

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:

Jagodic, K., 2015. Izračun zgornjega ustroja za podano obremenitev. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Zgonc, B., somentorica Šemrov, D.): 32 str.

Datum arhiviranja: 30-09-2015

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:

Jagodic, K., 2015. Izračun zgornjega ustroja za podano obremenitev. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Zgonc, B., co-supervisor Šemrov, D.): 32 pp.

Archiving Date: 30-09-2015

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:

**KATJA JAGODIC**

**IZRAČUN ZGORNJEGA USTROJA ZA PODANO  
OBREMENITEV**

Diplomska naloga št.: 227/B-GR

**THE CALCULATION OF SUPERSTRUCTURE FOR  
GIVEN LOADS**

Graduation thesis No.: 227/B-GR

**Mentor:**

prof. dr. Bogdan Zgonc

**Somentorica:**

asist. Darja Šemrov

Ljubljana, 24. 09. 2015

## STRAN ZA POPRAVKE

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVE**

Podpisana **KATJA JAGODIC** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom: »**Izračun zgornjega ustroja za podano obremenitev**«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 12. 8. 2015

Katja Jagodic

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>625.1(497.4)(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Katja Jagodic</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Bogdan Zgonc, univ. dipl. inž. grad.</b>
<b>Somentor:</b>	<b>asist. Darja Šemrov, univ. dipl. inž. grad.</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Izračun zgornjega ustroja za podano obremenitev</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>32 str., 3 pregl., 10 graf., 15 sl., 35 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>Tirnica, prag, tirna greda, pritrdilni in vezni pribor, napetosti v tirnici, napetosti zaradi temperaturne spremembe, napetosti zaradi upogiba.</b>

### **Izvelek**

V prvem delu diplomske naloge so ob upoštevanju Pravilnika o zgornjem ustroju železniških prog, objavljenega v Uradnem listu Republike Slovenije, št. 92/2010, podrobno opisani elementi zgornjega ustroja železniških prog, ki odločilno vplivajo na stanje železniške proge. Opisane so tirnice, pragovi, tirna greda ter pritrdilni in vezni pribor.

V nadaljevanju diplomske naloge je predstavljena teorija za izračun napetosti v tirnici zaradi temperaturnih sprememb in zaradi upogiba. Pri izračunu napetosti zaradi upogiba je predstavljena Zimmermanova metoda, dinamični vplivi pa so zajeti s pomočjo Eissenmannove teorije.

Zadnji del dejansko vsebuje izračun, na podlagi izbranih izhodiščnih podatkov. Na podlagi tega sem izračunala napetosti v različnih oblikah standardnih tirnic pri različnih stanjih zgornjega ustroja. Izračunala sem napetosti zaradi temperaturnih sprememb pri breztrejsko položenih tirnicah in trejsko položenih tirnicah. Sledi še izračun napetosti zaradi upogiba, kjer je tudi izračun posodka, upogibnega momenta in pritiska ter izračun upogibnih napetosti pri dinamični prometni obremenitvi.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDK:** 625.1(497.4)(043.2)  
**Author:** Katja Jagodic  
**Supervisor:** Prof. Bogdan Zgonc, Ph.D.  
**Co-advisor:** Assist. Darja Šemrov, B. Sc.  
**Title:** The Calculation of Superstructure for Given Load  
**Document type:** Graduation Thesis – University studies  
**Notes:** 32 p., 3 tab., 10 graph., 15 fig., 35 eq.  
**Key words:** Railway, railstep, railbed, tightening and binding tools, tensions in railway, tensions due to temperature change, tensions due to bend.

**Abstract:**

In the first part of Diploma Thesis there are elements of railroad superstructure described in detail, which decisively influence on railroad condition, considering the Rule Book of Railroad Superstructure issued in the Official Gazette of Republic of Slovenia with number 92/2010. There are railways, railsteps, railbed, tightening and binding tools described.

In the second part there is a theory for calculating tensions due to temperature change and bend presented. In calculating tension due to bend there is Zimmerman method presented and dynamic impacts are taken into consideration with a help of Eissmann theory.

In the last part I have made actual calculation based on gathered starting point data. Using it I have calculated tensions in different shapes of standard railways and in different conditions of upper structure. I have made calculations tensions due to temperature changes in case of non-friction laid railways and friction laid railways. There is also a calculation of tension due to bend having a calculation of subsidence, bending moment, pressure and a calculation of bending tensions in dynamic traffic load.

## **ZAHVALA**

Za pomoč in strokovne nasvete pri izdelavi te diplomske naloge se zahvaljujem mentorju prof. dr. Bogdan Zgoncu in somentorici asist. Darji Šemrov.

Posebna zahvala gre mojim staršem in celotni družini za podporo in spodbudo pri študiju.

Prav tako se zahvaljujem vsem sošolcem in prijateljem za podporo ter za vse skupaj preživete trenutke.

**KAZALO VSEBINE**

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ZGORNJI USTROJ .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>Tirnica .....</b>	<b>2</b>
2.1.1	Oblike tirnic .....	2
2.1.2	Kakovost tirnic.....	3
2.1.3	Varjenje tirnic.....	3
<b>2.2</b>	<b>Pragovi.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3</b>	<b>Tirna greda.....</b>	<b>6</b>
<b>2.4</b>	<b>Pritrdilni in vezni pribor .....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>IZRAČUN NAPETOSTI V TIRNICI.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>Napetosti zaradi temperaturnih sprememb .....</b>	<b>10</b>
3.1.1	Breztrenjsko položena tirnica.....	10
3.1.2	Trenjsko položena tirnica .....	11
3.1.3	Neprekinjeno zavarjeni tir .....	13
<b>3.2</b>	<b>Napetosti zaradi upogiba .....</b>	<b>14</b>
3.2.1	Izračun posedka, upogibnega momenta in pritiska .....	16
3.2.2	Izračun upogibnih napetosti pri dinamični prometni obremenitvi .....	19
<b>4</b>	<b>PRAKTIČNI DEL .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1</b>	<b>Napetosti zaradi temperaturnih sprememb .....</b>	<b>21</b>
4.1.1	Breztrenjsko položena tirnica.....	21
4.1.1.1	Kratka tirnica .....	21
4.1.1.2	Dolga tirnica.....	21
4.1.1.3	Dolga tirnica, različne oblike tirnic .....	22
4.1.2	Trenjsko položena tirnica .....	22
4.1.2.1	Trenjsko položena tirnica standardne oblike 60 E1.....	22
4.1.2.2	Primerjava trenjsko položenih tirnic različnih standardnih oblik 60 E1, 54 E2 in 49 E1 .....	25



<b>4.2</b>	<b>Napetosti zaradi upogiba .....</b>	<b>27</b>
4.2.1	Tirnica 60 E1 pri dobri podlagi .....	27
4.2.2	Primerjava različnih standardnih oblik tirnic pri dobri podlagi .....	28
4.2.3	Standardna oblika tirnice 60 E1 in različna stanja zgornjega ustroja .....	30
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>31</b>
<b>VIRI.....</b>		<b>32</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Podatki o standardnih tirnicah (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 39. člen)	3
Preglednica 2: Razmik pragov (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 47. člen)	4
Preglednica 3: Izračun osne sile v tirnici za različne oblike tirnic	22

## **KAZALO GRAFIKONOV**

Grafikon 1: Vplivnica za upogib	17
Grafikon 2: Vplivnica za moment	18
Grafikon 3: Dilatacije v odvisnosti od sprememb temperature za tirnico oblike 60 E1	24
Grafikon 4: Napetosti v odvisnosti od sprememb temperature za tirnico oblike 60 E1	25
Grafikon 5: Dilatacije v odvisnosti od sprememb temperature za različne tirnice	25
Grafikon 6: Napetosti v odvisnosti od sprememb temperature za različne tirnice	26
Grafikon 7: Vrednosti momentov za različne tirnice	28
Grafikon 8: Vrednosti upogibov za različne tirnice	29
Grafikon 9: Vrednosti upogibnih napetosti za različne tirnice	29
Grafikon 10: Vrednosti upogibnih napetosti za različna stanja zgornjega ustroja	30

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Standardne tirnice (Zgonc, 2012: str. 22)	2
Slika 2: Vgrajevanje tirnic različnih kakovosti glede na količino prometa in polmera krožnega loka (Zgonc, 2012: str. 23)	3
Slika 3: Standardni prečni prerezi lesenih pragov (Zgonc, 2012: str. 26)	5
Slika 4: Tipičen enodelen betonski prag (Zgonc, 2012: str. 26)	5
Slika 5: Razpored pragov na dolžini enega tirnega polja (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 47. člen)	6
Slika 6: Zrnavost tirne grede (Zgonc, 2012: str. 27)	6
Slika 7: Shematični prikaz zrn v tirni gredi (Zaletelj, Flerin, 2006: str. 8)	7
Slika 8: Karakteristični prečni profili enotirne proge za hitrosti $V \leq 160\text{km/h}$ (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 48. člen)	8
Slika 9: Karakteristični prečni profili dvotirne proge za $V \leq 160\text{km/h}$ (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 48. člen)	8
Slika 10: Sistem toge pritrditve K (B. Lichtberger, str. 155)	9
Slika 11: Sistem elastične pritrditve imenovan Pandrol ( <a href="http://www.railway-news.com/pandrol-track-systems-and-fastening-materials">http://www.railway-news.com/pandrol-track-systems-and-fastening-materials</a> , pridobljeno: 23.8.2015)	9
Slika 12: Diagram mejnih napetosti (Zgonc, 2012: str. 39)	12
Slika 13: Namišljeni vzdolžni prag (Zgonc, 2012: str. 46)	15
Slika 14: Sile in momenti v prečnem prerezu tirnice (Zgonc, 2011: str. 5)	16
Slika 15: Lokomotiva SŽ 541 ( <a href="http://www.miniaturna-zeleznica.com/galerije/Ziva/1del/index.php">http://www.miniaturna-zeleznica.com/galerije/Ziva/1del/index.php</a> , pridobljeno: 11.8.2015)	27

## **OKRAJŠAVE IN SIMBOLI**

SŽ	Slovenske železnice
RS	Republika Slovenija
EN	European Standards
SIST	Slovenski standard, ki ga je sprejel Slovenski inštitut za standardizacijo
SIST EN	Privzeti evropski standard
UIC	Mednarodna železniška zveza (fr. Union Internationale des Chemins de fer)



## 1 UVOD

Železniška proga je inženirska konstrukcija, ki omogoča neprekinjen in varen prevoz železniških vozil in vlakov. Sestavljena je iz zgornjega in spodnjega ustroja, opreme prog, zemljišč in železniških objektov (M. Tomičić – Torlaković, S. Ranković, 1996). Zgornji ustroj je sestavljen iz več delov, in sicer iz tirnic, tirnega pribora, pragov, tirne grede, kretnic, križišč in drugih, ki jih bom opisala v nadaljevanju diplomske naloge. Namen diplomske naloge je izračun napetosti v tirnici za različne oblike tirnic in za različna stanja zgornjega ustroja.

V začetku diplomske naloge bom podrobneje predstavila sestavo zgornjega ustroja železniške proge, saj to vpliva na napetosti v tirnici. Predstavila bom tudi oblike tirnic, vrste pragov, sestavo tirnih gred, sestavo tamponskega sloja in pritrdilni in vezni pribor Slovenskih železniških prog.

V srednjem delu diplomske naloge vas bom seznanila s teorijo za izračun napetosti v tirnici. Napetosti v tirnici nastopijo zaradi temperaturnih sprememb in zaradi upogiba.

Na koncu diplomske naloge bom primerjala napetosti v tirnici za različne oblike tirnic in za različna stanja zgornjega ustroja.

