

# Požarna odpornost jeklenih konstrukcij – določitev mehanske odpornosti



Tomaž Hozjan

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

soba: 503

# Mehansko obnašanje jeklenih konstrukcij v požaru – viskozne deformacije

Viskozne deformacije (nad 400 °C),

- Časovno in napetostno odvisen proces
  - (raziskave, problem pridobiti materialne parametre, težko opisljivo)
- Poenostavitev skladno s SIST EN 1993-1-2
  - če je hitrost ogrevanja med 2 in 50 K/min lahko prispevek viskoznih deformacij k celotnim deformacijam zanemarimo, tako upoštevamo:
    - $\varepsilon_{\text{tot}} = \varepsilon_{\text{meh}} + \varepsilon_{\text{th}}$  (TRDNOST)

# Mehansko obnašanje jeklenih konstrukcij v požaru

Glavni parametri, ki vplivajo na obnašanje jeklenih konstrukcij v požaru so:

- Velikost temperature v jeklenem elementu;
- Velikost obtežbe na konstrukciji;
- Mehanske lastnosti jekla pri povišanih temperaturah;
- Geometrija in projektiranje konstrukcij (robustnost).

Skladno s standardi Evrokod požarno odpornost določimo na enak način kot pri sobni temperaturi, pri čemer je potrebno upoštevati vpliv temperature na obnašanje materiala in konstrukcije

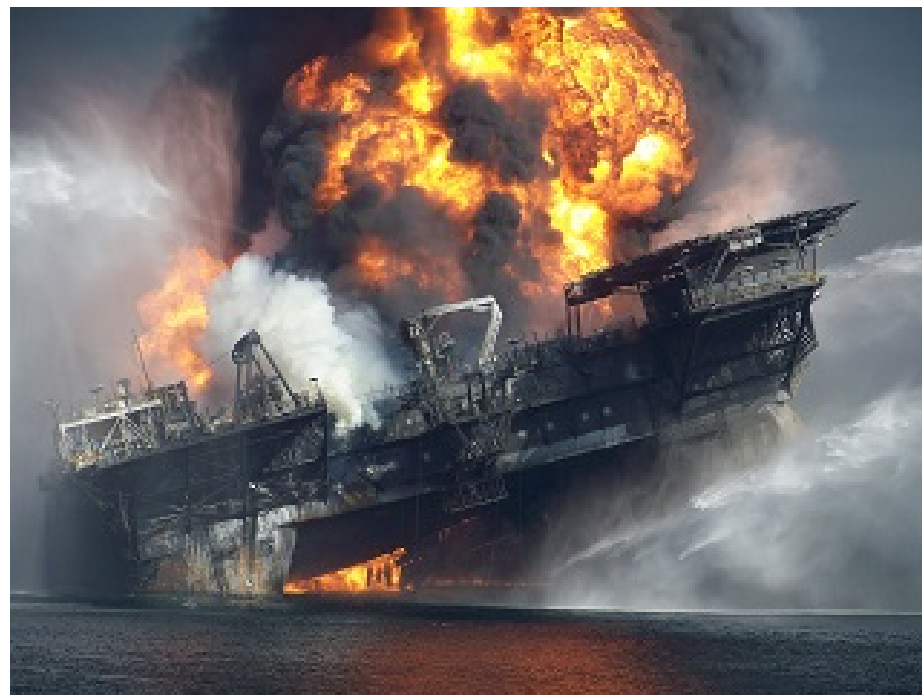
- Pri jeklenih konstrukcijah ta vpliv zajamemo z zmanjšanjem materialnih karakteristik

# Odziv jeklenih konstrukcij v požaru

Lokalna porušitev



Globalna porušitev



# Kriterij R - nosilnost

Skladno s standardom SIST EN 1993-1-2 je kriteriju R zadoščeno, če med trajanjem požara ***t* velja:**

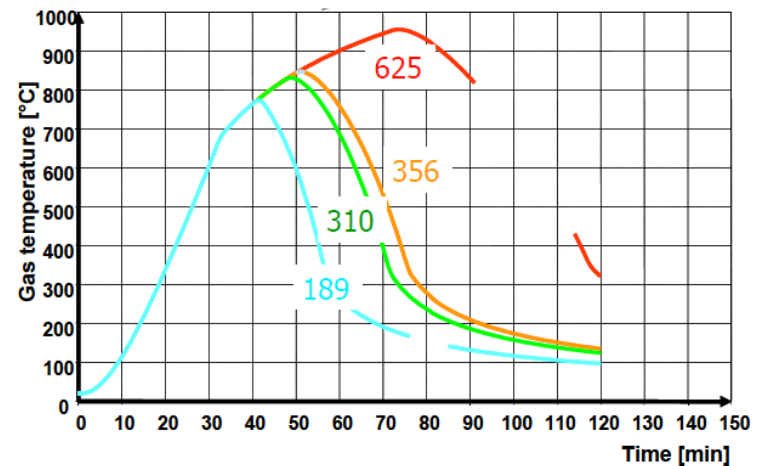
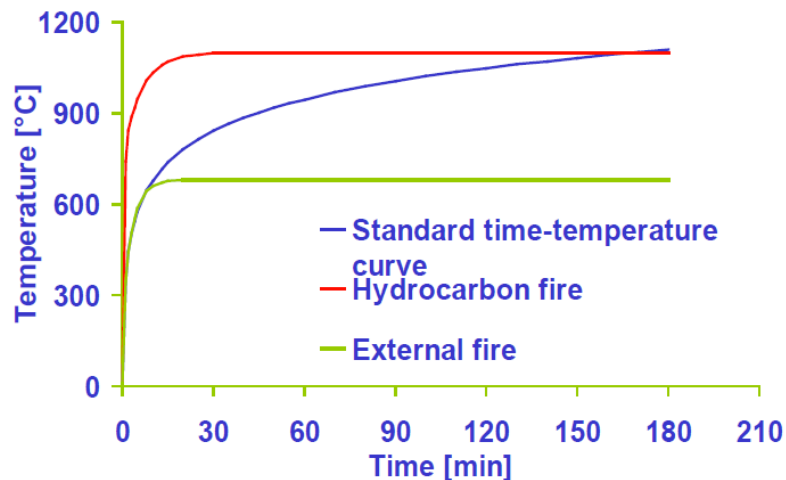
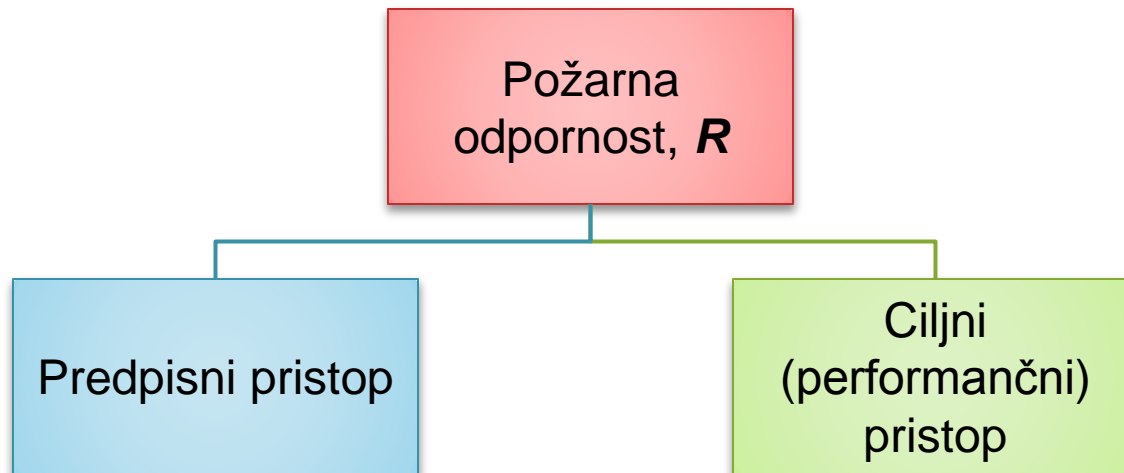
$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$$

