

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



SAMIR HOZANOVIĆ

**VPLIV POŽARNE ZAŠČITE NA STANDARDNO
POŽARNO ODPORNOST JEKLENIH ELEMENTOV**

DIPLOMSKA NALOGA

**VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJSKI PROGRAM
PRVE STOPNJE
OPERATIVNO GRADBENIŠTVO**

Ljubljana, 2017

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

VISOKOŠOLSKI STROKOVNI
ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE
STOPNJE OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO

Kandidat/-ka:

SAMIR HOZANOVIĆ

VPLIV POŽARNE ZAŠČITE NA STANDARDNO POŽARNO ODPORNOST JEKLENIH ELEMENTOV

THE EFFECT OF FIREPROOFING MEASURES ON THE STANDARD FIRE RESISTANCE OF STEEL ELEMENTS

Mentor/-ica:

izr. prof. dr. Tomaž Hozjan

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

asist. Anita Ogrin

Član komisije:

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Ta stran je namenoma prazna

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	614.841.33:624.014.2(043.2)
Avtor:	Samir Hozanović
Mentor:	izr. prof. dr. Tomaž Hozjan, univ. dipl. inž. grad.
Somentor:	Anita Ogrin, univ. dipl. inž. grad.
Naslov:	Vpliv požarne zaščite na standardno požarno odpornost jeklenih elementov
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – VSŠ
Obseg in oprema:	44 str., 30 pregl., 13 sl., 23 graf.
Ključne besede:	standardna požarna odpornost, jekleni elementi, protipožarne plošče, intumescentni premaz
Izvleček:	

V diplomskem delu je obravnavan vpliv požarne zaščite na standardno požarno odpornost jeklenih elementov. Na začetku sta opisana pomen požarne varnosti in obnašanje konstrukcijskega jekla med požarom. Sledi opis različnih tipov požarne zaščite, ki so obravnavani v nadaljnjih izračunih. V četrtem poglavju je predstavljena toplotna analiza, za primer poenostavljenega računa in računa z napredno metodo. V zadnjem poglavju je, na primeru tlačnega stebra s prerezom HEA 240, prikazana razlika v izračunani mehanski odpornosti elementa, ki jo povzroči izbor metode pri toplotni analizi. Poleg stebra, je v mehanski analizi obravnavan tudi upogibni nosilec s prerezom IPE 300, na katerem preverimo vpliv bočne zvrnitve na standardno upogibno nosilnost jeklenega elementa med požarom.

Ta stran je namenoma prazna

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 614.841.33:624.014.2(043.2)

Author: Samir Hozanović

Supervisor: assoc. prof. Tomaž Hozjan, Ph. D.

Co-advisor: Anita Ogrin, B.Sc.

Title: The effect of fireproofing measures on the standard fire resistance of steel elements

Document type: Graduation Thesis

Scope and tools: 44 p., 30 tab., 13 fig., 23 graph.

Keywords: standard fire resistance, steel elements, boards, intumescent coating

Abstract:

The thesis starts off with a basic description of fire engineering and the behaviour of structural steel during exposure to high temperatures. This is followed by the third chapter, in which the necessary data for the thermal analysis is presented. In the fourth chapter we take a look at the procedure and results of the simplified and advanced method of thermal analysis. The final chapter shows the difference that the chosen method makes to a column's ability to bear an axial compression force and the effect of using lateral restraints on the design moment resistance of steel elements during exposure to fire. In addition to the column, in the mechanical analysis, a beam with a cross-section IPE 300 is also considered, in which the influence of the lateral buckling on the standard bending fire resistance is examined.

Ta stran je namenoma prazna

ZAHVALA

Za vso pomoč in nasvete ob pisanju diplomskega dela se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Tomažu Hozjanu in somentorici Aniti Ogrin.

Rad bi se zahvalil tudi svoji družini za vso podporo v času študija in pisanja diplomske naloge.

Ta stran je namenoma prazna

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE.....	I
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	V
ZAHVALA	VII
1 UVOD	1
2 POŽARNA VARNOST JEKLENIH KONSTRUKCIJ.....	2
2.1 Projektiranje požarne odpornosti	2
2.2 Zahteve za konstrukcijsko jeklo	3
2.2.1 Duktilnost.....	3
2.2.2 Lomna žilavost.....	4
2.2.3 Lamelarni lom	4
2.2.4 Utrujanje jekla	4
2.3 Obnašanje jeklenih elementov med požarom	4
2.4 Zaščita jeklenih elementov	5
2.4.1 Nivo zaščite in požarna odpornost	5
2.4.2 Zaščita z uporabo intumescentnih premazov	6
2.4.3 Zaščita z uporabo protipožarnih plošč.....	8
3 VHODNI PODATKI ZA TOPLOTNO ANALIZO	9
3.1 Požarna krivulja, jeklo in izbrana profila.....	9
3.2 Plošče iz mineralnih vlaken vezanih s cementom	12
3.3 Plošče iz mavčno vezanih papirnih vlaken.....	12
3.4 Intumescentni premaz	12
3.5 Intumescentna epoksidna smola	16

4 TOPLOTNA ANALIZA.....	17
4.1 Postopek računa po SIST EN 1993-1-2:2005	17
4.1.1 Izračun razvoja temperature za nezaščitene jeklene prereze	17
4.1.2 Izračun razvoja temperature za zaščitene jeklene prereze	17
4.2 Račun s programom Heatko	18
4.3 Rezultati toplotne analize.....	18
4.4 Zbrani rezultati toplotne analize	27
5 MEHANSKA ANALIZA.....	31
5.1 Mehanska analiza stebra za primer čistega tlaka	31
5.1.1 Postopek računa po SIST EN 1993-1-2:2005.....	31
5.1.2 Rezultati mehanske analize za primer stebra	33
5.2 Mehanska analiza upogibno obremenjenega nosilca.....	35
5.2.1 Postopek računa za bočno podprt element	37
5.2.2 Postopek računa za bočno nepodprt element	37
5.2.3 Rezultati mehanske analize upogibno obremenjenega nosilca	38
6 ZAKLJUČEK	43
7 VIRI.....	44

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Nominalne vrednosti napetosti tečenja f_y in natezne trdnosti f_u za vroče valjana konstrukcijska jekla [5]	3
Preglednica 2: Dimenzije vroče valjanega I profila IPE 300	10
Preglednica 3: Geometrijske karakteristike vroče valjanega I profila IPE 300	10
Preglednica 4: Dimenzije vroče valjanega H profila HEA 240	10
Preglednica 5: Geometrijske karakteristike vroče valjanega H profila HEA 240	10
Preglednica 6: Zbrani podatki za izbrane plošče iz mineralnih vlaken vezanih s cementom.	12
Preglednica 7: Zbrani podatki za izbrane plošče iz mavčno vezanih papirnih vlaken	12
Preglednica 8: Zbrani podatki za izbrani intumescentni premaz	13
Preglednica 9: Faktorji c_0 , c_1 in c_2 za različna temperaturna območja	13
Preglednica 10: Toplotna prevodnost za prerez IPE 300 v odvisnosti od temperature	14
Preglednica 11: Toplotna prevodnost za prerez HEA 240 v odvisnosti od temperature	14
Preglednica 12: Zbrani podatki za izbrano intumescentno epoksidno smolo	16
Preglednica 13: Toplotna prevodnost intum. epoksidne smole glede na temperaturo	16
Preglednica 14: Povprečna temperatura obeh prerezov ob petih različnih časih, za primer nezaščitenosti in izpostavljenosti požaru s štirih strani	19
Preglednica 15: Povprečna temperatura obeh prerezov ob petih različnih časih, za primer zaščitenosti s Promat ploščami in izpostavljenosti požaru s štirih strani	20
Preglednica 16: Povprečna temperatura obeh prerezov ob petih različnih časih, za primer zaščitenosti s Fermacell ploščami in izpostavljenosti požaru s štirih strani	21
Preglednica 17: Povprečna temperatura obeh prerezov ob petih različnih časih, za primer zaščitenosti z epoksidno smolo in izpostavljenosti požaru s štirih strani	22
Preglednica 18: Povprečna temperatura obeh prerezov ob petih različnih časih, za primer zaščitenosti z intumescentnim premazom in izpostavljenosti požaru s štirih strani	23
Preglednica 19: Povprečna temperatura nezaščitenega jeklenega prereza IPE 300, ob petih različnih časih, izpostavljenost požaru s treh strani	24
Preglednica 20: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščitenega s Promat ploščami, ob petih različnih časih, izpostavljenost požaru s treh strani	25

Preglednica 21: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega s Fermacell ploščami, ob petih različnih časih, izpostavljenost požaru s treh strani.....	25
Preglednica 22: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega z epoksidno smolo, ob petih različnih časih, izpostavljenost požaru s treh strani	26
Preglednica 23: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega z intumescentnim premazom, ob petih različnih časih, izpostavljenost požaru s treh strani	27
Preglednica 24: Zbrani rezultati toplotne analize za jekleni prerez IPE 300 za izpostavljenost požaru s štirih strani.....	27
Preglednica 25: Zbrani rezultati toplotne analize za jekleni prerez HEA 240 za izpostavljenost požaru s štirih strani.....	28
Preglednica 26: Zbrani rezultati toplotne analize za jekleni prerez IPE 300 za izpostavljenost požaru s treh strani	28
Preglednica 27: Redukcijski faktor za modul elastičnosti $k_{y,\theta}$ v odvisnosti od povprečne temperature prereza	32
Preglednica 28: Redukcijski faktor za napetost tečenja jekla $k_{E,\theta}$ v odvisnosti od povprečne temperature prereza	33
Preglednica 29: Zbrani rezultati mehanske analize za tlačno obremenjen steber HEA 240 za čase 30, 60 in 90 min	33
Preglednica 30: Zbrani rezultati mehanske analize za upogibno obremenjen nosilec IPE 300 za čase 30, 60 in 90 min	41

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Vpliv temperature na mehanske lastnosti konstrukcijskega jekla [4]	5
Grafikon 2: Toplotna prevodnost za vse 3 primere	15
Grafikon 3: Povprečna temperatura nezaščenega jeklenega prereza IPE 300, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani	19
Grafikon 3: Povprečna temperatura nezaščenega jeklenega prereza HEA 240, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani.....	19
Grafikon 5: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega s Promat ploščami, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani	20
Grafikon 6: Povprečna temperatura jeklenega prereza HEA 240, zaščenega s Promat ploščami, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani	20
Grafikon 7: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega s Fermacell ploščami, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani	21
Grafikon 8: Povprečna temperatura jeklenega prereza HEA 240, zaščenega s Fermacell ploščami, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani	21
Grafikon 9: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega z epoksidno smolo, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani.....	22
Grafikon 10: Povprečna temperatura jeklenega prereza HEA 240, zaščenega z epoksidno smolo, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani.....	22
Grafikon 11: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega z intumescentnim premazom, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani	23
Grafikon 12: Povprečna temperatura jeklenega prereza HEA 240, zaščenega z intumescentnim premazom, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani	23
Grafikon 13: Povprečna temperatura nezaščenega jeklenega prereza IPE 300, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s treh strani	24
Grafikon 14: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega s Promat ploščami, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s treh strani.....	24
Grafikon 15: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega s Fermacell ploščami, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s treh strani.....	25
Grafikon 16: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega z epoksidno smolo, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s treh strani	26
Grafikon 17: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega z intumescentnim premazom, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s treh strani	26

Grafikon 18: Nosilnost stebra HEA 240, zaščenega s požarnimi ploščami Fermacell.....	34
Grafikon 19: Maksimalni razpon nezaščenega nosilca IPE 300.....	39
Grafikon 20: Maksimalni razpon nosilca IPE 300, zaščenega s Promat ploščami.....	39
Grafikon 21: Maksimalni razpon nosilca IPE 300, zaščenega s Fermacell ploščami	39
Grafikon 22: Maksimalni razpon nosilca IPE 300, zaščenega z intumescentno epoksidno smolo	40
Grafikon 23: Maksimalni razpon nosilca IPE 300, zaščenega z intumescentnim premazom	40

KAZALO SLIK

Slika 1: Postopki projektiranja - predpisni pristop [1]	2
Slika 2: Postopki projektiranja - odzivni pristop [1]	2
Slika 3: Ekspandirani intumescentni premaz	6
Slika 4: Primer nosilca z vsemi tremi sloji sistema intumescentne zaščite.....	7
Slika 5: Primer uporabe intumescentnega epoksidnega premaza	7
Slika 6: Knauf protipožarna plošča FPB D150	8
Slika 7: Prerez vroče valjanega I profila IPE 300.....	10
Slika 8: Prerez vroče valjanega H profila HEA 240	10
Slika 9: Potek temperature v nosilcu IPE 300, zaščitenemu s Promat ploščami, trideseta minuta požara	30
Slika 10: Potek temperature v nosilcu IPE 300, zaščitenemu s Promat ploščami, šestdeseta minuta požara	30
Slika 11: Računski model stebra HEA 240.....	31
Slika 12: Računski model prostoležečega nosilca IPE 300	35
Slika 13: Prerez medetažne konstrukcije z obtežbami posameznih slojev	35

Ta stran je namenoma prazna

1 UVOD

Uporaba jeklenih konstrukcij je, zaradi številnih dobrih lastnosti materiala, po industrijski revoluciji doživela razcvet. Kljub vsem prednostim, ki nam jih jeklo nudi, pa ostaja ena velika slabost, in sicer drastična sprememba njegovih karakteristik pri povišanih temperaturah. Ščitenje jeklenih konstrukcij pred požarom je že z vidika zagotavljanja zadostnega časa za evakuacijo zelo pomembno. S tem se spopadamo že v fazi projektiranja in običajno je za jeklene konstrukcije potrebno predvideti ustrezno protipožarno zaščito, da konstrukcija izpolnjuje pogoj požarne odpornosti [1].

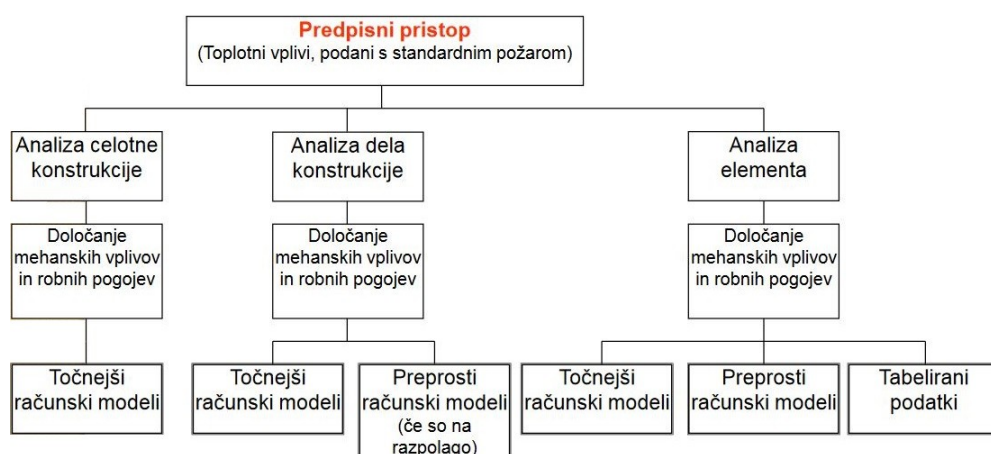
Industrijska revolucija iz konca 18. in začetka 19. stoletja je v zahodnem svetu prinesla velik razvoj in z njim povezano večjo koncentracijo ljudi v mestih. Veliko število požarov po naseljenih področjih v 19. in 20. stoletju, ter želja po zaščiti industrijskih objektov, sta pripeljala do razvoja požarnega inženirstva kot ločene vede. Večji razmah pa doživi v drugi polovici 20. stoletja in sicer v anglosaksonskem svetu. Danes pojem požarnega inženirstva razumemo kot vedo, katere primarne naloge so preprečitev in odkrivanje požara, ter blaženje njegovih posledic. To vključuje tudi poznavanje fenomena požara in načinov požarne zaščite, tako pasivnih kot aktivnih, z namenom zagotavljanja varne evakuacije uporabnikov objekta in omogočanja varnega gašenja. Pomembno je tudi razumevanje obnašanja ljudi med požarom in ustrezno analiziranje tveganj povezanih s pojavom [2].

Namen diplomske naloge je, poleg prikaza vpliva različnih vrst protipožarne zaščite na razvoj temperature v jeklenem prerezu, predstaviti razlike, ki nastanejo pri toplotni analizi, med poenostavljeno in napredno računsko metodo, ter prikazati njihov vpliv na izračunano požarno odpornost enostavnih jeklenih elementov skladno s standardom SIST EN 1993-1-2 [1]. Obravnavani tipi protipožarne zaščite so plošče iz mineralnih vlaken vezanih s cementom, plošče iz mavčno vezanih papirnih vlaken, intumescentni premaz in intumescentna epoksidna smola. Vpliv določitve temperatur in različnih tipov protipožarne zaščite je najprej prikazan na primeru tlačnega stebra s prerezom HEA 240. Nato sledi še primerjava na primeru upogibnega nosilca s prerezom IPE 300.