## 2 ZGORNJI USTROJ

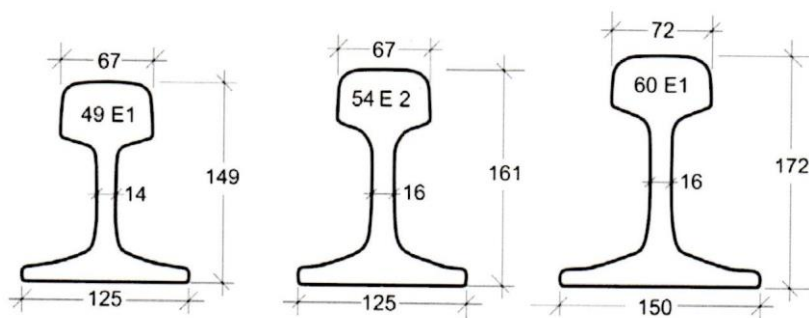
Zgornji ustroj ima dve temeljni funkciji, in sicer vodenje tirnih vozil in prenos prometnih obremenitev na spodnji ustroj. Zasnova zgornjega ustroja, v obliki tirne rešetke s prečnimi pragovi, seže daleč v zgodovino in se še do danes ni spremenila, ter uspešno kljubuje vsem izzivom in potrebam časa. Seveda to ne pomeni, da ni nobenega vzdrževanja, saj moramo zgornji ustroj nujno vzdrževati z rednimi vzdrževalnimi deli. Prednost takšne zasnove je ta, da lahko enostavno reguliramo tir oziroma izravnavamo vertikalne in horizontalne deformacije, ki nastanejo tekom obratovanja. Danes se pojavlja še zgornji ustroj brez tirne grede na betonski plošči, ki pa je zelo velik investicijski strošek, in zato klasičnega še nekaj časa ne bo nadomestil (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

### 2.1 Tirnica

Najpomembnejši element železniškega tira je tirnica, ki neposredno sodeluje pri nošenju in vodenju vozila v tiru. Prevzema vertikalne in horizontalne sile tirnih vozil in jih prenaša na pragove, tirno gredo in spodnji ustroj proge. Tirnice razlikujemo po obliki, masi ter kemični sestavi (Zgonc, 2013).

#### 2.1.1 Oblike tirnic

Na sliki 1 so prikazane standardne tirnice, katere so vgrajene v slovenskem železniškem sistemu, vgrajenih pa je še veliko drugih oblik. Velikost odpornostnega momenta tirnice je določena z obliko in maso tirnice, katera je določena na tekoči meter (Zgonc, 2013).



Slika 1: Standardne tirnice (Zgonc, 2012: str. 22)



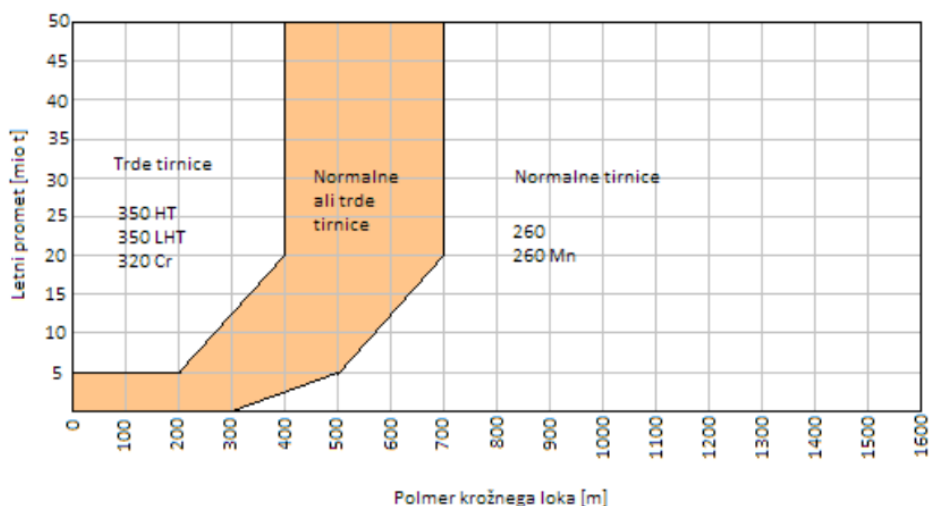
Preglednica 1: Podatki o standardnih tirnicah (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 39. člen)

OBLIKA TIRNICE		Masa [kg/m]	Površina prereza [cm <sup>2</sup> ]	Momenti	
Nova oznaka	Stara oznaka			I(x) [cm <sup>4</sup> ]	W(x) [cm <sup>3</sup> ]
60 E1	UIC60	60,21	76,70	3038	333,6
54 E1	UIC54E	53,81	68,56	2307	276,4
49 E1	S49	49,39	62,92	1816	240,3

### 2.1.2 Kakovost tirnic

Za določanje kakovosti tirnic je po novem evropskem standardu (EN 13674-1, 2003) odločilna trdota vozne površine tirnice po Brinellu. Tirnice se po tem standardu delijo v sedem kakovostnih razredov. (Zgonc, 2012)

Odločitev o tem, kakšno tirnico bomo izbrali, je odvisna od polmera krivine in prometne obremenitve proge. Po priporočilu UIC (UIC Kodex 721 E, 2005) je izbor tirnic pri vgrajevanju odvisen od količine prometa in polmera krožnega loka, kot je to prikazano na naslednji sliki (Zgonc, 2012).



Slika 2: Vgrajevanje tirnic različnih kakovosti glede na količino prometa in polmera krožnega loka (Zgonc, 2012: str. 23)

### 2.1.3 Varjenje tirnic

Obstajata dva različna načina varjenja tirnic, in sicer elektroporovni postopek in alumotermijski postopek. Z varjenjem tirnic dobimo neprekinjeno zavarjene tire, ki se danes vse bolj uporabljajo, saj z

zgornjim ustrojem zagotavljajo zanesljivo obvladovanje sil, ki nastajajo v tiru zaradi temperaturnih sprememb. Poznamo še stikovani tir, ki se danes opušča, spojen pa je s spojkami in na stiku podprt z dvojnimi pragovi. To predstavlja šibko točko, kjer prihaja do tresljajev in drugih neugodnosti (Zgonc, 2012).

## 2.2 Pragovi

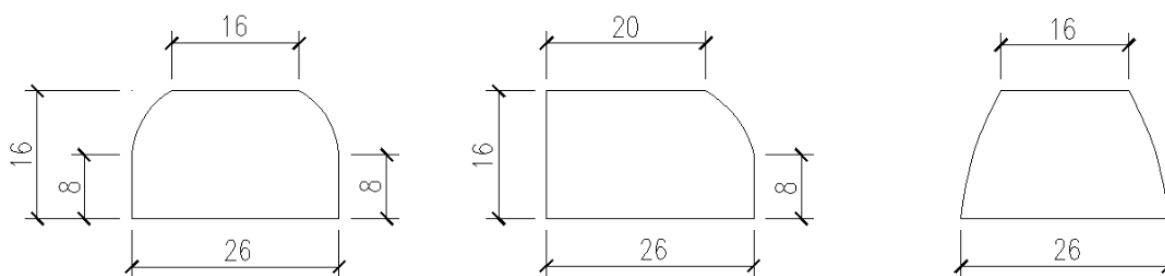
Poznamo lesene, betonske ali jeklene pragove, kateri imajo nalogo prenosa obremenitve tirnih vozil s tirnice na tirno gredo in ohranitev tirne širine. Pragovi morajo kljubovati vremenskim vplivom, morajo biti odporni na udar koles pri iztirjenju ter morajo zagotavljati zadostno prečno odpornost tirne rešetke v gredi. Polagamo jih pravokotno na vzdolžno os tira v razmiku podanem na tabeli 2 (Zgonc, 2012).

Preglednica 2: Razmik pragov (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 47. člen)

Osna obremenitev [kN]	Osni razmik pragov [mm]	Število pragov [kos/km]
225	600	1667
200	650	1538
180	700	1429
160	750	1333

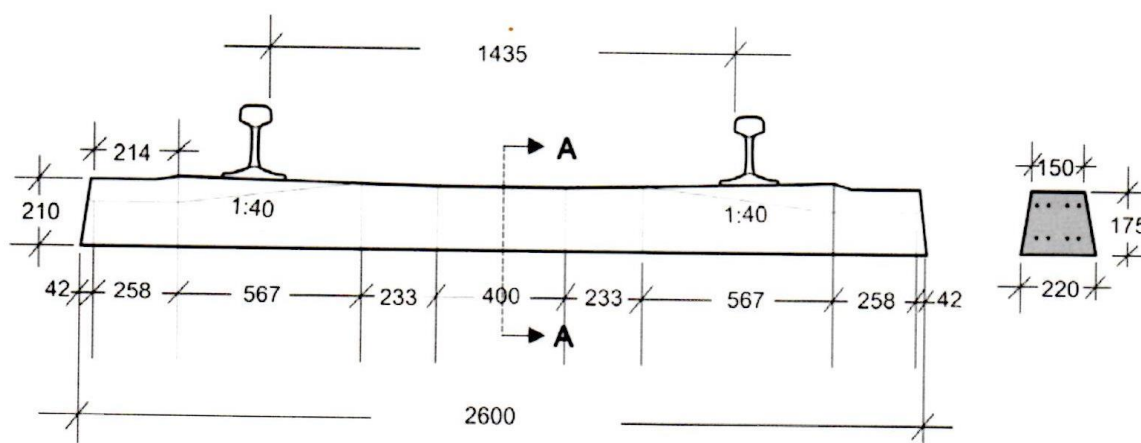
V pravilniku o zgornjem ustroju železniških prog je zahtevano, da se ravnamo za lesene pragove po SIST EN 13145, kjer so predpisane vrste lesa, zahteve kakovosti, izvor, pogoji izdelave, oblike, dimenzije in tolerance, dopustne napake in posebnosti kakovosti lesa, ter za betonske pragove po SIST EN 13230 (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

Lesene prage izdelujemo iz različnih vrst lesa, in sicer iz zdravega hrastovega ali bukovega lesa, lesa belega ali črnega bora, macesna, akacije ali pa tudi iz nekaterih drugih vrst lesa. Ker vemo, da je les občutljiv, ga moramo po posebnem postopku popolnoma zaščititi s posebnimi impregnacijskimi sredstvi (Zgonc, 2012).



Slika 3: Standardni prečni prerezi lesenih pragov (Zgonc, 2012: str. 26)

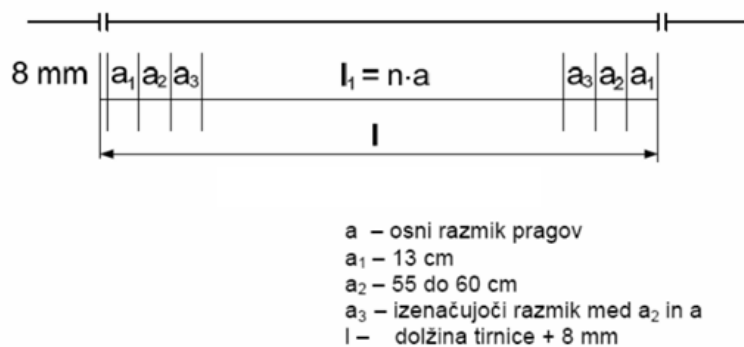
Betonski prerezi so izdelani iz prednapetega betona visoke kakovosti. Imajo daljšo življenjsko dobo od lesenih pragov, so pa bistveno težji od lesenih, zato jih ne moremo ročno vgrajevati. Zaradi velike teže so tudi bolj odporni proti premikom tal (Zgonc, 2012).



Slika 4: Tipičen enodelen betonski prag (Zgonc, 2012: str. 26)

Jekleni pragovi se izdelujejo iz valjanega jekla. Njihova prednost je majhna višina in dobra odpornost proti prečnemu premiku. Pri nas jih ne proizvajamo in ne vgrajujemo. Nekaj rabljenih je vgrajenih le na istrskih progah (Zgonc, 2012).