Kjer sta:

$R_{fi,d,t}$  – pripadajoča nosilnost konstrukcije v požarnem projektnejem stanju

$E_{fi,d,t}$  – projektna vrednost notranjih sil pri požarnem projektnejem stanju, določena v skladu s SIST EN 1993-1-2 in ob upoštevanju vplivov toplotnih raztezkov

# Pristop k določitvi požarne odpornosti



# Določitev požarne odpornosti, skladno s SIST EN 1993-1-2

Določitev požarne odpornosti v drugih območjih:

Lahko določimo na "roke", večina EC3 metod

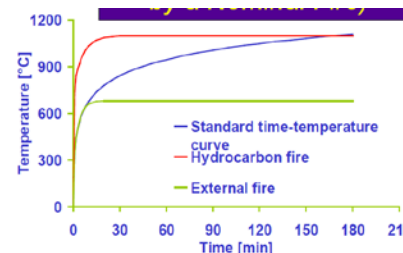
območje	enote	Požarna odpornost	$\geq$	Požarna obremenitev
Odpornost, napetost	kN, kNcm	$R_{fi,d,t}$	$\geq$	$E_{fi,d}$
Čas	minuta, ura	$t_{fi,d}$	$\geq$	$t_{fi,req}$
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	$T_{crit}$	$\geq$	$T_{konst}$ pri $t = t_{fi,req}$

Najpreprostejša oblika kontrole zajeta v EC3.

Določi (odčitaj) kritično temperaturo za izbrano obremenitev in jo primerjaj s projektno temperaturo.

# Možnosti uporabe različnih računskih metod za določitev požarne odpornosti jeklenih konstrukcij

## V primeru standardnega požara

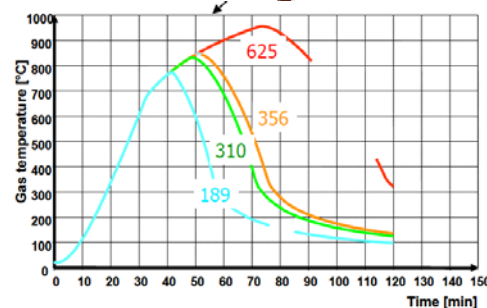


Analiza	Uporaba tabel	Enostavni računski modeli	Globalna analiza
Element konstrukcije	DA (ISO 834)	DA	DA
Podkonstrukcija	NE	DA (vprašanje veljavnosti)	DA
Globalna analiza	NE	NE	DA



