

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:

Sukič, S., 2013. Sile in napetosti v zgornjem in spodnjem ustroju železniških prog. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Zgonc, B., somentorica Šemrov, D.): 76 str.

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:

Sukič, S., 2013. Sile in napetosti v zgornjem in spodnjem ustroju železniških prog. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Zgonc, B., co-supervisor Šemrov, D.): 76 pp.

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 ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
PROMETNA SMER

Kandidatka:

**SONJA SUKIČ**

**SILE IN NAPETOSTI V ZGORNJEM IN SPODNJEM  
USTROJU ŽELEZNIŠIH PROG**

Diplomska naloga št.: 3342/PS

**FORCES AND STRESSES IN THE SUPERSTRUCTURE  
AND IN THE FORMATION OF THE RAILWAY TRACK**

Graduation thesis No.: 3342/PS

**Mentor:**

prof. dr. Bogdan Zgonc

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentorica:**

asist. Darja Šemrov

**Član komisije:**

izr. prof. dr. Jože Panjan

Ljubljana, 29. 11. 2013

## **ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVE**

Podpisana **SONJA SUKIČ** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom: »**SILE IN NAPETOSTI V ZGORNJEM IN SPODNJEM USTROJU ŽELEZNIŠKIH PROG**«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 5. 11. 2013

Sonja Sukič

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

<b>UDK:</b>	<b>625.1 (043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Sonja Sukič</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Bogdan Zgonc, univ. dipl. inž. grad.</b>
<b>Somentorica:</b>	<b>asist. Darja Šemrov, univ. dipl. inž. grad.</b>
<b>Somentor:</b>	<b>asist. dr. Primož Može, univ. dipl. inž. grad.</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Sile in napetosti v zgornjem in spodnjem ustroju železniških prog</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>76 str., 20 pregl., 51 sl., 4 graf., 39 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>tirnica, prag, tirni pribor, tirna greda, tamponski sloj, progovno telo, osna obremenitev, metoda po Zimmermannu, Odemarkova teorija, teorija Eisenmanna</b>

### **Izvleček**

V prvem delu diplomske naloge so ob upoštevanju Pravilnika o zgornjem ustroju železniških prog (Uradni list Republike Slovenije št. 92/2010), standarda Agregati gred železniških prog SIST EN 13450:2003, standarda za tamponski sloj in progovno telo Mednarodne železniške zveze UIC Code 719 R (2008) ter tehničnih specifikacij za ceste, opisani elementi zgornjega in spodnjega ustroja železniških prog. Opisani so tirnica, prag, tirni pribor, tirna greda, tamponski sloj in progovno telo. Nato je predstavljena teorija za izračun sil in napetosti skozi prerez železniške proge pod prometno obremenitvijo. Dinamični vplivi prometa se upoštevajo po Eisenmannovi teoriji. Predstavljena je Eisenmannova poenostavitev Hertzove teorije kontakta med kolesom in tirnico za določitev maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice, Zimmermannova metoda za izračun sil in napetosti v zgornjem ustroju, Odemarkov postopek ter izračun kontaktnih napetosti na posameznih stikih plasti.

V zadnjem delu diplomske naloge je izračun sil in napetosti skozi prerez železniške proge pri prometni obremenitvi z najsodobnejšo lokomotivo voznega parka Slovenskih železnic SŽ 541 za izbrano sestavo zgornjega ustroja. Izračunane so maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice, upogibne napetosti v tirnici, kontaktne napetosti na stiku tirnica – prag, kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda ter kontaktne napetosti na stiku tirna greda – progovno telo.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

<b>UDC:</b>	<b>625.1 (043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Sonja Sukič</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Prof. Bogdan Zgonc, Ph. D.</b>
<b>Co-advisor:</b>	<b>Assist. Darja Šemrov, B. Sc.</b>
<b>Co-advisor:</b>	<b>Assist. Primož Može, Ph. D.</b>
<b>Document type:</b>	<b>Graduation thesis – University studies</b>
<b>Title:</b>	<b>Forces and stresses in the superstructure and in the formation of the railway track</b>
<b>Notes:</b>	<b>76 p., 20 tab., 51 fig., 4 graph., 39 eq.</b>
<b>Key words:</b>	<b>rail, sleeper, rail joints, ballast bed, blanket layer, formation, axle load, Zimmermann's method, Odemark's theory, Eisenmann theory</b>

**Abstract**

The first part of the thesis describes elements of the railway superstructure and formation (rail, sleeper, rail joints, ballast bed, blanket layer and formation). These descriptions are based on Pravidnik o zgornjem ustroju železniških prog (published in UL RS 92/100), standard Aggregates for railway ballast SIST EN 13450:2003, standard Earthworks and track bed for railway lines UIC Code 719 R (2008) published by International Union of Railways and on technical specifications for roads. The second part introduces the calculation of forces and stresses through the cross section of the railway line under traffic load. Dynamic impacts are taken into account by Eisenmann's theory. Presented is Eisenmann's simplification of the Hertz theory for wheel–rail contact, for determination of the maximum shear stress in the rail head, Zimmermann's method to calculate the forces and stresses in the superstructure, Odemark's theory and the calculation of contact stresses on individual contact layer.

Last part of the thesis presents the calculation of forces and stresses through the cross section of the railway line under traffic load of the Siemens locomotive SŽ 541 for the chosen composition of the superstructure. Maximum shear stress in the rail head, bending stresses in the rail foot, contact stresses at the rail – sleeper contact, contact stresses at the sleeper – ballast bed contact and contact stresses at the ballast bed – formation contact are calculated.

## **ZAHVALA**

Za pomoč in nasvete pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Bogdanu Zgoncu, univ. dipl. inž. grad. in somentorici asist. Darji Šemrov, univ. dipl. inž. grad. ter somentorju asist. dr. Primožu Možetu, univ. dipl. inž. grad.

Posebej se zahvaljujem tudi prof. dr. Janku Logarju, univ. dipl. inž. grad. za natančen pregled, nasvete in komentarje, ki so izboljšali mojo diplomsko nalogo.

Zahvaljujem se tudi svojima staršema, Jasni in Jožetu, ki sta mi omogočila študij in me s sestro vedno spodbujala ter nudila podporo.

Zahvaljujem pa se tudi sošolcem in prijateljem za nepozabna leta študija.

**KAZALO VSEBINE**

Errata	I
Izjave	II
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	III
Bibliographic-documentalistic information and abstract	IV
Zahvala	V
<b>1 UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1 Namen.....	1
1.2 Cilj.....	1
<b>2 ZGORNJI IN SPODNJI USTROJ ŽELEZNIŠKIH PROG.....</b>	<b>3</b>
2.1 Zgornji ustroj.....	5
2.1.1 Tirnica.....	5
2.1.1.1 Oblika tirnic.....	5
2.1.1.2 Kakovost tirnic.....	5
2.1.2 Pragi.....	7
2.1.2.1 Vrsta in oblika pragov.....	7
2.1.2.2 Razmik pragov.....	9
2.1.3 Tirni pribor.....	10
2.1.3.1 Pritrdilni pribor.....	10
2.1.3.2 Vezni pribor.....	12
2.1.4 Tirna greda.....	13
2.1.4.1 Lastnosti tirne grede.....	13
2.1.4.2 Dimenzija tirne grede.....	17
2.2 Spodnji ustroj.....	18
2.2.1 Tamponski sloj.....	18
2.2.1.1 Lastnosti tamponskega sloja.....	18
2.2.1.2 Dimenzija tamponskega sloja.....	22
2.2.1.3 Izvedba in kakovost izvedbe tamponskega sloja.....	23
2.2.2 Progovno telo.....	25
2.2.2.1 Lastnosti progovnega telesa.....	26
2.2.2.2 Izvedba in kakovost izvedbe progovnega telesa.....	27
2.2.3 Kontrola kakovosti izvedbe zemeljskih del in del na nevezani nosilni plasti.....	29
2.2.3.1 Kontrola zgoščenosti.....	29
2.2.3.2 Kontrola togosti.....	31
2.2.3.3 Kontinuirna kontrola zgoščenosti.....	33



<b>3</b>	<b>SILE IN NAPETOSTI V ŽELEZNIŠKI PROGI.....</b>	<b>35</b>
3.1	Teorija izračuna sil in napetosti v zgornjem in spodnjem ustroju proge.....	36
3.1.1	Dinamični vplivi po Eisenmannu .....	37
3.1.2	Teorija izračuna maksimalnih strižnih napetosti v glavi tirnice.....	38
3.1.3	Teorija izračuna sil in upogibnih napetosti v tirnici po Zimmermannovi metodi .....	40
3.1.4	Teorija izračuna kontaktnih napetosti na stiku tirnica – prag.....	43
3.1.5	Teorija izračuna sil in napetosti v tirni gredi in spodnjem ustroju po Odemarku .....	44
<b>4</b>	<b>IZRAČUN SIL IN NAPETOSTI V ŽELEZNIŠKI PROGI.....</b>	<b>48</b>
4.1	Podatki za večsistemsko lokomotivo SŽ 541 .....	48
4.2	Podatki zgornjega in spodnjega ustroja uporabljeni v izračunu .....	49
4.3	Rezultati izračuna za izhodiščne podatke.....	50
4.3.1	Maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice .....	50
4.3.2	Upogibne napetosti v tirnici .....	51
4.3.3	Kontaktne napetosti na stiku tirnica – prag .....	53
4.3.4	Kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda .....	55
4.3.5	Kontaktne napetosti na stiku tirna greda – progovno telo .....	56
4.4	Rezultati izračuna za tirnico 49 E1 namesto tirnice 60 E1 .....	60
4.4.1	Maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice pri upoštevanju tirnic 49 E1 .....	60
4.4.2	Upogibne napetosti v tirnici pri upoštevanju tirnic 49 E1 .....	60
4.4.3	Kontaktne napetosti na stiku tirnica – prag pri upoštevanju tirnic 49 E1.....	61
4.4.4	Kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda pri upoštevanju tirnic 49 E1.....	62
4.4.5	Kontaktne napetosti na stiku tirna greda – progovno telo pri upoštevanju tirnic 49 E1 .....	63
4.5	Rezultati izračuna za osni razmik pragov 65 cm namesto 60 cm.....	64
4.5.1	Maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice za razmik pragov 65 cm .....	64
4.5.2	Upogibne napetosti v tirnici za razmik pragov 65 cm.....	65
4.5.3	Kontaktne napetosti na stiku tirnica – prag za razmik pragov 65 cm.....	66
4.5.4	Kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda za razmik pragov 65 cm.....	66
4.5.5	Kontaktne napetosti na stiku tirna greda – progovno telo za razmik pragov 65 cm .....	67
4.6	Upoštevanje podatkov za obstoječe proge .....	68
4.6.1	Maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice za obstoječe proge .....	68
4.6.2	Upogibne napetosti v tirnici za obstoječe proge .....	69
4.6.3	Kontaktne napetosti na stiku tirnica – prag za obstoječe proge .....	70
4.6.4	Kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda za obstoječe proge .....	70
4.6.5	Kontaktne napetosti na stiku tirna greda – progovno telo za obstoječe proge .....	71
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČEK .....</b>	<b>74</b>
	<b>VIRI.....</b>	<b>75</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Minimalne vrednosti $E_{v2}$ in $D_{Pr}$ (Zgonc, 1996: str. 7).....	4
Preglednica 2: Podatki standardnih tirnic (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 39. člen) .....	5
Preglednica 3: Kakovost in kemična sestava tirnic (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 39. člen) .....	6
Preglednica 4: Osni razmik pragov (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 47. člen) ....	9
Preglednica 5: Kategorije zrnivosti tolčenca (SIST EN 13450:2003: str. 6) .....	14
Preglednica 6: TSI kategorizacija proge za konvencionalne hitrosti (TSI infrastruktura za konvencionalne proge, 2011: str. 66) .....	35
Preglednica 7: Parametri tehničnega stanja za TSI kategorizacijo proge za konvencionalne hitrosti (TSI infrastruktura za konvencionalne proge, 2011: str. 67) .....	35
Preglednica 8: Vrednosti za stanje zgornjega ustroja $s$ in statistično verjetnost razsipanja rezultatov $t$ (Esveld, 2001: str. 84) .....	38
Preglednica 9: Mejne vrednosti ponavljajoče se upogibne napetosti v tirnici (Lichtberger, 2005: str. 65).....	43
Preglednica 10: Prikaz kontaktnih napetosti na planum proge pri hitrosti 60 km/h.....	57
Preglednica 11: Prikaz kontaktnih napetosti na planum proge pri hitrosti 80 km/h.....	57
Preglednica 12: Prikaz kontaktnih napetosti na planum proge pri hitrosti 100 km/h.....	58
Preglednica 13: Napetosti v železniški progi pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 .....	58
Preglednica 14: Sile v železniški progi pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 .....	59
Preglednica 15: Prikaz napetosti na planum proge pri hitrosti 80 km/h za tirnico 49 E1.....	63
Preglednica 16: Primerjava napetosti v železniški progi za tirnico 60 E1 in tirnico 49 E1 pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h .....	64
Preglednica 17: Prikaz napetosti na planum proge pri hitrosti 80 km/h pri osnem razmiku 65 cm .....	67
Preglednica 18: Primerjava napetosti v železniški progi za osni razmik pragov 60 cm in 65 cm pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h .....	68
Preglednica 19: Prikaz napetosti na planum proge pri hitrosti 80 km/h za obstoječe proge .....	72
Preglednica 20: Primerjava napetosti v železniški progi za novo in obstoječo železniško progo pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h .....	73

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Vrednost upogibnih momentov v tirnici pod prvo osjo lokomotive SŽ 541 .....	52
Grafikon 2: Vrednost upogibnih napetosti v tirnici pod prvo osjo lokomotive SŽ 541 .....	53
Grafikon 3: Vrednost kontaktnih napetosti na stiku prag – tirna greda po dolžini tirnice .....	56
Grafikon 4: Vpliv sosednjih pragov na račun napetosti na planumu proge pod prvo osjo lokomotive SŽ 541 pri 30 cm tirne grede.....	57

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Karakteristični prečni prerez železniških prog (Zgonc, 2012: str. 29) .....	3
Slika 2: Obtežbena shema za nove premostitvene konstrukcije (Uredba o kategorizaciji prog, 2011: priloga 10) .....	4
Slika 3: Prečni prerez standardnih tirnic (Zgonc, 2012: str. 22).....	5
Slika 4: Oznaka na vratu tirnice (lasten vir).....	6
Slika 5: Izbira tirnice glede na količino prometa in polmer krožnega loka (Zgonc, 2012: str. 23).....	7
Slika 6: Leseni pragi v prečnem prerezu (Zgonc, 2012: str. 26) .....	8
Slika 7: Enodelni betonski prag (Zgonc, 2012: str. 26).....	8
Slika 8: Označitev betonskih pragov (lasten vir).....	9
Slika 9: Označitev betonskih pragov (lasten vir).....	9
Slika 10: Toga pritrditev K na lesenem pragu (Zaletelj, 2006: str. 7) .....	10
Slika 11: Elastična pritrditev Pandrol (Zaletelj, 2006: str. 7) .....	11
Slika 12: Elastična pritrditev Pandrol na betonskih pragih (lasten vir) .....	11
Slika 13: Del tirnice s sistemom elastične pritrditve Pandrol za lesene prage (lasten vir) .....	12
Slika 14: Vezni pribor (Zgonc, 2012: str. 32).....	12
Slika 15: Tirna greda (lasten vir).....	13
Slika 16: Zrnavost tirne grede (SIST EN 13450:2003: str. 6) .....	14
Slika 17: Sestav zrn v tirni gredi (Zaletelj, Flerin, 2006: str. 9).....	15
Slika 18: Drobljenje tolčenca in zapolnitev praznin z zdrobljenimi delci (Ballast Properties, 2013) ...	16
Slika 19: Poškodba planuma zaradi neizvedenega čiščenja tirne grede (Zaletelj, Flerin, 2006: str. 9). 16	
Slika 20: Prečni prerez tirne grede v premi in enostranskem nagibu planuma (glavna proga) (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 48.člen).....	17
Slika 21: Prečni prerez tirne grede dvotirne proge v premi (novogradnja, glavna proga) (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 48.člen).....	17
Slika 22: Zmanjšanje napetosti na teren s povečanjem debeline tamponskega sloja (Subballast properties, 2013).....	18
Slika 23: Bitumenska plast kot del tamponskega sloja pod tirno gredo (Subballast properties, 2013). 19	
Slika 24: Območje sestave zmesi kamnitih zrn 0/22 mm za nevezane nosilne plasti (TSC 06.200, 2003: str. 6).....	20
Slika 25: Območje sestave zmesi kamnitih zrn 0/31 mm za nevezane nosilne plasti (TSC 06.200, 2003: str. 6).....	20
Slika 26: Območje sestave zmesi kamnitih zrn 0/45 mm za nevezane nosilne plasti (TSC 06.200, 2003: str. 6).....	21
Slika 27: Tamponski sloj kot filterski sloj (Subballast properties, 2013).....	22
Slika 28: Tamponski sloj kot plast zaščite pred zmrzovanjem (Subballast properties, 2013).....	23
Slika 29: Dviganje tira zaradi ledenih leč (Subballast properties, 2013).....	23
Slika 30: Zmanjšanje nosilnosti v času tajanja (Subballast properties, 2013).....	23
Slika 31: Proga v nasipu (lasten vir).....	25
Slika 32: Proga v useku (Railway track in cutting, 2013) .....	25
Slika 33: Zgoščanje proge z valjarji (Obnova železniške proge odsek Lipovci – Murska Sobota, 2013) .....	28
Slika 34: Odvisnost suhe gostote zmesi od vlažnosti zmesi (Logar, 2013).....	30
Slika 35: Izotopska sonda (Logar, 2013).....	31
Slika 36: Shema krožne obremenilne plošče z opremo za meritev posedkov (TSC 06.720, 2003: str. 5) .....	31
Slika 37: Določitev modulov $E_{v1}$ in $E_{v2}$ (TSC 06.720, 2003: str.12) .....	32
Slika 38: Krožna obremenilna plošča s padajočo utežjo za meritev posedkov in določitev dinamičnega deformacijskega modula $E_{vd}$ (TSC 06.720, 2003: str. 7) .....	33
Slika 39: Merilni valjar s sistemom za kontinuirano kontrolo zgoščanja (TSC 06.713, 2005: str. 8)...	34
Slika 40: Prenos vertikalne obremenitve (Track Performance, 2013).....	37
Slika 41: Razporeditev strižnih napetosti v glavi tirnice (Esveld, 2001: str. 86) .....	38

Slika 42: Predpostavljena razporeditev kontaktnih napetosti med kolesom in tirnico po Eisenmannu (Esveld, 2001: str. 86) .....	39
Slika 43: Namišljeni vzdolžni prag (Zgonc, 2012: str. 46) .....	40
Slika 44: Vplivnica za upogib $\eta$ .....	42
Slika 45: Vplivnica za moment $\mu$ .....	42
Slika 46: Odemarkov ekvivalentni postopek (Žmavc, 2007: str. 222).....	45
Slika 47: Tirna greda in spodnji ustroj kot dvoplastni sistem (Esveld, 2001: str. 93).....	45
Slika 48: Napetosti zaradi trakaste obremenitve na polprostor (Esveld, 2001: str. 94) .....	47
Slika 49: Večsistemska lokomotiva SŽ 541 (Miniaturna železnica, 2013).....	48
Slika 50: Obtežna shema večsistemske lokomotive SŽ 541 .....	49
Slika 51: Rezultati izračuna za hitrosti 80 km/h pri obremenitvi železniške proge z lokomotivo SŽ 541 .....	59

---

**SEZNAM KRATIC**

CCC	Kontinuirana kontrola zgoščenosti (angl. Continuous compaction control)
EN	European Norm
SIST	slovenski standard, ki ga je sprejel Slovenski inštitut za standardizacijo
SIST EN	privzeti evropski standard
SŽ	Slovenske železnice
RS	Republika Slovenija
TEN-T	Proge vseevropskega železniškega omrežja (angl. Trans-European transport network)
TSC	Tehnične specifikacije za ceste
TSI	Tehnične specifikacije za interoperabilnost
UIC	Mednarodna železniška zveza (fr. Union Internationale des Chemins de fer)

## 1 UVOD

Železniška proga je del javne železniške infrastrukture, ki je grajeno javno dobro v lasti države in s katero v Republiki Sloveniji upravljajo Slovenske železnice – Infrastruktura d.o.o. Naloga železniške proge je prenos obremenitev vlakovne kompozicije na raščeni teren in vodenje vozil. Prenos obremenitev temelji na principu zmanjševanja napetosti po plasteh (Esveld, 2001). Jaz v diplomski nalogi obravnavam le prenos obremenitev.

### 1.1 Namen

Namen diplomske naloge je izračunati sile in napetosti v vseh slojih prečnega prereza železniške proge pod vertikalno prometno obremenitvijo najsodobnejše večsistemske lokomotive voznega parka Slovenskih železnic SŽ 541 za izbrano sestavo zgornjega ustroja.

V zadnjem delu diplomske naloge zato za izbrano sestavo zgornjega ustroja in za prometno obremenitev z večsistemsko Siemensovo lokomotivo SŽ 541, izračunam sile in napetosti skozi prerez železniške proge. Pri tem izračunam maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice, upogibne napetosti v tirnici, kontaktne napetosti na stiku tirnica – prag, kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda ter kontaktne napetosti na stiku tirna greda – progovno telo.

Nato še primerjam napetosti, ki nastopijo v železniški progi, za izbrano sestavo zgornjega ustroja s podatki, kjer izhodiščnim podatkom izbrane sestave zgornjega ustroja spremenim eno komponento. Na ta način ugotovim, kakšen vpliv na napetosti v železniški progi imajo različne hitrosti prometne obremenitve z lokomotivo SŽ 541, uporaba tirnice z manjšim prečnim prerezom, kakšen vpliv na napetosti je, če povečamo osni razmik med pragi. Ugotovim tudi, kakšen je vpliv na napetosti v železniški progi, če upoštevam podatke za novogradnjo in za obstoječo progo.

### 1.2 Cilj

Na začetku diplomske naloge se seznanim z zgornjim in spodnjim ustrojem železniških prog. Podrobneje obravnavam posamezne sloje zgornjega in spodnjega ustroja, ki jih bom uporabila pri izračunu v zadnjem delu diplomske naloge. Seznanim se z obliko tirnic in njihovo kakovostjo. Nato obravnavam vrste in obliko pragov, ki se vgrajujejo pri nas, ter z osnim razmikom pragov. Pri obravnavi tirnega pribora se seznanim s sestavo pritrdilnega pribora, ki je bil oz. je zdaj najbolj uporabljen v Republiki Sloveniji. V poglavju o tirni gredi pa obravnavam agregat tirne grede, njegovo zrnavost in kakovost, ter dimenzije tirne grede na progah v Republiki Sloveniji.

Pri obravnavi tamponskega sloja in progovnega telesa se seznanim z materialom, njegovo zrnavostjo in zahtevano kakovostjo materiala, z dimenzijami tamponskega sloja ter izvedbo in zahtevami kakovosti planuma tamponskega sloja ter planuma progovnega telesa. V poglavju o kontroli kakovosti izvedenih zemeljskih del in del na nevezani nosilni plasti pa obravnavam še postopke za kontrolo zgoščenosti po Proctorju in postopke za določitev deformacijskega modula na planum.

V srednjem delu diplomske naloge se seznanim s teorijo za izračun sil in napetosti v železniški progi pod prometno obremenitvijo. Celoten izračun je izdelan za statično obremenitev z mirujočim vozilom. Ker pa se vozilo v naravi giblje z določeno hitrostjo, bom ta vpliv zajela z dinamičnim faktorjem po Eisenmannu (Esveld, 2001). Maksimalne strižne napetosti v tirnici dobim z Eisenmannovo poenostavitvijo Hertzove teorije kontakta med kolesom in tirnico (Esveld, 2001). Za izračun

---

upogibnih napetosti v tirnici pa upoštevam Zimmermannovo metodo za izračun sil in napetosti v zgornjem ustroju.

Tirna greda in spodnji ustroj sestavljata dvoplastni sistem, ki ga po Odemarkovem ekvivalentnem postopku (Esveld, 2001), (Lichtberger, 2005) obravnavam kot enakovreden homogen elastični polprostor. Pri tem upoštevam vertikalne napetosti, ki so posledica osne obremenitve, kot prevladujoče napetosti tega sistema. Mejne napetosti planumov pa dobim po empirični formuli Heukeloma in Klompa (Esveld, 2001).

Pri izdelavi diplomske naloge sem upoštevala standard za tamponski sloj in progovno telo Mednarodne zveze železnic (v nadaljevanju UIC – fr. Union Internationale des Chemins de fer) UIC Code 719 R (2008), standard Agregati gred železniških prog SIST EN 13450:2003 in standard za enodelne betonske prage SIST EN 13230-1:2004, Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog (Uradni list Republike Slovenije št. 92/2010), tehnične specifikacije za ceste (v nadaljevanju TSC) ter dodatno literaturo.





Zgornja površina progovnega telesa predstavlja planum progovnega telesa. Planum proge pa je stična ploskev med tirno gredo in spodnjim ustrojem proge. Ob vgradnji tamponskega sloja je planum proge zaključna plast tamponskega sloja (planum tamponskega sloja). Če pa se tamponskega sloja ne vgradi predstavlja planum proge zaključno plast progovnega telesa (planum progovnega telesa). Planum mora ustrezati določenim zahtevam glede nivelete, prečnega nagiba, ravnosti in togosti.

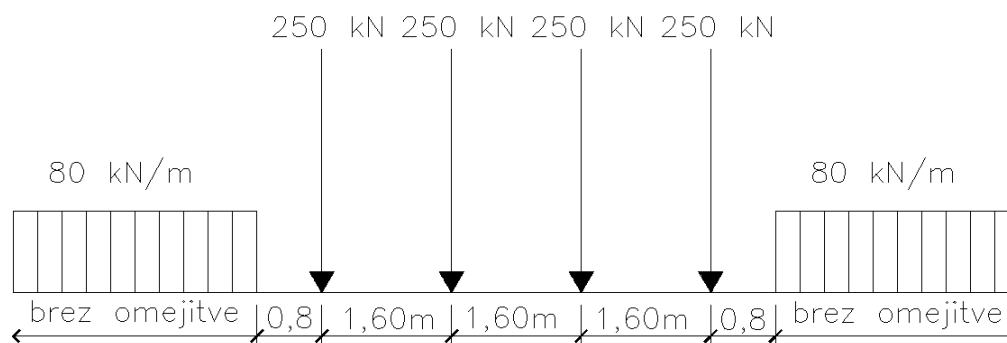
Največja pozornost pri gradnji železniških prog se mora nameniti gradnji spodnjega ustroja. Velike osne obremenitve in zahtevana geometrijska točnost tira, zahtevajo kakovostno izvedbo vseh plasti spodnjega ustroja (Zgonc, 1996). Gradnja ter vzdrževanje progovnega telesa in tamponskega sloja sta natančneje opisani v kodeksu UIC 719 R (2008). Pri gradnji progovnega telesa in tamponskega sloja se sprti preverja kakovost vgrajenega materiala in vgradnje, točnost mer in zgoščenost zemljin.

Kakovost gradnje progovnega telesa in tamponskega sloja se preverja s stopnjo zgoščenosti po Proctorju  $D_{Pr}$  in vrednostjo deformacijskega modula  $E_{v2}$  na planumu temeljnih tal, planumu progovnega telesa in planumu proge (Zgonc, 1996). Stopnja zgoščenosti po Proctorju  $D_{Pr}$  je razmerje med izmerjeno suho gostoto materiala in maksimalno suho gostoto določeno s Proctorjevim preizkusom. Deformacijski modul  $E_{v2}$  pa je parameter, ki ponazarja deformabilnost vgrajenega materiala in je določen na osnovi nagiba krivulje obremenitev/posedek pri poskusu s krožno ploščo pri drugi obremenitvi (TSC 06.720, 2003). Minimalne zahtevane vrednosti teh parametrov za planum proge in planum progovnega telesa so podane v Preglednici 1.

Preglednica 1: Minimalne vrednosti  $E_{v2}$  in  $D_{Pr}$  (Zgonc, 1996: str. 7)

Vrsta proge	Planum proge		Planum prog. telesa	
	$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$D_{Pr}$	$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$D_{Pr}$
Glavne proge, novogradnja	120	1.03	80	1.00
Regionalne proge, novogradnja	100	1.00	60	0.97
Drugi tiri, novogradnja	80	0.97	45	0.95
Obstoječe proge, obnova	50	0.95	20	0.93

Umetne objekte (propuste, mostove, podvoze, viadukte in nasipe) se dimenzionira za prevzem navpičnih obremenitev glede na obremenilne sheme iz EN 1991-2:2003 (TSI infrastruktura za konvencionalne proge, 2011). Statični del obtežbe za normalni promet se dimenzionira glede na obremenilno shemo 71, ki je prikazana na Sliki 2.



Slika 2: Obtežbena shema za nove premostitvene konstrukcije (Uredba o kategorizaciji prog, 2011: priloga 10)

## 2.1 Zgornji ustroj

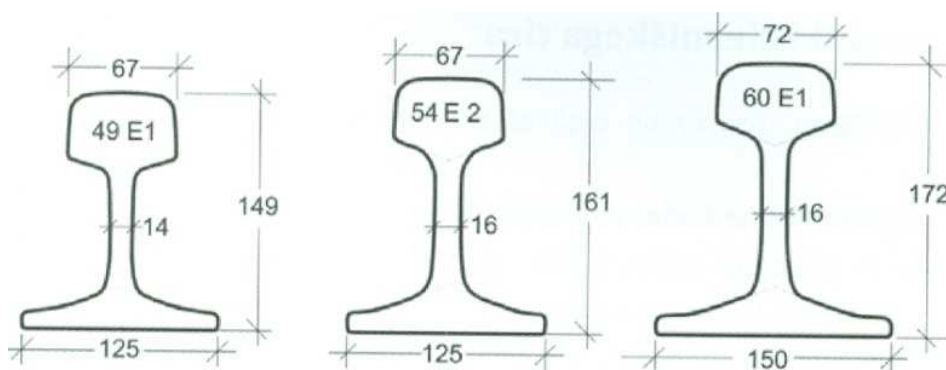
### 2.1.1 Tirnica

Tirnica je element zgornjega ustroja. Njena naloga je nošenje in vodenje vozila v tiru. Pri nošenju vozila tirnica prevzame vertikalne in horizontalne sile tirnih vozil ter jih prenese na prage, tirno gredo in spodnji ustroj proge. Pri vodenju pa tirnica usmerja tirno vozilo na vozni poti. Tirnica mora biti takšna, da lahko prenaša velike lokalne sile in napetosti, ki nastanejo na stiku med kolesom in tirnico. Tirnice se razlikujejo po masi, obliki in kemični sestavi (Zgonc, 2012).

Življenjska doba tirnic se določi na podlagi količine prevoženega tovora ali pa v letih služenja tirnice. Na življenjsko dobo tirnic vplivajo tip, količina in frekventnost prometa, osna obremenitev, ploščata mesta na kolesih, kvaliteta vzdrževanja proge ter kvaliteta tirnih stikov in bočne obrabe v krivinah (Zaletelj, 2006).

#### 2.1.1.1 Oblika tirnic

Oblika, mere prečnih prerezov in ostali podatki standardnih oblik tirnic so določeni v standardu SIST EN 13674-1 in Objavah UIC 860, UIC 861-1 in UIC 861-3. V Republiki Sloveniji se pri novogradnji, nadgradnji in obnovi glavnih prog vgrajuje tirnice standardne oblike 60 E1 ali 54 E1, na regionalnih progah in postajnih tirih pa 49 E1 (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010). Prečni prerez standardnih tirnic je prikazan na Sliki 3, podatki o standardnih tirnicah pa so navedeni v Preglednici 2.



