

Požarna odpornost jeklenih konstrukcij – določitev mehanske odpornosti



Tomaž Hozjan

e-mail: 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).

Odziv jeklenih konstrukcij v požaru

Lokalna porušitev



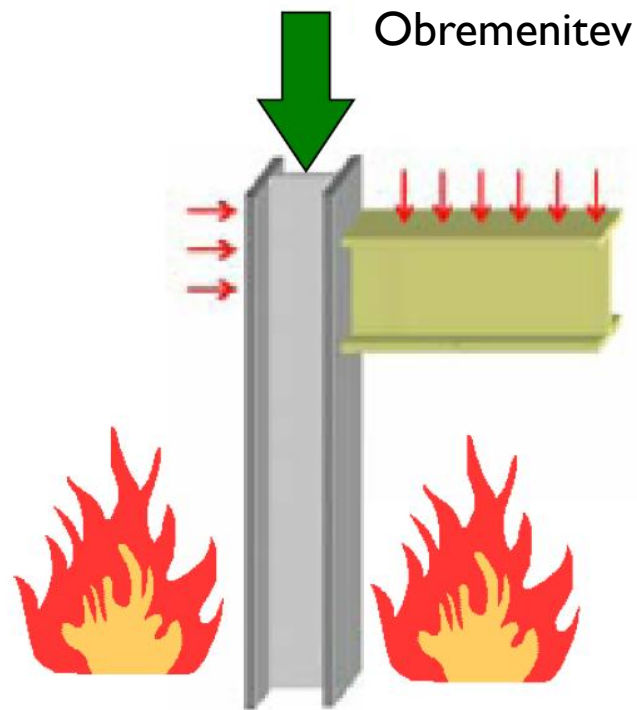
Globalna porušitev



Kriterij **R** - nosilnost

Standard SIST EN 1993-1-2 obravnava samo kriterij **R**

– to je sposobnost konstrukcije, da ohrani svojo nosilnost v primeru požara, torej da ne izgubi nosilnosti.



Kriterij **R** - nosilnost

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

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

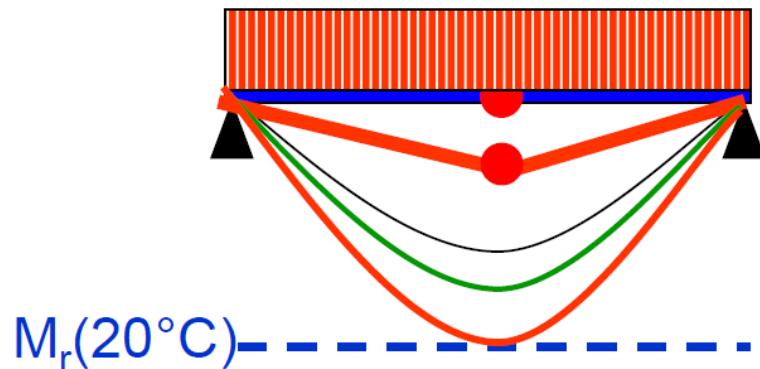
Kjer sta:

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

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

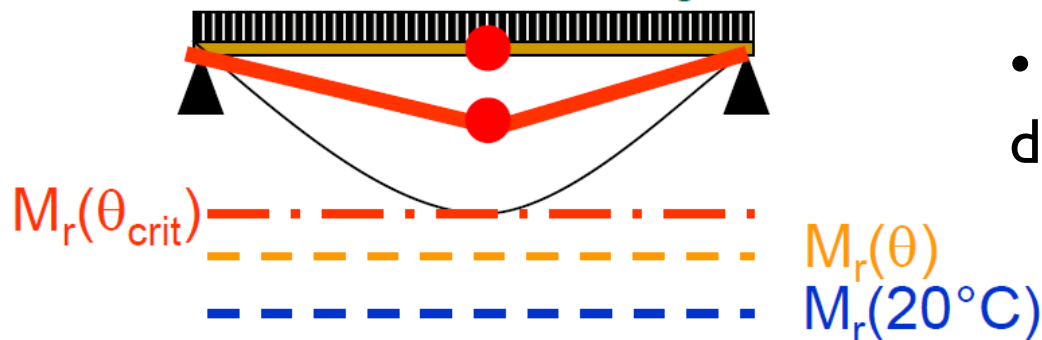
Kriterij **R** - nosilnost

SOBNA TEMPERATURA



- Konstantna temperatura
- Povečanje obtežbe do porušitve

POVIŠANA TEMPERATURA



- Konstantna obtežba
- Povečanje temperature do porušitve

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	°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.

Kaj potrebujemo za proces določitve požarne odpornosti po SIST EN 1993-1-2

Določitev obtežbe na konstrukciji

- Toplotni vpliv;
- Mehanska obtežba;
- Nivo obremenitvi pri požarni obtežbi.

Metode preverjanja

- Analiza elementa;
- Analiza dela konstrukcije;
- Globalna analiza.

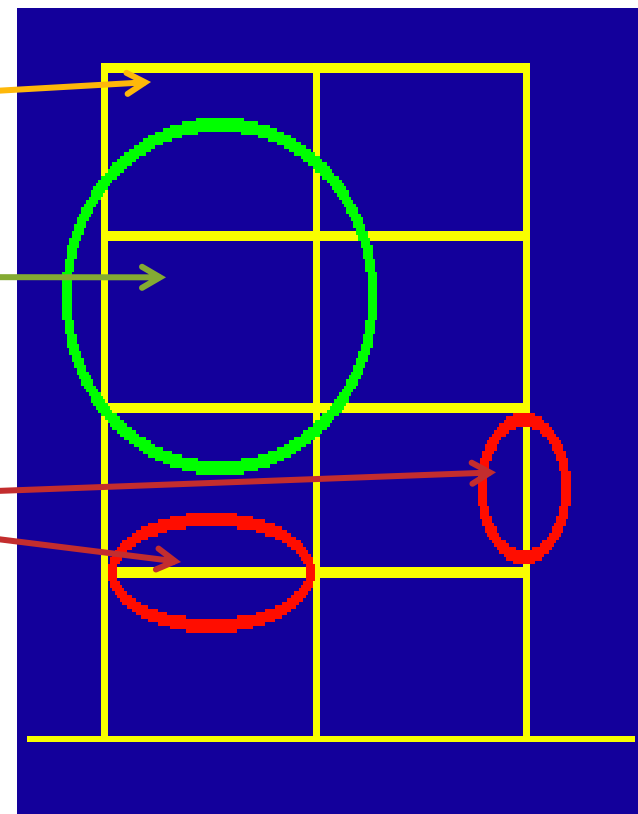
Materialne lastnosti pri povišanih temperaturah

- Toplotne lastnosti (prevodnost, spec. toplota);
- Mehanske lastnosti jekla – redukcijski faktorji za trdnost in elastični modul jekla pri povišanih T ;
- Varnostni faktorji za jeklo pri požarne projektne stanju.