# Možnosti uporabe različnih računskih metod za določitev požarne odpornosti jeklenih konstrukcij

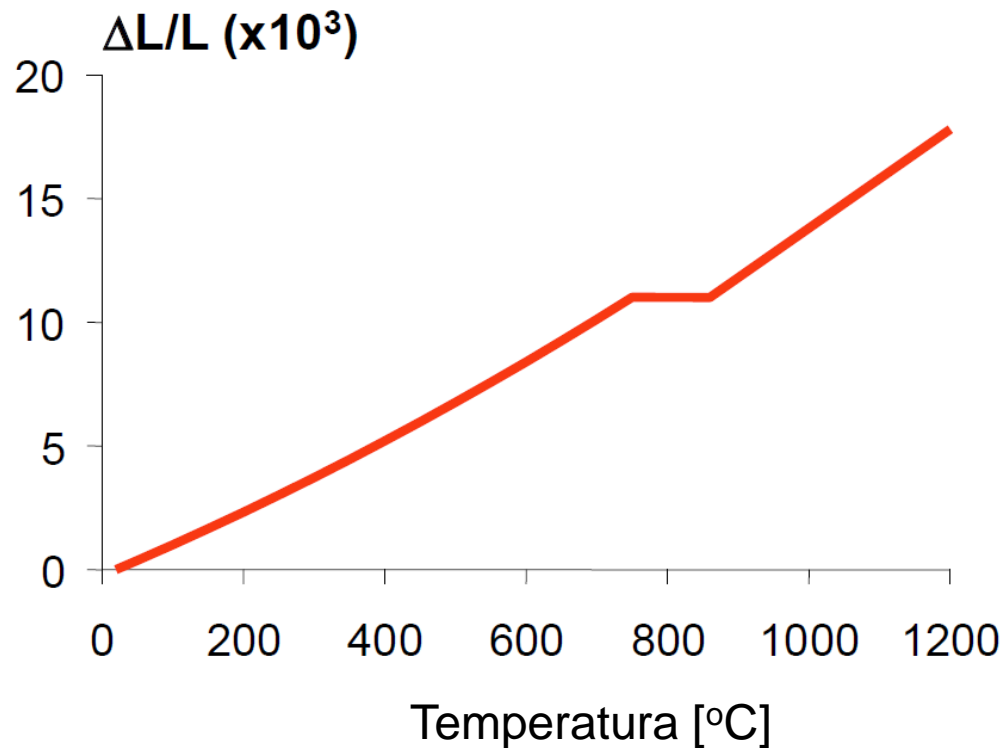
## V primeru naravnega požara



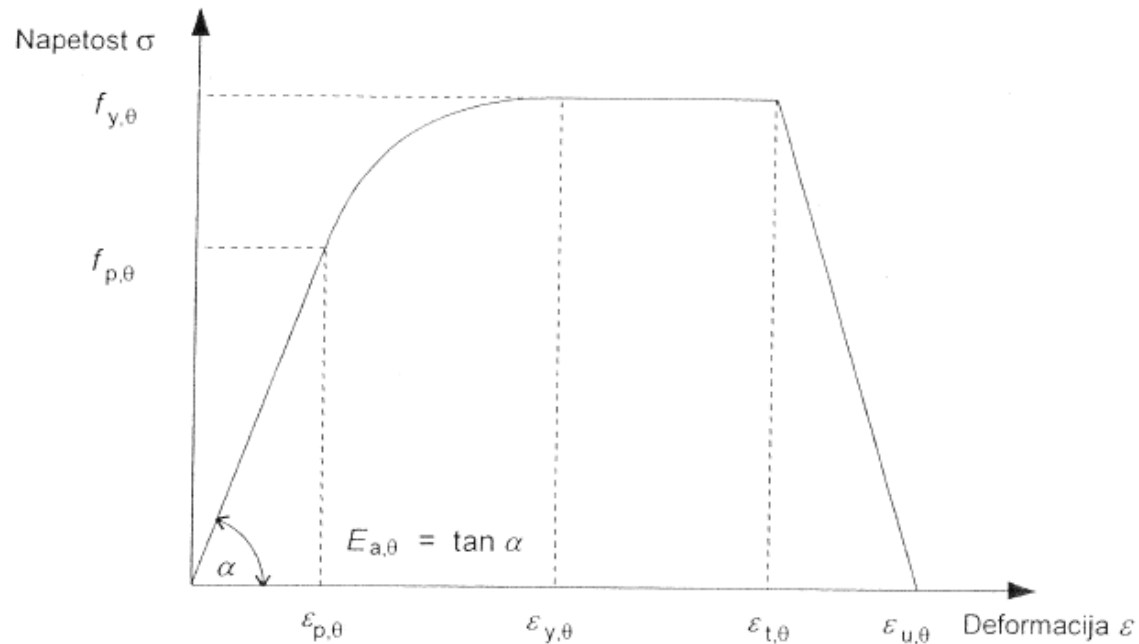
Analiza	Uporaba tabel	Enostavni računski modeli	Globalna analiza
Element konstrukcije	DA (če na voljo)	DA (če na voljo)	DA
Podkonstrukcija	NE	NE	DA
Globalna analiza	NE	NE	DA

# Materialne lastnosti jekla pri povišanih temperaturah

Relativni toplotni raztezek jekla – temperaturne deformacije  $\varepsilon_{th}$



# Napetostno deformacijska zveza jekla pri povišanih temperaturah



## Legenda:

$f_{y,\theta}$       efektivna napetost tečenja

$f_{p,\theta}$       meja proporcionalnosti

$E_{a,\theta}$       naklon linearnega elastičnega območja

$\epsilon_{p,\theta}$       deformacija na meji proporcionalnosti

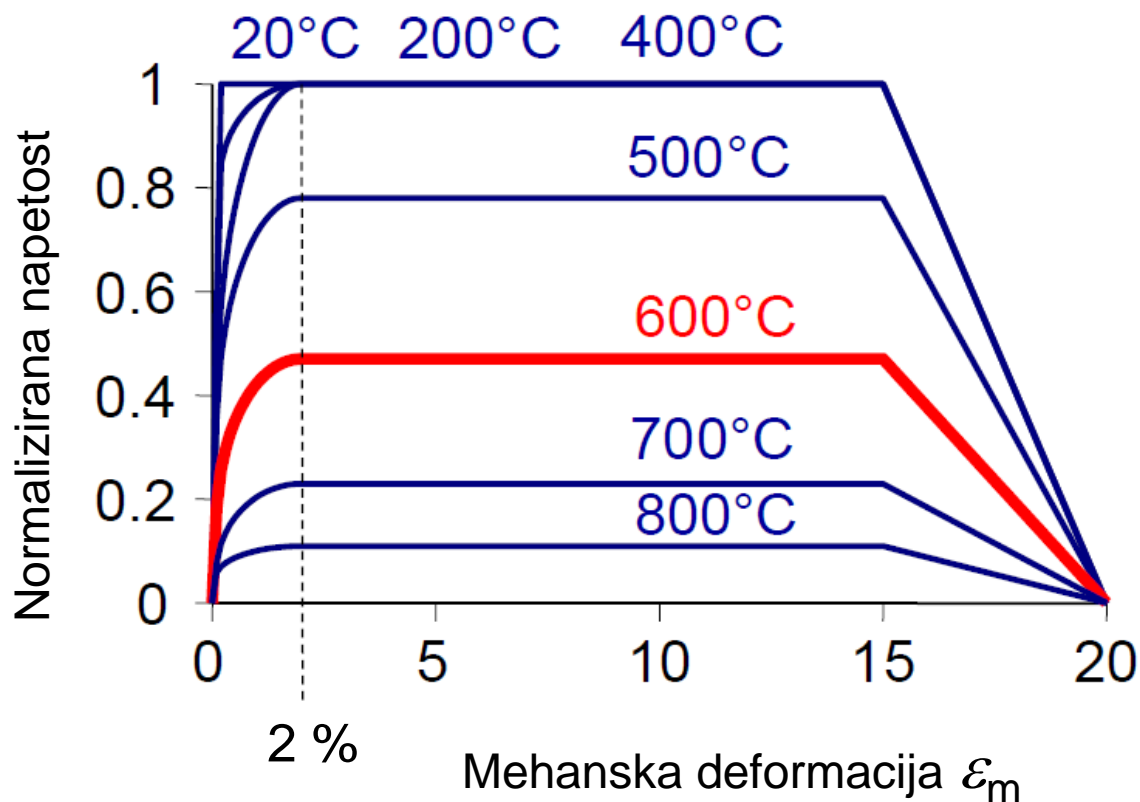
$\epsilon_{y,\theta}$       deformacija na meji tečenja