Slika 3: Prečni prerez standardnih tirnic (Zgonc, 2012: str. 22)

Preglednica 2: Podatki standardnih tirnic (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 39. člen)

Oblika tirnice	Teža [kg/m]	Prerez [cm <sup>2</sup> ]	$I_x$ [cm <sup>4</sup> ]	$W_x$ [cm <sup>3</sup> ]
60 E1	60,21	76,70	3038	333,6
54 E1	53,81	68,56	2307	276,4
49 E1	49,39	62,92	1816	240,3

#### 2.1.1.2 Kakovost tirnic

Kakovost tirnic je po evropskem standardu EN 13674-1 (2003) odvisna od trdote vozne površine tirnice po Brinellu. Tirnice se loči v sedem kakovostnih razredov, ki so podani v Preglednici 3. Nove

tirnice, ki se vgradijo v železniško omrežje RS, morajo biti najmanj kakovostnega razreda 260 z minimalno natezno trdnostjo 880 MPa (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

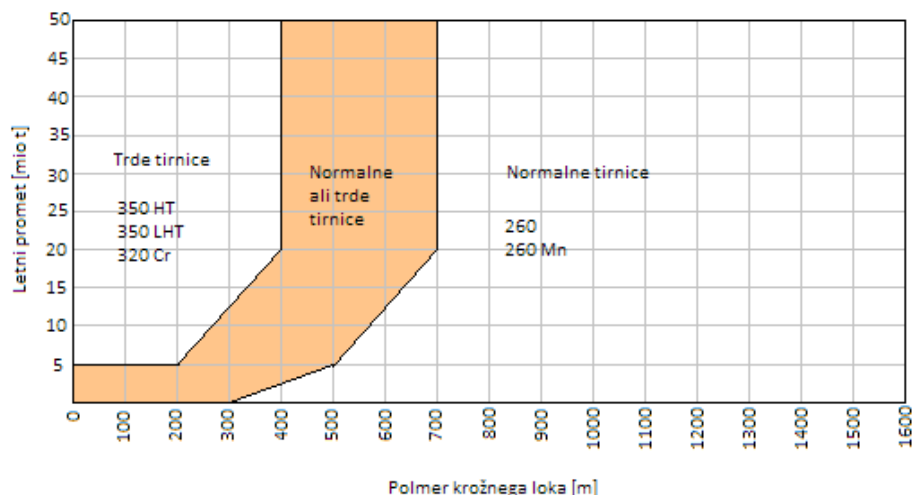
Preglednica 3: Kakovost in kemična sestava tirnic (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 39. člen)

Kakovostni razred	Min. natezna trdnost [N/mm <sup>2</sup> ]	Območje trdote (HBW)	Kemična sestava	Oznaka na vratu tirnice
200	680	200 – 240	C – Mn	(brez)
220	770	220 – 260	C – Mn	—
260	880	260 – 300	C – Mn	— —
260 Mn	880	260 – 300	C – Mn	— — —
320 Cr	1080	320 – 360	C – Cr	— — — —
350 HT	1175	350 – 390	C – Mn, HT	— — — — —
350 LHT	1175	350 – 390	C – Mn, LHT	— — — — — —



Slika 4: Oznaka na vratu tirnice (lasten vir)

Kakovost tirnice se lahko poveča s toplotno obdelavo glave tirnice HSH (angl. Head Special Hardened). Pri toplotni obdelavi tirnice se, pri temperaturi valjanja, glava tirnice potopi v hladilno kopel. S postopkom se doseže, da glava tirnice doseže fino perlitsko strukturo in visoko trdoto. Različne kakovosti tirnic potrebujemo, ker so na terenu različni pogoji. V krivinah se tirnice bolj obrabljajo, zato tam potrebujemo tirnice večje trdote. Po UIC 721 (UIC Kodex 721 E, 2005) je izbira tirnice za vgraditev odvisna od polmera krivine in prometne obremenitve proge, kot je prikazano na Sliki 5 (Zgonc, 2012). Manjši je polmer krožnega loka in večja je prometna obremenitev, večja je zahteva po tirnici višje kakovosti.



Slika 5: Izbira tirnice glede na količino prometa in polmer krožnega loka (Zgonc, 2012: str. 23)

## 2.1.2 Pragi

Prag je element zgornjega ustroja. Njegova glavna naloga je prenos obremenitev tirnih vozil s tirnice na tirno gredo ter ohranjanje tirne širine. Biti mora vremensko obstojen in odporen na udar koles pri iztirjenju ter mora ohranяти zadostno odpornost tirne rešetke v tirni gredi (Zgonc, 2012).

Ločimo lesene, betonske in jeklene prage. Vrste lesa, zahteve kakovosti, izvor, pogoji izdelave, oblika, dimenzije in tolerance, napake in posebnosti kakovosti lesa ter dopustne oblike, trajnost in konzerviranje lesenih pragov so podani v SIST EN 13145. Zahteve za betonske prage pa so podane v SIST EN 13230 in predpisane v Pravilniku o zgornjem ustroju železniških prog.

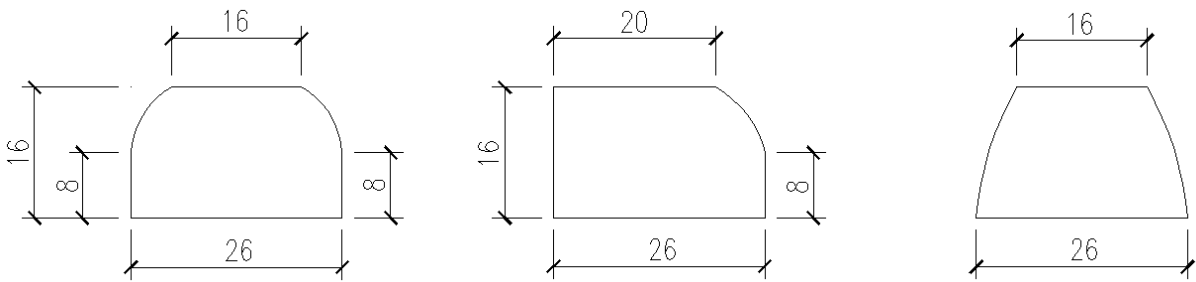
V Republiki Sloveniji se na glavnih progah vgrajujejo betonski ali impregnirani leseni pragi dolžine 260 cm, na regionalnih progah in stranskih postajnih tirih glavnih prog pa je dovoljeno vgrajevanje impregniranih lesenih pragov dolžine 250 cm ali betonskih pragov dolžine 250 ali 240 cm (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

Življenjska doba pragov je odvisna od let delovanja in stopnje obrabe. Leseni pragi iz trdega lesa dosežejo 20 do 30 let, iz mehkega lesa pa 13 do 20 let, za betonske prage pa je ocenjena življenjska doba na 30 do 50 let. Na življenjsko dobo pragov vpliva slaba utrditev, visoke osne obremenitve, povečanje dinamičnih obremenitev, udar bočnih sil v krivinah ter obraba pragov. Prage je potrebno obnoviti, ko ne morejo več ohranяти tirne širine, ko pride do propadanja (gnitja) lesenih pragov, v primeru mehanske obrabe, ter pri betonskih v primeru razpada jeklene armature ali izgube elastičnosti (Zaletelj, 2006).

### 2.1.2.1 Vrsta in oblika pragov

Za lesene prage se lahko uporablja les hrasta, bukve, bora, macesna, kostanja. Prage iz mehkega lesa (bor, kostanj, macesen) je dovoljeno vgrajevati le na stranskih postajnih in industrijskih tirih. Za podaljšanje življenjske dobe se lesene prage zaščiti s posebnimi impregnacijskimi sredstvi in zaščito proti razpokanju. Pogoji dobave neimpregniranih lesenih pragov so podani v objavi UIC Code 863 – O (1991) in v evropskem standardu EN 13145. Vsak prag mora biti tudi ustrezno označen z letnico izdelave praga (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

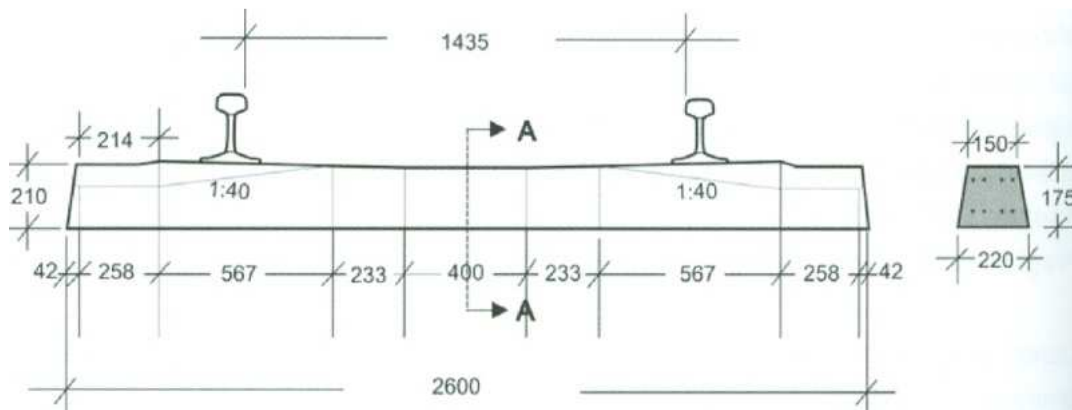
Standardni leseni pragi so širine 24 do 26 cm in višine 14 do 16 cm (Zgonc, 2012). Standardni prečni prerezi lesenih pragov so prikazani na Sliki 6.



Slika 6: Leseni pragi v prečnem prerezu (Zgonc, 2012: str. 26)

Betonski pragi so iz prednapetega betona visoke kakovosti. Prednost betonskih pragov v primerjavi z lesenimi je daljša življenjska doba, nižja cena in ekološka nespornost. Zaradi svoje večje teže so bolj odporni proti premiku tira, problem pa je, da se jih ne da ročno vgrajevati (Zgonc, 2012).

Oblike in zahteve betonskih pragov so določene v SIST EN 13230. Poznamo enodelne in dvodelne betonske prage. V Republiki Sloveniji se vgrajuje le enodelne betonske prage (Zgonc, 2012).



Slika 7: Enodelni betonski prag (Zgonc, 2012: str. 26)

V Sloveniji so trenutno edini proizvajalci betonskih pragov SGP POMGRAD – Armirano betonski izdelki, ki delajo prage B70 dolžine 260 cm.

Pri proizvodnji se mora vsak betonski prag označiti z letom proizvodnje, identifikacijo kalupa in identifikacijsko oznako proizvodnega obrata. Prav tako je lahko označen datum izdelave ali serijska številka praga (SIST EN 13230-1:2004). Označitev betonskih pragov je prikazana na Sliki 8 in Sliki 9.



Slika 8: Označitev betonskih pragov (lasten vir)



Slika 9: Označitev betonskih pragov (lasten vir)

### 2.1.2.2 Razmik pragov

Osni razmik pragov je razmik dveh sosednjih pragov. Na glavnih progah mora biti osni razmik 60 cm, na regionalnih progah, stranskih postajnih tirih in na industrijskih progah pa je odvisen od dopustne osne obremenitve, kot je podano v Preglednici 4 (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

Preglednica 4: Osni 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

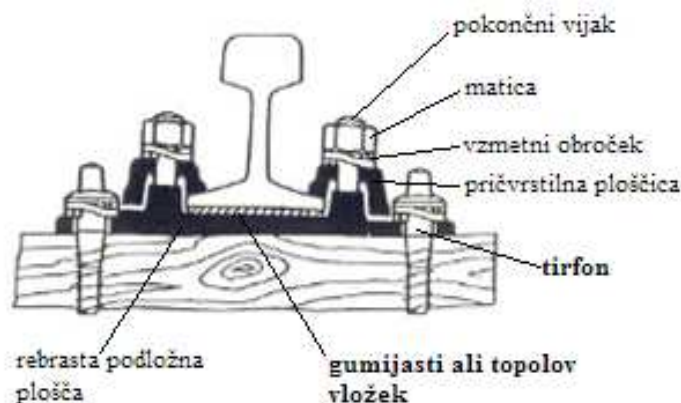
### 2.1.3 Tirni pribor

Tirni pribor je element zgornjega ustroja. Ločimo pritrtilni, vezni in drugi tirni pribor. Tirni pribor zagotavlja trdno povezavo med tirnicami in povezavo tirnice s pragom ter preprečuje rahljanje pribora in zvez (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

#### 2.1.3.1 Pritrdilni pribor

Naloga pritrtilnega pribora je pritrnitev tirnic na prage (Zgonc, 2012). Pritrdilni pribor se deli na tog in elastičen. Elastičen pritrtilni pribor se vgrajuje na betonske ali lesene prage pri novih glavnih progah, nadgradnjah ali obnovi glavnih prog ter na glavnih postajnih tirih. Pri novih regionalnih progah, nadgradnji ali obnovi regionalnih prog ter pri stranskih postajnih in industrijskih tirih pa je dovoljena vgradnja togega ali elastičnega pribora (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

Včasih je bil v Republiki Sloveniji najbolj uporabljen togi pritrtilni pribor sistem K, h kateremu sodijo rebraste podložne plošče, dva pokončna vijaka, dve pričvrstilni ploščici, dva vzmetna obročka, dve matici, topolov ali gumijasti vložek in štirje tirfoni (Zgonc, 2012). Toga pritrnitev K je prikazana na Sliki 10.

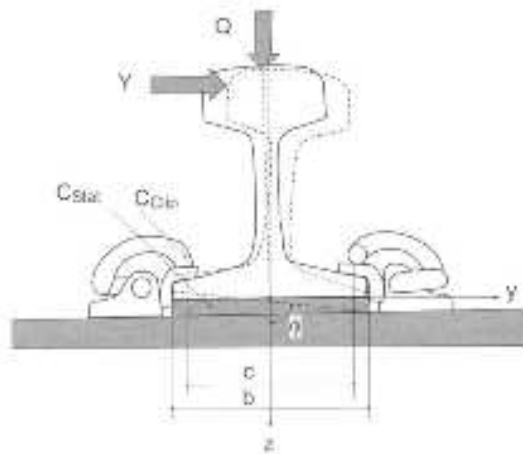


Slika 10: Toga pritrnitev K na lesenem pragu (Zaletelj, 2006: str. 7)

Klasičen pribor tipa K je zelo robusten, kar povzroča povečanje togosti tira v tirni rešetki. Slabost pribora je njegova velika masa in posledično visoka cena glede na ostali pritrtilni pribor. Zaradi velikega števila sestavnih delov je večja obraba na stičnih mestih, kar se pozna v razrahljanju zveze. Zaradi tega so potrebne pogoste kontrole in pritegovanje vijakov. Pribor tipa K ni primeren za proge z visokimi hitrostmi, ker slabo blaži oscilacije visokih frekvenc, kar vodi k rahljanju zveze. Pri zrahljanju zvezi se neblažene vibracije prenašajo na prag in poškodujejo naležno površino praga. To je še posebej nevarno pri betonskih pragih, ki so bolj togi. Če se zveze zrahljajo pri več pragih, se pod pragi drobi tolčenec in pride do zablatenosti, zaradi česar je potrebna zamenjava tolčenca in podbijanje pragov (Zaletelj, 2006).

Namesto togih pritrtilnih priborov se lahko uporablja elastični pritrtilni pribor, pri katerem toge elemente pritrditve nadomestijo elastične vzmeti ali elastične ploščice. Pri nas se uporablja elastična pritrnitev Pandrol, ki je prikazana na Sliki 11, 12 in 13 (Zgonc, 2012).





Slika 11: Elastična pritrditev Pandrol (Zaletelj, 2006: str. 7)



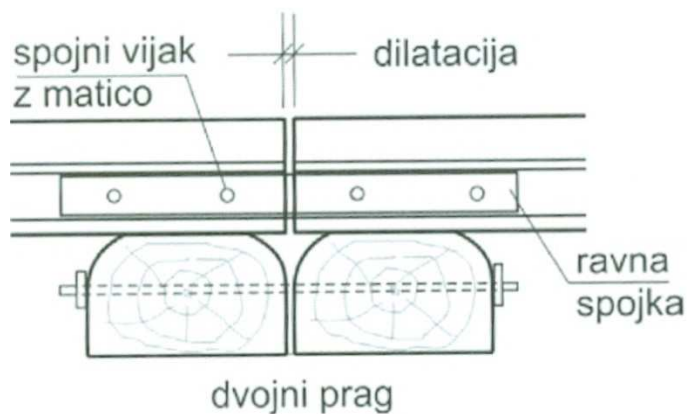
Slika 12: Elastična pritrditev Pandrol na betonskih pragih (lasten vir)



Slika 13: Del tirnice s sistemom elastične pritrditve Pandrol za lesene prage (lasten vir)

### 2.1.3.2 Vezni pribor

Naloga veznega pribora je povezanje tirnic med seboj v vzdolžni smeri. Vezni pribor poveže tirnici na tirnem stiku. Standardni vezni pribor je sestavljen iz dveh ravnih spojk in štirih spojnih vijakov z maticami (Zgonc, 2012). Standardiziran vezni pribor se mora prilagajati standardiziranim tirničnim profilom ter se vgrajuje pri novogradnji, nadgradnji, obnovi in zamenjavi kot del vzdrževanja vseh prog (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).



Slika 14: Vezni pribor (Zgonc, 2012: str. 32)

## 2.1.4 Tirna greda

Tirna greda je sloj tolčenca, v katerem leži tirna rešetka (tirnice in pragi). Je sestavni del zgornjega ustroja. Njena naloga je (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010):

- zagotavljanje enakomernega prenosa pritiska pragov na planum,
- odpornost proti bočnemu in vzdolžnemu premiku pragov,
- enostavna vzpostavitev horizontalne in vertikalne lege tira,
- zagotavljanje zračnosti in vodopropustnosti,
- zagotavljanje elastičnosti tira za zmanjševanje dinamičnih sil.

Tirna greda mora biti čista, obstojna na mraz in obrus ter ima predpisano obliko in enakomerno višino, dobro mora prepuščati atmosferske padavine in omogočati hitro odvodnjavanje planuma (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010). Na njeno življenjsko dobo vpliva vrsta in kvaliteta tirne grede, stopnja zablatenosti, vrsta pritrditve, vrsta in razmik pragov (Zaletelj, 2006).



Slika 15: Tirna greda (lasten vir)

### 2.1.4.1 Lastnosti tirne grede

#### 2.1.4.1.1 Material in proizvodnja

Tolčenec za tirno gredo mora izhajati iz nahajališč zdravega, trdnega, gostega in žilavega kamna. Kamnina mora biti homogena, brez primesi gline, humusa, železovih oksidov ali drugih škodljivih snovi, ter odporna proti zmrzovanju in zunanjim vplivom.

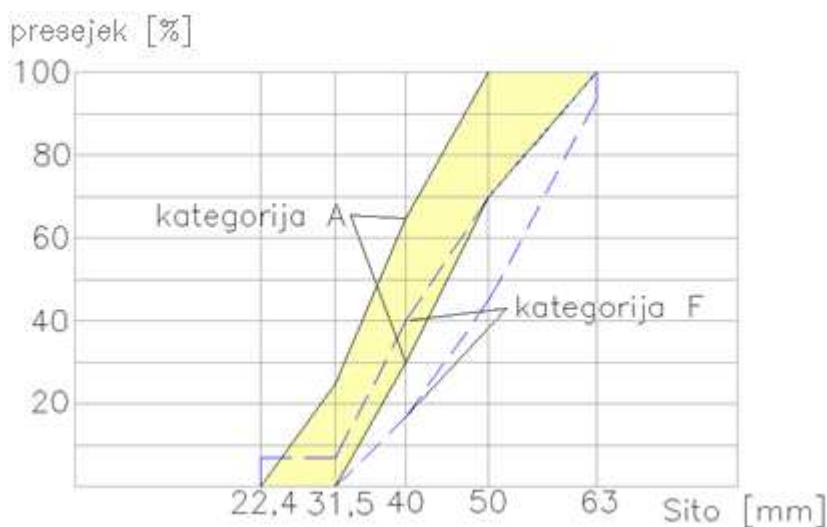
Proizvodnja tolčenca poteka z drobljenjem in sejanjem na tehnološko ustreznih drobilnih in sejalnih strojih. Material za proizvodnjo tolčenca so lahko magmatske (granit, porfir, bazalt) ali sedimentne kamnine (apnenec, dolomit). Najboljše so magmatske kamnine, ki so trde. Slovenija nima primernih nahajališč magmatskih kamnin, uvoz teh pa bi pomenil prevelik strošek, zato se pri nas za tolčenec uporablja apnenec, ki je sedimentna kamnina (Zgonc, 2012). Sedimentne kamnine so mehkejšje od magmatskih in se posledično bolj drobijo, zaradi česar se stanje tirne grede hitreje slabša (Zaletelj, 2006).

### 2.1.4.1.2 Zrnavost

Tolčenec sestavljajo oglata zrna, ki se morajo približevati obliki kocke. Optimalno strukturo tolčenca dobimo, ko z zrnavostjo tolčenca dosežemo največje možno število stičnih ploskev med posameznimi zrni. Zrnavostna sestava tolčenca je podana z nazivno zrnavostjo. Nazivna zrnavost prestavlja večino zrn, ki gredo skozi sito z največjim premerom  $D = 63$  mm oziroma  $D = 50$  mm in ostanejo na situ z najmanjšim premerom  $d = 31,5$  mm. Ločimo dve nazivni zrnavosti tolčenca, 31,5 – 50 mm in 31,5 – 63 mm, oziroma 6 kategorij A – F. Kategorije zrnavosti tolčenca so prikazane v Preglednici 5. Na Sliki 16 pa sta prikazani kategoriji A in F, za obe nazivni zrnavosti (SIST EN 13450:2003).

Preglednica 5: Kategorije zrnavosti tolčenca (SIST EN 13450:2003: str. 6)

Sito [mm]	31,5 – 50 mm			31,5 – 63 mm		
	Presejek [%]					
	Kategorija zrnavosti tolčenca					
	A	B	C	D	E	F
80	100	100	100	100	100	100
63	100	97 – 100	95 – 100	97 – 99	95 – 99	93 – 99
50	70 – 99	70 – 99	70 – 99	65 – 99	55 – 99	45 – 70
40	30 – 65	30 – 70	25 – 75	30 – 65	25 – 75	15 – 40
31,5	1 – 25	1 – 25	1 – 25	1 – 25	1 – 25	0 – 7
22,4	0 – 3	0 – 3	0 – 3	0 – 3	0 – 3	0 – 7
31,5 – 50	≥ 50	≥ 50	≥ 50	-	-	-
31,5 – 60	-	-	-	≥ 50	≥ 50	≥ 50



Slika 16: Zrnavost tirne grede (SIST EN 13450:2003: str. 6)

### 2.1.4.1.3 Kakovost tolčenca in tirne grede

Trdna, zdrava in gosta zrna tolčenca morajo biti takšne mineralne in kemijske sestave, da se pod vplivom vode, zraka in atmosferij fizikalne in trdnostne lastnosti ohranjajo. Delež primesi gline in humusa mora biti omejen, da ne bi imel negativnega vpliva na lastnosti materiala. Z mineraloško petrografskim pregledom zrn se določi oblika delcev, velikost in specifična masa ter delež finih delcev. Kakovost tolčenca, način pridobivanja in potrebne preiskave ter določitev zrnivosti in dodatnih karakteristik tolčenca morajo biti v skladu s SIST EN 13450:2003 in 13450:2003/AC:2004, ki vsebujeta predpise za agregate za grede železniških prog. Kakovost tolčenca se določi z mineraloško petrografskim pregledom zrn, z odpornostjo proti obrabi in proti drobljenju, z odpornost na zmrzal in meritvami vpijanja vode (SIST EN 13450:2003).

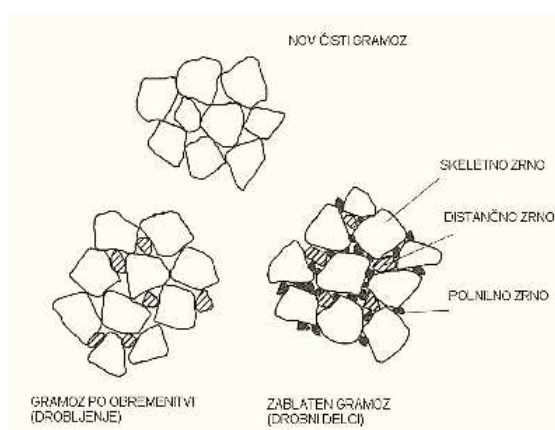
Mehanske lastnosti tolčenca se kontrolira z odpornostjo proti obrabi in odpornostjo proti drobljenju. Odpornost proti drobljenju se določi po metodi Los Angeles. Kategorije odpornosti proti drobljenju tirne grede so (SIST EN 13450:2003):

- $LA_{RB} 12$  ( $LA \leq 12$ ),
- $LA_{RB} 14$  ( $LA \leq 14$ ),
- $LA_{RB} 16$  ( $LA \leq 16$ ),
- $LA_{RB} 20$  ( $LA \leq 20$ ),
- $LA_{RB} 24$  ( $LA \leq 24$ ),
- $LA_{RB} \text{ Declared}$  ( $LA > 24$ ).

Odpornost proti obrabi pa se določi po metodi mikro-Deval. Kategorije odpornosti proti obrabi so (SIST EN 13450:2003):

- $M_{DE} RB 5$  ( $\leq 5$ ),
- $M_{DE} RB 7$  ( $\leq 7$ ),
- $M_{DE} RB 11$  ( $\leq 11$ ),
- $M_{DE} RB 15$  ( $\leq 15$ ),
- $M_{DE} RB \text{ Declared}$  ( $> 15$ ).

Tirna greda se zaradi dinamičnih obremenitev prometa in vzdrževalnih posegov, kot je strojno podbijanje, obrablja. Zaradi drobljenja zrn prihaja do posedanja tirne grede pod dinamično obremenitvijo. Votline med tolčencem se zapolnijo z zdrobljenimi delci in razno umazanijo, ter nimajo več funkcije sistema vzmetenja, kar povzroči povečanje togosti proge. Zapolnitev votlin povzroča tudi slabše odvajanje vode s planuma. Planum se razmehča in deformira, in fini delci iz spodnjega ustroja začnejo prodirati v tirno gredo, tolčenec pa se posede v zemeljski trup proge (Zaletelj, 2006), (Zgonc, 2012).

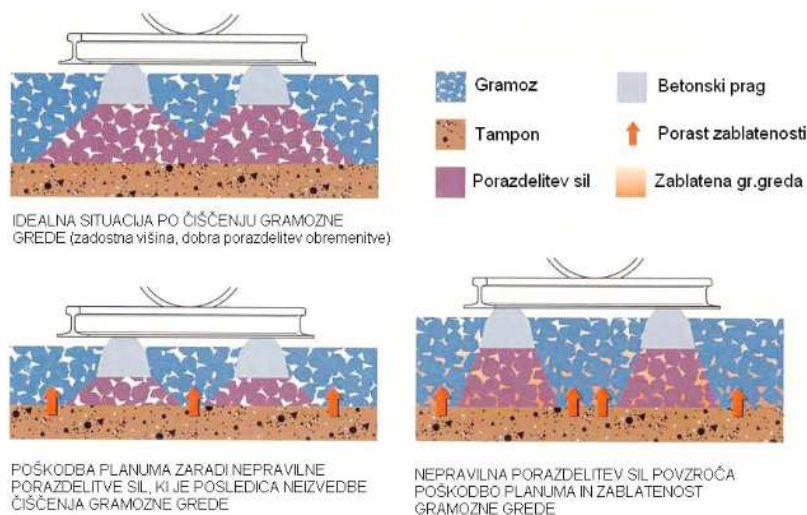


Slika 17: Sestav zrn v tirni gredi (Zaletelj, Flerin, 2006: str. 9)



Slika 18: Drobljenje tolčenca in zapolnitev praznin z zdrobljenimi delci (Ballast Properties, 2013)

Zablatenost tirne grede je pomemben kriterij pri določanju nujnosti sanacije proge. Osnova je analiza zrnivosti vzorcev, ki se jih določa z ročnim sejanjem na izbranih mestih. Odločilen je odstotek zrn, ki gre skozi sito 22,4 mm. Če se ugotovi, da je zablatenost manj kot 30-odstotna, se tirno gredo lahko preseje ali delno zamenja, v primeru, da pa je več kot 30-odstotna, se tirno gredo popolno zamenja. Zablatenost se kaže v slabi stabilnosti geometrijske lege tira. Če se tirna greda ne preseje ali delno/popolnoma zamenja, lahko pride do poškodbe planuma zaradi nepravilne porazdelitve sil, kot je prikazano na Sliki 19 (Zaletelj, 2006).



Slika 19: Poškodba planuma zaradi neizvedenega čiščenja tirne grede (Zaletelj, Flerin, 2006: str. 9)

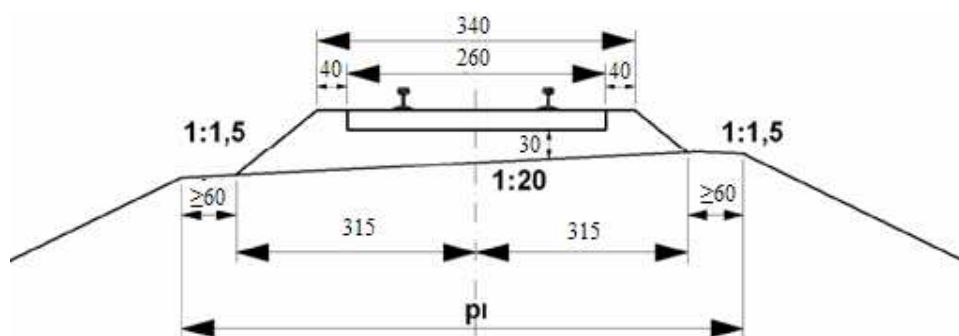
Tirna greda mora biti tudi odporna na zmrzal. Obstojnost tolčenca se določi z meritvami vpijanja vode in meritve obstojnosti v raztopini  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Preizkušanci po preizkusu morajo ostati kompaktni, brez odprtih razpok, odkruškov, lusk in drugih vidnih znamenj delovanja zmrzali.

#### 2.1.4.2 Dimenzija tirne grede

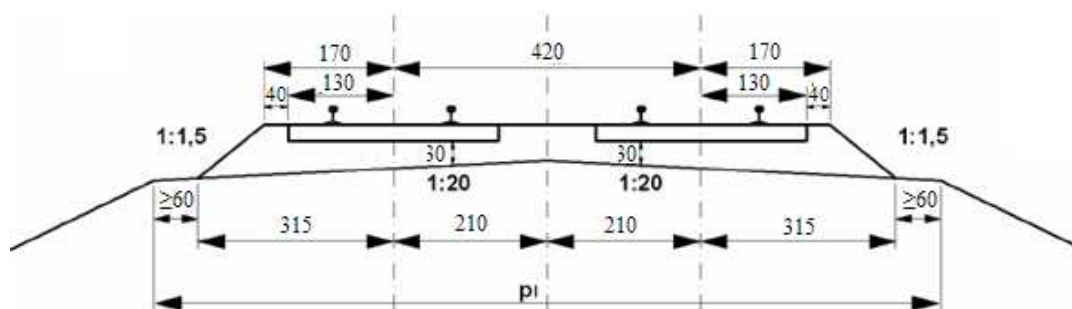
Obliko in dimenzijo prečnega prereza tirne grede določa vrsta proge, število in vrsta tirov, vrsta in dolžina pragov, nagib planuma, geometrija tira (prema ali krivina), dolžina tirnic (neprekinjeno zvarjeni tir ali klasični tir) in način vzdrževanja tira (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

Debelina tirne grede se meri od spodnjega roba praga do planuma. V Pravilniku o zgornjem ustroju železniških prog (2010) so podane minimalne debeline tirne grede za Slovenijo. Za glavne proge je minimalna debelina 30 cm, za regionalne proge 25 cm, pri stranskih postajnih tirih in industrijskih tirih pa 20 cm.

Da se zagotovi primerno odvodnjavanje, mora imeti planum ustrezen nagib. Planum enotirnih prog ima enostranski nagib 1:20, dvotirnih prog pa strešni nagib 1:20 (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010). Na spodnjih slikah sta prikazana prečna prereza tirne grede na enotirnih in dvotirnih progah v premi.



Slika 20: Prečni prerez tirne grede v premi in enostranskem nagibu planuma (glavna proga) (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 48.člen)



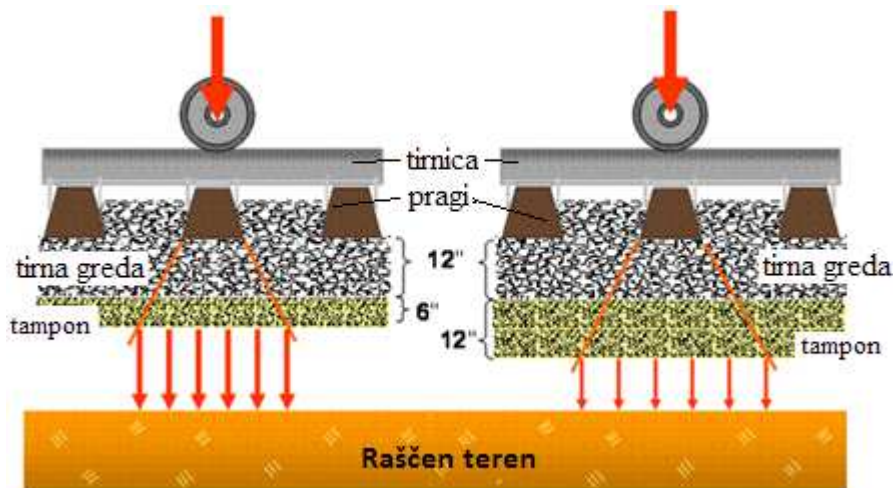
Slika 21: Prečni prerez tirne grede dvotirne proge v premi (novogradnja, glavna proga) (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010: 48.člen)

## 2.2 Spodnji ustroj

### 2.2.1 Tamponski sloj

Tamponski sloj je nosilna plast iz nevezanih zmesi kamnitih zrn med tirno gredo in planumom progovnega telesa. Prek tirne grede prevzame obremenitve prometa in jih prenese na spodnji ustroj. Je del zmrzlinško varnega sloja proge. Glavne naloge tamponskega sloja so (Zgonc, 2012):

- boljša porazdelitev prometne obremenitve,
- izboljšanje nosilnosti proge,
- dušenje vibracij,
- filtriranje,
- zagotavljanje odpornosti proti zmrzovanju,
- odvajanje padavin.