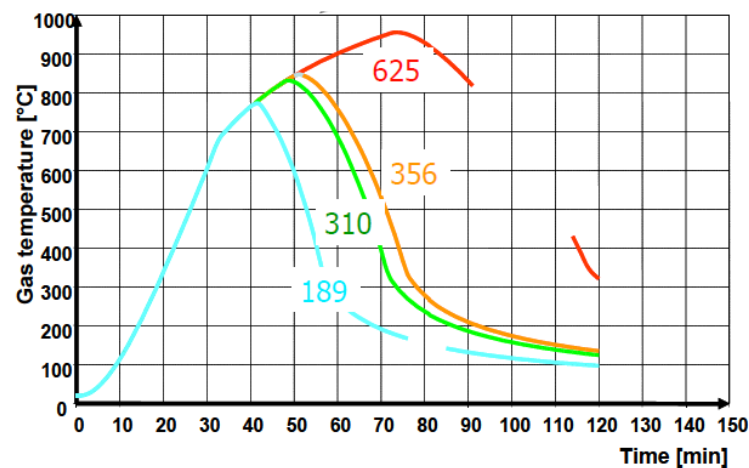
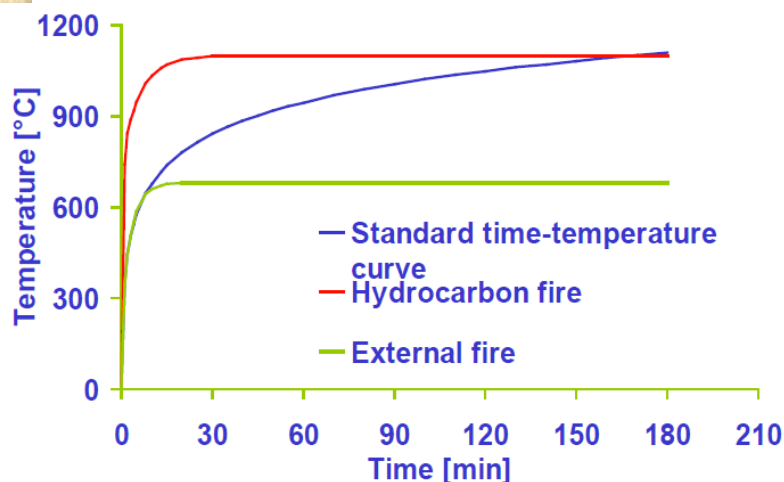
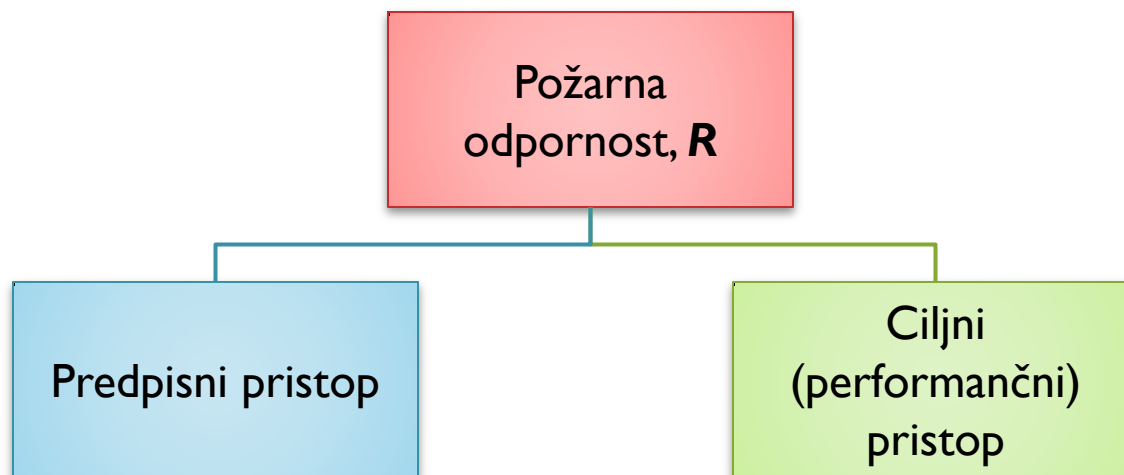
Metode preverjanja mehanske odpornosti konstrukcije v požaru

Možnosti analize računa odziva konstrukcije:

- ❖ **Globalna analiza**
- ❖ **Analiza dela konstrukcije**
- ❖ **Analiza posameznega nosilnega elementa konstrukcije**
 - ❖ Obravnavamo tukaj
 - ❖ Običajno v primerih standardne požarne odpornosti

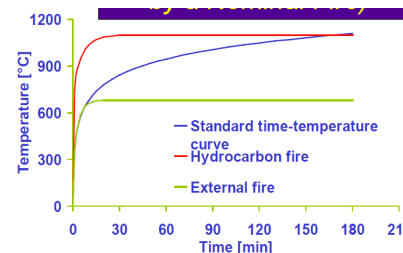


Pristop k določitvi požarne odpornosti



Možnosti uporabe različnih računskih metod za določitev požarne odpornosti jeklenih konstrukcij

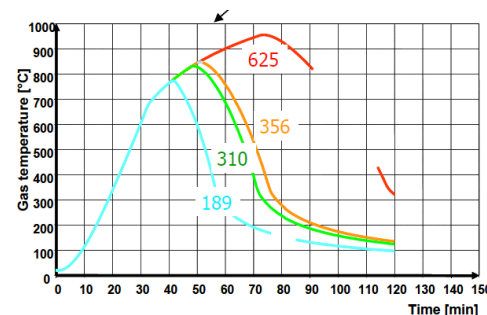
V primeru standardnega požara



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

Določitev $E_{fi,d,t}$ - obremenitev

Skladno s standardom SIST EN 1990

$$E_{fi,d,t} = \sum G_{k,j} + (\psi_{1,1} \text{ ali } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Priporočena vrednost
(SIST EN 1991-1-2)
Nacionalni dodatek

Prevladujoč
vpliv

Preostali vplivi

kjer je:

$G_{k,j}$ - karakteristična vrednost stalne obtežbe;

$Q_{k,1}$ - karakteristična vrednost prevladujoče spremenljive obtežbe; $Q_{k,i}$ - karakteristična vrednost drugih spremenljivih obtežb;

$\psi_{1,1}$ - kombinacijski faktor za pogosto obtežno kombinacijo vplivov;

$\psi_{2,1}$ - kombinacijski faktor za navidezno stalno obtežno kombinacijo vplivov.

