali za elastično (3. razred kompaktnosti) nosilnost.

Projektno upogibno nosilnost  $M_{fi,t,Rd}$  v času  $t$  s konstantnim razporedom temperature  $\theta_a$  določimo z naslednjim izrazom:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \left[ \gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi} \right] M_{Rd} \quad (62)$$

kjer je:

$M_{Rd}$  plastična (1., 2. razred) ali elastična (3. razred) upogibna nosilnost bruto prečnega prereza določena pri sobni temperaturi v skladu s SIST EN 1993-1-1,

$k_{y,0}$  redukcijski faktor za napetost tečenja jekla pri temperaturi jekla  $\theta_a$  doseženi v času  $t$ .

Enačbo (62) lahko zapišemo tudi v drugačni obliki, ki sicer ni podana v SIST EN 1993-1-1:

$$M_{fi,0,Rd} = k_{y,0} \left[ f_y / \gamma_{M,fi} \right] W, \quad (63)$$

kjer je:

$W$  plastični odpornostni moment prereza  $W_{pl}$  za 1. in 2. razred kompaktnosti, ter elastični odpornostni moment prereza  $W_{el}$  za 3. kompaktnosti,

$f_y$  napetost na meji tečenja, določena pri sobni temperaturi.

Omenimo, da je potrebno upogibno nosilnost bruto prečnega prereza  $M_{Rd}$  reducirati po potrebi ob upoštevanju interakcije s prečno silo v skladu s SIST EN 1993-1-1.

#### 3.4.3.4.1.2 Neenakomeren raspored temperature po prečnem prerezu

V primeru 1. in 2. razreda kompaktnosti podaja standard SIST EN 1993-1-2: 2005 podaja naslednji izraz za izračun projektne upogibne nosilnosti  $M_{fi,t,Rd}$  v času  $t$  z neenakomernim rasporedom temperature po prečnem prerezu:

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_i A_i z_i k_{y,0,i} f_{y,i} / \gamma_{M,fi}, \quad (64)$$

kjer je:

$z_i$  razdalja med plastično nevtralno osjo in težiščem dela prečnega prereza s površino  $A_i$ ,

$f_{y,i}$  napetost na meji tečenja dela prereza  $A_i$ .

Člena  $A_i$  in  $k_{y,0,i}$  v enačbi (64) določimo enako kot v primeru nateznih elementov z neenakomernim rasporedom temperature po prečnem prerezu (enačba (54)).

Kot alternativo za enačbo (64) lahko projektno upogibno nosilnost  $M_{fi,t,Rd}$  v času  $t$  z neenakomernim rasporedom temperature po prečnem prerezu izračunamo z enačbo (65) in (66). Enačba (65) velja za prereze v 1. in 2. razredu kompaktnosti, medtem ko enačba (66) velja za prereze v 3. razredu kompaktnosti.

$$M_{fi,t,Rd} = M_{fi,0,Rd} / \kappa_1 \kappa_2, \quad (65)$$

$$M_{fi,t,Rd} = k_{y,0,max} M_{Rd} \left[ \gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi} \right] / \kappa_1 \kappa_2, \quad (66)$$

kjer je:

$\theta$  v enačbi (65) pomeni konstantno temperaturo po prečnem prerezu, v katerem podpore

ne vplivajo na razpored temperatur,

$\theta_{\max}$  v enačbi (66) pomeni maksimalno temperaturo jekla doseženo v času  $t$ ,

$\kappa_1$  faktor prilagoditve za neenakomerni razpored temperature po prečnem prerezu,

$\kappa_2$  faktor prilagoditve za neenakomerni razpored temperature vzdolž nosilca.

Za faktor  $\kappa_1$ , ki upošteva neenakomeren razpored temperature po prečnem prerezu, je potrebno vzeti naslednje vrednosti:

- za nosilec izpostavljen požaru z vseh štirih strani  $\kappa_1 = 1.0$ ,
- za nezaščiten nosilec, izpostavljen požaru s treh strani in s sovprežno ali betonsko ploščo na četrti strani:  $\kappa_1 = 0.70$ ,
- za zaščiten nosilec, izpostavljen s treh strani in s sovprežno ploščo na četrti strani:  $\kappa_1 = 0.85$ ,

Za upoštevanje neenakomerne razporeditve temperature vzdolž nosilca je treba vzeti naslednje vrednosti faktorja prilagoditve  $\kappa_2$ :

- v območju podpor statično nedoločenih nosilcev:  $\kappa_2 = 0,85$ ,
- v vseh drugih primerih:  $\kappa_2 = 1.0$ .

#### 3.4.3.4.2 Strižna nosilnost

Projektno strižno nosilnost v času  $t$  prečnih prerezov določimo z naslednjim izrazom:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,web} V_{Rd} \left[ \gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi} \right], \quad (67)$$

kjer je:

$\theta_{web}$  povprečna temperatura stojine prečnega prereza,

$V_{Rd}$  projektna strižna nosilnost bruto prečnega prereza pri sobni temperaturi določena v skladu z SISI EN 1993-1-1,

$k_{y,\theta,web}$  redukcijski faktor za napetost tečenja jekla pri temperaturi jekla  $\theta_{web}$ .

Omenimo, le da ta izraz lahko uporabimo tako v primeru enakomerne razporeditve temperature po prečnem prerezu, kot v primeru neenakomerne razporeditve temperature po prerezu. V prvem primeru je povprečna temperatura stojine prečnega prereza  $\theta_{web}$  kar enaka enakomerni temperaturi po prečnem prerezu.

#### 3.4.3.4.3 Nosilnost v primeru bočne zvrnitve

Projektno nosilnost bočne zvrnitve v času  $t$  za bočno nepodprt element določimo z naslednjim izrazom:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_y k_{y,\theta,com} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (68)$$

kjer je:

$W_y$  plastični odpornostni moment prereza  $W_{pl,y}$  za 1. in 2. razred kompaktnosti, ter elastični odpornostni moment prereza  $W_{el,y}$  za 3. razred kompaktnosti,

$\chi_{LT,fi}$  redukcijski faktor za bočno zvrnitev pri požarnem projektne stanju,

$k_{y,\theta,com}$  redukcijski faktor za napetost tečenja jekla pri najvišji temperaturi tlačene pasnice  $\theta_{a,com}$  dosežene v času  $t$ .

Konservativno lahko za  $\theta_{a,com}$  predpostavimo, da je enaka konstantni temperaturi  $\theta_a$  za prečne prereze v 1. in 2 razredu kompaktnosti, ter enaka najvišji temperaturi  $\theta_{a,max}$  v primeru prerezov v 3. razredu.

Vrednost  $\chi_{LT,fi}$  določimo na naslednji način:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}}, \quad (69)$$

z

$$\alpha = 0.65 \sqrt{235 / f_y} \quad (70)$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{k_{y,\theta,com} / k_{E,\theta,com}} \quad (71)$$

kjer je:

$k_{E,\theta,com}$  redukcijski faktor za modul elastičnosti pri najvišji temperaturi jekla v tlačeni pasnici  $\theta_{a,com}$  dosežene v času  $t$ ,

$\bar{\lambda}_{LT}$  brezdimenzionalna vitkost pri bočni zvrnitvi določena pri sobni temperaturi.