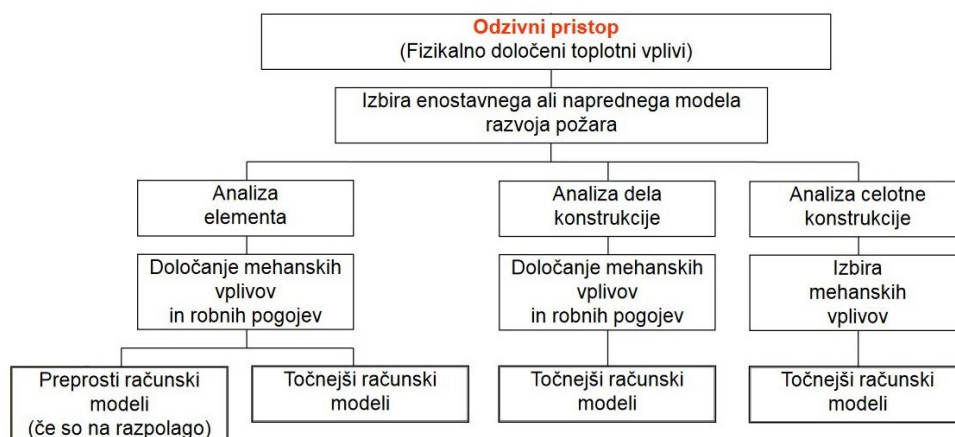
2 POŽARNA VARNOST JEKLENIH KONSTRUKCIJ

2.1 Projektiranje požarne odpornosti

Projektiranje požarne odpornosti nosilnih konstrukcijskih elementov skladno s standardom SIST EN 1991-1-2:2004 [3] lahko poteka po predpisnem ali odzivnem pristopu. Pri prvemu toplotni vplivi temeljijo na nominalnih krivuljah, med katerimi je verjetno najbolj znana ISO 834, prav ta bo uporabljena v nadaljevanju pri toplotni analizi. Za primera analize elementa ali dela konstrukcije predpisni pristop dopušča uporabo preprostih računskih modelov. Pri analizi posameznih elementov je možna uporaba tabeliranih podatkov. Pri globalni analizi pa je obvezna uporaba natančnejših računskih modelov. Odzivni oz. ciljni pristop se dosti bolj približa realnemu požarnemu stanju, saj upošteva dejansko stanje konstrukcije in temelji na naravnih požarih. Za odzivni pristop so potrebni natančni računski modeli, tudi pri analizi posameznih elementov konstrukcije, če ustrezni preprosti računski modeli niso na razpolago [2].



Slika 1: Postopki projektiranja - predpisni pristop [1]



Slika 2: Postopki projektiranja - odzivni pristop [1]

2.2 Zahteve za konstrukcijsko jeklo

2.2.1 Duktilnost

Duktilnost je v splošnem definirana kot karakteristika materiala, da prenaša plastične deformacije, brez da bi prišlo do njegovega zloma. Lahko jo opišemo bodisi kot količnik deformacije na meji trdnosti in deformacije na meji elastičnosti bodisi kot kvocient deformacije na meji porušitve in deformacije na meji elastičnosti. Jeklo, ki je duktilno, se lahko krivi za kot 180° , brez da bi se razvile razpoke na zunanji ploskvi preskušanca [4]. Vpliv duktilnosti se kaže predvsem pri plastični analizi in projektiranju konstrukcij z zahtevano potresno odpornostjo. Zaradi stalne, vsaj delne, prisotnosti plastifikacije pa ni zanemarljiva niti pri nominalno elastični globalni analizi, ter dimenzioniranju. Za jekla iz spodnje preglednice (preglednica 1) je duktilnost že upoštevana [5].

Preglednica 1: Nominalne vrednosti napetosti tečenja f_y in natezne trdnosti f_u za vroče valjana konstrukcijska jekla [5]

Standard in kvaliteta jekla	Nominalna debelina elementa t [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	490	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	490	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

Najmanjše sprejemljive zahteve glede duktilnosti so [6]:

- $f_u/f_y \leq 1,10$
- relativni raztezek po pretrgu je večji ali enak 15%
- $\epsilon_y \geq f_y/E$

2.2.2 Lomna žilavost

Žilavost jekla kaže ploščina lika omejenega z napetostno-deformacijskim diagramom in vodoravno koordinatno osjo. Bolj žilav material se pod vplivom eksternih sil težje lomi. Lomna žilavost je količina energije porabljene za to da se ploščina materiala med širitvijo razpoke loči [4]. Pomembna je predvsem z vidika preprečevanja krhkega loma, kar lahko izpolnimo z uporabo ustreznega materiala. Jeklo lahko razdelimo po odpornosti na krhki lom s pomočjo Charpy-V testa oz. s podobnimi postopki, ki preskušajo natezno zarezno žilavost. Upoštevati pa moramo tudi debelino pločevine [5, 6].

2.2.3 Lamelarni lom

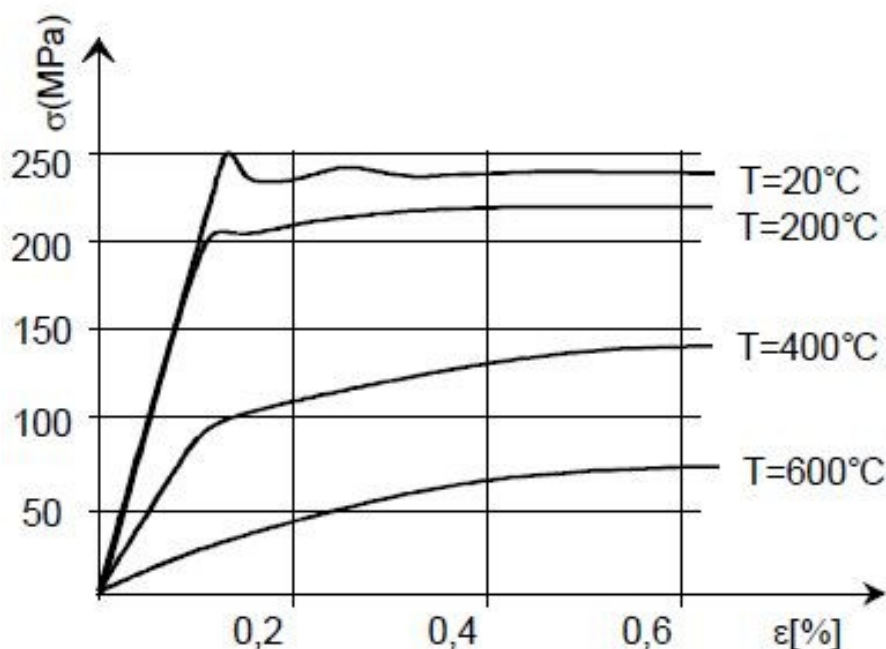
Lamelarni lom lahko predstavlja težavo predvsem v primeru uporabe X, T in L varjenih spojev, saj lahko pride do oviranega krčenja, posledično pa tudi do nateznih napetosti v smeri debeline pločevine. Kontrola zaradi možnosti lamelnega loma se izvaja v primeru pločevin debelejših od 30mm in sicer bodisi z ustrezno dobavo materiala bodisi s preverjanjem po izdelavi zvara [6].

2.2.4 Utrujanje jekla

Kontrola utrujanja se pri nosilnih konstrukcijah zahteva samo v primeru elementov uporabljenih za podpiranje naprav za dviganje, elementov izpostavljenih ponavljajočim obremenitvam naprav in strojev, ter elementov pri katerih se pričakuje izpostavljenost vibracijam zaradi koncentracije ljudi [6].

2.3 Obnašanje jeklenih elementov med požarom

Z višanjem temperatur se praviloma večja duktilnost materiala, ostale lastnosti pa so večinoma odvisne od njegove sestave. Če temperaturo navadnega konstrukcijskega jekla dvignemo na 600°C se plastično tečenje pojavi že na približno četrtini meje plastičnosti pri 20°C [4].



Grafikon 1: Vpliv temperature na mehanske lastnosti konstrukcijskega jekla [4]

Pri temperaturah višjih od 400 °C se v jeklenemu elementu pojavljajo viskozne deformacije. Sam proces je dokaj težko opisljiv, saj so potrebni preskusi, ki nam dajo ustrezne materialne parametre. Razvoj viskoznih deformacij je odvisen od časa in napetosti [2]. V skladu s standardom SIST EN 1993-1-2 [1] se glede viskoznih deformacij, v primeru ogrevanja jekla od 2 do 50 K/min, uvede poenostavitev in jih upošteva že v temperaturno odvisnem napetostno-deformacijskem diagramu, zato jih ni potrebno upoštevati ločeno [1].

2.4 Zaščita jeklenih elementov

2.4.1 Nivo zaščite in požarna odpornost

Nivo zaščite konstrukcije je odvisen predvsem od potrebe po evakuaciji in zahtevnosti gašenja. Moramo vedeti kako dolgo traja izhod iz goreče stavbe in če bodo gasilci morali delati tudi znotraj objekta. Pomemben pa je tudi podatek ali mora nosilna konstrukcija preživeti samo do evakuacije človeških življenj ali pa tudi predviden požarni scenarij v celoti, tako da so potrebna zgolj popravila, ne pa tudi ponovna izgradnja celotnega objekta [7]. Požarna odpornost je definirana kot čas, ki ga konstrukcija preživi, izpolnjujoč svojo funkcijo, kljub izpostavljenosti požarnemu stanju [2].

Skladno z evropskimi standardi poznamo tri merila, ki definirajo požarno odpornost gradbenih elementov/konstrukcij, in sicer nosilnost (R), celovitost (E) in izolativnost (I). Ta merila se uporabljajo bodisi sama bodisi v kombinaciji, v odvisnosti od zahtev. Merilo nosilnosti od elementov/konstrukcij zahteva da v požarnem stanju ne izgubijo svoje nosilnosti. Merilo celovitosti kaže zmožnost elementa, da preprečuje prehajanje plamenov in vročih dimnih plinov. Merilo izolativnosti kaže zmožnost elementa, da ohranja določeno toplotno izolativnost, torej da preprečuje preveliko toplotno prevodnost [2].

2.4.2 Zaščita z uporabo intumescentnih premazov

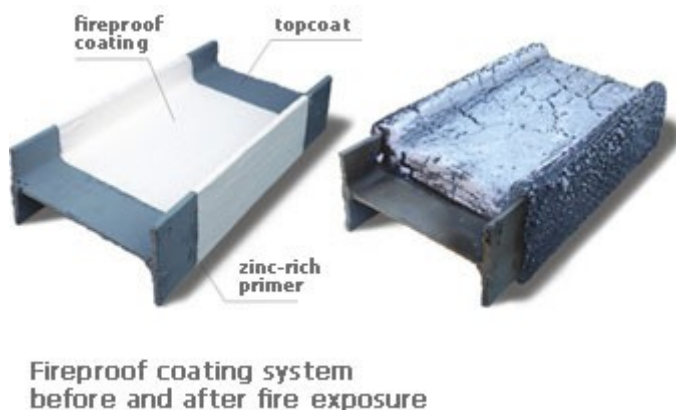
Intumescentni premaz je barvi podoben material, ki pri normalnih temperaturnih razmerah nima znatnega vpliva na izgled jeklenega elementa. Poleg tega pa nima nobenega učinka na njegove mehanske lastnosti. Zaradi teh dveh lastnosti so intumescentni premazi zaželeni v prostorih, kjer ni prisotna velika požarna obtežba, hkrati pa želimo ohraniti izgled in obliko jeklenega elementa. Ko se temperature v prostoru začnejo dvigati intumescentni premaz ekspandira, običajno med 180 in 250 °C, in jekleni element obda z debelim pasom nizkoprevodnega zogljenega materiala [8].



Slika 3: Ekspandirani intumescentni premaz [8]

V splošnem jih ločimo po kemijski sestavi. Tanjši intumescentni premazi so po navadi narejeni na vodni osnovi ali osnovi topil, na element se lahko nanašajo v proizvodnem obratu ali na samemu gradbišču. Pri uporabi premazov na vodni osnovi moramo biti tudi pozorni na končni namen elementa, saj so takšni materiali uporabni za suhe, ogrevane prostore. Drugje so bolj primerni premazi na osnovi topil [8].

Uporaba intumescentnih premazov zahteva ustrezno pripravo površine jeklenega elementa. To naredimo s čiščenjem in nanosom temeljnega premaza, ki predstavlja korozijsko zaščito in oprijemljivo ploskev za samo požarno zaščito. Na samem koncu pa se uporabi še zaključni premaz, ki nudi ustrezen estetski izgled in zaščito pred določenimi zunanjimi vplivi. Celoten sistem se nato redno pregleduje [8].



Slika 4: Primer nosilca z vsemi tremi sloji sistema intumescentne zaščite
[<http://vmp-holding.com/proplamkor/>] (Pridobljeno 12. 7. 2017)]

Intumescentni premazi na epoksidni osnovi imajo po navadi večjo končno debelino od tistih, ki so delani na vodni osnovi ali osnovi topil. Prav tako so bolj vzdržljivi in trajni, saj so bili sprva delani za strožje požarne scenarije, predvsem v industrijske namene. Dandanes se lahko uporabljajo praktično povsod, čeprav se v večini primerov hranijo za konstrukcije, ki potrebujejo močno požarno zaščito, a se nahajajo v delu stavbe z oteženimi možnostmi vzdrževanja [8].



Slika 5: Primer uporabe intumescentnega epoksidnega premaza [8]

2.4.3 Zaščita z uporabo protipožarnih plošč

Požarne plošče so dokaj razširjen način varovanja jeklenih konstrukcij pred požarom. Glavne prednosti takšnega načina varovanja so čist, škatlast izgled, relativno enostavna vgradnja, ter dejstvo da ni potrebna posebna predpriprava. Plošče so pripravljene v industrijskih objektih, kar pomeni da je njihova debelina konstantna in vnaprej točno znana. V osnovi jih lahko, poleg po uporabljenem materialu, delimo po gostoti. Lažje plošče imajo med 150 in 250 kg/m³, uporabne pa so bolj na delih objekta, kjer izgled ni bistvenega pomena. Težje plošče imajo po navadi med 750 in 950 kg/m³ [8].



Slika 6: Knauf protipožarna plošča FPB D150

[<http://www.knaufinsulation-ts.com/en/content/fire-protection-board-fpb-d150> (Pridobljeno 11. 7. 2017)]

3 VHODNI PODATKI ZA TOPLOTNO ANALIZO

3.1 Požarna krivulja, jeklo in izbrana profila

Pri toplotni analizi, za časovni potek požara, uporabimo standardno požarno krivuljo ISO 834, ki predstavlja temperaturo vročega zraka v prostoru T_g pri polno razvitem požaru v sektorju, za celulozno požarno obtežbo. Opišemo jo z enačbo [2]:

$$T_g = 20 + 345 * \log_{10}(8 * t + 1) \quad (3.1)$$

Skladno s SIST EN 1993-1-1:2005 [6] znaša modul elastičnosti za jeklo 210000 MPa, specifična teža pa 78 kN/m³.

Specifična toplota jekla je temperaturno odvisna [1]:

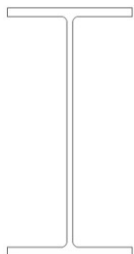
$$c_a = \begin{cases} \text{Pri } 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 600 \text{ }^{\circ}\text{C}: \\ 425 + 7,73 * 10^{-1} * \theta_a - 1,69 * 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 * 10^{-6} * \theta_a \text{ J/kgK} \\ \\ \text{Pri } 600 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735 \text{ }^{\circ}\text{C}: \\ 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \text{ J/kgK} \\ \\ \text{Pri } 735 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 900 \text{ }^{\circ}\text{C}: \\ 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \text{ J/kgK} \\ \\ \text{Pri } 900 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}: \\ 650 \text{ J/kgK} \end{cases} \quad (3.2)$$

Toplotna prevodnost jekla je temperaturno odvisna [1]:

$$\lambda_a = \begin{cases} \text{Pri } 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 800 \text{ }^{\circ}\text{C}: \\ 54 - 3,33 * 10^{-2} * \theta_a \text{ W/mK} \\ \\ \text{Pri } 800 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}: \\ 27,3 \text{ W/mK} \end{cases} \quad (3.3)$$

Pri tem je θ_a temperatura jeklenega elementa.

Za toplotno in mehansko analizo smo izbrali vroče valjana profila IPE 300 in HEA 240 (sliki 7 in 8). V nadaljevanju so podane nekatere osnovne dimenzije in geometrijski podatki (preglednice 2-5), ki so potrebni za obe nadaljnji analizi.