OPOMBA: VPLIV ENAK NE GLEDE NA IZBRAN MATERIAL NOSILNE KONSTRUKCIJE.

Priporočene vrednosti faktorjev Ψ (SIST EN 1990 – preglednica A.1.1)

Preglednica A.1.1: Priporočene vrednosti faktorjev ψ za stavbe

Vpliv	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Koristna obtežba v stavbah (glej EN 1991-1-1)			
Kategorija A: bivalni prostori	0,7	0,5	0,3
Kategorija B: pisarne	0,7	0,5	0,3
Kategorija C: stavbe, kjer se zbirajo ljudje	0,7	0,7	0,6
Kategorija D: trgovine	0,7	0,7	0,6
Kategorija E: skladišča	1,0	0,9	0,8
Kategorija F: prometne površine vozilo s težo ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Kategorija G: prometne površine 30 kN < teža vozila ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Kategorija H: strehe	0	0	0
Obtežba snega na stavbah (glej EN 1991-1-3)*			
Finska, Islandija, Norveška, Švedska	0,7	0,5	0,2
Druge članice CEN, za kraje z nadmorsko višino nad 1.000 m	0,7	0,5	0,2
Druge članice CEN, za kraje z nadmorsko višino pod 1.000 m	0,5	0,2	0
Obtežba vetra na stavbah (glej EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Spremembe temperature (ne pri požaru) v stavbah (glej EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
OPOMBA: Vrednosti faktorjev ψ so lahko določene v nacionalnem dodatku. *) Za države, ki niso omenjene v nadaljevanju, glej ustrezne krajevne pogoje.			

Določitev $E_{fi,d,t}$ - obremenitev

Poenostavljen pristop skladno s SIST EN 1991-1-2

- Pri metodah požarnega projektiranja po Evrokodih, se pogosto pojavlja pomembna količina, imenovana **faktor redukcije nivoja obremenitve za požarno projektno stanje** η_{fi} :

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

Redukcijski
faktor

Projektna vrednost notranje sile
določena pri sobni temperaturi za
trajno projektno stanje ob upoštevanju
osnovne kombinacije vplivov (EN
1990).

Določitev redukcijskega faktorja

η_{fi}

Skladno z naslednjo enačbo za nezgodno obtežno kombinacijo 6.10 po EN 1990

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

Sobna temperatura:

$\gamma_G = 1,35$ – stalna obtežba

$\gamma_{Q,1} = 1,5$ – spremenljiva obtežba

Požarno projektno stanje:

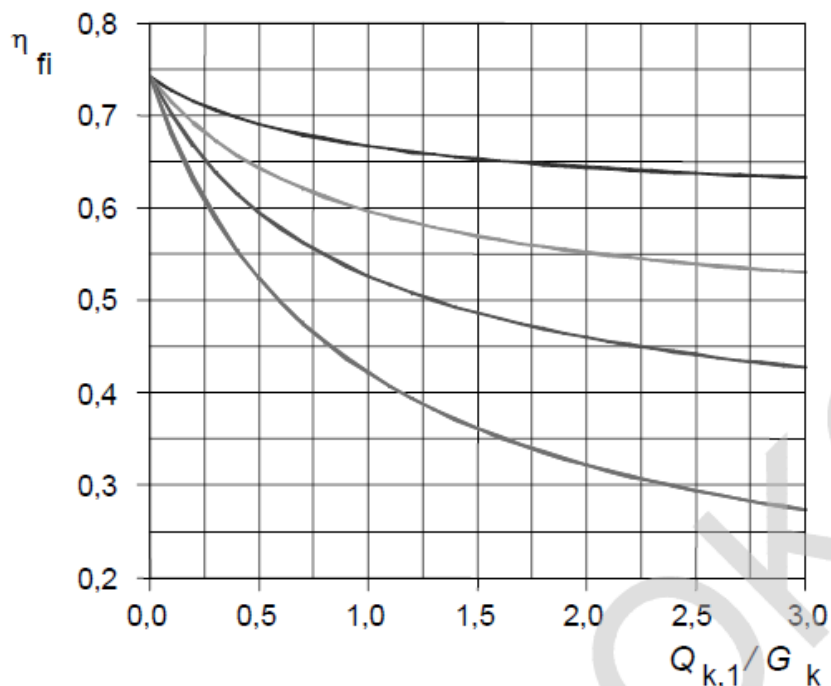
$\gamma_G = 1,0$ – stalna obtežba

$\psi_{1,1} = 0,5$ – za pisarne za spremenljivo obtežbo

Določitev redukcijskega faktorja

η_{fi}

Primer: Vrednost redukcijskega faktorja η_{fi} glede na razmerje $Q_{k,1}/G_k$, za različne vrednosti kombinacijskega faktorja $\psi_{1,1}$ pri upoštevanju $\gamma_G = 1,35$ in $\gamma_{Q,1} = 1,5$



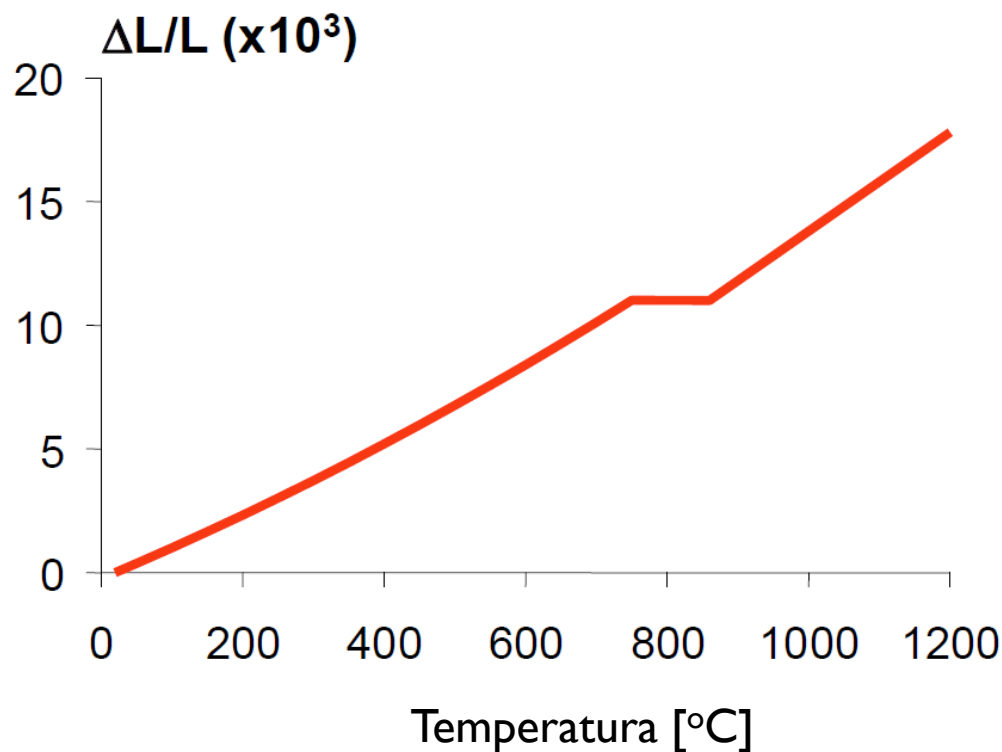
**DODATNA
POENOSTAVITEV
(SIST EN 1993-1-2)**