Razporeditev pragov na dolžini enega tirnega polja mora biti v skladu z naslednjo sliko (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).



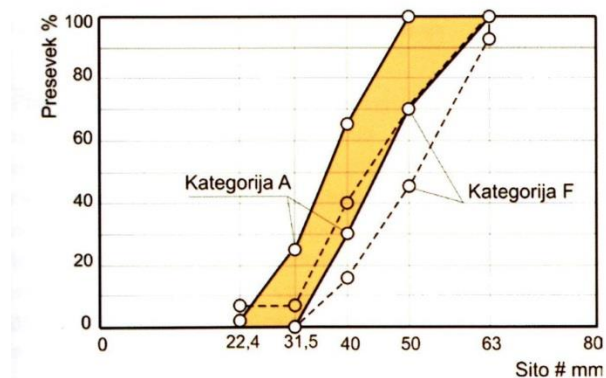
Slika 5: Razpored pragov na dolžini enega tirnega polja (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 47. člen)

### 2.3 Tirna greda

Tirna greda je sestavljena iz sloja tolčenca, v katerem leži tirna rešetka, in ima funkcijo prenosa in porazdelitve prometne obremenitve s tirne rešetke na planum proge, zagotavljanja stabilne lege tira, odvajanja meteorne vode in amortiziranja dinamičnih in akustičnih vplivov, ki jih povzroča promet (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

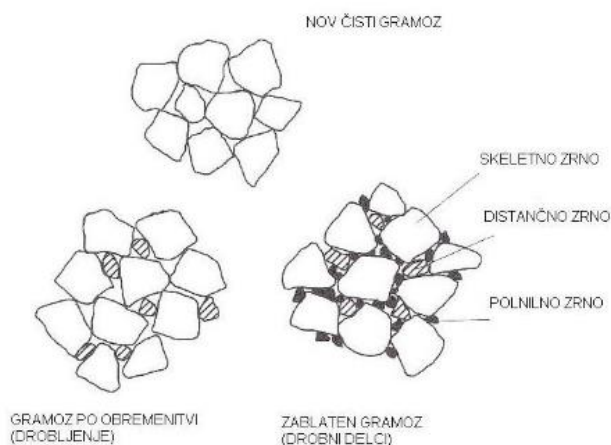
Tolčenec za tirno gredo se izdeluje iz sedimentnih (apnenec, dolomit) ali eruptivnih kamnin (granit porfir, bazalt), v Sloveniji pa za izdelavo tirne grede uporabljamo le sedimentne kamnine (Zgonc, 2012).

Najbolj optimalno strukturo tolčenca dosežemo, ko ustvarimo največje možno število stičnih ploskev med posameznimi zrni. Zrnavost sestave tolčenca ugotavljamo s siti kvadratne oblike premera 22,40 mm, 40 mm, 50 mm, 63 mm. Nazivno strukturo zrnivosti delimo na 6 kategorij od A do F. Zrnavost dveh skrajnih kategorij, obeh nazivnih zrnivosti, kategorije A in F kaže naslednja slika. V Sloveniji in večini evropskih železniških uprav uporabljamo zrnavost kategorije A, ki je na sliki 6 rdeče obarvana (Zgonc, 2012).



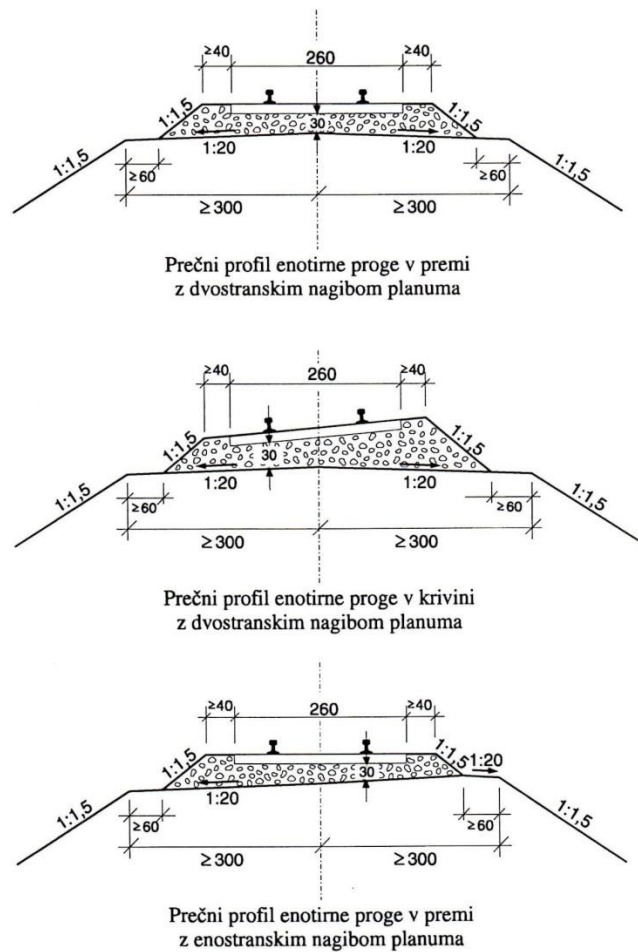
Slika 6: Zrnavost tirne grede (Zgonc, 2012: str. 27)

Tirna greda mora biti čista, da omogoča hitro in nemoteno odvajanje vode s planuma proge, odporna pa mora biti tudi na mrz in obrus. Zato se mehanske lastnosti tolčenca preverjajo glede na odpornost proti obrabi, odpornost proti drobljenju in tudi nekatere druge lastnosti. Tirna greda se v času obratovanja obrablja, zrna tolčenca se drobijo in s tem zatesnijo tirno gredo, kar onemogoča odvajanje vode s planuma proge, kateri se razmehča in deformira, zato blato začne prodirati v tirno gredo in se tolčenec pogreza v zemeljski trup proge. Zaradi tega pride do zablatenosti tirne grede, ki pa ne more več učinkovito opravljati svoje naloge in pride do slabše stabilnosti tira. Osnova za oceno zablatenosti grede je analiza zrnivosti vzorcev grede, pri čemer odločilno vlogo igra presevek oziroma odstotek zrn, ki pade skozi sito 22,4 mm (ERRI D 182 RP, 1995). Če ta vrednost preseže 30%, je potrebno gredo presejati, odstraniti neustrezen material in dodati novega. Ravno tako pa moramo pregledati spodnji ustroj proge in ga ustrezno sanirati če je le to potrebno. Progo moramo na koncu tudi strojno regulirati (Zgonc, 2012). Na sliki 7 je še shematični prikaz zrn v tirni gredi.

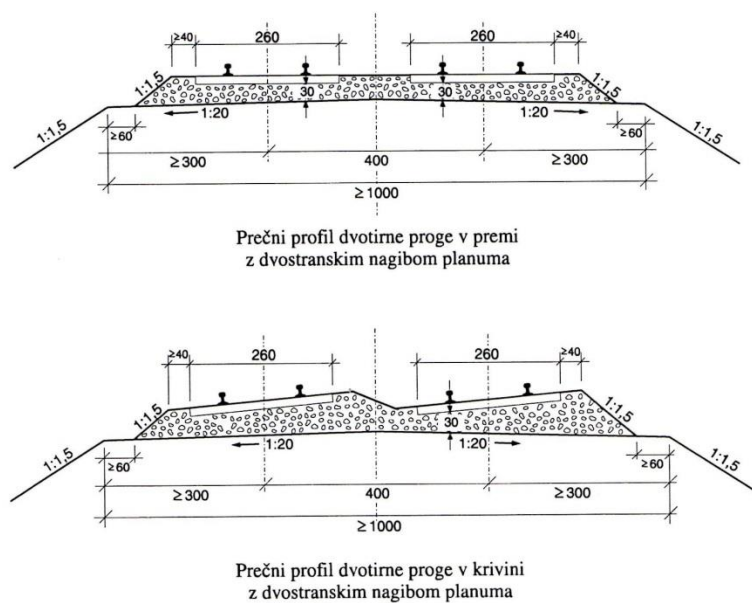


Slika 7: Shematični prikaz zrn v tirni gredi (Zaletelj, Flerin, 2006: str. 8)

Na naslednjih slikah je na prečnih profilih proge prikazana oblika tirne grede in njene glavne dimenzije.



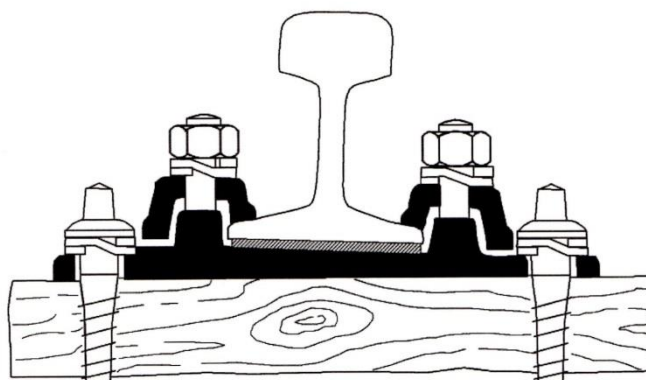
Slika 8: Karakteristični prečni profili enotirne proge za hitrosti  $V \leq 160 \text{ km/h}$  (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 48. člen)



Slika 9: Karakteristični prečni profili dvotirne proge za  $V \leq 160 \text{ km/h}$  (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 48. člen)

## 2.4 Pritrdilni in vezni pribor

Funkcija pritrdilnega in veznega pribora je pritrnitev tirnic na pragove in povezava tirnic v vzdolžni smeri. Poznamo dva različna načina, in sicer togo in elastično pritrnitev. Pri nas najpogostejši sistem je toga K pritrnitev, katere sistem je prikazan na naslednji sliki (Zgonc, 2003).



Slika 10: Sistem toge pritrditve K (B. Lichtberger, str. 155)

Pomanjkljivost pri togi K pritrditvi je velika teža in togost, saj se zaradi tako velike togosti ne more prilagajati spreminjajočim se silam. Vedno bolj se tudi pri nas uveljavljajo elastične pritrditve. Uporabljajo se posebne elastične vzmeti ali elastične ploščice. Najbolj se uveljavlja elastični sistem pritrditve imenovan Pandrol, ki je razviden na sliki 11 (Zgonc, 2003).



Slika 11: Sistem elastične pritrditve imenovan Pandrol (<http://www.railway-news.com/pandrol-track-systems-and-fastening-materials>, pridobljeno: 23.8.2015)

### 3 IZRAČUN NAPETOSTI V TIRNICI

Za izračun zgornjega ustroja železniške proge moramo poznati napetosti v tirnici, ki pa nastanejo zaradi temperaturnih sprememb, upogiba in nekaterih drugih dejavnikov.

#### 3.1 Napetosti zaradi temperaturnih sprememb

Tir se zaradi temperaturnih sprememb razteza ali krči, odvisno od tega ali je temperatura nizka ali visoka. Napetosti v tiru so odvisne od tega, kakšne vrste je stik, in sicer ali je stikovani ali neprekinjeno zavarjeni. Pri stikovanem tiru je krčenje in raztezanje omogočeno s pomočjo dilatacij, pri neprekinjeno zavarjenih pa teh dilatacij ni, zato morajo biti krčenja in raztezanja obvladovana in ohranjena v mejah, ki zagotavljajo varen promet (Zgonc, 2012).

##### 3.1.1 Breztrenjsko položena tirnica

Pri breztrenjsko položeni tirnici lahko izračunamo spremembo dolžine tirnic premo sorazmerno s spremembo temperature po naslednji enačbi (Zgonc, 2012):

$$\Delta l = \alpha l \Delta t, \quad (1)$$

kjer je

$\Delta l$  sprememba dolžine tirnice [m]

$\alpha$  koeficient raztezanja jekla ( $\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5}$ )

$l$  dolžina tirnice [m]

$\Delta t$  sprememba temperature [°C].