Slika 22: Zmanjšanje napetosti na teren s povečanjem debeline tamponskega sloja (Subballast properties, 2013)

Gradnja in vzdrževanje tamponskega sloja sta natančneje opisana v UIC Code 719 R (2008).

#### 2.2.1.1 Lastnosti tamponskega sloja

##### 2.2.1.1.1 Material in proizvodnja

Material za tamponski sloj so lahko drobljeni kamniti materiali iz zdravih, trdnih, gostih, na vodo in zmrzal obstojnih kamnin ali prodiv (Hribar, 2013). Kakovost materiala mora biti skladna s SIST EN 13242:2002/AC 2004 in EN 933-1 do 933-9 (TSC 06.200, 2003).

Tamponski sloj je lahko sestavljen iz več plasti različnih materialov, ki imajo različne funkcije, kot so plast za zaščito pred zmrzovanjem, filterska plast,... Poleg zmesi zrn pa ga lahko sestavljajo tudi s cementom ali z apnom obdelane plasti, bitumenske plasti, geosintetiki in plošče za zaščito pred zmrzovanjem (UIC Code 719 R, 2008). Bitumenska plast poveča togost proge in se uporablja pri progah z zelo veliko osno obremenitvijo ter na odsekih, kjer so slabi pogoji izvedbe odvodnjavanja. Bitumenska plast pod tirno gredo je prikazana na Sliki 23. Problem z bitumensko plastjo nastopi, če



postane togost proge prevelika, saj lahko pride do obrabe tirne grede in degradacije tira (Moravec, 2011).

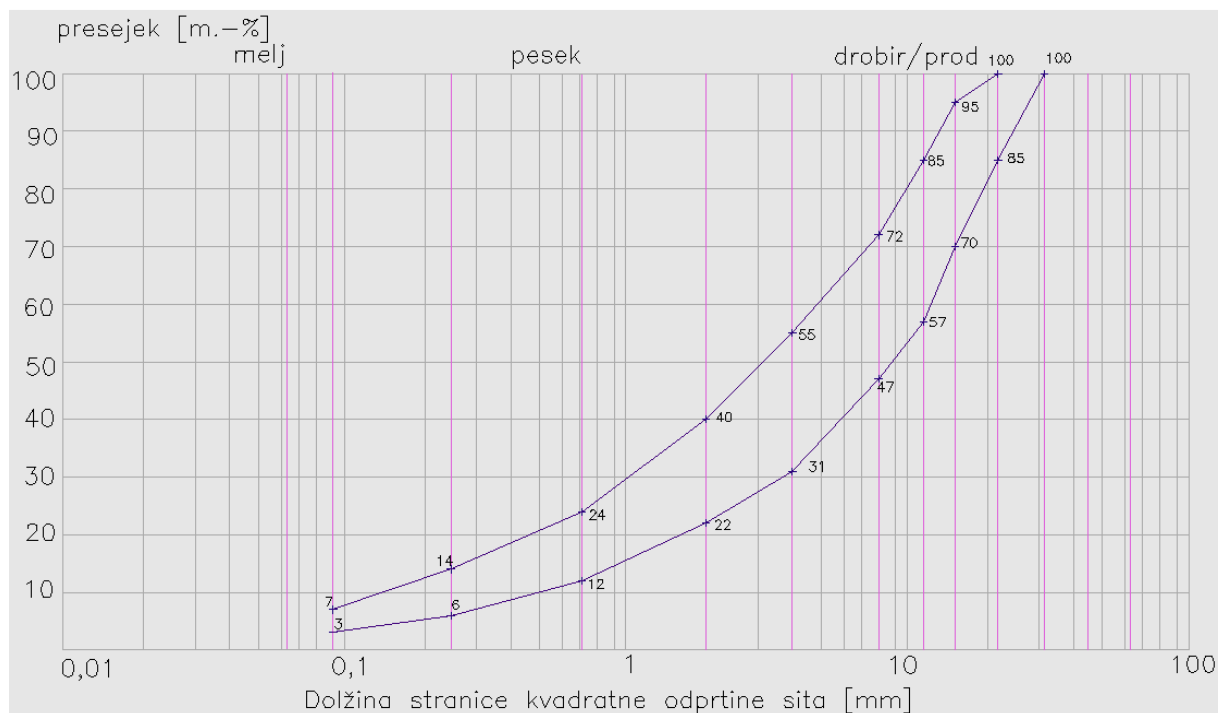


Slika 23: Bitumenska plast kot del tamponskega sloja pod tirno gredo (Subballast properties, 2013)

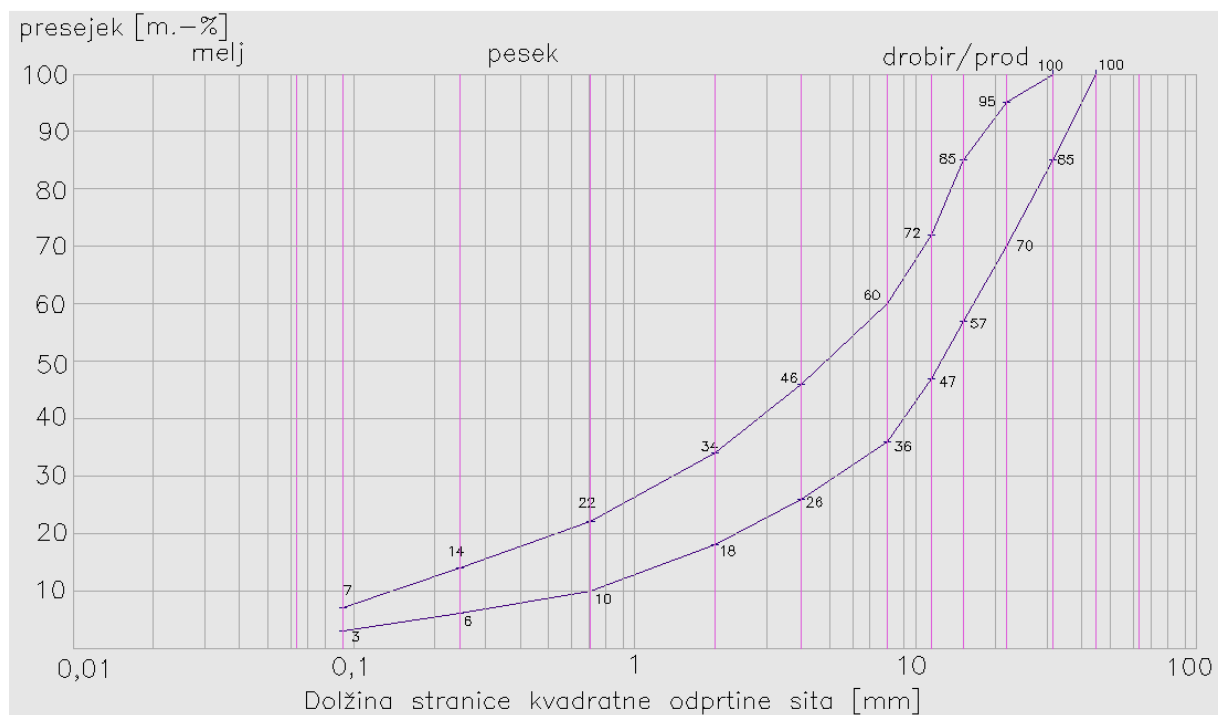
#### 2.2.1.1.2 Zrnavost

Material, ki je v direktnem stiku s tirno gredo mora biti dobro granuliran. Zrnavostna sestava tamponskega sloja mora ustrezati grafom iz TSC 06.200, ki so prikazani na naslednjih slikah (TSC 06.200, 2003). Hkrati pa morajo biti izpolnjeni parametri zrnivosti (Hribar, 2013):

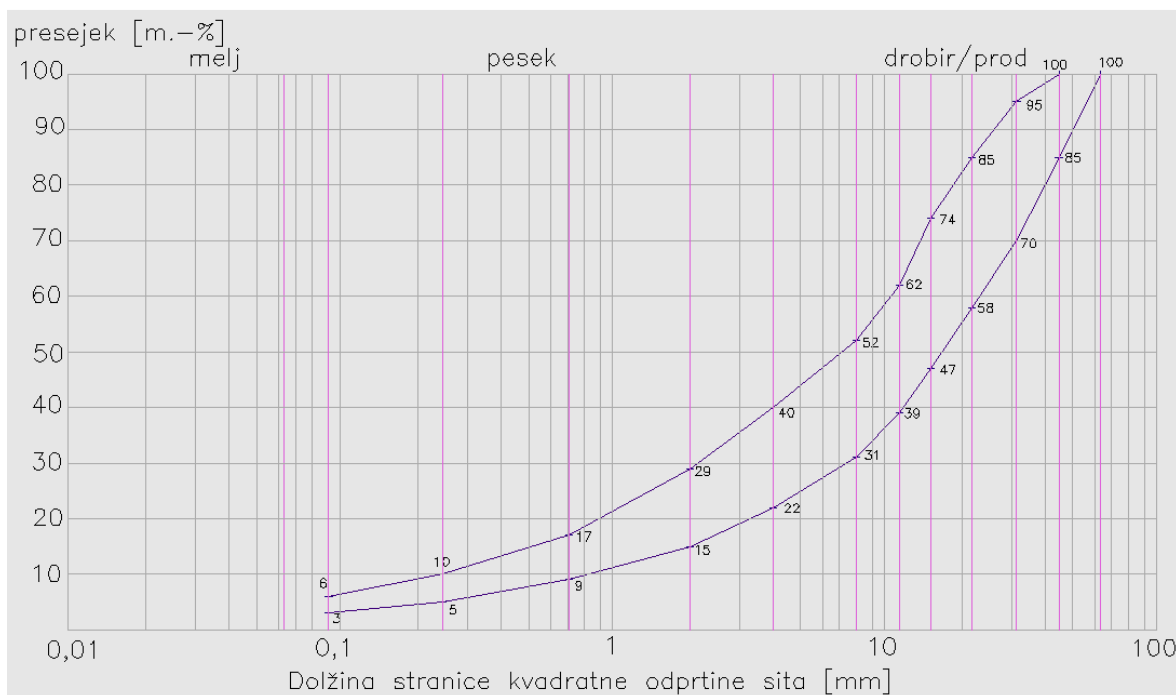
- delež zrn pod 0,063 mm 3 – 8 %,
- karakteristike finih delcev Metilen modro  $MB < 1,5$  g/kg,
- koeficient enakomernosti  $U > 15 - 50$ ,
- vrednost zrn neustrezne oblike z metodo kljunastega merila max. 20 %,
- drobna zrna ne smejo biti plastična,
- drobljenec sme obarvati raztopino natrijevega luga svetleje od standardne raztopine.



Slika 24: Območje sestave zmesi kamnitih zrn 0/22 mm za nevezane nosilne plasti (TSC 06.200, 2003: str. 6)



Slika 25: Območje sestave zmesi kamnitih zrn 0/31 mm za nevezane nosilne plasti (TSC 06.200, 2003: str. 6)

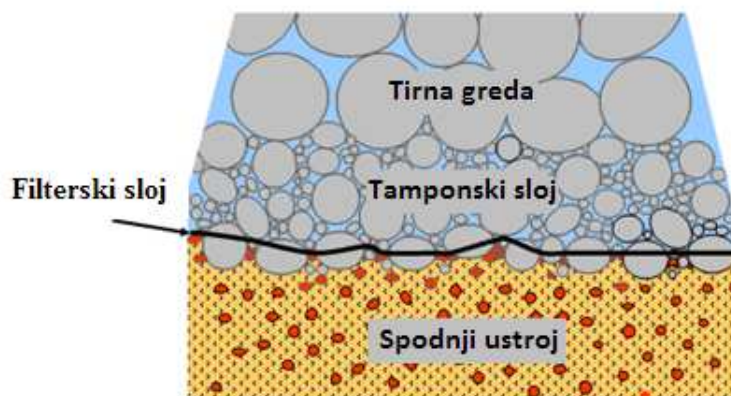


Slika 26: Območje sestave zmesi kamnitih zrn 0/45 mm za nevezane nosilne plasti (TSC 06.200, 2003: str. 6)

Če je tamponski sloj sestavljen iz več plasti različnih materialov, mora biti zagotovljena filterska stabilnost. To je lastnost kontakta dveh iz različnih materialov zgrajenih plasti, ki jo določa njuna zrnavostna sestava, tako da pod vplivom stalnega ali spremenljivega gradienta vode oziroma pod dinamično obremenitvijo prometa ni omogočeno prehajanje finih delcev iz ene v drugo plast. Filterska stabilnost kontakta se preveri z enačbo USBR ali Terzaghija (TSC 06.100, 2003), (UIC Code 719 R, 2008). Tamponski sloj mora preprečiti tudi fenomen nabrekanja. Do nabrekanja pride, ko se fini delci iz drobozrnatega spodnjega ustroja dvigajo v grobozrnato tirno gredo. Tamponski sloj mora v takem primeru vsebovati ustrezno količino materiala z velikostjo zrn pod 0,2 mm, saj ti zmanjšujejo hidravlično prepustnost. To se zagotovi s (UIC Code 719 R, 2008):

- sestavo tamponskega sloja iz peščenega gramoza, ki vsebuje okoli 20 % delcev pod 0,2 mm ali
- sestava tamponskega sloja iz dveh plasti: zgornja iz peščenega gramoza s količnikom enakomernosti  $U > 6$  in s količnikom ukrivljenosti  $1 < C_c < 3$  ter z zagotovitvijo spodnje filtrirne plasti, ki se jo lahko izboljša tudi z geosintetiki.

Tamponski sloj kot filterska plast je prikazan na Sliki 27.



Slika 27: Tamponski sloj kot filterski sloj (Subballast properties, 2013)

### 2.2.1.1.3 Kakovost materialov

Kakovost materiala za tamponski sloj mora biti skladen s SIST EN 13242:2002/AC 2004 in EN 933-1 do 933-9. Material se pod vplivom dinamičnih obremenitev prometa obrablja, zato mora biti odporen proti obrabi in proti drobljenju. Odpornost proti drobljenju se določi po metodi Los Angeles. Odpornost proti obrabi pa po metodi mikro-Deval. Po UIC Code 719 R (2008) mora ustrezati vrednostim:

- odpornost proti obrabi po metodi mikro-Deval,  $M_{DE} \leq 15$  ali 20,
- odpornost proti drobljenju po metodi Los Angeles,  $LA \leq 20$  ali 25 ali vrednostim

$LA + M_{DE} < 40$  za hitrosti  $V \geq 160$  km/h

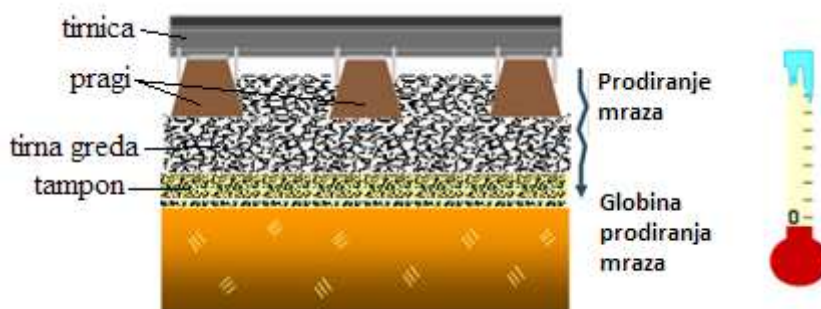
$LA + M_{DE} < 50$  za hitrosti  $V < 160$  km/h.

### 2.2.1.2 Dimenzija tamponskega sloja

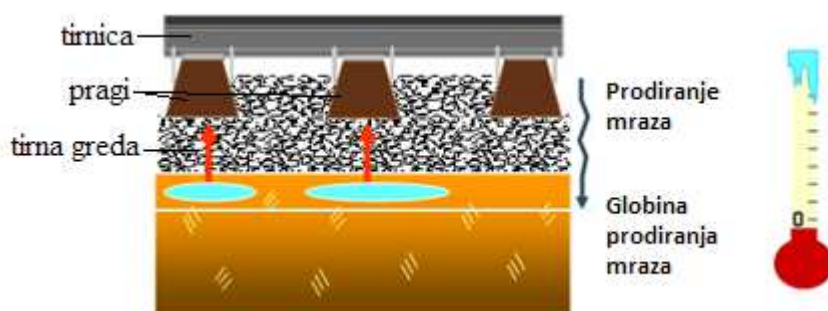
Tamponski sloj, skupaj s tirno gredo, prenaša obremenitve tira na spodnji ustroj. Zrnavostna sestava in dimenzije vplivajo na obnašanje in geometrijo tira. Debelina tamponskega sloja je odvisna od (UIC Code 719 R, 2008):

- lastnosti temeljnih tal (nosilnosti, odpornost na vodo in zmrzal,...),
- geoloških in hidroloških razmer trase proge,
- klimatskih razmer,
- prometne obremenitve (bruto tonaže, osne obremenitve) in hitrosti,
- sestave zgornjega ustroja (profil tirnice, tip praga, osni razmik pragov,...).

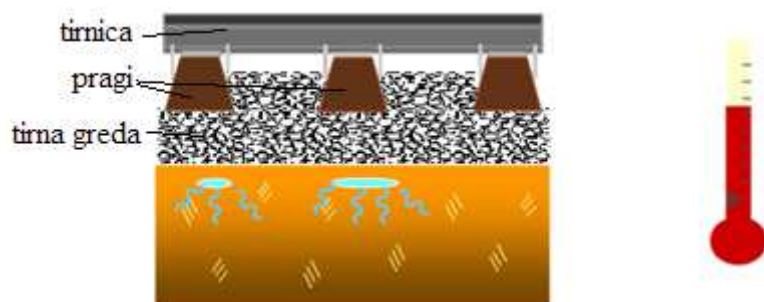
Debelina tamponskega sloja se določi glede na željeno nosilnost, ki se jo nato poveča še za zagotavljanje zaščite pred zmrzovanjem (Slika 28). Zmrzovanje spodnjega ustroja se prepreči z zadostno skupno debelino tirne grede in tamponskega sloja, ki morata biti na zmrzal neobčutljiva. Če spodnji ustroj ne zaščitimo, lahko pride do dviganja tira v času zmrzovanja (Slika 29) in zmanjšanja nosilnosti proge v času tajanja (Slika 30). Potrebna debelina za zaščito pred zmrzovanjem se določi iz karte informativnih vrednosti globin prodiranja mraza za Slovenijo. Če je globina prodiranja mraza zelo velika, in bi posledično rabili zelo veliko debelino tamponskega sloja, se lahko uporabi material s slabo toplotno prevodnostjo. Najpogosteje se za te namene uporabljajo ekstrudirane polistirenske plošče različnih debelin (UIC Code 719 R, 2008).



Slika 28: Tamponski sloj kot plast zaščite pred zmrzovanjem (Subballast properties, 2013)



Slika 29: Dviganje tira zaradi ledenih leč (Subballast properties, 2013)



Slika 30: Zmanjšanje nosilnosti v času tavanja (Subballast properties, 2013)

Tamponski sloj skrbi tudi za odvajanje padavin iz proge. Za zagotovitev odtekanja vode iz tamponskega sloja se določi minimalna vrednost prečnega nagiba tamponskega sloja ter planuma progovnega telesa. Prečni nagib mora biti v mejah med 3 – 5 %.

### 2.2.1.3 Izvedba in kakovost izvedbe tamponskega sloja

Za kakovostno izvedbo tamponskega sloja mora biti zagotovljena primerna togost planuma progovnega telesa, ki se meri z deformacijskim modulom  $E_{v2}$ , ki predstavlja deformabilnost vgrajenega materiala. Zmes kamnitih zrn za vgradnjo v tamponskega sloja mora imeti optimalni delež in enakomerno razporeditev vlage v zmesi, da se lahko zmes zrn optimalno vgradi. Pri vgradnji se mora zagotoviti enakomerna prostorska razporeditev zrn (TSC 06.200, 2003).

Po prevzetem planumu progovnega telesa je mogoče razprostriranje s finišejem. Če vgrajevanje ne poteka s finišejem, navoz materiala poteka čelno, z vožnjo po že razprostrti tamponski plasti. Vožnja ne sme potekati po planumu progovnega telesa ali z vozilom z zablatenimi kolesi. Takoj po

razprostrtju zmesi kamnitih zrn se mora izvesti zgoščanje, da se prepreči zmanjšanje vlage v zmesi. Na preskusnem polju se najprej določi (TSC 06.200, 2003):

- gostoto in vlago z neporušnim postopkom z izotopskim merilnikom, določenim v TSC 06.711, za kontrolo pa še z nadomestnimi postopki za določitev gostote in vlage po TSC 06.712,
- togost z določitvijo statičnega in dinamičnega deformacijskega modula po postopku določenim v TSC 06.720,
- optimalna vlaga in gostota po modificiranem postopku po Proctorju (SIST EN 13286-2) ter določitev sestave zmesi kamnitih zrn pred in po zgoščanju.

Na podlagi rezultatov preiskav na preskusnem polju se določi tehnološki postopek in vrsto sredstva za zgoščanje. Vsa dela razprostiranja in zgoščanja tamponskega sloja so strojna. Ročno zgoščanje ni dopustno (TSC 06.200, 2003).

Po izvedenem zgoščanju se preveri kakovost izvedenih del z določitvijo zgoščenosti in togosti. Zahteve glede zgoščenosti in togosti tamponskega sloja določajo vrsta proge, osna obremenitev in največja dovoljena progovna hitrost. Pri novogradnjah mora planum tamponskega sloja ustrezati (UIC Code 719 R, 2008):

- $\rho_d \geq 100 - 103$  % maksimalne suhe gostote določene po standardnem Proctorjevem preizkusu,  
98 – 100 % maksimalne suhe gostote določene po modificiranem Proctorjevem preizkusu,
- $E_{V2} \geq 120$  MN/m<sup>2</sup> in
- $E_{V2}/E_{V1} \leq 2,2$  ob vrednosti  $E_{V1}$  manj od minimalne vrednosti  $E_{V2}$ .

Spodnja mejna vrednost zgoščenosti ne sme biti manj od 3 % glede na srednjo zgoščenost (TSC 06.200, 2003).

## 2.2.2 Progovno telo

Progovno telo je del proge med zgornjim ustrojem in raščnim terenom. Njegov namen je zagotavljanje dobre podlage za zgornji ustroj, ustrezne nivelete ter prenos obtežbe na temeljna tla. Sestavljajo ga zemeljski in umetni objekti. Zemeljski objekti iz zemljin, kamnin ali za zemljine nadomestnih materialov so glede na položaj temeljnih tal lahko v nasipu, useku ali zaseku. Slika 31 prikazuje železniško progo v nasipu, slika 32 pa progo v useku.



Slika 31: Proga v nasipu (lasten vir)



Slika 32: Proga v useku (Railway track in cutting, 2013)

Vsi deli progovnega telesa morajo biti izdelani kakovostno. Vrhnja, zaključna plast nasipa ali temeljnih tal je prehodni sloj, ki zagotavlja ustrezno togost in vremensko obstojnost proge. Če so lastnosti v zaključnih plasteh nasipa, v dnu useka ali v planumu temeljnih tal že takšne, da zagotovijo ustrezno togost, zgoščenost in vremensko obstojnost, se kot prehodni sloj obravnava ta zaključna plast (TSC 06.100, 2003). Da se onemogoči mešanje slabše zemljine iz spodnjega ustroja z boljšo zgornjo, se planum temeljnih tal (pri usekih) in planum nasipa (pri nasipih) pogosto zaščitita z geotekstilom. Posebna pozornost pri progovnem telesu se mora nameniti tudi odvodnjavanju površinskih voda in podtalnice (Slokan, 2005).

## 2.2.2.1 Lastnosti progovnega telesa

### 2.2.2.1.1 Material

Progovno telo je zgornji del zemeljskih del, na katerem leži tamponski sloj oz. zgornji ustroj. Pri nasipih ga sestavlja navožen material, pri izkopu pa je lahko sestavljen iz zemljin v temeljnih tleh ali iz plasti navoženega materiala (UIC 719 R, 2008).

Najnižja plast nasipa, ki je na raščnem terenu, mora biti iz dobro graduiranega materiala z manj kot 5 % finih delcev ( $d < 0,063$  mm), ki ima dobre drenažne lastnosti, ki pa se lahko še dodatno izboljšajo z uporabo geosintetikov (UIC Code 719 R, 2008). Prehodni sloj pa mora biti iz mehansko in prostorsko obstojne ter na vplive vode in mraza odpornih zemljin in kamnin (TSC 06.100, 2003).

### 2.2.2.1.2 Zrnavost

Največja velikost zrn progovnega telesa se določi na podlagi njihove sposobnosti primerne razporeditve in zgoščanja, kar je povezano tudi z debelino plasti vgradnje. Največja velikost zrn praviloma ne sme biti večja od 600 mm ali od polovice debeline plasti nasipa (UIC Code 719 R, 2008).

Pomemben pokazatelj stopnje zrnivosti sta količnika zrnivosti. Količnik enakomernosti  $U$  določa primernost zgoščanja. Manjša vrednost količnika predstavlja bolj enakozrnato zemljino, ki ima slabo stopnjevano zrnivost in nima stabilne strukture. Zemljine so dobro graduirane, ko je količnik enakomernosti  $U > 6$ . Vrednost količnika ukrivljenosti  $C_c$  pa mora biti večja od 1 ter manjša od 3 (UIC Code 719 R, 2008).

Vrhna plast nasipa ali temeljnih tal, prehodni sloj, je zmrzlinško odporen sloj. Sestavljajo ga vremensko obstojni materiali, ki preprečujejo kapilarni dvig. Material prehodnega sloja mora imeti (TSC 06.100, 2003):

- nevezljive zemljine ali drobljeni kamniti material, katerega največje zrno ni večje od polovice debeline vgrajenega prehodnega sloja ali od 125 mm,
- dobro stopnjevano zrnivost s količnikom enakomerne zrnivosti  $U > 5$  (zaželjene vrednosti 8 – 50),
- delež zrn velikost do 0,063 mm (ne smejo biti plastična):
  - na deponiji do 5 m.-%
  - v vgrajeni plasti do 8 m.-%

v primeru, ko je količnik enakomerne zrnivosti  $U \geq 15$  in je zmes vgrajena do globine zmrzovanja.



### 2.2.2.1.3 Kakovost materialov

Material za progovno telo se preveri glede na občutljivost na vodo s preiskusom metilen modrim. Če ima zmes zrn vrednost  $MB < 1,0$  g/kg je neobčutljiva na vodo, če pa je  $MB > 2,0$  g/kg je občutljiva na vodo (UIC Code 719 R, 2008). Preveri se tudi vsebnost humoznih primesi. Zmes zrn sme obarvati raztopino natrijevega luga največ temno rumeno (TSC 06.100, 2003).

Material se mora preveriti tudi na občutljivost na zmrzovanje, saj se do globine zmrzovanja lahko v progovno telo vključi le material, ki ni občutljiv na zmrzovanje. Globina zmrzovanja se določi s pomočjo karte informativnih globin prodiranja mraza za Slovenijo. Material občutljiv na zmrzovanje je tisti, pri katerih se ob delovanju mraza in prisotnosti vode pojavijo ledene leče ali plasti ledu, ki povzročajo zmrzilske dvige in zmanjšanje nosilnosti pri odtajanju (UIC Code 719 R, 2008).

### 2.2.2.2 Izvedba in kakovost izvedbe progovnega telesa

Vgradnja materialov v progovno telo se sprti kontrolira, saj le s pravilno izvedbo od samega začetka, omogočimo pravilen raznos sil na raščen teren (UIC Code 719 R, 2008). Zemljina za vgradnjo v nasip mora imeti ustrezno vlago, da je omogočeno optimalno vgrajevanje. Navoz nasipnega materiala mora potekati po že razprostrti plasti tega materiala. Vozilo za navoz je odvisno od debeline nasipne plasti in kakovosti podlage. Material za prehodni sloj se lahko razprostire na planum nasipa ali planum temeljnih tal, če je bil ta planum že predhodno prevzet. Navoz prehodnega sloja lahko poteka le po že predhodno razprostrti zmesi kamnitih zrn za prehodni sloj. Razprostiranje zmesi kamnitih zrn v prehodni sloj poteka z grederjem in/ali buldozerjem (TSC 06.100, 2003).

Po razprostrtju se material primerno zgosti. Pri tem se mora doseči vsaj minimalni zahtevani deformacijski modul z enakomerno razporeditvijo po plasti. Na preskusnem polju se najprej določi (TSC 06.200, 2003):

- gostoto in vlago z neporušnim postopkom z izotopskim merilnikom, določenim v TSC 06.711, za kontrolo pa še z nadomestnimi postopki,
- togost z določitvijo statičnega in dinamičnega deformacijskega modula po postopku določenim v TSC 06.720,
- optimalna vlaga in gostota po modificiranem postopku po Proctorju (SIST EN 13286-2) ter določitev sestave zmesi kamnitih zrn pred in po zgoščanju.

Na podlagi rezultatov preiskav na preskusnem polju se določi tehnološki postopek in vrsto sredstva za zgoščevanje. Slika 33 prikazuje zgoščevanje z valjarjem.



Slika 33: Zgoščanje proge z valjarji (Obnova železniške proge odsek Lipovci – Murska Sobota, 2013)

Po izvedenem zgoščevanju se preveri kakovost izvedenih del, z določitvijo zgoščenosti in togosti. Zahteve glede zgoščenosti in togosti progovnega telesa določajo vrsta proge, osna obremenitev in največja dovoljena progovna hitrost. Pri novogradnjah se zahteva za (UIC Code 719 R, 2008):

- planum nasipa ali planum temeljnih tal (če se nasip ne izvede):
  - $\rho_d \geq 95$  % maksimalne suhe gostote, ki je določena z referenčnim testom (standardni Proctorjev preizkus ali modificirani Proctorjev preizkus),
  - $E_{V2} \geq 45$  MN/m<sup>2</sup> za drobnozrnate zemljine ali  
60 MN/m<sup>2</sup> za debelozrnate zemljine in
  - $E_{V2}/E_{V1} \leq 2,2$  ob vrednosti  $E_{V1}$  manj od minimalne vrednosti  $E_{V2}$ .
- planum progovnega telesa:
  - $\rho_d \geq 100$  % maksimalne suhe gostote določene po standardnem Proctorjevem preizkusu,  
95 % maksimalne suhe gostote določene po modificiranem Proctorjevem preizkusu,
  - $E_{V2} \geq 80$  MN/m<sup>2</sup> in
  - $E_{V2}/E_{V1} \leq 2,2$  ob vrednosti  $E_{V1}$  manj od minimalne vrednosti  $E_{V2}$ .

Spodnja mejna vrednost zgoščenosti ne sme biti manj od 3 % glede na srednjo zgoščenost (TSC 06.100, 2003).

### 2.2.3 Kontrola kakovosti izvedbe zemeljskih del in del na nevezani nosilni plasti

Gradnja železniške proge poteka po plasteh. Pri tem se za vsak vgrajen sloj progovnega telesa, tamponski sloj ter planum temeljnih tal sproti kontrolira kakovost s stopnjo zgoščenosti po Proctorju  $D_{Pr}$  in vrednostjo deformacijskega modula  $E_{v2}$ . Stopnja zgoščenosti po Proctorju  $D_{Pr}$  je razmerje med izmerjeno suho gostoto materiala in maksimalno suho gostoto določeno po Proctorju. Deformacijski modul  $E_{v2}$  pa je parameter, ki ponazarja deformabilnost vgrajenega materiala in je določen na osnovi nagiba krivulje obremenitev/posedek pri poskusu s krožno ploščo pri ponovni/drugi obremenitvi (TSC 06.720, 2003).