### 3.4.3.5 Elementi s prečnimi prerezi v 1., 2., ali 3. razredu kompaktnosti, sočasno obremenjeni z upogibnim momentom in s tlačno osno silo

Projektno uklonsko nosilnost  $R_{fi,t,d}$  v času  $t$  za elemente obremenjene z upogibnim momentom in s tlačno osno silo v primeru enakomerne razporeditve temperature po prečnem prerezu določimo z naslednjimi izrazi:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{W_y k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{W_z k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (72)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} W_y k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{W_z k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (73)$$

kjer je:

$W_y, W_z$  plastični odpornostni moment prereza  $W_{pl,y}, W_{pl,z}$  za 1. in 2. razred kompaktnosti, ter elastični odpornostni moment prereza  $W_{el,y}, W_{el,z}$  za 3. razred kompaktnosti,

$\chi_{\min,fi}$  manjša od vrednosti  $\chi_{y,fi}$  in  $\chi_{z,fi}$  določena z enačbo (57),

Parameter  $\chi_{LT,fi}$  v enačbi (73) izračunamo z izrazom (69). Parametre  $k_{LT}$ ,  $k_y$ , in  $k_z$  določimo s pomočjo naslednjih zvez:

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1, \quad (74)$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3, \quad (75)$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3, \quad (76)$$

kjer je  $\mu_{LT}$ ,  $\mu_y$  in  $\mu_z$  določimo kot:

$$\mu_{LT} = 0.15 \bar{\lambda}_{z,\theta} \beta_{M,LT} - 0.15 \leq 0.9, \quad (77)$$

$$\mu_y = (1.2 \beta_{M,y} - 3) \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0.44 \beta_{M,y} - 0.29 \leq 0.8, \quad (78)$$

$$\mu_z = (2 \beta_{M,z} - 5) \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0.44 \beta_{M,z} - 0.29 \leq 0.8 \quad \text{in} \quad \bar{\lambda}_{z,\theta} \leq 1.1. \quad (79)$$

Za izračun vrednosti faktorja  $\beta_M$  v odvisnosti od poteka momenta standard SIST EN 1993-1-2:2005 na sliki 4.2 podaja izraze za račun le tega. Količine  $N_{fi,Ed}$ ,  $M_{y,fi,Ed}$  in  $M_{z,fi,Ed}$  v zgornjih enačbah predstavljajo notranje statične količine jeklenega elementa, ki jih določimo na osnovi požarnega projektnega stanja skladno s (4).

#### 3.4.3.6 Elementi s prečnimi prerezi v 4. razredu kompaktnosti

Za elemente s prečnim prerezom v 4. razredu kompaktnosti, z izjemo natezno obremenjenih elementov, se lahko predpostavi, da zadostimo kriteriju nosilnosti (1), če v času  $t$  temperatura jekla v nobenem prečnem prerezu ni višja od 350 °C. Nosilnost nateznih elementov, kjer seveda ne obstaja možnost pojava lokalne nestabilnosti, določimo kot smo to prikazali v razdelku 3.4.3.2.

Določevanje nosilnosti jeklenih elementov s prečnimi prerezi v 4. razredu kompaktnosti je z uporabo metode kritične temperature je seveda zelo enostavno. Vendar po drugi strani je ta metoda zelo konservativna. Zato tudi sam standard SIST EN 1993-1-2:2005 v dodatku E daje možnost uporabe naprednejših metod, vendar ob upoštevanju nekaterih predpostavk. Na tem mestu omenimo le pomembnejše predpostavke:

- nosilnost tlačno obremenjenih elementov je treba preveriti z enačbami iz 3.4.3.3, za upogibno obremenjene nosilce z enačbami iz 3.4.3.4, ki veljajo za prereze v 3. razredu kompaktnosti ter za elemente, ki so hkrati obremenjeni tlačno in upogibno z enačbami iz 3.4.3.4, ki veljajo za prereze v 3. razredu kompaktnosti. Pri tem se prečni prerez in odpornostni moment nadomestita s sodelujočim prečnim prerezom in odpornostnim momentom,
- sodelujoč prečni prerez in odpornostni moment je potrebno določiti skladno s SIST EN 1993-1-3 in SIST EN 1993-1-5 na podlagi mehanskih lastnosti jekla pri sobnih temperaturah,
- za projektno napetost tečenja v pogojih požara je potrebno vzeti dogovorno napetost tečenja  $f_{p,0,2\theta}$ . Ta projektna napetost tečenja se lahko uporabi za določanje natezne, tlačne, upogibne in strižne nosilnosti,
- redukcijski faktor za projektno napetost tečenja jekla je podan v preglednici E.1 v standardu SIST EN 1993-1-2:2005.

#### 3.4.4 Kritična temperatura

Kot smo že omenili na začetku, standard SIST EN 1993-1-2:2005 omogoča preverjanje požarne nosilnosti tudi na nivoju temperatur. Osnovna ideja je, da kritično temperaturo določimo neposredno iz nivoja obtežba oziroma, kot sam Evrokod to poimenuje, iz stopnje izkoriščenosti  $\mu_0$ . Za elemente s prečnim prerezom v 1., 2. in 3. razredu kompaktnosti in za vse natezno obremenjene elemente, stopnjo izkoriščenosti  $\mu_0$  izračunamo kot:

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0}, \quad (80)$$

kjer je:

$E_{fi,d}$  projektna vrednost notranjih sil pri požarnem projektnejem stanju, določena v skladu z EN 1991-1-2,

$R_{fi,d,0}$  pripadajoča projektna odpornost v požarnem projektnejem stanju določena v času  $t = 0$  ( $T = 20^\circ\text{C}$ ), določena s pomočjo enačb (glej poglavje 3.4.3).

Kot alternativa za natezno obremenjene elemente in za bočno podprte nosilce lahko na konservativen način izračunamo  $\mu_0$  z izrazom:

$$\mu_0 = \eta_{fi} \left[ \gamma_{M,fi} / \gamma_{M,0} \right], \quad (81)$$

kjer je:

$\eta_{fi}$  faktor redukcije nivoja obremenitve pri požarnem projektnejem stanju.

Kritično temperaturo jekla  $\theta_{a,cr}$  v času  $t$  za konstantni potek temperature v elementu, kot funkcijo stopnje izkoriščenosti  $\mu_0$ , določimo na naslednji način:

$$\theta_{a,cr} = 39.19 \ln \left[ \frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482. \quad (82)$$

V enačbi (82)  $\mu_0$  ne sme biti manjši od 0.013. Naj omenimo, da ta enačba ne velja v primerih, ko je potrebno upoštevati vpliv deformacij ali stabilnosti. S tem je metoda kritične temperature omejena na manjše število primerov, kot so npr. upogib jeklenega elementa s prečnim prerezom v 1., 2. in 3. razredu kompaktnosti ter jekleni elementi v nategu.

### 3.4.5 Mehanske lastnosti konstrukcijskega jekla pri povišanih temperaturah

Dobro je znano, da se z višanjem temperature pomembno znižuje togost jeklenih elementov, saj tako modul elastičnosti kakor tudi napetost na meji tečenja pri tem nelinearno upadata. Izbira ustreznega materialnega modela jekla pri povišanih temperaturah ima zato bistven pomen. Za poenostavljene postopke, ki so predstavljeni v prejšnjem razdelku, trdnostne in deformacijske lastnosti jekla pri povišanih temperaturah določimo iz napetostno-deformacijske zveze predstavljene v SIST EN 1993-1-2:2005, ki je opisan z naslednjimi tremi parametri, ki so temperaturno odvisni: meja proporcionalnosti  $f_{p,\theta}$ , karakteristična napetost na meji tečenja  $f_{y,\theta}$  in elastični modul  $E_{a,\theta}$ . Pri tej zvezi materialno odvisnost od temperature opišemo s tako imenovanimi redukcijskimi faktorji za:

- efektivno napetost tečenja glede na napetost tečenja pri 20°C:  $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$ ,
- meja proporcionalnosti glede na napetost tečenja pri 20°C:  $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$ ,
- elastični modul glede na elastični modul pri 20°C:  $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$ .