$\epsilon_{t,\theta}$       deformacija na koncu plastičnega platoja

$\epsilon_{u,\theta}$       mejna deformacija pri porušitvi

# Materialne lastnosti jekla pri povišanih temperaturah

Napetostno deformacijska zveza jekla pri povišanih temperaturah  $\sigma = f(\varepsilon_m)$  (nelinearna zveza)



# Materialne lastnosti jekla pri povišanih temperaturah

Redukcijski faktorji skladno s SIST EN 1993-1-2

$k_{y,\Theta}$  – redukcijski faktor za mejo tečenja pri sobni temperaturi  $f_{y,20}$

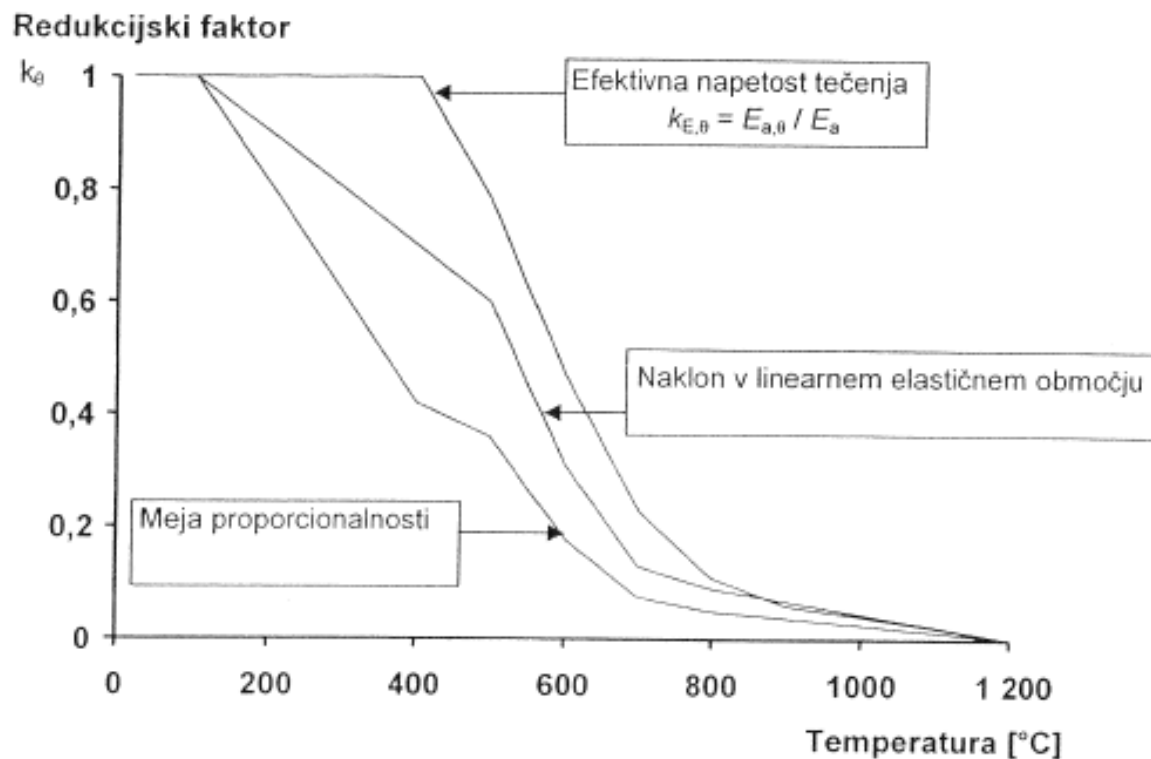
$k_{E,\Theta}$  – redukcijski faktor za elastični modul  $E_{20}$

$k_{p,\Theta}$  – redukcijski faktor za mejo proporcionalnosti (linearen del diagrama) glede na  $f_{y,20}$

Temperatura jekla $\theta_a$	Redukcijski faktorji pri temperaturi $\theta_a$ glede na vrednost $f_y$ ali $E_a$ pri 20 °C		
	Redukcijski faktor (glede na $f_y$ ) za efektivno napetost tečenja $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Redukcijski faktor (glede na $f_y$ ) za mejo proporcionalnosti $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Redukcijski faktor (glede na $E_a$ ) za naklon v linearno elastičnem območju $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,0000	0,0000

OPOMBA: Za vmesne vrednosti temperature jekla se lahko uporabi linearna interpolacija.

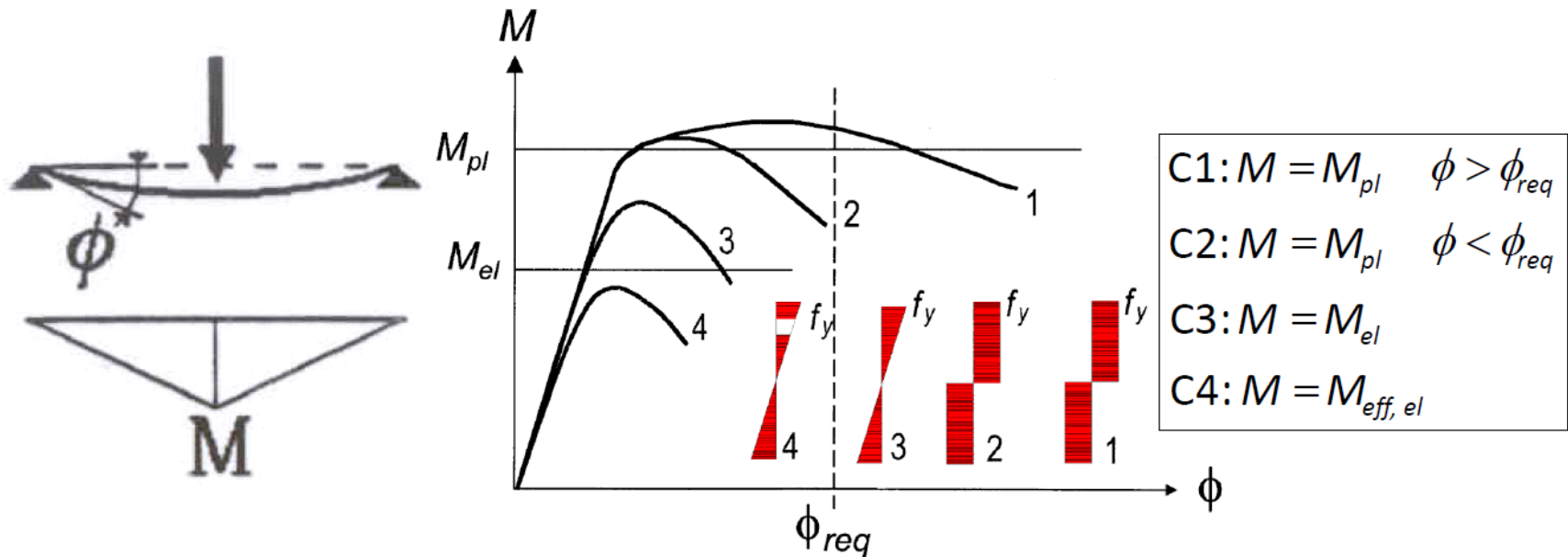
# Redukcijski faktorji za napetostno deformacijsko zvezo jekla skladno s SIST EN 1993-1-2