#### 2.2.3.1 Kontrola zgoščenosti

Sposobnost zgoščanja zemljine pri določeni energiji je odvisna od vlažnosti zemljine. Sestavni del kontrole kakovosti izvedenih zemeljskih del in del na nevezanih plasteh so zato meritve gostote in vlažnosti zemljine. Zaradi enostavnosti se večina del izvaja z indirektno metodo z izotopsko sondo, pri kateri pa se lahko pojavijo napake, zaradi možnih napak postopka. Zato se jih na značilnih plasteh proge mora dopolniti z direktnimi meritvami z nadomestnimi postopki (TSC 06.712, 2002). Nov postopek za kontrolo zgoščenosti je tudi kontinuirana kontrola zgoščenosti (CCC – angl. Continuous compaction control) (TSC 06.713, 2005).

##### 2.2.3.1.1 Nadomestni postopek

Nadomestni postopek je direktna meritev gostote in vlažnosti. Pri postopku se gostoto materiala določa tako, da maso izkopanega materiala iz temeljnih tal ali vgrajene plasti določimo s tehtanjem, prostornino izkopanega materiala pa tako, da jo nadomestimo z znanim volumnom nadomestnega materiala. Nadomestni postopki so (TSC 06.712, 2002):

- postopek s kalibriranimi valji,
- postopek nadomeščanja s peskom,
- postopek nadomeščanja z vodo.

Količnik mase izkopanega materiala in znanega volumna nadomestnega materiala nam da gostoto  $\rho$ , po sušenju izkopanega materiala pa lahko določimo še suho gostoto  $\rho_d$  in vlažnost  $w$  (TSC 06.712, 2002). Gostoto in suho gostoto se določi z enačbama:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w}, \quad (2)$$

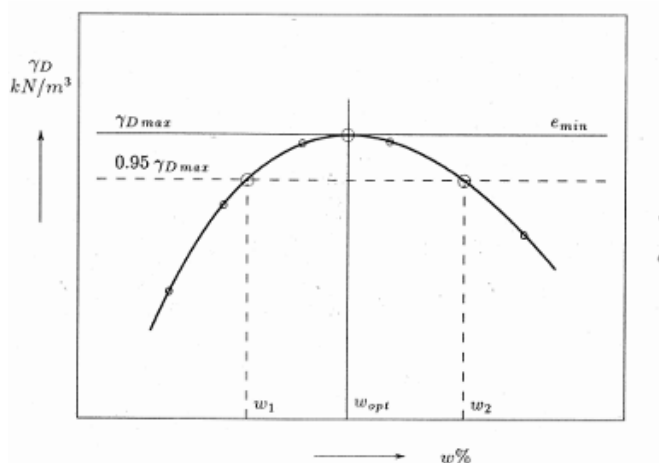
kjer so:

$\rho$  ... gostota vlažnega materiala,  
 $V$  ... volumen vlažnega materiala,  
 $\rho_d$  ... gostota suhega materiala,  
 $w$  ... delež vode v materialu.

Stopnja zgoščenosti predstavlja razmerje med suho gostoto materiala in maksimalno suho gostoto po Proctorjevem postopku, in se določi po enačbi:

$$D_{Pr} = \frac{\rho_d}{\rho_{dpr}}. \quad (3)$$

Kjer je  $\rho_{dpr}$  suha gostota po standardnem Proctorjevem postopku ali modificiranem Proctorjevem postopku. Proctorjev postopek se izvaja na vzorcih zemljine različnih vlažnosti, ki se jim določa suha prostorninska teža oziroma suha gostota. Rezultat prikaže odvisnost suhe gostote zmesi od vlažnosti iste zmesi, kot je prikazano na Sliki 34. Na podlagi te odvisnosti se določi optimalna vlažnost zgoščanja zemljine  $w_{opt}$ , pri kateri dosežemo največjo suho gostoto zmesi  $\rho_{dpr}$ . Pri vgradnji se zahteva določen odstotek maksimalne suhe gostote, zato ima zemljina lahko malo manjšo ali večjo vlažnost od optimalne vlažnosti zgoščanja zemljine.



Slika 34: Odvisnost suhe gostote zmesi od vlažnosti zmesi (Logar, 2013)

### 2.2.3.1.2 Postopek z izotopskim merilnikom

Indirektna meritev gostote in vlažnosti se izvaja s pomočjo izotopskega merilnika, ki je prikazan na Sliki 35. Izotopski merilnik sestavljajo sonda, detektor, naprava za odčitavanje in vir električne energije. Izotopska sonda deluje na podlagi radioaktivnih izotopov, ki oddajajo sevanje, ki lahko prodira skozi trdno snov. Iz stopnje oslabitve oziroma spremembe energije sevanja se potem lahko ugotovi lastnosti materiala. Oslabitev je odvisna od gostote vgrajenega materiala, dolžine poti in gostote elektronov izhodiščnega sevanja. Na hiter in nedestruktivni način se določi in odčita gostoto in vlago vgrajenega materiala na izbranem mestu. Na osnovi teh podatkov se potem določi suho gostoto (TSC 06.711, 2001).

Suho gostoto  $\rho_d$  se izvednoti z enačbami:

$$\rho_d = \rho - W, \quad (4)$$

kjer je:

$\rho$  ... gostota vlažnega materiala določena z izotopskim merilnikom [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$W$  ... vlaga, masa vode na prostorninsko enoto materiala, določena z izotopskim merilnikom [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].



Slika 35: Izotopska sonda (Logar, 2013)

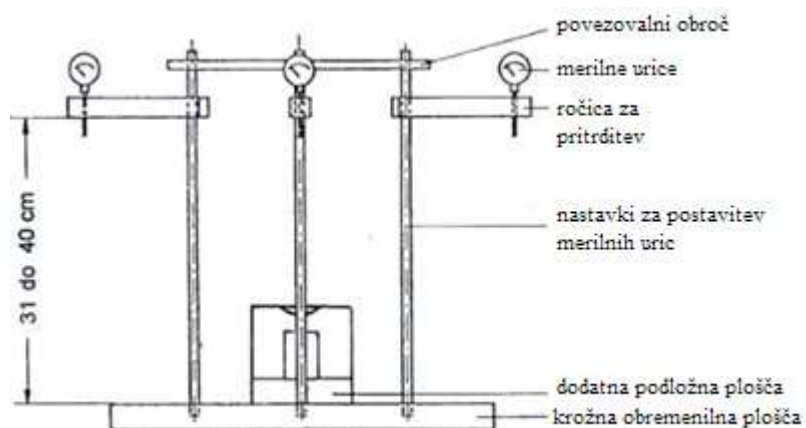
### 2.2.3.2 Kontrola togosti

Kontrola kakovosti izvedenih zemeljskih del in nevezanih nosilnih plasti zajema tudi meritev deformacijskih modulov. Deformacijski modul je poleg stopnje zgoščenosti osnova za določanje dimenzij proge. Z meritvami deformacijskih modulov se določi potek in velikost posedkov površine vgrajene plasti zrnatega materiala. Značilnosti posedanja (elastična in plastična komponenta) omogočajo določitev togosti ter kontrolo zgoščenosti vgrajenega materiala (TSC 06.720, 2003).

Deformacijski modul se določi s statičnim postopkom s krožno obremenilno ploščo ali dinamično obremenitvijo krožne plošče. Pojavljajo pa se tudi novi postopki kot je kontinuirana kontrola zgoščenosti (CCC – angl. Continuous compaction control).

#### 2.2.3.2.1 Statični postopek s krožno obremenilno ploščo

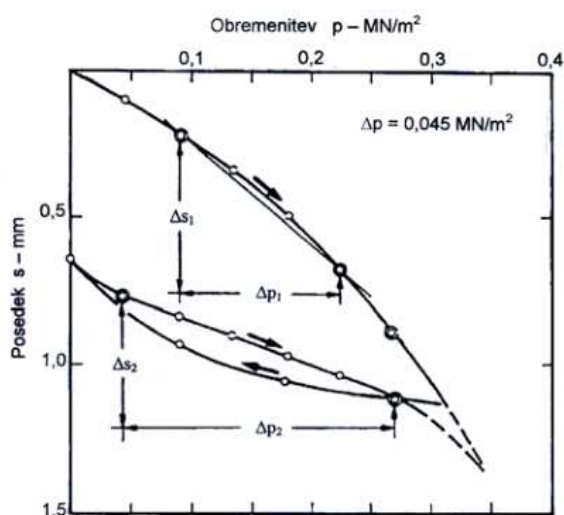
Statični deformacijski modul je vrednost deformabilnosti materiala, ki se določi s postopnim večkratnim obremenjevanjem krožne plošče na podlagi nagiba sekante krivulje posedanja v območju prve, druge ali tretje obremenitve (TSC 06.720, 2003).



Slika 36: Shema krožne obremenilne plošče z opremo za meritev posedkov (TSC 06.720, 2003: str. 5)

Togo krožno jekleno ploščo s premerom  $d = 30$  cm se obremeni z najmanj šestimi stopnjami v približno enakih korakih. Velikost posamezne obremenitve  $\Delta p$  je takšna, da bo posedek tal manjši od 2 mm ali da bo normalna napetost pod ploščo do  $0,5 \text{ MN/m}^2$ . Takoj po posamezni stopnji obremenitve se odčita posedek obremenilne plošče ter vsako naslednjo minuto, dokler razlika dveh zaporednih posedkov ni manjša od 0,02 mm. Šele ko je razlika zaporednih posedkov manjša od 0,02 mm, se lahko izvede naslednja obremenilna stopnja. Obremenilne stopnje imajo vrednosti (TSC 06.720, 2003):

- na vezljivi zemljini 0,02 do 0,03  $\text{MN/m}^2$ ,
- na mešanem materialu 0,03 do 0,04  $\text{MN/m}^2$ ,
- na gramozu in prodcu 0,05 do 0,06  $\text{MN/m}^2$ ,
- na drobljencu 0,06 do 0,07  $\text{MN/m}^2$ .



Slika 37: Določitev modulov  $E_{v1}$  in  $E_{v2}$  (TSC 06.720, 2003: str.12)

Deformacijski modul  $E_{v1}$  se določi za prirastek obtežbe med 2. in 5. stopnjo obremenitve prvega ciklusa obremenitve (Slika 37), po enačbi:

$$E_{v1} = 0,75 \frac{\Delta p_1}{\Delta s_1} d. \quad (5)$$

Po maksimalni obremenitvi plošče, se ploščo razbremeni v treh stopnjah (50 %, 25 % in 0 % največje obremenitve) in odčitajo se dvižki plošče vsako 1 minuto dokler se podlaga ne umiri. Po popolni razbremenitvi se ploščo spet obremeni z enako obtežbo kot pri prvem obremenjevanju, vendar le do predzadnje stopnje prvega ciklusa obremenitve (TSC 06.720, 2003). Deformacijski modul  $E_{v2}$  se določi med 1. in 6. stopnjo obremenitve drugega ciklusa obremenitve, po enačbi:

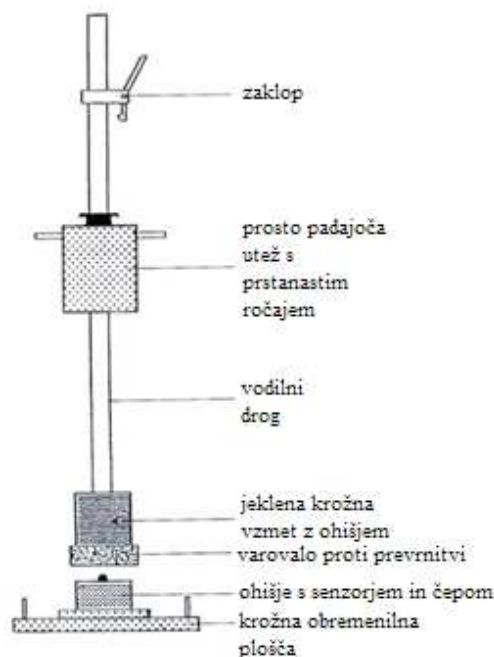
$$E_{v2} = 0,75 \frac{\Delta p_2}{\Delta s_2} d. \quad (6)$$

Za določitev togosti je merodajna vrednost deformacijskega modula  $E_{v2}$ , za določitev zgoščenosti materiala pa razmerje deformacijskih modulov  $E_{v2}/E_{v1}$  (TSC 06.720, 2003).

### 2.2.3.2.2 Dinamični postopek s krožno obremenilno ploščo

Dinamični deformacijski modul se določa z napravo, ki jo sestavlja krožna jeklena plošča premera  $d = 30$  cm, vodilni drog za prosto padajočo utež mase 10 kg, jeklena krožna vzmet z ohišjem in varovalom proti prevrnitvi, zaklop, ki zadrži utež ter elektronski merilec pospeška plošče. Naprava z merilcem pospeška plošče določi pospešek in ga dvakrat integrira za določitev posedka plošče. Iz sunka sile pa

se nato določi še dinamični deformacijski modul. Rezultat je povprečje treh sunkov padajoče uteži. Pri postopku je potrebno zagotoviti kalibrirano višino prostega pada uteži in ulov uteži po odboju (TSC 06.720, 2003).



Slika 38: Krožna obremenilna plošča s padajočo utežjo za meritev posedkov in določitev dinamičnega deformacijskega modula  $E_{vd}$  (TSC 06.720, 2003: str. 7)

### 2.2.3.3 Kontinuirna kontrola zgoščenosti

Pri kontroli kakovosti se pojavljajo novi postopki, ki izboljšujejo raven kakovosti. Eden izmed teh je kontinuirana kontrola zgoščenosti (CCC). Zgoščenost zemljine po kontinuirni kontroli zgoščenosti se določa z opremo nameščeno na merilnem valjarju s kolesom z jeklenim obročem. Postopek temelji na medsebojnem vplivu v nihanje vzbujene jeklene bandaže valjarja in materiala pod njo. Primeren je povsod, kjer je delo mogoče izvajati z vibracijskimi valjarji (TSC 06.713, 2005).

S hitrimi zaporednimi dinamičnimi obremenitvami se zemljina sproti obremenjuje in analizira. Kot rezultat dobimo zvezen zapis zgoščenosti, kar nam omogoča enostaven vpogled in določitev slabih mest, kjer so potrebni dodatni ukrepi. Hkrati na podlagi predhodno umerjenih dinamičnih značilnosti za kontrolo načrtovanega materiala je mogoča opredelitev glede na uveljavljene značilne vrednosti (gostota, deformacijski modul), ki so osnova za kontrolo kvalitete izvedenih del (TSC 06.713, 2005).

Rezultati so odvisni od značilnosti vgrajenega materiala (vrste, vlažnosti, zgoščenosti), debeline vgrajene plasti in podlage. Vrednosti kontinuirane kontrole zgoščenosti se po vgradnji zaradi vpliva prometa, vremena in konsolidacije lahko spremenijo (TSC 06.713, 2005).



Slika 39: Merilni valjar s sistemom za kontinuirano kontrolo zgoščanja (TSC 06.713, 2005: str. 8)



### 3 SILE IN NAPETOSTI V ŽELEZNIŠKI PROGI

V Evropi se je za proge, ki so pomembne za Evropo kot celoto vzpostavilo vseevropsko železniško omrežje TEN-T (angl. trans-European transport network TEN-T), na katerem veljajo pogoji interoperabilnosti. Vse glavne proge v Republiki Sloveniji so del TEN-T omrežja. Proge vseevropskega železniškega omrežja se po direktivi EU 2008/57/ES in tehničnih specifikacijah za interoperabilnost podsistema železniške infrastrukture (v nadaljevanju TSI) ločijo na proge za čisti potniški promet (P), proge za mešani potniški in tovorni promet (M) ter proge za čisti tovorni promet (F) (Zgonc, 2012).

Po določeni namembnosti prog, se proge še dodatno loči na sedem TSI kategorij. Proge kategorij I, II in III so proge visokih hitrosti, proge kategorij IV, V, VI in VII pa so proge konvencionalnih hitrosti. V Republiki Sloveniji sodijo vse proge v kategorijo konvencionalnih prog (Uredba o kategorizaciji prog, 2011).

Kategorija prog določa funkcionalne in tehnične zahteve, ki jih proga mora izpolnjevati za zagotavljanje interoperabilnosti znotraj vseevropskega železniškega omrežja. Proge za visoke hitrosti so namenjene le potniškemu prometu (I – P, II – P, III – P), za katerega so značilni lahki vlaki z visokimi in višjimi hitrostmi ter majhnimi osnimi obremenitvami, ki brez težav premagujejo večje nagibe prog (Zgonc, 2012). Proge konvencionalnih hitrosti pa so namenjene potniškemu, mešanemu in tovornemu prometu. TSI kategorizacija prog za konvencionalne hitrosti je prikazana v Preglednici 6.

Preglednica 6: TSI kategorizacija prog za konvencionalne hitrosti (TSI infrastruktura za konvencionalne proge, 2011: str. 66)

TSI kategorizacija prog	Vrste prometa		
	Potniški promet (P)	Tovorni promet (F)	Mešani promet (M)
<b>Nova ključna proga TEN (IV)</b>	IV – P	IV – F	IV – M
<b>Nadgrajena ključna proga TEN (V)</b>	V – P	V – F	V – M
<b>Nova druga proga TEN (VI)</b>	VI – P	VI – F	VI – M
<b>Nadgrajena druga proga TEN (VII)</b>	VII – P	VII – F	VII – M

Za posamezno TSI kategorijo prog so v tehničnih specifikacijah navedeni parametri tehničnega stanja, ki obsegajo svetli profil proge, osno obremenitev, progovno hitrost in dolžino vlaka. Tehnični parametri za konvencionalne hitrosti so podani v Preglednici 7 (TSI infrastruktura za konvencionalne proge, 2011). Proge za visoke hitrosti TSI kategorij I, II in III pa imajo v TSI navedeno le dolžino vlakov 400 m in največjo maso vlakov 1000 t (Zgonc, 2012).

Preglednica 7: Parametri tehničnega stanja za TSI kategorizacijo prog za konvencionalne hitrosti (TSI infrastruktura za konvencionalne proge, 2011: str. 67)

		Svetli profil	Oсна obremenitev [t]	Progovna hitrost [km/h]	Dolžina vlaka [m]
<b>TSI kategorizacija prog</b>	<b>IV – P</b>	GC	22,5	200	400
	<b>IV – F</b>	GC	25	140	750
	<b>IV – M</b>	GC	25	200	750
	<b>V – P</b>	GB	22,5	160	300
	<b>V – F</b>	GB	22,5	100	600
	<b>V – M</b>	GB	22,5	160	600
	<b>VI – P</b>	GB	22,5	140	300
	<b>VI – F</b>	GC	25	100	500
	<b>VI – M</b>	GC	25	140	500

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 7

	<b>VII – P</b>	GA	20	120	250
	<b>VII – F</b>	GA	20	100	500
	<b>VII – M</b>	GA	20	120	500

Minimalne zahteve TSI za podsistem infrastruktura ne omogoča možnosti za hkratno kombinacijo najvišje hitrosti in največje osne obremenitve. Pri najvišji hitrosti je možna osna obremenitev manjša od največje. Pri največji osni obremenitvi pa je možna nižja hitrost od najvišje določene v Preglednici 7. Na posameznih odsekih proge je, zaradi upoštevanja geografskih ali okoljskih omejitev ter omejitev zaradi naselij, upravičeno uvesti nižje hitrosti in/ali krajše vlake, kot so podane v Preglednici 7 (TSI infrastruktura za konvencionalne proge, 2011).

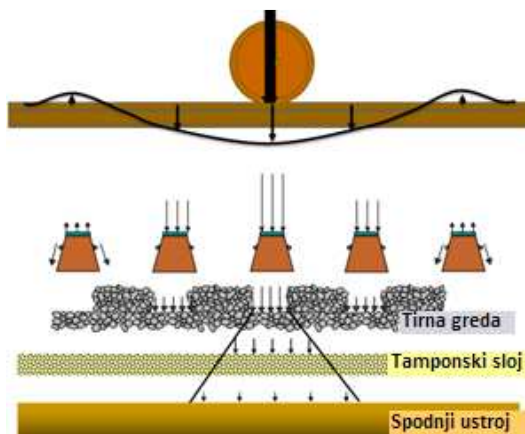
Obstoječe glavne proge v Republiki Sloveniji so namenjene mešanemu prometu in sodijo v kategorije V – M, VI – M in VII – M (Zgonc, 2012).

V zadnjem delu diplomske naloge bom za izbrano sestavo zgornjega ustroja in prometno obremenitev z večsistemsko Siemensovo lokomotivo SŽ 541, izračunala sile in napetosti skozi prerez železniške proge. Pri tem izračunam maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice, upogibne napetosti v tirnici, kontaktne napetosti na stiku tirnica – prag, kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda ter kontaktne napetosti na stiku tirna greda – progovno telo. V tem delu diplomske naloge bom zato predstavila teorijo za izračun sil in napetosti v železniški progi pod prometno obremenitvijo. Celoten izračun poteka statično z obremenitvijo mirujočega vozila. Ker pa se vozilo v naravi giblje z določeno hitrostjo, se ta vpliv upošteva z dinamičnim faktorjem po Eisenmannu (Esveld, 2001). Maksimalne strižne napetosti v tirnici se dobi z Eisenmannovo poenostavitvijo Hertzove teorije kontakta med kolesom in tirnico (Esveld, 2001). Za izračun upogibnih napetosti v tirnici pa upoštevam Zimmermannovo teorijo za izračuna sil in napetosti v zgornjem ustroju.

Tirna greda in spodnji ustroj sestavljata dvoplastni sistem, ki ga po Odemarkovem ekvivalentnem postopku (Esveld, 2001), (Lichtberger, 2005), obravnavam kot enakovreden homogen elastični polprostor. Pri tem upoštevam vertikalne napetosti, ki so posledica osne obremenitve, kot prevladujoče napetosti tega sistema. Mejne vrednosti napetosti planumov pa dobim po empirični formuli Heukeloma in Klompa (Esveld, 2001).

### 3.1 Teorija izračuna sil in napetosti v zgornjem in spodnjem ustroju proge

Osnovna predpostavka za izračun sil in napetosti v zgornjem in spodnjem ustroju je, da se tirnice obravnavajo kot kontinuirani vzdolžni nosilec brez lastne teže, ki ležijo na posameznih podporah – pragih. Pragi ležijo na ravni in elastični podlagi. Tirna greda in spodnji ustroj predstavljata dvoplastni sistem, ki ga nadomestimo z enakovrednim homogenim elastičnim polprostorom. Pri izračunu upogibnih napetosti upoštevamo le vertikalne sile. Prenos obremenitve je prikazan na Sliki 40.



Slika 40: Prenos vertikalne obremenitve (Track Performance, 2013)

V izračunu se upošteva efektivna kolesna obremenitev  $Q_{ef}$ , ki je enaka nominalni kolesni obremenitvi pomnoženi s faktorjem 1,2, ki upošteva povečanje kolesne obremenitve v krivinah zaradi primanjkljaja ali presežka nadvišanja (Esveld, 2001):

$$Q_{ef} = Q \cdot 1,2 \quad (7)$$

### 3.1.1 Dinamični vplivi po Eisenmannu

Pri izračunu upogibnih napetosti v tirnici najprej upoštevamo le statično obremenitev z mirujočim vozilom po Zimmermannovi metodi. Zaradi gibanja vozil z določeno hitrostjo po tiru, pa moramo upoštevati tudi vpliv dinamične prometne obremenitve. Vpliv dinamičnih sil dobimo tako, da statične vrednosti pomnožimo z dinamičnim koeficientom  $\alpha$  (Zgonc, 2012).

Za izračun dinamičnega koeficienta se v večini evropskih držav upošteva enačba po Eisenmannu. Enačba upošteva hitrost, stanje zgornjega ustroja in statistično verjetnost razsipanja rezultatov. Eisenmann je prišel do spoznanja, da so srednje vrednosti upogibnih napetosti in upogiba v nogi tirnice do hitrosti 200 km/h približno konstantne, posledično neodvisne od hitrosti. Posamezni rezultati pa se razsipajo okrog srednjih vrednosti. Razsipanje rezultatov narašča s hitrostjo. Razsipanje je normalno porazdeljeno in ga lahko opišemo s standardno deviacijo (Zgonc, 2012), (Esveld, 2001).

Dinamični koeficient po Eisenmannu se določi po (Esveld, 2001):

$$\alpha = 1 + t s \quad \text{za } V < 60 \text{ km/h}, \quad (8)$$

$$\alpha = 1 + t s \left(1 + \frac{V-60}{140}\right) \quad \text{za } 60 \text{ km/h} \leq V < 200 \text{ km/h}, \quad (9)$$

kjer je:

- $\alpha$  ... dinamični koeficient,
- $V$  ... hitrost [km/h],
- $t$  ... statistična verjetnost razsipanja rezultatov,
- $s$  ... standardna deviacija.

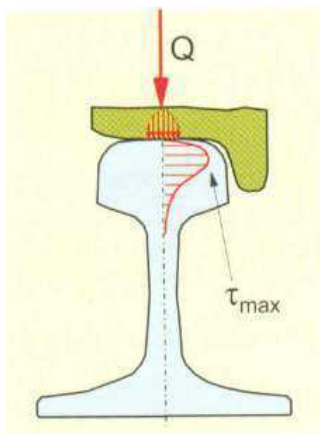
Stanje zgornjega ustroja je odvisno od standardne deviacije in ima vrednosti podane v Preglednici 8. Statistična verjetnost razsipanja rezultatov pa se upošteva z enkratnikom, dvokratnikom ali trikratnikom standardne deviacije glede na verjetnost zajetja vseh rezultatov razsipanja okrog srednje vrednosti in je prav tako podano v Preglednici 8 (Zgonc, 2012), (Esveld, 2001).

Preglednica 8: Vrednosti za stanje zgornjega ustroja  $s$  in statistično verjetnost razsipanja rezultatov  $t$  (Esveld, 2001: str. 84)

Verjetnost	$t$	Uporaba	Stanje zgornjega ustroja	$s$
68,3 %	1	Kontaktne napetosti, spodnji ustroj	Zelo dobro	0,1
95,4 %	2	Tirna greda	Dobro	0,2
99,7 %	3	Napetosti v tirnici, tirni pribor	Slabo	0,3

### 3.1.2 Teorija izračuna maksimalnih strižnih napetosti v glavi tirnice

Kolesna obremenitev povzroča strižne napetosti v glavi tirnice, ki se spreminjajo z globino, kot je prikazano na Sliki 41. Za izračun strižnih napetosti moramo najprej obravnavati kontakt med kolesom in tirnico (Esveld, 2001).



Slika 41: Razporeditev strižnih napetosti v glavi tirnice (Esveld, 2001: str. 86)

Po Hertzovi teoriji pride med dvema zaokroženima elastičnima telesoma, kot sta kolo in glava tirnice, do elipsaste kontaktne površine in razporeditve kontaktnih napetosti v obliki parabole. Dimenzija kontaktne elipse je odvisna od sile na kontaktno površino, medtem ko sta velika in mala polos elipse  $a$  in  $b$  odvisni od ukrivljenosti kolesa in tirnične glave. Največje kontaktne napetosti se pojavijo v sredini elipse in so po Hertzovi teoriji (Esveld, 2001):

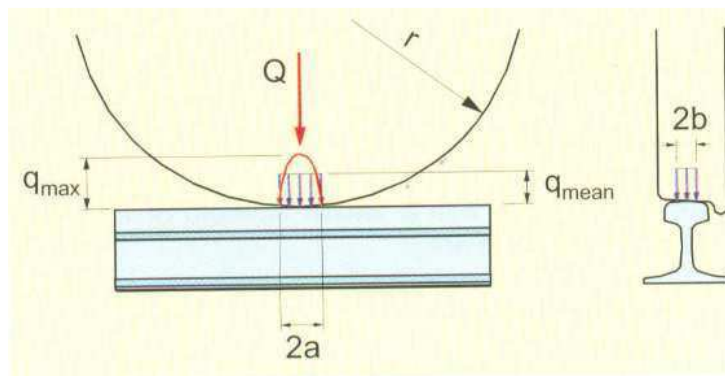
$$\sigma_{max} = \frac{3 Q}{2 \pi a b}, \quad (10)$$

kjer je:

$Q$  – kolesna sila [N],

$a, b$  – velika in mala polos elipse [mm].

Eisenmann je izračun kontaktnih napetosti na stiku kolo – tirnica poenostavil s predpostavko, da se problem lahko obravnava dvodimenzionalno, če je premer koles  $2r$  med 60 in 120 cm, vsi ostali radiji pa se upoštevajo kot neskončno veliki. S tem dobimo pravokotno kontaktno površino in kontaktne napetosti so v obliki parabole razporejene po pravokotniku, kot je prikazano na Sliki 42 (Esveld, 2001).



Slika 42: Predpostavljena razporeditev kontaktnih napetosti med kolesom in tirnico po Eisenmannu (Esveld, 2001: str. 86)

Če upoštevamo, da je kolesna sila  $Q$  enakomerno razporejena po kontaktni površini s širino  $2b$ , se kontaktne napetosti lahko opiše z enakomernimi kontaktnimi napetostmi po enačbi (Esveld, 2001):

$$q_{mean} = \sqrt{\frac{\pi E Q}{64 (1 - \nu^2) r b}}, \quad (11)$$

kjer je:

$Q$  – kolesna sila [N],  
 $r$  – radij kolesa [mm],  
 $2b$  – širina kontaktne površine kolo – tirnica [mm],  
 $E$  – modul elastičnosti [N/mm<sup>2</sup>],  
 $\nu$  – Poissonov količnik.

Če upoštevamo še vrednosti za  $E = 2,1 \cdot 10^5$  N/mm<sup>2</sup>,  $\nu = 0,3$  in  $b = 6$  mm dobimo bolj praktično formulo:

$$q_{mean} \approx 1374 \sqrt{\frac{Q}{r}}, \quad (12)$$

kjer je kolesna sila  $Q$  v kN in radij kolesa  $r$  v mm.

S pomočjo Boussinesqove teorije z enakomerno razporejenimi napetostmi v polprostoru se lahko določijo maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice  $\tau_{max}$  po enačbi (Esveld, 2001):

$$\tau_{max} \approx 0,3 q_{mean} \approx 412 \sqrt{\frac{Q}{r}}. \quad (13)$$

Maksimalne strižne napetosti potekajo vzdolžno po celi dolžini tirnice in se zmanjšajo ob nastopu upogibnih napetosti v tirnici. Iz enačbe (13) vidimo, da strižna napetosti ni prenosorazmerna kolesni obremenitvi  $Q$ . Odvisna pa je tudi od radija kolesa  $r$ .

Mejna strižna napetost  $\tau_u$  se določi po enačbi (Esveld, 2001):

$$\tau_u \approx 0,3 \sigma_z, \quad (14)$$

kjer je  $\sigma_z$  natezna trdnost tirničnega jekla [N/mm<sup>2</sup>]. Za tirnice kakovostnega razreda 260, z minimalno natezno trdnostjo 880 N/mm<sup>2</sup>, je mejna strižna napetost 264 N/mm<sup>2</sup>.

Ob upoštevanju enačb (13) in (14) lahko izračunamo maksimalno statično kolesno silo  $Q_{max}$  [kN] po tem kriteriju v odvisnosti od polmera kolesa  $r$  in natezne trdnosti tirničnega jekla  $\sigma_z$  kot sledi (Esveld, 2001):

$$Q_{max} = 4,9 \cdot 10^{-7} r \sigma_z^2 \quad (15)$$

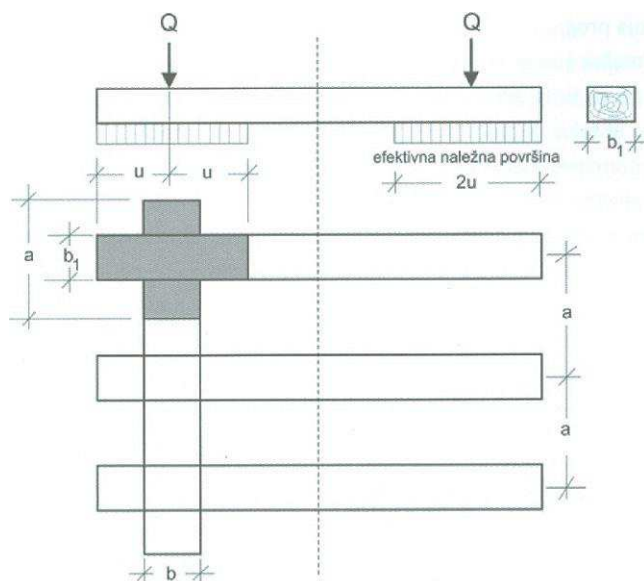
kjer je  $r$  [mm],  $\sigma_z$  [N/mm<sup>2</sup>] in  $Q_{max}$  [kN]. V enačbi je že upoštevan varnostni faktor za glavne proge 1,1 (Lichtberger, 2005).