Pri konstitucijski zvezi po SIST EN 1993-1-2:2005 je odnos med napetostjo in deformacijo nelinearna elastično-plastična funkcija, sestavljena iz štirih delov (izrazi so podani s sistemom enačb (83)). Prvi del opisuje linearno elastično obnašanje jekla in je zato opisan z linearno funkcijo. Drugi del opisuje plastifikacijo jekla po eliptičnem zakonu, tretji del pa plastifikacijo brez utrjevanja. Četrty, zadnji del pa predstavlja porušitev jekla.

$$\sigma = \begin{cases} \varepsilon E_{a,\theta} & \text{za } \varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta} \\ f_{p,\theta} - c + (b/a) \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2} & \text{za } \varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta} \\ f_{y,\theta} & \text{za } \varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta} \\ f_{y,\theta} \left[ 1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}) \right] & \text{za } \varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta} \end{cases} \quad (83)$$

V enačbi (83) predstavlja  $\varepsilon_{p,\theta}$  deformacijo jekla na meji linearnosti,  $\varepsilon_{y,\theta}$  deformacijo na meji tečenja jekla in  $E_{a,\theta}$  je elastični modul jekla. Preostali materialni parametri v enačbi (83) so neodvisni od temperature in imajo vrednosti  $\varepsilon_{t,\theta} = 0.15$ ,  $\varepsilon_{u,\theta} = 0.20$  in  $\varepsilon_{y,\theta} = 0.02$ . Funkcije  $a$ ,  $b$  in  $c$  so odvisne od parametrov  $\varepsilon_{p,\theta}$ ,  $\varepsilon_{y,\theta}$ ,  $f_{p,\theta}$ ,  $f_{y,\theta}$ ,  $E_{a,\theta}$ . Izračunamo jih s pomočjo naslednjih izrazov:

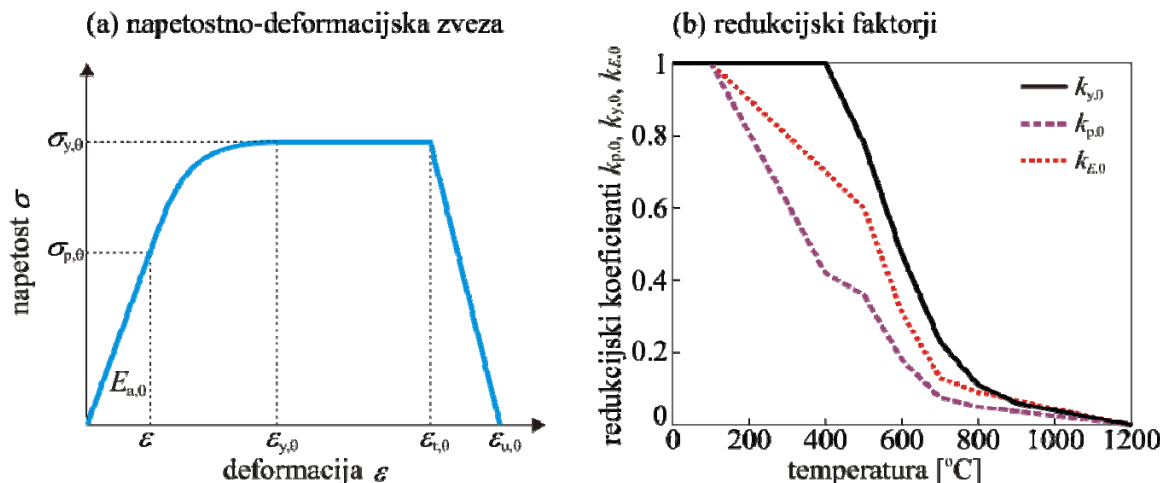
$$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c / E_{a,\theta}), \quad (84)$$



$$b^2 = c(\varepsilon_{y,0} - \varepsilon_{p,0})E_{a,0} + c^2, \quad (85)$$

$$c = \frac{(f_{y,0} - f_{p,0})^2}{(\varepsilon_{y,0} - \varepsilon_{p,0})E_{a,0} - 2(f_{y,0} - f_{p,0})}. \quad (86)$$

Materialni model jekla pri povišanih temperaturah in fizikalni pomen materialnih parametrov prikazuje slika 4a. Spreminjanje redukcijskih faktorjev  $k_{p,0}$ ,  $k_{y,0}$  in  $k_{E,0}$  v odvisnosti od temperature prikazujemo na sliki 4b.



Slika 8: (a) Napetostno deformacijska zveza jekla pri povišani temperaturi po SIST EN 1993-1-2:2005. (b) Spreminjanje redukcijskih faktorjev v odvisnosti od temperature.

### 3.4.6 Primeri

#### 3.4.6.1 Element v nategu

Obravnavamo jekleno palico iz cevi prereza  $D = 177.8 \text{ mm}$  in debeline stene cevi  $d = 8.8 \text{ mm}$ , je iz materiala S275 in je izpostavljena osni natezni sili, ki v požarne projektne stanju znaša  $F_{fi,Ed} = 150 \text{ kN}$ . Zahtevana požarna nosilnost za obravnavano jekleno palico je R30. Kontrole nosilnosti jeklene palice preveri v območju obtežbe ter v časovnem in temperaturnem območju.

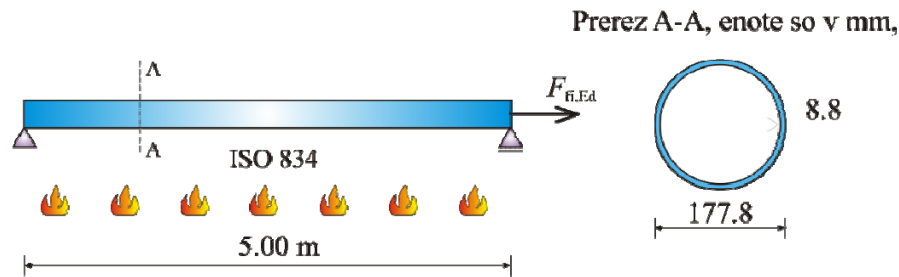
#### Kontrola v območju obtežbe

Skladno z zahtevo za kontrolo v območju obtežbe (1) mora biti projektna odpornost jeklene palice večja od projektne obremenitve za zahtevano požarno odpornost  $t_{fi,req} = 30 \text{ min}$ . Požarno odpornost  $N_{fi,0,Rd}$  take palice določimo skladno z enačbo (53).

$$A_m = \pi D = 0.556 \text{ m}$$

$$V \text{ (iz tabele)} = 0.004672 \text{ m}^2$$

$$A_m^* / V = A_m / V = 0.556 / 0.004672 = 119 \text{ m}^{-1}$$



Slika 9: Geometrijski podatki in podatki o obtežbi.

Interpolacija med vrednostmi 100 in 200 v preglednici I-1 nam da vrednost temperature po 30 minutah požara  $780\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Z interpolacijo v preglednici II-2 pa določimo vrednost za redukcijski factor  $k_{y,0}$  za napetost tečenja jekla pri temperaturi jekla  $\theta_a = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$ , doseženi v času  $t_{req}$ . Dobimo vrednost  $k_{y,0} = 0.134$ . Izračunamo požarno odpornost  $N_{fi,0,Rd}$  take palice kot:

$$f_{y,0} = k_{y,0} f_y = 0.134 \cdot 27.5 = 3.69 \text{ kN/cm}^2$$

$$N_{fi,0,Rd} = A f_{y,0} = 46.72 \cdot 3.69 = 172.4 \text{ kN} > F_{fi,Ed} = 150 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Kot vidimo je požarna odpornost nateznega elementa  $N_{fi,0,Rd}$  večja od požarne obremenitve  $F_{fi,d}$ . Varnostni v smislu obtežbe znaša  $(172.4 - 150)/150 = 15\%$ .