Če je premik kakorkoli onemogočen, nastanejo v tirnici napetosti, ki jih izračunamo po enačbi (Zgonc, 2012):

$$\sigma = \alpha E \Delta t, \quad (2)$$

kjer je

$\sigma$  napetost v tirnici [N/cm<sup>2</sup>]

$E$  elastični modul jekla ( $E = 2,1 \cdot 10^7 \text{ N/cm}^2$ ).

Če v enačbo (2) vstavimo vrednost koeficienta raztezanja jekla  $\alpha$  in elastičnega modula jekla  $E$ , dobimo enostavnejšo obliko enačbe (Zgonc, 2012):

$$\sigma = \alpha E \Delta t = 241 \Delta t \quad (3)$$



Iz enačbe (3) lahko vidimo, da se za vsako stopinjo, ki naraste ali pade, spremeni napetost v tirnici za  $241 \text{ N/cm}^2$ .

### 3.1.2 Trenjsko položena tirnica

V tem primeru je prosto raztezanje oziroma krčenje tirnic ovirano z odporom med pragovi in tirno gredo, ter trenjem med spojko in tirnico na tirnem stiku. Povprečna vrednost odpora trenja med spojko in tirnico je  $R = 100 \text{ kN}$ , povprečna vrednost odpora proti premaknitvi praga v tirni gredi pa je podana na dolžinski centimeter tirnice in znaša  $r = 90 \text{ N/cm}$ . Pri tem je predpostavka, da je tirnica tako močno pritrjena na pragove, da ne pride do vzdolžnega premika med tirnico in pragovi, in da se trenje med tirnico in pragovi sploh ne aktivira (Zgonc, 2012).

Predpostavimo, da tirnica na sredini miruje in da se na koncih razteza na obe strani. Z naraščanjem temperature se najprej aktivira sila trenja v spojki  $R$ , ki preprečuje raztezanje tirnice in s tem povzroči v tirnici napetosti (Zgonc, 2012):

$$\sigma_R = \frac{R}{S}, \quad (4)$$

kjer je:

$R$  sila trenja v spojki [kN]

$S$  prerez tirnice [ $\text{cm}^2$ ].

Iz enačbe (3) sledi, da to napetost povzroča naraščanje temperature  $\Delta t_R$ :

$$\Delta t_R = \frac{R}{241S} \quad (5)$$

V spojki je sila trenja premagana, ko temperatura naraste za vrednost  $\Delta t_R$ . Pri povečevanju temperature se tirnica razteza na obeh koncih tirnice proti sredini, dilatacija pa se manjša. Trenje na celotni dolžini tirnice bo premagano oziroma bo vsa tirnica prešla v gibanje z naslednjim temperaturnim intervalom (Zgonc, 2012):

$$\Delta t_r = \frac{rl}{2 \cdot 241S} \quad (6)$$

Z raztezanjem tirnice se veča tudi napetost:

$$\sigma_r = \frac{rl}{2S} \quad (7)$$

Opazujemo lahko poljubno točko na tirnici, ki je oddaljena od konca tirnice za  $x$ . Pogoji, da se ta točka premakne vzdolžno, je vzdolžna sila  $F_x$ , ki nastane zaradi spremembe temperature in je višja od sile odpora v spojki in sile odpora med pragovi in tirno gredo na dolžini  $x$ . Mejno silo  $F_x$  lahko izračunamo po naslednji enačbi (Zgonc, 2012):

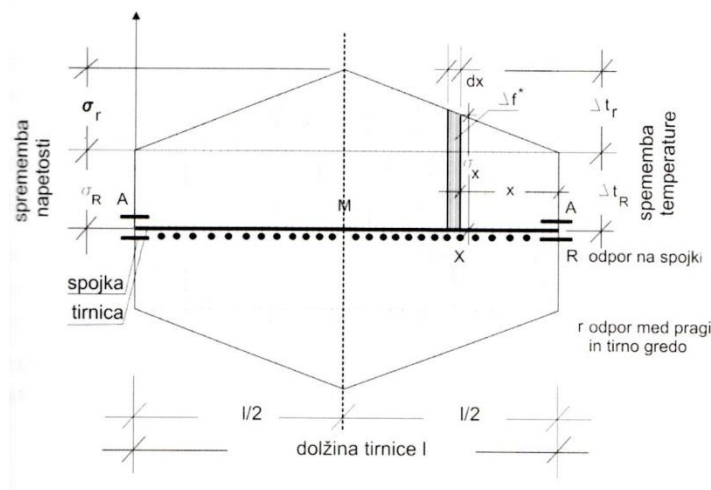
$$F_x = R + rx \quad (8)$$

Dokler sila  $F_x$  ne premaga sile odpora  $R$  v tej točki, točka miruje, ko pa je sila odpora premagana, pa se točka premakne. Kasneje ko se temperatura še povečuje, se to kaže v spremembi dolžine tirnice. Če poznamo to mejno silo, lahko iz naslednjih enačb izračunamo tudi mejno napetost  $\sigma_x$  in z njo povezano mejno temperaturo  $\Delta t_x$  (Zgonc, 2012):

$$\sigma_x = \frac{R+rx}{S} \quad (9)$$

$$\Delta t_x = \pm \frac{R+rx}{241S} \quad (10)$$

K vsaki točki na dolžini tirnice lahko dodamo mejne napetosti in mejne temperature kot ordinate in dobimo diagram mejnih napetosti ter mejnih temperatur v odvisnosti od odporov trenja. V mejah spodnjega diagrama, se vsaka sprememba temperature kaže kot napetost, zunaj meja diagrama pa kot sprememba dolžine tirnice, če je to omogočeno (Zgonc, 2012).



Slika 12: Diagram mejnih napetosti (Zgonc, 2012: str. 39)

Največja sprememba dolžine tirnice je na tirnem stiku, kjer je  $\sigma_r = 0$ . Spremembo dolžine tirnice na tirnem stiku lahko izračunamo s pomočjo naslednje enačbe (Zgonc, 2012):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} \quad (11)$$

Oziroma:

$$\Delta l = \frac{\sigma}{E} l \quad (12)$$

Za dolžino  $l$  vstavimo  $l/2$ , za napetost pa vstavimo enačbo (7) in dobimo enačbo za izračun spremembe dolžine:

$$\Delta l_r = \frac{r l^2}{4ES} \quad (13)$$

Zgornje enačbe veljajo za naraščanje temperature. Pri padanju temperature je nekaj sprememb pri izračunu. Za premagovanje odpora v spojki in odpora med pragovi in tirno gredo veljajo iste enačbe, ker pa gre za nizke temperature in zamrznjeno tirno gredo pa moramo upoštevati še odpor trenja med tirnico in pragovi, ki se aktivira v primeru, ko je  $r^* > r$ . Pri tem se aktivira odpor med tirnico in pragovi, kar pomeni, da moramo premagati razliko obeh odporov (Zgonc, 2012):

$$\Delta r = r^* - r \quad (14)$$

Za izračun temperaturne spremembe uporabimo enačbo:

$$\Delta t_{\Delta r} = \frac{\Delta r l}{2 \cdot 241 \cdot S} \quad (15)$$

Dilatacija, ki se pri tem odpre je:

$$\Delta l_{\Delta r} = \frac{\Delta r l^2}{4ES} \quad (16)$$

Napetosti se ob tem povečajo za:

$$\sigma_{\Delta r} = \frac{r l}{2S} \quad (17)$$

### 3.1.3 Nепrekinjeno zavarjeni tir

Najsodobnejša konstrukcija zgornjega ustroja proge je neprekinjeno zavarjeni tir. Pri tem se izognemo tirnim stikom, ki so šibka mesta v tiru. Nепrekinjeno zavarjeni tir je sestavljen iz enega srednjega

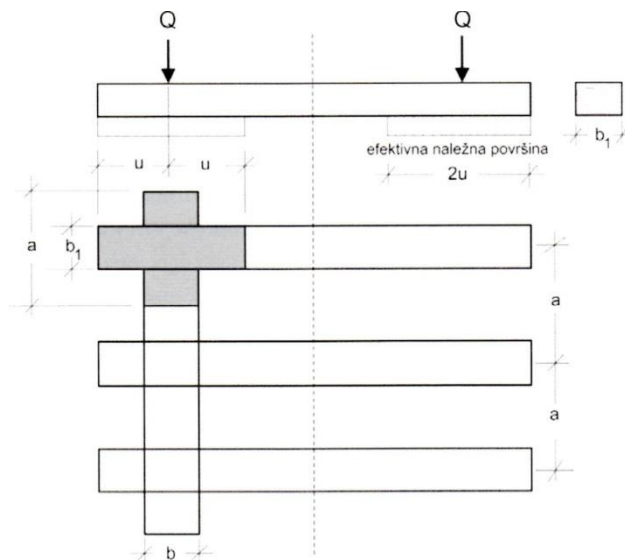
mirujočega dela in dveh krajnih kratkih gibajočih se delov dolžine od 50 do 80 m. Napetosti in vzdolžne sile zaradi temperaturnih sprememb so pri takih tirih zelo velike, zato moramo posebno pozornost posvetiti že v sami izgradnji. Neprekinjeno zavarjene tire lahko izvedemo samo na progah s stabilnim zemeljskim trupom. Tirnice naročamo v čim večji dolžini (maksimalna je 120 m) in jih potem z alumotermijskem postopkom zavarimo skupaj do maksimalne dolžine 360 m. Varimo lahko pri katerikoli temperaturi, vendar pa ne nižji od 5°C in višji od 40°C. Posameznim odsekom moramo povsem sprostiti napetosti, in sicer to naredimo tako, da na posameznem odseku odvijemo pritrdilni pribor, tirnice dvignemo, položimo na posebne valjčke in jih z udarjanjem z lesenimi kladivi od konca proti sredini popolnoma sprostimo. Po sproščanju lahko tirnice zavarimo v neprekinjeno zavarjeni tir, kar lahko naredimo samo v temperaturnem intervalu od 17,5°C do 25,5°C. Če sproščanje in končno varjenje izvajamo pri nižji temperaturi od predpisane, moramo umetno segreti tirnice v sproščenem stanju, lahko pa jo raztegujemo s posebnimi hidravličnimi tenzorji (Zgonc, 2012).

Neprekinjeno zavarjeni tir je že v uporabi na slovenskem železniškem omrežju, tako pri obnovi kot tudi novogradnji (Zgonc, 2012).

### 3.2 Napetosti zaradi upogiba

Poznamo več različnih metod za izračun upogibnih momentov in posledično upogibnih napetosti v tirnici, vendar pa je teoretično najbolj izpopolnjena in utemeljena metoda, metoda po Zimmermanu, ki se uporablja po večini evropskih držav. Poleg upogibnih momentov in posledično upogibnih napetosti metoda omogoča tudi izračun tlačnih napetosti oziroma pritiska tirnice na prag in posedka tirnice pod prometno obremenitvijo (Zgonc, 2012).

Zimmermannova predpostavka je, da je tirnica vzdolžni nosilec brez teže na elastični podlagi. Ker obstaja elastična podajnost zgornjega ustroja, je upogib tirnice med dvema pragovoma zelo majhen v primerjavi z upogibom celotne tirnice. Zaradi tega lahko prečne pragove nadomestimo z namišljenim vzdolžnim pragom z enako naležno površino kot pri prečnih pragovih. Pri tem upoštevamo samo efektivno naležno površino praga  $2u$ , se pravi da upoštevamo samo površino v neposrednem območju tirnice brez srednjega dela, ki sodeluje pri prenosu obremenitve. To pretvorba je narisana shematično na naslednji sliki (Zgonc, 2012).