$\eta_{fi} = 0,65$

za kategorije stavb E
pa **$\eta_{fi} = 0,70$**

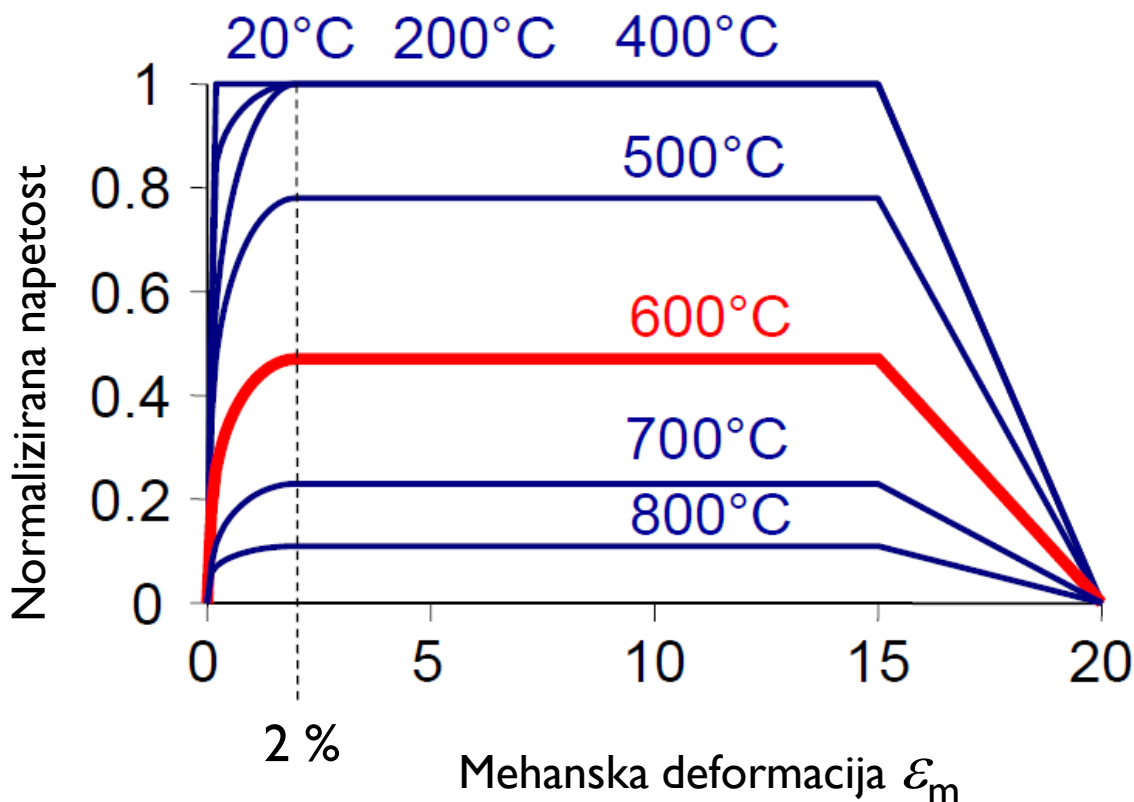
Materialne lastnosti jekla pri povišanih temperaturah