# Delni faktorji obravnavane lastnosti materiala za požarno projektno stanje $\gamma_{M,fi}$

Tip elementa (Kontrola)	Požarno projektno stanje	Projektno stanje pri sobni temperaturi
Prerez, kontrola napetosti	$\gamma_{M,0} = 1,0$	$\gamma_{M,0} = 1,0$
Elementi z vplivom stabilnosti (uklon, bočna zvrnitev)	$\gamma_{M,1} = 1,0$	$\gamma_{M,1} = 1,0$
Stiki	$\gamma_{M,2} = 1,0$	$\gamma_{M,2} = 1,25$

# Določitev razreda kompaktnosti jeklenih prerezov pri požarni analizi



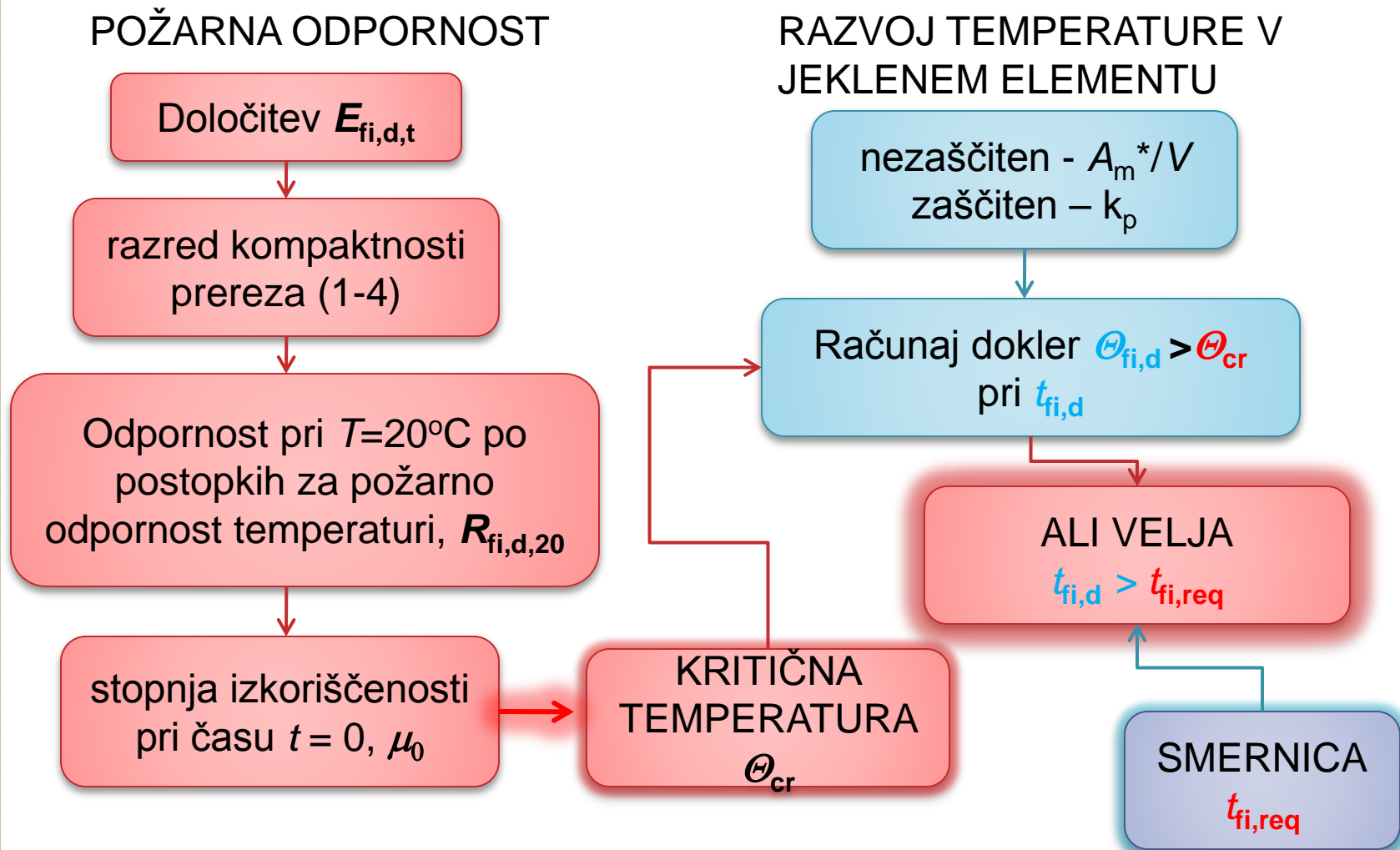
Na enak način kot pri sobni temperaturi.

Vpliv povišanih temperatur upoštevamo z zmanjšanjem

parametra  $\varepsilon = 0,85 (235/f_y)^{0.5}$ .



# Določitev požarne odpornosti jeklenih elementov z uporabo preprostega postopka (metoda kritične temperature)



# Določitev stopnje izkoriščenosti prereza

$\mu_0$

Stopnja izkoriščenosti prereza se določi kot razmerje med

projektno obtežbo elementa v požarnem stanju in

projektno nosilnostjo pri sobni

Temperaturi ( $t = 0$ ) z upoštevanjem

delnih materialnih faktorjev za požarno stanje.