Slika 13: Namišljeni vzdolžni prag (Zgonc, 2012: str. 46)

Po naslednji enačbi lahko izračunamo širino namišljenega praga (Zgonc, 2012):

$$b = \frac{2ub_1}{a}, \quad (18)$$

kjer je:

- b      širina namišljenega vzdolžnega praga [cm]
- u      razdalja med osjo tirnice in koncem praga [cm]
- b<sub>1</sub>    širina prečnega praga [cm]
- a      razmik pragov [cm]

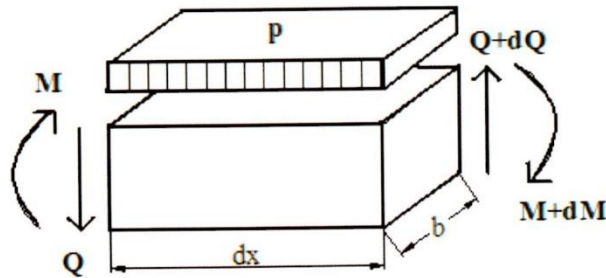
Zimmermann uvede v svoj izračun tudi koeficient podajnosti tira C, ki nam pove, kolikšna mora biti sila na cm<sup>2</sup> površine praga, da se bo prag posedel za 1 cm. Pritisk grede na vzdolžni prag p [N/cm<sup>2</sup>] je premo sorazmeren posedku praga y [cm], kar lahko vidimo v naslednji enačbi (Zgonc, 2012):

$$p = Cy \quad (19)$$

Koeficient podajnosti tira C ima vrednost med 20 in 600 N/cm<sup>3</sup>. Odvisen je od podlage in vremenskih vplivov. Pri izračunu največkrat uporabljamo vrednost C = 100 N/cm<sup>3</sup>, kar pomeni dobro podlago tira (Zgonc, 2012).

### 3.2.1 Izračun posedka, upogibnega momenta in pritiska

Prečna sila  $Q$  in upogibni moment  $M$  sta v opazovanem prerezu vzdolžnega nosilca na elastični podlagi v ravnotežju z delovanjem zunanjih sil v obliki zvezno razporejene obremenitve  $p$ . Na tej predpostavki temelji izračun (Zgonc, 2012).



Slika 14: Sile in momenti v prečnem prerezu tirnice (Zgonc, 2011: str. 5)

Ob upoštevanju ravnotežnega pogoja in ob upoštevanju diferencialne enačbe ukrivljenosti upogibne črte, uvedbe novih spremenljivk in matematični obdelavi, dobimo enačbo za upogib tirnice oziroma posedek praga zaradi posamezne kolesne sile  $Q$  (Zgonc, 2012):

$$y = \frac{Q}{2bCL} \eta, \quad (20)$$

kjer je:

$\eta$  ordinata vplivnice za upogib tirnice pod silo  $Q$

$$\eta = \frac{\sin \xi + \cos \xi}{e^\xi} \quad (21)$$

$\xi$  razdalja  $x/L$  [cm]

$x$  oddaljenost prijemašča sile [cm]

$Q$  kolesna sila [N]

$b$  širina namišljenega vzdolžnega praga [cm]

$C$  koeficient podajnosti tira [ $N/cm^3$ ]

$L$  konstanta zgornjega ustroja [cm]

$y$  posedek [cm].

Lahko dobimo tudi enačbo za upogibni moment zaradi posamične sile Q in sicer iz enačbe za ukrivljenost upogibne črte (Zgonc, 2012).

$$M = \frac{QL}{4} \mu, \quad (22)$$

kjer je:

$\mu$  ordinata vplivnice momenta pod silo Q

$$\mu = -\frac{-\sin\xi - \cos\xi}{e^\xi} \quad (23)$$

Pritisk posamezne sile Q lahko izračunamo tako, da enačbo za upogib (19) pomnožimo s koeficientom podajnosti tira C (Zgonc, 2012):

$$p = \frac{Q}{2bL} \eta \quad (24)$$

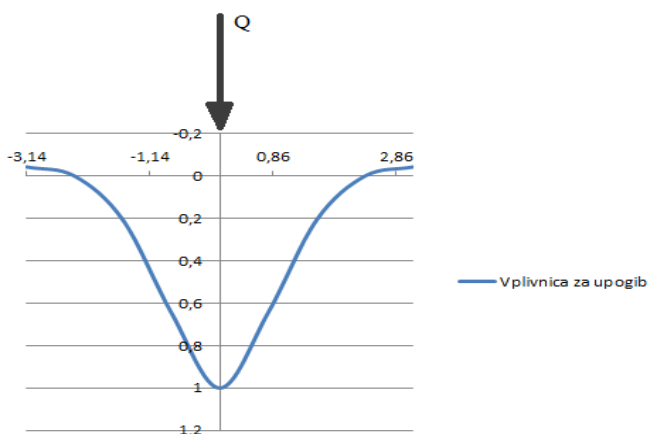
Konstanto zgornjega ustroja izračunamo po naslednji enačbi (Zgonc, 2012):

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}} \quad (25)$$

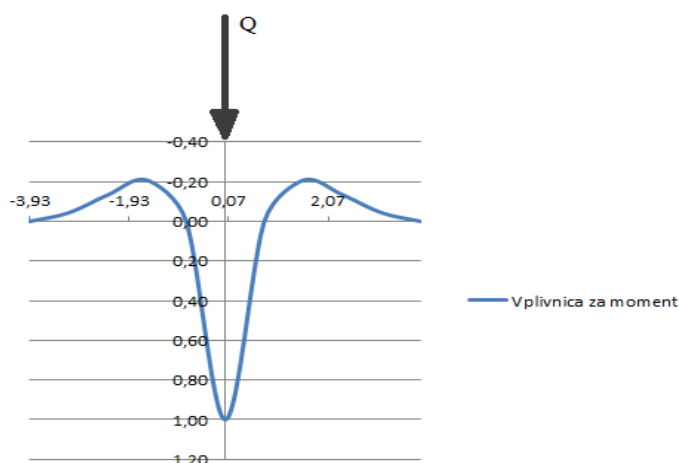
Enačbe (20), (22) in (24) se nanašajo na posamezne kolesne sile Q v točkah, ki so oddaljene za x od opazovanega prereza (Zgonc, 2012):

$$x = L\xi \quad (26)$$

Vrednosti vplivnic  $\eta$  in  $\mu$  so prikazane na naslednjih slikah (Zgonc, 2012).



Grafikon 1: Vplivnica za upogib



Grafikon 2: Vplivnica za moment

Maksimalne vrednosti posedka, upogibnega momenta in pritiska dobimo, kadar je prijemališče posamezne sile v opazovanem prerezu ( $\xi = 0, x = 0, \eta = 1, \mu = 1$ ). Vrednosti izračunamo s pomočjo naslednjih enačb (Zgonc, 2012):

$$y_{max} = \frac{Q}{2bCL} \quad (27)$$

$$M_{max} = \frac{QL}{4} \quad (28)$$

$$p_{max} = \frac{Q}{2bL} \quad (29)$$

Lahko se nam zgodi, da v vplivnem območju opazovanega prereza na nosilec deluje več sil. V tem primeru se vrednosti posedka, upogibnega momenta in pritiska povečujejo oziroma zmanjšujejo, odvisno od tega ali se nahajajo v pozitivnem ali negativnem območju vplivnice (Zgonc, 2012).

Moment v opazovanem prerezu se pri standardnih razdaljah osi železniških vozil praviloma zmanjša v primerjavi z momentom od posamične sile, upogib pa se pri skupini sil praviloma poveča. Ker privzamemo predpostavko, da so vse kolesne sile  $Q$  enake, oziroma se zelo malo razlikujejo, dobimo naslednje enačbe za izračun posedka, upogibnega momenta in pritiska pri skupini sil (Zgonc, 2012):

$$y = \frac{\sum Q\eta}{2bCL} \quad (30)$$

$$M = \frac{L}{4} \sum Q\mu \quad (31)$$

$$p = \frac{\sum Q\eta}{2bL} \quad (32)$$



### 3.2.2 Izračun upogibnih napetosti pri dinamični prometni obremenitvi

S predhodnimi enačbami dobimo statične vrednosti posedka, upogibnega momenta in pritiska. To pomeni, da imamo vrednosti za mirujoče vozilo. Če želimo ugotoviti vpliv dinamičnih sil, moramo statične vrednosti pomnožiti z dinamičnim koeficientom  $\alpha$  (Zgonc, 2012).

Za izračun dinamičnega koeficienta se danes uporablja v večini evropskih železnic Eisenmannova enačba, ki poleg hitrosti upošteva še kakovost tira in statistično verjetnost zajetja dinamičnih vplivov. Izračun temelji na predpostavki, da so napetosti v tirnici normalno statistično porazdeljene. Eisenmann je ugotovil, da so srednje vrednosti upogibnih napetosti in upogiba v nogi tirnice do hitrosti 200 km/h praktično konstantne, se pravi neodvisne od hitrosti (Zgonc, 2012).

Dinamični koeficient po Eisenmannu izračunamo po naslednjih enačbah:

$$\alpha = 1 + t\sigma \quad \text{za } V < 60 \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad (33)$$

$$\alpha = 1 + t\sigma \left(1 + \frac{V-60}{140}\right) \quad \text{za } 60 \frac{\text{km}}{\text{h}} \leq V \leq 200 \frac{\text{km}}{\text{h}}, \quad (34)$$

kjer je:

- $\alpha$      dinamični koeficient;
- $t$      faktor statistične verjetnosti;
- $\sigma$      standardna deviacija.

Faktor statistične verjetnosti upoštevamo z enokratnikom, dvakratnikom ali trikratnikom standardne deviacije (Zgonc, 2012):

- $t = 1$      ustreza 68% verjetnosti zajetja vseh rezultatov razsipanja okrog srednje vrednosti;
- $t = 2$      ustreza 95,5% verjetnosti zajetja vseh rezultatov razsipanja okrog srednje vrednosti;
- $t = 3$      ustreza 99,7% verjetnosti zajetja vseh rezultatov razsipanja okrog srednje vrednosti.

Za izračun upogibnih napetosti v tirnici navadno upoštevamo trikratnik, za izračun napetosti v tirnični glavi pa enokratnik standardne deviacije (Zgonc, 2012).

S standardno deviacijo lahko zajamemo stanje zgornjega ustroja, katerega vrednosti so podane v nadaljevanju (Zgonc, 2012):

$\sigma = 0,1$  za zelo dobro stanje zgornjega ustroja,

$\sigma = 0,2$  za dobro stanje zgornjega ustroja,

$\sigma = 0,3$  za slabo stanje zgornjega ustroja.

Napetost v tirnici izračunamo tako, da upogibni moment izračunan po Zimmermannovi metodi pomnožimo z dinamičnim koeficientom in delimo z odpornostnim momentom  $W$  tirnice (Zgonc, 2012):

$$\sigma = \frac{M_{max} \alpha}{W} \quad (35)$$

## 4 PRAKTIČNI DEL

### 4.1 Napetosti zaradi temperaturnih sprememb

#### 4.1.1 Breztrenjsko položena tirnica

V nadaljevanju bom prikazala kako različne oblike standardnih tirnic vplivajo na napetosti v breztrenjsko položeni tirnici. Za izračun si izberem tirnico standardne oblike 60 E1. Maksimalna dilatacija je konstrukcijsko pogojena in znaša maksimalno 20 mm. Temperaturni razpon, ki v našem geografskem območju v tirnici lahko nastopi je od -30°C do 65°C. Za kratko tirnico si izberem dolžino 15 m, za dolgo tirnico pa 45 m. Tirnico polagamo pri srednji temperaturi 17,5°C, s srednjo dilatacijo 10 mm.