Relativni toplotni raztezek jekla – temperaturne deformacije
 ε_{th}

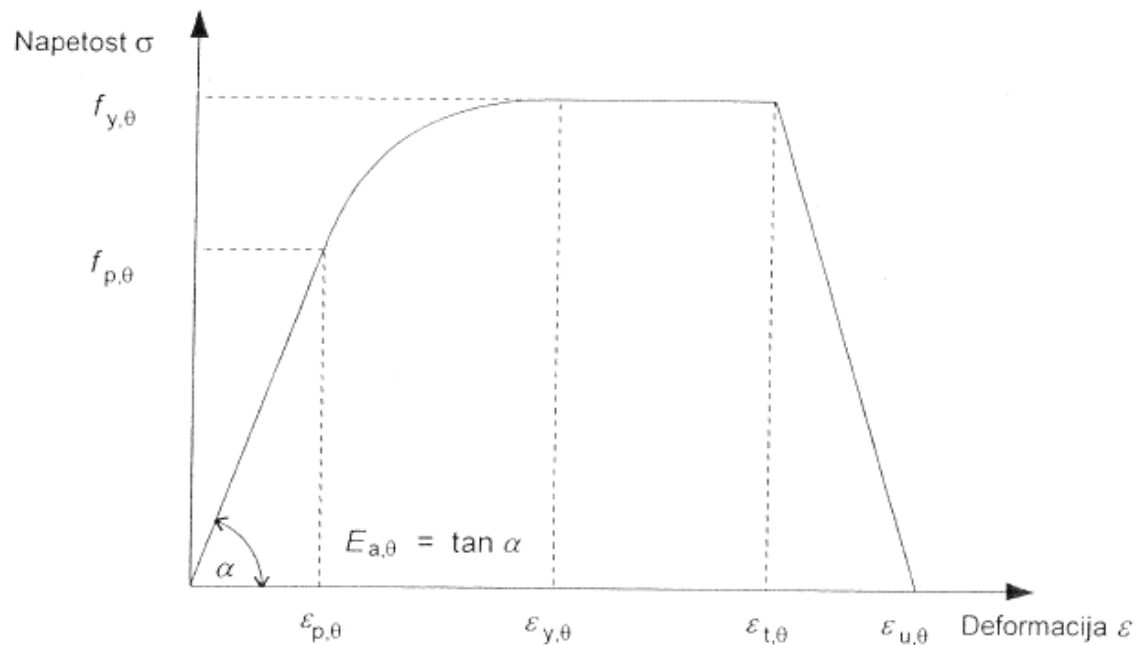


Materialne lastnosti jekla pri povišanih temperaturah

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



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

Redukcijski faktorji skladno s SIST EN 1993-1-2

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

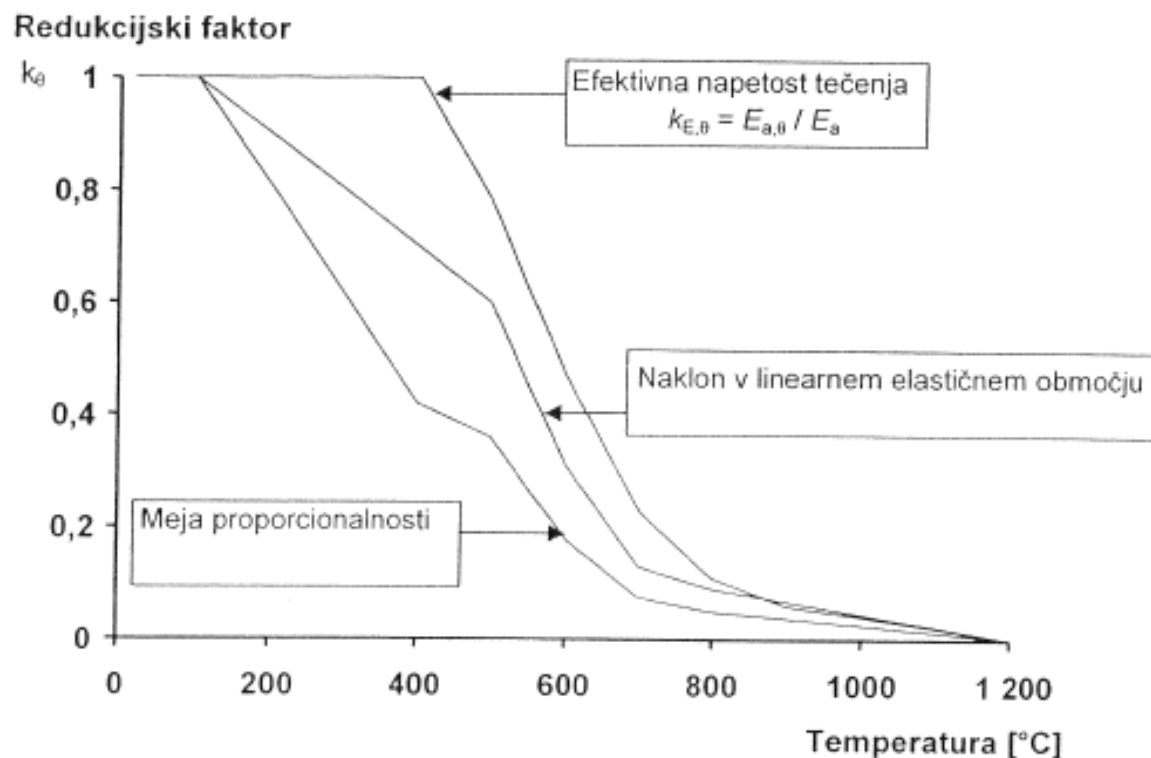
$k_{E,\Theta}$ – redukcijski faktor za elastični modul E_{20}

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

Temperatura jekla θ_a	Redukcijski faktorji pri temperaturi θ_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