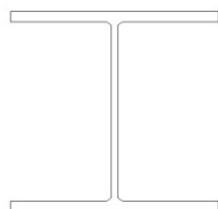
Slika 7: Prerez vroče valjanega I profila IPE 300

Preglednica 2: Dimenzije vroče valjanega I profila IPE 300

Dimenzija	h	b	t_f	t_w	$h-2t_f$
Količina	300 mm	150 mm	10,70 mm	7,10 mm	278,6 mm

Preglednica 3: Geometrijske karakteristike vroče valjanega I profila IPE 300

Geometrijska karakteristika	A	I_y	i_y	$W_{y,pl}$	I_z	i_z
Količina	53,80 cm ²	8360 cm ⁴	12,5 cm	628 cm ³	604 cm ⁴	3,35 cm



Slika 8: Prerez vroče valjanega H profila HEA 240

Preglednica 4: Dimenzije vroče valjanega H profila HEA 240

Dimenzija	h	b	t_f	t_w	$h-2t_f$
Količina	230 mm	240 mm	12 mm	7,50 mm	206 mm

Preglednica 5: Geometrijske karakteristike vroče valjanega H profila HEA 240

Geometrijska karakteristika	A	I_y	i_y	I_z	i_z
Količina	76,80 cm ²	7760 cm ⁴	10,1 cm	2770 cm ⁴	6 cm

V nadaljevanju bomo potrebovali tudi parameter A_p/V , ki nam opiše oblikovne lastnosti zaščenega prereza, ki ga ogrevamo. Čim večji je faktor prereza, tem hitreje se ta ogreva. Izračunamo ga tako, da delimo površino notranjega oboda izolacije s površino prečnega prereza elementa. Faktor A_p/V je v primeru prerezov zaščenih s premazi enak faktorju A_m/V , ki sicer velja za nezaščiten jeklene prereze [2].

Faktor prereza za nosilec IPE 300 v primeru izpostavljenosti požaru s štirih strani, za prerez zaščiten s protipožarnimi ploščami:

$$\frac{A_p}{V} = \frac{0,15 \text{ m} * 2 + 0,3 \text{ m} * 2}{0,00538 \text{ m}^2} = 167 \text{ m}^{-1}$$

Faktor prereza za nosilec IPE 300 v primeru izpostavljenosti požaru s štirih strani, za prerez zaščiten s premazom oz. za nezaščiten prerez:

$$\frac{A_p}{V} = \frac{A_m}{V} = \frac{0,15 \text{ m} * 4 + 0,3 \text{ m} * 2 - 0,0071 \text{ m} * 2}{0,00538 \text{ m}^2} = 220 \text{ m}^{-1}$$

Faktor prereza za nosilec IPE 300 v primeru izpostavljenosti požaru s treh strani, za prerez zaščiten s protipožarnimi ploščami:

$$\frac{A_p}{V} = \frac{0,15 \text{ m} + 0,3 \text{ m} * 2}{0,00538 \text{ m}^2} = 139 \text{ m}^{-1}$$

Faktor prereza za nosilec IPE 300 v primeru izpostavljenosti požaru s treh strani, za prerez zaščiten s premazom oz. za nezaščiten prerez:

$$\frac{A_p}{V} = \frac{A_m}{V} = \frac{0,15 \text{ m} * 3 + 0,3 \text{ m} * 2 - 0,0071 \text{ m} * 2}{0,00538 \text{ m}^2} = 193 \text{ m}^{-1}$$

Faktor prereza za nosilec HEA 240 v primeru izpostavljenosti požaru s štirih strani, za prerez zaščiten s protipožarnimi ploščami:

$$\frac{A_p}{V} = \frac{0,24 \text{ m} * 2 + 0,23 \text{ m} * 2}{0,00768 \text{ m}^2} = 122 \text{ m}^{-1}$$

Faktor prereza za nosilec HEA 240 v primeru izpostavljenosti požaru s štirih strani, za prerez zaščiten s premazom oz. za nezaščiten prerez:

$$\frac{A_p}{V} = \frac{A_m}{V} = \frac{0,24 \text{ m} * 4 + 0,23 \text{ m} * 2 - 0,0075 \text{ m} * 2}{0,00768 \text{ m}^2} = 183 \text{ m}^{-1}$$

3.2 Plošče iz mineralnih vlaken vezanih s cementom

Kot prvi primer protipožarne plošče smo izbrali PROMATECT®-H. Delane so v skladu s standardom ISO 9001. Imajo silikatno osnovo vezano s cementom, so negorljive in samonosilne. Njihove lastnosti se ne spreminjajo ob izpostavljenosti vlagi. Za vgradnjo jih lahko pripravimo z navadnimi stroji namenjenimi obdelavi lesa. Termične lastnosti plošč so temperaturno odvisne, toda proizvajalci jih po navadi navedejo kot neodvisne, zato so take podane v spodnji preglednici [9].

Preglednica 6: Zbrani podatki za izbrane plošče iz mineralnih vlaken vezanih s cementom

ρ	λ	c	d
870 kg/m ³	0,175 W/mK	800 J/kgK	0,015 m

3.3 Plošče iz mavčno vezanih papirnih vlaken

Za naslednji primer plošč smo izbrali plošče Fermacell. Narejene so iz mešanice recikliranih papirnatih vlaken in mavca. Gre za dve naravni surovini, katerima je dodana le še voda. Zaradi slednje nastane reakcija, v kateri mavec obda papirnata vlakna. Iz mešanice, s stiskanjem pod visokim tlakom, dobimo visoko trdne plošče pripravljene za nadaljnjo obdelavo. Posušene plošče se obdajo s hidrofobnim sredstvom, nato pa režejo na predvidene formate. Uporabljajo se lahko kot navadne gradbene ali protipožarne plošče [10].

Preglednica 7: Zbrani podatki za izbrane plošče iz mavčno vezanih papirnih vlaken

ρ	λ	c	d
1150 kg/m ³	0,32 W/mK	1100 J/kgK	0,015 m

3.4 Intumescentni premaz

Težava pri iskanju podatkov za intumescentne premaze je bila v tem, da proizvajalci, v skladu s sedanjimi direktivami za gradbene proizvode, po navadi svojo ponudbo predstavijo v obliki tabel. Te nam, na podlagi želenega časa ohranjene nosilnosti znotraj standardnega požara, dajo potrebno suho debelino nanosa oz. *DFT*. Ustrezne podatke smo dobili šele s pomočjo strokovnih člankov [11].

Izbrani intumescentni premaz je na osnovi topil. Vrednosti efektivne toplotne prevodnosti so bile pridobljene na podlagi trinajstih različnih preskusov, z raznimi debelinami nanosa, na štirih jeklenih profilih. S temperaturno odvisno efektivno toplotno prevodnostjo zajamemo spreminjanje dejanske toplotne prevodnosti in ostalih dejanskih termičnih lastnosti premaza s temperaturo in zaradi ekspandiranja [11].

Konstantne efektivne vrednosti gostote, specifične toplote in izbrane debeline, ki jih uporabimo v toplotni analizi, so podane v naslednji preglednici [11].

Preglednica 8: Zbrani podatki za izbrani intumescentni premaz

ρ	c	DFT
100 kg/m ³	1000 W/mK	0,00125 m

Poleg njih pa za pridobitev toplotne prevodnosti potrebujemo še faktor prereza A_m/V . Vpliv faktorja A_m/V na razvoj temperatur je prikazan za preglednicama na grafikonu 2. Izračun toplotne prevodnosti poteka z enačbo [11]:

$$\lambda = c_0 + c_1 * \frac{A_m}{V} + c_2 * DFT \quad (3.4)$$

Faktorji c_0 , c_1 in c_2 so koeficienti dobljeni na podlagi linearne regresijske analize rezultatov zgoraj omenjenih, trinajstih eksperimentov. Njihove vrednosti so odvisne od temperature premaza in veljajo v določenih mejah faktorja oblike (za A_m/V med 73 in 310 m⁻¹). V samem članku so podane napačne vrednosti koeficientov. Pravilne smo dobili s pomočjo avtorice. V preglednici 9 so podane popravljene vrednosti za koeficiente c_0 , c_1 in c_2 .

Preglednica 9: Faktorji c_0 , c_1 in c_2 za različna temperaturna območja

Temperatura [°C]	$c_0 * 10^{-3}$	$c_1 * 10^{-5}$	c_2
180 – 230	5,899	-1,892	36,283
230 – 280	3,798	-0,10610	29,239
280 – 330	7,057	-0,84771	26,832
330 – 380	19,277	-4,099	16,851
380 – 430	24,323	-7,206	13,919
430 – 480	21,090	-7,005	4,690
480 – 530	7,540	-2,119	3,473
530 – 580	4,154	-0,20615	2,082
580 – 630	3,731	0,35561	2,694
630 – 680	4,244	0,75233	3,401
680 – 730	5,740	1,053	3,781
730 – 780	8,397	1,181	3,932
780+	10,042	5,528	-0,900

Preglednica 10: Toplotna prevodnost za prerez IPE 300 v odvisnosti od temperature

Temperatura [°C]	Požar na vseh štirih straneh prereza:	Požar s treh strani:
	λ [W/mK]	λ [W/mK]
20 – 180	50	50
180 – 230	0,0471	0,0476
230 – 280	0,0401	0,0401
280 – 330	0,0387	0,039
330 – 380	0,0313	0,0324
380 – 430	0,0259	0,0278
430 – 480	0,0115	0,0134
480 – 530	0,0072	0,0078
530 – 580	0,0063	0,0064
580 – 630	0,0079	0,0078
630 – 680	0,0101	0,01
680 – 730	0,0128	0,0125
730 – 780	0,0159	0,0156
780+	0,0211	0,0196

Preglednica 11: Toplotna prevodnost za prerez HEA 240 v odvisnosti od temperature

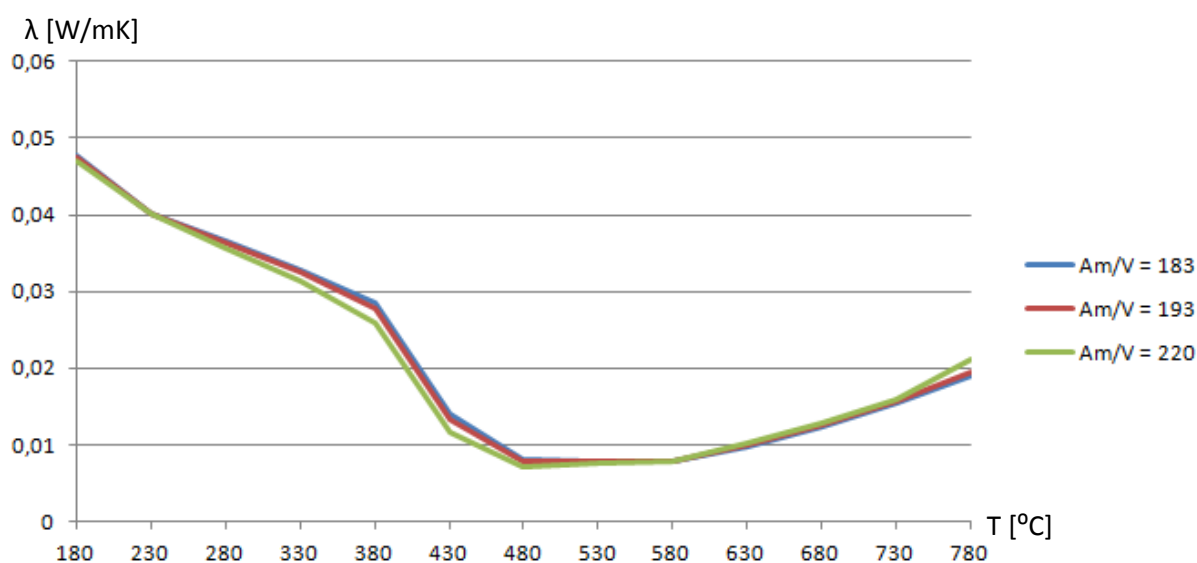
Temperatura [°C]	λ [W/mK]
20	50
180 – 230	0,0478
230 – 280	0,0402
280 – 330	0,039
330 – 380	0,0328
380 – 430	0,0285

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 11

430 – 480	0,0141
480 – 530	0,008
530 – 580	0,0064
580 – 630	0,0077
630 – 680	0,0099
680 – 730	0,0123
730 – 780	0,0155
780+	0,019

Za vmesne vrednosti v preglednicah 10 in 11 se za določitev toplotne prevodnosti ne uporabi linearne interpolacije, ampak uporabimo podano konstantno toplotno prevodnost v odvisnosti od temperaturnega območja.



Grafikon 2: Toplotna prevodnost za vse 3 primere

Vpliv faktorja prereza na toplotno prevodnost je precej majhen. Pri izračunu koeficientov v članku je debelina nanosa bila konstantna. Preden temperatura jekla doseže 180°C, element upoštevamo kot nezaščiten. V Heatku to naredimo z višjo toplotno prevodnostjo, v našem primeru 50 W/mK. Po poenostavljenem računu pa lahko do te točke računamo po enačbah za nezaščitene jeklene elemente.

3.5 Intumescentna epoksidna smola

Podobno kot pri prejšnjem primeru, smo podatke pridobil iz znanstvenega članka [12]. Toplotna prevodnost skozi različna temperaturna območja je bila pridobljena s pomočjo kinetičnega modela, ki je bil narejen z namenom opisovanja sprememb ključnih materialnih karakteristik med termalno aktiviranim procesom ekspandiranja. V naslednjih dveh preglednicah se nahajajo bistveni podatki pomembni za račun [12].

Preglednica 12: Zbrani podatki za izbrano intumescentno epoksidno smolo

ρ	c	DFT
1425kg/m ³	1000W/mK	0,009m

Preglednica 13: Toplotna prevodnost intum. epoksidne smole glede na temperaturo

Temperatura [°C]	λ [W/mK]
20	0,3
100	0,3
200	0,225
300	0,225
370	0,175
400	0,175
500	0,15
600	0,165
700	0,225
800	0,35

Za vmesne vrednosti se uporabi linearna interpolacija.

4 TOPLOTNA ANALIZA

4.1 Postopek računa po SIST EN 1993-1-2:2005

4.1.1 Izračun razvoja temperature za nezaščitene jeklene prereze

Spremembo temperature za nezaščitene jeklene elemente, skladno s standardom SIST EN 1993-1-2:2005 [1], izračunamo po naslednji enačbi:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} * \frac{A_m V}{c_a * \rho_a} * \dot{h}_{net} * \Delta t \quad (4.1)$$

Pri čemer je toplotni tok:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (4.2)$$

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c * (T_r - T_m) \quad (4.3)$$

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * B * [(T_r + 273)^4 - (T_m + 273)^4] \quad (4.4)$$

Kot vrednost prestopnega koeficienta α_c , skladno s SIST EN 1993-1-2:2005 [1], za standardno požarno krivuljo vzamemo $25 \text{ W/m}^2\text{K}$. Φ je faktor oblike, privzamemo ga kot $\Phi = 1$. B je Stefan-Boltzmannova konstanta in je enaka $5,67036713 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. ε_m je emisivnost površine elementa, za jekleno površino jo upoštevamo kot 0,7. ε_f pa emisivnost plamenskega telesa, ki je skladno z omenjenim standardom enaka 1. T_m je temperatura elementa na površini, T_r pa efektivna temperatura sevanja požara [1].

4.1.2 Izračun razvoja temperature za zaščitene jeklene prereze

Skladno s SIST EN 1993-1-2:2005 [1] račun za zaščitene jeklene elemente poteka z enačbo:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p * A_p V}{d_p * c_a * \rho_a} * \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{1 + \Phi/3} * \Delta t - (e^{\Phi/10} - 1) * \Delta\theta_{g,t} \quad (4.5)$$

Pri čemer s Φ označimo izraz:

$$\Phi = \frac{c_p * \rho_p}{c_a * \rho_a} * d_p * A_p V \quad (4.6)$$

4.2 Račun s programom Heatko

Račun po napredni metodi je bil opravljen s pomočjo programskega orodja Heatko [13].

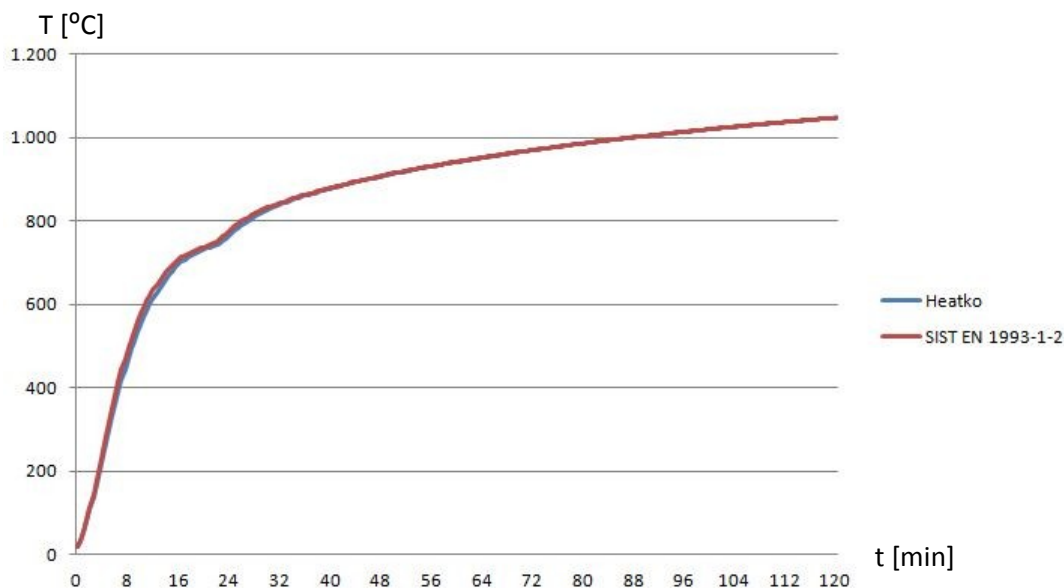
Geometrijo prereza, robne pogoje in debelino zaščitnega materiala vnesemo v datoteko generiraj_mrezo.m. V datoteki Podatki.m izberemo material in vpišemo lastnosti izolacijskega materiala, če te niso temperaturno odvisne. Tukaj vpišemo tudi koeficiente za robne pogoje, začetno temperaturo jekla, časovni korak izračuna in njegovo celotno trajanje.

