

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Gomboši, J., 2015. Požarna odpornost konstrukcijskih elementov iz nerjavečega jekla. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Sinur, F.): 29 str.

Datum arhiviranja: 29-09-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Gomboši, J., 2015. Požarna odpornost konstrukcijskih elementov iz nerjavečega jekla. B.Sc Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Sinur, F.): 29 pp.

Archiving Date: 29-09-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidatka:

JANA GOMBOŠI

**POŽARNA ODPORNOST KONSTRUKCIJSKIH
ELEMENTOV IZ NERJAVEČEGA JEKLA**

Diplomska naloga št.: 187/B-GR

**FIRE RESISTANCE OF STAINLESS STEEL
STRUCTURAL ELEMENTS**

Graduation thesis No.: 187/B-GR

Mentor:

doc. dr. Franc Sinur

Ljubljana, 03. 09. 2015

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana Jana Gomboši izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »Požarna odpornost konstrukcijskih elementov iz nerjavečega jekla«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 6.8.2015

Jana Gomboši

BIBLIOGRAFSKA – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 614.84:624.014.2(043.2)
- Avtor:** Jana Gomboši
- Mentor:** doc. dr. Franc Sinur
- Naslov:** Požarna odpornost konstrukcijskih elementov iz nerjavečega jekla
- Tip dokumenta:** diplomska naloga – univerzitetni študij
- Obseg in oprema:** 29 str., 6 pregl., 19 sl.
- Ključne besede:** nerjavno jeklo, požarna odpornost, uklonska nosilnost

Izvleček

V diplomski nalogi je predstavljeno obnašanje konstrukcijskih elementov iz nerjavnega jekla v primeru požara. Predstavljena so splošna pravila za požarnoodporno projektiranje jeklenih konstrukcij skladno s standardom SIST EN 1993-1-2. Na podlagi enostavnih računskih metod sledi izračun uklonske nosilnosti RHS stebra iz nerjavnega jekla, izpostavljenega standardnemu požaru. Vpliv povišanih temperatur se upošteva z zmanjšanjem napetosti na meji tečenja in modulom elastičnosti jekla. V nadaljevanju sledi primerjava mehanskih in toplotnih lastnosti ter obnašanje nerjavnega in ogljikovega jekla na primeru RHS stebra iz nerjavnega jekla trdnostnega razreda 1.4301 in ogljikovega jekla S235. V sklopu evropskih raziskav za obnašanje hladno oblikovanega nerjavnega jekla v primeru požara so razvili novejša metode za izračun uklonske nosilnosti tlačno obremenjenih konstrukcijskih elementov s kompaktnimi in vitkimi prečnimi prerezi. Raziskave iz projekta in primerjava različnih metod so predstavljene na koncu diplomske naloge.

BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 614.84:624.014.2(043.2)

Author: Jana Gomboši

Supervisor: Assist. Prof. Franc Sinur, Ph.D.

Title: Fire resistance of stainless steel structural elements

Document type: Graduation Thesis – University studies

Notes: 29 p., 6 tab., 19 fig.

Keywords: stainless steel, fire resistance, buckling resistance

Abstract

Graduation thesis represents behavior of structural elements made from stainless steel in case of fire. The general rules according to the European standard SIST EN 1993-1-2 to determine design resistance of the steel structural element for fire conditions are presented. The main focus was to determinate behavior of stainless steel column exposed to the standard fire. Buckling resistance of the column was calculated with a simplified method from the standard SIST EN 1993-1-2. Mechanical and thermal properties of the stainless steel were compared to the carbon steel. The structural performance of the stainless steel RHS column from grade 1.4301 and carbon steel column from grade S235 was studied. Stainless steel tends to be stronger and stiffer at temperatures which are higher than 500°C. Behavior of the cold worked stainless steel in fire was analyzed within European research project. In this project new methods for structural fire resistant design were invented, which are also represented at the end of this thesis.

ZAHVALA

Za nasvete in strokovno pomoč pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Francu Sinurju.

Zahvala gre tudi staršem, ki so me ves čas študija stali ob strani, me spodbujali in podpirali.

Prav tako hvala sošolcem za pomoč pri študiju in družbo.

KAZALO VSEBINE

1. UVOD	1
2. POŽARNA ODPORNOST KONSTRUKCIJE	2
2.1 Mehanski odziv konstrukcije.....	5
2.2 Prenos toplote v jeklenih elementih.....	6
3. NERJAVNO JEKLO	8
3.1 Mehanske lastnosti nerjavnega jekla	8
4. PRIMERJAVA POŽARNE ODPORNOSTI OGLJIKOVEGA IN NERJAVNEGA JEKLA NA PRIMERU RHS STEBRA	11
4.1 Mehanske lastnosti	11
4.2 Toplotne lastnosti	12
4.3 Klasifikacija prereza.....	13
4.4 Nosilnost elementa	14
4.4.1 Uklonske krivulje	14
4.4.2 Primerjava uklonske nosilnosti.....	16
5. ESCS PROJEKT: POŽARNA ODPORNOST ELEMENTOV IZ HLADNO OBLIKOVANEGA NERJAVNEGA JEKLA.....	18
5.1 Primerjava pristopov Euro Inox in CTICM za požarnoodporno projektiranje nerjavnega jekla	21
5.1.1 Klasifikacija prereza	21
5.1.2 Trdnost materiala.....	21
5.1.3 Uklonska krivulja	22
5.1.4 Nosilnost elementa	23
5.2 Primerjava uklonska nosilnost elementov s prečnimi prerezi v 4. razredu kompaktnosti	25
6. ZAKLJUČEK	28
VIRI	29

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Zahtevana požarna odpornost (Tehnična smernica TSG 1-001 - Požarna varnost v stavbah, 2010, str. 20)	2
Preglednica 2: Redukcijski faktorji za določanje mehanskih lastnosti nerjavnega jekla 1.4301 pri povišanih temperaturah (SIST EN 1993-1-2; 2005, str. 67)	9
Preglednica 3: Faktorji nepopolnosti uklonskih krivulj za ogljikovo jeklo	15
Preglednica 4: Rezultati testov pri povišanih temperaturah (Stainless steel in fire, 2009, str.43)	20
Preglednica 5: Izračun uklonske nosilnosti stebra po pristopu Euro Inox Design Manual.....	24
Preglednica 6: Izračun uklonske nosilnosti stebra po pristopu CTICM.....	24

KAZALO SLIK

Slika 1: Nomogram za nezaščitene elemente	5
Slika 2: Nomogram za zaščitene elemente	5
Slika 3: Standardna požarna krivulja.....	7
Slika 4: Zveza napetost-deformacija za ogljikovo in nerjavno jeklo.....	8
Slika 5: Redukcijski faktorji za zvezo napetost-deformacija za nerjavno jeklo 1.4301 pri povišanih temperaturah.....	10
Slika 6: Primerjava redukcijskega faktorja za efektivno napetost tečenja (levo) in redukcijskega faktorja za naklon v linearno elastičnem območju (desno)	12
Slika 7: Primerjava toplotne prevodnosti jekla S235 in 1.4301 v odvisnosti od temperature	12
Slika 8: Primerjava specifične toplote jekla S235 in 1.4301 v odvisnosti od temperature.....	13
Slika 9: Primerjava uklonskih krivulj za ogljikovo in nerjavno jeklo pri sobni temperaturi.....	15
Slika 10: Primerjava brezdimezionalne uklonske nosilnosti pri povišanih temperaturah za jeklo 1.4301 in S235.....	16
Slika 11: Razvoj temperature v jeklenem elementu v odvisnosti od časa	17
Slika 12: Razvoj temperature v prečnem prerezu (Stainless steel in fire, 2009, str. 20)	18
Slika 13: Prečni prerez in robni pogoji za steber obdan s Siporex steno (Stainless steel in fire, 2009, str. 23).....	19
Slika 14: Primerjava zveze napetost-deformacija pri povišanih temperaturah za ogljikovo in nerjavno jeklo (Stainless steel in fire, 2009, str. 24)	20
Slika 15: Vpliv temperature na redukcijski faktor materiala (Preglednica 2)	22
Slika 16: Primerjava uklonskih krivulj pri temperaturi 500°C.....	23
Slika 17:Primerjava redukcijskega faktorja uklonske nosilnosti χ_{fi} (levo) in uklonske nosilnosti elementa (desno) po različnih pristopih za požarno odporno projektiranje nerjavnega jekla	24
Slika 18: Primerjava sodelujoče prečnega prereza A_{eff} (levo) in brezdimezionalnega redukcijskega faktorja uklonske nosilnosti χ_{fi} (desno) v odvisnosti od temperature	27
Slika 19: Primerjava uklonske nosilnosti stebra s prečnim prerezom 4. razreda kompaktnosti.....	27

1. UVOD

V zadnjem času je napredoval razvoj nerjavnih jekel, ki imajo v primerjavi z običajnimi konstrukcijskimi jekli na račun dodanih legiranih elementov višjo trdnost in so korozijsko odporna. Nerjavna jekla se lahko razvrstijo v pet skupin glede na njihovo kemijsko sestavo. Za potrebe gradbeništva se najpogosteje uporablja avstentitno nerjavno jeklo.

Namen diplomske naloge je spoznati obnašanje konstrukcijskih elementov iz nerjavnega jekla v primeru požara in se seznaniti s pravili za požarnoodporno projektiranje jeklenih konstrukcij. Diplomaska naloga na začetku vsebuje nekaj splošnih pravil za požarnoodporno projektiranje jeklenih konstrukcij v skladu s predpisi iz Evrokod standardov. V nalogi so upoštevana pravila iz slovenskih standardov SIST EN 1991-1-1, SIST EN 1993-1-1, SIST EN 1993-1-2 in SIST EN 1993-1-4. V nadaljevanju so predstavljene mehanske in toplotne lastnosti nerjavnega jekla pri povišanih temperaturah v primerjavi z lastnostmi običajnega ogljikovega jekla. Sledi izračun uklonske nosilnosti nezaščitenega RHS stebra, izpostavljenega standardnemu požaru. Požarna analiza konstrukcijskega elementa je narejena po enostavnih računskih metodah skladno s standardom SIST EN 1993-1-2. Pri izračunu se zaradi visokih temperatur upoštevajo zmanjšane karakteristike materiala. Glavni cilj diplomske naloge je spoznati obnašanje jeklenih konstrukcijskih nosilnih elementov pri povišani temperaturi na primeru stebra iz nerjavnega jekla in ogljikovega jekla.

Poenostavljene metode za izračun požarne odpornosti konstrukcijskih elementov temeljijo, glede na uveljavljene standarde, na konservativnih predpostavkah. V sklopu evropskih raziskav za obnašanje hladno oblikovanega nerjavnega jekla v primeru požara so zato razvili novejša metode za izračun uklonske nosilnosti tlačno obremenjenih konstrukcijskih elementov, ki omogočajo bolj ekonomično projektiranje. V diplomski nalogi so predstavljene raziskave iz projekta in primerjava različnih metod za element s kompaktnimi prečnim prerezom ter element z vitkim prečnim prerezom.

2. POŽARNA ODPORNOST KONSTRUKCIJE

Stavbe morajo biti projektirane in zgrajene tako, da v primeru požara nosilna konstrukcija določen čas ohrani potrebno nosilnost. Nosilnost konstrukcije R je definirana kot čas v minutah, ki opiše odpornost nosilnega dela stavbe proti porušitvi (npr. R30 pomeni polurna odpornost). Tehnična smernica TSG 1-001- Požarna varnost v stavbah podaja zahtevano požarno odpornost nosilne konstrukcije glede na vrsto stavbe, velikost in število etaž, glej preglednico 1. Požarno odpornost nosilnih elementov konstrukcije lahko povečamo s toplotno odpornimi paneli, ploščami, mineralnimi obrizgi ali ekspanzijskimi premazi.