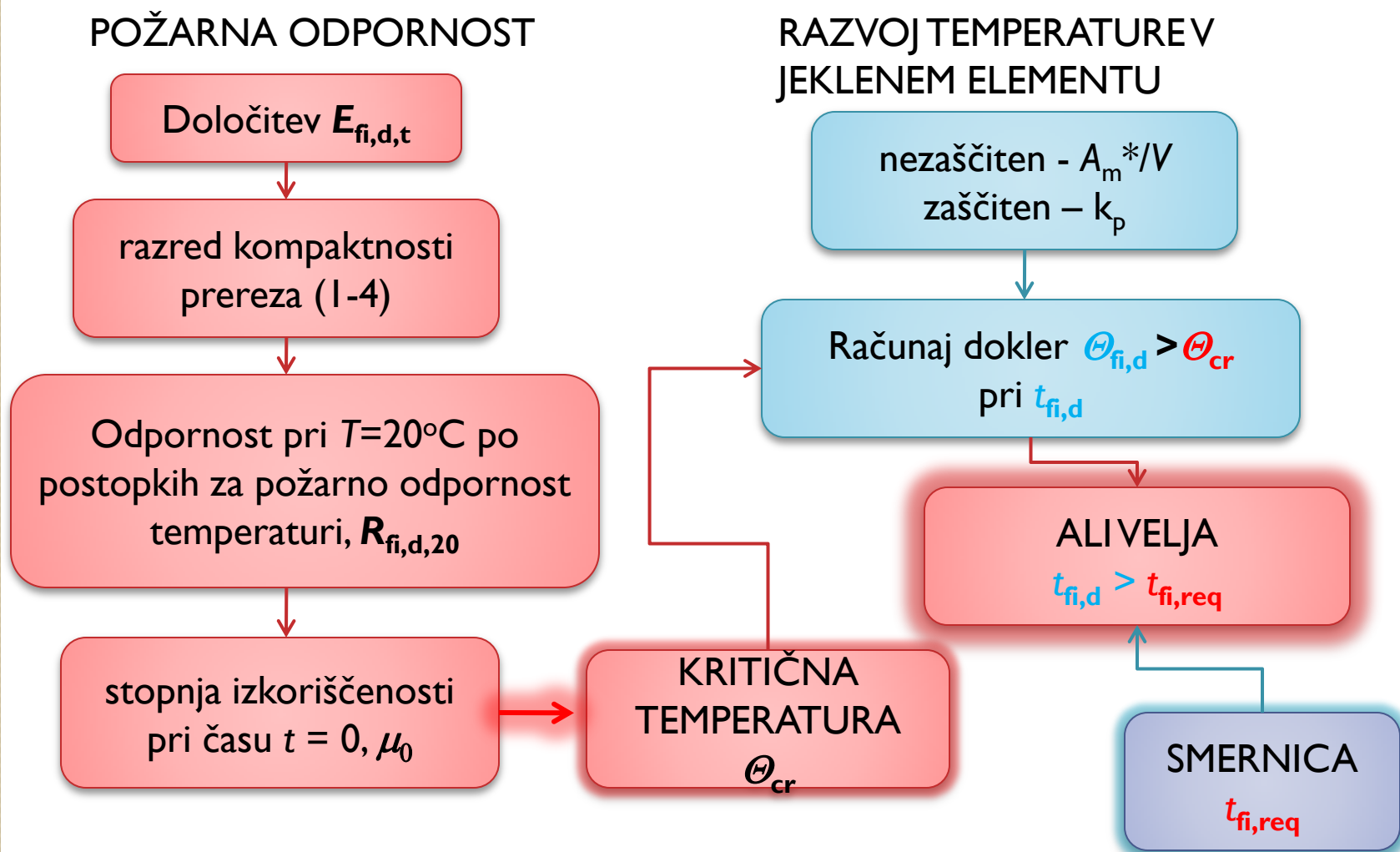


Delni faktorji obravnavane lastnosti materiala za požarno projektno stanje

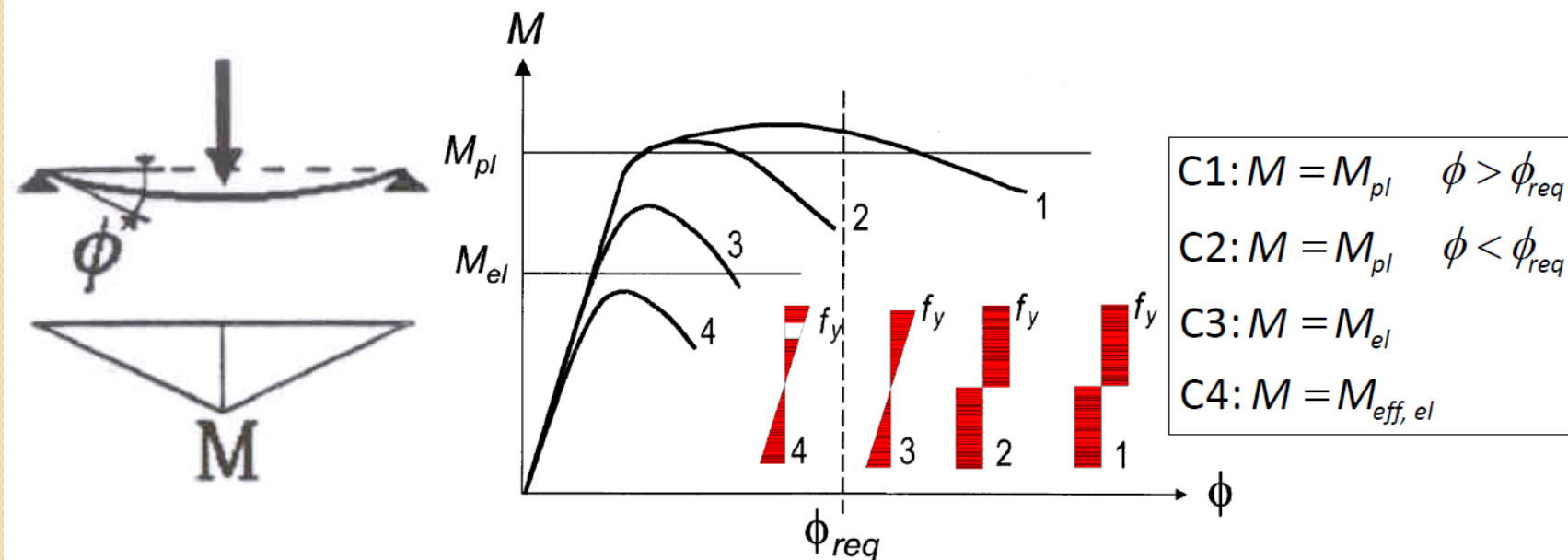
$\gamma_{M,fi}$

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



Določitev razreda kompaktnosti jeklenih prerezov pri požarni analizi



Na enak način kot pri sobni temperaturi.

Vpliv povišanih temperatur upoštevamo z zmanjšanjem

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

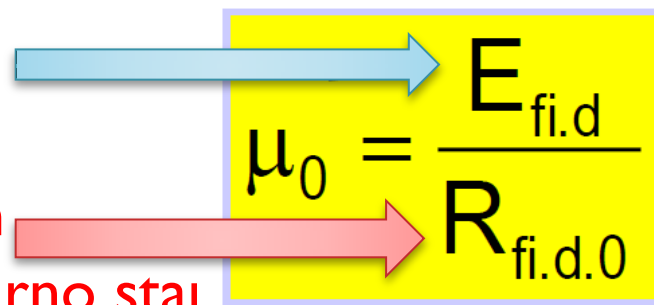
Določitev stopnje izkoriščenosti prereza