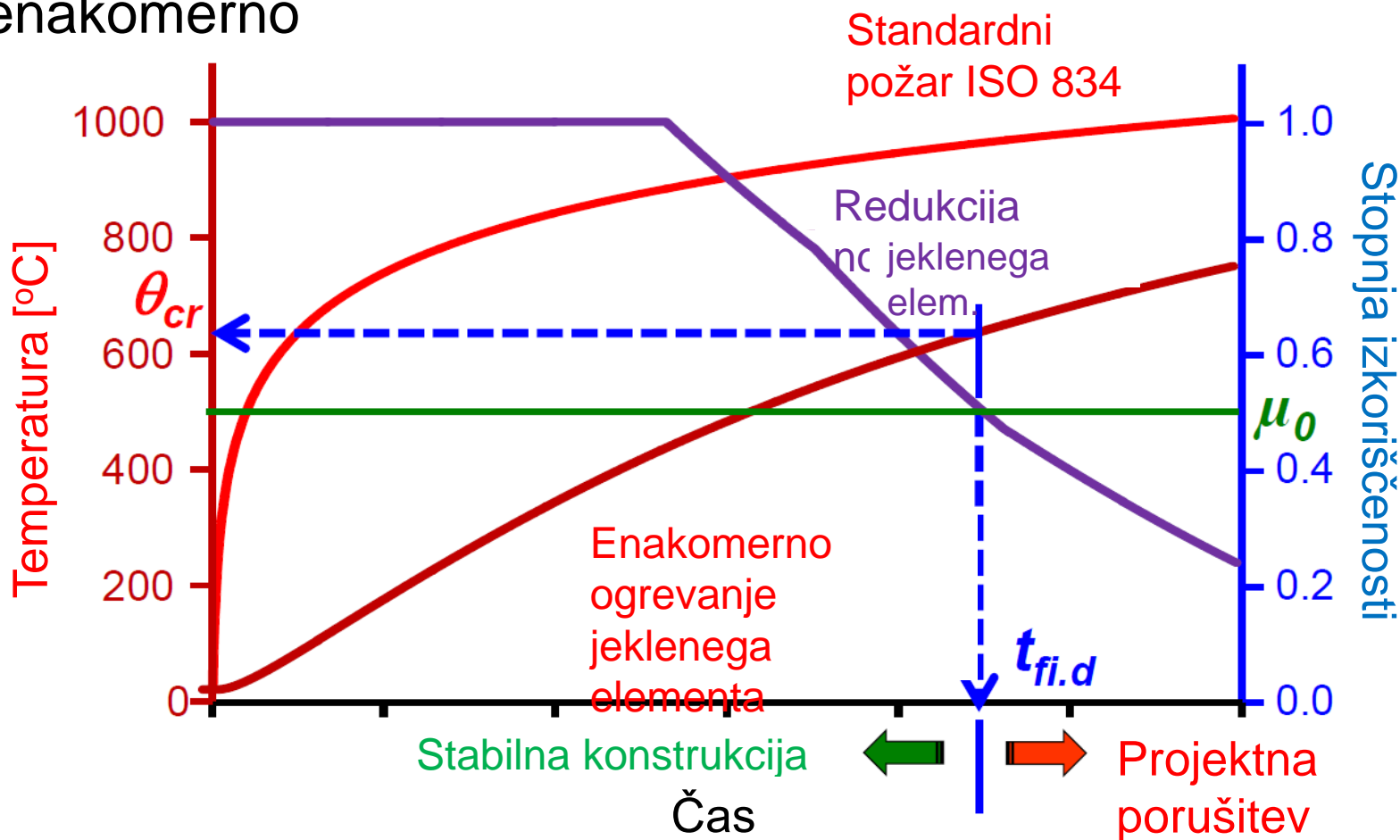
Alternativno za natezne elemente in bočno podprte elemente lahko  $\mu_0$  določimo kot:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi.d}}{R_{fi.d.0}}$$

$$\mu_0 = \eta_{fi} [\gamma_{M,fi} / \gamma_{M,0}]$$

# Določitev kritične temperature jeklenih elementov

Osnovna predpostavka: elementi so segreti enakomerno



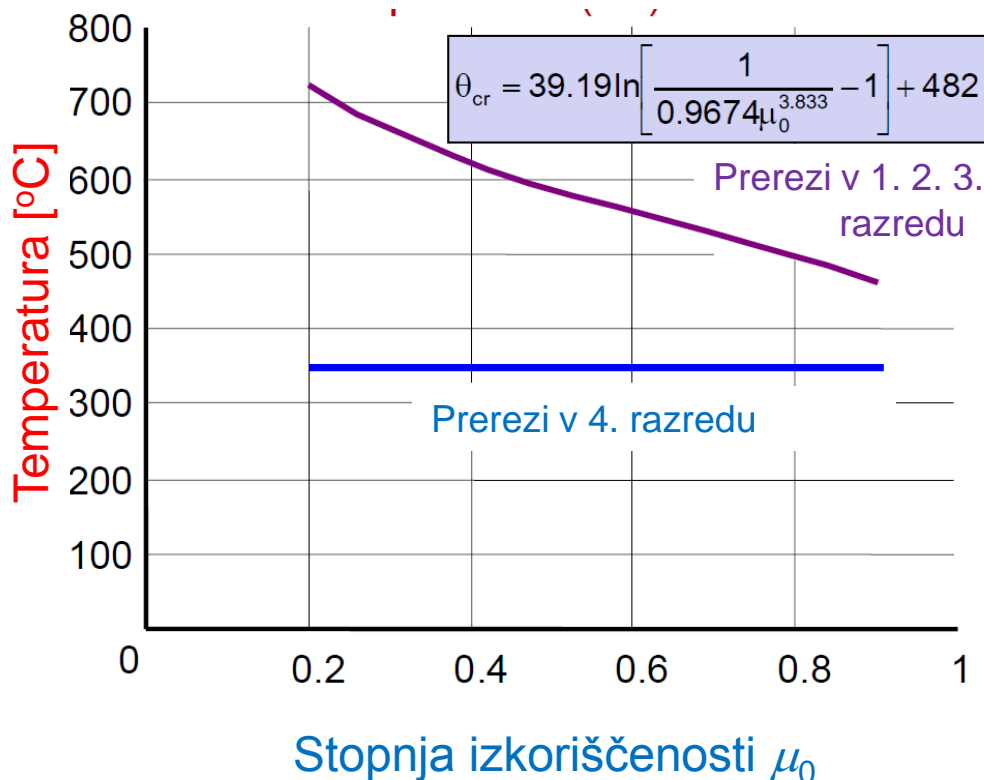
# Določitev kritične temperature jeklenih elementov skladno s SIST EN 1993-1-2

## PREDPOSTAVKE !!!

- Temelji na standardnih testih.  
Samo za enostavne elemente.