Preglednica 1: Zahtevana požarna odpornost (Tehnična smernica TSG 1-001 - Požarna varnost v stavbah, 2010, str. 20)

Število etaž	[2]	(P) do 600 m ² BET	(P+1) do 600 m ² BET	(P in P+1) nad 600 m ² BET	(P+2)	(P+3)	(P+4) (P+5)	(P+6) (P+7)
112 - Večstanovanjske stavbe	A	nz	R 60 [3]	R 60 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60	R 60
	B	nz	R 60 [3]	R 60 [3]	R 60 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60
113 - Stanovanjske stavbe za posebne namene	A	R 30 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60	R 90	R 90	R 90
	B	R 30 [3]	R 60 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60	R 90
121- Gostinske stavbe	A	ng ali R 30 [3]	R 30 [3]	R 30 [3]	R 60 [4]	R 90	R 90	[5]
1241 – Postaje, terminali, stavbe za elektronske komunikacije in z njimi povezane stavbe	B	nz	nz	R30 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60	R 90
1261 – Stavbe za kulturo in razvedrilo								
1262 – Muzeji in knjižnice								
1263 – Stavbe za izobraževanje in znanstveno-raziskovalno delo								
1265 – Športne dvorane								
123 – Trgovske in druge stavbe za storitvene dejavnosti								
1272 – Stavbe za opravljanje verskih obredov, pokopališče stavbe								
122 - Upravne in pisarniške stavbe	A	nz	ng ali R 30 [3]	R30 [3]	R30 [4]	R 60 [4]	R 60	R 60
	B	nz	nz	ng ali R 30 [3]	R30 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60
1242 – Garažne stavbe	A	ng	R 30	R 60	R 60	R 90	R 90	R 90
125 - Industrijske stavbe in skladišča nad 1000 MJ/m ²								
125 - Industrijske stavbe in skladišča do 1000 MJ/m ²	B	ng	R 30	R 60	R 60	R 60	R 60	R 60
1271 – Nestanovanjske kmetijske stavbe	A	R 30 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60	R 90	R 90	[5]
	B	R 30 [3]	R 60 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60	R 90
1274 - Nestanovanjske stavbe, ki niso uvrščene drugje	A	R 30	R 30	R 60	R 60	R 60	R 60	R 90
	B	R 30 [3]	R 30 [3]	R 30 [3]	R 30 [3]	R 30	R 30	R 60

V mejnem stanju nosilnosti se za določitev obremenitve v primeru požara upoštevajo obtežne kombinacije za nezgodno projektno stanje, pri katerih se za stalno obtežbo upošteva samo neugodni vpliv. Projektna vrednost obremenitve pri požarnem obtežnem stanju se določi po enačbi (1).

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

$G_{k,j}$	karakteristična vrednost stalne obtežbe (neugodni vpliv)
A_d	nezgodna obtežba (požar)
$Q_{k,1}$	karakteristična vrednost prevladujoče spremenljive obtežbe
$Q_{k,i}$	karakteristična vrednost ostalih spremenljivih vplivov
$\Psi_{1,1}$	kombinacijski faktor za pogoste spremenljive obtežbe
$\Psi_{2,i}$	kombinacijski faktor i-te navidezno stalne spremenljive obtežbe

Priporočene vrednosti faktorja Ψ za stavbe so podane v standardu SIST EN 1990 v tabeli A1.1., priporočene vrednosti faktorja Ψ za spremenljivo obtežbo pa v standardu SIST EN 1991-1-1 v Tabeli 6.2.

Obstajajo različni pristopi za določitev odpornosti nosilne konstrukcije v primeru požarne obremenitve. Najbolj enostavna analiza temelji na analizi posameznega konstrukcijskega elementa. Za mehansko analizo posameznih jeklenih elementov pri povišanih temperaturah se lahko uporabijo enostavne računske metode v skladu s standardom SIST EN 1993-1-2. Element, izpostavljen požarnemu projektnemu stanju po času t ohrani nosilnost, če velja:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t} \quad (2)$$

Po standardu SIST EN 1991-1-2 se lahko za projektno vrednost notranje sile pri požarnem projektnem stanju privzame:

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} E_d \quad (3)$$

kjer so:

$E_{fi,d}$	projektna vrednost obremenitve pri požarnem projektnem stanju
$R_{fi,d,t}$	projektna nosilnost jeklenega elementa pri požarnem projektnem stanju
η_{fi}	faktor redukcije nivoja obremenitve za požarno projektno stanje (kot poenostavitev skladno s SIST EN 1993-1-2 se lahko uporabi priporočena vrednost $\eta_{fi} = 0.65$)
E_d	projektna vrednost obremenitve določena pri normalni temperaturi za MSN

Priporočena vrednost varnostnega faktorja materiala za požarno projektno stanje je $\gamma_{M,fi} = 1.0$.

Za dokazovanje požarne odpornosti posameznih konstrukcijskih elementov ali dela konstrukcije uporabimo poenostavljene računske metode, ki temeljijo na konservativnih predpostavkah. Za analizo globalne stabilnosti celotne konstrukcije v primeru požara poenostavljene metode niso primerne in je zato potrebno uporabiti naprednejše metode. Pri poenostavljeni analizi je konstrukcija, del konstrukcije ali konstrukcijski element izpostavljen standardnemu požaru, ki ga opiše standardna

požarna krivulja ISO 834 (EN1364-1). Standardna požarna krivulja opisuje spreminjanje temperature s časom in ne upošteva faze pred izbruhom požara. Pri analizi je potrebno upoštevati ustrezne načine porušitve, temperaturno odvisne lastnosti materiala, togost elementov, vpliv toplotnih raztezkov in deformacij.

Požarna nosilnost elementa se skladno s standardom SIST EN 1993-1-2 lahko določi na podlagi kritične temperature v jeklu. To je temperatura v jeklenem elementu, pri kateri konstrukcijski element še ohrani svojo nosilnost. Kadar temperatura v elementu preseže kritično temperaturo, je nosilnost jeklenega elementa prekoračena in sledi porušitev konstrukcijskega elementa in posledično konstrukcije. Standard predpostavlja konstanten potek temperature $\theta(t)$ po prečnem prerezu. Kritično temperaturo v jeklenem elementu najlažje določimo s pomočjo evro nomograma, glede na zahtevano požarno odpornost in faktor prereza A_m/V , kjer je za nezaščiten jekleni element:

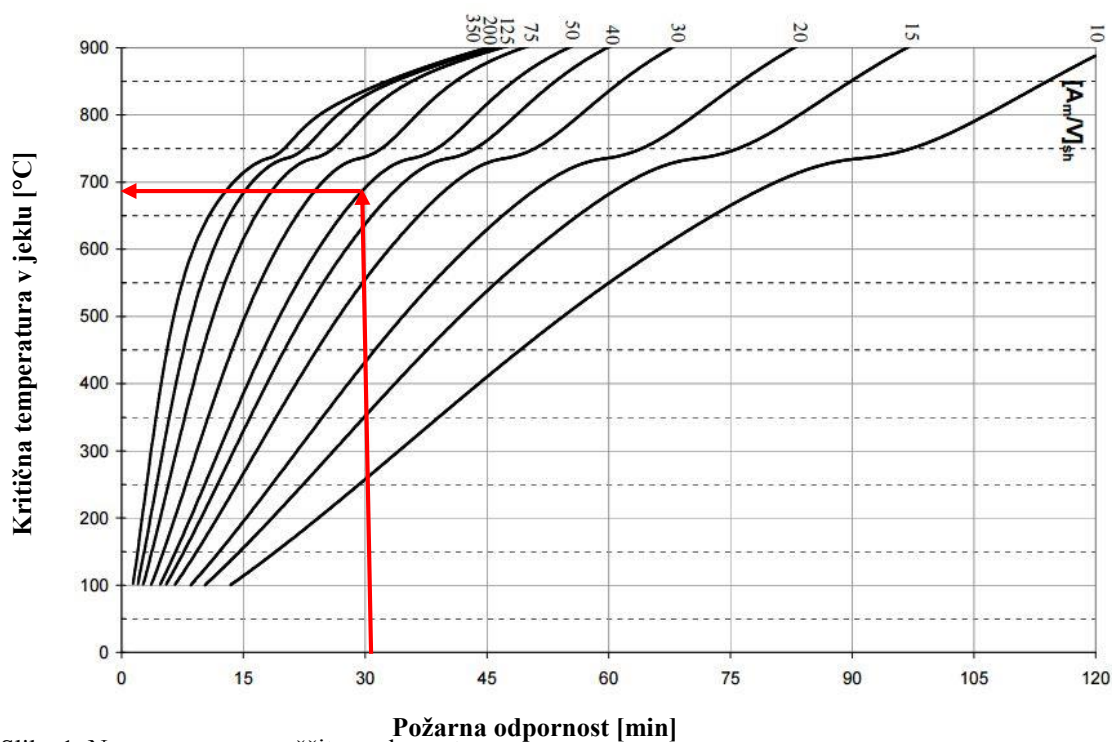
A_m obseg izpostavljen požaru (npr. za I profil je A_m obseg pravokotnika, ki obkroža prerez)

V površina prečnega prereza.

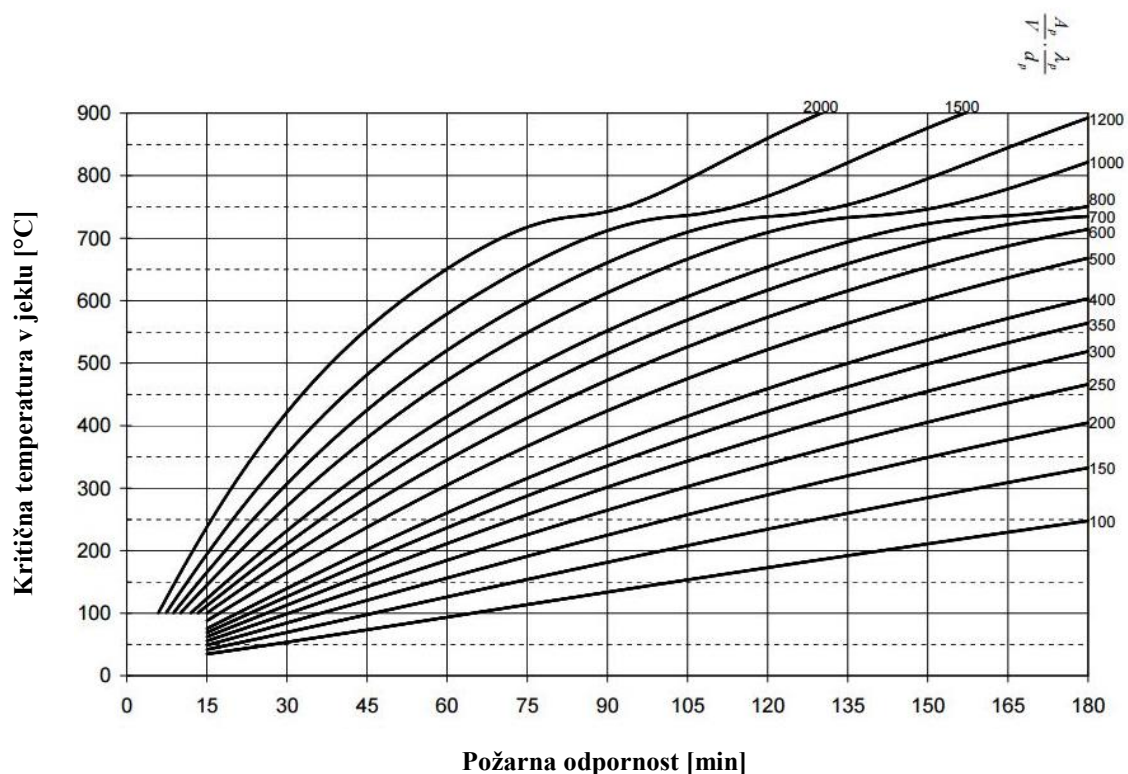
Za nezaščiteni element s faktorjem prereza $A_m/V = 50$ za pol urno požarno odpornost R30, s pomočjo nomograma na sliki 1 določimo kritično temperaturo v jeklenem elementu. Pripadajoča kritična temperatura pri času $t = 30$ min je $\theta_{crit} = 690^\circ\text{C}$.