##### 4.1.1.1 Kratka tirnica

Za kratko breztrenjsko položeno tirnico dolžine 10m velja, da je brez napetosti. Za izračun, koliko je lahko dolga breztrenjsko položena tirnica, da ni napetosti v tirnici, uporabim enačbo (1):

$$l = \frac{\Delta l}{\alpha \Delta t} = \frac{20 * 10^{-3}}{1,15 * 10^{-5} * 95} = 18,31 \text{ m}$$

##### 4.1.1.2 Dolga tirnica

Do napetosti v tirnici pride pri dolgih breztrenjsko položenih tirnicah. Temperaturni razpon, v katerem ne pride do napetosti, izračunamo po enačbi (1):

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{\alpha l} = \frac{20 * 10^{-3}}{1,15 * 10^{-5} * 45} = 38,65^{\circ} \text{ C}$$

Iz tega podatka lahko izračunamo, na katerem temperaturnem intervalu pride do napetosti v tirnici, in sicer od -1,83°C (17,5 - 38,65/2 = -1,83° C) do 36,83°C (17,5 + 38,65/2 = 36,83°C). Območje, v katerem bo tirnica v napetosti, je od -30° C pa do -1,83° C, in od 36,83° C do 65° C. Napetosti, ki pri tem nastopijo, izračunamo po enačbi (3).

$$\sigma = 241\Delta t = 241 * 28,17 = 6.789,00 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$$

Pri prečnem prerezu tirnice 60 E1,  $S = 76,86 \text{ cm}^2$  bo pri najvišji in najnižji temperaturi nastala v tirnici osna sila:

$$F = \sigma * S = 6.789 * 76,86 = 520.716,30 \text{ N}$$

Maksimalna osna sila je 225 000 N, kjer vidimo, da bi prišlo do prevelike osne sile v tirnici, zato bi bila taka breztrejnjsko položena tirnica nedopustna. V praksi pride do odpora proti krčenju in raztezanju zaradi trenja med pragovi in tirno gredo ter na spojki na tirnem stiku.

#### 4.1.1.3 Dolga tirnica, različne oblike tirnic

V nadaljevanju podajam rezultate izračunov za različne standardne oblike tirnic. V izračunih so upoštevani vhodni podatki, ki so enaki kot pri izračunu za kratko in dolgo tirnico.

Preglednica 3: Izračun osne sile v tirnici za različne oblike tirnic

Oblika tirnice	Prerez [cm <sup>2</sup> ]	Napetost v tirnici [N/cm <sup>2</sup> ]	Osna sila [N]
60 E1	76,70	6789,00	520716,30
54 E2	68,56		465453,84
49 E1	62,92		427163,88

Iz tabele je razvidno, da vse standardne oblike tirnic presegajo maksimalno osno silo 225 000 N, zato se takšne tirnice danes opuščajo in se izdelujejo neprekinjeno zavarjene tirnice. Pri breztrejnjsko položenih tirnicah so napetosti sicer obvladovali, vendar pa je velik problem nastajal pri stikih, ki predstavljajo šibko mesto tirnice.

#### 4.1.2 Trenjsko položena tirnica

V nadaljevanju bom prikazala, kakšne napetosti v odvisnosti od temperaturnih sprememb dosežemo pri trenjsko položenih tirnicah standardne oblike 60 E1 dolžine 45 m. Tirnica je položena pri temperaturi polaganja  $t_p=12^\circ \text{ C}$  z dilatacijo  $\Delta l_p = 10 \text{ mm}$ . Pri tem je odpor v spojki  $R = 100 \text{ kN}$ , odpor med pragovi in tirno gredo  $r = 90 \text{ N/cm}$  ter odpor med pragovi in tirnico  $r^*=150 \text{ N/cm}$ .

##### 4.1.2.1 Trenjsko položena tirnica standardne oblike 60 E1

Iz enačbe (5) izračunam spremembo temperature, ki pri tem nastanejo v tirnici, in pri kateri bo premagan odpor na spojki ter napetosti, s pomočjo enačbe (4):

$$\Delta t_R = \frac{R}{2415} = \frac{100.000}{241*76,86} = 5,40^\circ \text{ C}$$

$$\sigma_R = \frac{R}{S} = \frac{100.000}{76,86} = 1.301 \frac{N}{cm^2}$$

Iz enačb (6) in (7) izračunam še spremembo temperature in napetost, ko bo premagan odpor med pragovi in tirno gredo:

$$\Delta t_r = \frac{rl}{2 \cdot 241S} = \frac{90 \cdot 4500}{2 \cdot 241 \cdot 76,86} = 10,93^\circ C$$

$$\sigma_r = \frac{rl}{2S} = \frac{90 \cdot 4500}{2 \cdot 76,86} = 2.635 \frac{N}{cm^2}$$

S povečanjem temperature za  $\Delta t_R + \Delta t_r = 5,40 + 10,93 = 16,33^\circ C$  so se v tirnici aktivirali vsi odpori. Zanima me še, za koliko se je spremenila dilatacija, kar pa izračunam s pomočjo enačbe (13):

$$\Delta l_r = \frac{rl^2}{4ES} = \frac{90 \cdot 4500^2}{4 \cdot 2,1 \cdot 10^7 \cdot 76,86} = 0,28 \text{ cm} = 2,8 \text{ mm}$$

Preostanek dilatacije lahko izračunam kot razliko med dilatacijo pri vgraditvi tirnice in porabljeno dilatacijo:

$$\Delta l_p - \Delta l_r = 10 - 2,8 = 7,2 \text{ mm}$$

To potrebujem za izračun temperaturne razlike med točko, pri kateri je premagan odpor v spojki in odpor med pragovi ter tirno gredo, in točko, pri kateri se dilatacija v celoti zapre. To izračunam s pomočjo enačbe (1), saj se od premagovanja odpora tirnica obnaša kot breztrejnjsko položena.

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{\alpha l} = \frac{7,2 \cdot 10^{-3}}{1,15 \cdot 10^{-5} \cdot 45} = 13,91^\circ C$$

Iz tega sledi, da se dilatacija popolnoma zapre pri naslednji temperaturi:

$$t_z = t_p + \Delta t_R + \Delta t_r + \Delta t = 12,00 + 5,40 + 10,93 + 13,91 = 42,24^\circ C$$

Pri naraščanju temperature do  $65^\circ C$  narašča napetost v tirnici. Napetost lahko izračunamo po enačbi (2):

$$\sigma_{t,max} = \alpha E \Delta t = 241 \cdot \Delta t = 241 \cdot (65,00 - 42,24) = 5.485 \text{ N/cm}^2$$

Odpor na spojki in odpor med tirnico in gredo je premagan pri temperaturi:

$$t_p - \Delta t_r - \Delta t_R = 12,00 - 5,40 - 10,93 = -4,33^\circ C$$

Ker gre za nizke temperature in zamrznjeno tirno gredo, moram upoštevati tudi odpor trenja med tirnico in pragovi, kar pomeni, da moram premagati razliko obeh odporov iz enačbe (14):

$$\Delta r = r \cdot -r = 150 - 90 = 60 \text{ kN/cm}$$

Za izračun temperaturne spremembe uporabim enačbo (15):

$$\Delta t_{\Delta r} = \frac{\Delta r l}{2 \cdot 241 \cdot S} = \frac{60 \cdot 4500}{2 \cdot 241 \cdot 76,86} = 7,29^\circ C$$

Dilatacijo, ki se pri tem odpre izračunam po enačbi (16):

$$\Delta l_{\Delta r} = \frac{\Delta r l^2}{4ES} = \frac{60 \cdot 4500^2}{4 \cdot 2,1 \cdot 10^7 \cdot 76,86} = 0,19 \text{ cm} = 1,9 \text{ mm}$$

Napetosti, izračunane po enačbi (17), se ob tem povečajo za:

$$\sigma_{\Delta r} = \frac{\Delta r l}{2S} = \frac{60 \cdot 4500}{2 \cdot 76,86} = 1.756 \frac{N}{\text{cm}^2}$$

Vsi odpori so premagani pri temperaturi:

$$t_0 = t_p - \Delta t_R - \Delta t_r - \Delta t_{\Delta r} = 12,00 - 5,40 - 10,93 - 7,29 = -11,62^\circ \text{C}$$

Dilatacija, ki se pri tem odpre znaša:

$$\Delta l = l_p + \Delta l_r + \Delta l_{\Delta r} = 10 + 2,8 + 1,9 = 14,7 \text{ mm}$$

Do najnižje temperature se dilatacija odpre še za:

$$\Delta l_k = \Delta l - l_p = 14,7 - 10 = 4,7 \text{ mm}$$

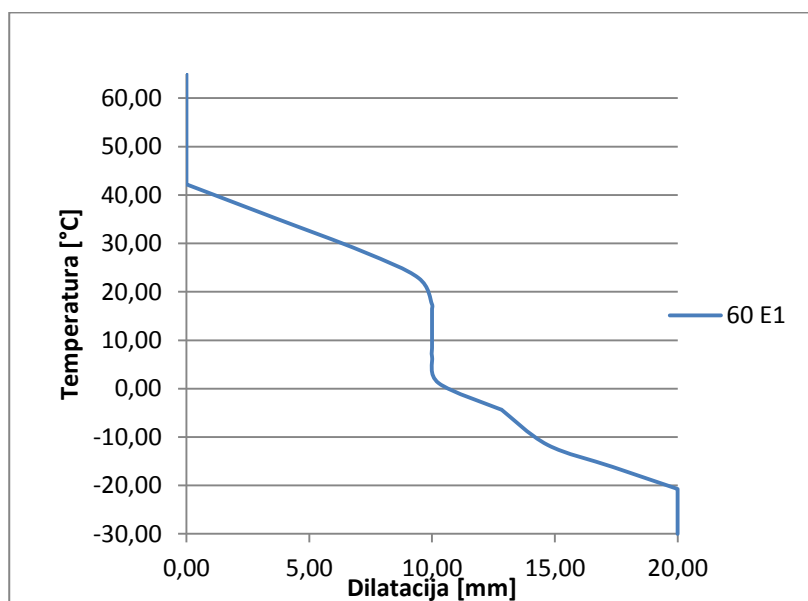
Da se dilatacija popolnoma odpre mora temperatura pasti še za:

$$\Delta t = \frac{\Delta l_k}{\alpha l} = \frac{4,7 \cdot 10^{-3}}{1,15 \cdot 10^{-5} \cdot 45} = 9,08^\circ \text{C}$$

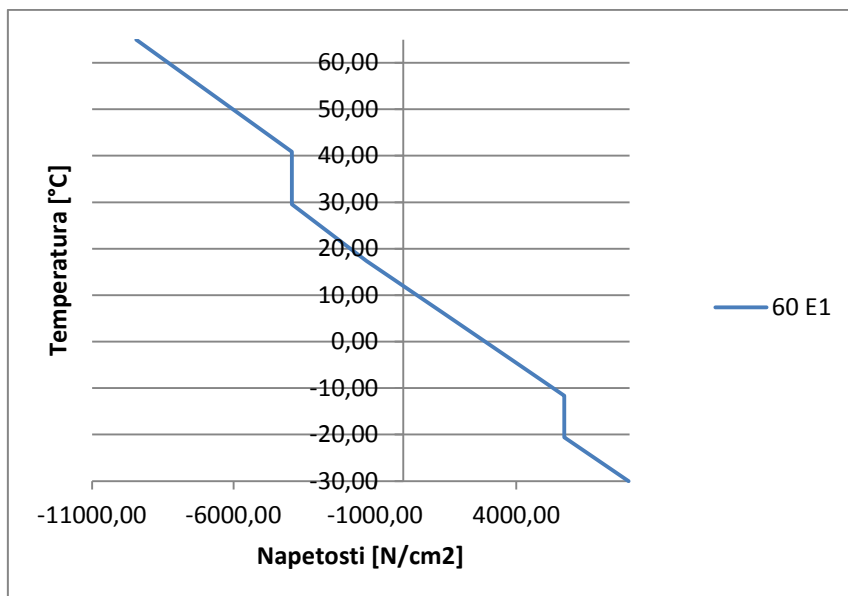
Napetosti se pri tem še ne povečajo, saj dilatacija ni popolnoma odprta. Dilatacija se popolnoma odpre pri temperaturi:

$$t_0 = -11,62 - 9,08 = -20,70^\circ \text{C}$$

Na naslednjih grafikonih je grafično prikazan potek napetosti v odvisnosti od sprememb temperature.