### Kontrola v časovnem območju

Pri kontroli v časovnem območju mora skladno z (2) je projektna vrednost požarne odpornosti  $t_{d,fi}$  biti večja od zahtevanega časa požarne odpornosti  $t_{fi,req} = 30 \text{ min}$ . Požarno odpornost dosežemo kadar velja  $N_{fi,0,Rd} = F_{fi,Ed}$ . Iz te enakosti izračunamo:

$$N_{fi,0,Rd} = A f_{y,0} = 46.72 \cdot f_{y,0} = 150 \Rightarrow f_{y,0} = 3.21 \text{ kN/cm}^2$$

$$k_{y,0} = f_{y,0} / f_y = 3.21 / 27.5 = 0.1167$$

Z interpolacijo iz preglednice II-2 določimo temperaturo, ki ustreza izračunanemu faktorju  $k_{y,0}$ . Dobimo temperaturo, ki znaša  $794\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Iz preglednice I-1 z dvojno interpolacijo med vrednostmi za  $A_m / V = 119 \text{ m}^{-1}$  in čase 30 ter 34 minut dobimo čas  $t_{d,fi} = 31.3 \text{ minut}$ . Varnost v smislu časa znaša dobro minuto.

### Kontrola v temperaturnem območju

Kontrolo v tem območju določimo skladno z izrazom (82).

$$R_{fi,d,0} = A f_y = 46.72 \cdot 27.5 = 1285 \text{ kN}$$

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0} = 150 / 1285 = 0.1167$$

$$\theta_{a,cr} = 39.19 \ln \left[ \frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482 = 39.19 \ln \left[ \frac{1}{0.9674 \cdot 0.1167^{3.833}} - 1 \right] + 482$$

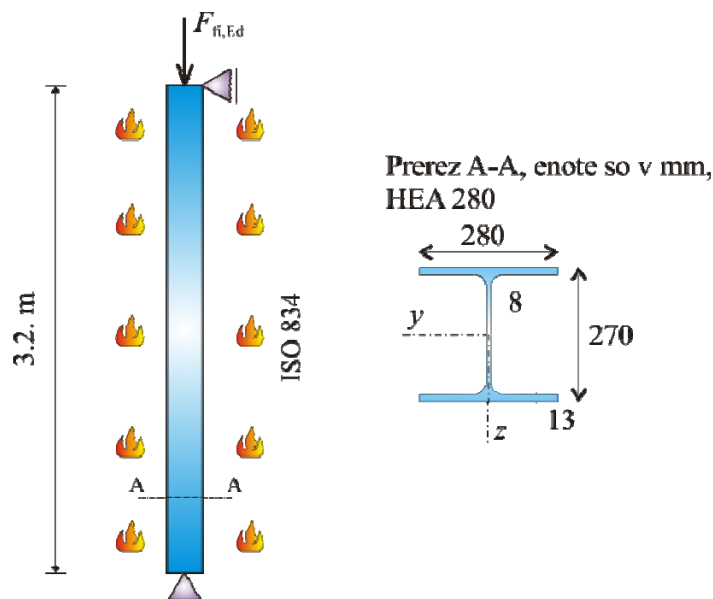
$$= 806^\circ\text{C}$$

Vidimo, da razlika med kritičnimi temperaturami v časovnem območju in temperaturnem območju majhna.

### 3.4.6.2 Steber izpostavljen požaru ISO 834 in centrični tlačni osni sil

Obravnavamo nezaščiteno steber prečnega prereza HEA 280, dolžine 3.2 m, ki iz jekla S235 in je z vseh štirih strani izpostavljen standardnemu požaru ISO 834. Obremenjen je z centrično osno silo. Obremenitev v požarnem projektnem stanju znaša  $F_{fi,Ed} = 520 \text{ kN}$ . Določi kritični čas porušitve  $t_{d,fi}$ . Upoštevamo, da je steber v šibki smeri ustrezno podprt in da je uklon v tej smeri onemogočen.

Kolikšna debelina požarne zaščite v obliki požarno odpornih plošč je potreba, da dosežemo odpornost R90? Pri tem upoštevamo konstantno prevodnost požarne zaščite, ki znaša  $0.18 \text{ W/mK}$ .



Slika 10: Geometrijski podatki in podatki o obtežbi.

Požarno odpornost tlačno obremenjenega elementa določimo skladno s postopkom, ki smo ga predstavili v razdelku 3.4.3.3.

Najprej določimo v kateri razred kompaktnosti spada prečni prerez:

$$\varepsilon = 0.85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.85$$

$$\text{pasnice: } c/t_f = 14/1.3 = 10.8 < 15\varepsilon = 12.75 \Rightarrow 3. \text{ razred}$$

$$\text{stojina: } d/t_w = 19.6/0.8 = 24.5 < 33\varepsilon = 28.1 \Rightarrow 1. \text{ razred}$$

Prerez je v 3. razredu kompaktnosti. V nadaljevanju določimo faktor relativne vitkosti  $\bar{\lambda}$  na enak način kot pri sobni temperaturi skladno s SIST EN 1993-1-1.

Vitkost pri upogibnem uklonu:

$$\lambda = l_f / i_y = 320 / 11.90 = 26.89$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \sqrt{\frac{21000}{23.5}} = 93.9$$

Faktor relativne vitkosti  $\bar{\lambda}$  pri sobni temperaturi znaša:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{26.89}{93.9} = 0.286$$

Ker je relativna vitkost  $\bar{\lambda}_0$  funkcija temperature določimo kritično temperaturo z iterativnim postopkom, kjer v prvi iteraciji za prvi približek vzamemo  $\bar{\lambda}_0 = 1.2\lambda$ .

*Prva iteracija*

$$\bar{\lambda}_0 = 1.2\lambda = 1.2 \cdot 0.286 = 0.343$$

Faktor nepopolnosti:

$$\alpha = 0.65 \sqrt{235 / f_y} = 0.65$$

$$\varphi_0 = 0.5 \left( 1 + \alpha \bar{\lambda}_0 + \bar{\lambda}_0^2 \right) = 0.5 \left( 1 + 0.65 \cdot 0.343 + 0.343^2 \right) = 0.670$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_0 + \sqrt{\varphi_0^2 - \bar{\lambda}_0^2}} = \frac{1}{0.670 + \sqrt{0.670^2 - 0.343^2}} = 0.803$$

Enačba nosilnosti (56):

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,0} f_y / \gamma_{M,fi} = N_{fi,Ed}$$

$$\Rightarrow k_{y,0} = N_{fi,Ed} / \left( \chi_{fi} A f_y / \gamma_{M,fi} \right) = 520 / \left( 0.803 \cdot 97.3 \cdot 23.5 / 1.0 \right) = 0.283$$

Sedaj iz preglednice II-2 za prej izračunan redukcijski  $k_{y,0}$  z interpolacijo določimo kritično temperaturo jekla  $\theta_{a,crit} = 678^\circ\text{C}$ .

Preglednica II-3 pa nam da vrednost redukcijskega faktorja za elastični modul  $k_{E,0} = 0.170$  za to kritično temperaturo jekla.