V dveh primerih ščitenja, kjer smo imeli premaz, je bila toplotna prevodnost odvisna od temperature materiala. To smo spremenili v datoteki prevodnost.m. V datoteki temperatura.m se vpiše temperaturni režim. To je lahko poljubna krivulja, v našem primeru pa gre za enačbo standardne požarne krivulje. Po vnosu vseh potrebnih podatkov, z vpisom besede »Heatko«, začnemo izračun.

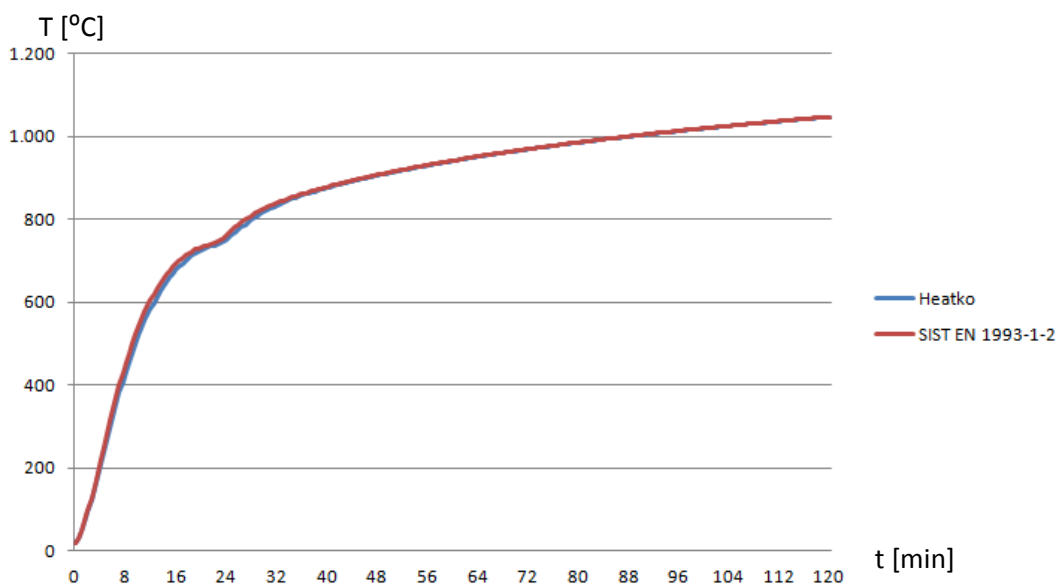
Program omogoča več načinov prikaza rezultatov. Z uporabo datoteke povprecne_T se nam izriše graf povprečnih temperatur za posamezne dele prereza in celoten prerez. Te podatke lahko pridobimo tudi v obliki Excelove razpredelnice. Z uporabo datoteke risanje2D.m je možen pregled poteka temperature po prečnem prerezu ob izbranem času.

4.3 Rezultati toplotne analize

V nadaljevanju so grafično prikazani posamični rezultati temperaturne analize (grafikoni 3-17). Vsak graf vsebuje dve krivulji. Ena prikazuje rezultate pridobljene s poenostavljenim postopkom, druga pa rezultate napredne metode. Za primere, kjer sta prereza izpostavljena požaru s štirih strani, se preglednica s temperaturami jeklenega elementa (preglednice 13-17), nahaja pod grafoma za oba elementa. Zadnjih 5 grafikonov in preglednic (preglednice 18-22), pa je namenjenih prerezu IPE 300, izpostavljenemu požaru s treh strani. Tukaj lahko omenimo še, da so rezultati prikazani za dve uri trajajoči požar, ne glede na to kdaj zaščita odpove. Pri ploščah ta podatek ni naveden, za premaze so bili izračuni v literaturi [11, 12] narejeni približno do temperature 800 °C.



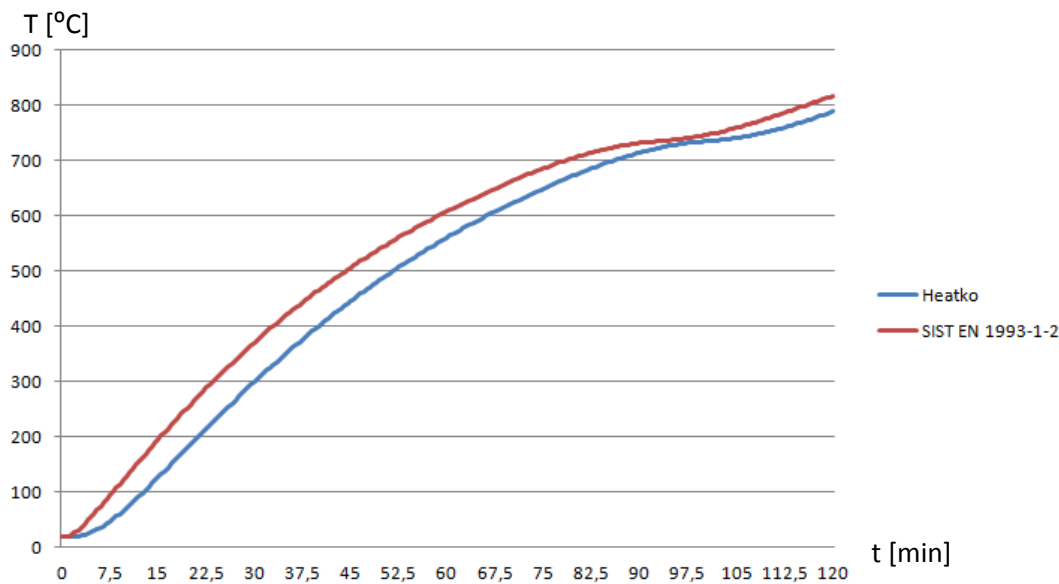
Grafikon 3: Povprečna temperatura nezaščenega jeklenega prereza IPE 300, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani



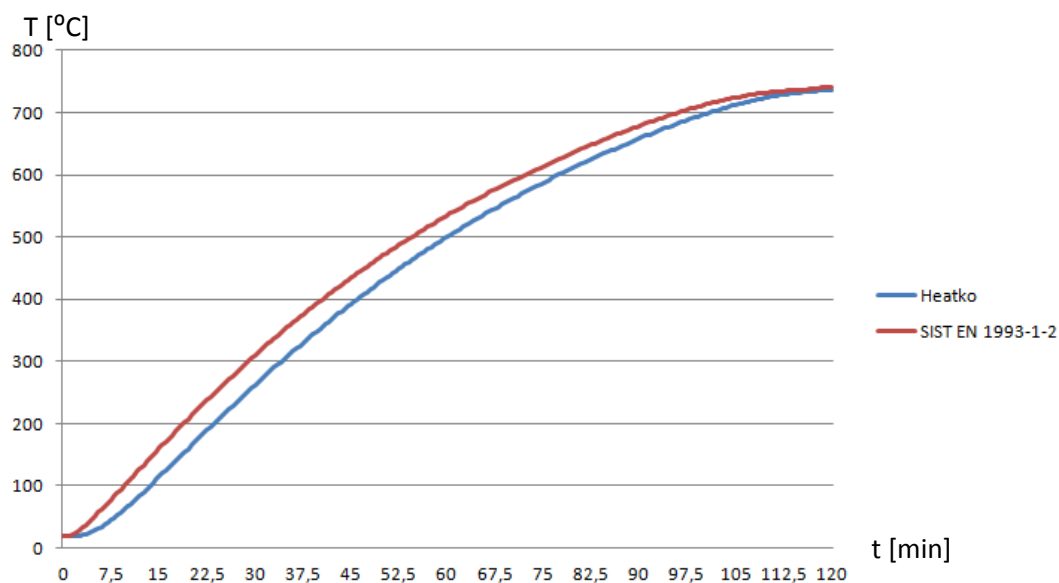
Grafikon 3: Povprečna temperatura nezaščenega jeklenega prereza HEA 240, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani

Preglednica 14: Povprečna temperatura obeh prerezov ob petih različnih časih, za primer nezaščitenosti in izpostavljenosti požaru s štirih strani

Metoda:	Profil:	T [°C] 5 min:	T [°C] 30 min:	T [°C] 60 min:	T [°C] 90 min:	T [°C] 120 min:
SIST EN 1993-1-2	IPE 300	318	831	942	1004	1048
Heatko	IPE 300	300	826	941	1004	1048
SIST EN 1993-1-2	HEA 240	282	827	942	1004	1048
Heatko	HEA 240	268	819	941	1003	1047



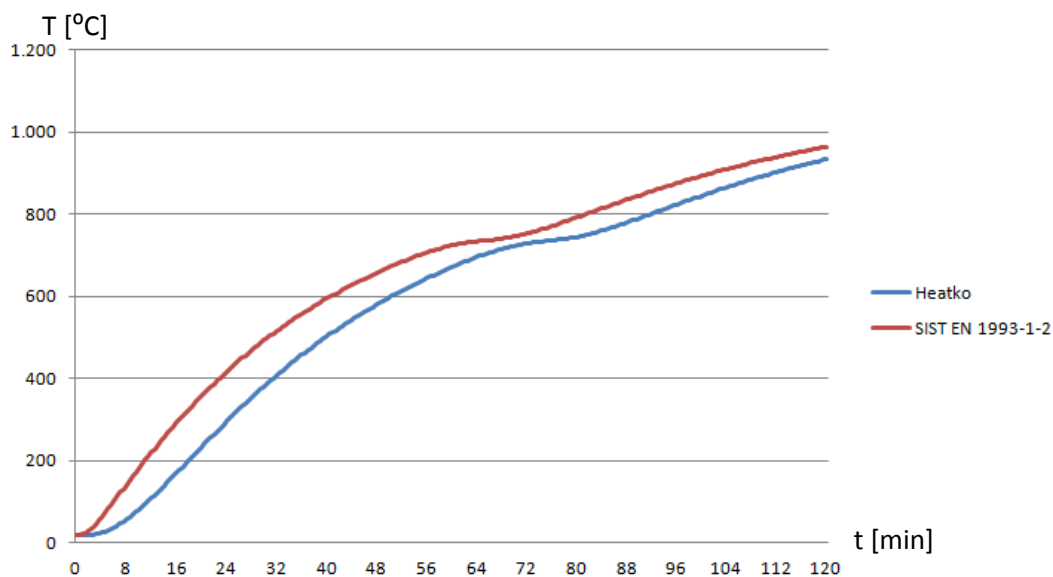
Grafikon 5: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega s Promat ploščami, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani



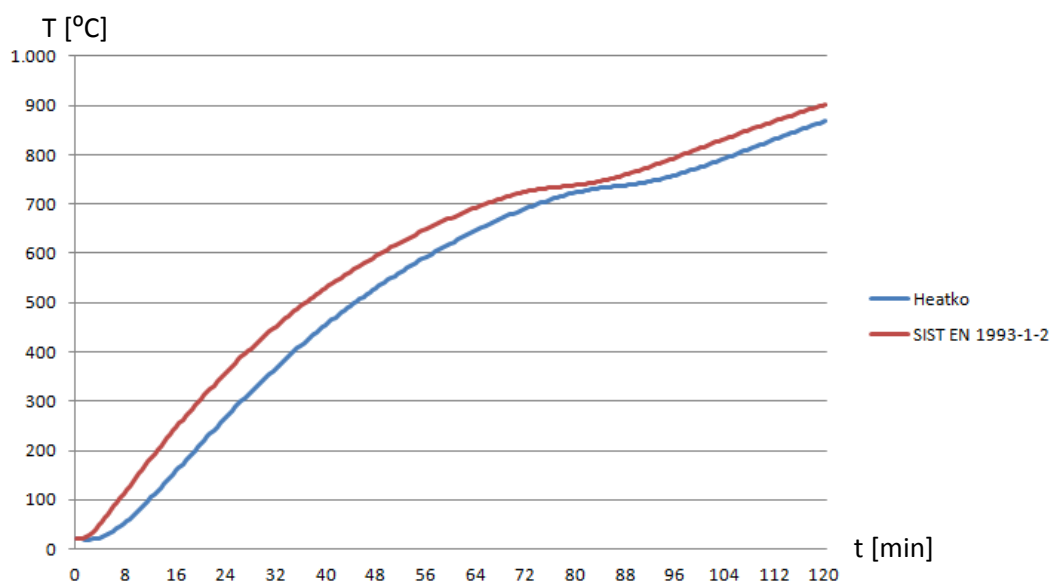
Grafikon 6: Povprečna temperatura jeklenega prereza HEA 240, zaščenega s Promat ploščami, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani

Preglednica 15: Povprečna temperatura obeh prerezov ob petih različnih časih, za primer zaščitenosti s Promat ploščami in izpostavljenosti požaru s štirih strani

Metoda:	Profil:	T [°C] 5 min:	T [°C] 30 min:	T [°C] 60 min:	T [°C] 90 min:	T [°C] 120 min:
SIST EN 1993-1-2	IPE 300	61	371	609	732	817
Heatko	IPE 300	29	300	561	715	789
SIST EN 1993-1-2	HEA 240	52	310	535	679	742
Heatko	HEA 240	29	262	500	658	737



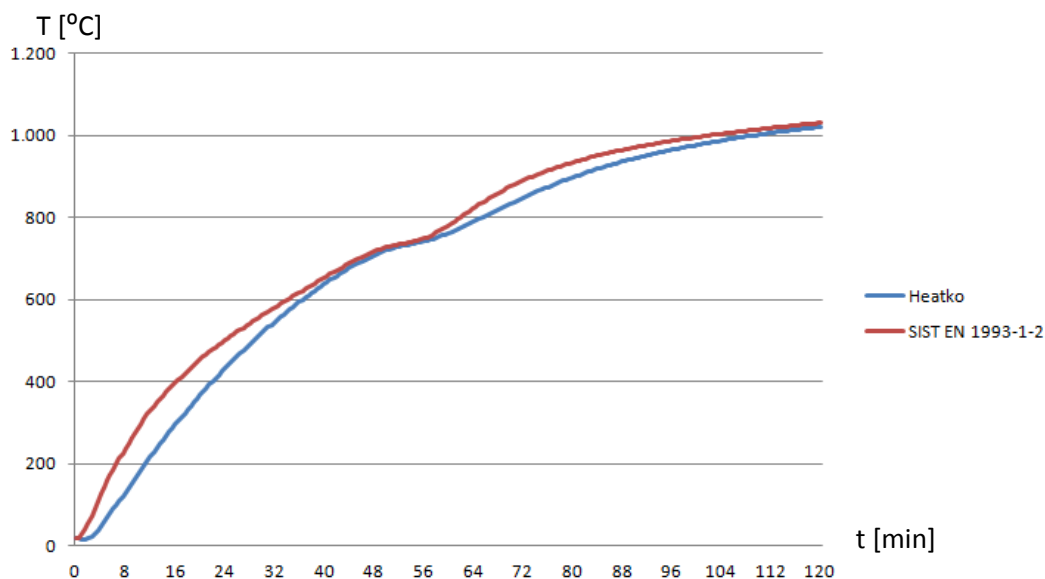
Grafikon 7: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega s Fermacell ploščami, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani



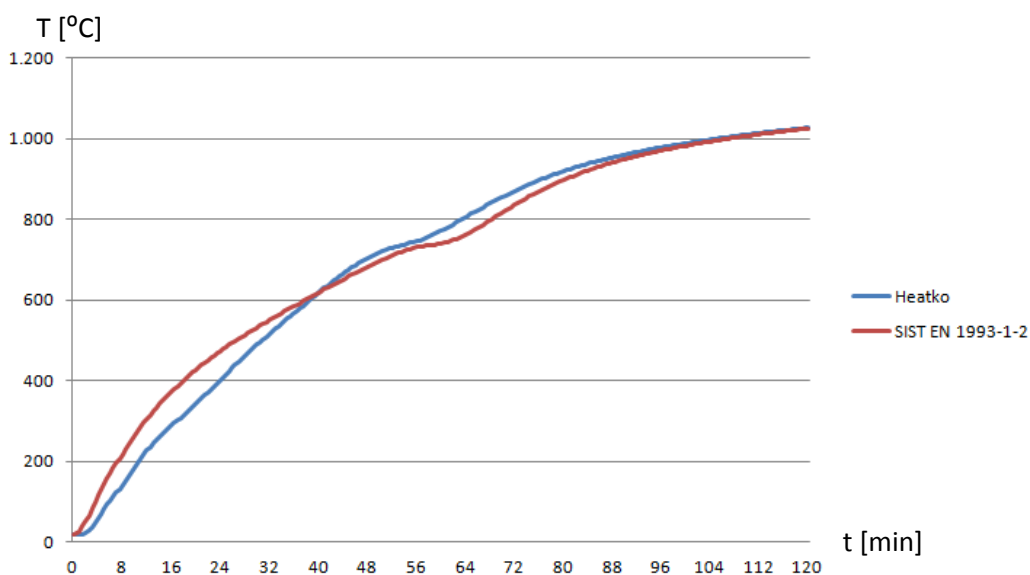
Grafikon 8: Povprečna temperatura jeklenega prereza HEA 240, zaščenega s Fermacell ploščami, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani

Preglednica 16: Povprečna temperatura obeh prerezov ob petih različnih časih, za primer zaščitenosti s Fermacell ploščami in izpostavljenosti požaru s štirih strani

Metoda:	Profil:	T [°C] 5 min:	T [°C] 30 min:	T [°C] 60 min:	T [°C] 90 min:	T [°C] 120 min:
SIST EN 1993-1-2	IPE 300	82	493	724	846	964
Heatko	IPE 300	30	380	672	790	934
SIST EN 1993-1-2	HEA 240	70	430	672	767	901
Heatko	HEA 240	30	344	620	741	869



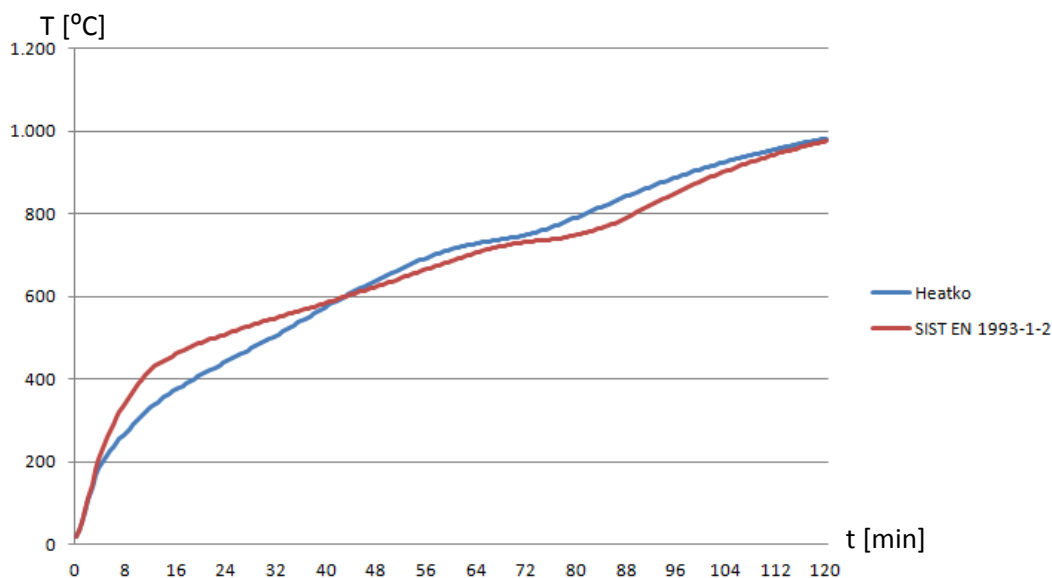
Grafikon 9: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega z epoksidno smolo, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani



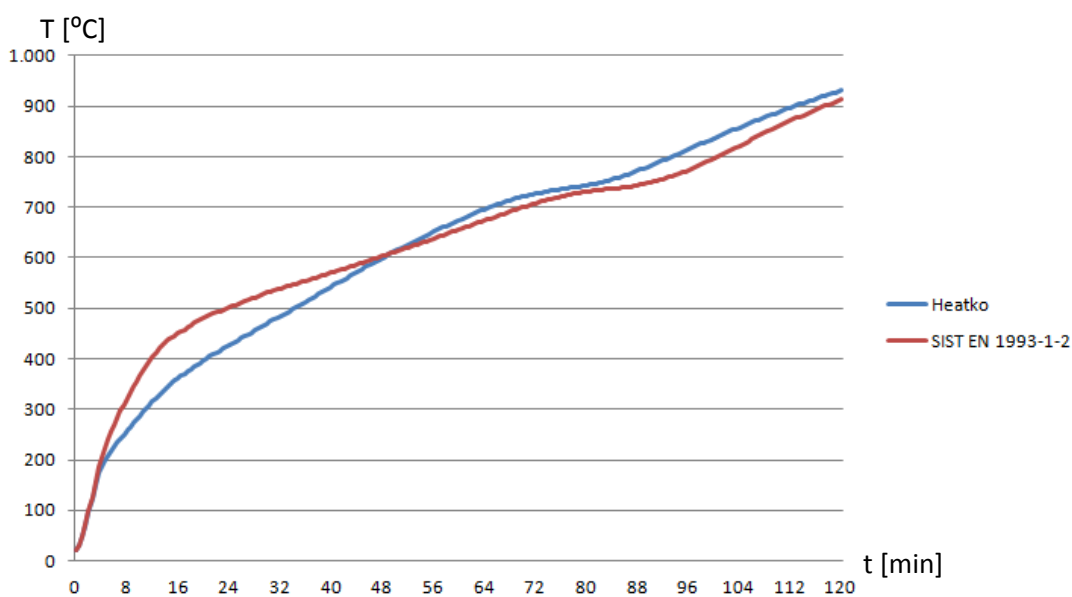
Grafikon 10: Povprečna temperatura jeklenega prereza HEA 240, zaščenega z epoksidno smolo, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani

Preglednica 17: Povprečna temperatura obeh prerezov ob petih različnih časih, za primer zaščitenosti z epoksidno smolo in izpostavljenosti požaru s štirih strani

Metoda:	Profil:	T [°C] 5 min:	T [°C] 30 min:	T [°C] 60 min:	T [°C] 90 min:	T [°C] 120 min:
SIST EN 1993-1-2	IPE 300	157	562	781	971	1031
Heatko	IPE 300	68	519	762	944	1021
SIST EN 1993-1-2	HEA 240	143	532	740	949	1025
Heatko	HEA 240	82	489	771	960	1027



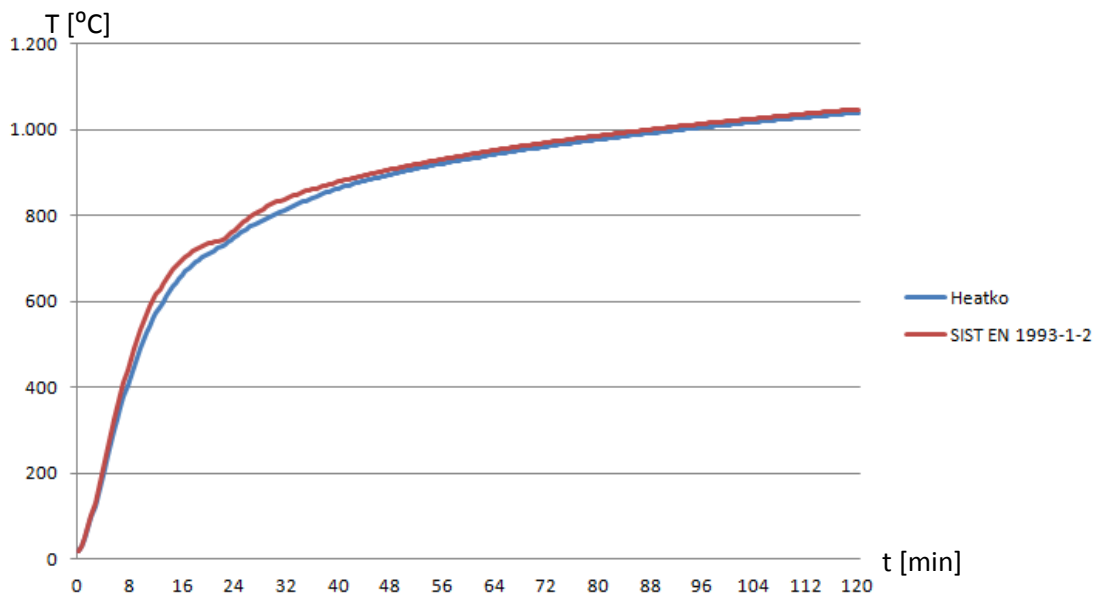
Grafikon 11: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega z intumescentnim premazom, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani



Grafikon 12: Povprečna temperatura jeklenega prereza HEA 240, zaščenega z intumescentnim premazom, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s štirih strani

Preglednica 18: Povprečna temperatura obeh prerezov ob petih različnih časih, za primer zaščitenosti z intumescentnim premazom in izpostavljenosti požaru s štirih strani

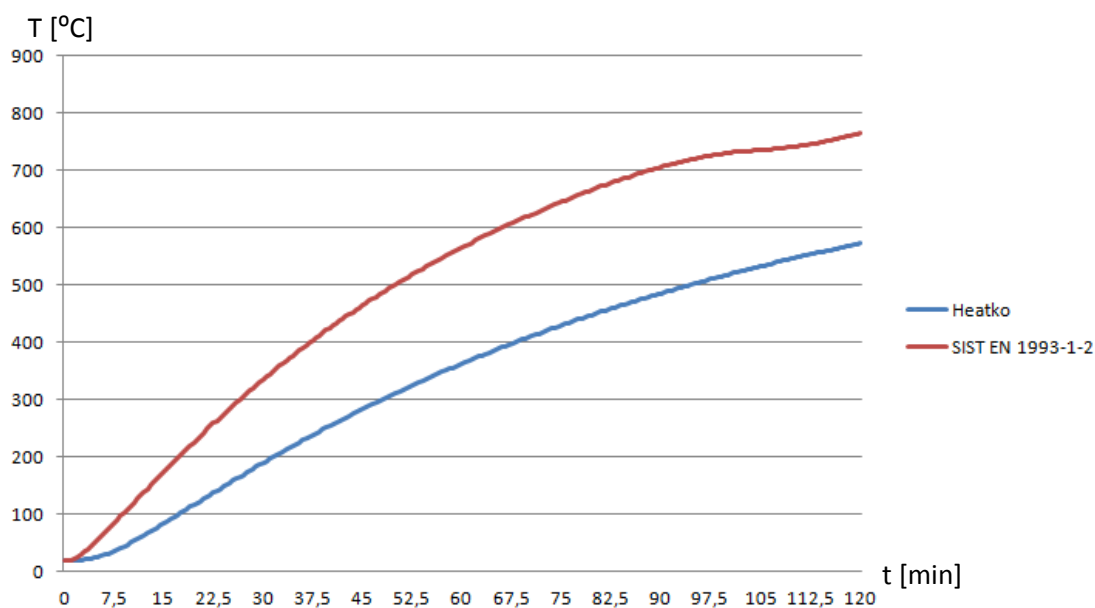
Metoda:	Profil:	T [°C] 5 min:	T [°C] 30 min:	T [°C] 60 min:	T [°C] 90 min:	T [°C] 120 min:
SIST EN 1993-1-2	IPE 300	259	539	686	807	976
Heatko	IPE 300	217	491	714	854	983
SIST EN 1993-1-2	HEA 240	240	531	656	749	913
Heatko	HEA 240	207	470	674	782	930



Grafikon 13: Povprečna temperatura nezaščenega jeklenega prereza IPE 300, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s treh strani

Preglednica 19: Povprečna temperatura nezaščenega jeklenega prereza IPE 300, ob petih različnih časih, izpostavljenost požaru s treh strani

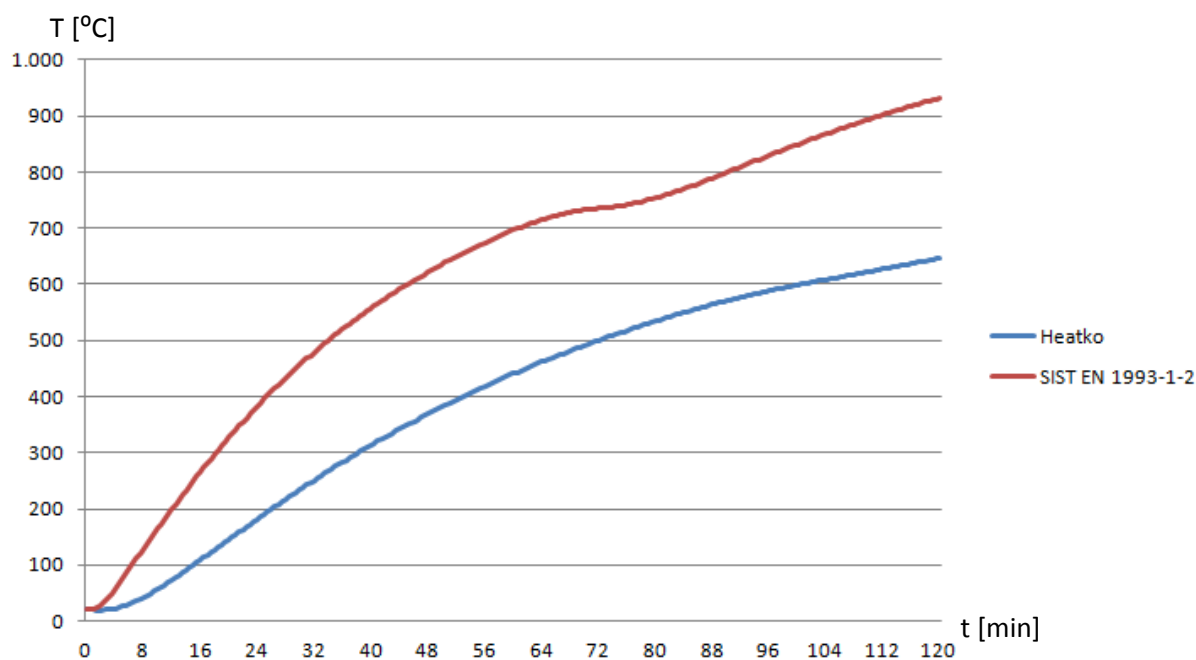
Metoda:	T [°C] 5 min:	T [°C] 30 min:	T [°C] 60 min:	T [°C] 90 min:	T [°C] 120 min:
SIST EN 1993-1-2:2005	292	828	942	1004	1048
Heatko	270	800	932	995	1040



Grafikon 14: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega s Promat ploščami, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s treh strani

Preglednica 20: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega s Promat ploščami, ob petih različnih časih, izpostavljenost požaru s treh strani

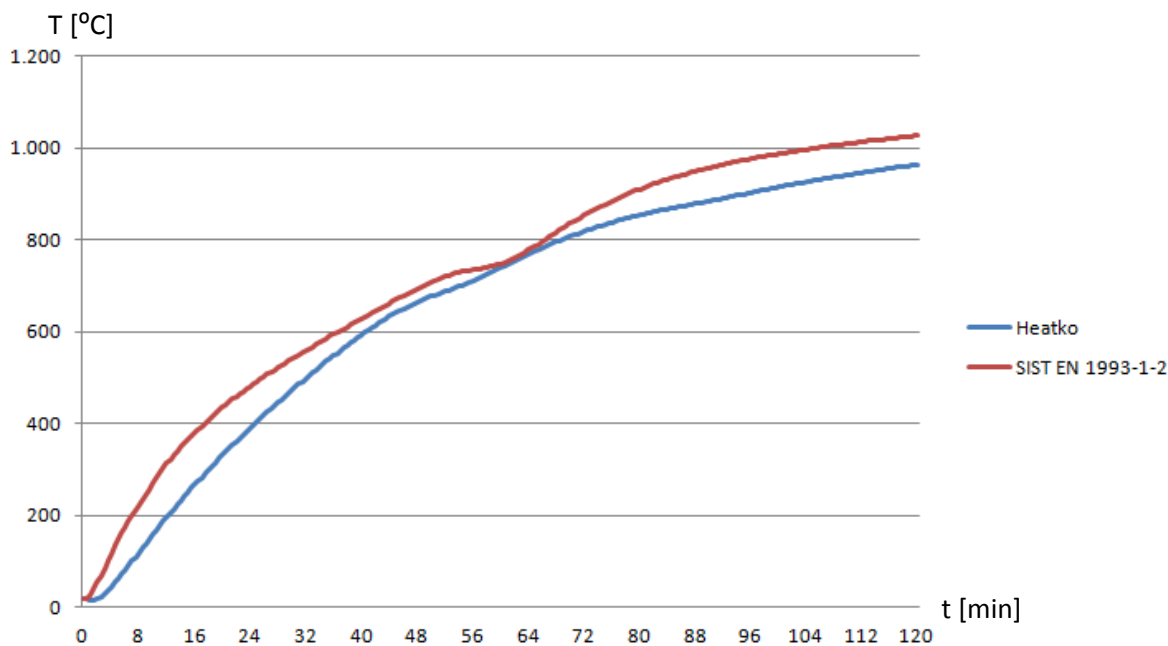
Metoda:	T [°C] 5 min:	T [°C] 30 min:	T [°C] 60 min:	T [°C] 90 min:	T [°C] 120 min:
SIST EN 1993-1-2:2005	55	335	566	706	765
Heatko	25	190	363	486	572