Iz enačbe sledi, da maksimalna statična kolesna sila oziroma maksimalna osna obremenitev, po kriteriju mejne strižne napetosti, narašča s kvadratom natezne trdnosti tirničnega jekla.

### 3.1.3 Teorija izračuna sil in upogibnih napetosti v tirnici po Zimmermannovi metodi

Za izračun upogibnih momentov in upogibnih napetosti v tirnici se uporablja več metod, ki se ločijo po času nastanka in natančnosti izračuna. V večini evropskih držav se uporablja metoda po Zimmermannu, ki je teoretično najbolj utemeljena in izpopolnjena. Po tej metodi lahko poleg upogibnega momenta in upogibnih napetosti v tirnici določimo tudi tlačne napetosti oziroma pritisk tirnice na prag in posedek tirnice pod prometno obremenitvijo (Zgonc, 2012).

Zimmermann je predpostavil, da je tirnica vzdolžni kontinuiran nosilec brez teže na elastični podlagi. Upogib tirnice med dvema pragoma je zaradi elastične podajnosti zgornjega ustroja zelo majhen, zato lahko prečne prage zamenjamo z namišljenimi vzdolžnimi pragi, ki imajo enako naležno površino kot prečni pragi. Pri izračunu se upošteva efektivna naležna površina praga s širino  $2u$ , na bližnjem območju tirnice. Srednji del praga se, zaradi neenakomernega podbijanja praga, pri prenosu obremenitve ne upošteva (Esveld, 2001), (Zgonc, 2012).



Slika 43: Namišljeni vzdolžni prag (Zgonc, 2012: str. 46)

Širina namišljenega vzdolžnega praga se določi po enačbi:

$$b = \frac{2 u b_1}{a}, \quad (16)$$

kjer je:

- $b$  ... širina namišljenega vzdolžnega praga,
- $b_1$  ... širina prečnega praga,
- $u$  ... razdalja med osjo tirnice in koncem praga,
- $a$  ... razmik pragov.

Vpelje se tudi konstanto zgornjega ustroja  $L$  na elastični podlagi, ki se izračuna po enačbi:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}}, \quad (17)$$

kjer je:

$E$  ... elastični modul jekla tirnice,  
 $I$  ... vztrajnostni moment tirnice,  
 $b$  ... širina namišljenega vzdolžnega praga,  
 $C$  ... koeficient podajnosti tira.

Običajne vrednosti za  $L$  so med 50 in 120 cm. Iz enačbe lahko sklepamo, da če uporabimo tirnico boljše kvalitete, z večjim vztrajnostnim momentom  $I$ , dobimo večjo vrednost  $L$ , iz česar sledi, da se bodo sile prenesle na večje število pragov, zaradi česar dobimo manjše napetosti na podlago. Če pa imamo boljšo podlago in s tem večjo vrednost koeficienta podajnosti tira  $C$ , dobimo manjšo vrednost  $L$ , kar pomeni, da se bodo sile prenesle na manj pragov in zato dobimo večje napetosti na podlago.

Zimmermann je vpeljal tudi koeficient podajnosti tira  $C$ , ki nam pove, kolikšna sila mora delovati na  $\text{cm}^2$  površine praga, da se prag posede za 1 cm. Koeficient podajnosti tira je izhodiščna hipoteza pri izračunu zgornjega ustroja, saj upošteva tudi kvaliteto oziroma elastičnost podlage. V praksi elastičnost in homogenost podlage nista vedno enaki, zato ta predpostavka velja le na ožjem območju v velikosti nekaj milimetrov. Velikost posedka praga  $y$  se spreminja od praga do praga in na njega vpliva več dejavnikov. Vrednost koeficienta podajnosti tira  $C$  se giblje med 20 in  $600 \text{ N/cm}^3$ . Pri izračunu ponavadi upoštevamo, da je podlaga dobra in je koeficient podajnosti  $C = 100 \text{ N/cm}^3$  (Zgonc, 2012).

Če se predpostavi elastična podajnost podlage, je pritisk grede na vzdolžni prag  $p$  [ $\text{N/cm}^2$ ] premosorazmeren posedku praga  $y$  [cm]. Pri tem je koeficient podajnosti tira  $C$  [ $\text{N/cm}^3$ ] enak koeficientu proporcionalnosti. Pritisk tirne grede na vzdolžni prag  $p$  se določi po enačbi (Zgonc, 2012):

$$p = C y. \quad (18)$$

Enačba upogiba tirnice oz. posedka praga pod posamično kolesno silo  $Q$  je:

$$y = \frac{Q}{2bCL} \eta. \quad (19)$$

kjer je  $\eta$  ordinata vplivnice za upogib tirnice pod točkovno silo  $Q$  in se določi po:

$$\eta = e^{-\xi} [\cos\xi + \sin\xi]. \quad (20)$$

Upogibni moment tirnice pod točkovno silo  $Q$  dobimo po enačbi:

$$M = \frac{QL}{4} \mu, \quad (21)$$

kjer je  $\mu$  ordinata vplivnice za upogibni moment tirnice pod posamično silo  $Q$  in se določi po:

$$\mu = e^{-\xi} [\cos\xi - \sin\xi]. \quad (22)$$

Enačbo za pritisk  $p = C y$  dobimo iz enačbe upogiba tirnice oziroma posedka praga po enačbi:

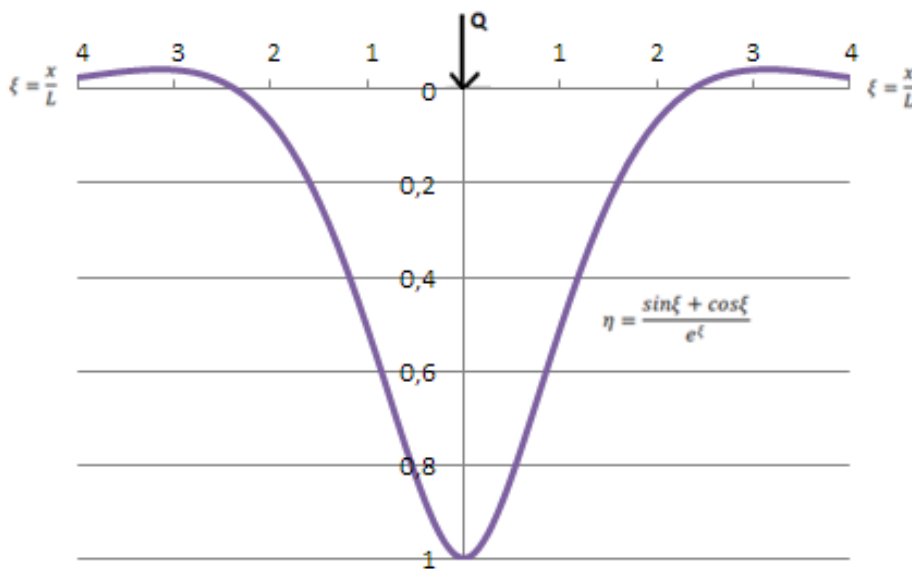
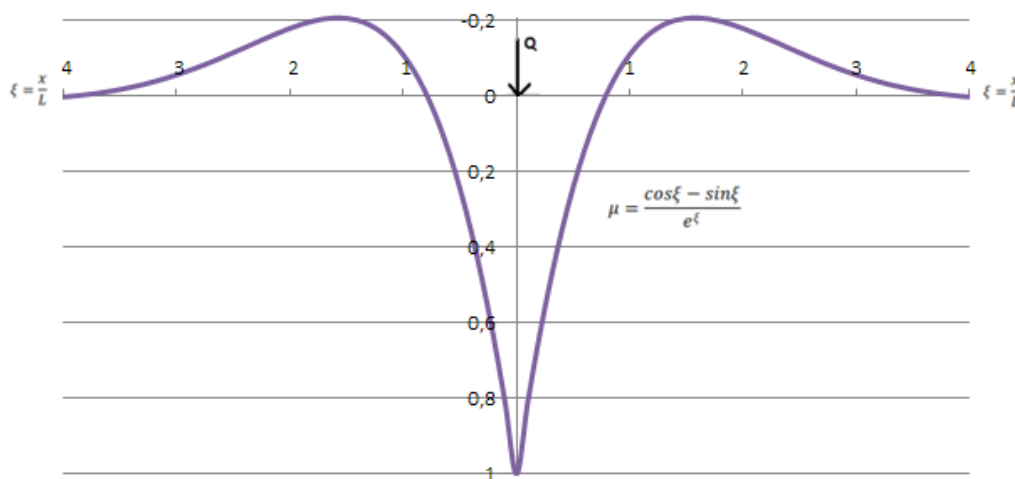
$$p = \frac{Q}{2bL} \eta. \quad (23)$$

V enačbah neznanke predstavljajo:

$y$  ... posedek,  
 $Q$  ... kolesna sila,  
 $b$  ... širina namišljenega vzdolžnega praga,

$C$  ... koeficient podajnosti tira,  
 $\zeta$  ... razdalja  $x/L$ ,  
 $L$  ... konstanta zgornjega ustroja,  
 $x$  ... oddaljenost prijemališča sile.

Enačbe (19), (21) in (23) nam povedo kakšen je upogib, upogibni moment tirnice in pritisk zaradi posamezne kolesne sile  $Q$  v točkah, ki so za  $x = L \zeta$  oddaljene od opazovanega prereza. Pri tem sta vplivnici  $\eta$  in  $\mu$  funkciji spremenljivke  $\zeta$  in določata vpliv kolesne sile  $Q$  v opazovanem prerezu. Vrednosti vplivnic  $\mu$  in  $\eta$  so grafično prikazane na Sliki 44 in Sliki 45.

Slika 44: Vplivnica za upogib  $\eta$ Slika 45: Vplivnica za moment  $\mu$ 

Iz grafičnega prikaza vplivnic  $\mu$  in  $\eta$  vidimo, da maksimalno vrednosti posedka, upogibnega momenta in pritiska dobimo, če je prijemališče posamezne sile točno v opazovanem prerezu, saj je potem vrednost obeh vplivnic  $\eta$  in  $\mu$  enako 1. Če prijemališče posamezne sile ni v opazovanem prerezu je vrednost vplivnic  $\mu$  in  $\eta$  manjše od 1.



Če v vplivnem območju opazovanega prereza deluje več sil, pride do sodelovanja vplivov posameznih sil. Pri tem se upogib, upogibni moment tirnice in pritisk povečajo, če se sila nahaja v pozitivnem območju vplivnice, ali pa se zmanjšajo, če se nahaja v negativnem območju vplivnice. Pri standardnih razdaljah osi železniških vozil je moment v opazovanem prerezu zaradi skupine sil praviloma manjši od momenta zaradi posamezne sile, upogib pri skupini sil pa je načeloma večji (Zgonc, 2012).

Če so kolesne sile približno enake, dobimo za izračun posedka, momenta in pritiska pri skupini sil, enačbe s superpozicijo enačb (19), (21) in (23):

$$y = \frac{\sum Q \eta}{2 b c L'} \quad (24)$$

$$M = \frac{\sum Q L \mu}{4}, \quad (25)$$

$$p = \frac{\sum Q \eta}{2 b L}. \quad (26)$$

Upogibne napetosti v tirnici zaradi dinamične prometne obremenitve izračunamo z upogibnim momentom po Zimmermannovi metodi pomnoženim z dinamičnim koeficientom  $\alpha$  in deljenim z odpornostnim momentom  $W$  tirnice:

$$\sigma_{din} = \frac{M \alpha}{W}. \quad (27)$$

Mejne upogibne napetosti tirnice se podane v Preglednici 9.

Preglednica 9: Mejne vrednosti ponavljajoče se upogibne napetosti v tirnici (Lichtberger, 2005: str. 65)

Natezna trdnost tirničnega jekla [N/mm <sup>2</sup> ]	Neprekinjeno zvarjen tir [N/mm <sup>2</sup> ]		Stikovani tir [N/mm <sup>2</sup> ]	
	Obrabljene	Nove neobrabljene	Obrabljene	Nove neobrabljene
880 (49 E1, 54 E1)	190	282	200	320
880 (60 E1)	200	282	210	320

Mejne vrednosti ponavljajoče se upogibne napetosti v tirnici so odvisne od kakovosti tirničnega jekla (njegove natezne trdnosti) in od vrste tira (neprekinjeno zvarjeni tir ali stikovani tir). Pri neprekinjeno zvarjenemu tiru so za nove neobrabljene tirnice kakovosti 260 z natezno trdnostjo tirničnega jekla 880 N/mm<sup>2</sup> vrednosti mejne napetosti pri ponavljajoči se obremenitvi 282 N/mm<sup>2</sup> (Lichtberger, 2005). Pri teh mejnih napetostih pri ponavljajoči se obremenitvi se že upošteva konstantne napetosti. Konstantne napetosti predstavljajo zaostale napetosti v tirnici in natezne napetosti zaradi nizkih temperatur (zimski čas). Vsaka od teh predstavlja nekje 100 N/mm<sup>2</sup> (Esveld, 2001), (Lichtberger, 2005).

### 3.1.4 Teorija izračuna kontaktnih napetosti na stiku tirnica – prag

Kolesna sila  $Q$  se preko tirnice prenaša na podložno ploščico, nato pa naprej na prag. Srednja kolesna sila, ki deluje na prag, je enaka (Esveld, 2001):

$$F_{sr} = \frac{Q a}{2 L}, \quad (28)$$

Maksimalna kolesna sila pod podložno ploščico  $F_{max}$  je odvisna od hitrosti, in se jo izračuna ob upoštevanju dinamičnega koeficienta  $\alpha$ :

$$F_{max} = \alpha F_{sr}, \quad (29)$$

kjer je:

$Q$  ... statična kolesna sila,  
 $a$  ... razmik med pragi,  
 $L$  ... konstanta zgornjega ustroja.

Srednja kolesna sila je odvisna od razmika pragov, kolesne obremenitve in konstante zgornjega ustroja. Iz enačbe vidimo, da je pri večjem razmiku med pragi  $a$ , večja sila pod podložno ploščico na prag. Pri večji vrednosti  $L$ , kar pomeni, da se sila prenaša na več pragov, pa dobimo manjšo silo na prag.

Poleg največje kolesne sile, ki deluje na prag, se mora pri izračunu kontaktnih napetosti na stiku tirnica – prag upoštevati tudi silo pritrditve na tirnico. Kontaktna napetosti na stiku tirnica – prag se določi po enačbi:

$$\sigma_{rs} = \frac{F_o + F_{max}}{A_{rs}}, \quad (30)$$

kjer je:

$F_o$  ... skupna sila pritrditve na tirnico,  
 $F_{max}$  ... maksimalna sila pod podložno ploščico na prag,  
 $A_{rs}$  ... ploščina podložne plošče oz. ploščina kontaktne površine med tirnico in pragom.

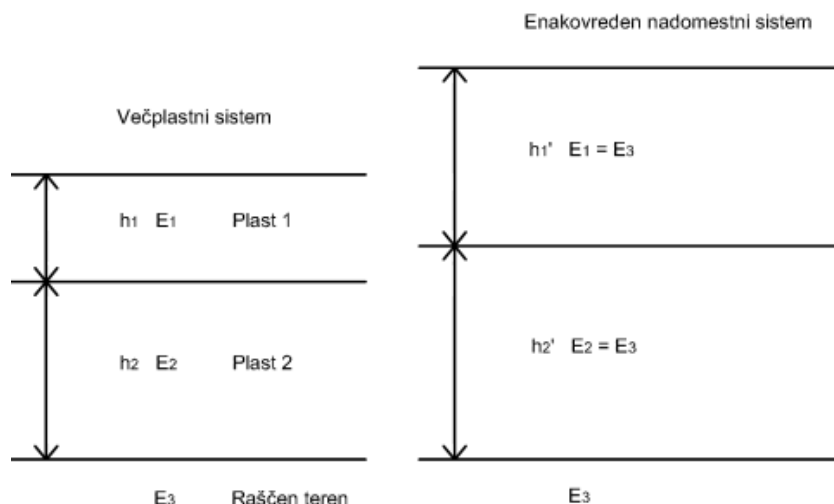
Mejne kontaktne napetosti med tirnico in pragom so za (Esveld, 2001):

- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| - leseni prag iz mehkega lesa | $\sigma_{rs} \leq 1,0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$ |
| - leseni prag iz trdega lesa  | $\sigma_{rs} \leq 1,5 - 2,5 \text{ N/mm}^2$ |
| - betonski prag               | $\sigma_{rs} \leq 4 \text{ N/mm}^2$ .       |

### 3.1.5 Teorija izračuna sil in napetosti v tirni gredi in spodnjem ustroju po Odemarku

Tirna greda in spodnji ustroj predstavljata dvoplastni sistem. Vertikalne napetosti, ki so posledica osne obremenitve, se upoštevajo kot prevladujoče napetosti dvoplastnega sistema. Vertikalne napetosti se določi, da se prepreči prekoračitev osne nosilnosti proge. Preobremenitev tirne grede lahko povzroči zmanjšanje kvalitete tirne geometrije. Preobremenitev spodnjega ustroja pa povzroči nabrekanje, pri katerem se material iz spodnjega ustroja dviga v tirno gredo (Esveld, 2001).

Izračun vertikalnih tlačnih napetosti v večplastnih sistemih si lahko poenostavimo, če spremenimo tak večplastni sistem v enakovreden homogen elastični polprostor. Izhodišče spremembe je izvednotenje togosti zgornjih plasti v odnosu na modul elastičnosti materiala v raščnem terenu. Debelino posamezne plasti preračunamo v ekvivalentno debelino plasti z enako togostjo, s tem da je osnova ekvivalentnosti vrednost modula elastičnosti raščnega terena (Žmavc, 2007).



Slika 46: Odemarkov ekvivalentni postopek (Žmavc, 2007: str. 222)

Debelino posamezne plasti preračunamo v nadomestno debelino plasti po Odemarku po enačbi (Esveld, 2001), (Lichtberger, 2005):

$$h_n' = h_n \cdot 0,9 \sqrt[3]{\frac{E_n}{E_{teren}}}, \quad (31)$$

kjer je:

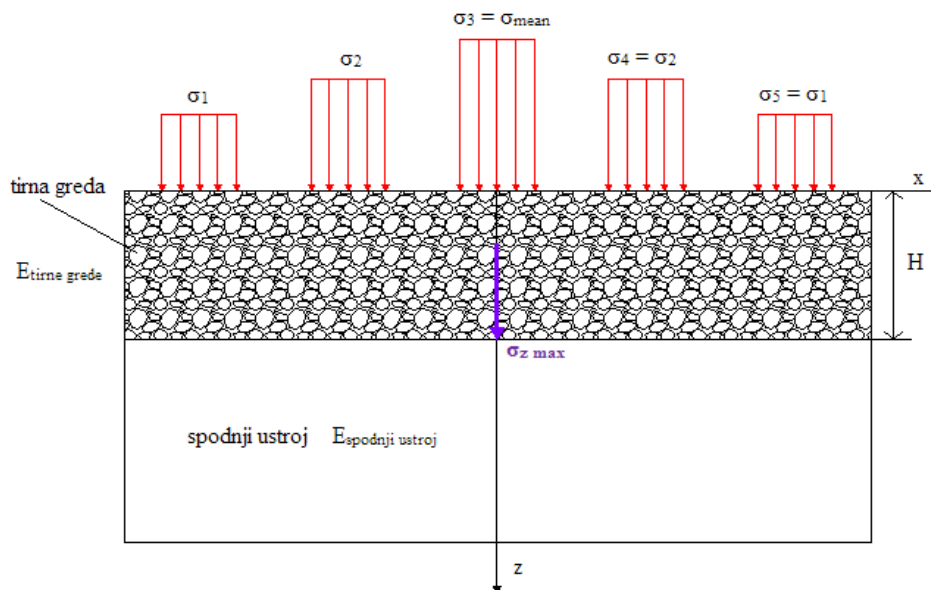
$h_n'$  ... nadomestna debelina plasti,

$h_n$  ... debelina plasti,

$E_n$  ... elastični modul tirne grede ali spodnjega ustroja,

$E_{teren}$  ... elastični modul raščenege terena.

Ko dobimo nadomestno debelino posameznih plasti z enotnim elastičnim modulom, lahko na poljubni globini določimo napetosti. Za izračun maksimalnih vertikalnih napetosti v plasteh proge se upošteva superpozicija vpliva sosednjih pragov. Slika 47 prikazuje tlačne napetosti pragov na tirno gredo po dolžini tirnice (Esveld, 2001).



Slika 47: Tirna greda in spodnji ustroj kot dvoplastni sistem (Esveld, 2001: str. 93)

Napetosti v progi zaradi napetosti pragov na tirno gredo  $\sigma_i$ , ki so posledica posamezne kolesne sile, z upoštevanjem dinamičnega vpliva, se določijo po enačbi (Esveld, 2001):

$$\sigma_i = \sigma_{max} \eta(x), \quad (32)$$

$$\sigma_{max} = \frac{F_{sr}}{A_{SB}} \alpha = \frac{Q a}{2 L A_{SB}} \alpha, \quad (33)$$

kjer je:

$Q$  ... kolesna sila,

$a$  ... osni razmik pragov,

$L$  ... konstanta zgornjega ustroja,

$A_{SB}$  ... kontaktna površina med pragom in tirno gredo za polovico praga,

$\alpha$  ... dinamični koeficient po Eisenmannu,

$\eta$  ... vplivnica za upogib tirnice pod točkovno silo.

Iz enačbe (33) vidimo, da ima na kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda, vpliv kontaktna površina polovice praga in tirne grede. Večja je kontaktna površina, manjše so napetosti. Vpliv ima tudi razmik pragov, ki premosorazmerno vpliva na napetosti na stiku prag – tirna greda. Pri boljši podlagi, ki ima večji koeficient podajnosti in posledično manjšo konstanto zgornjega ustroja, dobimo večje napetosti na stiku prag – tirna greda.

Pri določitvi vertikalnih napetosti v plasteh proge se lahko upošteva faktor  $t = 1$  (68,3 % verjetnost zajetja vseh rezultatov razsipanja okrog srednje vrednosti), ker sosednji pragi ne morejo biti istočasno izpostavljeni neugodni obremenitvi. Mejne kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda morajo biti manjše od  $0,50 \text{ N/mm}^2$  (Esveld, 2001).

Enakomerno razporejena obremenitev pod pragom na tirno gredo se lahko nadomesti z enakovrednimi trakastimi obremenitvami na širini praga. Če to predpostavimo, lahko problem obravnavamo kot dvodimenzionalno ravninsko napetostno stanje. Vertikalne napetosti v polprostoru pod enakomerno porazdeljenimi trakastimi obremenitvami, kot je prikazano na Sliki 48, lahko določimo po dvodimenzionalni teoriji elastičnosti (Šuklje, 1984), (Esveld, 2001). Napetosti se določi po enačbi (Šuklje, 1984), (Esveld, 2001), (Lichtberger, 2005):

$$\sigma_{zi} = \frac{\sigma_i}{\pi} \left[ \beta_1 - \beta_2 + \frac{1}{2} (\sin 2\beta_1 - \sin 2\beta_2) \right], \quad (34)$$

pri tem sta:

$$\beta_1 = \arctan \frac{x_i + \frac{b}{2}}{H_e}, \quad (35)$$

$$\beta_2 = \arctan \frac{x_i - b/2}{H_e}, \quad (36)$$

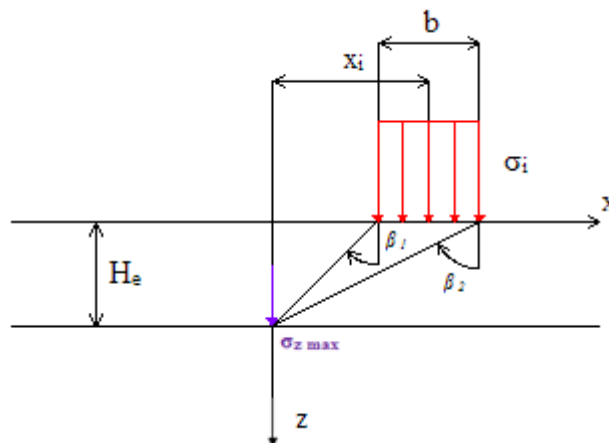
kjer je:

$x_i$  ... oddaljenost od osi praga,

$H_e$  ... globina na kateri se računajo napetosti,

$\beta_1$  ... kot do osi od začetka praga [rad],

$\beta_2$  ... kot do osi od konca praga [rad].



Slika 48: Napetosti zaradi trakaste obremenitve na polprostor (Esveld, 2001: str. 94)

Maksimalna vertikalna napetost na posamezni globini se določi s superpozicijo vpliva vseh napetosti zaradi enakomerno porazdeljenih trakastih obremenitev:

$$\sigma_{zmax} = \sum \sigma_{zi} . \quad (37)$$

Vertikalne napetosti, ki nastopijo v progi, zaradi vertikalne obremenitve določimo na mejah posameznih plasti, da se preveri mejne napetosti in izračunajo posedki plasti. Za določitev mejnih napetosti na teren sta Heukelom in Klomp podala empirično formulo (Lichtberger, 2005):

$$\bar{\sigma}_z = \frac{0,006 E_{dyn}}{1+0,7 \log n} , \quad (38)$$

kjer je:

$E_{dyn}$  – dinamični modul elastičnosti,

$n$  – število ciklov obremenitve med kritičnim obdobjem (1 milijon ciklov obremenitve (Esveld, 2001), (Lichtberger, 2005)).

Če je znan deformacijski modul plasti določen po postopku s krožno obremenilno ploščo  $E_{v2}$ , se za dinamični modul elastičnosti lahko predpostavi  $E_{dyn} = 1,2 - 2,5 E_{v2}$  (Lichtberger, 2005).

Elastični modul plasti v homogenem polprostoru se določi iz deformacijskega modula  $E_v$  po enačbi (TSC 06.720, 2003):

$$E = \frac{\pi}{3} (1 - \nu^2) E_v , \quad (39)$$

kjer je:

$E$  ... elastični modul materiala [N/mm<sup>2</sup>],

$\nu$  ... Poissonov količnik.

## 4 IZRAČUN SIL IN NAPETOSTI V ŽELEZNIŠKI PROGI

V tem delu diplomske naloge bom za izbrano sestavo zgornjega ustroja in obremenitev z večsistemsko Siemensovo lokomotivo SŽ 541, izračunala sile in napetosti skozi prerez železniške proge. Izračunala in prikazala bom, kako se sile prenašajo iz sloja v sloj. Sproti še preverim, če so napetosti, ki nastopijo pri izbrani sestavi proge zaradi prometne obremenitve SŽ 541, znotraj mejnih vrednosti napetosti.

Izračun za izhodiščne podatke naredim za hitrosti 60, 80 in 100 km/h. Nato pa za hitrost 80 km/h še primerjam napetosti, ki nastopijo v železniški progi, za izbrano sestavo zgornjega ustroja s podatki, kjer izhodiščnim podatkom izbrane sestave zgornjega ustroja spremenim eno komponento. Na ta način izračunam, kakšen vpliv na napetosti v železniški progi ima:

- uporaba tirnice z manjšim prečnim prerezom,
- povečanje osnega razmika med pragi,
- upoštevanje podatkov za obstoječo progo.

### 4.1 Podatki za večsistemsko lokomotivo SŽ 541

V letih 2006 – 2009 je bilo za posodobitev voznega parka SŽ nabavljenih 32 večsistemskih lokomotiv SŽ 541. To so štiriosne lokomotive z maso 87 ton, ki lahko vozijo po progah z različnimi sistemi elektrifikacije. Predvideno je bilo, da bodo te lokomotive zaradi možnosti vožnje po progah z različnimi sistemi elektrifikacije, vozile po vseh sosednjih železniških tirih, a je bil dogovor sklenjen le z avstrijsko stranjo. Z madžarsko stranjo je fizično še nemogoč, zaradi manjkajočega elektrificiranega odseka med Pragerskim in Hodošem (Tehnični podatki lokomotive SŽ 541, 2013).

Razpored osi SŽ 541 je Bo'Bo'. Sredinska razdalja osnovnih vozičkov je 9900 mm, medosna razdalja kolesnih dvojic v osnovnem vozičku pa je 3000 mm. Premer novih gonilnih koles je 1150 mm. Lokomotive SŽ 541 lahko dosežejo največjo hitrost 200 km/h. Osna masa pa znaša 21,75 t (Tehnični podatki lokomotive SŽ 541, 2013).



Slika 49: Večsistemski lokomotiva SŽ 541 (Miniaturna železnica, 2013)

## 4.2 Podatki zgornjega in spodnjega ustroja uporabljeni v izračunu

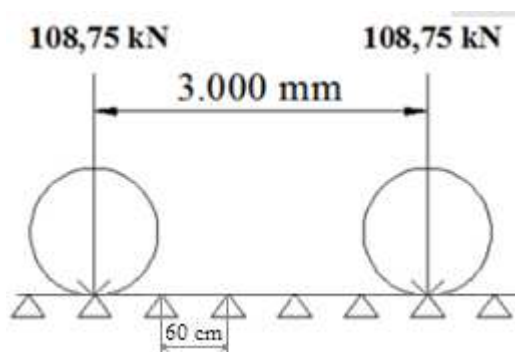
Izračun se naredi glede na mejno stanje utrujanja. Pri tem se efektivno kolesno silo pomnoži s faktorjem utrujanja  $\gamma_{FF} = 1,0$ .

V izračunu upoštevam tirnico oblike 60 E1 ( $W = 333,6 \text{ cm}^3$ ,  $I = 3038 \text{ cm}^4$ ,  $E = 2,1 \cdot 10^7 \text{ N/cm}^2$ ), (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010). Širina noge tirnice znaša  $b_t = 150 \text{ mm}$ . Osni razmik med pragi  $a = 60 \text{ cm}$ , širina pragov  $b_l = 26,5 \text{ cm}$  ter efektivna naležna površina praga je  $2ub_l = 2385 \text{ cm}^2$ . Upoštevam tudi, da je podlaga dobra in je koeficient podajnosti tira  $C = 100 \text{ N/cm}^3$  ter minimalno vrednost debeline tirne grede za glavne proge  $30 \text{ cm}$ .

Za skupno silo pritrditve na tirnico upoštevam vrednost  $F_o = 20 \text{ kN}$ . Za ploščino kontaktne površine podložne ploščice s pragom upoštevam  $A_{rs2} = 550 \text{ cm}^2$ .

Pri izračunu za novogradnjo uporabim vrednosti za tirno gredo  $E_{tirne\ grede} = 150 \text{ N/mm}^2$ ,  $\nu = 0,3$ , tamponski sloj  $E_v = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $\nu = 0,36$ , za progovno telo pa  $E_v = 80 \text{ N/mm}^2$ ,  $\nu = 0,4$ .

Na Sliki 50 je prikazana obtežna shema lokomotive SŽ 541, na podlagi katere izračunam sile in napetosti v železniški progi. Pri izračunu upoštevam le prvi podstavni voziček lokomotive, saj je drugi od prvega oddaljen več kot  $340 \text{ cm}$  in nima vpliva na prvega. Pri tem upoštevam, da je pri SŽ 541 prva os podstavnega vozička nad pragom številka 15.



Slika 50: Obtežna shema večsistemske lokomotive SŽ 541

V zadnjem delu izračuna, ko spreminjam eno komponento izhodiščnih podatkov izbranega zgornjega ustroja, uporabim spremenjene podatke:

- tirnico 60 E1 zamenjam s tirnico 49 E1 ( $W = 240,3 \text{ cm}^3$ ,  $I = 1816 \text{ cm}^4$ ,  $E = 2,1 \cdot 10^7 \text{ N/cm}^2$ , širina noge tirnice  $b_t = 125 \text{ mm}$ ) (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010),
- povečam razmik pragov s  $60 \text{ cm}$  na  $65 \text{ cm}$ ,
- namesto podatkov za novogradnjo, upoštevam podatke za obstoječe proge. Pri tem upoštevam slabo stanje zgornjega ustroja ( $s = 0,3$ ) ter manjše vrednosti deformacijskih modulov, ki veljajo za obstoječe proge (za tamponski sloj  $E_v = 50 \text{ N/mm}^2$ , pri progovnem telesu pa  $E_v = 20 \text{ N/mm}^2$ ).