*Druga iteracija*

V drugi iteraciji cel postopek ponovim, pri tem pa upoštevamo kritično temperaturo jekla, ki smo jo določili v prvi iteraciji

$$\bar{\lambda}_0 = \bar{\lambda} \sqrt{k_{y,0} / k_{E,0}} = 0.286 \sqrt{0.283 / 0.170} = 0.369$$

$$\varphi_0 = 0.5 \left( 1 + \alpha \bar{\lambda}_0 + \bar{\lambda}_0^2 \right) = 0.5 \left( 1 + 0.65 \cdot 0.369 + 0.369^2 \right) = 0.688$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} = \frac{1}{0.688 + \sqrt{0.688^2 - 0.369^2}} = 0.788$$

$$\Rightarrow k_{y,0} = N_{fi,Ed} / (\chi_{fi} A f_y / \gamma_{M,fi}) = 520 / (0.788 \cdot 97.3 \cdot 23.5 / 1.0) = 0.287$$

Kritično temperatura jekla znaša  $\theta_{a,crit} = 676^{\circ}\text{C}$  (Preglednica II-2)

$$k_{E,0} = 0.173 \text{ (Preglednica II-3)}$$

*Tretja iteracija*

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{k_{y,0} / k_{E,0}} = 0.286 \sqrt{0.287 / 0.173} = 0.369$$

Kot vidimo smo v tretji iteraciji dosegli enak rezultat za paramater  $\bar{\lambda}_{\theta}$  kot v drugi iteraciji, s tem je postopek iteriranja končan in dosežena kritična temperatura jekla znaša  $\theta_{a,crit} = 676^{\circ}\text{C}$ .

Na osnovi izračunane kritične temperature jekla in faktorja  $A_m^* / V$  iz preglednice I-1 določimo kritični čas porušitve  $t_{d,fi}$ .

Za  $H$  prerez velja:

$$A_m^* / V = k_{sh} A_{m,b} / V = 0.9 \cdot 2 \cdot (0.27 + 0.28) / 0.00973 = 102 \text{ m}^{-1} \approx 100 \text{ m}^{-1}$$

Z interpolacijo iz tabele, kjer upoštevamo  $A_m^* / V = 100 \text{ m}^{-1}$  in  $\theta_{a,crit} = 676^{\circ}\text{C}$  dobimo, da je kritični čas porušitve enak  $t_{d,fi} = 19.9 \text{ min}$ .

### **Požarno zaščiten steber**

Ob upoštevanju kritične temperature jekla  $\theta_{a,crit} = 676^{\circ}\text{C}$  in zahtevani požarni odpornosti 90 minut iz preglednice I-2 z interpolacijo med vrednostmi  $613^{\circ}\text{C}$  za  $k_p = 1000$  in  $681^{\circ}\text{C}$  za  $k_p = 1300$  dobimo vrednost za faktor  $k_p = 1278 \text{ W} / \text{m}^3\text{K}$ . Za ta faktor je temperatura v jeklenem elementu po 90 minutah enaka  $676^{\circ}\text{C}$ .

Za zaščiten prerez s požarnimi oblogami izračunamo najprej ustrezno površino materiala požarne zaščite elementa, nato še ustrezno debelino požarne zaščite:

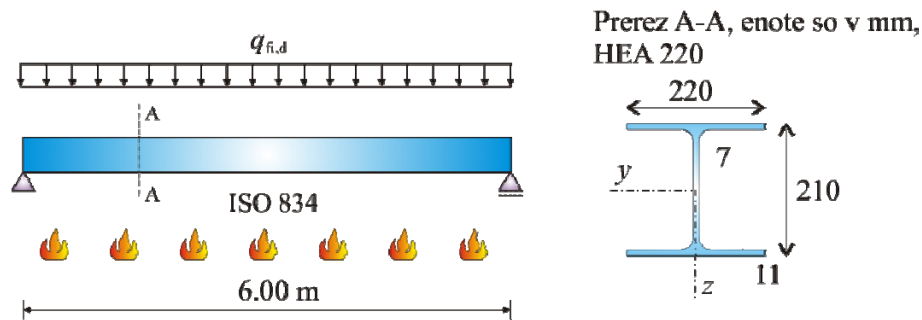
$$A_p = 2(h + b) = 2 \cdot (0.27 + 0.28) = 1.10 \text{ m}$$

$$V = 97.3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ (iz tabel)}$$

$$k_p = \frac{\lambda_p A_p}{d_p V} \Rightarrow d_p = 0.18 \cdot (1.10 / 0.00973) / 1278 = 0.0159 \text{ m} \approx 16 \text{ mm}.$$

### 3.4.6.3 Upogni nosilec HEA 220 izpostavljen bočni zvrnitvi

Obravnavamo 6 metrov dolg nosilec prečnega prereza HEA 220 iz jekla S275, ki je obtežen z enakomerno zvezno obtežbo. Vrednost zvezno obtežbe pri projektnem požarnem stanju  $q_{fi,d}$  znaša 9 kN/m. Določi kritično temperaturo  $\theta_{a,com}$  tako obremenjenega nosilca.



Slika 11: Geometrijski podatki in podatki o obtežbi.

Steber HEA 220:

$$h = 21 \text{ cm}, b = 22 \text{ cm}, t_f = 1.1 \text{ cm}, t_w = 0.7 \text{ cm}, r = 1.8 \text{ cm}$$

$$W_{el,y} = 515 \text{ cm}^3, I_z = 1950 \text{ cm}^4, I_\omega = 193300 \text{ cm}^6, I_t = 28.5 \text{ cm}^4$$

Kompaktnost prereza:

$$\varepsilon = 0.85 \sqrt{\frac{235}{275}} = 0.79$$

$$\text{pasnice: } c / t_f = 11 / 1.1 = 10 < 15\varepsilon = 11.79 \Rightarrow 3. \text{ razred}$$

$$\text{stojina: } d / t_w = 15.2 / 0.7 = 21.7 < 72\varepsilon = 56.8 \Rightarrow 1. \text{ razred}$$

Prerez je v 3. razredu kompaktnosti

Izračun obremenitve:

$$M_{fi,Ed} = q_{fi,d} l^2 / 8 = 4050 \text{ kNcm}$$

Za nadaljnji račun potrebujemo vrednost kritičnega momenta bočne zvrnitve in relativno vitkost pri bočni zvrnitvi, ki ju določimo pri sobni temperaturi skladno s SIST EN 1993-1-2:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z}} + (C_2 z_g)^2 - C_2 z_g = 16214 \text{ kNcm}$$

pri tem smo upoštevali:

$$L = 6 \text{ m},$$

$$z_g = 0.5h = 10.5 \text{ cm}$$

$$C_1 = 1.132, C_2 = 0.459 \text{ za nosilec, ki je obtežen z zvezno obtežb.}$$

Relativna vitkost pri bočni zvrnitvi pri sobni temperaturi je:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{el,y} f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{515 \cdot 27.5}{16214}} = 0.935.$$

Do porušitve nosilce pride kadar velja:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_y k_{y,\theta,com} f_y / \gamma_{M,fi} = M_{fi,Ed} = 4050 \text{ kNcm}$$

Kritično temperaturo pa določimo iz koeficienta  $k_{y,\theta,com}$

$$\Rightarrow k_{y,\theta,com} = M_{fi,Ed} / (\chi_{LT,fi} W_y f_y / \gamma_{M,fi})$$

Ker je redukcijski faktor za bočno zvrnitev pri požarnem projektne stanju  $\chi_{LT,fi}$  odvisen od temperature, postopamo tukaj podobno kot v primeru tlačnih elementov. Torej do kritične temperature tlačene pasnice  $\theta_{a,com}$  pridemo z iterativnim reševanjem.