μ_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 stal

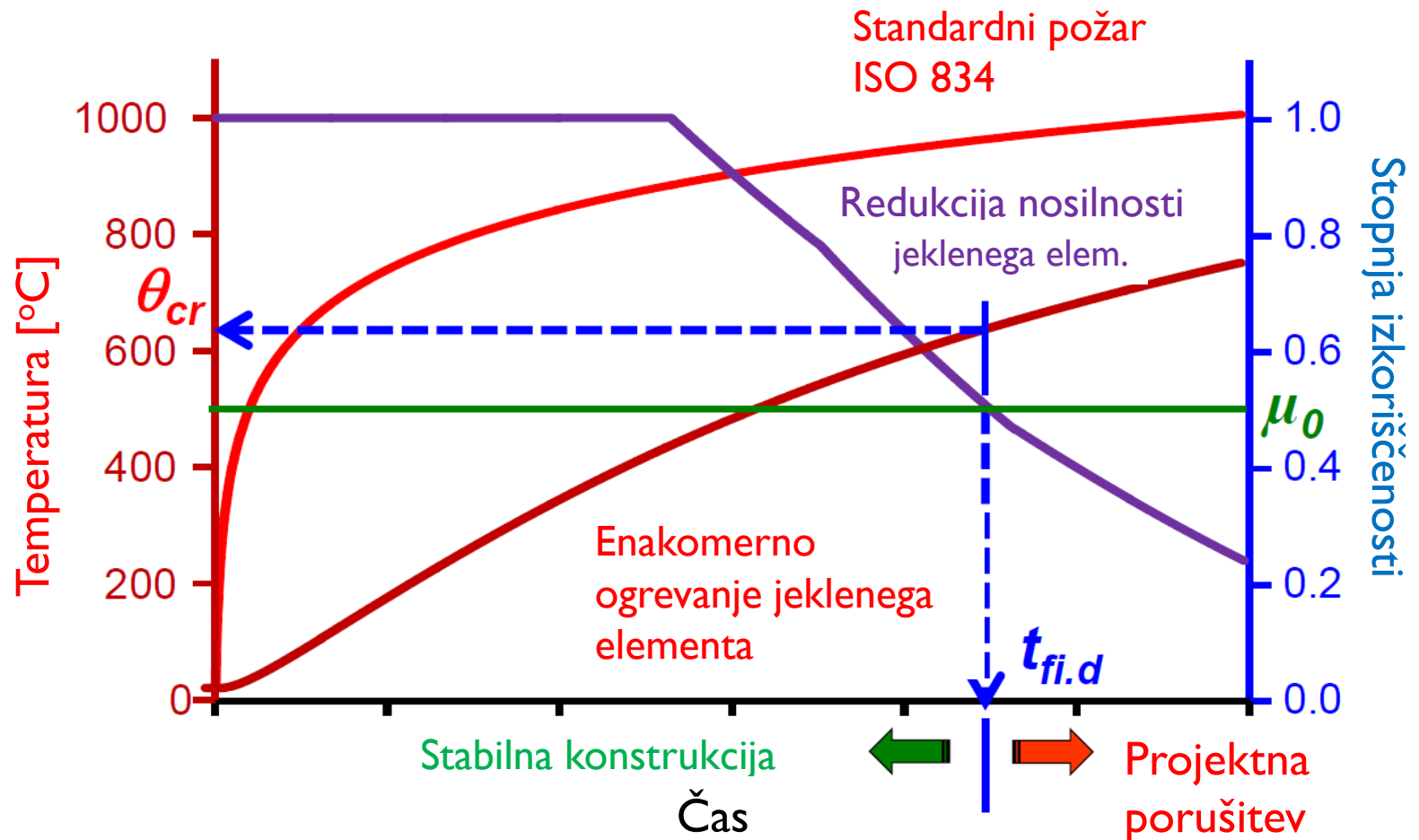

$$\mu_0 = \frac{E_{fi.d}}{R_{fi.d.0}}$$

Alternativno za natezne elemente in bočno podprte
elemente lahko μ_0 določimo kot:

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

Določitev kritične temperature jeklenih elementov

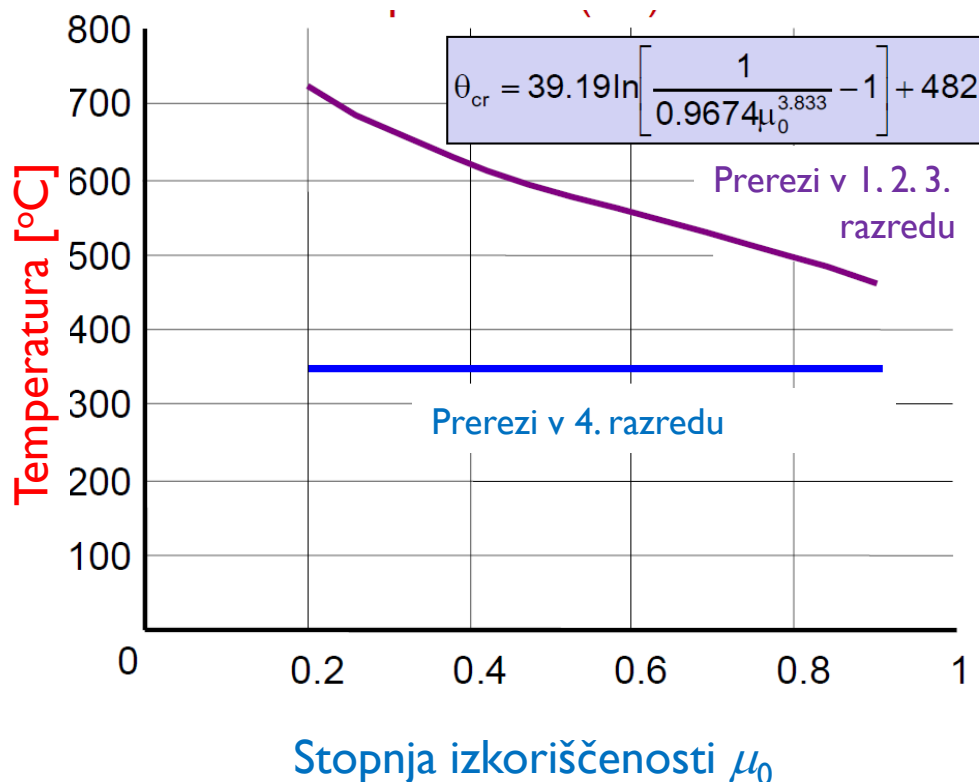
Osnovna predpostavka: elementi so segreti enakomerno



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

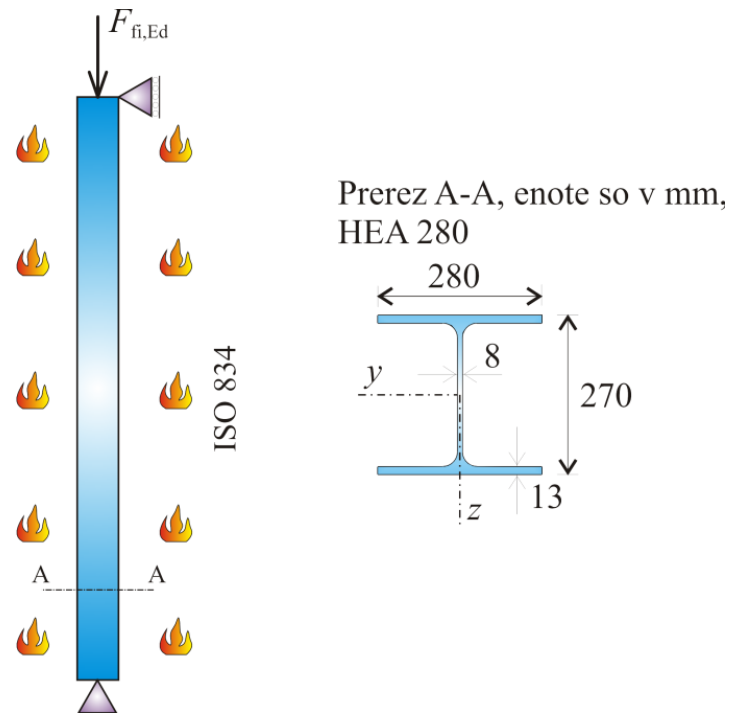
SIST EN 1993-1-2 podaj tudi spodnjo tabelo za določitev kritične temperature v primerih, **da stabilnost in temperaturne deformacijo ne vplivajo na obnašanje jeklenih elementov v požaru.**