Grafikon 15: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega s Fermacell ploščami, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s treh strani

Preglednica 21: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega s Fermacell ploščami, ob petih različnih časih, izpostavljenost požaru s treh strani

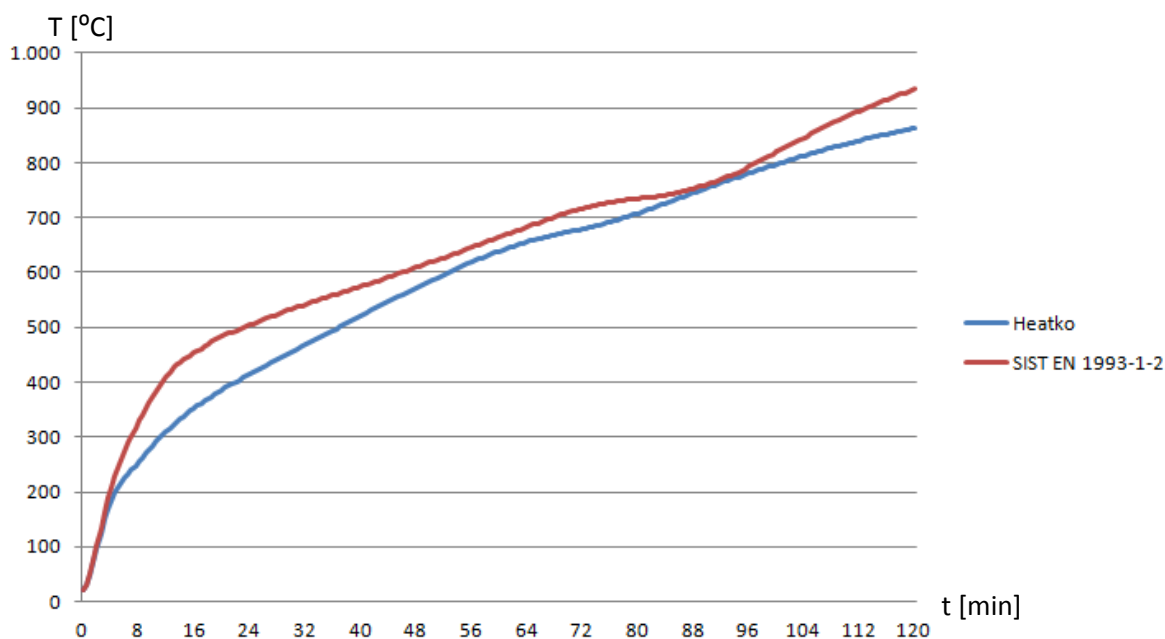
Metoda:	T [°C] 5 min:	T [°C] 30 min:	T [°C] 60 min:	T [°C] 90 min:	T [°C] 120 min:
SIST EN 1993-1-2:2005	75	457	697	799	932
Heatko	26	234	441	570	647



Grafikon 16: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega z epoksidno smolo, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s treh strani

Preglednica 22: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega z epoksidno smolo, ob petih različnih časih, izpostavljenost požaru s treh strani

Metoda:	T [°C] 5 min:	T [°C] 30 min:	T [°C] 60 min:	T [°C] 90 min:	T [°C] 120 min:
SIST EN 1993-1-2:2005	148	541	748	957	1027
Heatko	63	473	740	885	964



Grafikon 17: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega z intumescentnim premazom, za obe izbrani metodi, izpostavljenost požaru s treh strani

Preglednica 23: Povprečna temperatura jeklenega prereza IPE 300, zaščenega z intumescentnim premazom, ob petih različnih časih, izpostavljenost požaru s treh strani

Metoda:	T [°C] 5 min:	T [°C] 30 min:	T [°C] 60 min:	T [°C] 90 min:	T [°C] 120 min:
SIST EN 1993-1-2:2005	244	533	664	760	934
Heatko	207	455	639	754	863

4.4 Zbrani rezultati toplotne analize

V naslednjih treh preglednicah so, zaradi boljše preglednosti, podani skupni rezultati toplotne analize. Za vsak primer zaščitenosti, je podano tudi razmerje med rezultati dobljenimi po poenostavljeni in napredni računski metodi.

Preglednica 24: Zbrani rezultati toplotne analize za jekleni prerez IPE 300 za izpostavljenost požaru s štirih strani

Zaščita:	Tip toplotne analize:	T [°C] pri 30 min:	T [°C] pri 60 min:	T [°C] pri 90 min:
Brez	SIST EN 1993-1-2	831	942	1004
Brez	Heatko	826	941	1004
SIST EN 1993-1-2/Heatko		1,01	1,0	1,0
Plošče, Promat	SIST EN 1993-1-2	371	609	732
Plošče, Promat	Heatko	300	561	715
SIST EN 1993-1-2/Heatko		1,24	1,09	1,02
Plošče, Fermacell	SIST EN 1993-1-2	493	724	846
Plošče, Fermacell	Heatko	380	672	790
SIST EN 1993-1-2/Heatko		1,30	1,08	1,08
Epoksidna smola	SIST EN 1993-1-2	562	781	971
Epoksidna smola	Heatko	519	762	944
SIST EN 1993-1-2/Heatko		1,08	1,02	1,03
Intumescentni premaz	SIST EN 1993-1-2	539	686	807
Intumescentni premaz	Heatko	491	714	854
SIST EN 1993-1-2/Heatko		1,1	0,96	0,94

Preglednica 25: Zbrani rezultati toplotne analize za jekleni prerez HEA 240 za izpostavljenost požaru s štirih strani

Zaščita:	Tip toplotne analize:	T [°C] pri 30 min:	T [°C] pri 60 min:	T [°C] pri 90 min:
Brez	SIST EN 1993-1-2	827	942	1004
Brez	Heatko	819	941	1003
SIST EN 1993-1-2/Heatko		1,01	1,0	1,0
Plošče, Promat	SIST EN 1993-1-2	310	535	679
Plošče, Promat	Heatko	262	500	658
SIST EN 1993-1-2/Heatko		1,18	1,07	1,03
Plošče, Fermacell	SIST EN 1993-1-2	430	672	767
Plošče, Fermacell	Heatko	344	620	741
SIST EN 1993-1-2/Heatko		1,25	1,08	1,04
Epoksidna smola	SIST EN 1993-1-2	532	740	949
Epoksidna smola	Heatko	489	771	960
SIST EN 1993-1-2/Heatko		1,09	0,96	0,99
Intumescentni premaz	SIST EN 1993-1-2	531	656	749
Intumescentni premaz	Heatko	470	674	782
SIST EN 1993-1-2/Heatko		1,13	0,97	0,96

Preglednica 26: Zbrani rezultati toplotne analize za jekleni prerez IPE 300 za izpostavljenost požaru s treh strani

Zaščita:	Tip toplotne analize:	T [°C] pri 30 min:	T [°C] pri 60 min:	T [°C] pri 90 min:
Brez	SIST EN 1993-1-2	828	942	1004
Brez	Heatko	800	932	995
SIST EN 1993-1-2/Heatko		1,04	1,01	1,01
Plošče, Promat	SIST EN 1993-1-2	335	566	706
Plošče, Promat	Heatko	190	363	486
SIST EN 1993-1-2/Heatko		1,76	1,56	1,45

se nadaljuje ...

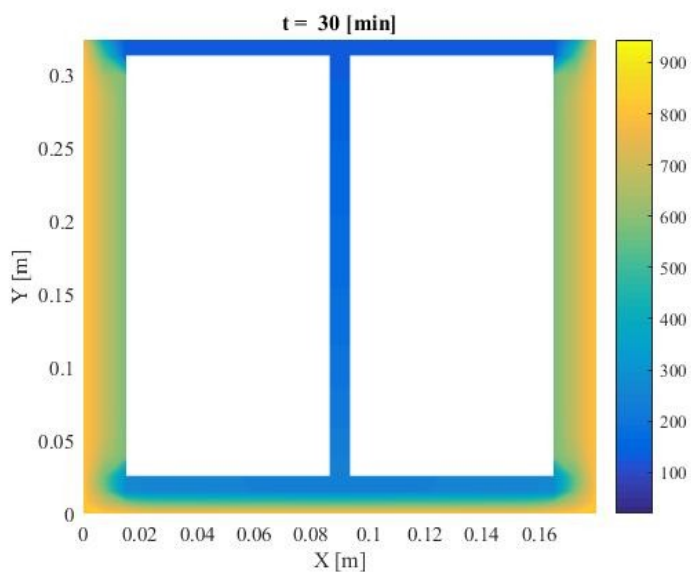
... nadaljevanje Preglednice 26

Plošče, Fermacell	SIST EN 1993-1-2	457	697	799
Plošče, Fermacell	Heatko	234	441	570
SIST EN 1993-1-2/Heatko		1,95	1,58	1,40
Epoksidna smola	SIST EN 1993-1-2	541	748	957
Epoksidna smola	Heatko	473	740	885
SIST EN 1993-1-2/Heatko		1,14	1,01	1,08
Intumescentni premaz	SIST EN 1993-1-2	533	664	760
Intumescentni premaz	Heatko	455	639	754
SIST EN 1993-1-2/Heatko		1,17	1,04	1,01

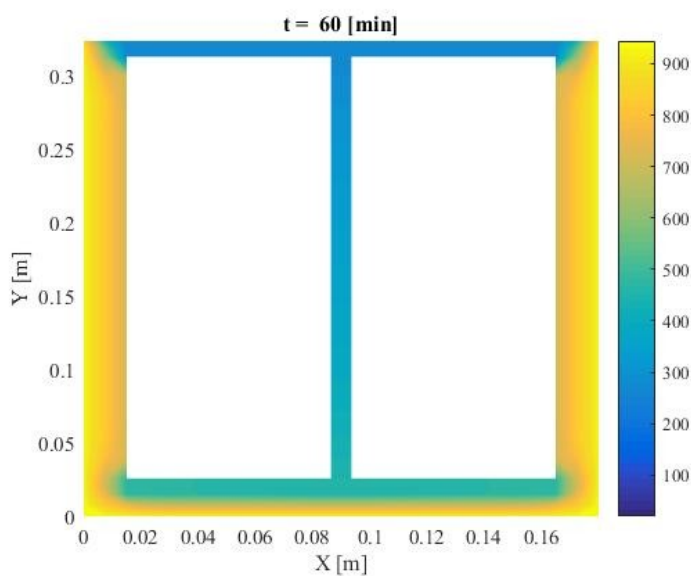
V vseh treh primerih so rezultati, dobljeni za nezaščitene prereze, pri obeh metodah podobni. Poenostavljena metoda nam za te primere vedno da višje, torej konservativne rezultate. Pri prerezih zaščitene s premazi so temperature primerljive po 35. minuti, pred tem nam poenostavljena metoda da nekoliko višje temperature (grafikoni 8-12). Pri prerezih zaščitene s ploščami so razlike precej večje (grafikoni 5-8). To lahko delno pripišemo dejstvu, da Heatko, za razliko od poenostavljene metode, upošteva tudi prostor med oblogo in profilom. Za prereze izpostavljene požaru s štirih strani, postanejo rezultati primerljivi po 60. minuti. Pri prerezih izpostavljenih s treh strani pa so, pri poenostavljeni metodi, dobljene temperature vedno bistveno višje v primerjavi z rezultati dobljenimi s programom Heatko.

Velika prednost računa s programom Heatko je tudi podrobnost rezultatov. Razberemo lahko, ne samo povprečne temperature po celotnemu prerezu, temveč tudi temperaturo v stojini in pasnicah. Možen je tudi prikaz poteka po prerezu (sliki 9 in 10), za poljuben čas požarnega scenarija.

Temperatura v spodnji pasnici na sliki 9, po 30 min požara, je 262 °C, v zgornji pa 129 °C. V naslednjih tridesetih minutah se temperatura v spodnji pasnici dvigne na 467 °C, v zgornji pa na 267 °C (slika 10).



Slika 9: Potek temperature v nosilcu IPE 300, zaščitenemu s Promat ploščami, trideseta minuta požara



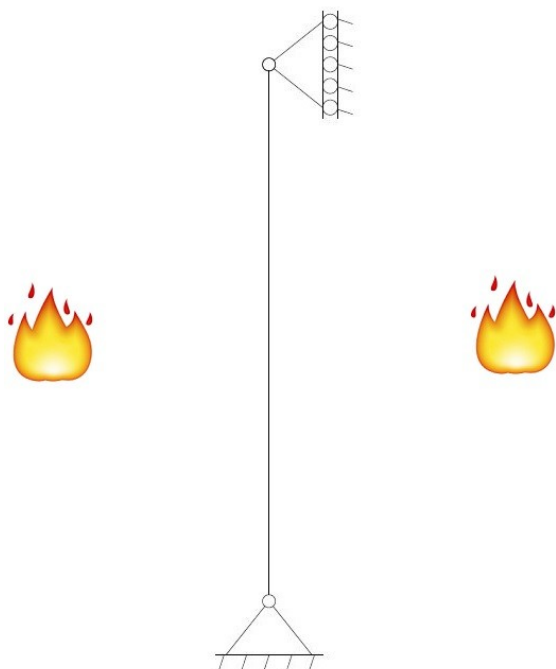
Slika 10: Potek temperature v nosilcu IPE 300, zaščitenemu s Promat ploščami, šestdeseta minuta požara

5 MEHANSKA ANALIZA

5.1 Mehanska analiza stebra za primer čistega tlaka

5.1.1 Postopek računa po SIST EN 1993-1-2:2005

Prvi primer mehanske analize je tlačno obremenjen steber. Poleg podatkov iz poglavja 3, uporabimo rezultate toplotne analize za prerez HEA 240, izbrana dolžina l je 2,5 m, kvaliteta jekla pa S235. Požarno odpornost določimo skladno s poenostavljenim postopkom podanim v SIST EN 1993-1-2:2005 [1].



Slika 11: Računski model stebra HEA 240

Najprej moramo določiti razred kompaktnosti prereza, saj ta diktira nadaljnje korake [5].

$$\text{Parameter } \varepsilon = 0,85 * \sqrt{235/f_y} = 0,85 * \sqrt{235/235} = 0,85$$

Kompaktnost pasnice $c / t = 116,25 / 12 = 9,69 \leq \varepsilon * 14 = 11,90 \rightarrow 3.$ razred kompaktnosti

Kompaktnost stojine $c / t = 164 / 7,5 = 21,87 \leq \varepsilon * 33 = 28,05 \rightarrow 1.$ razred kompaktnosti

Prerez je v 3. razredu kompaktnosti.

Projektna uklonska nosilnost $N_{b,fi,t,Rd}$ se za prereze v 1., 2. ali 3. razredu kompaktnosti, skladno s standardom SIST EN 1993-1-2:2005 [1], računa preko naslednje enačbe:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} * A * k_{y,\theta} * \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (5.1)$$

Kjer je redukcijski faktor:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad (5.2)$$

$$\text{Koefficient } \phi_{\theta} = 0,5 * (1 + \alpha * \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2) \quad (5.3)$$

$$\text{Faktor nepopolnosti } \alpha = 0,65 * \sqrt{235/f_y} = 0,65$$

$$\text{Relativna vitkost } \bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} * \sqrt{k_{y,\theta}/k_{E,\theta}} \quad (5.4)$$

$$\text{Faktor relativne vitkosti } \bar{\lambda} = \frac{l_{fi}/\sqrt{I/A}}{\pi \sqrt{E/f_y}} \quad (5.5)$$

Redukcijska faktorja za modul elastičnosti in napetost tečenja jekla se odčitata iz preglednice 27 in 28. Za vmesne vrednosti se uporabi interpolacija.