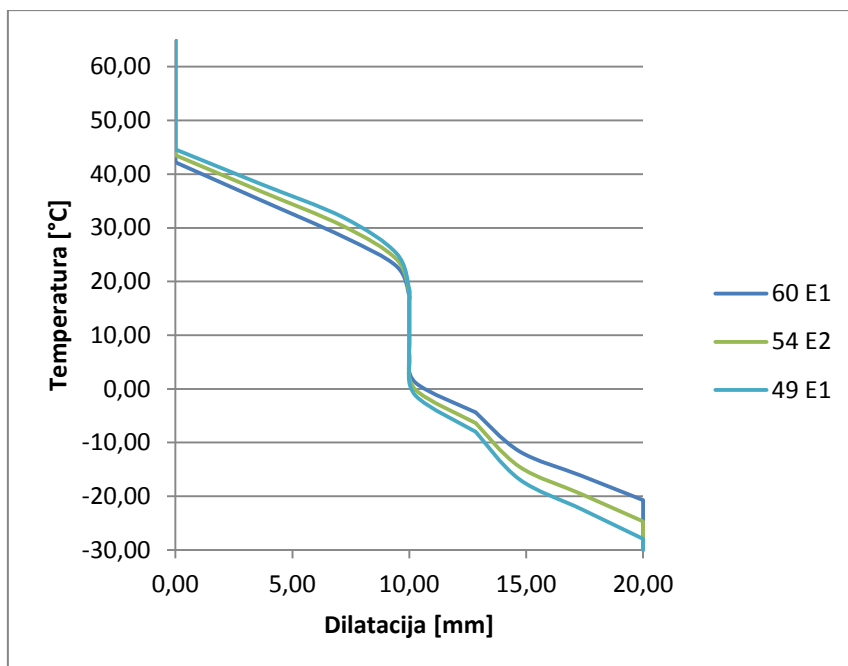
Grafikon 3: Dilatacije v odvisnosti od sprememb temperature za tirnico oblike 60 E1



Grafikon 4: Napetosti v odvisnosti od sprememb temperature za tirnico oblike 60 E1

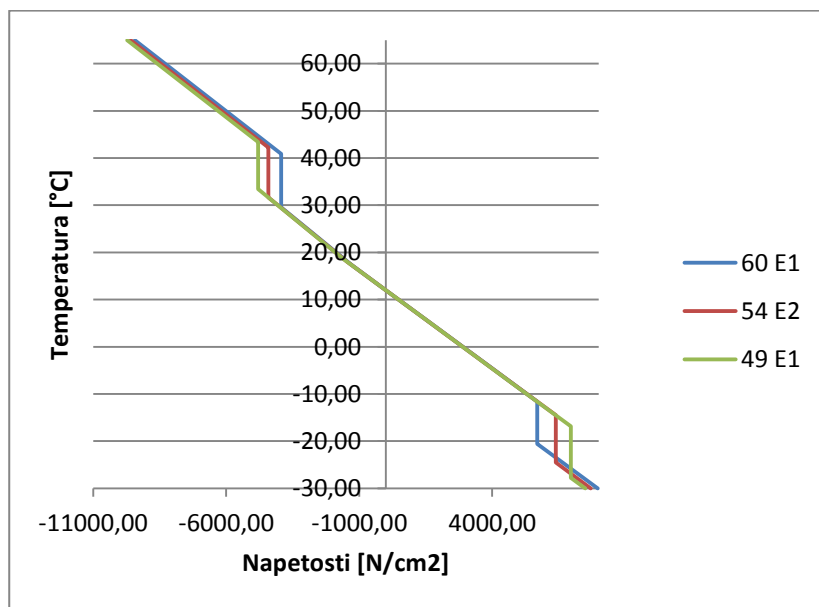
#### 4.1.2.2 Primerjava trenjsko položenih tirnic različnih standardnih oblik 60 E1, 54 E2 in 49 E1

Za primerjavo ponovim izračun še za tirnici oblike 54 E2 in 49 E1, za kateri uporabim enake izhodiščne podatke. Za boljše primerjavo so rezultati prikazani v grafu:



Grafikon 5: Dilatacije v odvisnosti od sprememb temperature za različne tirnice

Iz grafikona 5 vidim, da obstajajo različne spremembe dilatacije pri različnih temperaturah za različne standardne oblike tirnic. Vidim, da se tirnica oblike 60 E1 začne krčiti pri najnižji temperaturi, kar vidimo po dolžini navpične črte pri dilataciji 0 mm, in se najhitreje krči, medtem ko se tirnica oblike 49 E1 začne krčiti pri višji temperaturi glede na tirnico 60 E1, in se krči najpočasneje. Tirnica 54 E2 pa je nekje v sredini med tirnico 60 E1 in 49 E1.



Grafikon 6: Napetosti v odvisnosti od sprememb temperature za različne tirnice

Iz grafikona 6 vidim, da pride do največje napetosti v tirnici oblike 60 E1 in najmanjše pri tirnici oblike 49 E1. Iz grafikona 6 vidimo, da napetosti na začetku in koncu naraščajo linearno. To je zaradi tega, ker je dilatacija popolnoma odprta ali zaprta, tirnica pa se zaradi temperaturnih sprememb še vedno krči ali razteza. Ker se zaradi dilatacije ne more prosto raztezati ali krčiti, pride do napetosti v tirnici. Potem sledi območje, kjer so napetosti na določenem temperaturnem intervalu enake, in sicer na temperaturnem razmiku med točko, kjer je premagan odpor na spojki, odpor med pragovi in tirno gredo in odpor med pragovi in tirnico, ter točki, pri kateri se dilatacija v celoti zapre ali odpre. Potem pa sledi ponovno linearni del, ki prikazuje spremembo napetosti v odvisnosti od temperature pri premagovanju odpora v spojki, odpora med pragovi in tirno gredo ter odpora med pragovi in tirnico. V tem delu lahko vidimo, da so majhna odstopanja napetosti v odvisnosti od temperature za različne oblike tirnic.



## 4.2 Napetosti zaradi upogiba

Za izračun sil in napetosti v zgornjem ustroju si izberem lokomotivo SŽ 541, katera ima medosno razdaljo kolesnih dvojic v podstavnem vozičku 3.000 mm, največjo hitrost 200 km/h in osno maso 21,75 t in je dvoosno tirno vozilo ([http://www.miniaturna-zeleznica.com/SZ\\_vlaki/SZ541.php](http://www.miniaturna-zeleznica.com/SZ_vlaki/SZ541.php)).



Slika 15: Lokomotiva SŽ 541 (<http://www.miniaturna-zeleznica.com/galerije/Ziva/1del/index.php>, pridobljeno: 11.8.2015)

Izberem si razmik med pragovi  $a = 63$  cm, širino pragov 26,5 cm ter naležno površino pragov  $2ub_1 = 2385$  cm<sup>2</sup>. Lokomotiva dosega hitrosti 200 km/h, vendar bom za izračun uporabila hitrost 160 km/h.

Pri izračunu bom primerjala različne tirnice in različno stanje zgornjega ustroja.

### 4.2.1 Tirnica 60 E1 pri dobri podlagi

Najprej izračunam napetosti zaradi upogiba za tirnico 60 E1 ( $W = 333,60$  cm<sup>3</sup>,  $I = 3038$  cm<sup>4</sup>) pri dobri podlagi, ki je podana s podajnostnim koeficientom tira,  $C = 100$  N/cm<sup>3</sup>.

Potem po enačbi (18) izračunam širino namišljenega vzdolžnega nosilca:

$$b = \frac{2ub_1}{a} = \frac{2385}{63} = 38 \text{ cm}$$

Ter po enačbi (25) izračunam še konstanto zgornjega ustroja:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 2,1 \cdot 10^7 \cdot 3038}{38 \cdot 100}} = 90,61 \text{ cm}$$

Sedaj lahko izračunam iz enačbe (26)  $\xi$ :

$$\xi = \frac{x}{L} = \frac{300}{90,5} = 3,3$$

Za izračunani  $\xi$  lahko iz tabele odčitamo vrednosti vplivnic  $\eta$  in  $\mu$ .

$$\eta = -0,0421 \text{ in } \mu = -0,0298$$

Ker je dvoosno tirno vozilo, z obtežbo  $Q = 108,75$  kN, moramo uporabiti enačbe (30), (31), za izračun posedka in momenta.

$$y = \frac{\Sigma Q \eta}{2bCL} = \frac{1}{2 \cdot 38 \cdot 100 \cdot 90,5} * (108,75 * 1 + 108,75 * (-0,0422)) = 0,15 \text{ cm}$$

$$M = \frac{L}{4} \Sigma Q \mu = \frac{90,5}{4} (100 * 1 + 100 * (-0,0306)) = 23,90 \text{ kNm} = 2.390.000 \text{ Ncm}$$

Za izračun napetosti moramo upoštevati enačbo (34), ker je hitrost 160 km/h.

$$\alpha = 1 + t\sigma \left(1 + \frac{V-60}{140}\right) = 1 + 3 * 0,2 * \left(1 + \frac{160-60}{140}\right) = 2,03$$

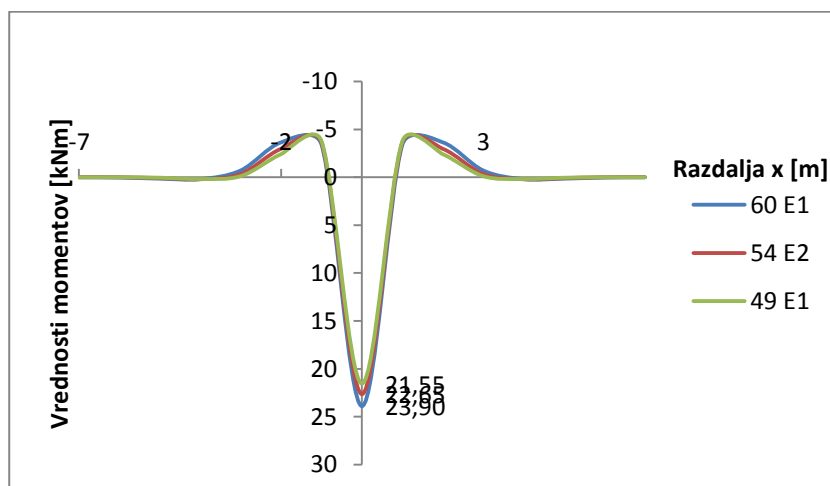
Za faktor statistične vrednosti sem izbrala 3, saj sem tako na varni strani, za  $\sigma$  pa sem vzela vrednost 0,2 saj je dobro stanje zgornjega ustroja.

Dinamični koeficient 2,0 pomeni, da so dejanski rezultati zaradi razsipanja pri 99,7% verjetnosti lahko tudi do 100% večji od izračunane srednje vrednosti.