Za zaščitene elemente kritično temperaturo v jeklu določimo s pomočjo nomograma na sliki 2, glede na faktor zaščitenega prereza A_p/V , debeline materiala za požarno zaščito d_p in toplotne prevodnosti sistema požarne zaščite λ_p .

Faktor prereza A_m/V za nezaščitene jeklene elemente se določi na podlagi preglednice 4.2, faktor prereza A_p/V za zaščitene elemente pa na podlagi preglednice 4.3 iz standarda SIST EN 1993-1-2.



Slika 1: Nomogram za nezaščitene elemente



Slika 2: Nomogram za zaščitene elemente

2.1 Mehanski odziv konstrukcije

Glavni parametri, ki vplivajo na obnašanje jeklenih konstrukcij so obtežba, geometrija konstrukcije, časovni razvoj temperature v nosilnem elementu in mehanske lastnosti materiala pri povišanih

temperaturah. Jeklo se pod vplivom povišanih temperatur toplotno razteza. Z naraščanje temperature se poslabšajo mehanske lastnosti konstrukcije, zmanjšata se togost in nosilnost elementa, pojavijo se plastične deformacije. Konstrukcija lahko zaradi prevelikih deformacij izgubi globalno stabilnost. Pri jeklenih konstrukcijah, ki so izpostavljene standardnemu požaru, se vpliv temperature pri določanju požarne odpornosti upošteva z redukcijskim faktorjem $k_{y,\theta}$, napetosti na meji tečenja f_y in redukcijskim faktorjem $k_{E,\theta}$, modula elastičnosti jekla E .

2.2 Prenos toplote v jeklenih elementih

Toplota se na jekleni element, ki je izpostavljen standardnemu požaru prenaša s kondukcijo oz. prenosom energije iz mesta z višjo temperaturo na mesto z nižjo temperaturo, konvekcijo oz. s prenosom energije z gibanjem snovi z različnimi temperaturami in s sevanjem, kjer se energija prenaša z elektromagnetnim valovanjem.

Standard SIST EN 1993-1-2 predpostavlja, da je temperatura enakomerno razporejena v okolici obravnavanega elementa in po prečnem prerezu. Specifični površinski toplotni tok h_{net} se določi skladno s standardom SIST EN 1991-1-2, kot vsota prenosa toplote zaradi konvekcije in sevanja. Standard predpostavi konstanten toplotni tok po celotni površini elementa.

$$h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r} \quad (4)$$

Toplotni tok zaradi konvekcije se določi po izrazu:

$$h_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad (5)$$

α_c koeficient prehajanja toplote pri konvekciji

θ_g temperatura plinov v okolici elementa

θ_m temperatura na površini elementa

Toplotni tok zaradi sevanja se določi po izrazu:

$$h_{net,r} = \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma (\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \quad (6)$$

Φ faktor oblike

ε_f emisivnost plamenskega telesa

ε_m emisivnost površine jekla

σ Stefan-Boltzmanova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$)

θ_r efektivna temperatura sevanja požara

θ_m temperatura na površini elementa

Za račun toplotnega toka se po standardu SIST EN 1991-1-2 za koeficient prehajanja toplote pri izpostavljenosti elementa standardni požarni krivulji upošteva vrednost $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$, za faktor oblike in emisivnost plamenskega telesa $\Phi = 1$, $\varepsilon_f = 1$ ter $\varepsilon_m = 0,7$ za ogljikovo in $\varepsilon_m = 0,4$ za nerjavno jeklo.

Za temperaturo sevanja požara se predpostavi, da je enaka temperaturi plinov v okolici elementa. Za nezaščiteni jekleni element se prirastek temperature v jeklu v časovnem intervalu Δt , ki ne sme biti daljši od 5 s, izračuna po izrazu:

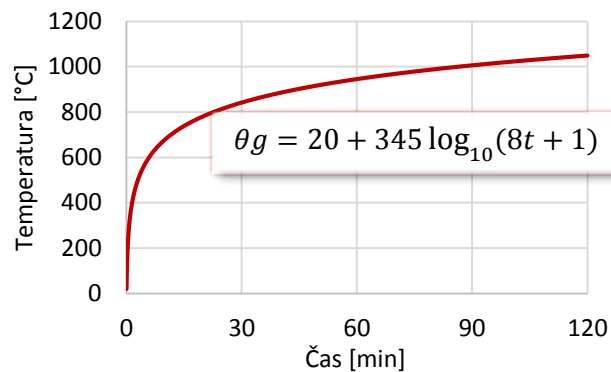
$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{Am/V}{c_a \rho_a} h_{net} \Delta t \quad (7)$$

Korekcijski faktor upošteva vplive zasenčenja in se za pravokotne votle profile, ki so z vseh strani izpostavljeni požaru predpostavi $k_{sh} = 1$. Za gostoto jekla ρ_a se privzame vrednost $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$.

Specifična toplota se za nerjavno jeklo določi po izrazu:

$$c_a = 450 + 0,280 \cdot \theta_a - 2,91 \cdot 10^{-4} \cdot \theta_a^2 + 1,34 \cdot 10^{-7} \cdot \theta_a^3 \quad (8)$$

Slika 3 prikazuje standardno požarno krivuljo ISO 834, ki opisuje spreminjanje temperature plinov v okolici površine elementa v odvisnosti od časa.



Slika 3: Standardna požarna krivulja

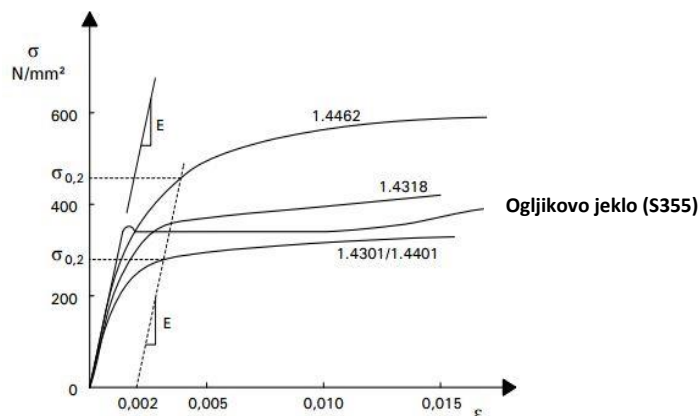
3. NERJAVNO JEKLO

V gradbeništvu se nerjavna jekla, zaradi številnih prednosti pred običajnimi konstrukcijskimi jekli, vse pogosteje uporabljajo. So korozijsko odporna, toplotno obstojna, žilava, enostavna za predelavo in recikliranje. Lahko so različnih vrst, oblik in barv, kar zagotavlja estetski videz konstrukcije. Slabost nerjavnega jekla predstavlja cena, ki je tri do pet krat višja od cene ogljikovega jekla.

Za potrebe gradbeništva se najpogosteje uporablja avstenitno nerjavno jeklo trdnostnega razreda 1.4301 ali 1.4401, z nizko vsebnostjo ogljika in dodanih legiranih elementov, ki tvorijo kubične ploskovno orientirane kristalne mreže. Vsebujejo približno 18% kroma in 8-11% niklja. Visoka temperatura pospešuje oksidacijsko korozijo, zato običajna karbonska jekla hitro rjavijo. Dodatek niklja in kroma tako nerjavnemu jeklu omogoča korozijsko odpornost ter obstojnost. Na račun dodanih legiranih elementov se nerjavno jeklo v primerjavi z ogljikovim jeklom boljše obnaša pri visokih temperaturah. Nerjavno jeklo se obdelava s postopkom hladnega valjanja. Je anizotropen material, zato se paralelno in transverzalno, glede na smer valjanja, obnaša nesimetrično tako v tlaku kot nategu. Zaradi različnega obnašanja nerjavnega jekla, se za račun nosilnosti ravnomo skladno s standardom SIST EN 1993-1-4.

3.1 Mehanske lastnosti nerjavnega jekla

Mehanske lastnosti ogljikovega in nerjavnega jekla se razlikujejo po zvezi napetost-deformacija. Ogljikovo jeklo se do meje tečenja obnaša povsem linearno elastično in ima izrazit plato plastičnega tečenja. Nerjavno jeklo nima izrazitega platoja, meja tečenja pa se določi z napetostjo, pri kateri po razbremenitvi ostane 0,2% nepovratne plastične deformacije. Slika 4 prikazuje tipično obnašanje nerjavnega in ogljikovega jekla.



Slika 4: Zveza napetost-deformacija za ogljikovo in nerjavno jeklo

Mehanske lastnosti pri povišanih temperaturah se določijo skladno s SIST EN 1993-1-2. Po enostavnih računskih metodah se za račun nosilnosti elementov iz nerjavnega jekla uporabi efektivna

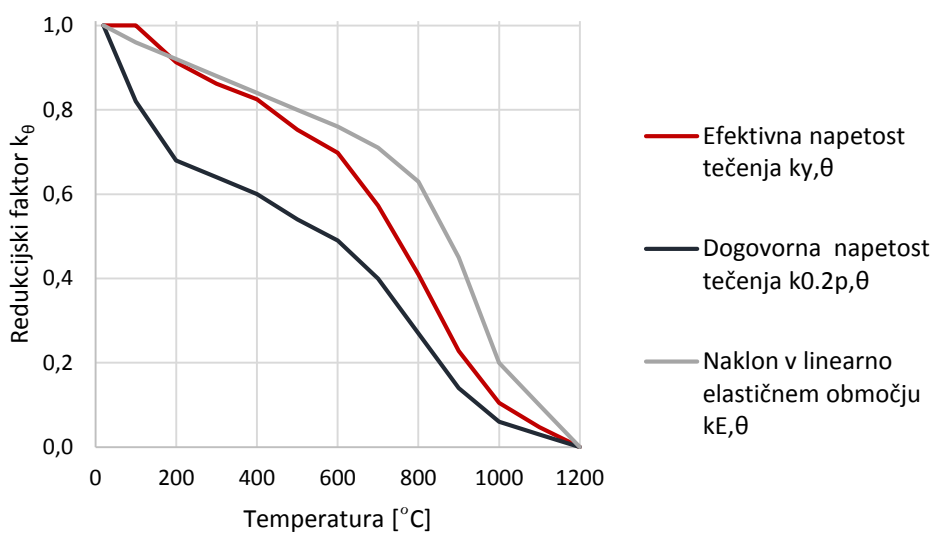
napetost tečenja, ki je odvisna od dogovorne napetosti tečenja, natezne trdnosti in faktorja $k_{2\%,\theta}$.
 Efektivna napetost se določi po izrazu:

$$f_{y,\theta} = f_{0.2p,\theta} + k_{2\%,\theta} (f_{u,\theta} - f_{0.2p,\theta}) \quad (9)$$

Redukcijski faktorji za določanje mehanskih lastnosti nerjavnega jekla 1.4301 pri povišanih temperaturah so podani v preglednici 2.