Preglednica 27: Redukcijski faktor za modul elastičnosti $k_{y,\theta}$ v odvisnosti od povprečne temperature prereza

T [°C]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
200	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
300	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
400	1	0,978	0,956	0,934	0,912	0,890	0,868	0,846	0,824	0,802
500	0,78	0,749	0,718	0,687	0,656	0,625	0,594	0,563	0,532	0,501
600	0,47	0,446	0,422	0,398	0,374	0,35	0,326	0,302	0,278	0,254
700	0,23	0,218	0,206	0,194	0,182	0,17	0,158	0,146	0,134	0,122
800	0,11	0,105	0,1	0,095	0,09	0,085	0,08	0,075	0,07	0,065
900	0,06	0,058	0,056	0,054	0,052	0,05	0,048	0,046	0,044	0,042
1000	0,04	0,038	0,036	0,034	0,032	0,03	0,028	0,026	0,024	0,022
1100	0,02	0,018	0,016	0,014	0,012	0,01	0,008	0,006	0,004	0,002

Preglednica 28: Redukcijski faktor za napetost tečenja jekla $k_{E,\theta}$ v odvisnosti od povprečne temperature prereza

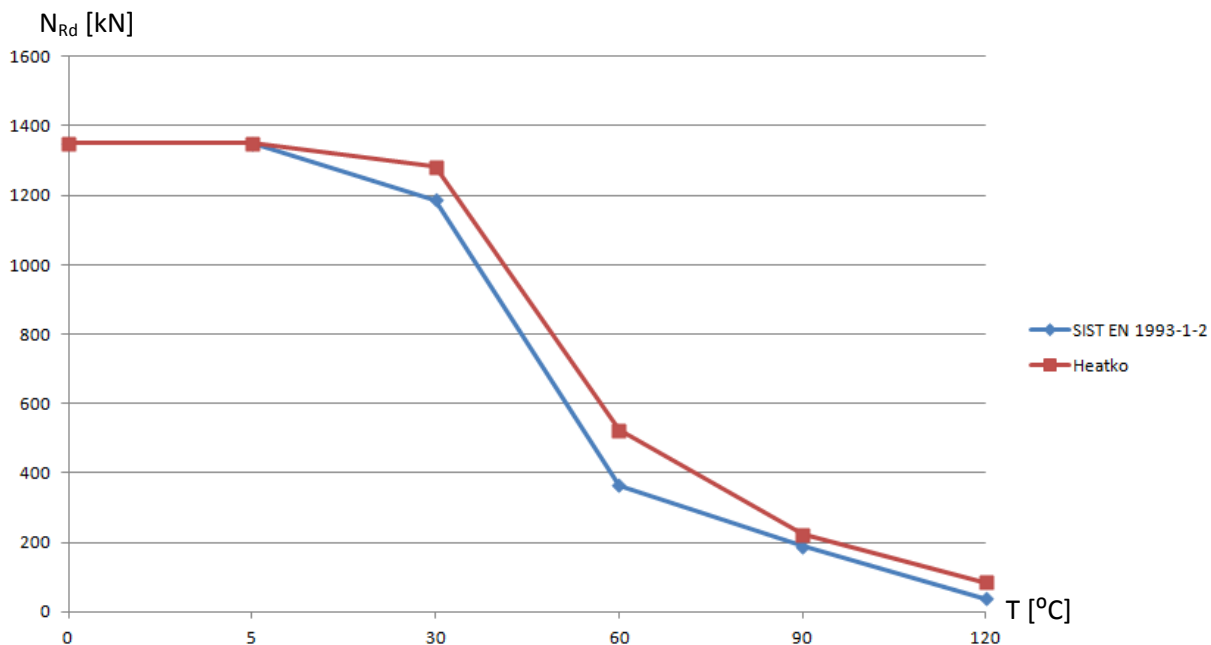
T [°C]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100	1	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91
200	0,9	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81
300	0,8	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73	0,72	0,71
400	0,7	0,69	0,68	0,67	0,66	0,65	0,64	0,63	0,62	0,61
500	0,6	0,571	0,542	0,513	0,484	0,455	0,426	0,397	0,368	0,339
600	0,31	0,292	0,274	0,256	0,238	0,22	0,202	0,184	0,166	0,148
700	0,13	0,126	0,122	0,118	0,114	0,11	0,106	0,102	0,098	0,094
800	0,09	0,082	0,073	0,065	0,057	0,048	0,04	0,032	0,023	0,015
900	0,007	0,011	0,014	0,018	0,022	0,026	0,03	0,034	0,037	0,041
1000	0,045	0,043	0,041	0,038	0,036	0,034	0,032	0,029	0,027	0,025
1100	0,022	0,02	0,018	0,016	0,014	0,011	0,009	0,007	0,005	0,002

5.1.2 Rezultati mehanske analize za primer stebra

Preglednica 29: Zbrani rezultati mehanske analize za tlačno obremenjen steber HEA 240 za čase 30, 60 in 90 min

Zaščita:	Tip toplotne analize:	N_{RD} [kN] pri 30 min:	N_{RD} [kN] pri 60 min:	N_{RD} [kN] pri 90 min:
Brez	SIST EN 1993-1-2	122	58	54
Brez	Heatko	128	58	54
Heatko/SIST EN 1993-1-2		1,05	1,0	1,0
Plošče, Promat	SIST EN 1993-1-2	1294	859	342
Plošče, Promat	Heatko	1309	1004	407
Heatko/SIST EN 1993-1-2		1,01	1,17	1,19
Plošče, Fermacell	SIST EN 1993-1-2	1186	364	188
Plošče, Fermacell	Heatko	1283	525	223
Heatko/SIST EN 1993-1-2		1,08	1,44	1,19
Epoksidna smola	SIST EN 1993-1-2	871	224	59
Epoksidna smola	Heatko	1033	183	59
Heatko/SIST EN 1993-1-2		1,19	0,82	1,0
Intumescentni premaz	SIST EN 1993-1-2	875	413	212
Intumescentni premaz	Heatko	1082	358	168
Heatko/SIST EN 1993-1-2		1,24	0,87	0,79

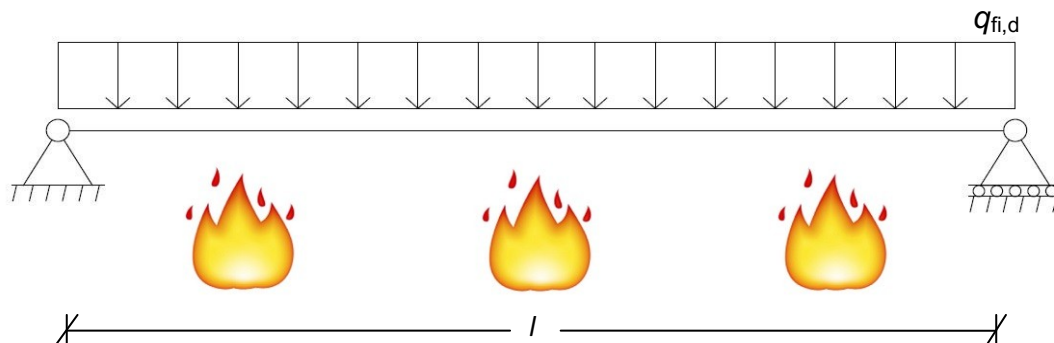
Rezultati so v večini primerov, za obe metodi, precej podobni. Na grafikonu 18 je prikazano časovno spreminjanje projektne nosilnosti tlačno obremenjenega stebra, za primer ščitenja s ploščami Fermacell, saj so v tem primeru bila največja odstopanja med poenostavljeno in napredno toplotno analizo. Do največje razlike pride pri šestdeseti minuti, kjer ta znaša 44%.



Grafikon 18: Nosilnost stebra HEA 240, zaščenega s požarnimi ploščami Fermacell

5.2 Mehanska analiza upogibno obremenjenega nosilca

V tem podpoglavju analiziramo vpliv različno določenih temperatur na požarno odpornost upogibno obremenjenega prostoležečega nosilca, ki je enkrat bočno podprt in drugič bočno nepodprt. Uporabljene bodo temperature, ki so bile pridobljene za primer prereza IPE 300, za standardni požar s treh strani. Izbrani element je prostoležeč sekundarni nosilec, ki je del medetažne konstrukcije v poslovni stavbi. Razmik med nosilci e je 1,5m. Rezultate analize predstavimo v obliki največjega razpona, ki ga nosilec, ob danih pogojih, še premosti.



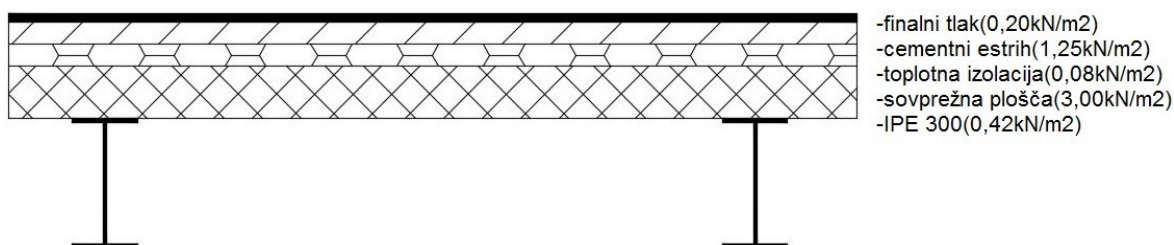
Slika 12: Računski model prostoležečega nosilca IPE 300

Notranje sile:

$$M_{Ed} = \frac{q_{fi,d} * l^2}{8} \quad (5.6)$$

$$V_{Ed} = \frac{q_{fi,d} * l}{2} \quad (5.7)$$

V enačbi (5.6) in (5.7) $q_{fi,d}$ predstavlja projektno enakomerno zvezno obtežbo pri požarnem projektnem stanju in l je razpon nosilca.



Slika 13: Prerez medetažne konstrukcije z obtežbami posameznih slojev

$$g_k = \sum g_{i,k} = 4,95 \text{ kN/m}^2$$

Koristna obtežba za poslovno-prodajne površine (kategorija B) [14]: $q_k = 2 \text{ kN/m}^2$

Kombinacija vplivov v primeru nezgodnega požarnega scenarija [15]:

$$q'_d = g_k + \psi_{1,I} * q_k = 4,95 + 0,5 * 2 = 5,95 \text{ kN/m}^2$$

$$\psi_{1,I} = 0,5$$

$$q_{fi,d} = q'_d * e = 8,925 \text{ kN/m}$$

Določimo še razred kompaktnosti:

$$\text{Parameter } \varepsilon = 0,85 * \sqrt{235/f_y} = 0,85 * \sqrt{235/235} = 0,85$$

Kompaktnost pasnice $c / t = 71,45 / 10,7 = 6,68 \leq \varepsilon * 9 = 7,65 \rightarrow 1.$ razred kompaktnosti

Kompaktnost stojine $c / t = 278,6 / 7,1 = 39,24 \leq \varepsilon * 72 = 61,2 \rightarrow 1.$ razred kompaktnosti

Prerez je v 1. razredu kompaktnosti. Lahko uporabimo plastični odpornostni moment.

Preverimo tudi strižno kompaktnost:

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{278,6}{7,1} = 39,24 \leq 72 * \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 * \frac{0,85}{1,2} = 51 \rightarrow \text{stojina je strižno kompaktna}$$

Na koncu vključimo še dodaten pogoj za strižno nosilnost. Razpon omejimo na tak način, da interakcija ne bo potrebna:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\Theta} * V_{Rd} \quad (5.8)$$

Projektno strižno odpornost (enačba 5.8) enačimo s projektno strižno obremenitvijo (enačba 5.7). Vključimo še pogoj upoštevanja vpliva prečnih sil na projektno upogibno nosilnost:

$$V_{Ed} \leq 0,5 * V_{Rd} \quad (5.9)$$

Dobimo maksimalen razpon, ki še ne zahteva interakcije:

$$l = \frac{2 * k_{y,\Theta} * V_{Rd}}{q_{fi,d}} \quad (5.10)$$

$$V_{Rd} = \frac{A_v * f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M,0}} = \frac{23,74 * 23,50}{\sqrt{3} * 1,0} = 322,10 \text{ kN}$$

$$A_v = \eta * h_w * t_w = 1,2 * 27,86 * 0,71 = 23,74 \text{ cm}^2$$

5.2.1 Postopek računa za bočno podprt element

Kontroliramo maksimalne napetosti. Enačbo za projektno upogibno nosilnost (enačba 5.12) enačimo z obremenitvijo (enačba 5.6):

$$M_{fi,\theta,Rd} = M_{Ed} \quad (5.11)$$

Projektna upogibna nosilnost se za bočno podprte elemente določa z naslednjo enačbo:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} * W_{y,pl} * f_y / \gamma_{M,fi} \quad (5.12)$$

Dobimo enačbo za maksimalen razpon nosilca:

$$l = \sqrt{\frac{8 * W_{y,pl} * k_{y,\theta} * f_y}{q_{fi,d} * \gamma_{M,fi}}} \quad (5.13)$$

5.2.2 Postopek računa za bočno nepodprt element

Račun projektne nosilnosti za bočno nepodprte elemente, skladno s SIST EN 1993-1-2 [1] poteka z enačbo:

$$M_{fi,t,Rd} = X_{LT,fi} * k_{y,\theta} * W_{y,pl} * f_y / \gamma_{M,fi} \quad (5.14)$$

Kjer je:

$$X_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{\phi_{LT,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}} \quad (5.15)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha * \bar{\lambda}_{LT,\theta} + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2] \quad (5.16)$$

$$\text{Faktor nepopolnosti } \alpha = 0,65 * \sqrt{235/f_y} = 0,65$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\Theta} = \bar{\lambda}_{LT} * \sqrt{\frac{k_{y,\Theta}}{k_{E,\Theta}}} \quad (5.17)$$

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi}{k_z * I} * \sqrt{E * I_z * G * I_t + \frac{\pi^2 * E^2 * I_z * I_\omega}{(k_\omega * I)^2}} \quad (5.18)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,pl} * f_y}{M_{cr}}} \quad (5.19)$$

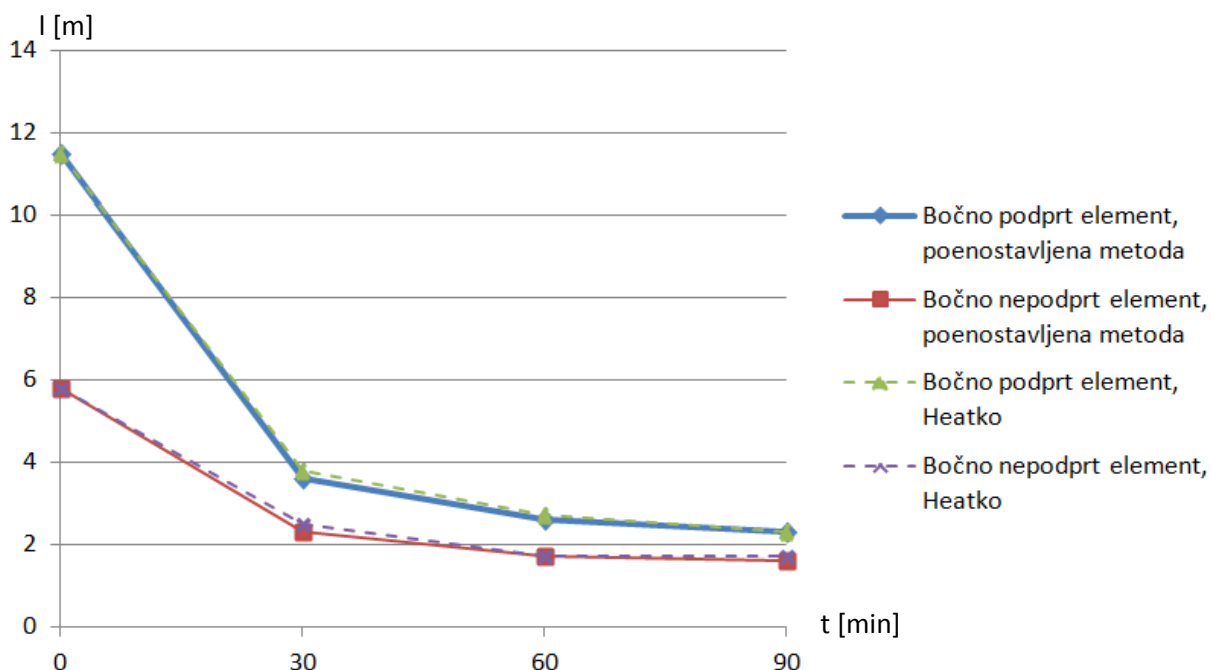
Projektno upogibno nosilnost za bočno nezavarovane elemente (enačba 5.14) enačimo z obremenitvijo (enačba 5.6):

$$\frac{q_{fi,d} * l^2}{8} = X_{LT,fi} * k_{y,\Theta} * W_{y,pl} * f_y / \gamma_{M,fi} \quad (5.20)$$

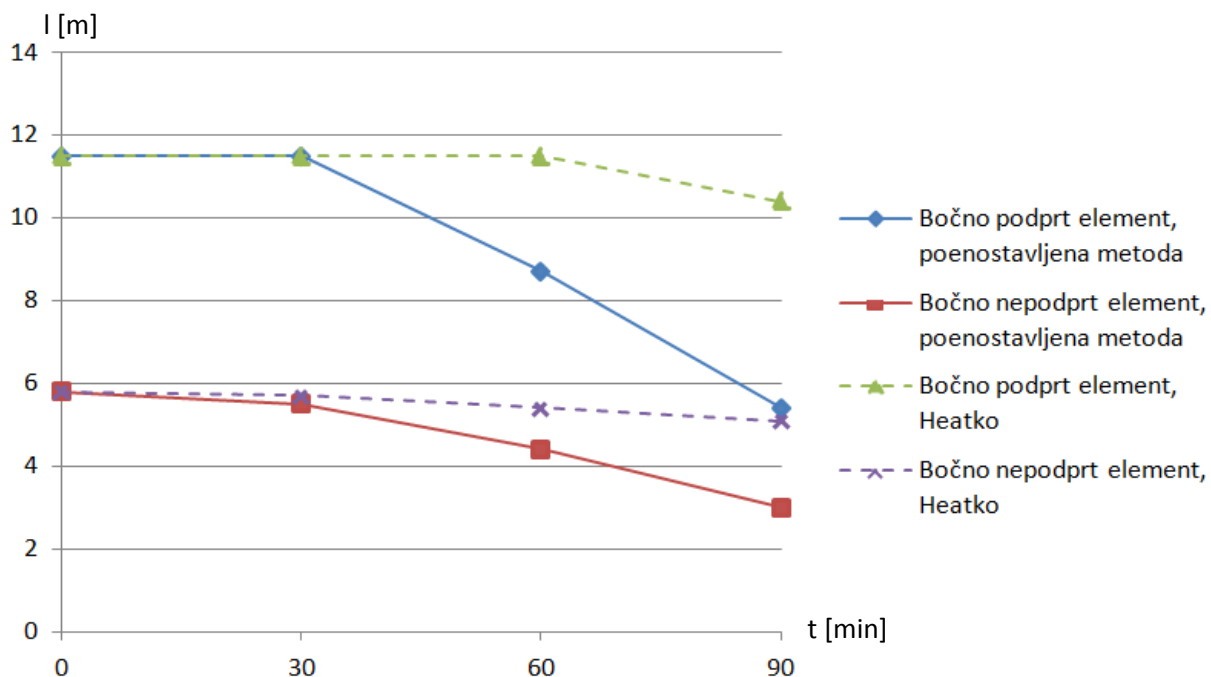
Iščemo tak razpon nosilca l , ki izpolni enačbo (5.20). Ker je $X_{LT,fi}$ preko enačbe (5.18) odvisen od razpona nosilca enačbe (5.20) ne moremo rešiti neposredno. Zato maksimalen razpon nosilca l pri katerem je še izpolnjen kriterij (5.20) določimo iterativno.