### 4.3 Rezultati izračuna za izhodiščne podatke

Najprej določim efektivno kolesno silo, ki upošteva povečanje kolesne obremenitve v krivinah zaradi primanjkljaja ali presežka nadvišanja, po enačbi (7):

$$Q_{ef} = Q_{1,2} = 108,75 \text{ kN}_{1,2} = 130,5 \text{ kN}.$$

Ker računam za mejno stanje utrujanja se efektivno kolesno silo pomnoži še s faktorjem utrujanja  $\nu_{Ff} = 1,0$  in dobim:

$$Q_{eff} = Q_{ef} \cdot 1,0 = 130,5 \text{ kN}.$$

Nato po enačbi (16) določim širino namišljenega vzdolžnega praga:

$$b = \frac{2 u b_1}{a} = \frac{2385 \text{ cm}^2}{60 \text{ cm}} = 39,75 \text{ cm}$$

in po enačbi (17) konstanto zgornjega ustroja:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 E I}{b C}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 2,1 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} \cdot 3038 \text{ cm}^4}{39,75 \text{ cm} \cdot 100 \text{ N/cm}^3}} = 89,51 \text{ cm}.$$

#### 4.3.1 Maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice

Gonilna kolesa lokomotive SŽ 541 imajo premer  $2r = 1150 \text{ mm} = 115 \text{ cm}$ . Ker je premer koles med 60 in 120 cm ter ob upoštevanju vrednosti za jeklo  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$  in  $\nu = 0,3$  lahko za izračun maksimalnih strižnih napetosti v glavi tirnice uporabim poenostavljeni enačbi (12) in (13).

Kontaktne napetosti na stiku tirnice s kolesom lokomotive SŽ 541 se določijo po enačbi (12) in so:

$$q_{mean} \approx 1374 \sqrt{\frac{Q_{eff}}{r}} \approx 1374 \sqrt{\frac{130,5 \text{ kN}}{575 \text{ mm}}} \approx 654,57 \text{ N/mm}^2.$$

Maksimalne strižne napetosti, ki nastopijo v glavi tirnice, pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541, pa so po enačbi (13):

$$\tau_{max} \approx 0,3 q_{mean} \approx 412 \sqrt{\frac{Q_{eff}}{r}} \approx 412 \sqrt{\frac{130,5 \text{ kN}}{575 \text{ mm}}} = 196,28 \text{ N/mm}^2.$$

Iz enačbe (13) ugotovim, da maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice niso odvisne od hitrosti, jih pa določa kolesna obremenitev in radij koles.

Mejne strižne napetosti, ob upoštevanju minimalne natezne trdnosti jekla tirnice  $880 \text{ N/mm}^2$ , se določi po enačbi (14):

$$\tau_u \approx 0,3 \sigma_z \approx 0,3 \cdot 880 \text{ N/mm}^2 \approx 264 \text{ N/mm}^2.$$

Maksimalne strižne napetosti, ki nastopijo pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541, so nižje od mejne strižne napetosti za minimalno kakovost jekla tirnice.



### 4.3.2 Upogibne napetosti v tirnici

Pri izračunu upogibnih napetosti v tirnici upoštevam zelo dobro stanje zgornjega ustroja ( $s = 0,1$ ) ter 99,7 % statistično verjetnost zajetja rezultatov ( $t = 3$ ), ter s temi podatki po enačbi (8) in (9) izračunam dinamični koeficient za upoštevanje dinamičnega vpliva prometa. Dinamični koeficient pri hitrosti 60 km/h in ob predpostavki zelo dobrega stanja zgornjega ustroja znaša:

$$\alpha_1 = \alpha(V = 60 \text{ km/h}) = 1 + t s = 1 + 3 \cdot 0,1 = 1,30,$$

kar pomeni, da pri 99,7 % verjetnosti zajetja vseh rezultatov, dejanske vrednosti lahko znašajo do 30 % več od izračunane srednje vrednosti. Dinamični koeficient pri hitrosti 80 km/h znaša:

$$\alpha_2 = \alpha(V = 80 \text{ km/h}) = 1 + t s \left(1 + \frac{V-60}{140}\right) = 1 + 3 \cdot 0,1 \left(1 + \frac{80-60}{140}\right) = 1,34,$$

torej so dejanske vrednosti lahko do 34 % večje od izračunanih srednjih vrednosti. Pri hitrosti 100 km/h pa znaša dinamični koeficient:

$$\alpha_3 = \alpha(V = 100 \text{ km/h}) = 1 + t s \left(1 + \frac{V-60}{140}\right) = 1 + 3 \cdot 0,1 \left(1 + \frac{100-60}{140}\right) = 1,39,$$

kar pomeni, da so dejanske vrednosti lahko tudi do 39 % večje.

Pri izračunu upogibnih napetosti v tirnici je merodajen maksimalni upogibni moment, zato je treba preveriti pod katero silo v opazovanem prerezu se pojavijo maksimalni upogibni momenti. Pri lokomotivi SŽ 541, katere podstavni voziček sestavljata dve osi, je vseeno v katerem opazovanem prerezu prijemališča sile se računa maksimalne upogibne momente, saj v obeh primerih dobimo enake rezultate. Jaz v izračunu upoštevam opazovalni prerez prve sile.

Ordinata vplivnice za upogibni moment se določi po enačbi (22). Najprej pa določimo vrednost  $\xi$  v prvi osi:

$$\xi_1 = \frac{x}{L} = \frac{0 \text{ cm}}{89,51 \text{ cm}} = 0,00$$

$$\mu_1(0,00) = e^{-\xi} [\cos\xi - \sin\xi] = 1,00$$

in za drugo os:

$$\xi_2 = \frac{x}{L} = \frac{300 \text{ cm}}{89,51 \text{ cm}} = 3,3515$$

$$\mu_2(3,3515) = e^{-\xi} [\cos\xi - \sin\xi] = -0,027.$$

Maksimalne upogibne momente v tirnici pod prvo osjo lokomotive SŽ 541 izračunam po enačbi (25) in dobim:

$$M = \frac{\sum Q_{eff} L \mu}{4} = \frac{130,5 \text{ kN} \cdot 89,51 \text{ cm} \cdot 1}{4} + \frac{130,5 \text{ kN} \cdot 89,51 \text{ cm} \cdot (-0,027)}{4} =$$

$$= 2920,34 \text{ kNcm} - 78,74 \text{ kNcm} = 2841,59 \text{ kNcm}$$

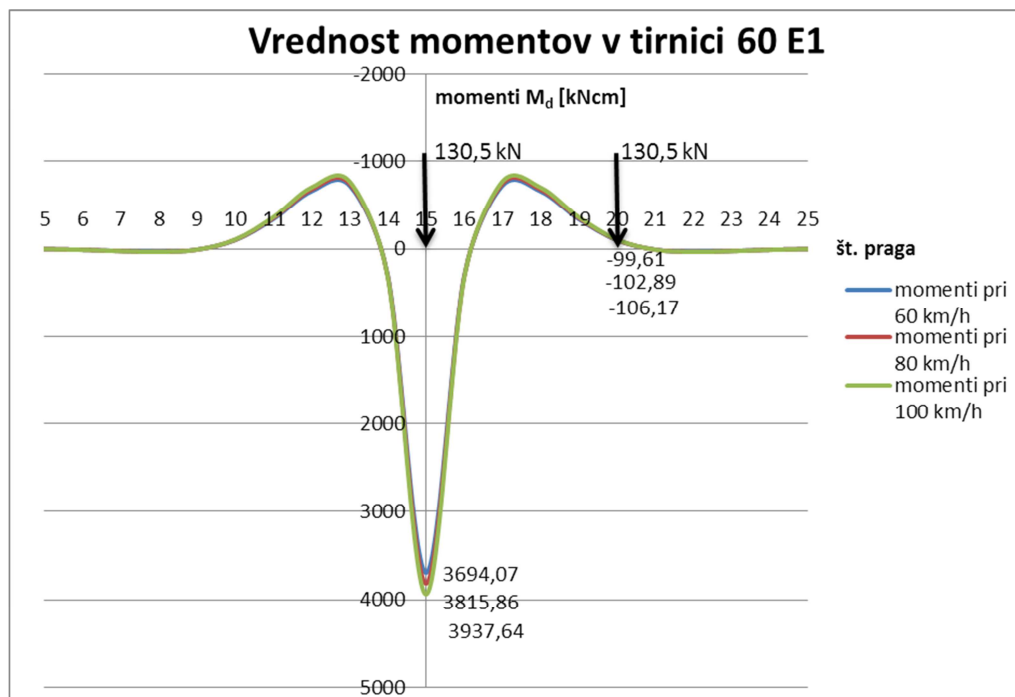
$$M_1 = M(V = 60 \text{ km/h}) = M \alpha_1 = 2841,59 \text{ kNcm} \cdot 1,30 = 3694,07 \text{ kNcm}$$

$$M_2 = M(V = 80 \text{ km/h}) = M \alpha_2 = 2841,59 \text{ kNcm} \cdot 1,34 = 3815,86 \text{ kNcm}$$

$$M_3 = M(V = 100 \text{ km/h}) = M \alpha_3 = 2841,59 \text{ kNcm} \cdot 1,39 = 3937,64 \text{ kNcm}.$$

Iz izračuna in naslednjega grafikona ugotovim, da so osi podstavnega vozička SŽ 541 v takšnem razmiku, da druga sila glede na opazovalni prerez prve sile, deluje v negativnem območju vplivnice za

upogibni moment in povzročata negativne upogibne momente. To je ugodno, saj se skupni upogibni moment tako zmanjša.



Grafikon 1: Vrednost upogibnih momentov v tirnici pod prvo osjo lokomotive SŽ 541

Ko je izračunan maksimalni upogibni moment v tirnici, se lahko izračuna tudi upogibne napetosti v tirnici po enačbi (27). Razmik osi podstavnega vozička lokomotive SŽ 541 ugodno vpliva tudi pri upogibnih napetostih. Vrednosti maksimalnih upogibnih napetosti v tirnici, pod lokomotivo SŽ 541, znašajo pri hitrosti 60 km/h:

$$\sigma_{din1} = \sigma_{din}(V = 60 \text{ km/h}) = \frac{M_1}{W} = \frac{3694,07 \text{ kNcm}}{333,6 \text{ cm}^3} = 11,073 \text{ kN/cm}^2 = 110,73 \text{ N/mm}^2,$$

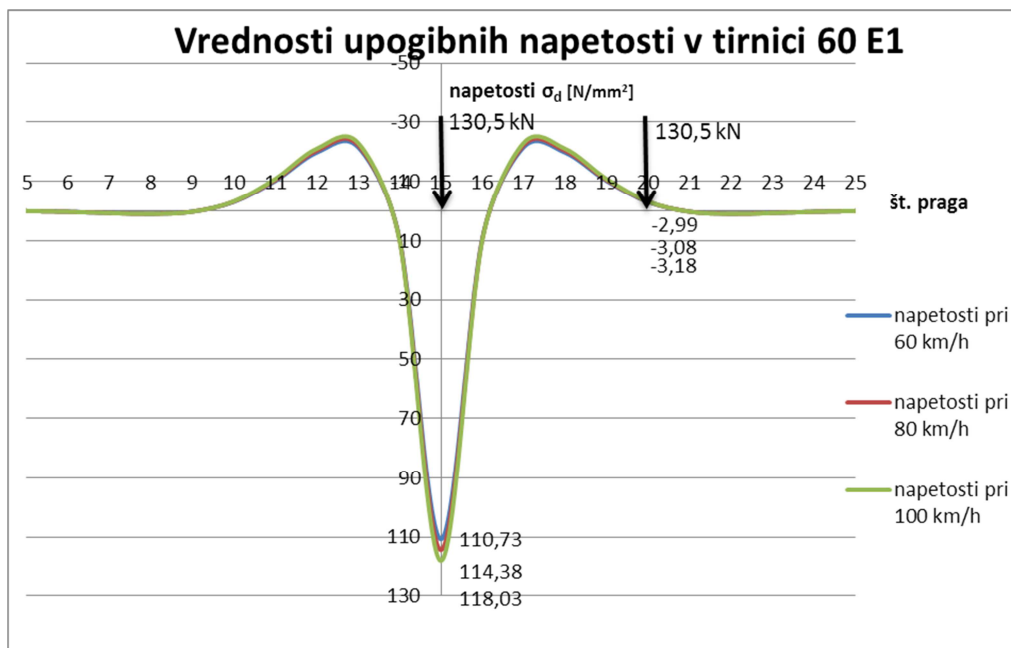
pri hitrosti 80 km/h znašajo:

$$\sigma_{din2} = \sigma_{din}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{M_2}{W} = \frac{3815,86 \text{ kNcm}}{333,6 \text{ cm}^3} = 11,438 \text{ kN/cm}^2 = 114,38 \text{ N/mm}^2,$$

pri hitrosti 100 km/h pa znašajo:

$$\sigma_{din3} = \sigma_{din}(V = 100 \text{ km/h}) = \frac{M_3}{W} = \frac{3937,64 \text{ kNcm}}{333,6 \text{ cm}^3} = 11,803 \text{ kN/cm}^2 = 118,03 \text{ N/mm}^2.$$

Vrednosti upogibnih napetosti v tirnici v opazovalnem prerezu pod prvo osjo pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 so prikazane v naslednjem grafikonu.



Grafikon 2: Vrednost upogibnih napetosti v tirnici pod prvo osjo lokomotive SŽ 541

Razliko med maksimalnimi upogibnimi napetostmi pri različnih hitrostih določajo vrednosti količnikov dinamičnih koeficientov, ki se določijo po enačbi (8) ali (9):

$$\frac{\sigma_{din2}}{\sigma_{din1}} = \frac{114,38}{110,73} = 1,033$$

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{1,34}{1,3} = 1,033$$

$$\frac{\sigma_{din3}}{\sigma_{din2}} = \frac{118,03}{114,38} = 1,032$$

$$\frac{\alpha_3}{\alpha_2} = \frac{1,39}{1,34} = 1,032.$$

Pri novi neobrabljeni tirnici kakovosti 260 znašajo vrednosti mejnih upogibnih napetosti  $282 \text{ N/mm}^2$  (poglavje 3.1.3). Za nove neobrabbene tirnice 60 E1 torej vrednosti maksimalnih upogibnih napetosti za izbrane hitrosti 60, 80 in 100 km/h ne presegajo mejnih napetosti.

### 4.3.3 Kontaktne napetosti na stiku tirnica – prag

Kontaktne napetost na stiku tirnica – prag se izračunajo po enačbi (30). Kolesna sila se s tirnice prenese na podložno ploščico, nato pa s podložne ploščice na prag. Najprej se izračuna srednja kolesna sila po enačbi (28):

$$F_{sr} = \frac{Q_{eff} a}{2L} = \frac{130,5 \text{ kN } 60 \text{ cm}}{2 \cdot 89,51 \text{ cm}} = 43,74 \text{ kN}.$$

Nato pa maksimalna kolesna sila, ki je odvisna od hitrosti, po enačbi (29):

$$F_{max1} = F_{max}(V = 60 \text{ km/h}) = \alpha_1 F_{sr} = 1,30 \cdot 43,74 \text{ kN} = 56,86 \text{ kN}$$

$$F_{max2} = F_{max}(V = 80 \text{ km/h}) = \alpha_2 F_{sr} = 1,34 \cdot 43,74 \text{ kN} = 58,73 \text{ kN}$$

$$F_{max3} = F_{max}(V = 100 \text{ km/h}) = \alpha_3 F_{sr} = 1,39 \cdot 43,74 \text{ kN} = 60,61 \text{ kN}.$$

Ploščina površine med tirnico in podložno ploščico je:

$$A_{rs1} = b_t b_l = 15,0 \text{ cm} \cdot 26,5 \text{ cm} = 397,5 \text{ cm}^2.$$

Kontaktne napetosti na stiku tirnica – podložna ploščica, pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541, znašajo pri hitrosti 60 km/h:

$$\sigma_{rs1} = \sigma_{rs}(V = 60 \text{ km/h}) = \frac{F_o + F_{max1}}{A_{rs1}} = \frac{20 \text{ kN} + 56,86 \text{ kN}}{397,5 \text{ cm}^2} = 0,193 \text{ kN/cm}^2 = 1,93 \text{ N/mm}^2,$$

pri hitrosti 80 km/h:

$$\sigma_{rs2} = \sigma_{rs}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{F_o + F_{max2}}{A_{rs1}} = \frac{20 \text{ kN} + 58,73 \text{ kN}}{397,5 \text{ cm}^2} = 0,198 \text{ kN/cm}^2 = 1,98 \text{ N/mm}^2,$$

pri hitrosti 100 km/h pa:

$$\sigma_{rs3} = \sigma_{rs}(V = 100 \text{ km/h}) = \frac{F_o + F_{max3}}{A_{rs1}} = \frac{20 \text{ kN} + 60,61 \text{ kN}}{397,5 \text{ cm}^2} = 0,203 \text{ kN/cm}^2 = 2,03 \text{ N/mm}^2.$$

Ploščina podložne ploščice, ki nalega na prag, je bila izbrana na začetku in sicer  $550 \text{ cm}^2$ . Kontaktne napetosti na stiku podložna ploščica – prag, pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541, znašajo pri hitrosti 60 km/h:

$$\sigma_{rs1} = \sigma_{rs}(V = 60 \text{ km/h}) = \frac{F_o + F_{max1}}{A_{rs2}} = \frac{20 \text{ kN} + 56,86 \text{ kN}}{550 \text{ cm}^2} = 0,140 \text{ kN/cm}^2 = 1,40 \text{ N/mm}^2,$$

pri hitrosti 80 km/h:

$$\sigma_{rs2} = \sigma_{rs}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{F_o + F_{max2}}{A_{rs2}} = \frac{20 \text{ kN} + 58,73 \text{ kN}}{550 \text{ cm}^2} = 0,143 \text{ kN/cm}^2 = 1,43 \text{ N/mm}^2,$$

pri hitrosti 100 km/h pa:

$$\sigma_{rs3} = \sigma_{rs}(V = 100 \text{ km/h}) = \frac{F_o + F_{max3}}{A_{rs2}} = \frac{20 \text{ kN} + 60,61 \text{ kN}}{550 \text{ cm}^2} = 0,147 \text{ kN/cm}^2 = 1,47 \text{ N/mm}^2.$$

Vrednosti mejnih kontaktnih napetosti na stiku tirnica – prag pri lesenih pragih iz mehkega lesa so  $1,5 \text{ N/mm}^2$ . Pri lesenih pragih iz trdega lesa so vrednosti mejnih kontaktnih napetosti  $1,5 - 2,5 \text{ N/mm}^2$ . Za betonske prage pa so vrednosti mejnih kontaktnih napetosti na stiku tirnica – prag  $4,0 \text{ N/mm}^2$  (poglavje 3.1.4).

Ugotovim, da so vrednosti kontaktnih napetosti na stiku tirnica – prag pri izbranih hitrostih 60, 80 in 100 km/h za novogradnjo, v primeru uporabe lesenih pragov iz trdega lesa in betonskih pragov, manjše od mejnih kontaktnih napetosti. Ugotovim tudi, da so kontaktne napetosti na stiku tirnica – prag, pri izbranih hitrostih 60, 80 in 100 km/h za novogradnjo, manjše tudi od mejnih kontaktnih napetosti za lesene prage iz mehkega lesa, ki se jih sicer po Pravilniku o zgornjem ustroju železniških prog uporabljajo le na stranskih postajnih in industrijskih tirih.

Iz podatkov za vrednosti mejnih kontaktnih napetosti na stiku tirnica – prag ugotovim, da betonske prage lahko obremenimo z večjimi kontaktnimi napetostmi, kot lesene prage. Iz enačbe (30) ugotovim, da to posledično pomeni, da so lahko obremenjeni z večjo kolesno silo, imajo večji osni razmik med pragi, lahko pa je ploščina površine podložne plošče, ki nalega na prag manjša, kot bi jo potrebovali pri lesenem pragu.

#### 4.3.4 Kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda

Pri izračunu kontaktnih napetosti na tirno gredo in na planum sem upoštevala zelo dobro stanje zgornjega ustroja ( $s = 0,1$ ) ter 95,4 % statistično verjetnost zajetja rezultatov ( $t = 2$ ), ter s temi podatki po enačbi (8) in (9) izračunam dinamični koeficient za upoštevanje dinamičnega vpliva prometa. Dinamični koeficient pri hitrosti 60 km/h in ob predpostavki zelo dobrega zgornjega ustroja znaša:

$$\alpha_1 = \alpha(V = 60 \text{ km/h}) = 1 + t s = 1 + 2 \cdot 0,1 = 1,20,$$

kar pomeni, da pri 95,4 % verjetnosti zajetja vseh rezultatov, dejanske vrednosti lahko znašajo do 20 % več od izračunane srednje vrednosti. Pri hitrosti 80 km/h znaša dinamični koeficient:

$$\alpha_2 = \alpha(V = 80 \text{ km/h}) = 1 + t s \left(1 + \frac{V-60}{140}\right) = 1 + 2 \cdot 0,1 \left(1 + \frac{80-60}{140}\right) = 1,23,$$

pri hitrosti 100 km/h pa znaša dinamični koeficient:

$$\alpha_3 = \alpha(V = 100 \text{ km/h}) = 1 + t s \left(1 + \frac{V-60}{140}\right) = 1 + 2 \cdot 0,1 \left(1 + \frac{100-60}{140}\right) = 1,26.$$

Kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda, ki so posledica obremenitve z lokomotivo SŽ 541, se določijo po enačbi (32). Ploščina kontaktne površine polovice praga s tirno gredo znaša:

$$A_{SB} = b_1 \frac{l}{2} = 26,5 \text{ cm} \cdot \frac{260 \text{ cm}}{2} = 3445 \text{ cm}^2.$$

Ordinata vplivnice upogiba pod prvo silo znaša po enačbi (20):

$$\xi_1 = \frac{x}{L} = \frac{0 \text{ cm}}{89,51 \text{ cm}} = 0,00$$

$$\eta_1(0,00) = e^{-\xi} [\cos \xi + \sin \xi] = 1,00$$

in za drugo silo:

$$\xi_2 = \frac{x}{L} = \frac{300 \text{ cm}}{89,51 \text{ cm}} = 3,3515$$

$$\eta_2(3,3515) = e^{-\xi} [\cos \xi + \sin \xi] = -0,0416.$$

Kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda so, po enačbi (32), pri hitrosti 60 km/h:

$$\sigma_{max1} = \sigma_{max}(V = 60 \text{ km/h}) = \frac{F_{Sr}}{A_{SB}} \alpha_1 \Sigma \eta = \frac{43,74 \text{ kN}}{3445 \text{ cm}^2} 1,2 (1 - 0,0416) = 0,0146 \text{ kN/cm}^2 = 0,146 \text{ N/mm}^2,$$

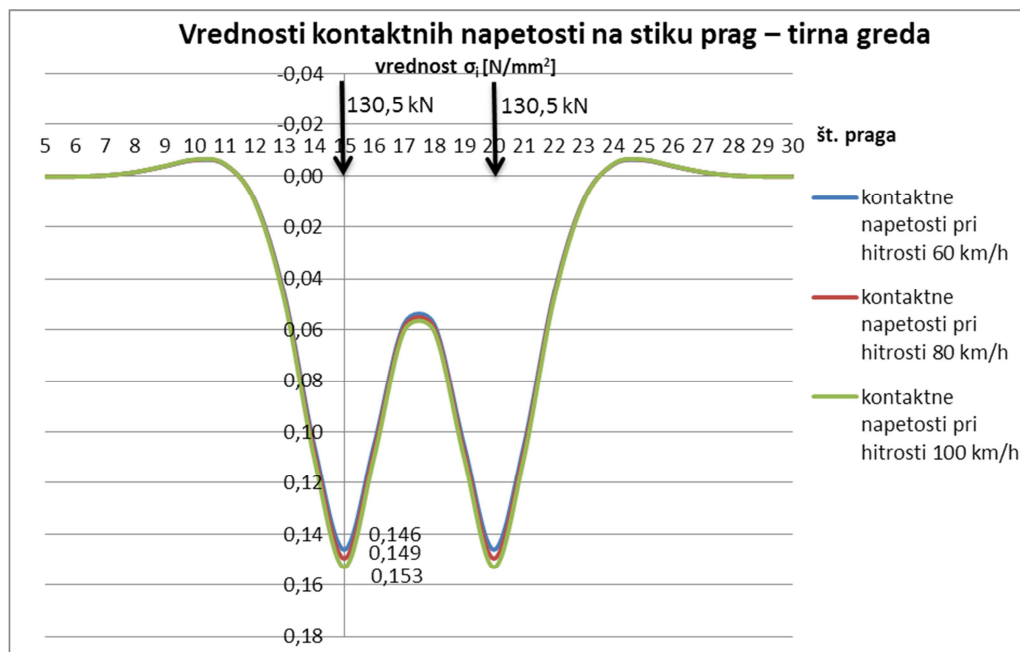
pri hitrosti 80 km/h so:

$$\sigma_{max2} = \sigma_{max}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{F_{Sr}}{A_{SB}} \alpha_2 \Sigma \eta = \frac{43,74 \text{ kN}}{3445 \text{ cm}^2} 1,23 (1 - 0,0416) = 0,0149 \text{ kN/cm}^2 = 0,149 \text{ N/mm}^2,$$

pri hitrosti 100 km/h pa so:

$$\sigma_{max3} = \sigma_{max}(V = 100 \text{ km/h}) = \frac{F_{Sr}}{A_{SB}} \alpha_3 \Sigma \eta = \frac{43,74 \text{ kN}}{3445 \text{ cm}^2} 1,26 (1 - 0,0416) = 0,0153 \text{ kN/cm}^2 = 0,153 \text{ N/mm}^2.$$

Največje kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda se pojavijo pod pragi na katere delujejo osi podstavnega vozička lokomotive SŽ 541. Kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda po dolžini tirnice so prikazani na naslednjem grafikonu.



Grafikon 3: Vrednost kontaktnih napetosti na stiku prag – tirna greda po dolžini tirnice

Kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 ne presegajo vrednosti mejnih kontaktnih napetosti na tirno gredo, ki znašajo 0,50 N/mm<sup>2</sup> (poglavje 3.1.5). Ugotovim, da so kontaktne napetosti dosti manjše od mejnih in iz enačbe (32), da vrsta praga nima vpliva na napetosti na stiku prag – tirna greda.

Iz zgornjega grafikona vidimo tudi, da so pritiski na tirno gredo pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 od praga 12 do praga 23, zato se te upošteva pri nadaljnem izračunu sil in napetosti.

#### 4.3.5 Kontaktne napetosti na stiku tirna greda – progovno telo

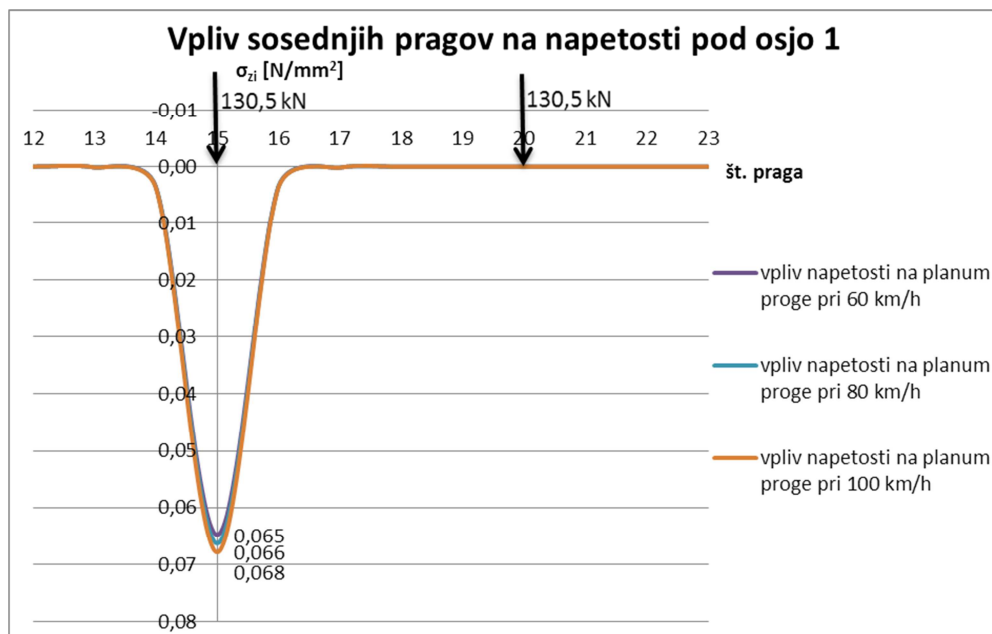
Za izračun kontaktnih napetosti na stiku tirna greda – progovno telo se najprej po Odemarkovi teoriji po enačbi (31) določi nadomestne višine posameznih plasti glede na modul elastičnosti materiala v progovnem telesu. Tako namesto večplastnega sistema dobimo enakovreden homogen elastični polprostor. Pri novogradnjah mora minimalni deformacijski modul planuma progovnega telesa  $E_v$  ustrezati vrednosti 80 N/mm<sup>2</sup>. Modul elastičnosti progovnega telesa je po enačbi (39):

$$E = \frac{\pi}{3} (1 - \nu^2) E_v = \frac{\pi}{3} (1 - 0,4^2) 80 \text{ N/mm}^2 = 70,37 \text{ N/mm}^2.$$

Nadomestna višina tirne grede je tako po enačbi (31):

$$h_n' = h_n 0,9 \sqrt[3]{\frac{E_{\text{tirne grede}}}{E_{\text{prog.telo}}} = 30 \text{ cm } 0,9 \sqrt[3]{\frac{150}{70,37}} = 34,75 \text{ cm}.$$

Kontaktne napetosti na planum računam pod pragom 15 pod prvo osjo lokomotive SŽ 541. Najprej izračunam vpliv posameznega praga na kontaktne napetosti na planum proge (t.j. stična ploskev med tirno gredo in spodnjim ustrojem, v primeru vgradnje tamponskega sloja predstavlja planum tamponskega sloja, brez tamponskega sloja pa je to tudi planum progovnega telesa) v opazovalnem prerezu prve osi. Ugotovim, da okoliški pragi pri debelini tirne grede 30 cm nimajo velikega vpliva na kontaktne napetosti na planum proge v opazovalnem prerezu prve osi lokomotive SŽ 541 (Grafikon 4).



Grafikon 4: Vpliv sosednjih pragov na račun napetosti na planumu proge pod prvo osjo lokomotive SŽ 541 pri 30 cm tirne grede

V naslednjih preglednicah so prikazane vrednosti kontaktnih napetosti izračunane na planum proge pri hitrosti 60, 80 in 100 km/h, kjer dobim vrednosti različne od 0 za opazovalni prerez pod prvo osjo lokomotive SŽ 541 pod pragi (od praga 13 do praga 17).

Preglednica 10: Prikaz kontaktnih napetosti na planum proge pri hitrosti 60 km/h

Prag	$z$	$\beta_1$	$\beta_2$	$2\varepsilon = \beta_2 - \beta_1$	$2\Psi = \beta_2 + \beta_1$	$\sigma_i$	$\sigma_{zi}$
	[cm]	[rad]	[rad]	[rad]	[rad]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]
13	34,75	1,2561	1,3157	0,0596	2,5718	0,0046	0,00001
14	34,75	0,9316	1,1279	0,1962	2,0595	0,0106	0,00035
15	34,75	-0,3643	0,3643	0,7286	0,0000	0,0146	0,00648
16	34,75	0,9316	1,1279	0,1962	2,0595	0,0105	0,00035
17	34,75	1,2561	1,3157	0,0596	2,5718	0,0058	0,00002
						<b><math>\Sigma</math></b>	<b>0,00722</b>

Preglednica 11: Prikaz kontaktnih napetosti na planum proge pri hitrosti 80 km/h

Prag	$z$	$\beta_1$	$\beta_2$	$2\varepsilon = \beta_2 - \beta_1$	$2\Psi = \beta_2 + \beta_1$	$\sigma_i$	$\sigma_{zi}$
	[cm]	[rad]	[rad]	[rad]	[rad]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]
13	34,75	1,2561	1,3157	0,0596	2,5718	0,0048	0,00001
14	34,75	0,9316	1,1279	0,1962	2,0595	0,0108	0,00036
15	34,75	-0,3643	0,3643	0,7286	0,0000	0,0149	0,00664
16	34,75	0,9316	1,1279	0,1962	2,0595	0,0107	0,00036
17	34,75	1,2561	1,3157	0,0596	2,5718	0,0059	0,00002
						<b><math>\Sigma</math></b>	<b>0,00739</b>

Preglednica 12: Prikaz kontaktnih napetosti na planum proge pri hitrosti 100 km/h

Prag	$z$	$\beta_1$	$\beta_2$	$2\varepsilon = \beta_2 - \beta_1$	$2\Psi = \beta_2 + \beta_1$	$\sigma_i$	$\sigma_{zi}$
	[cm]	[rad]	[rad]	[rad]	[rad]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]
13	34,75	1,2561	1,3157	0,0596	2,5718	0,0049	0,00001
14	34,75	0,9316	1,1279	0,1962	2,0595	0,0111	0,00037
15	34,75	-0,3643	0,3643	0,7286	0,0000	0,0153	0,00679
16	34,75	0,9316	1,1279	0,1962	2,0595	0,0110	0,00037
17	34,75	1,2561	1,3157	0,0596	2,5718	0,0060	0,00002
						<b>Σ</b>	<b>0,00756</b>

Skupne kontaktne napetosti pod prvo osjo lokomotive SŽ 541 na planum proge znašajo pri hitrosti 60 km/h 0,072 N/mm<sup>2</sup> (Preglednica 10), pri hitrosti 80 km/h 0,074 N/mm<sup>2</sup> (Preglednica 11), pri hitrosti 100 km/h pa 0,076 N/mm<sup>2</sup> (Preglednica 12). Kontaktne napetosti na planum proge pri novogradnji pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 ne presegajo vrednosti mejnih kontaktnih napetosti na planum progovnega telesa, ki po enačbi Heukeloma in Klompa (38) znašajo:

$$\bar{\sigma}_z = \frac{0,006 E_{dyn}}{1+0,7 \log n} = \frac{0,006 \cdot 1,2 \cdot 80 \text{ N/mm}^2}{1+0,7 \log(10^6)} = 0,111 \text{ N/mm}^2.$$

Tako ugotovim, da pri novogradnji za vožnjo lokomotive SŽ 541, pri izbranih hitrostih 60, 80 in 100 km/h, ni potreben tamponski sloj.