*Prva iteracija*

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = 1.2 \bar{\lambda}_{LT} = 1.122$$

$$\alpha = 0.65 \sqrt{235 / f_y} = 0.60$$

$$\phi_{LT,\theta,com} = 0.5 \left( 1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2 \right) = 0.5 (1 + 0.60 \cdot 1.122 + 1.122^2) = 1.466$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}} = \frac{1}{1.466 + \sqrt{1.466^2 - 1.122^2}} = 0.415$$

$$\Rightarrow k_{y,\theta,com} = M_{fi,Ed} / (\chi_{LT,fi} W_y f_y / \gamma_{M,fi}) = 4050 / (0.415 \cdot 515 \cdot 27.5 / 1.0) = 0.689$$

Pripadajoča kritična temperatura jekla znaša  $\theta_{a,com} = 529^\circ\text{C}$  (Preglednica II-2)

$$k_{E,\theta} = 0.516 \text{ (Preglednica II-3)}$$

*Druga iteracija*

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{k_{y,\theta} / k_{E,\theta}} = 0.935 \sqrt{0.689 / 0.516} = 1.081$$

$$\phi_{LT,\theta,com} = 0.5 \left( 1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2 \right) = 0.5 (1 + 0.60 \cdot 1.081 + 1.081^2) = 1.409$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}} = \frac{1}{1.409 + \sqrt{1.409^2 - 1.081^2}} = 0.432$$

$$\Rightarrow k_{y,\theta,com} = M_{fi,Ed} / (\chi_{LT,fi} W_y f_y / \gamma_{M,fi}) = 4050 / (0.432 \cdot 515 \cdot 27.5 / 1.0) = 0.662$$

Pripadajoča kritična temperatura jekla znaša  $\theta_{a,com} = 538^\circ\text{C}$  (Preglednica II-2)

$$k_{E,\theta} = 0.490 \text{ (Preglednica II-3)}$$

*Tretja iteracija*

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{k_{y,\theta} / k_{E,\theta}} = 0.935 \sqrt{0.662 / 0.490} = 1.087$$

$$\phi_{LT,\theta,com} = 0.5 \left( 1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + \left( \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} \right)^2 \right) = 0.5 \left( 1 + 0.60 \cdot 1.087 + 1.087^2 \right) = 1.417$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{\left[ \phi_{LT,\theta,com} \right]^2 - \left[ \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} \right]^2}} = \frac{1}{1.417 + \sqrt{1.417^2 - 1.122^2}} = 0.430$$

$$\Rightarrow k_{y,\theta,com} = M_{fi,Ed} / \left( \chi_{LT,fi} W_y f_y / \gamma_{M,fi} \right) = 4050 / \left( 0.430 \cdot 515 \cdot 27.5 / 1.0 \right) = 0.665$$

Pripadajoča kritična temperatura jekla znaša  $\theta_{a,com} = 537^\circ\text{C}$  (Preglednica II-2)

Ker se izračunana kritična temperatura med tretjo in drugo iteracijo razlikuje za 0.2% postopek iteriranja zaključimo. Kritična temperatura tlačene pasnice tako znaša  $\theta_{a,com} = 537^\circ\text{C}$ .



## **4 ZAKLJUČEK**

V nalogi smo predstavili postopke za določitev nosilnosti jeklenih elementov po poenostavljenih računskih metodah, ki jih predlaga standard SIST EN 1993-1-2:2005. Metoda je razdeljena v dva matematično nepovezana dela. V prvem delu analize v odvisnosti od požarne obtežbe določimo časovno razporeditev temperatur obravnavanega elementa med požarom, v drugem delu analize pa izračunamo ob znanih temperaturah elementa njegovo požarno odpornost. Kot smo videli pa zaradi napetostno-deformacijske zveze po SIST EN 1993-1-2:2005 lahko vrstni red tudi obrnemo in na osnovi projektne požarne obremenitve določimo kritično temperaturo in posledično še kritični čas. Metoda dokazovanja nosilnosti jeklenih elementov pri povišani temperaturi je strukturno podobna metodam projektiranja jeklenih elementov pri sobni temperaturi. Kljub temu pa je za vsakdanjo prakso priporočljiva izdelava dodatnih tabel, grafov in morebiti tudi izdelava manjših računalniških programov za račun prikazanih kontrol. Nekaj takšnih dodatnih tabel in grafov smo podali tudi v prilogah.

## 5 LITERATURA

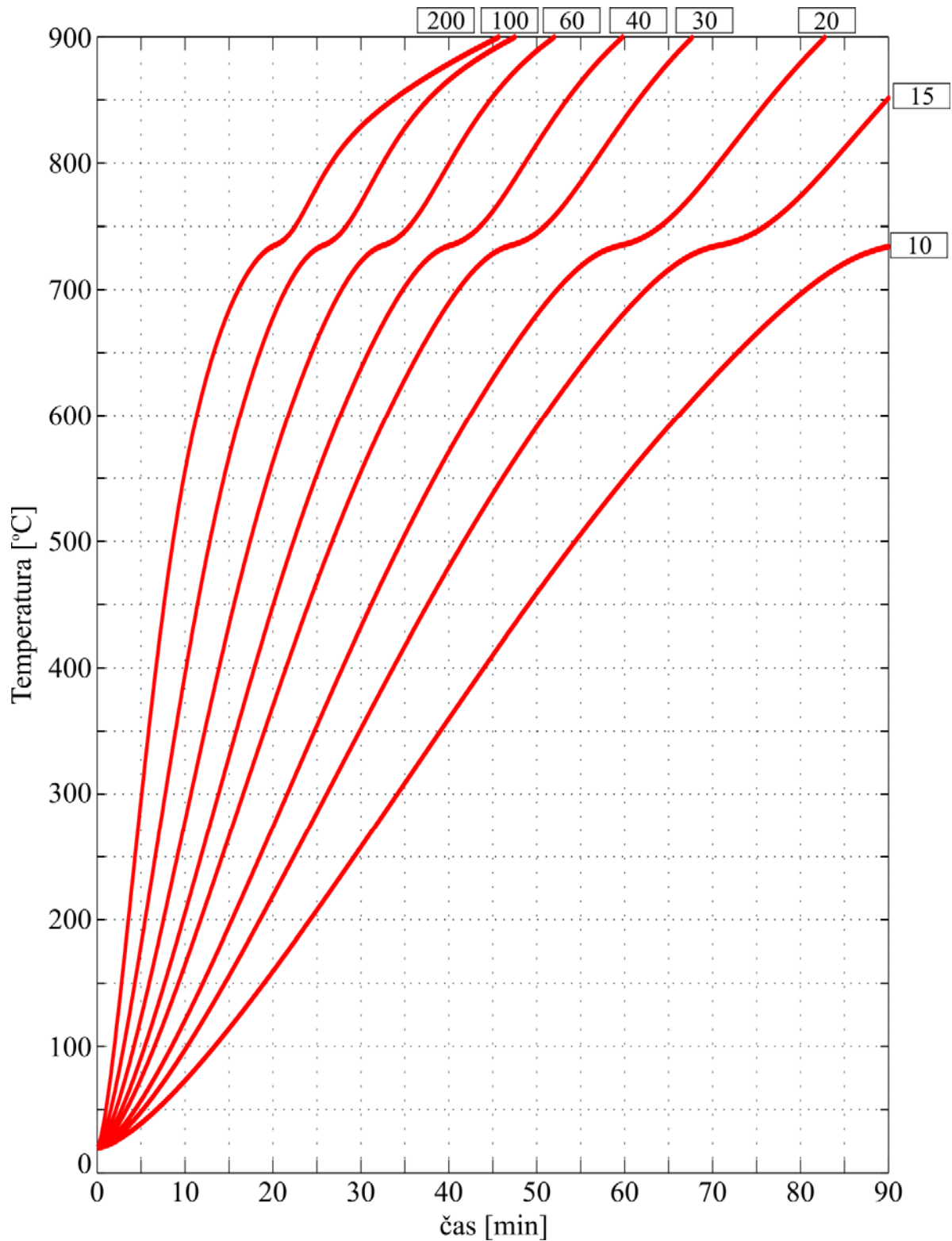
- Buchanan A.H., Structural design for fire safety, University of Canterbury, New Zeland, John Willey & Sons, Ltd., 2005.
- Franssen J-M., Zaharia R., Design os steel structures subjected to fire, Les Editions de l'Universitete de Liege, Liege, 2006.
- Hozjan T., Nelinearna požarna analiza jeklenih konstrukcij, Gradbeni vestnik, 56 (4), 86–94, 2009.
- Hozjan T., Nelinearna analiza vpliva požara na sovprežne linijske konstrukcije, Doktorska disertacija, FGG, Univerza v Ljubljani, 2009.
- Hozjan T., Turk G., Srpčič, S., Fire Analysis of Steel Frames with the use of Artificial Neural Networks., J. Const. Steel Res., 63(10): 1396–1403., 2007
- Purkiss J.A., Fire safety engineering design of structures, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1996.
- Slovenski standard SIST EN 1990: 2004: Osnove projektiranja konstrukcij, 2004.
- Slovenski standard SIST EN 1991-1-1: 2004: Vplivi na konstrukcije – Del 1-1: Splošni vplivi – Prostorninske teže , lastna teža, koristna obtežba stavb, 2004.
- Slovenski standard SIST EN 1991-1-2: 2004, Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – Del 1-2: Splošni vplivi – Vplivi na konstrukcije, izpostavljene požaru, 2004.
- Slovenski standard SIST EN 1993-1-1: 2005, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – Del 1-1: Splošna pravila in pravila za stavbe, 2005.
- Slovenski standard SIST EN 1993-1-2: 2005, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – Del 1-2: Splošna pravila – Požarnoodporno projektiranje, 2005.