Preglednica 4.1: Kritične temperature $\theta_{a,cr}$ v odvisnosti od stopnje izkoriščenosti μ_0

μ_0	$\theta_{a,cr}$	μ_0	$\theta_{a,cr}$	μ_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:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta max} f_{y,20} / \gamma_{M,fi} \quad \chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_0 + \sqrt{\varphi_0^2 - \bar{\lambda}_0^2}} \quad \bar{\lambda}_0 = \bar{\lambda} \sqrt{k_{y,0} / k_{E,0}}$$

Sedaj pa je nosilnost stebra pri povišani temperaturi odvisna od redukcijskega faktorja nosilnosti $k_{y,\theta}$ ter relativne vitkosti v primeru požara 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 ,
- stopnje izkoriščenosti , $\bar{\lambda}_{fi,0}$
- in trdnosti jekla f_y $\mu_0 = N_{fi,d,t} / N_{pl,fi,0}$

Določitev kritične temperature jeklenih elementov s stabilnostnimi vplivi

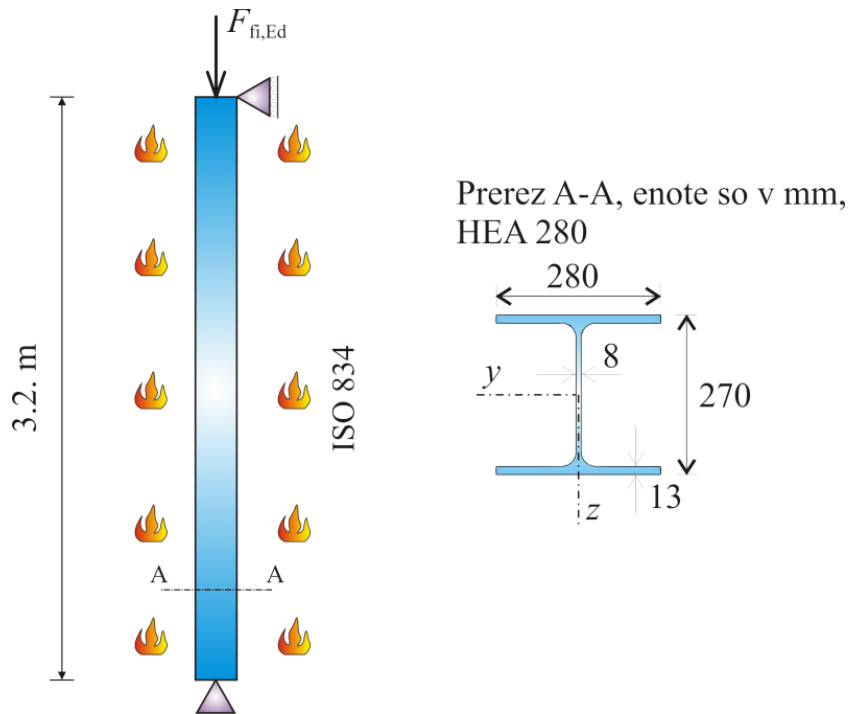
Tabela je drugačna glede na trdnost jekla f_y

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
μ_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 μ_0 .

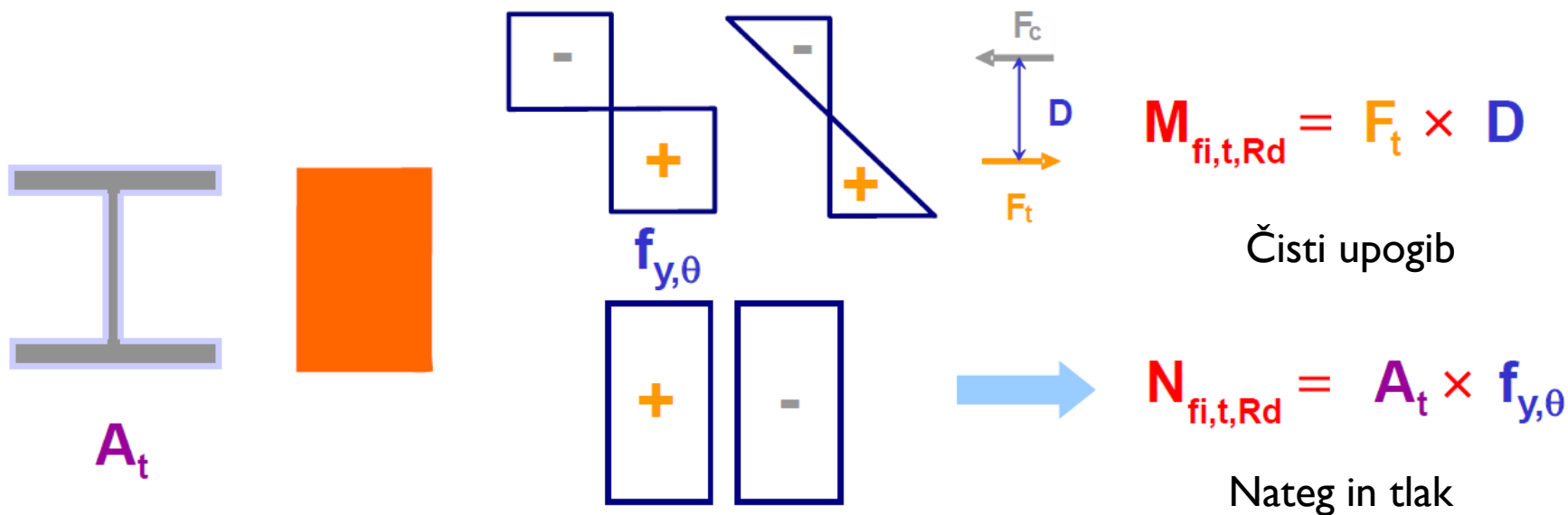
$\bar{\lambda}_{fi,0}$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
μ_0											
0.04	1000	977	949	913	880	847	814	781	748	715	682
0.06	900	885	866	837	795	762	729	696	663	630	602
0.08	860	839	811	785	749	717	684	651	618	588	564
0.10	820	797	780	752	703	671	638	605	572	547	527
0.12	792	777	755	719	685	652	619	586	553	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						
0.20	725	698	680	655	619						
0.22	708	689	669	641	603						
0.24	696	679	658	628	591						
0.26	688	670	647	615	579						

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 $R_{fi,d,t}$