Preglednica 2: Redukcijski faktorji za določanje mehanskih lastnosti nerjavnega jekla 1.4301 pri povišanih temperaturah (SIST EN 1993-1-2; 2005, str. 67)

Temperatura jekla θ_a	Redukcijski faktor (glede na E_a) za naklon v linearno elastičnem območju $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$	Redukcijski faktor (glede na f_y) za dogovorno napetost tečenja $k_{0.2,p,\theta} = f_{0.2,p,\theta} / f_y$	Redukcijski faktor (glede na f_u) za natezno trdnost $k_{u,\theta} = f_{u,\theta}/f_u$	Faktor za določanje napetosti tečenja $f_{y,\theta}$ $k_{2\%,\theta}$
Jeklo 1.4301				
20	1	1	1	0,26
100	0,96	0,82	0,87	0,24
200	0,92	0,68	0,77	0,19
300	0,88	0,64	0,73	0,19
400	0,84	0,6	0,72	0,19
500	0,8	0,54	0,67	0,19
600	0,76	0,49	0,58	0,22
700	0,71	0,4	0,43	0,26
800	0,63	0,27	0,27	0,35
900	0,45	0,14	0,15	0,38
1000	0,2	0,06	0,07	0,4
1100	0,1	0,03	0,03	0,4
1200	0	0	0	0,4



Slika 5: Redukcijski faktorji za zvezo napetost-deformacija za nerjavno jeklo 1.4301 pri povišanih temperaturah

4. PRIMERJAVA POŽARNE ODPORNOSTI OGLJIKOVEGA IN NERJAVNEGA JEKLA NA PRIMERU RHS STEBRA

V nadaljevanju je prikazana analiza požarne odpornosti nezaščitenega RHS stebra iz ogljikovega jekla kvalitete S235 in iz nerjavnega jekla trdnostnega razreda 1.4301. Steber s prečnim prerezom RHS 200x100x6 in dolžino 3 m je na obeh straneh členkasto podprt in iz vseh strani izpostavljen standardnem požaru ISO 834.

4.1 Mehanske lastnosti

Mehanske lastnosti ogljikovega jekla kvalitete S235 pri 20°C se povzamejo iz standarda SIST EN 1993-1-1:

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

$$f_u = 360 \text{ MPa}$$

$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

Mehanske lastnosti nerjavnega jekla razreda EN 1.4301 pri 20°C povzete po SIST EN 1993-1-4:

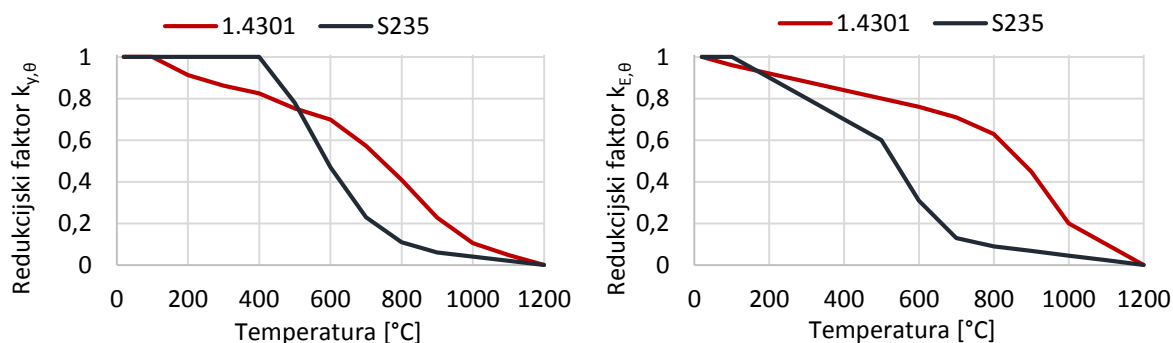
$$f_y = 210 \text{ Mpa}$$

$$f_u = 520 \text{ MPa}$$

$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

Glavni razlog za boljše obnašanje nerjavnega jekla pri povišanih temperaturah je njegova mikrostruktura. Atomi v avstenitni mikrostrukturi nerjavnega jekla so gosteje razporejeni, kot atomi v feritni mikrostrukturi ogljikovega jekla. Legirani elementi nerjavnemu jeklu onemogočajo prosto premikanje atomov, kar upočasni rekristalizacijo pri povišanih temperaturah. Zmanjšanje trdnosti in togosti posamezne vrste jekla se upošteva z redukcijskimi faktorji. Redukcijski faktor napetosti meje tečenja nerjavnega jekla je pri temperaturah višjih od 550°C večji v primerjavi z redukcijskim faktorjem ogljikovega jekla. Redukcijski faktor za naklon v linearno elastičnem območju nerjavnega jekla je pri vseh povišanih temperaturah večji od redukcijskega faktorja ogljikovega jekla. Nerjavno jeklo zato ohranja večjo togost pri povišanih temperaturah.

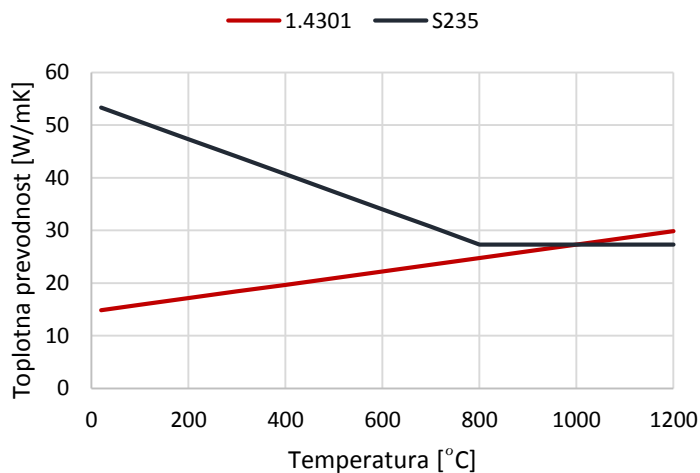
Slika 6 prikazuje spreminjanje redukcijskih faktorjev v odvisnosti od temperature za ogljikovo in nerjavno jeklo.



Slika 6: Primerjava redukcijskega faktorja za efektivno napetost tečenja (levo) in redukcijskega faktorja za naklon v linearno elastičnem območju (desno)

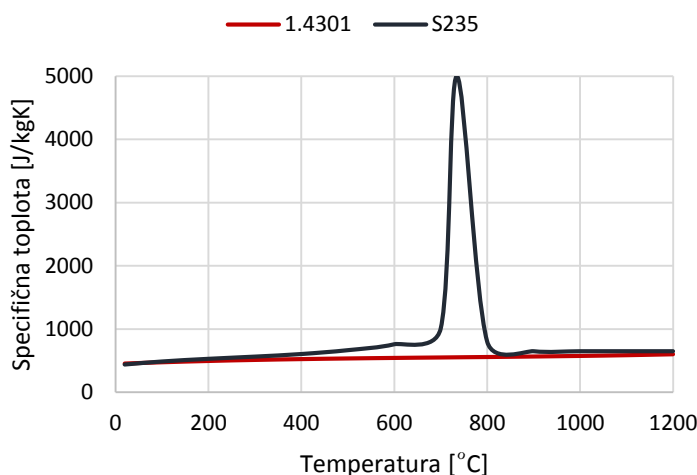
4.2 Toplotne lastnosti

Ogljikovo jeklo ima v primerjavi z nerjavim jeklom pri sobni temperaturi veliko večjo prevodnost. Z višanjem temperature se toplotna prevodnost nerjavnega jekla enakomerno povečuje, medtem ko pri ogljikovem jeklu toplotna prevodnost pada do temperature 800°C. Zaradi velike začetne toplotne prevodnosti se ogljikovo jeklo v začetnih fazah požara segreva hitreje kot nerjavno jeklo.



Slika 7: Primerjava toplotne prevodnosti jekla S235 in 1.4301 v odvisnosti od temperature

Specifična toplota ogljikovega jekla se izrazito poveča pri temperaturi 735°C in je posledica spremembe faze jekla. Ogljikovo jeklo ima feritno mikrostrukturo vse do temperature 735°C, nato pa preide v avstenitno mikrostrukturo. Nerjavno jeklo pri povišanih temperaturah ne spremeni svoje strukture, zato se specifična toplota takega jekla bistveno ne spreminja.



Slika 8: Primerjava specifične toplote jekla S235 in 1.4301 v odvisnosti od temperature

4.3 Klasifikacija prereza

Prečni prerezi se v razred kompaktnosti razvrstijo na enak način kot pri sobni temperaturi 20°C. Vpliv povišane temperature standard SIST EN 1993-1-2 za ogljikovo jeklo upošteva z zmanjšanjem vrednosti parametra ε s faktorjem 0,85. Faktor 0,85 za ogljikovo jeklo predstavlja povprečno vrednost razmerja $(k_E/k_y)^{0.5}$, ki pa pri povišanih temperaturah za različne trdnostne razrede nerjavnega jekla izrazito variira, zato ta vrednost za požarno odporno projektiranje nerjavnega jekla ni primerna. Parameter ε je za nerjavno jeklo odvisen od napetosti meje tečenja f_y in elastičnega modula E . Klasifikacija prereza je za nerjavno jeklo neodvisna od temperature.

Karakteristike prereza:

$h = 200 \text{ mm}$	$A = 34,2 \text{ cm}^2$
$b = 100 \text{ mm}$	$I_y = 1754 \text{ cm}^4$
$t = 6 \text{ mm}$	$I_z = 589 \text{ cm}^4$
$l = 300 \text{ cm}$	$i_y = 7,16 \text{ cm}$
	$i_z = 4,15 \text{ cm}$

Ogljikovo jeklo S235:

$$\varepsilon = 0,85 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,85$$

$$\text{Stojina: } \frac{c}{t} = \frac{h-2t}{t} = \frac{188 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 31,3 \leq 38\varepsilon = 32,3$$

$$\text{Pasnica: } \frac{c}{t} = \frac{b-2t}{t} = \frac{88 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 14,7 \leq 33\varepsilon = 28,1$$

Prerez je v 2. razredu kompaktnosti.

Nerjavno jeklo 1.4301:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235 \cdot 200000}{210 \cdot 210000}} = 1,03$$

$$\text{Stojina: } \frac{c}{t} = \frac{h-2t}{t} = \frac{188 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 31,3 \leq 30,7\varepsilon = 31,6$$

$$\text{Pasnica: } \frac{c}{t} = \frac{b-2t}{t} = \frac{88 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 14,7 \leq 25,7\varepsilon = 26,5$$

Prerez je v 3. razredu kompaktnosti.

4.4 Nosilnost elementa

Steber se zaradi delovanja tlačne obremenitve lahko ukloni. Pri analizi požarno projektne stanja se upoštevajo ustrezno zmanjšane temperaturno odvisne lastnosti materiala in togost elementa. Projektne uklonske nosilnosti tlačnih elementov, ki so izpostavljeni standardnemu požaru, je odvisna od relativne vitkosti, redukcijskega faktorja za napetost tečenja jekla in redukcijskega faktorja za naklon v linearno elastičnem območju pri temperaturi θ_a doseženi v času t . Na podlagi relativne vitkosti in uklonske krivulje se določi redukcijski faktor za upogibni uklon pri požarnem projektne stanju $\chi_{fi} = \chi_{fi}(\bar{\lambda}, \alpha)$.

Uklonska dolžina stebra l_{fi} se določi enako kot pri normalni temperaturi. Ker je steber na obeh straneh členkasto vpet je uklonska dolžina enaka dolžini stebra. Za uklonsko nezavarovan steber je merodajen uklon okrog šibke osi z .