**PRILOGA I – Temperature v nezaščitenih in zaščitenih jeklenih prerezih**

Preglednica I-1. Razvoj temperature nezaščitenih jeklenih elementov za različne vrednosti faktorja  $A_m^* / V$  [ $m^{-1}$ ]

$A_m / V$ [ $m^{-1}$ ]	10	15	20	30	40	60	100	200
Čas [min]	Temperatura nezaščitenih jeklenih elementov							
0	20	20	20	20	20	20	20	20
5	39	48	57	74	91	123	180	295
10	73	97	121	165	205	278	395	556
12	89	120	149	204	255	342	471	619
14	105	143	179	245	305	404	538	665
16	123	168	210	287	354	462	593	699
18	141	193	242	329	403	515	640	722
20	159	219	274	370	449	563	678	734
22	178	245	306	410	493	605	707	745
24	198	272	338	449	534	643	727	768
26	218	298	370	486	571	675	736	793
28	237	325	401	522	606	702	747	813
30	258	352	432	555	637	722	768	829
32	278	378	462	586	666	733	794	841
34	298	404	491	615	691	740	817	852
36	319	430	519	642	712	754	837	861
38	339	455	546	667	727	775	853	870
40	360	480	571	689	735	799	866	879
42	380	503	595	708	741	823	876	886
44	400	527	618	723	753	843	886	894
46	420	549	640	732	771	861	894	901
48	440	570	661	737	793	876	901	907
50	459	591	680	745	815	889	908	914
52	478	611	697	758	836	900	915	920
54	497	630	712	775	855	909	921	926
56	515	648	724	795	873	917	927	931
58	533	666	732	815	888	924	933	937
60	550	682	736	835	901	931	938	942
62	567	697	741	854	913	937	943	947
64	583	710	750	872	923	943	949	952
66	599	721	762	887	932	948	953	957
68	615	729	777	902	939	953	958	961
70	630	734	794	914	946	958	963	966
72	644	737	812	925	953	963	967	970
74	658	742	829	935	959	967	971	974
76	672	750	847	944	964	972	976	978
78	685	761	864	952	969	976	980	982
80	697	774	879	959	974	980	984	986
82	707	788	894	966	978	984	988	990
84	717	804	908	972	983	988	991	994
86	724	820	920	977	987	992	995	997
88	730	836	932	983	991	995	999	1001
90	734	851	942	987	995	999	1002	1004



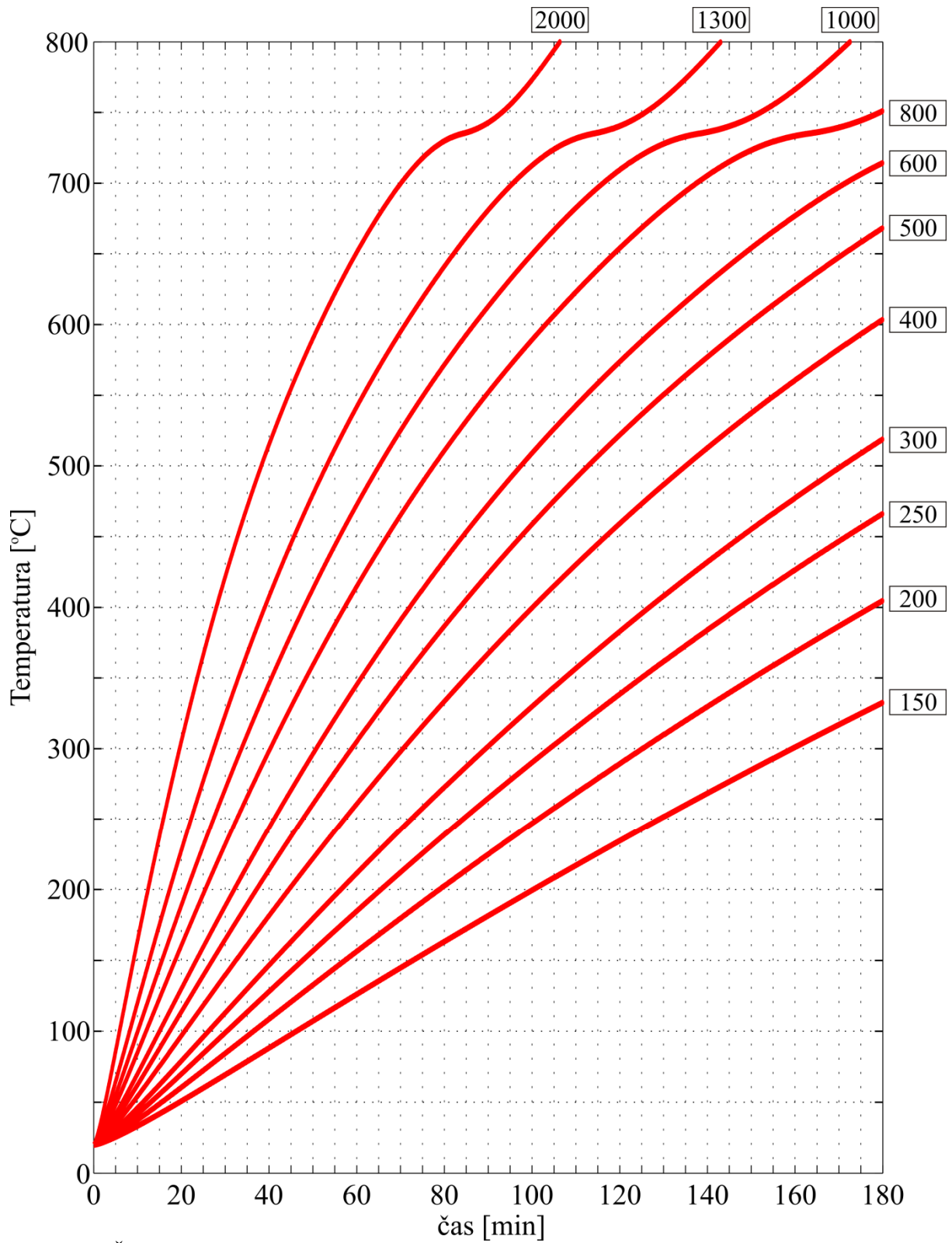
Slika I-1. Časovni razvoj temperature nezaščiten jeklenih elementov izpostavljenim standardnemu požaru ISO 834 za različne faktorje  $A_m^* / V$  [m<sup>-1</sup>].