Sedaj lahko izračunamo upogibno napetost po enačbi (35):

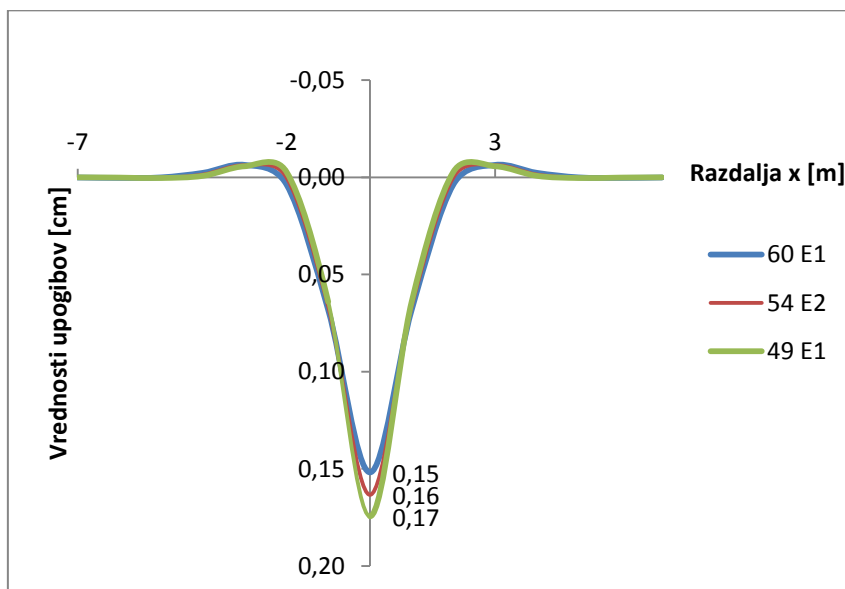
$$\sigma = \frac{M_{max} \alpha}{W} = \frac{2.390.000 * 2,0}{333,6} = 14.533 \frac{N}{cm^2} = 14,53 \frac{kN}{cm^2}$$

#### 4.2.2 Primerjava različnih standardnih oblik tirnic pri dobri podlagi



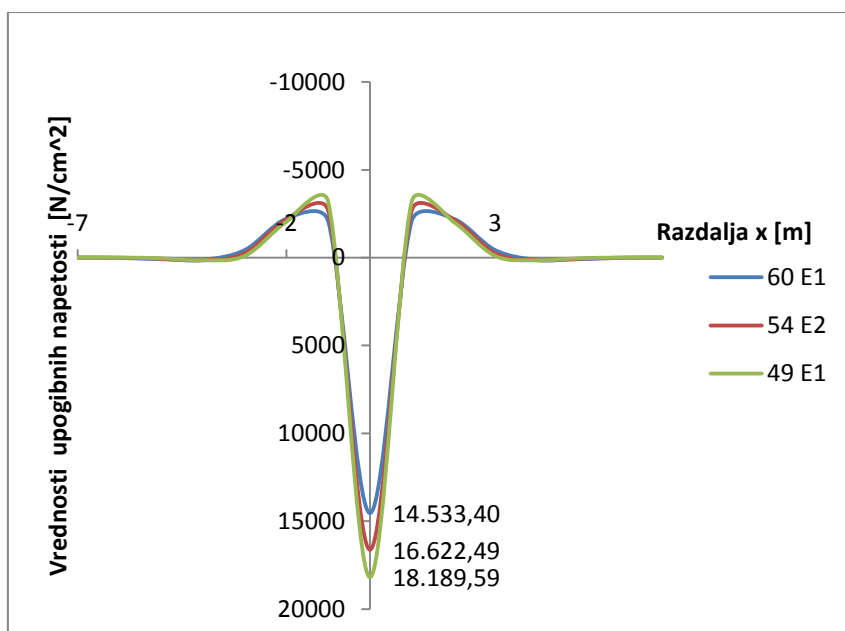
Grafikon 7: Vrednosti momentov za različne tirnice

Iz grafikona 7 vidimo, da so največje vrednosti momentov pri obliki tirnice 60 E1 in najmanjše pri obliki tirnice 49 E1. Razlika med obliko tirnice 60 E1 in 49 E1 je 10%, med tirnicama 60 E1 in 54 E2 pa 6%.



Grafikon 8: Vrednosti upogibov za različne tirnice

Iz grafikona 8 vidimo, da so največji upogibi pri tirnici 49 E1 in najmanjši pri tirnici 60 E1.

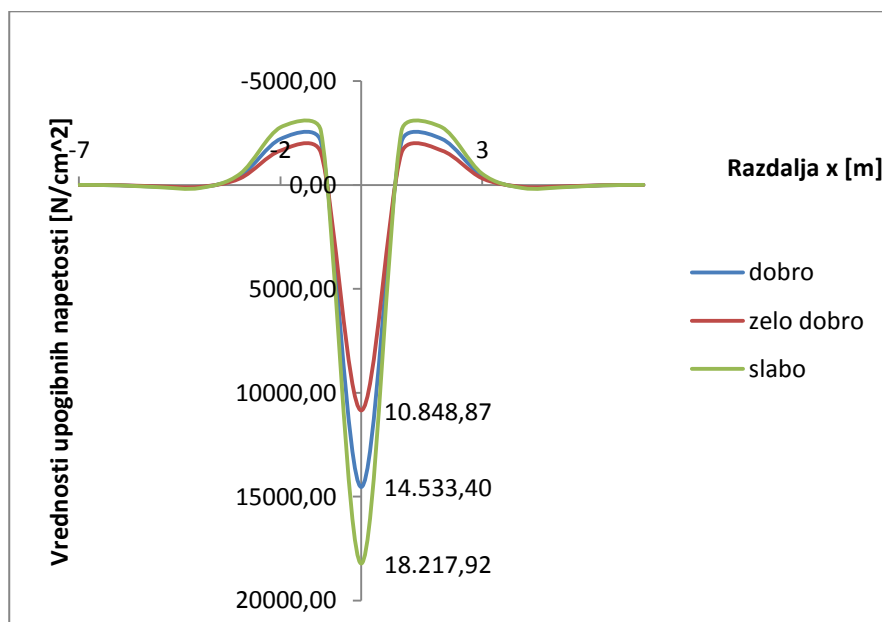


Grafikon 9: Vrednosti upogibnih napetosti za različne tirnice

Iz grafikona 9 vidimo, da oblika tirnice vpliva tudi na upogibne napetosti. Večje napetosti so pri tirnici 49 E1, in sicer za 25% večje od napetosti v tirnici 60 E1. Razlika med tirnico 54 E2 in tirnico 60 E1 pa je 14%.

#### 4.2.3 Standardna oblika tirnice 60 E1 in različna stanja zgornjega ustroja

Z enakimi izhodiščnimi podatki primerjam še napetosti za različna stanja zgornjega ustroja. Uporabim tirnico 60 E1, pri kateri spreminjam stanje zgornjega ustroja, in sicer na zelo dobro stanje zgornjega ustroja, dobro stanje zgornjega ustroja in slabo stanje zgornjega ustroja.



Grafikon 10: Vrednosti upogibnih napetosti za različna stanja zgornjega ustroja

Iz grafikona 10 lahko vidimo, da je razlika med slabim in zelo dobrim zgornjim ustrojem kar velika. Razlika med dobrim in zelo dobrim je 25 % , med slabim in zelo dobrim pa kar 40 %. Tako vidimo, da ima kvaliteta zgornjega ustroja zelo velik pomen.

## 5 ZAKLJUČEK

Namen diplomske naloge je bil izračun napetosti v tirnici za različne oblike standardnih tirnic in različna stanja zgornjega ustroja. Zato je v zadnjem delu diplomske naloge izračun napetosti v tirnici zaradi temperaturnih sprememb in upogiba.

Za izhodiščne podatke pri izračunu napetosti zaradi temperaturnih sprememb pri breztrejsko položenih tirnicah sem upoštevala tirnice različnih oblik, z maksimalno dilatacijo 20 mm, temperaturnim razponom od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $65^{\circ}\text{C}$ , temperaturo polaganja  $17,5^{\circ}\text{C}$  in srednjo dilatacijo 10 mm.

Pri kratkih tirnicah in tirnicah do dolžine 18,31 m ni napetosti v tirnicah, če so položene pri srednji temperaturi in srednji dilataciji. Pri daljših tirnicah pa pride do napetosti. Pri breztrejsko položeni tirnici dolžine 45 m je napetost v tirnici  $6.789 \text{ N/cm}^2$ . Ta vrednost se ne spremeni tudi pri tirnicah drugačne oblike. Spremeni pa se osna sila v tirnici, ki za tirnico 60 E1 znaša  $520.716,30 \text{ N}$ . Za tirnico 49 E1 je ta vrednost za 18% manjša, vendar še vedno presega maksimalno osno obremenitev.

Izračunala sem tudi napetosti v tirnici pri trenjsko položenih tirnicah z izhodiščnimi podatki za različne oblike tirnic dolžine 45 m, ki so položene pri temperaturi polaganja  $12^{\circ}\text{C}$  in z dilatacijo 10 mm. Upoštevala sem odpor v spojki 100 kN, odpor med pragovi in tirno gredo  $90 \text{ N/cm}$  ter odpor med pragovi in tirnico  $150 \text{ N/cm}$ .

Iz rezultatov je razvidno, da največje napetosti dosegamo pri tirnici oblike 60 E1 in najmanjše pri tirnici oblike 49 E1.

Pri diplomski nalogi sem izračunala tudi napetosti zaradi upogiba, za katerega sem uporabila podatke za lokomotivo SŽ 541 z medosno razdaljo 3000 mm, največjo hitrostjo 160 km/h in osno maso 21,75 t. Izbrala sem si tudi razmik med pragovi 63 mm, širino pragov 26,5 cm ter naležno površino pragov  $2ub_1=2385 \text{ cm}^2$ . Primerjala sem različne oblike tirnic in različna stanja zgornjega ustroja.

Pri primerjavi različnih oblik tirnic ugotovim, da je vrednost upogibne napetosti tirnice 49 E1 kar 25 % večja od vrednosti upogibne napetosti 60 E1. Ko pa sem primerjala vrednosti še za različna stanja zgornjega ustroja, pa je sprememba še veliko večja, in sicer kar 40 %.

Iz teh izračunov lahko vidimo, da ima zelo velik pomen izbira tirnice in stanje zgornjega ustroja proge na železniško progo. Zato moramo tirnice redno pregledovati, vzdrževati in redno kontrolirati zgornji ustroj proge, da ni prevelikih obrab ali kakšnih drugih poškodb, da omogočimo najbolj optimalno delovanje železniške proge.

## VIRI

Bajželj, A. 2011. Elementi železniške proge ter izračun sil in napetosti v zgornjem ustroju. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Bajželj): 74 str.

Lichtberger, B. 2005. Track Compendium. Formation, Pemanent Way, Maintenance, Economics. Bobingen, Kessler: 634 str.

Sukič, S. 2013. Sile in napetosti v zgornjem in spodnjem ustroju železniških prog. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Sukič): 76 str.

Tehnični podatki lokomotive SŽ 541. 2015.

[http://www.miniaturna-zeleznica.com/SZ\\_vlaki/SZ541.php](http://www.miniaturna-zeleznica.com/SZ_vlaki/SZ541.php) (Pridobljeno 11. 8. 2015.)

Tomičić – Torlaković, M., Ranković, S. 1996. Gornji stroj železnica. S. n., Beograd: 276 str.

Zgonc, B. 2011. Sile in napetosti v zgornjem ustroju: f. 24.

Zgonc, B. 1996. Železnice I. Projektiranje, gradnja in vzdrževanje prog. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 225 str.

Zgonc, B. 2003. Železniški promet. Portorož, Fakulteta za pomorstvo in promet: 216 str.

Zgonc, B. 2012. Železniška infrastruktura. Portorož, Fakulteta za pomorstvo in promet: 217 str.

## Pravilniki, standardi in tehnične specifikacije

Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog. UL RS št. 92/2010.