V naslednji preglednici so zbrane vse napetosti, ki sem jih dobila pri izračunu sil in napetosti v železniški progi za izbrani zgornji ustroj za novogradnjo pri treh različnih hitrostih, pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541. Ugotovim, da napetosti ne presegajo mejnih vrednosti napetosti, ki so za strižne napetosti v tirnici določene po enačbi (14), za maksimalne upogibne napetosti v tirnici v poglavju 3.1.3, mejne kontaktne napetosti na stiku tirnica – prag so določene v poglavju 3.1.4, mejne kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda v poglavju 3.1.5, mejne kontaktne napetosti na planumu pa po enačbi (38).

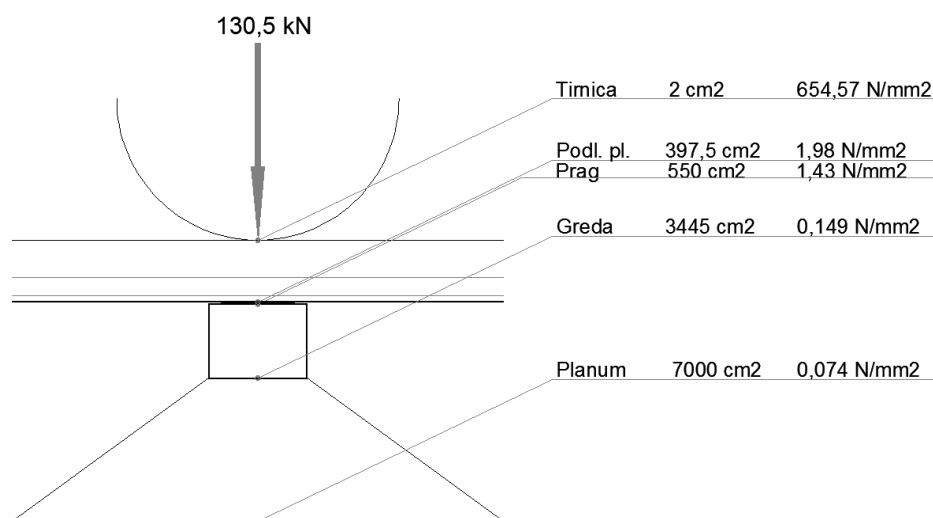
Preglednica 13: Napetosti v železniški progi pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541

	Napetosti [N/mm <sup>2</sup> ]			
	Hitrost [km/h]			Mejne napetosti [N/mm <sup>2</sup> ]
	60	80	100	
Kontaktne napetosti kolo - tirnica	654,57	654,57	654,57	
Maksimalne strižne napetosti v tirnici	196,28	196,28	196,28	264
Upogibne napetosti v tirnici	110,73	114,38	118,03	282
Napetosti na stiku tirnica - podložna ploščica	1,93	1,98	2,03	
Napetosti na stiku podložna ploščica - prag	1,40	1,43	1,47	1,5 - 2,5 (4,0)
Napetosti na stiku prag - tirna greda	0,146	0,149	0,153	0,5
Napetosti na stiku tirna greda – planum proge	0,072	0,074	0,076	0,166
Napetosti na stiku tirna greda – planum prog. telo	0,072	0,074	0,076	0,111

Ugotovim, da so pri večji hitrosti večje napetosti v železniški progi. Razlike med napetostmi pri različnih hitrostih so v razmerju, kot so razmerja dinamičnih koeficientov vpliva hitrosti, ki se jih določi po enačbah (8) in (9). Hitrost pa ne vpliva na kontaktne napetosti na kontaktu kolo – tirnica in na maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice.



Napetosti na slojih skozi železniško progo, pod prometno obremenitvijo SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h, so prikazane na spodnji sliki. Ugotovim, da se z globino večja kontaktna površina med sloji, manjša pa se napetost na stiku med sloji.



Slika 51: Rezultati izračuna za hitrosti 80 km/h pri obremenitvi železniške proge z lokomotivo SŽ 541

V naslednji preglednici so prikazane sile skozi železniško progo.

Preglednica 14: Sile v železniški progi pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541

	Sile na površino z dinamičnim faktorjem $\alpha_2$ [kN]	Sile na površino brez dinamičnega faktorja $\alpha_2$ [kN]
Kontaktne napetosti kolo - tirnica	130,5	130,5
Napetosti na stiku tirnica - podložna ploščica	58,73 + 20	43,74
Napetosti na stiku podložna ploščica - prag	58,73 + 20	43,74
Napetosti na stiku prag - tirna greda	51,50	41,92
Napetosti na stiku tirna greda - planum	51,76	42,10

(+ 20 je sila pritrditve tirnice)

Iz zgornje preglednice iz stolpca sil na površino brez dinamičnega faktorja  $\alpha_2$  ugotovim, da le 33,52 % prvotne sile med tirnico in kolesom, pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 za izbran sestav zgornjega ustroja, pride na podložno ploščico in prag. Ostala sila se prenese iz tirnice na sosednje prage, kar nam pokaže konstanta zgornjega ustroja  $L$ .

Zmanjšanje sile na tirno gredo povzroči ugodna oddaljenost druge osi lokomotive SŽ 541, ki deluje v negativnem območju vplivnice  $\eta$ , kar povzroči da so kontaktne napetosti na tirno gredo manjše. Če se druge osi pri prenosu sile ne upošteva, dobimo isto silo 43,74 kN, ki se je prenesla iz tirnice na podložno ploščico in na prag ter naprej na tirno gredo in planum.

V naslednjih izračunih pa primerjam napetosti v železniški progi za izbrano sestavo zgornjega ustroja z napetostmi v železniški progi, kjer izhodiščni izbrani sestavi spremenim eno komponento, za prometno obremenitev z lokomotivo SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h.

#### 4.4 Rezultati izračuna za tirnico 49 E1 namesto tirnice 60 E1

Naredim primerjavo, ko je na progi namesto tirnice 60 E1 vgrajena tirnica 49 E1 ( $W = 240,3 \text{ cm}^3$ ,  $I = 1816 \text{ cm}^4$ ,  $E = 2,1 \cdot 10^7 \text{ N/cm}^2$ , širina noge tirnice  $b_t = 125 \text{ mm}$ ). Sicer pri novogradnjah na glavnih progah ni dovoljena vgradnja 49 E1, a na obstoječih glavnih progah je še marsikje vgrajena ta vrsta tirnic. Zato me zanima, kakšne so razlike v napetostih pri uporabi tirnic 60 E1 oziroma tirnic 49 E1.

Ostali podatki pri izračunu so isti kot so izhodiščni podatki, ki so navedeni na str. 49, le tirnico 60 E1 zamenjam s tirnico 49 E1.

##### 4.4.1 Maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice pri upoštevanju tirnic 49 E1

Kontaktne napetosti na stiku tirnice s kolesom se določijo po enačbi (12) in so:

$$q_{mean} \approx 1374 \sqrt{\frac{Q_{eff}}{r}} \approx 1374 \sqrt{\frac{130,5 \text{ kN}}{575 \text{ mm}}} \approx 654,57 \text{ N/mm}^2.$$

Maksimalne strižne napetosti, ki nastopijo v glavi tirnice, za tirnico 49 E1, so po enačbi (13):

$$\tau_{max} \approx 0,3 q_{mean} \approx 412 \sqrt{\frac{Q_{eff}}{r}} \approx 412 \sqrt{\frac{130,5 \text{ kN}}{575 \text{ mm}}} = 196,28 \text{ N/mm}^2,$$

in so manjše od mejnih strižnih napetosti, ki se jih določi po enačbi (14):

$$\tau_u \approx 0,3 \sigma_z \approx 0,3 \cdot 880 \text{ N/mm}^2 \approx 264 \text{ N/mm}^2.$$

Ugotovim, da sprememba oblike tirnice ne vpliva na maksimalne strižne napetosti v tirnici in na kontaktne napetosti na stiku kolo – tirnica (primerjava s str. 50).

##### 4.4.2 Upogibne napetosti v tirnici pri upoštevanju tirnic 49 E1

S spremembo tirnice ostane širina namišljenega praga za izračun zgornjega ustroja enaka in znaša  $b = 39,75 \text{ cm}$  (str. 50). Zmanjša pa se konstanta zgornjega ustroja:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 2,1 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} \cdot 1816 \text{ cm}^4}{39,75 \text{ cm} \cdot 100 \text{ N/cm}^3}} = 78,71 \text{ cm}.$$

S tem se sila prenese na manjše število pragov, zaradi česar dobimo večje kontaktne napetosti na podlago.

Pri izračunu upogibnih napetosti v tirnici 49 E1 upoštevam zelo dobro stanje zgornjega ustroja ( $s = 0,1$ ) ter 99,7 % verjetnost zajetja rezultatov ( $t = 3$ ), ter po enačbi (9) izračunam dinamični koeficient za upoštevanje dinamičnega vpliva prometa pri hitrosti 80 km/h:

$$\alpha_2 = \alpha(V = 80 \text{ km/h}) = 1 + t s \left(1 + \frac{V-60}{140}\right) = 1 + 3 \cdot 0,1 \left(1 + \frac{80-60}{140}\right) = 1,34,$$

torej so pri 99,7 % verjetnosti zajetja vseh rezultatov dejanske vrednosti lahko do 34 % večje od izračunanih srednjih vrednosti.

Ordinata vplivnice za upogibni moment se določi po enačbi (22). Najprej pa določim vrednost  $\zeta$  v prvi osi:

$$\zeta_1 = \frac{x}{L} = \frac{0 \text{ cm}}{78,71 \text{ cm}} = 0,00$$

$$\mu_1(0,00) = e^{-\zeta} [\cos \zeta - \sin \zeta] = 1,00$$

in za drugo os:

$$\zeta_2 = \frac{x}{L} = \frac{300 \text{ cm}}{78,71 \text{ cm}} = 3,8116$$

$$\mu_2(3,8116) = e^{-\zeta} [\cos \zeta - \sin \zeta] = -0,0036.$$

Maksimalni upogibni momenti v tirnici 49 E1 so:

$$M = \frac{\Sigma Q_{eff} L \mu}{4} = \frac{130,5 \text{ kN} \cdot 78,71 \text{ cm} \cdot 1}{4} + \frac{130,5 \text{ kN} \cdot 78,71 \text{ cm} \cdot (-0,0036)}{4} = 2558,58 \text{ kNcm}$$

$$M_2 = M(V = 80 \text{ km/h}) = M \alpha_2 = 2558,58 \text{ kNcm} \cdot 1,34 = 3435,80 \text{ kNcm}.$$

Maksimalne upogibne napetosti v tirnici 49 E1 pa pri hitrosti 80 km/h znašajo:

$$\sigma_{din2} = \sigma_{din}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{M_2}{W} = \frac{3435,80 \text{ kNcm}}{240,3 \text{ cm}^3} = 14,298 \text{ kN/cm}^2 = 142,98 \text{ N/mm}^2.$$

Maksimalne upogibne napetosti v tirnici 49 E1 so za 25 % večje od maksimalnih upogibnih napetosti v tirnici 60 E1 (primerjava s str. 52), a pri novih neobrabljenih tirnicah 49 E1 niso presežene vrednosti mejnih upogibnih napetosti, ki so  $282 \text{ N/mm}^2$  (poglavje 3.1.3).

#### 4.4.3 Kontaktna napetost na stiku tirnica – prag pri upoštevanju tirnic 49 E1

Najprej se določi srednja kolesna sila, ki se prenese s tirnice na prag, po enačbi (28). Za tirnico 49 E1 znaša:

$$F_{sr} = \frac{Q_{eff} a}{2 L} = \frac{130,5 \text{ kN} \cdot 60 \text{ cm}}{2 \cdot 78,71 \text{ cm}} = 49,74 \text{ kN}.$$

Maksimalna kolesna sila za izračun kontaktnih napetosti na stiku tirnica – prag, pri hitrosti 80 km/h, se izračuna po enačbi (29):

$$F_{max2} = F_{max}(V = 80 \text{ km/h}) = \alpha_2 F_{sr} = 1,34 \cdot 49,74 \text{ kN} = 66,80 \text{ kN}.$$

Ploščina kontaktne površine med tirnico 49 E1 in podložno ploščico je:

$$A_{rs1} = b_t b_l = 12,5 \text{ cm} \cdot 26,5 \text{ cm} = 331,25 \text{ cm}^2.$$

Kontaktne napetosti na stiku tirnica – podložna ploščica so pri hitrosti 80 km/h:

$$\sigma_{rs2} = \sigma_{rs}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{F_o + F_{max2}}{A_{rs1}} = \frac{20 \text{ kN} + 66,80 \text{ kN}}{331,25 \text{ cm}^2} = 0,262 \text{ kN/cm}^2 = 2,62 \text{ N/mm}^2.$$

Ploščina podložne ploščice s pragom je bila izbrana na začetku in sicer  $550 \text{ cm}^2$ . Kontaktna napetosti na stiku podložna ploščica – prag so pri hitrosti 80 km/h:

$$\sigma_{rs2} = \sigma_{rs}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{F_o + F_{max2}}{A_{rs2}} = \frac{20 \text{ kN} + 66,80 \text{ kN}}{550 \text{ cm}^2} = 0,158 \text{ kN/cm}^2 = 1,58 \text{ N/mm}^2.$$

Kontaktna napetosti na stiku podložna ploščica – prag za tirnico 49 E1, pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h, so manjše od vrednosti mejnih kontaktnih napetosti za betonski prag, ki znašajo  $4 \text{ N/mm}^2$  (poglavje 3.1.4), ter so manjše od vrednosti mejnih kontaktnih napetosti za leseni prag iz trdega lesa, ki so  $2,5 \text{ N/mm}^2$  (poglavje 3.1.4). V primeru lesenih pragov iz mehkega lesa pa presegajo vrednosti mejnih kontaktnih napetosti, ki so  $1,5 \text{ N/mm}^2$  (poglavje 3.1.4).

#### 4.4.4 Kontaktna napetosti na stiku prag – tirna greda pri upoštevanju tirnic 49 E1

Pri izračunu kontaktnih napetosti na tirno gredo in na planum sem upoštevala zelo dobro stanje zgornjega ustroja ( $s = 0,1$ ) ter 95,4 % statistično verjetnost zajetja rezultatov ( $t = 2$ ), ter s temi podatki po enačbi (9) izračunam dinamični koeficient za upoštevanje dinamičnega vpliva prometa pri hitrosti 80 km/h:

$$\alpha_2 = \alpha(V = 80 \text{ km/h}) = 1 + t s \left(1 + \frac{V-60}{140}\right) = 1 + 2 \cdot 0,1 \left(1 + \frac{80-60}{140}\right) = 1,23.$$

Ploščina kontaktne površine polovice praga s tirno gredo znaša:

$$A_{SB} = b_l \frac{l}{2} = 26,5 \text{ cm} \frac{260 \text{ cm}}{2} = 3445 \text{ cm}^2.$$

Ordinata vplivnice upogiba pod prvo silo znaša po enačbi (20):

$$\xi = \frac{x}{L} = \frac{0 \text{ cm}}{78,71 \text{ cm}} = 0,00$$

$$\eta(0,00) = e^{-\xi} [\cos \xi + \sin \xi] = 1,00.$$

in za drugo silo:

$$\xi = \frac{x}{L} = \frac{300 \text{ cm}}{78,71 \text{ cm}} = 3,8116$$

$$\eta(3,8116) = e^{-\xi} [\cos \xi + \sin \xi] = -0,0311.$$

Kontaktna napetosti na stiku prag – tirna greda pri tirnici 49 E1 in hitrosti 80 km/h znašajo:

$$\sigma_{max2} = \sigma_{max}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{F_{sr}}{A_{SB}} \alpha_2 \Sigma \eta = \frac{49,74 \text{ kN}}{3445 \text{ cm}^2} 1,23 (1 - 0,0311) = 0,0172 \text{ kN/cm}^2 = 0,172 \text{ N/mm}^2,$$

in so manjše od mejnih napetosti na tirno gredo, ki so  $0,5 \text{ N/mm}^2$  (poglavje 3.1.5).

#### 4.4.5 Kontaktne napetosti na stiku tirna greda – progovno telo pri upoštevanju tirnic 49 E1

Za izračun kontaktnih napetosti na stiku tirna greda – progovno telo se najprej po Odemarkovi teoriji po enačbi (31) določi nadomestne višine posameznih plasti glede na modul elastičnosti materiala v progovnem telesu. Tako namesto večplastnega sistema dobimo enakovreden homogen elastični polprostor. Pri novogradnjah mora minimalni deformacijski modul planuma progovnega telesa  $E_v$  ustrezati vrednosti  $80 \text{ N/mm}^2$ . Modul elastičnosti progovnega telesa je po enačbi (39):

$$E = \frac{\pi}{3} (1 - \nu^2) E_v = \frac{\pi}{3} (1 - 0,4^2) 80 \text{ N/mm}^2 = 70,37 \text{ N/mm}^2.$$

Nadomestna višina tirne grede, po enačbi (31), je pri izračunu za tirnico 49 E1:

$$h_n' = h_n 0,9 \sqrt[3]{\frac{E_{\text{tirne grede}}}{E_{\text{prog.telo}}}} = 30 \text{ cm } 0,9 \sqrt[3]{\frac{150}{70,37}} = 34,75 \text{ cm}.$$

V naslednji preglednici so prikazane vrednosti kontaktnih napetosti izračunane na planum proge (t.j. stična ploskev med tirno gredo in spodnjim ustrojem, v primeru vgradnje tamponskega sloja predstavlja planum tamponskega sloja, brez tamponskega sloja pa je to tudi planum progovnega telesa) pri hitrosti  $80 \text{ km/h}$ , kjer dobim vrednosti pod pragi različne od 0 za opazovalni prerez pod prvo osjo lokomotive SŽ 541 v primeru vgradnje tirnice 49 E1 (od praga 13 do praga 17).

Preglednica 15: Prikaz napetosti na planum proge pri hitrosti  $80 \text{ km/h}$  za tirnico 49 E1

Prag	$z$	$\beta_1$	$\beta_2$	$2\varepsilon = \beta_2 - \beta_1$	$2\Psi = \beta_2 + \beta_1$	$\sigma_i$	$\sigma_{zi}$
	[cm]	[rad]	[rad]	[rad]	[rad]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]
13	34,75	1,2561	1,3157	0,0596	2,5718	0,0040	0,00001
14	34,75	0,9316	1,1279	0,1962	2,0595	0,0115	0,00038
15	34,75	-0,3643	0,3643	0,7286	0,0000	0,0172	0,00763
16	34,75	0,9316	1,1279	0,1962	2,0595	0,0109	0,00036
17	34,75	1,2561	1,3157	0,0596	2,5718	0,0042	0,00001
						<b>Σ</b>	<b>0,00840</b>

Skupne kontaktne napetosti pod prvo osjo lokomotive SŽ 541 na planum proge znašajo pri hitrosti  $80 \text{ km/h}$   $0,084 \text{ N/mm}^2$  (Preglednica 15). Kontaktne napetosti na planum proge pri novogradnji pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 ne presegajo vrednosti mejnih kontaktnih napetosti na planum progovnega telesa, ki po enačbi Heukeloma in Klompa (38) znašajo:

$$\bar{\sigma}_z = \frac{0,006 E_{dyn}}{1+0,7 \log n} = \frac{0,006 \cdot 1,2 \cdot 80 \text{ N/mm}^2}{1+0,7 \log(10^6)} = 0,111 \text{ N/mm}^2.$$

Tako ugotovim, da pri novogradnji s tirnicami 49 E1 za vožnjo lokomotive SŽ 541 pri hitrosti  $80 \text{ km/h}$  ni potreben tamponski sloj.

Napetosti v železniški progi za tirnico 60 E1 in tirnico 49 E1 zberem v naslednji preglednici ter jih primerjam.

Preglednica 16: Primerjava napetosti v železniški progi za tirnico 60 E1 in tirnico 49 E1 pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h

	Napetosti [N/mm <sup>2</sup> ]			
	Tirnica		Mejne napetosti [N/mm <sup>2</sup> ]	Razlika napetosti [%]
	60 E1	49 E1		
Kontaktne napetosti kolo - tirnica	654,57	654,57		0,00
Maksimalne strižne napetosti v tirnici	196,28	196,28	264	0,00
Upogibne napetosti v tirnici	114,38	142,98	282	25,00
Napetosti na stiku tirnica - podložna ploščica	1,98	2,62		32,34
Napetosti na stiku podložna ploščica - prag	1,43	1,58	1,5 - 2,5 (4,0)	10,36
Napetosti na stiku prag - tirna greda	0,149	0,172	0,5	15,36
Napetosti na stiku tirna greda - planum proge	0,074	0,084	0,166	13,63
Napetosti na stiku tirna greda - planum prog. telo	0,074	0,084	0,111	13,63

Ugotovim, da se kontaktne napetosti na stiku kolo – tirnica in maksimalne strižne napetosti v tirnici ne spremenijo. Upogibne napetosti v tirnici so se povečale za 25 %. Za 32,34 % se povečajo tudi napetosti na kontaktu tirnica – podložna ploščica, saj je širina noge tirnice pri 49 E1 za 16,67 % manjša od širine noge tirnice 60 E1. Povečajo pa se tudi napetosti na tirno gredo in planum za okrog 15 %. Vrednosti na planum proge in planum progovnega telesa pri uporabi tirnice 49 E1 pri novogradnji za izbrano sestavo zgornjega ustroja niso presežene.

#### 4.5 Rezultati izračuna za osni razmik pragov 65 cm namesto 60 cm

Preverim tudi za koliko se povečajo napetosti v železniški progi, v primeru osnega razmika med pragi, ki je dovoljen le za manjše osne obremenitve (20 ton). Osni razmik zato povečam s 60 cm na 65 cm.

Ostali podatki pri izračunu so isti kot so izhodiščni podatki, ki so navedeni na str. 49, le osni razmik  $a = 65$  cm nadomesti osni razmik  $a = 60$  cm.

##### 4.5.1 Maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice za razmik pragov 65 cm

Kontaktne napetosti na stiku tirnice s kolesom se določijo po enačbi (12) in so:

$$q_{mean} \approx 1374 \sqrt{\frac{Q_{eff}}{r}} \approx 1374 \sqrt{\frac{130,5 \text{ kN}}{575 \text{ mm}}} \approx 654,57 \text{ N/mm}^2.$$

Maksimalne strižne napetosti, ki nastopijo v glavi tirnice, so po enačbi (13):

$$\tau_{max} \approx 0,3 q_{mean} \approx 412 \sqrt{\frac{Q_{eff}}{r}} \approx 412 \sqrt{\frac{130,5 \text{ kN}}{575 \text{ mm}}} = 196,28 \text{ N/mm}^2,$$

in so manjše od mejnih strižnih napetosti, ki se jih določi po enačbi (14):

$$\tau_u \approx 0,3 \sigma_z \approx 0,3 \cdot 880 \text{ N/mm}^2 \approx 264 \text{ N/mm}^2.$$

Ugotovim, da sprememba osnega razmika pragov ne vpliva na maksimalne strižne napetosti v tirnici in na kontaktne napetosti na stiku kolo – tirnica (primerjava s str. 50).

#### 4.5.2 Upogibne napetosti v tirnici za razmik pragov 65 cm

S povečanjem osnega razmika se zmanjša širina namišljenega praga za izračun zgornjega ustroja:

$$b = \frac{2 u b_1}{a} = \frac{2385 \text{ cm}^2}{65 \text{ cm}} = 36,69 \text{ cm},$$

konstanta zgornjega ustroja pa znaša:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 E I}{b C}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 2,1 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} \cdot 3038 \text{ cm}^4}{36,69 \text{ cm} \cdot 100 \text{ N/cm}^3}} = 91,32 \text{ cm}.$$

Pri izračunu upogibnih napetosti v tirnici upoštevam zelo dobro stanje zgornjega ustroja ( $s = 0,1$ ) ter 99,7 % verjetnost zajetja rezultatov ( $t = 3$ ), ter po enačbi (9) izračunam dinamični koeficient za upoštevanje dinamičnega vpliva prometa pri hitrosti 80 km/h:

$$\alpha_2 = \alpha(V = 80 \text{ km/h}) = 1 + t s \left(1 + \frac{V-60}{140}\right) = 1 + 3 \cdot 0,1 \left(1 + \frac{80-60}{140}\right) = 1,34,$$

torej so pri 99,7 % verjetnosti zajetja vseh rezultatov dejanske vrednosti lahko do 34 % večje od izračunanih srednjih vrednosti.

Ordinata vplivnice za upogibni moment se določi po enačbi (22). Najprej pa določim vrednost  $\zeta$  v prvi osi:

$$\zeta_1 = \frac{x}{L} = \frac{0 \text{ cm}}{91,32 \text{ cm}} = 0,00$$

$$\mu_1(0,00) = e^{-\zeta} [\cos \zeta - \sin \zeta] = 1,00$$

in za drugo os:

$$\zeta_2 = \frac{x}{L} = \frac{300 \text{ cm}}{91,32 \text{ cm}} = 3,2851$$

$$\mu_2(3,2851) = e^{-\zeta} [\cos \zeta - \sin \zeta] = -0,0317.$$

Maksimalni upogibni momenti pri osnem razmiku 65 cm so:

$$M = \frac{\Sigma Q_{eff} L \mu}{4} = \frac{130,5 \text{ kN} \cdot 91,32 \text{ cm} \cdot 1}{4} + \frac{130,5 \text{ kN} \cdot 91,32 \text{ cm} \cdot (-0,0317)}{4} = 2884,92 \text{ kNcm}$$

$$M_2 = M(V = 80 \text{ km/h}) = M \alpha_2 = 2884,92 \text{ kNcm} \cdot 1,34 = 3874,04 \text{ kNcm}.$$

Maksimalne upogibne napetosti v tirnici pri hitrosti 80 km/h pri osnem razmiku 65 cm znašajo:

$$\sigma_{din2} = \sigma_{din}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{M_2}{W} = \frac{3874,04 \text{ kNcm}}{333,6 \text{ cm}^3} = 11,613 \text{ kN/cm}^2 = 116,13 \text{ N/mm}^2.$$

Maksimalne upogibne napetosti v tirnici 60 E1 pri osnem razmiku 65 cm so za 1,53 % večje od maksimalnih upogibnih napetosti v tirnici 60 E1 pri osnem razmiku 60 cm (primerjava s str. 52). Maksimalne upogibne napetosti v tirnici 60 E1 pri osnem razmiku 65 cm so manjše od vrednosti mejnih upogibnih napetosti za nove neobrbljene tirnice, ki so  $282 \text{ N/mm}^2$  (poglavje 3.1.3).

#### 4.5.3 Kontaktne napetosti na stiku tirnica – prag za razmik pragov 65 cm

Najprej se določi srednja kolesna sila, ki se prenese s tirnice na prag, po enačbi (28) in znaša:

$$F_{sr} = \frac{Q_{eff} a}{2L} = \frac{130,5 \text{ kN} \cdot 65 \text{ cm}}{2 \cdot 91,32 \text{ cm}} = 46,44 \text{ kN}.$$

Maksimalna kolesna sila za izračun kontaktnih napetosti na stiku tirnica – prag, pri hitrosti 80 km/h, se izračuna po enačbi (29):

$$F_{max2} = F_{max}(V = 80 \text{ km/h}) = \alpha_2 F_{sr} = 1,34 \cdot 46,44 \text{ kN} = 62,37 \text{ kN}.$$

Ploščina kontaktne površine med tirnico 60 E1 in podložno ploščico je:

$$A_{rs1} = b_t b_l = 15,0 \text{ cm} \cdot 26,5 \text{ cm} = 397,5 \text{ cm}^2.$$

Kontaktne napetosti na stiku tirnica – podložna ploščica pri osnem razmiku pragov 65 cm so pri hitrosti 80 km/h:

$$\sigma_{rs2} = \sigma_{rs}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{F_o + F_{max2}}{A_{rs1}} = \frac{20 \text{ kN} + 62,37 \text{ kN}}{397,5 \text{ cm}^2} = 0,207 \text{ kN/cm}^2 = 2,07 \text{ N/mm}^2.$$

Ploščina podložne ploščice s pragom je bila izbrana na začetku in sicer  $550 \text{ cm}^2$ . Kontaktne napetosti na stiku podložna ploščica – prag so pri hitrosti 80 km/h:

$$\sigma_{rs2} = \sigma_{rs}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{F_o + F_{max2}}{A_{rs2}} = \frac{20 \text{ kN} + 62,37 \text{ kN}}{550 \text{ cm}^2} = 0,150 \text{ kN/cm}^2 = 1,50 \text{ N/mm}^2.$$

Kontaktne napetosti na stiku podložna ploščica – prag so za tirnico 60 E1 pri osnem razmiku pragov 65 cm, pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h, manjše od vrednosti mejnih kontaktnih napetosti za betonski prag, ki znašajo  $4 \text{ N/mm}^2$  (poglavje 3.1.4) ter so manjše od vrednosti mejnih kontaktnih napetosti za leseni prag iz trdega lesa, ki so  $2,5 \text{ N/mm}^2$  (poglavje 3.1.4). V primeru lesenih pragov iz mehkega lesa pa so napetosti na meji vrednosti mejnih kontaktnih napetosti, ki so  $1,5 \text{ N/mm}^2$  (poglavje 3.1.4).

#### 4.5.4 Kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda za razmik pragov 65 cm

Pri izračunu kontaktnih napetosti na tirno gredo in na planum sem upoštevala zelo dobro stanje zgornjega ustroja ( $s = 0,1$ ) ter 95,4 % statistično verjetnost zajetja rezultatov ( $t = 2$ ), ter s temi podatki po enačbi (9) izračunam dinamični koeficient za upoštevanje dinamičnega vpliva prometa pri hitrosti 80 km/h:

$$\alpha_2 = \alpha(V = 80 \text{ km/h}) = 1 + t s \left(1 + \frac{V-60}{140}\right) = 1 + 2 \cdot 0,1 \left(1 + \frac{80-60}{140}\right) = 1,23.$$

Ploščina kontaktne površine polovice praga s tirno gredo znaša:

$$A_{SB} = b_l \frac{l}{2} = 26,5 \text{ cm} \cdot \frac{260 \text{ cm}}{2} = 3445 \text{ cm}^2.$$

Ordinata vplivnice upogiba pod prvo silo znaša po enačbi (20):

$$\xi_l = \frac{x}{L} = \frac{0 \text{ cm}}{91,32 \text{ cm}} = 0,00$$

$$\eta_l(0,00) = e^{-\xi} [\cos \xi + \sin \xi] = 1,00.$$

in za drugo silo:



$$\xi_2 = \frac{x}{L} = \frac{300 \text{ cm}}{91,32 \text{ cm}} = 3,2851$$

$$\eta_2(3,2851) = e^{-\xi} [\cos \xi + \sin \xi] = -0,0424.$$

Kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda pri osnem razmiku 65 cm in hitrosti 80 km/h znašajo:

$$\sigma_{max2} = \sigma_{max}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{F_{Sr}}{A_{SB}} \alpha_2 \Sigma \eta = \frac{46,44 \text{ kN}}{3445 \text{ cm}^2} 1,23 (1 - 0,0424) = 0,0159 \text{ kN/cm}^2 = 0,159 \text{ N/mm}^2,$$

in so manjše od mejnih napetosti na tirno gredo, ki so 0,5 N/mm<sup>2</sup> (poglavje 3.1.5).