Relativna vitkost $\bar{\lambda}$ pri 20°C se določi z izrazom:

$$\bar{\lambda} = \frac{l_u}{i \cdot 93,9 \varepsilon} \quad (10)$$

Relativna vitkost pri povišani temperaturi se določi po enačbi (11) glede na relativno vitkost pri temperaturi 20°C, redukcijskega faktorja za napetost tečenja jekla $k_{y,\theta}$ in naklon v linearno elastičnem območju $k_{E,\theta}$ pri temperaturi jekla θ_a doseženi v času t :

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad (11)$$

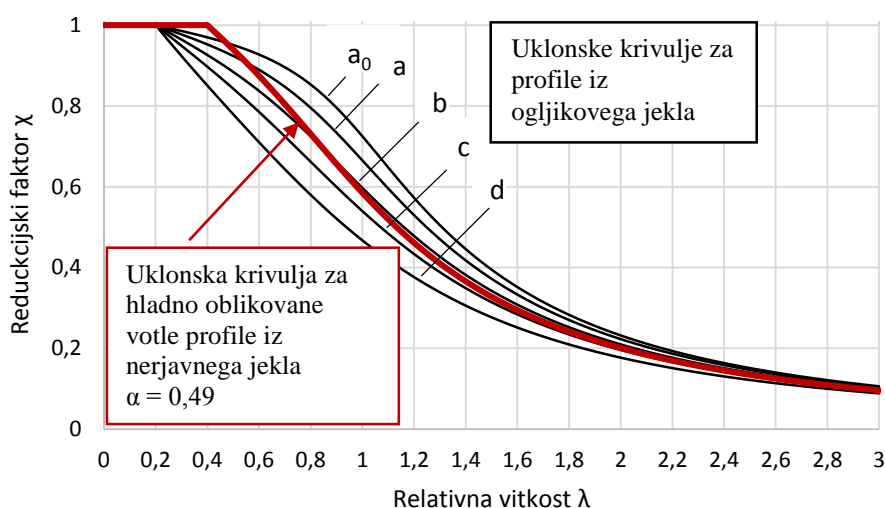
4.4.1 Uklonske krivulje

Uklonske krivulje, ki prikazujejo odvisnost redukcijskega faktorja χ od relativne vitkosti $\bar{\lambda}$ se med seboj razlikujejo glede na faktor nepopolnosti α . Faktor nepopolnosti zajame vpliv geometrijskih nepopolnosti in zaostalih napetosti, ki so posledica postopka izdelave profila (varjenje, vroče valjanje, hladno valjanje). Faktor α se z večanjem nepopolnosti povečuje. Izbira uklonske krivulje je odvisna od prečnega prereza, postopka izdelave, vrste jekla in osi, okrog katere je možen uklon. Za hladno oblikovane votle profile iz ogljikovega jekla se pri sobni temperaturi 20°C uporabi uklonska krivulja

c. Faktor nepopolnosti α je pri sobni temperaturi za hladno oblikovane votle profile iz ogljikovega in nerjavnega jekla enak.

Preglednica 3: Faktorji nepopolnosti uklonskih krivulj za ogljikovo jeklo

uklonska krivulja	a_0	a	b	c	d
faktor nepopolnosti α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76



Slika 9: Primerjava uklonskih krivulj za ogljikovo in nerjavno jeklo pri sobni temperaturi

Standard SIST EN 1993-1-2 za izračun požarne odpornosti tlačnih elementov upošteva 'požarno' uklonsko krivuljo, ki je eksperimentalno določena na podlagi obnašanja stebrov iz ogljikovega jekla pri povišanih temperaturah. 'Požarna' uklonska krivulja, ki jo opiše enačba (12), je nižja za vse relativne vitkosti in napetosti tečenja.

$$\varphi_{\theta} = 0.5 \left(1 + 0.6 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right) \quad (12)$$

Redukcijski faktor za upogibni uklon se določi z izrazom:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad (13)$$

Faktor nepopolnosti α pri požarnem projektnejem stanju je višji od faktorja nepopolnosti za hladno oblikovane votle profile iz ogljikovega ali nerjavnega jekla pri sobni temperaturi. Z večanjem faktorja nepopolnosti se manjša vrednost redukcijskega faktorja uklonske nosilnosti χ_{fi} , zato 'požarna' uklonska krivulja za vse relativne vitkosti pri povišanih temperaturah $\bar{\lambda}_{\theta}$ leži pod uklonsko krivuljo za hladno oblikovane votle profile pri sobni temperaturi.

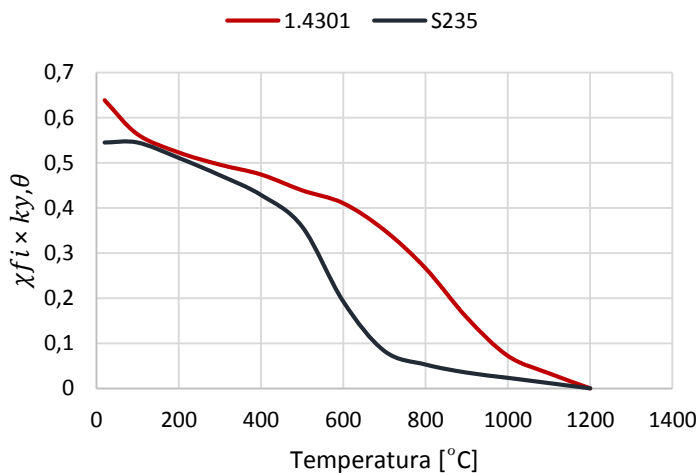
4.4.2 Primerjava uklonske nosilnosti

Uklonska nosilnost za tlačene elemente s prečnimi prerezi v 1., 2. ali 3. razredu kompaktnosti se izračuna po izrazu:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (14)$$

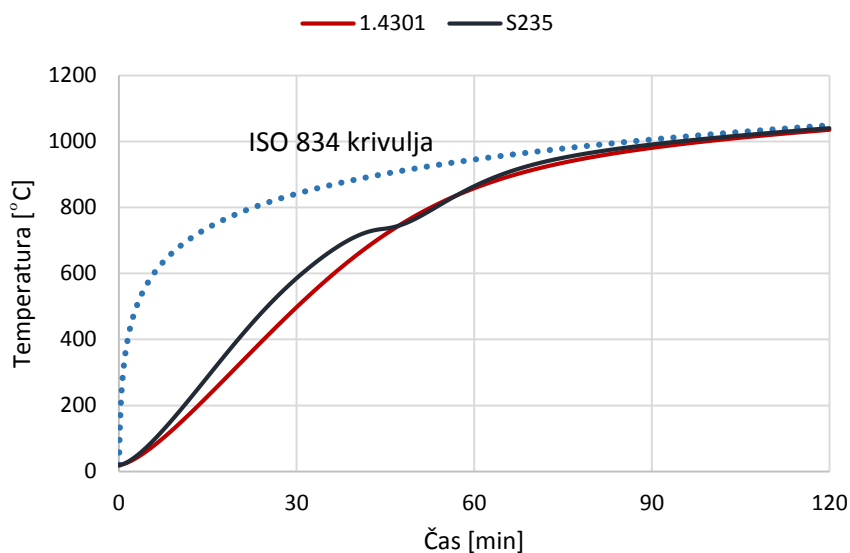
Različna uklonska nosilnost je posledica različnih mehanskih lastnosti ogljikovega in nerjavnega jekla. Zaradi značilne mikrostrukture in dodanih legiranih elementov so mehanske lastnosti nerjavnega jekla pri temperaturi višji od 500°C boljše. Nerjavno jeklo ima pri temperaturah višjih od 500°C v primerjavi z ogljikovim jeklom veliko večjo trdnost in togost. Slika 10 prikazuje primerjavo brezdimezionalne uklonske nosilnosti stebra iz nerjavnega in ogljikovega jekla. Zaradi manjše relativne vitkosti stebra iz nerjavnega jekla in posledično večje vrednosti redukcijskega faktorja uklonske nosilnosti χ_{fi} , je brezdimezionalna uklonska nosilnost nerjavnega jekla pri vseh povišanih temperaturah višja od brezdimezionalne uklonske nosilnosti enakega stebra iz ogljikovega jekla.

Pri temperaturi 500°C nosilnost ogljikovega jekla v primerjavi z nerjavnim jeklom začne izrazito padati. Pri temperaturi 700°C pa je nosilnost zanemarljivo majhna.



Slika 10: Primerjava brezdimezionalne uklonske nosilnosti pri povišanih temperaturah za jeklo 1.4301 in S235

Slika 11 prikazuje razvoj temperature v RHS elementu v odvisnosti od časa s faktorjem prereza $\frac{Am}{V} = 167 m^{-1}$ iz nerjavnega jekla 1.4301 in ogljikovega jekla S235 glede na standardno požarno krivuljo ISO 834.



Slika 11: Razvoj temperature v jeklenem elementu v odvisnosti od časa

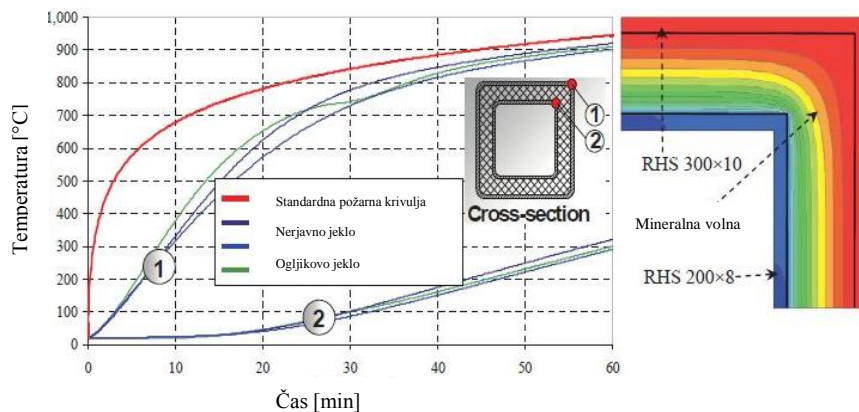
Ogljikovo jeklo ima v začetnih fazah požara večjo toplotno prevodnost. V začetku, ko oba stebra izpostavimo standardnemu požaru, razvoj temperature v stebru iz ogljikovega jekla poteka hitreje kot v stebru iz nerjavnega jekla. Po času 45 minut temperatura v stebru iz ogljikovega jekla doseže vrednost 735°C. Pri tej temperaturi ogljikovo jeklo spremeni svojo strukturo. Ker imata nerjavno in ogljikovo jeklo pri temperaturah višjih od 735°C enako kristalno strukturo, podobno toplotno prevodnost in specifično toploto, se temperatura v obeh stebrih razvija približno enako.

5. ESCS PROJEKT: POŽARNA ODPORNOST ELEMENTOV IZ HLADNO OBLIKOVANEGA NERJAVNEGA JEKLA

Obnašanje konstrukcijskih elementov iz hladno oblikovanega nerjavnega jekla, ki so izpostavljeni požarni obremenitvi, so preučevali v sklopu ESCS projekta. Ker je cena konstrukcijskih elementov iz nerjavnega jekla višja v primerjavi z elementi iz ogljikovega jekla, je bil glavni cilj projekta razviti bolj ekonomične postopke za požarnoodporno projektiranje konstrukcijskih elementov iz nerjavnega jekla v primerjavi z obstoječimi predpisi iz standardov Evrokod. Na podlagi rezultatov iz eksperimentalnih testov, numeričnih analiz in parametričnih študij so opazovali obnašanje konstrukcijskih elementov in ugotavljali, kateri parametri vplivajo na rast temperature v jeklenem elementu ter prednosti nerjavnega jekla pred ogljikovim jeklom. Dokazali so, da lahko nekateri konstrukcijski elementi brez protipožarne zaščite dosežejo 30 minutno do 60 minutno požarno odpornost, če je nivo obtežbe majhen. Nivo obtežbe predstavlja razmerje med nosilnostjo pri kritični temperaturi in nosilnostjo pri sobni temperaturi.