Preglednica I-2(a). Razvoj temperature zaščitnih jeklenih elementov za različne vrednosti faktorja  $k_p$  [ $W/m^3K$ ]

$k_p$ [ $W/m^3K$ ]	150	200	250	300	400	500
Čas [min]	Temperatura zaščitnih jeklenih elementov					
0	20	20	20	20	20	20
5	25	27	29	31	34	38
10	33	38	42	46	54	62
15	42	49	56	62	75	88
20	51	60	70	79	97	114
25	60	72	84	96	118	139
30	69	84	99	113	140	165
35	79	97	114	130	161	190
40	88	109	128	147	181	214
45	98	121	142	163	202	238
50	107	133	157	179	222	261
55	117	145	171	196	241	283
60	126	156	185	211	261	305
65	135	168	198	227	279	326
70	145	180	212	242	298	347
75	154	191	226	258	316	367
80	163	203	239	273	333	387
85	172	214	252	287	351	406
90	181	225	265	302	367	424
95	190	236	278	316	384	442
100	199	247	290	330	400	459
105	208	258	302	343	415	475
110	217	268	315	357	430	491
115	226	279	327	370	445	507
120	234	289	338	383	459	522
125	243	300	350	396	473	536
130	252	310	362	408	487	550
135	260	320	373	420	500	564
140	268	330	384	432	513	577
145	277	339	395	444	525	590
150	285	349	406	455	537	602
155	293	359	416	466	549	614
160	301	368	426	477	561	625
165	309	377	437	488	572	637
170	317	387	447	498	583	648
175	325	396	456	509	593	658
180	333	405	466	519	603	668

Preglednica I-2(b). Razvoj temperature zaščitene jeklene elemente za različne vrednosti faktorja  $k_p$  [W/m<sup>3</sup>K]

$k_p$ [W/m <sup>3</sup> K]	600	800	1000	1300	2000
Čas [min]	Temperatura zaščitene jeklene elemente				
0	20	20	20	20	20
5	41	48	55	64	86
10	70	85	100	120	164
15	100	123	145	175	238
20	130	160	189	228	305
25	159	197	231	277	366
30	188	232	271	324	421
35	217	266	310	367	471
40	244	298	346	408	515
45	270	329	380	445	555
50	296	359	413	480	590
55	321	388	444	512	622
60	345	415	472	542	651
65	368	441	500	569	677
70	391	465	525	595	700
75	413	489	549	619	718
80	433	511	572	641	730
85	453	532	593	662	736
90	473	552	613	681	743
95	491	571	632	698	755
100	509	589	650	712	773
105	526	606	667	724	794
110	543	623	682	732	816
115	558	639	697	736	838
120	574	654	709	740	860
125	588	668	720	748	881
130	602	682	728	760	900
135	616	694	733	774	918
140	629	705	736	790	935
145	642	715	740	806	951
150	654	723	747	824	965
155	666	729	755	841	978
160	677	733	766	858	991
165	687	736	779	875	1002
170	697	739	793	891	1013
175	706	744	807	907	1023
180	714	751	822	922	1032



Slika I-2. Časovni razvoj temperature zaščitnih jeklenih elementov izpostavljenim standardnemu požaru ISO 834 za različne faktorje  $k_p$  [W/m<sup>3</sup>K].



**PRILOGA II – Vrednosti redukcijskih faktorjev**Preglednica II-1: Redukcijski faktor  $k_{p,0}$  za mejo proporcionalnosti konstrukcijskega jekla pri povišanih temperaturah.

redukcijski faktor za mejo proporcionalnosti $k_{p,p}$										
P [°C]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100	1	0.981	0.961	0.942	0.923	0.903	0.884	0.865	0.846	0.826
200	0.807	0.788	0.768	0.749	0.729	0.710	0.691	0.671	0.652	0.632
300	0.613	0.594	0.574	0.555	0.536	0.516	0.497	0.478	0.459	0.439
400	0.420	0.414	0.408	0.402	0.396	0.390	0.384	0.378	0.372	0.366
500	0.360	0.342	0.324	0.306	0.288	0.270	0.252	0.234	0.216	0.198
600	0.180	0.169	0.159	0.148	0.138	0.128	0.117	0.107	0.096	0.085
700	0.075	0.072	0.070	0.068	0.065	0.063	0.060	0.058	0.055	0.053
800	0.050	0.049	0.048	0.046	0.045	0.044	0.043	0.041	0.040	0.039
900	0.037	0.036	0.035	0.034	0.033	0.031	0.030	0.029	0.028	0.026
1000	0.025	0.024	0.022	0.021	0.020	0.019	0.018	0.016	0.015	0.014
1100	0.013	0.011	0.010	0.009	0.007	0.006	0.005	0.004	0.002	0.001

Preglednica II-2: Redukcijski faktor  $k_{y,0}$  za napetost tečenja konstrukcijskega jekla pri povišanih temperaturah.

redukcijski faktor za napetost tečenja $k_{y,p}$										
P [°C]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
200	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
300	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
400	1	0.978	0.956	0.934	0.912	0.890	0.868	0.846	0.824	0.802
500	0.780	0.749	0.718	0.687	0.656	0.625	0.594	0.563	0.532	0.501
600	0.470	0.446	0.422	0.398	0.374	0.350	0.326	0.302	0.278	0.254
700	0.230	0.218	0.206	0.194	0.182	0.170	0.158	0.146	0.134	0.122
800	0.110	0.105	0.100	0.095	0.090	0.085	0.080	0.075	0.070	0.065
900	0.060	0.058	0.056	0.054	0.052	0.050	0.048	0.046	0.044	0.042
1000	0.040	0.038	0.036	0.034	0.032	0.030	0.028	0.026	0.024	0.022
1100	0.020	0.018	0.016	0.014	0.012	0.010	0.008	0.006	0.004	0.002

Preglednica II-3: Redukcijski faktor  $k_{E,0}$  za elastično modul konstrukcijskega jekla pri povišanih temperaturah.

redukcijski faktor za elastični modul $k_{E,P}$										
P [°C]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100	1	0.990	0.980	0.970	0.960	0.950	0.940	0.930	0.920	0.910
200	0.900	0.890	0.880	0.870	0.860	0.850	0.840	0.830	0.820	0.810
300	0.800	0.790	0.780	0.770	0.760	0.750	0.740	0.730	0.720	0.710
400	0.700	0.690	0.680	0.670	0.660	0.650	0.640	0.630	0.620	0.610
500	0.600	0.571	0.542	0.513	0.484	0.455	0.426	0.397	0.368	0.339
600	0.310	0.292	0.274	0.256	0.238	0.220	0.202	0.184	0.166	0.148
700	0.130	0.126	0.122	0.118	0.114	0.110	0.106	0.102	0.098	0.094
800	0.090	0.082	0.073	0.065	0.057	0.048	0.040	0.032	0.023	0.015
900	0.007	0.011	0.014	0.018	0.022	0.026	0.030	0.034	0.037	0.041
1000	0.045	0.043	0.041	0.038	0.036	0.034	0.032	0.029	0.027	0.025
1100	0.022	0.020	0.018	0.016	0.014	0.011	0.009	0.007	0.005	0.002