- Velja za KOMPAKTNE prereze (razred 1, 2, 3) brez vplivov stabilnosti (kot so: uklon, bočna zvrnitev, vpliv temperaturnih raztezkov!!!).

- VITKI prerezi so zajeti zelo konzervativno ( $\theta_{cr} = 350$  °C).



# Določitev kritične temperature jeklenih elementov skladno s SIST EN 1993-1-2

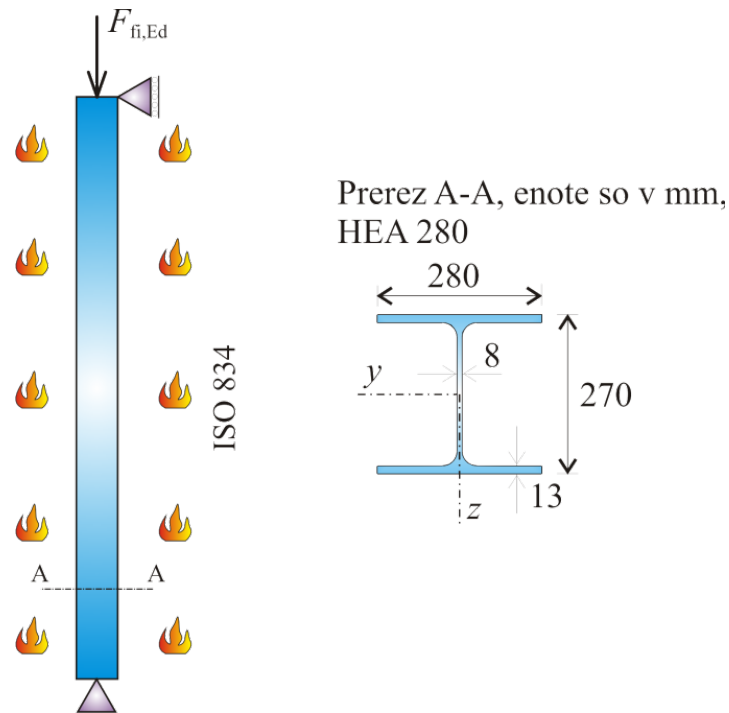
SIST EN 1993-1-2 podaj tudi spodnjo tabelo za določitev kritične temperature v primerih, **da stabilnost in temperaturne deformacije ne vplivajo na obnašanje jeklenih elementov v požaru.**

Preglednica 4.1: Kritične temperature  $\theta_{a,cr}$  v odvisnosti od stopnje izkoriščenosti  $\mu_0$

$\mu_0$	$\theta_{a,cr}$	$\mu_0$	$\theta_{a,cr}$	$\mu_0$	$\theta_{a,cr}$
0,22	711	0,42	612	0,62	549
0,24	698	0,44	605	0,64	543
0,26	685	0,46	598	0,66	537
0,28	674	0,48	591	0,68	531
0,30	664	0,50	585	0,70	526
0,32	654	0,52	578	0,72	520
0,34	645	0,54	572	0,74	514
0,36	636	0,56	566	0,76	508
0,38	628	0,58	560	0,78	502
0,40	620	0,60	554	0,80	496

# PRIMER: Določitev kritične temperature jeklenih elementov

Obravnavajmo steber, ki je izpostavljen tlačni osni sili  $F_{fi,Ed}$  in sicer pod a) kratek steber, b) daljši steber.



# PRIMER: Določitev kritične temperature jeklenih elementov

a) kratek steber:

Če je steber dovolj kratek in uklon stebra ni prisoten, lahko osno nosilnost stebra pri povišanih temperaturah določimo skladno s SIST EN 1993-1-2 z naslednjim izrazom:

$$N_{b,fi,t,Rd} = A k_{y,\theta_{max}} f_{y,20} / \gamma_{M,fi}$$

Vidimo, da je v tem primeru nosilnost stebra pri povišani temperaturi odvisna **samo od redukcijskega faktorja nosilnosti  $k_{y,\theta}$** , saj so vsi ostali parametri konstante.

# PRIMER: Določitev kritične temperature jeklenih elementov

a) Daljši steber, prisotnost uklona:

Če je steber vitek in je možen uklon pri povišanih temperaturah:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta max} f_{y,20} / \gamma_{M,fi} \quad \chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_0 + \sqrt{\varphi_0^2 - \bar{\lambda}_0^2}} \quad \bar{\lambda}_0 = \bar{\lambda} \sqrt{k_{y,\theta} / k_{E,\theta}}$$

Sedaj pa je nosilnost stebra pri povišani temperaturi odvisna od redukcijskega faktorja nosilnosti  $k_{y,\theta}$  ter relativne vitkosti v primeru požara  $\bar{\lambda}_0$  in s tem tudi faktorja togosti  $k_{E,\theta}$ . Tako račun kritične temperature, ki je odvisna samo od  $k_{y,\theta}$ , ni več možen.

Za račun kritične temperature v primeru stabilnostnih problemov moramo uporabiti iterativen postopek. Običajno pridemo do rešitve z dvema iteracijama.



# Določitev kritične temperature jeklenih elementov s stabilnostnimi vplivi

Iterativnemu izračunu se lahko izognemo na način da za razmerje  $\sqrt{k_{y,\theta} / k_{E,\theta}}$  predpostavimo konstantno vrednost, ki je na varni strani (največjo vrednost).

Tako relativna vitkost  $\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{k_{y,\theta} / k_{E,\theta}}$  ni več funkcija temperature in je možna uporaba direktnega postopka.

Sedaj je kritična temperatura funkcija naslednjih parametrov:

- relativne vitkosti pri sobni temperaturi  $\bar{\lambda}_{fi,0}$ ,
- stopnje izkoriščenosti  $\mu_0 = N_{fi,d,t} / N_{pl,fi,0}$ ,
- in trdnosti jekla  $f_y$ .