Nosilni konstrukcijski elementi

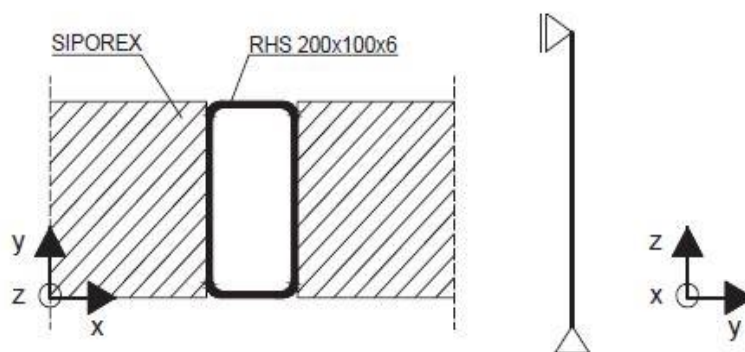
V sklopu projekta so preučevali razvoj temperature v jeklenem elementu iz nerjavnega in ogljikovega jekla, ki je bil izpostavljen standardnemu požaru. Temperaturo so merili v vsakem vogalu prečnega prereza RHS stebra, napolnjenega z mineralno volno. Mineralna volna ima zelo nizko toplotno prevodnost in se zato uporablja kot toplotna izolacija. Toplotne lastnosti pri povišanih temperaturah so upoštevali skladno s standardom EN 1993-1-2. EN 1993-1-2 podaja za emisivnost površine ogljikovega jekla vrednost 0,7 in za nerjavno jeklo 0,4 ter prestopni toplotni koeficient $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$. Na podlagi numerične analize so ugotovili, da je potek temperature po prečnem prerezu konstanten. Razvoj temperature pa je bil v obeh stebrih približno enak, neglede na različne materialne karakteristike (Slika 12). Notranja stran stebra se je zaradi nizke toplotne prevodnosti mineralne volne segrela manj kot zunanja stran, ki je bila izpostavljena požaru.



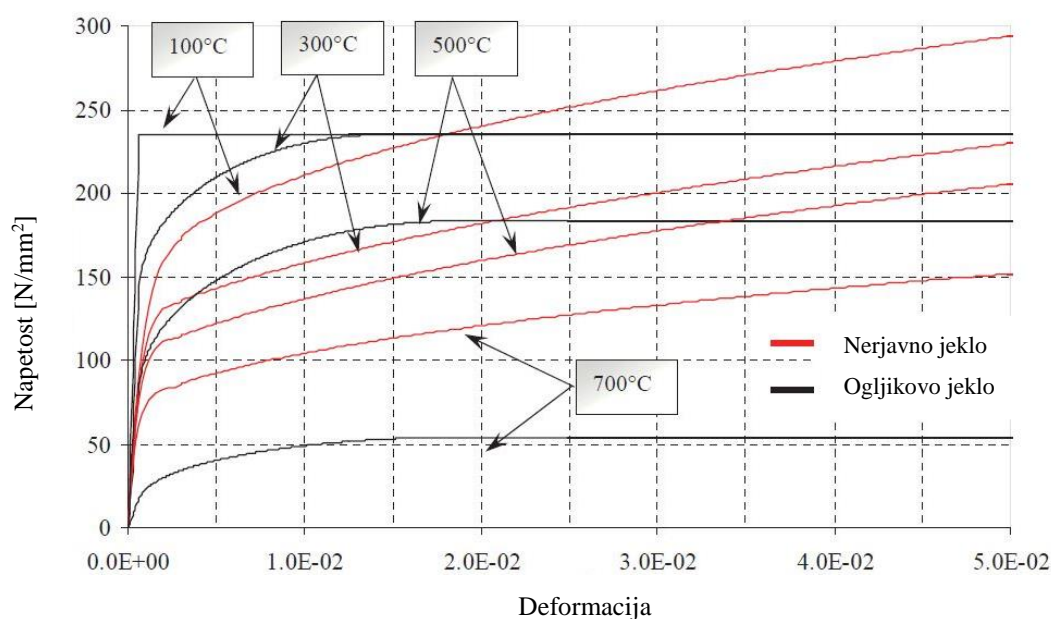
Slika 12: Razvoj temperature v prečnem prerezu (Stainless steel in fire, 2009, str. 20)

Pri povišanih temperaturah so z uporabo metode končnih elementov primerjali obnašanje RHS stebra iz nerjavnega jekla 1.4301 in enakega stebra iz ogljikovega jekla S235. Dokler temperatura v prečnem prerezu ne preseže 400°C se stebra iz ogljikovega in nerjavnega jekla obnašata podobno. Pri 600°C je stabilnost stebra iz nerjavnega jekla večja. Ohranjanje večje trdnosti in togosti pri povišanih temperaturah lahko stebri iz nerjavnega jekla prepreči izgubo globalne stabilnosti. Na podlagi nadaljnje toplotne analize RHS stebra $200 \times 200 \times 8$ so primerjali maksimalno obtežbo, ki jo lahko pri povišanih temperaturah preneseta stebra iz nerjavnega in ogljikovega jekla. Steber z višino 3,5 m so izpostavili standardnemu požaru. Po pol urni izpostavljenosti standardnemu požaru je temperatura v stebri iz nerjavnega jekla dosegla 698°C , v stebri iz ogljikovega jekla pa 740°C . Po 60 minutah je bila temperatura v stebri iz nerjavnega jekla 848°C in v stebri iz ogljikovega jekla 896°C . Nosilnost so analizirali na segretyh stebrih. Razmerje med nosilnostjo pri kritični temperaturi in nosilnostjo pri sobni temperaturi je za nerjavno jeklo znašalo 84% , za ogljikovo jeklo pa 22%.

Toplotno analizo so izvedli tudi na RHS stebri z dimenzijami $200 \times 100 \times 6$ višine 3m, ki je bil z dveh strani obdan z Siporex steno, kot je prikazano na sliki 13. Siporex (avtoklavirani celični beton) je konstrukcijski material, ki ima dobre toplotno izolativne karakteristike. Steber so za 30 in 60 minut izpostavili standardnemu požaru in merili temperaturo v prerezu. Na podlagi analize so ugotavljali nosilnost konstrukcijskih elementov pri povišanih temperaturah. Steber so nato obremenili še s tlačno vertikalno obtežbo 359 kN in ga za 60 minut izpostavili temperaturam pridobljenih iz toplotne analize. Obtežbo so povečevali dokler steber ni izgubil svoje nosilnosti. Členkasto vpet steber iz nerjavnega jekla se je uklonil pri 14 minutah, medtem ko je enak steber iz ogljikovega jekla dosegel 30 minutno odpornost. Pri majhnih deformacijah in temperaturah nižjih od 500°C ima ogljikovo jeklo višjo trdnost in večjo togost. Steber iz ogljikovega jekla je izgubil nosilnost pri temperaturi 700°C zaradi zmanjšanja napetosti na meji tečenja. Zveze med napetostjo in deformacijo pri povišanih temperaturah za nerjavno in ogljikovo jeklo so prikazane na sliki 14.



Slika 13: Prečni prerez in robni pogoji za steber obdan s Siporex steno (Stainless steel in fire, 2009, str. 23)



Slika 14: Primerjava zveze napetost-deformacija pri povišanih temperaturah za ogljikovo in nerjavno jeklo (Stainless steel in fire, 2009, str. 24)

Stebri s prečnim prerezom v 4. razredu kompaktnosti

Pri sobni temperaturi so v sklopu projekta testirali nosilnost štirih RHS stebrov iz hladno oblikovanega nerjavnega jekla 1.4301, dimenzij 200x200x5 in 150x150x3. Prečni prerezi takih stebrov so v 4. razredu kompaktnosti. Posamezni stebri so bili visoki 900 mm. Svojo nosilnost so izgubili v kratkem času zaradi lokalnega izbočenja na sredini stebra. Pri povišanih temperaturah so testirali stebre enakih dimenzij z različno velikostjo obtežbe. Stebri so tudi pri povišanih temperaturah izgubili nosilnost že zaradi lokalnega izbočenja.

Preglednica 4: Rezultati testov pri povišanih temperaturah (Stainless steel in fire, 2009, str.43)

Profil	Obtežba pri poružitvi [kN]	Nivo obtežbe	Kritična temperatura [°C]
150x150x3	203	0.51	676
150x150x3	165	0.42	720
150x150x3	248	0.63	588
200x200x5	694	0.62	609
200x200x5	567	0.50	685
200x200x5	463	0.41	764

Z analizo 3.1 m visokih členkasto podprtih RHS stebrov, izpostavljenih standardnemu požaru so v sklopu projekta dokazali, da nezaščiteni stebre iz nerjavnega jekla s prečnim prerezom v 4. razredu kompaktnosti dosežejo 30 minutno požarno odpornost pri nivoju obtežbe, ki je manjši od 30%.

5.1 Primerjava pristopov Euro Inox in CTICM za požarnoodporno projektiranje nerjavnega jekla

Za požarnoodporno projektiranje elementov iz nerjavnih jekel se namesto priporočil iz standarda SIST EN 1993-1-2, lahko uporabita dva različna pristopa: pristop Euro Inox Design Manual in novejši pristop CTICM, ki je bil razvit v sklopu ESCS projekta, kjer so preučevali obnašanje hladno oblikovanega nerjavnega jekla. V nadaljevanju je prikazana primerjava izračuna uklonske nosilnosti po obeh pristopih glede na priporočila iz standarda SIST EN 1993-1-2. RHS steber z dimenzijami 40x40x4 je iz nerjavnega jekla trdnostnega razreda 1.4031.

Za mehanske lastnosti nerjavnega jekla pri 20°C se upoštevajo vrednosti iz standarda SIST EN 1993-1-4. Vrednosti redukcijskih faktorjev za določanje mehanskih lastnosti nerjavnega jekla pri povišanih temperaturah se upoštevajo vrednosti podane v standardu SIST EN 1993-1-2 v preglednici C.1.

Karakteristike prereza stebra:

$$h = 40 \text{ mm}$$

$$A = 5,35 \text{ cm}^2$$

$$b = 40 \text{ mm}$$

$$I_y = I_z = 11,8 \text{ cm}^4$$

$$t = 4 \text{ mm}$$

$$i_y = i_z = 1,45 \text{ cm}$$

$$l = 100 \text{ cm}$$

$$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_y = 210 \text{ MPa}$$

$$f_u = 520 \text{ MPa}$$

5.1.1 Klasifikacija prereza

Parameter ε za klasifikacijo prereza pri povišani temperaturi se po pristopu Euro Inox in CTICM izračuna na enak način in je odvisen od napetosti meje tečenja f_y in elastičnega modula E . Vrednost parametra ε je neodvisna od temperature in se določi po izrazu:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{210} \frac{200000}{210000}} = 1,03$$

$$\text{Stojina: } \frac{c}{t} = \frac{b-2t}{t} = \frac{32 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} = 8 \leq 25,7\varepsilon = 26,5$$

$$\text{Pasnica: } \frac{c}{t} = \frac{b-2t}{t} = \frac{32 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} = 8 \leq 25,7\varepsilon = 26,5$$

Prerez je v 1. razredu kompaktnosti.