5.2.3 Rezultati mehanske analize upogibno obremenjenega nosilca

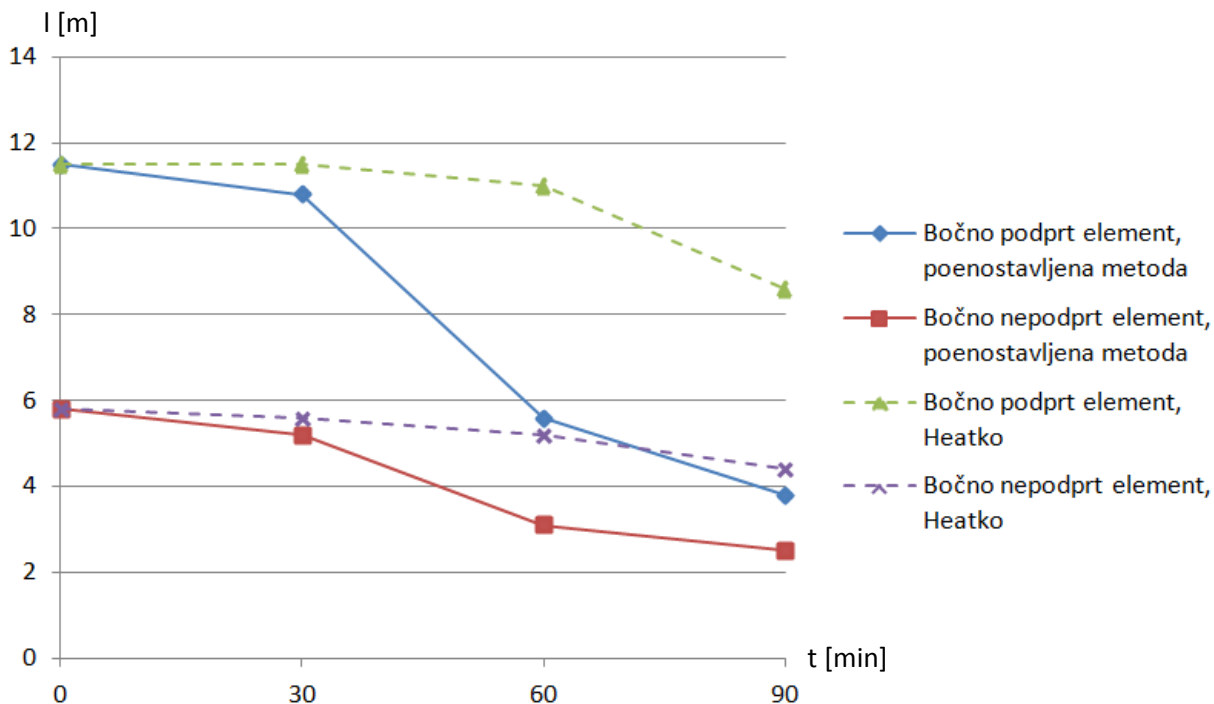
V nadaljevanju (grafikoni 19-23) so prikazani rezultati mehanske analize upogibnega nosilca. Na istem grafikonu so prikazani rezultati bočno podprtega in nepodprtega elementa, za obe metodi toplotne analize.



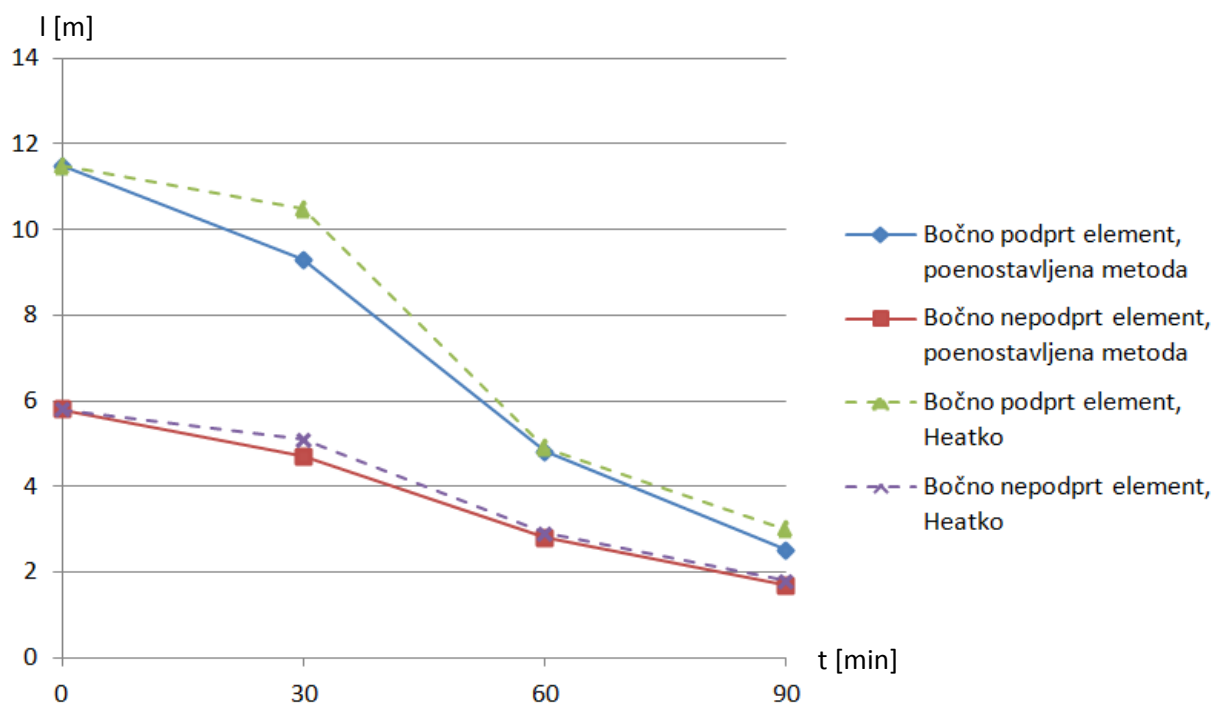
Grafikon 19: Maksimalni razpon nezaščitenega nosilca IPE 300



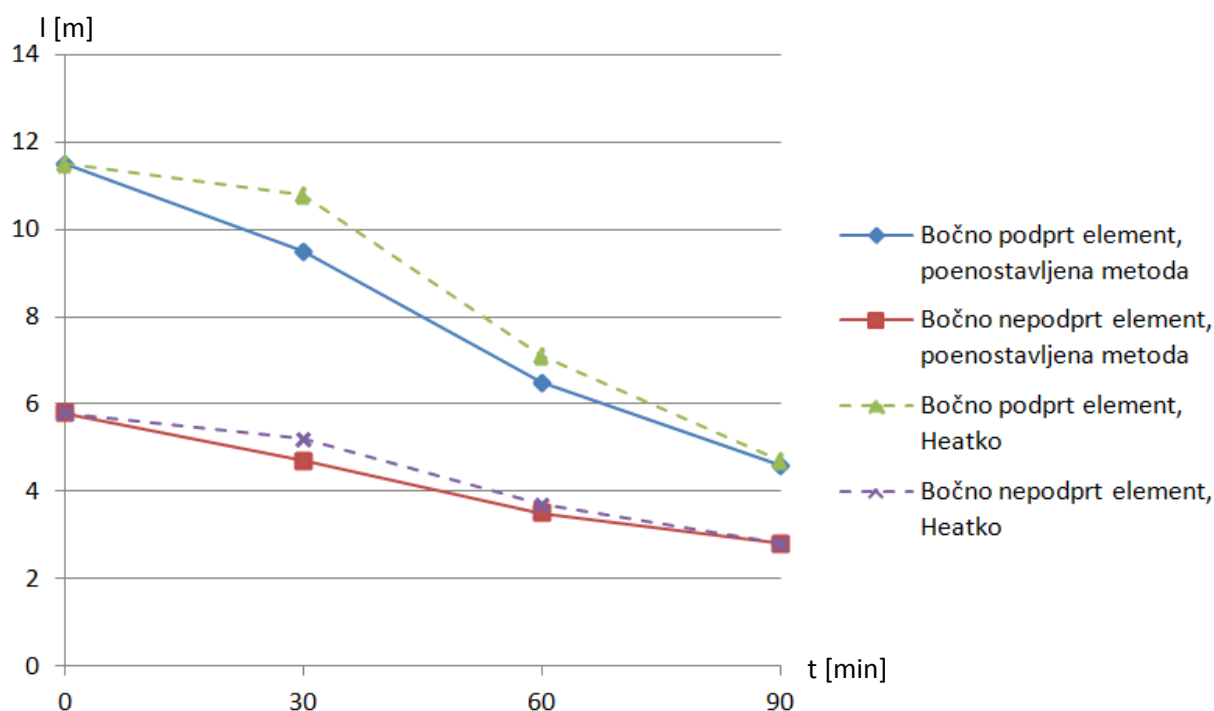
Grafikon 20: Maksimalni razpon nosilca IPE 300, zaščitenega s Promat ploščami



Grafikon 21: Maksimalni razpon nosilca IPE 300, zaščitenega s Fermacell ploščami



Grafikon 22: Maksimalni razpon nosilca IPE 300, zaščenega z intumescentno epoksidno smolo



Grafikon 23: Maksimalni razpon nosilca IPE 300, zaščenega z intumescentnim premazom

Preglednica 30: Zbrani rezultati mehanske analize za upogibno obremenjen nosilec IPE 300 za čase 30, 60 in 90 min

Metoda toplotne analize:	Zaščita:	Bočna podprtost:	I [m] pri 30 min:	I [m] pri 60 min:	I [m] pri 90 min:
SIST EN 1993-1-2	Nezaščiten	Da	3,55	2,60	2,25
SIST EN 1993-1-2	Nezaščiten	Ne	2,25	1,65	1,60
Bočno podprt/bočno nepodprt			1,58	1,58	1,41
Heatko	Nezaščiten	Da	3,80	2,65	2,30
Heatko	Nezaščiten	Ne	2,45	1,65	1,65
Bočno podprt/bočno nepodprt			1,55	1,61	1,39
SIST EN 1993-1-2	Promat	Da	11,50	8,70	5,40
SIST EN 1993-1-2	Promat	Ne	5,45	4,40	3,00
Bočno podprt/bočno nepodprt			2,11	1,98	1,80
Heatko	Promat	Da	11,50	11,50	10,35
Heatko	Promat	Ne	5,65	5,40	5,05
Bočno podprt/bočno nepodprt			2,04	2,13	2,05
SIST EN 1993-1-2	Fermacell	Da	10,75	5,60	3,80
SIST EN 1993-1-2	Fermacell	Ne	5,15	3,10	2,45
Bočno podprt/bočno nepodprt			2,09	1,81	1,55
Heatko	Fermacell	Da	11,50	10,95	8,60
Heatko	Fermacell	Ne	5,60	5,20	4,35
Bočno podprt/bočno nepodprt			2,05	2,11	1,98
SIST EN 1993-1-2	Epoksidna smola	Da	9,25	4,75	2,50
SIST EN 1993-1-2	Epoksidna smola	Ne	4,65	2,80	1,70
Bočno podprt/bočno nepodprt			1,99	1,70	1,47
Heatko	Epoksidna smola	Da	10,50	4,90	2,95
Heatko	Epoksidna smola	Ne	5,10	2,85	1,75
Bočno podprt/bočno nepodprt			2,06	1,72	1,69

... se nadaljuje

... nadaljevanje preglednice 30

SIST EN 1993-1-2	Intumescentni premaz	Da	9,45	6,45	4,55
SIST EN 1993-1-2	Intumescentni premaz	Ne	4,70	3,45	2,75
Bočno podprt/bočno nepodprt			2,01	1,87	1,65
Heatko	Intumescentni premaz	Da	10,75	7,05	4,65
Heatko	Intumescentni premaz	Ne	5,15	3,70	2,75
Bočno podprt/bočno nepodprt			2,09	1,91	1,69

6 ZAKLJUČEK

V diplomskem delu so bili predstavljeni najpogostejši načini požarne zaščite jeklenih elementov, dva načina izvajanja toplotne analize (skladno s SIST EN 1993-1-2:2005 in s programom Heatko) in dva primera mehanske analize. Toplotna analiza je bila izvedena za dva različna prereza in 5 različnih tipov požarne zaščite jeklenih elementov. Za prerez IPE 300 je bil izračunan razvoj temperatur tudi za primer požara s treh strani. Pri toplotni analizi so vidni učinki požarne zaščite in razlike v rezultatih zaradi izbora metode. Poenostavljeni račun nam v večini primerov da višje temperature v primerjavi z naprednejšo analizo, torej konservativne rezultate. Vidno je tudi, da so razlike med metodama manjše v primeru nezaščitenega prereza oz. za prereze zaščitene s protipožarnimi premazi.

Prvi del mehanske analize nam prikaže vpliv izbora metode na nosilnost tlačno obremenjenega stebra s prerezom HEA 240, drugi pa vpliv bočnega podpiranja na nosilnost upogibnega nosilca s prerezom IPE 300. V prvem delu mehanske analize je opazno, da so razlike v izračunani nosilnosti med obema metodama toplotne analize, večje od razlik med samo toplotno analizo. Pri drugem delu mehanske analize je za večino primerov viden znaten upad vpliva bočnega podpiranja po šestdeseti minuti požara, za prereze zaščitene s Promat ploščami in prereze brez zaščite je padec vpliva precej manj opazen, pri ščitenju z epoksidno smolo pa se upad zgodi že po trideseti minuti. Če primerjamo rezultate glede na uporabljeno toplotno analizo, so ugotovitve podobne kot pri prvem delu mehanske analize.

7 VIRI

- [1] SIST EN 1993-1-2:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-2. del: Splošna pravila – Požarnoodporno projektiranje.
- [2] Hozjan, T. 2016. Študijsko gradivo za predmet »Požarna varnost«. Magistrski študij Gradbeništvo, II. bolonjska stopnja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 205 str.
- [3] SIST EN 1991-1-2:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-2. del: Splošni vplivi – Vplivi požara na konstrukcije.
- [4] Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 351 str.
- [5] Beg, D., Pogačnik, A., Može, P. 2009. Priročnik za projektiranje konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 1077 str.
- [6] SIST EN 1993-1-1:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.
- [7] Stollard, P., Abrahams, J. 1999. Fire from first principles. A design guide to building fire safety. Tretja izdaja. London, New York, E & FN Spon: 174 str.
- [8] Fire protecting structural steelwork. 2017.
- www.steelconstruction.info/Fire_protecting_structural_steelwork (Pridobljeno 10. 7. 2017.)
- [9] Promatect® - H. 2017.
- <http://www.promat-see.com/sl-si/proizvodi/promatect-h> (Pridobljeno 28. 3. 2017.)
- [10] Fermacell - original med mavčno-vlaknenimi ploščami. 2017.
- https://www.Fermacell.si/baustoff_gipsfaser-platten.php (Pridobljeno 28. 3. 2017.)
- [11] Kolšek, J., Češarek, P. 2015. Performance-based fire modelling of intumescent painted steel structures and comparison to EC3. Journal of Constructional Steel Research 104: 91-103.
- [12] Gomez-Mares, M., Tugnoli, A., Landucci, G., idr. 2012. Behavior of intumescent epoxy resins in fireproofing applications. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 97: 99-108.
- [13] Hozjan, T. 2009. 2D analiza prevajanja toplote po mediju: program Heatko.
- [14] SIST EN 1991-1-1:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-1 del: Splošni vplivi – Gostote, lastna teža, koristne obtežbe stavb.
- [15] SIST EN 1990:2004. Evrokod: Osnove projektiranja.