# Določitev kritične temperature jeklenih elementov s stabilnostnimi vplivi

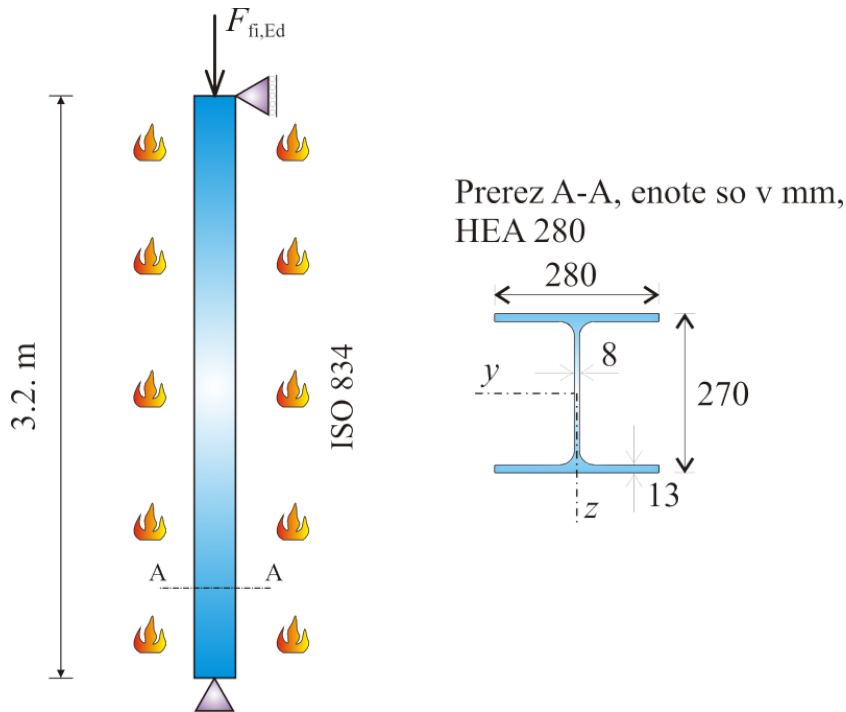
Tabela je drugačna glede na trdnost jekla  $f_y$ .

Tabele **niso** podane v SIST EN 1993-1-2.

$\bar{\lambda}_{fi,0}$	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				

# Določitev kritične temperature jeklenih elementov s stabilnostnimi vplivi

## Primer



Faktor relativne vitkosti pri sobni temperaturi znaša:

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

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

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

# Določitev kritične temperature jeklenih elementov s stabilnostnimi vplivi

Sedaj glede na izračunano relativno vitkost pri sobni temperaturi določimo kritično temperaturo v odvisnosti stopnje izkoriščenosti  $\mu_0$ .

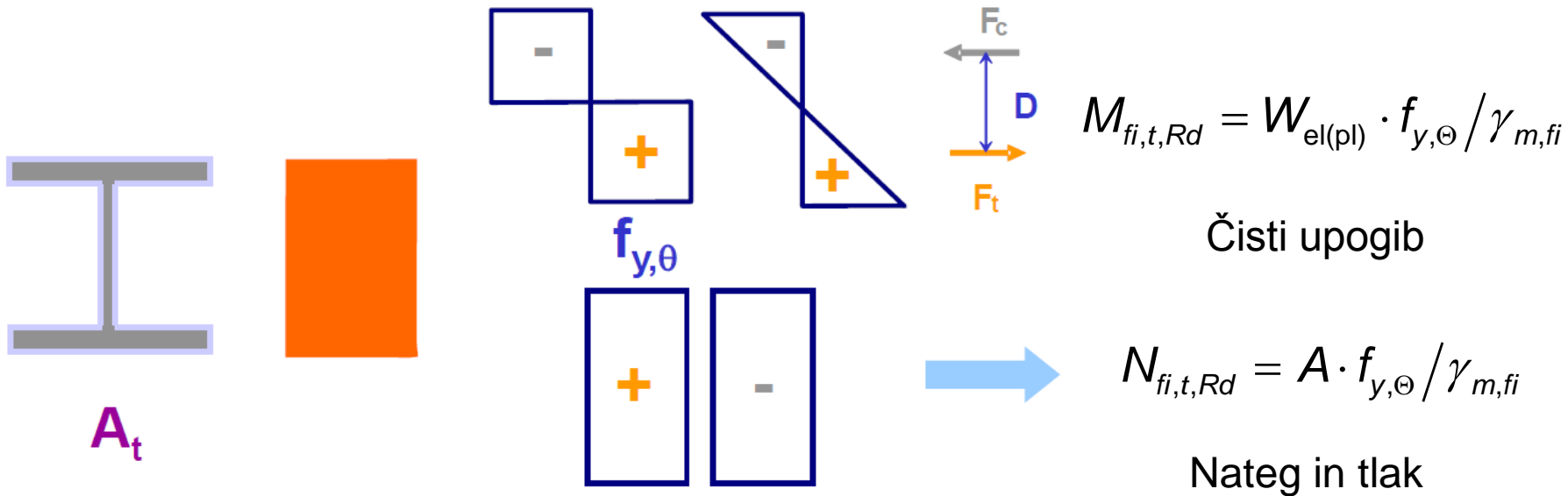
$\bar{\lambda}_{fi,0}$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
$\mu_0$											
0.04	1000	977	949	913	880	847	814	781	748	715	682
0.06	900	885	866	837	795	753	711	670	628	587	545
0.08	860	839	811	785	749	713	677	641	605	569	533
0.10	820	797	780	752	703	667	631	595	559	523	487
0.12	792	777	755	719	685	651	617	583	549	515	481
0.14	775	757	730	694	668	636	597	567	533	497	461
0.16	758	737	705	681	652	615	580	546	507	471	434
0.18	742	717	691	668	636	603	569	535	501	467	432
0.20	725	698	680	655	619	587	553	519	485	451	416
0.22	708	689	669	641	603	571	537	503	469	435	400
0.24	696	679	658	628	591	559	525	491	457	423	388
0.26	688	670	647	615	579	547	513	479	445	411	376

Relativna vitkost stebra je 0,286

Območje kjer se nahaja kritična temperatura za obravnavan steber

OPOMBA: Temperature so manjše kot v primeru, če stabilnosti vplivi niso merodajni.

# Poenostavljena metoda za določitev $R_{fi,d,t}$ za natezno, upogibno in tlačno obremenjene jeklene elemente brez vplivov stabilnosti (prerezi v 1. 2. in 3. razred kompaktnosti)



Prečni  
prerez

Razporeditev  
temperature

Napetosti po  
prerezu

Požarna  
odpornost  $R_{fi,d,t}$