5.1.2 Trdnost materiala

Trdnost materiala se uporabi za izračun relativne vitkosti in za določanje uklonske nosilnosti pri povišani temperaturi θ_a . Standard SIST EN 1993-1-2 in pristop Euro Inox za 1., 2. in 3. razred

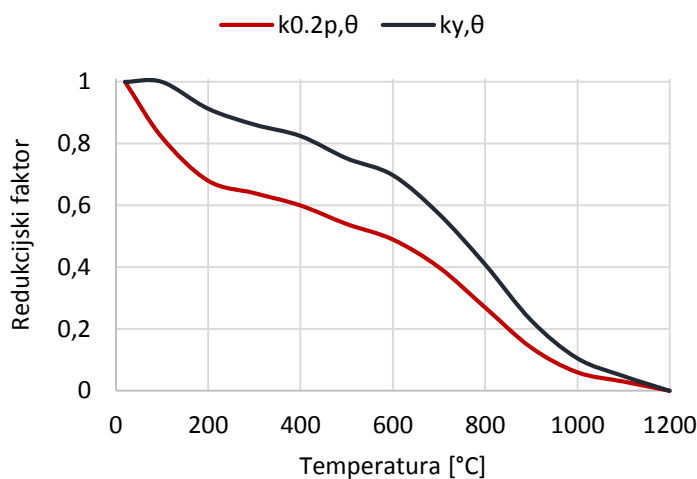
kompaktnosti upoštevata efektivno napetost meje tečenja $f_{y,\theta}$, za 4. razred kompaktnosti pa dogovorno napetost tečenja pri 2% elastične deformacije $f_{0,2p,\theta}$ CTICM za vse razrede kompaktnosti uporabi napetost tečenja $f_{0,2p,\theta}$. Efektivna napetost tečenja $f_{y,\theta}$ je za 20 do 25% višja od dogovorjene napetosti tečenja $f_{0,2p,\theta}$.

Za uporabo enostavnih računskih metod je določanje napetosti meje tečenja po standardu SIST EN 1993-1-2 in pristopi Euro Inox bolj zahteven, saj za račun efektivne napetosti tečenja pri povišani temperaturi $f_{y,\theta}$ upoštevata še korekcijski faktor $k_{2\%,\theta}$ in natezno trdnost jekla $f_{u,\theta}$ pri povišani temperaturi.

Efektivna napetost meje tečenja $f_{y,\theta}$ se določi po enačbi (9).

Po pristopu CTICM je redukcijski faktor za izračun napetosti meje tečenja pri povišani temperaturi neodvisen od natezne trdnosti f_u .

$$f_{0,2p,\theta} = k_{0,2p,\theta} f_y \quad (15)$$



Slika 15: Vpliv temperature na redukcijski faktor materiala (Preglednica 2)

Vrednost redukcijskega faktorja $k_{y,\theta}$ za račun efektivne napetosti tečenja po pristopu Euro Inox je višja od redukcijskega faktorja dogovorjene napetosti tečenja $k_{0,2p,\theta}$, ki se uporabi v računu po pristopu CTICM.

5.1.3 Uklonska krivulja

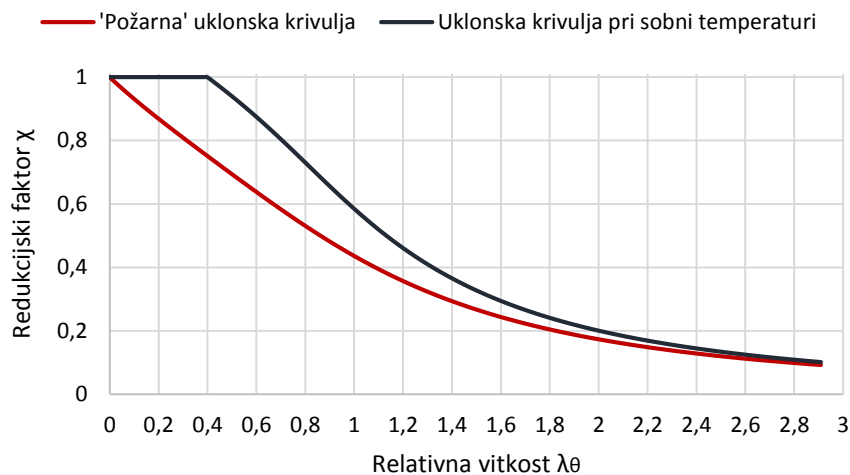
Pri požarno odpornem projektiranju tlačnih elementov pristop Euro Inox, enako kot standard SIST EN 1993-1-2 upošteva 'požarno' krivuljo.

$$\varphi_{\theta} = \frac{1}{2} \left(1 + 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y} \bar{\lambda}_{\theta}} + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right) \quad (16)$$

Pristop CTICM za požarno odporno projektiranje nerjavnih jekel uporabi uklonsko krivuljo, ki velja za projektiranje nerjavnih jekel pri sobni temperaturi po standardu SIST EN 1993-1-4.

$$\varphi_{\theta} = \frac{1}{2}(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{\theta}^2), \quad (17)$$

kjer se za hladno oblikovanje votle profile uporabi: $\alpha = 0.49$, $\bar{\lambda}_0 = 0.4$.



Slika 16: Primerjava uklonskih krivulj pri temperaturi 500°C

Relativna vitkost pri povišani temperaturi $\bar{\lambda}_{\theta}$ je odvisna od relativne vitkosti pri sobni temperaturi 20°C in redukcijskih faktorjev napetosti meje tečenja ter naklona v linearno elastičnem območju. Vrednosti teh redukcijskih faktorjev se s temperaturo manjšajo, zato je relativna vitkost pri povišanih temperaturah manjša od relativne vitkosti pri sobni temperaturi. 'Požarna' uklonska krivulja je zaradi večjega faktorja nepopolnosti za vse relativne vitkosti manjša od uklonske krivulje pri sobni temperaturi za hladno oblikovane votle profile iz nerjavnega jekla (Slika 16).

5.1.4 Nosilnost elementa

Relativna vitkost $\bar{\lambda}$ pri sobni temperaturi 20°C, relativna vitkost pri povišani temperaturi $\bar{\lambda}_{\theta}$, redukcijski faktor za upogibni uklon in uklonska nosilnost stebra, z upoštevanjem različnega redukcijskega faktorja materiala in različnih uklonskih krivulj se določi po enakih izrazih kot v poglavju 4.4. Za izračun relativne vitkosti pri sobni temperaturi, standard SIST EN 1993-1-2 ne podaja nobenih omejitev glede parametra ε . Za izračun relativne vitkosti $\bar{\lambda}$ se upošteva ne reducirana vrednost parametra ε .

Za uklonsko nezavarovan steber je uklonska dolžina stebra v smeri y in z enaka. Uklonska dolžina členkasto vpetega stebra v požarnem projektne stanju: $l_{fi} = l_u = l = 100 \text{ cm}$. Ker je pri analizi uporabljen kvadratni votli profil je uklonska nosilnost okrog obeh osi enaka.

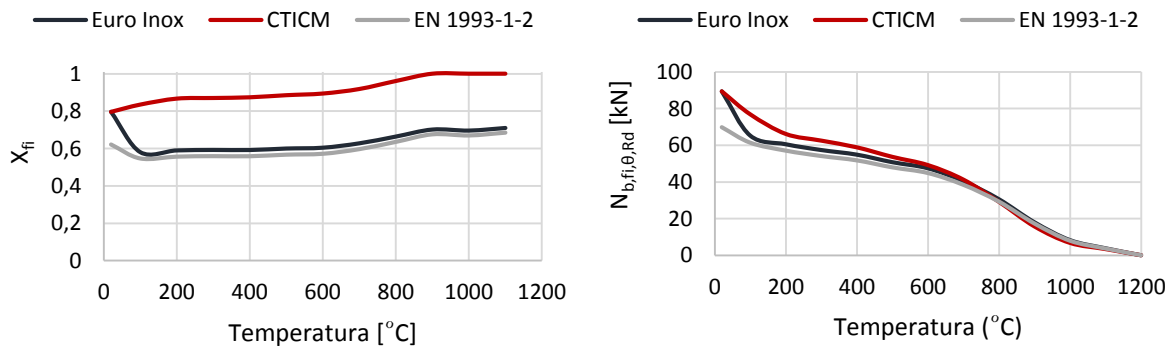
Rezultati izračunov uklonske nosilnosti pri povišanih temperaturah so podani v preglednici 5 in preglednici 6.

Preglednica 5: Izračun uklonske nosilnosti stebra po pristopu Euro Inox Design Manual

θ_a [°C]	$\bar{\lambda}_\theta$	α	φ_θ	χ_{fi}	$N_{b,fi,\theta,Rd}$ [kN]
20	0,7114	0,49	0,8294	0,7964	89,48
100	0,7261	0,6876	1,0133	0,5814	65,32
200	0,7088	0,6876	0,9948	0,5907	60,59
300	0,7041	0,6876	0,9899	0,5932	57,44
400	0,7049	0,6876	0,9908	0,5927	54,92
500	0,6900	0,6876	0,9753	0,6007	50,80
600	0,6819	0,6876	0,9669	0,6052	47,47
700	0,6390	0,6876	0,9239	0,6285	40,45
800	0,5736	0,6876	0,8617	0,6646	30,57
900	0,5063	0,6876	0,8023	0,7020	17,98
1000	0,5163	0,6876	0,8108	0,6964	8,24
1100	0,4914	0,6876	0,7897	0,7103	3,81
1200					0

Preglednica 6: Izračun uklonske nosilnosti stebra po pristopu CTICM

θ_a [°C]	$\bar{\lambda}_\theta$	α	φ_θ	χ_{fi}	$N_{b,fi,\theta,Rd}$ [kN]
20	0,7114	0,49	0,8294	0,7964	89,48
100	0,6575	0,49	0,7793	0,8351	76,93
200	0,6116	0,49	0,7389	0,8669	66,23
300	0,6067	0,49	0,7347	0,8703	62,58
400	0,6013	0,49	0,7301	0,8740	58,92
500	0,5845	0,49	0,7160	0,8853	53,71
600	0,5713	0,49	0,7051	0,8941	49,22
700	0,5340	0,49	0,6754	0,9183	41,27
800	0,4657	0,49	0,6246	0,9609	29,15
900	0,3968	0,49	0,5780	1,0000	15,73
1000	0,3897	0,49	0,5734	1,0000	6,74
1100	0,3897	0,49	0,5734	1,0000	3,37
1200					0

Slika 17: Primerjava redukcijskega faktorja uklonske nosilnosti χ_{fi} (levo) in uklonske nosilnosti elementa (desno) po različnih pristopih za požarno odporno projektiranje nerjavnega jekla

Z višanjem temperature se z zmanjševanjem redukcijskega faktorja posledično manjša tudi trdnost materiala in togost elementa. Standard SIST EN 1993-1-2 in pristop Euro Inox v primerjavi s pristopom CTICM uporabljata nekoliko višji redukcijski faktor in nižjo uklonsko krivuljo. Z upoštevanjem vseh zgoraj omenjenih razlik se izkaže, da je brezdimenzionalni redukcijski koeficient upogibnega uklona χ_{fi} večji po pristopu CTICM. Pri večjem χ_{fi} je uklonska nosilnost večja. Oba pristopa in priporočila iz standarda SIST EN 1993-1-2 se po rezultatih bistveno ne razlikujejo. Metodi za izračun uklonske nosilnosti v primeru požara po standardu in pristopu Euro Inox sta v primerjavi s pristopom CTICM nekoliko bolj konservativni. Z upoštevanjem pristopa CTICM pa smo kljub upoštevanju višje uklonske krivulje na račun večjega redukcijskega faktorja napetosti tečenja na varni strani.