#### 4.5.5 Kontaktne napetosti na stiku tirna greda – progovno telo za razmik pragov 65 cm

Za izračun kontaktnih napetosti na stiku tirna greda – progovno telo se najprej po Odemarkovi teoriji po enačbi (31) določi nadomestne višine posameznih plasti glede na modul elastičnosti materiala v progovnem telesu. Tako namesto večplastnega sistema dobimo enakovreden homogen elastični polprostor. Pri novogradnjah mora minimalni deformacijski modul planuma progovnega telesa  $E_v$  ustrezati vrednosti 80 N/mm<sup>2</sup>. Modul elastičnosti progovnega telesa je po enačbi (39):

$$E = \frac{\pi}{3} (1 - \nu^2) E_v = \frac{\pi}{3} (1 - 0,4^2) 80 \text{ N/mm}^2 = 70,37 \text{ N/mm}^2.$$

Nadomestna višina tirne grede je po enačbi (31):

$$h_n' = h_n 0,9 \sqrt[3]{\frac{E_{tirne grede}}{E_{prog,telo}}} = 30 \text{ cm} 0,9 \sqrt[3]{\frac{150}{70,37}} = 34,75 \text{ cm}.$$

V naslednji preglednici so prikazane vrednosti kontaktnih napetosti izračunane na planum proge (t.j. stična ploskev med tirno gredo in spodnjim ustrojem, v primeru vgradnje tamponskega sloja predstavlja planum tamponskega sloja, brez tamponskega sloja pa je to tudi planum progovnega telesa) pri hitrosti 80 km/h, kjer dobim vrednosti pod pragi različne od 0 (od praga 13 do praga 17) za opazovalni prerez pod prvo osjo lokomotive SŽ 541 v primeru osnega razmika med pragi 65 cm.

Preglednica 17: Prikaz napetosti na planum proge pri hitrosti 80 km/h pri osnem razmiku 65 cm

Prag	$z$	$\beta_1$	$\beta_2$	$2\varepsilon = \beta_2 - \beta_1$	$2\Psi = \beta_2 + \beta_1$	$\sigma_i$	$\sigma_{zi}$
	[cm]	[rad]	[rad]	[rad]	[rad]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]
13	34,75	1,2815	1,3328	0,0513	2,6143	0,0044	0,00001
14	34,75	0,9795	1,1529	0,1734	2,1324	0,0110	0,00029
15	34,75	-0,3643	0,3643	0,7286	0,0000	0,0159	0,00704
16	34,75	0,9795	1,1529	0,1734	2,1324	0,0111	0,00029
17	34,75	1,2815	1,3328	0,0513	2,6143	0,0063	0,00001
						<b>Σ</b>	<b>0,00764</b>

Skupne kontaktne napetosti pod prvo osjo lokomotive SŽ 541 na planum proge znašajo pri hitrosti 80 km/h 0,076 N/mm<sup>2</sup> (Preglednica 17). Kontaktne napetosti na planum proge pri novogradnji pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 ne presegajo vrednosti mejnih kontaktnih napetosti na planum progovnega telesa, ki po enačbi Heukeloma in Klompa (38) znašajo:

$$\bar{\sigma}_z = \frac{0,006 E_{dyn}}{1+0,7 \log n} = \frac{0,006 \cdot 1,2 \cdot 80 \text{ N/mm}^2}{1+0,7 \log(10^6)} = 0,111 \text{ N/mm}^2.$$

Tako ugotovim, da pri novogradnji s tirnicami 60 E1 in osnim razmikom pragov 65 cm, za vožnjo lokomotive SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h, ni potrebna vgradnja tamponskega sloja.

Napetosti v železniški progi za osni razmik pragov 60 cm in osni razmik 65 cm zberem v naslednji preglednici ter jih primerjam.

Preglednica 18: Primerjava napetosti v železniški progi za osni razmik pragov 60 cm in 65 cm pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h

	Napetosti [N/mm <sup>2</sup> ]			
	<i>a</i>		Mejne napetosti [N/mm <sup>2</sup> ]	Razlika napetosti [%]
	60 cm	65 cm		
Kontaktne napetosti kolo - tirnica	654,57	654,57		0,00
Maksimalne strižne napetosti v tirnici	196,28	196,28	264	0,00
Upogibne napetosti v tirnici	114,38	116,13	282	1,53
Napetosti na stiku tirnica - podložna ploščica	1,98	2,07		4,65
Napetosti na stiku podložna ploščica - prag	1,43	1,50	1,5 - 2,5 (4,0)	4,73
Napetosti na stiku prag - tirna greda	0,149	0,159	0,5	6,45
Napetosti na stiku tirna greda - planum proge	0,074	0,076	0,166	3,24
Napetosti na stiku tirna greda - planum prog. telo	0,074	0,076	0,111	3,30

Sprememba osnega razmika med pragi za 8 %, s 60 cm na 65 cm, nima vpliva na kontaktne napetosti na stiku kolo – tirnica ter na maksimalne strižne napetosti v tirnici. Pri ostalih napetostih pa ne pride do večjih sprememb v železniški progi. Upogibne napetosti v tirnici se povečajo le za 1,53 %. Ostale kontaktne napetosti pa se povečajo za nekje 4 – 7 %, vendar so vse znotraj vrednosti mejnih napetosti.

S tem ugotovim, da lokomotiva SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h za izbran sestav zgornjega ustroja lahko vozi tudi po železniških progah z osnim razmikom pragov 65 cm.

#### 4.6 Upoštevanje podatkov za obstoječe proge

Pri izračunu obstoječih prog upoštevam slabo stanje zgornjega ustroja ( $s = 0,3$ ) ter manjše vrednosti deformacijskih modulov, ki veljajo za obstoječe proge (za tamponski sloj  $E_v = 50 \text{ N/mm}^2$ , pri progovnem telesu pa  $E_v = 20 \text{ N/mm}^2$ ).

Ostali podatki pri izračunu so isti kot so izhodiščni podatki, ki so navedeni na str. 49.

##### 4.6.1 Maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice za obstoječe proge

Kontaktne napetosti na stiku tirnice s kolesom se določijo po enačbi (12) in so:

$$q_{mean} \approx 1374 \sqrt{\frac{Q_{eff}}{r}} \approx 1374 \sqrt{\frac{130,5 \text{ kN}}{575 \text{ mm}}} \approx 654,57 \text{ N/mm}^2.$$

Maksimalne strižne napetosti, ki nastopijo v glavi tirnice, so po enačbi (13):

$$\tau_{max} \approx 0,3 q_{mean} \approx 412 \sqrt{\frac{Q_{eff}}{r}} \approx 412 \sqrt{\frac{130,5 \text{ kN}}{575 \text{ mm}}} = 196,28 \text{ N/mm}^2,$$

in so manjše od mejnih strižnih napetosti, ki se jih določi po enačbi (14):

$$\tau_u \approx 0,3 \sigma_z \approx 0,3 \cdot 880 \text{ N/mm}^2 \approx 264 \text{ N/mm}^2.$$

Ugotovim, da sprememba stanja zgornjega ustroja (z zelo dobrega na slabo) in slabše stanje spodnjega ustroja ne vplivata na maksimalne strižne napetosti v tirnici in na kontaktne napetosti na stiku kolo – tirnica (primerjava s str. 50).

#### 4.6.2 Upogibne napetosti v tirnici za obstoječe proge

Širina namišljenega praga je ista kot pri izračunu v poglavju 4.3 in znaša  $b = 39,75 \text{ cm}$ . Ista je tudi konstanta zgornjega ustroja  $L = 89,51 \text{ cm}$  (poglavje 4.3).

Pri izračunu upogibnih napetosti v tirnici za obstoječo progo upoštevam slabo stanje zgornjega ustroja ( $s = 0,3$ ) ter 99,7 % verjetnost zajetja rezultatov ( $t = 3$ ), ter po enačbi (9) izračunam dinamični koeficient za upoštevanje dinamičnega vpliva prometa pri hitrosti 80 km/h:

$$\alpha_2 = \alpha(V = 80 \text{ km/h}) = 1 + t s \left(1 + \frac{V-60}{140}\right) = 1 + 3 \cdot 0,3 \left(1 + \frac{80-60}{140}\right) = 2,03,$$

torej so pri 99,7 % verjetnosti zajetja vseh rezultatov dejanske vrednosti lahko do 103 % večje od izračunanih srednjih vrednosti.

Ordinata vplivnice za upogibni moment se določi po enačbi (22). Najprej pa določimo vrednost  $\zeta$  v prvi osi:

$$\zeta_1 = \frac{x}{L} = \frac{0 \text{ cm}}{89,51 \text{ cm}} = 0,00$$

$$\mu_1(0,00) = e^{-\xi} [\cos \xi - \sin \xi] = 1,00$$

in za drugo os:

$$\zeta_2 = \frac{x}{L} = \frac{300 \text{ cm}}{89,51 \text{ cm}} = 3,3515$$

$$\mu_2(3,3515) = e^{-\xi} [\cos \xi - \sin \xi] = -0,027.$$

Maksimalni upogibni moment v tirnici 60 E1 pri obstoječi progi je:

$$M = \frac{\Sigma Q_{eff} L \mu}{4} = \frac{130,5 \text{ kN} \cdot 89,51 \text{ cm} \cdot 1}{4} + \frac{130,5 \text{ kN} \cdot 89,51 \text{ cm} \cdot (-0,027)}{4} = 2841,59 \text{ kNcm}$$

$$M_2 = M(V = 80 \text{ km/h}) = M \alpha_2 = 2841,59 \text{ kNcm} \cdot 2,03 = 5764,38 \text{ kNcm}.$$

Maksimalne upogibne napetosti v tirnici pri obstoječi progi pri hitrosti 80 km/h znašajo:

$$\sigma_{din2} = \sigma_{din}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{M_2}{W} = \frac{5764,38 \text{ kNcm}}{333,6 \text{ cm}^3} = 17,279 \text{ kN/cm}^2 = 172,79 \text{ N/mm}^2.$$

Maksimalne upogibne napetosti v tirnici 60 E1 pri obstoječi progi so za 51 % večje od maksimalnih upogibnih napetosti v tirnici 60 E1 za novogradnjo (primerjava s str. 52). Pri 80 km/h so vrednosti upogibnih napetosti pri obrabljeni tirnici 60 E1 manjše od vrednosti mejnih upogibnih napetosti v tirnici 60 E1, ki znašajo  $200 \text{ N/mm}^2$ .

Če tu upoštevam še, da so maksimalne upogibne napetosti pri tirnici 49 E1 za 25 % večje od maksimalnih upogibnih napetosti v tirnici 60 E1 (poglavje 4.4.2), bi pri obstoječih progah s tirnicami 49 E1 dobila vrednosti  $215,99 \text{ N/mm}^2$ , kar pa pri obrabljenih tirnicah 49 E1 presega vrednosti mejnih upogibnih napetosti v tirnici, ki so  $190 \text{ N/mm}^2$  (poglavje 3.1.3). Iz tega ugotovim, da je v primeru obrabljenih tirnic 49 E1 pri obstoječih progah potrebna uvedba počasnejše vožnje ali zamenjava obrabljenih tirnic 49 E1.

#### 4.6.3 Kontaktne napetosti na stiku tirnica – prag za obstoječe proge

Najprej se določi srednja kolesna sila, ki se prenese s tirnice na prag, po enačbi (28). Za tirnico 60 E1 znaša:

$$F_{sr} = \frac{Q_{eff} a}{2L} = \frac{130,5 \text{ kN} \cdot 60 \text{ cm}}{2 \cdot 89,51 \text{ cm}} = 43,74 \text{ kN}.$$

Maksimalna kolesna sila za izračun kontaktnih napetosti na stiku tirnica – prag, pri hitrosti 80 km/h, se izračuna po enačbi (29):

$$F_{max2} = F_{max}(V = 80 \text{ km/h}) = \alpha_2 F_{sr} = 2,03 \cdot 43,74 \text{ kN} = 88,72 \text{ kN}.$$

Ploščina kontaktne površine med tirnico in podložno ploščico je:

$$A_{rs1} = b_t b_l = 15,0 \text{ cm} \cdot 26,5 \text{ cm} = 397,5 \text{ cm}^2.$$

Kontaktne napetosti na stiku tirnica – podložna ploščica so pri hitrosti 80 km/h:

$$\sigma_{rs2} = \sigma_{rs}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{F_o + F_{max2}}{A_{rs1}} = \frac{20 \text{ kN} + 88,72 \text{ kN}}{397,5 \text{ cm}^2} = 0,274 \text{ kN/cm}^2 = 2,74 \text{ N/mm}^2.$$

Ploščina podložne ploščice s pragom je bila izbrana na začetku in sicer  $550 \text{ cm}^2$ . Kontaktne napetosti na stiku podložna ploščica – prag so pri hitrosti 80 km/h:

$$\sigma_{rs2} = \sigma_{rs}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{F_o + F_{max2}}{A_{rs2}} = \frac{20 \text{ kN} + 88,72 \text{ kN}}{550 \text{ cm}^2} = 0,198 \text{ kN/cm}^2 = 1,98 \text{ N/mm}^2.$$

Kontaktne napetosti na stiku podložna ploščica – prag za tirnico 60 E1 na obstoječi progi, pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h, so manjše od vrednosti mejnih kontaktnih napetosti za betonski prag, ki znašajo  $4 \text{ N/mm}^2$  (poglavje 3.1.4), ter od vrednosti mejnih kontaktnih napetosti za leseni prag iz trdega lesa, ki so  $2,5 \text{ N/mm}^2$  (poglavje 3.1.4). V primeru lesenih pragov iz mehkega lesa pa presegajo vrednosti mejnih kontaktnih napetosti, ki so  $1,5 \text{ N/mm}^2$  (poglavje 3.1.4).

#### 4.6.4 Kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda za obstoječe proge

Pri izračunu kontaktnih napetosti na tirno gredo in na planum pri obstoječih progah sem upoštevala slabo stanje zgornjega ustroja ( $s = 0,3$ ) ter 95,4 % statistično verjetnost zajetja rezultatov ( $t = 2$ ), ter s temi podatki po enačbi (9) izračunam dinamični koeficient za upoštevanje dinamičnega vpliva prometa pri hitrosti 80 km/h:

$$\alpha_2 = \alpha(V = 80 \text{ km/h}) = 1 + t s \left(1 + \frac{V-60}{140}\right) = 1 + 2 \cdot 0,3 \left(1 + \frac{80-60}{140}\right) = 1,69.$$

Ploščina kontaktne površine polovice praga s tirno gredo znaša:

$$A_{SB} = b_l \frac{l}{2} = 26,5 \text{ cm} \cdot \frac{260 \text{ cm}}{2} = 3445 \text{ cm}^2.$$

Ordinata vplivnice upogiba pod prvo silo znaša po enačbi (20):

$$\xi_1 = \frac{x}{L} = \frac{0 \text{ cm}}{89,51 \text{ cm}} = 0,00$$

$$\eta_1(0) = e^{-\xi} [\cos\xi + \sin\xi] = 1,00$$

in za drugo silo:

$$\xi_2 = \frac{x}{L} = \frac{300 \text{ cm}}{89,51 \text{ cm}} = 3,3515$$

$$\eta_2(3,3515) = e^{-\xi} [\cos\xi + \sin\xi] = -0,0416.$$

Kontaktne napetosti na stiku prag – tirna greda pri tirnici 60 E1 za obstoječe proge pri hitrosti 80 km/h znašajo:

$$\sigma_{max2} = \sigma_{max}(V = 80 \text{ km/h}) = \frac{F_{Sr}}{A_{SB}} \alpha_2 \Sigma \eta = \frac{43,74 \text{ kN}}{3445 \text{ cm}^2} 1,69 (1 - 0,0416) = 0,0205 \text{ kN/cm}^2 = 0,205 \text{ N/mm}^2,$$

in so manjše od mejnih napetosti na tirno gredo, ki so 0,5 N/mm<sup>2</sup> (poglavje 3.1.5).

#### 4.6.5 Kontaktne napetosti na stiku tirna greda – progovno telo za obstoječe proge

Za izračun kontaktnih napetosti na stiku tirna greda – progovno telo se najprej po Odemarkovi teoriji po enačbi (31) določi nadomestne višine posameznih plasti glede na modul elastičnosti materiala v progovnem telesu. Tako namesto večplastnega sistema dobimo enakovreden homogen elastični polprostor. Pri obstoječih progah mora minimalni deformacijski modul planuma progovnega telesa  $E_v$  ustrezati vrednosti 20 N/mm<sup>2</sup>. Modul elastičnosti progovnega telesa obstoječih prog je po enačbi (39):

$$E = \frac{\pi}{3} (1 - \nu^2) E_v = \frac{\pi}{3} (1 - 0,4^2) 20 \text{ N/mm}^2 = 17,59 \text{ N/mm}^2.$$

Nadomestna višina tirne grede je tako po enačbi (31):

$$h_n' = h_n 0,9 \sqrt[3]{\frac{E_{tirne\ grede}}{E_{prog.telo}}} = 30 \text{ cm} 0,9 \sqrt[3]{\frac{150}{17,59}} = 55,16 \text{ cm}.$$

V naslednji preglednici so prikazane vrednosti kontaktnih napetosti izračunane na planum proge (t.j. stična ploskev med tirno gredo in spodnjim ustrojem, v primeru vgradnje tamponskega sloja predstavlja planum tamponskega sloja, brez tamponskega sloja pa je to tudi planum progovnega telesa) za obstoječo progno pod pragom 15 pod prvo osjo lokomotive SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h, kjer dobim vrednosti različne od 0 (od praga 13 do praga 18).

Preglednica 19: Prikaz napetosti na planum proge pri hitrosti 80 km/h za obstoječe proge

	$z$	$\beta_1$	$\beta_2$	$2\varepsilon = \beta_2 - \beta_1$	$2\Psi = \beta_2 + \beta_1$	$\sigma_i$	$\sigma_{zi}$
<b>Prag</b>	[cm]	[rad]	[rad]	[rad]	[rad]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]
13	55,16	1,0939	1,1783	0,0845	2,2722	0,0065	0,00006
14	55,16	0,7031	0,9254	0,2223	1,6284	0,0148	0,00099
15	55,16	-0,2357	0,2357	0,4715	0,0000	0,0205	0,00604
16	55,16	0,7031	0,9254	0,2223	1,6284	0,0147	0,00098
17	55,16	1,0939	1,1783	0,0845	2,2722	0,0081	0,00008
18	55,16	1,2513	1,2928	0,0414	2,5441	0,0081	0,00002
						<b>Σ</b>	<b>0,00817</b>

Ugotovim, da se ob upoštevanju vrednosti za obstoječo progo, napetosti na planum proge večje kot pri novogradnji. Vrednosti mejne napetosti pa so za obstoječo progo po enačbi (38) v primeru proge brez tamponskega sloja:

$$\bar{\sigma}_z = \frac{0,006 E_{dyn}}{1+0,7 \log n} = \frac{0,006 \cdot 1,2 \cdot 20 \text{ N/mm}^2}{1+0,7 \log(10^6)} = 0,028 \text{ N/mm}^2.$$

Ugotovim, da so napetosti na planum progovnega telesa (brez tamponskega sloja) večje od mejnih vrednosti. Preverim tudi, če so vrednosti kontaktnih napetosti na planum presežene tudi v primeru, če je vgrajen tamponski sloj z deformacijskim modulom 50 N/mm<sup>2</sup>. Vrednosti mejnih napetosti na planum tamponskega sloja po enačbi (38) znašajo:

$$\bar{\sigma}_z = \frac{0,006 E_{dyn}}{1+0,7 \log n} = \frac{0,006 \cdot 1,2 \cdot 50 \text{ N/mm}^2}{1+0,7 \log(10^6)} = 0,069 \text{ N/mm}^2.$$

Ugotovim, da so presežene tudi vrednosti mejnih napetosti na planum tamponskega sloja. Iz tega ugotovim, da spodnji ustroj obstoječih prog pri izbrani sestavi zgornjega ustroja ni primeren za vožnjo lokomotive SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h. Za obstoječe proge pri izbrani sestavi zgornjega ustroja je zato potrebna uvedba počasnejše vožnje. Če upoštevam, da so razlike med napetostmi pri različnih hitrostih v razmerju, kot so razmerja dinamičnih koeficientov vpliva hitrosti (poglavje 4.3.5), ki se jih določi po enačbah (8) in (9) in sem za hitrost 80 km/h pri izračunu kontaktnih napetosti na tirno gredo in na planum obstoječih prog upoštevala dinamični koeficient 1,69. Pri hitrosti 60 km/h znaša dinamični koeficient ob upoštevanju slabega stanja zgornjega ustroja ( $s = 0,3$ ) ter 95,4 % statistične verjetnosti zajetja rezultatov ( $t = 2$ ) po enačbi (8):

$$\alpha_1 = \alpha(V = 60 \text{ km/h}) = 1 + t s = 1 + 2 \cdot 0,3 = 1,60.$$

Razlika dinamičnih koeficientov je:

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{1,69}{1,60} = 1,056$$

$$\frac{\sigma_{din2}}{\sigma_{din1}} = \frac{0,082}{\sigma_{din1}} = 1,056$$

$$\sigma_{din1} = 0,078 \text{ N/mm}^2.$$

Vse napetosti za novogradnjo in obstoječo progo zberem v isti preglednici in jih primerjam.

Preglednica 20: Primerjava napetosti v železniški progi za novo in obstoječo železniško progo pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h

	Napetosti [N/mm <sup>2</sup> ]			
	Proga		Mejne napetosti [N/mm <sup>2</sup> ]	Razlika napetosti [%]
	Nova	Obstoječa		
Kontaktne napetosti kolo - tirnica	654,57	654,57		0,00
Maksimalne strižne napetosti v tirnici	196,28	196,28	264	0,00
Upogibne napetosti v tirnici	114,38	172,79	200	51,07
Napetosti na stiku tirnica - podložna ploščica	1,98	2,74		38,14
Napetosti na stiku podložna ploščica - prag	1,43	1,98	1,5 - 2,5 (4,0)	38,24
Napetosti na stiku prag - tirna greda	0,149	0,205	0,5	37,66
Napetosti na stiku tirna greda - planum proge	0,074	0,082	0,069	10,80

Sprememba stanja zgornjega ustroja in stanja spodnjega ustroja ne vpliva na kontaktne napetosti na stiku kolo – tirnica ter na maksimalne strižne napetosti v tirnici. Ostale napetosti obstoječe proge pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h pa so bistveno večje kot napetosti pri novogradnji za izbran zgornji ustroj. Mejne napetosti na planum proge so manjše zaradi upoštevanja manjšega deformacijskega modula obstoječe proge.

Ugotovim, da so tudi pri hitrosti 60 km/h napetosti na planum proge večje od mejnih napetosti na planum proge. Iz tega sledi, da mora biti za obstoječe proge pri izbranem zgornjem ustroju uvedena hitrost manjša še od 60 km/h, kar pa povzroča velike zamude v prometu, izgubo energije, prihodka,...

## 5 ZAKLJUČEK

Namen diplomske naloge je bil ugotoviti prenos sil in napetosti skozi prerez železniške proge pod vertikalno obremenitvijo najsodobnejše večsistemske lokomotive voznega parka Slovenskih železnic SŽ 541 za izbrano sestavo zgornjega ustroja. V zadnjem delu diplomske naloge sem zato izračunala sile in napetosti v železniški progi pod prometno obremenitvijo z lokomotivo SŽ 541.

Kot izhodiščne podatke sem upoštevala sestavo proge za novogradnjo s tirnicami 60 E1, osnim razmikom pragov 60 cm, 30 cm tirne grede ter z zelo dobrim stanjem zgornjega ustroja. Ta osnovni izračun je narejen za hitrosti 60, 80 in 100 km/h. Ugotovila sem, da pri izbrani sestavi zgornjega ustroja s podatki za novogradnjo niso presežene nobene vrednosti mejnih napetosti pri hitrosti 60, 80 in 100 km/h, tudi brez tamponskega sloja.

Z izračunom sem ugotovila, da na maksimalne strižne napetosti v glavi tirnice in na kontaktne napetosti na stiku kolo – tirnica ne vpliva hitrost, vpliva pa kolesna obremenitev in radij koles.

Ugotovim, da se z globino večja kontaktna površina med sloji, manjša pa se napetost na stiku med sloji. Pri prenosu sil skozi železniško progo za lokomotivo SŽ 541 sem ugotovila, da le 33,52 % prvotne sile med kolesom in tirnico pride na podložno ploščico in prag, ter se prenese naprej na tirno gredo in progovno telo. Preostali del pa se prenese na sosednje prage. Pri lokomotivi SŽ 541 sta osi podstavnega vozička v ugodnem razmiku, saj druga os deluje v negativnem območju vplivnice, kar povzroča zmanjšanje upogibnih napetosti v tirnici kot tudi zmanjšanje kontaktnih napetosti na tirno gredo in planum.

S primerjavo tirnic 60 E1 in 49 E1 pri hitrosti 80 km/h ugotovim, da so napetosti v železniški progi s tirnico 49 E1 večje, razen strižnih napetosti v glavi tirnice in kontaktnih napetosti na stiku kolo – tirnica, ki ostanejo iste. Maksimalne upogibne napetosti v tirnici 49 E1 so za 25 % večje od maksimalnih upogibnih napetosti v tirnici 60 E1, a niso presežene vrednosti mejnih upogibnih napetosti v tirnici 49 E1 za novogradnjo. Z izračunom za tirnico 49 E1 sem ugotovila, da pri novogradnji niso presežene vrednosti mejnih kontaktnih napetosti na stikih železniške proge ob vgradnji betonskih pragov ali lesenih pragov iz trdega lesa. Prav tako za izbran sestav zgornjega ustroja s tirnico 49 E1 pri hitrosti 80 km/h niso presežene napetosti na planum progovnega telesa pri železniški progi brez tamponskega sloja.

S povečanjem osnega razmika med pragi s 60 cm na 65 cm, se povečajo napetosti v železniški progi, vendar ne pride do večjih sprememb. Ugotovim, da lokomotiva SŽ 541 pri hitrosti 80 km/h za izbran sestav zgornjega in spodnjega ustroja lahko vozi tudi po železniških progah z osnim razmikom pragov 65 cm.

Pri izračunu za obstoječe proge (slabo stanje zgornjega ustroja in upoštevan minimalen deformacijski moduli za obstoječe proge) so vrednosti napetosti bistveno večje kot pri novogradnji. Ugotovim, da so v primeru obrabljenih tirnic 60 E1 upogibne napetosti v tirnici manjše od vrednosti mejnih upogibnih napetosti, v primeru obrabljenih tirnic 49 E1 pa so vrednosti mejnih upogibnih napetosti v tirnici presežene. Zato je pri obstoječih progah z obrabljenimi tirnicami 49 E1 treba uvesti počasnejšo vožnjo ali zamenjati obrabljene tirnice 49 E1.

Ugotovim tudi, da spodnji ustroj obstoječih prog pri izbrani sestavi zgornjega ustroja s tirnico 60 E1 ni primeren za vožnjo lokomotive SŽ 541 s hitrostjo 80 km/h. Za obstoječe proge pri izbrani sestavi zgornjega ustroja je zato potrebna uvedba počasnejše vožnje. Ugotovim, da mora biti za obstoječe proge pri izbranem zgornjem ustroju in pri obremenitvi z lokomotivo SŽ 541 uvedena hitrost manjša od 60 km/h, kar pa povzroča velike zamude v prometu, izgubo energije, prihodka,...



## 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.

Ballast properties. 2013.

[http://railwaysubstructure.org/railwiki/index.php?title=Ballast\\_Properties](http://railwaysubstructure.org/railwiki/index.php?title=Ballast_Properties) (Pridobljeno 18. 7. 2013.)

Esveld, C. 2001. Modern Railway Track. Second Edition. Delft, MRT-Productions: 653 str.

Hribar, D. 2013. Kontrola kakovosti na spodnjem ustroju železniške proge. Gradbeni institut ZRMK d.o.o., Center za prometnice in infrastrukturo.

<http://www.gi-zrmk.si/Knjiznica/RIMC2010%20-%20KONTROLA%20KAKOVOSTI%20NA%20SPODNJEM%20USTROJU%20%20C5%BDELEZNI%20%20C5%A0KE%20PROGE.pdf> (Pridobljeno 12. 8. 2013.)

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

Logar, J. 2013. Priprava temeljnih tal.

<http://www.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/Gradiva%20za%20vec%20predmetov/Skripta%20Janko%20Logar/Gradnja%20nasipov.pdf> (Pridobljeno 31. 7. 2013.)

Miniaturna železnica. 2013.

[http://www.miniaturna-zeleznica.com/galerije/Ziva/1del/data/images/VL\\_028.jpg](http://www.miniaturna-zeleznica.com/galerije/Ziva/1del/data/images/VL_028.jpg) (Pridobljeno 8. 9. 2013.)

Moravec, L. 2011. Auswirkungen von Achslast- und Geschwindigkeitserhöhungen auf den bestehenden Eisenbahnunterbau. Diplomaska naloga. Dunaj, Universität für Bodenkultur Wien (samozaložba L. Moravec): 63 str.

Obnova železniške proge odsek Lipovci – Murska Sobota. 2013.

[http://sobotainfo.com/fotogalerije/slika/13270/457292#slika\\_8](http://sobotainfo.com/fotogalerije/slika/13270/457292#slika_8) (Pridobljeno 15. 7. 2013.)

Railway track in cutting. 2013.

<http://www.panoramio.com/photo/54128707> (Pridobljeno 18. 8. 2013.)

Slokan, I. 2005. Nizke zgradbe. Ceste in železnice. Ljubljana, Tehnična založba Slovenije: 165 – 176 str.

Subballast Properties. 2013.

[http://railwaysubstructure.org/railwiki/index.php?title=Subballast\\_Properties](http://railwaysubstructure.org/railwiki/index.php?title=Subballast_Properties) (Pridobljeno 15. 7. 2013.)

Šuklje, L. 1984. Mehanika tal. Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 147 – 150 str.

Tehnični podatki lokomotive SŽ 541. 2013.

<http://www.miniaturna-zeleznica.com/SZ%20541-nov.htm> (Pridobljeno 12. 8. 2013.)

Track Performance. 2013.

[http://railwaysubstructure.org/railwiki/index.php?title=Track\\_Performance](http://railwaysubstructure.org/railwiki/index.php?title=Track_Performance) (Pridobljeno 15. 7. 2013.)

Zaletelj, M., Flerin, G. 2006. Sodobni trendi pri posodabljanju in vzdrževanju železniške infrastrukture z uporabo "LCC" metode. Ljubljana, DRC – Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije. <http://www.drc.si/Portals/1/Referati/T7-Zaletelj.pdf> (Pridobljeno 10. 9. 2013.)

Zgonc, B. 1996. Železnice I. Projektiranje, gradnja in vzdrževanje prog. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 1 – 11 str.

Zgonc, B. 2012. Železniška infrastruktura. Portorož, Fakulteta za pomorstvo in promet: 6 – 55 str.

Žmavc, J. 2007. Gradnja cest : voziščne konstrukcije. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. DRC – Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 357 str.

### **Pravilniki, standardi in tehnične specifikacije**

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

SIST EN 13230-1:2004. Železniške naprave – Zgornji ustroj – Betonski pragi in kretniški betonski pragi – 1.del: Splošne zahteve. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

SIST EN 13450:2003. Agregati za grede železniških prog. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

TSC 06.100:2003. Kamnita posteljica in povozni plato. Ljubljana, Direkcija za ceste.

TSC 06.200:2003. Nevezane nosilne in obrabne plasti. Ljubljana, Direkcija za ceste.

TSC 06.711:2001. Meritve gostote in vlage. Postopek z izotopskim merilnikom. Ljubljana, Direkcija za ceste.

TSC 06.712:2002. Meritve gostote. Nadomestni postopki. Ljubljana, Direkcija za ceste.

TSC 06.713:2005. Meritve gostote. Postopki kontinuiranih površinskih dinamičnih meritev. Ljubljana, Direkcija za ceste.

TSC 06.720:2003. Meritve in preiskave. Deformacijski moduli vgrajenih materialov. Ljubljana, Direkcija za ceste.

TSI infrastruktura za konvencionalne proge. 2011. Sklep komisije o tehnični specifikaciji za interoperabilnost v zvezi z „infrastrukturnim“ podsistemom vseevropskega železniškega sistema za konvencionalne hitrosti. Bruselj, Evropska skupnost.

UIC Code 719 R. 2008. Earthworks and Track-bed Layers for Railway Lines. Paris, UIC – Mednarodna zveza železnic.

Uredba o kategorizaciji prog. UL RS št. 62/2011.