5.2 Primerjava uklonska nosilnost elementov s prečnimi prerezi v 4. razredu kompaktnosti

Pri elementih s prečnimi prerezi v 4. razredu kompaktnosti se zaradi tlačne obremenitve pojavi nevarnost lokalnega izbočenja. Normalne in strižne napetosti se pojavijo v ravnini plošče, pločevina se zato v tlačeni coni izboči. Pri takšnih prerezih je potrebno upoštevati zmanjšanje nosilnosti zaradi lokalnega izbočenja z reduciranim prečnim prerezom in odpornostnim momentom.

Standard SIST EN 1993-1-2 predpostavi, da je kriteriju nosilnosti zadoščeno, če je temperatura jekla v času t , v vseh prečnih prerezih elementa manjša od $\theta_{crit} = 350^{\circ}C$. Ker je ta predpostavka konservativna, standard v dodatku E podaja priporočila za izračun nosilnosti jeklenih elementov s prečnimi prerezi v 4. razredu kompaktnosti pri povišanih temperaturah. V sklopu ESCS projekta so na podlagi eksperimentalnih raziskav razvili nov pristop za požarno projektiranje elementov s prečnimi prerezi v 4. razredu kompaktnosti.

V nadaljevanju je prikazana primerjava pristopov za požarnoodporno projektiranje vitkih prerezov po standardu SIST EN 1993-1-2 in pristopu iz ESCS projekta. Analiziran je RHS steber dimenzij 200x200x5, trdnostnega razreda jekla 1.4031. Steber je členkasto vpet, zato je uklonska dolžina je enaka dolžini stebra.

Karakteristike prereza stebra:

$$h = 200 \text{ mm}$$

$$A = 38,7 \text{ cm}^2$$

$$b = 200 \text{ mm}$$

$$I_y = I_z = 2445 \text{ cm}^4$$

$$t = 5 \text{ mm}$$

$$i_y = i_z = 7,95 \text{ cm}$$

$$l = 310 \text{ cm}$$

$$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_y = 210 \text{ MPa}$$

$$f_u = 520 \text{ MPa}$$

Sodelujoči prerez se po obeh pristopih določi skladno s standardom SIST EN 1993-1-5 na podlagi mehanskih lastnosti pri sobni temperaturi. Pri tem se upošteva redukcijski faktor ρ , ki je za hladno oblikovane profile iz nerjavnega jekla določen v standardu SIST EN 1993-1-4:

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} \quad (18)$$

Zaradi delovanja tlačne osne sile so napetosti po prerezu konstantne. Za tak potek napetosti je razmerje na robovih pločevin $\Psi = 1$, vrednost koeficienta lokalnega izbočenja za izračun efektivne širine pa je $k_\sigma = 4$.

Za projektiranje v pogojih požara se za vitke prečne prereze uporabi dogovorna napetost tečenja določena z enačbo (15).

Nosilnost tlačno obremenjenih elementov s prečnimi prerezi v 4. razredu kompaktnosti se po obeh pristopih določi na enak način kot za kompaktne prereze, z upoštevanjem sodelujočega prečnega prereza A_{eff} .

Model za račun uklonske nosilnosti vitkih prerezov po projektu ESCS uporablja uklonsko krivuljo pri sobni temperaturi, z upoštevanjem parametra ε , lokalne vitkosti $\bar{\lambda}_p$ in globalne vitkosti $\bar{\lambda}_\theta$ ter $\bar{\lambda}_{0,\theta}$ v odvisnosti od povišane temperature.

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon \left[\frac{k_{E,\theta}}{k_{0.2,p,\theta}} \right]^{0.5} \quad (19)$$

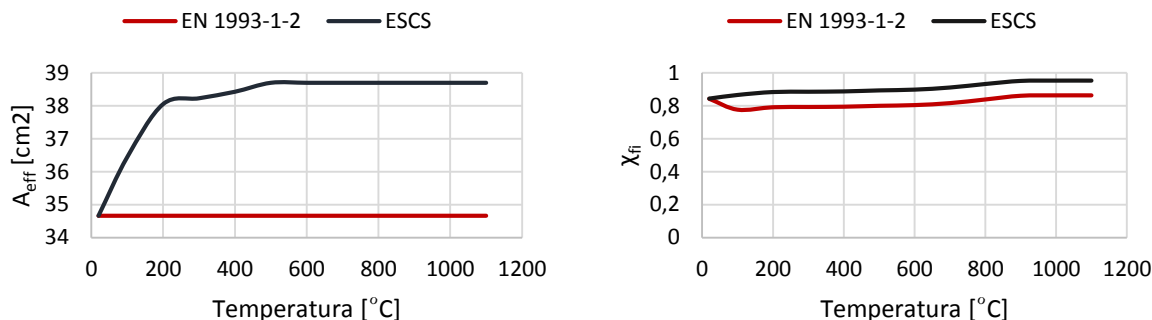
$$\bar{\lambda}_{p,\theta} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon_\theta \sqrt{k_\sigma}} \quad (20)$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \left[\frac{k_{0.2,p,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0.5} \quad (21)$$

$$\bar{\lambda}_{0,\theta} = \bar{\lambda}_0 \left[\frac{k_{0.2,p,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0.5} \quad (22)$$

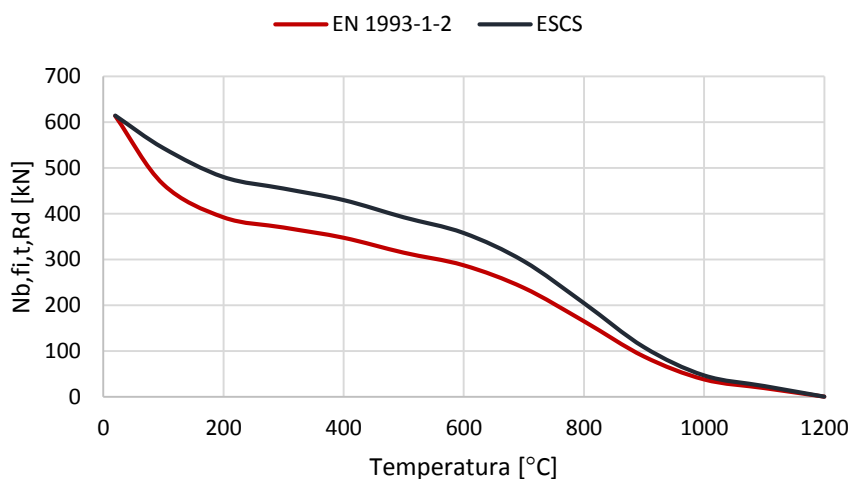
Za hladno oblikovanje votle profile se uporabijo vrednosti iz standarda SIST EN 1993-1-4: $\alpha = 0.49$, $\bar{\lambda}_0 = 0.4$.

Z višanjem temperature se vrednosti redukcijskih faktorjev manjšajo. Vrednost redukcijskega faktorja $k_{E,\theta}$ je večja od vrednosti redukcijskega faktorja $k_{0.2,p,\theta}$, zato se parameter ε , za izračun lokalne vitkosti po pristopu iz ESCS projekta s povišanjem temperature večja. Posledično se pri povišanih temperaturah zmanjša lokalna vitkost, sodelujoči prečni prerez pa se z naraščanjem temperature povečuje. Pri temperaturi 500°C je sodelujoči prečni prerez A_{eff} enak prečnemu prerezu A . Sodelujoči prečni prerez določen na podlagi priporočil iz standarda je neodvisen od temperature. Vrednost sodelujočega prečnega prereza je zato z naraščanjem temperature konstantna.



Slika 18: Primerjava sodelujoče prečnega prereza A_{eff} (levo) in brezdimenzionalnega redukcijskega faktorja uklonske nosilnosti χ_{fi} (desno) v odvisnosti od temperature

Globalna vitkost po pristopu iz ESCS projekta se zaradi manjšanja vrednosti redukcijskih faktorjev v odvisnosti od temperature zmanjšuje. Vrednost redukcijskega faktorja uklonske nosilnosti χ_{fi} je zato po pristopu iz ESCS projekta večja v primerjavi s pristopom iz standarda.



Slika 19: Primerjava uklonske nosilnosti stebra s prečnim prerezom 4. razreda kompaktnosti

Uklonska nosilnost stebra s prečnim prerezom v 4. razredu kompaktnosti (Slika 19), izračunana po standardu SIST EN 1993-1-2, je zaradi zgoraj omenjenih razlik manjša od uklonske nosilnosti, izračunane po pristopu iz ESCS projekta.

6. ZAKLJUČEK

V okviru diplomske naloge sem se spoznala s pravili za požarnoodporno projektiranje jeklenih konstrukcij in preučevala obnašanje konstrukcijskih elementov iz nerjavnega jekla pri požarno projektnem stanju. Požarna odpornost jeklenih konstrukcijskih elementov po poenostavljenih računskih metodah iz standarda SIST EN 1993-1-2 temelji na zmanjšanju odpornosti konstrukcijskih elementov pri povišanih temperaturah z redukcijskimi faktorji materiala. Z višanjem temperature se manjšata trdnost in togost. Z upoštevanjem reduciranih mehanskih karakteristik, uklonska nosilnost jeklenih stebrov pri povišanih temperaturah pada. Obnašanje nerjavnega jekla pri povišanih temperaturah sem primerjala z obnašanjem ogljikovega jekla. Pri temperaturi višji od 500°C se napetost na meji tečenja in naklon v linearno elastičnem območju pri ogljikovem jeklu v primerjavi z nerjavnim jeklom izrazito zmanjšata. Uklonska nosilnost stebrov iz nerjavnega jekla je zato pri povišanih temperaturah večja od uklonske nosilnosti ogljikovega jekla.

Jekleni konstrukcijski element, ki je izpostavljen standardnemu požaru, se zaradi povišanih temperatur v okolici segreva. Na razvoj temperature v jeklenem elementu vplivajo specifična toplota, toplotna prevodnost, faktor prereza, emisivnost površine jekla in gostota jekla. Različne toplotne lastnosti ogljikovega in nerjavnega jekla bistveno ne vplivajo na razvoj temperature v elementu. Ogljikovo jeklo ima v začetku večjo toplotno prevodnost, zato se element iz ogljikovega jekla segreva nekoliko hitreje. Pri temperaturi 735°C ogljikovo jeklo spremeni svojo feritno mikrostrukturo v asvtenitno. Od tega trenutka naprej se zaradi podobnih toplotnih lastnosti, elementa iz nerjavnega in ogljikovega jekla segrevata približno enako.

V nalogi sem primerjala različne novejšje metode za požarnoodporno projektiranje z obstoječimi metodami iz predpisov Evrokod. Čeprav je uklonska nosilnost stebra pri povišanih temperaturah po novejših metodah nekoliko višja, se metode v splošnem bistveno ne razlikujejo.

VIRI

Baddoo, N., Nunez Moreno, E., Zhao, B., Renaud, C., Montanari, A., Zilli, G., Säynäjäkangas, J., Ala-Outinen, T., Schaumann, P., Bahr, O., Heisse, A., Kettner, F., Uppfeldt, B., Claeys, J. 2009. Stainless steel in fire. Luksemburg, Office for Official Publications of the European Communities.

Beg, D., Vassart, B., Zhao, B. 2012. Membransko delovanje sovprežnih stropov med požarom. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 9-12.

Beg, D., Pogačnik, A. 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije.

Haller, M., Cajot L-G., 2006. Fire resistance of steel structures. Luksemburg, Arcelor LCS Research Centre: str. 14 in 21.

EN 1992-1-2: 2002. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire.

SIST EN 1993-1-1: 2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-1.del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

SIST EN 1993-1-2: 2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-2.del: Splošna pravila – Požarnoodporno projektiranje.

SIST EN 1993-1-4: 2007. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-4.del: Splošna pravila – Dodatna pravila za nerjavna jekla – Nacionalni dodatek.