

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:

Srebot, P., 2016. Model degradacije tira zaradi geometrijskih napak. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Zgonc, B.): 98 str.

Datum arhiviranja: 14-10-2016

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:

Srebot, P., 2016. Model degradacije tira zaradi geometrijskih napak. M.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Zgonc, B.): 98 pp.

Archiving Date: 14-10-2016

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo

Jamova 2, p.p. 3422  
1115 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si



**MAGISTRSKI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
PROMETNA SMER**

Kandidat:

**PRIMOŽ SREBOT, univ. dipl. inž. tehnol. prom.**

**MODEL DEGRADACIJE TIRA ZARADI  
GEOMETRIJSKIH NAPAK**

**Magistrsko delo štev.: 302**

**MODEL FOR TRACK DEGRADATION DUE TO  
GEOMETRY DEFECTS**

**Master of Science Thesis No.: 302**

**Mentor:**

prof. dr. Bogdan Zgonc

**Člana komisije:**

doc. dr. Tomaž Maher

izr. prof. dr. Drago Sever

**Predsednik in član komisije:**

izr. prof. dr. Marijan Žura

Ljubljana, 30. september 2016

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

Spodaj podpisani študent Primož Srebot, vpisna številka 26108394, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: **Model degradacije tira zaradi geometrijskih napak**

### **IZJAVLJAM**

1. da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V Ljubljani, 30. 9. 2016

Podpis: \_\_\_\_\_

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM**

<b>UDK:</b>	<b>625.1/.5(497.4)(043)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Primož Srebot, univ. dipl. inž.</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Bogdan Zgonc, univ. dipl. inž. grad.</b>
<b>Somentor:</b>	
<b>Naslov:</b>	<b>Model degradacije tira zaradi geometrijskih napak</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Magistrsko delo – podiplomski študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>98 str., 19 pregl., 57 sl.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>degradacija geometrije tira, modeli degradacije, kakovost tira</b>

### **Izvleček:**

Najpogostejši vzroki za degradacijo tira so neenakomerno posedanje tira zaradi nehomogenosti podlage, neustreznega vzdrževanja, slabega stanja zgornjega in spodnjega ustroja ipd. Pri napovedovanju degradacije tira moramo vedeti, kdaj bodo mejne vrednosti geometrijskih parametrov tira prekoračene, da se lahko odločimo za pravočasno učinkovito načrtovanje vzdrževalnih in obnovitvenih del ali za druge ukrepe, ki zagotavljajo varnost železniškega prometa. Namen magistrskega dela je preučiti najpomembnejše modele degradacije tira zaradi geometrijskih napak, izbrati model, ki bi bil primeren za uporabo na območju Slovenije, in ta model preveriti na praktičnem primeru izbranega progovnega odseka. Glede na razpoložljive podatke o prometnih obremenitvah po posameznih progovnih odsekih in podatke o merjenju tira z merilnim vlakom sta bila najprimernejša za uporabo v slovenskem okolju avstrijski in švedski model degradacije tira. Avstrijski degradacijski model je primeren predvsem za napovedovanje degradacije tira zaradi posameznih geometrijskih napak v odvisnosti od začetnega stanja kakovosti tira in prometne obremenitve. Švedski degradacijski model pa obravnava geometrijsko degradacijo tira v odvisnosti od standardne deviacije vzdolžnih višinskih napak in standardne deviacije smernih napak leve in desne tirnice. Ugotavljanje standardne deviacije napak je namreč z uveljavitvijo tehničnih specifikacij o interoperabilnosti postalo obvezno merilo za oceno geometrijske kakovosti tira tudi v Sloveniji. Uporabnost obeh modelov je bila preverjena na praktičnem primeru na novo obnovljenem progovnem odseku Gornje Ležeče–Divača in na uravnanem progovnem odseku Ljubljana–Brezovica, ki je bil obnovljen pred 36 leti. Degradacijo tira smo po zadnji strojni regulaciji leta 2012 spremljali do leta 2015. Raziskava je pokazala zelo dobro ujemanje izmerjenih podatkov na terenu z rezultati, izračunanimi s predlaganimi modeli.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 625.1/.5(497.4)(043)  
**Author:** Primož Srebot, B. Sc.  
**Supervisor:** Prof. Bogdan Zgonc Ph.D.  
**Co-advisor:**  
**Title:** Model for track degradation due to geometry defects  
**Document type:** M. Sc. Thesis  
**Scope and tools:** 98 p., 19 tab., 57 fig.  
**Key words:** degradation of the railway track geometry, degradation models, track quality

**Abstract:**

The most common causes of degradation of the track are uneven settling of the track due to inhomogeneity of the base, inadequate maintenance, poor state of the upper and lower structure, etc. In predicting the degradation of the track we need to know when the limits of the geometric parameters of the track are exceeded in order to decide in due time for effective planning of maintenance and renovation work and for taking other measures to ensure railway safety. The aim of this master's thesis is to investigate the most important models of track degradation due to geometry defects, select a model suitable for use in Slovenia, and test this model in practice along a selected section of railway line. Based on the available data on traffic loads by individual rail sections and data on the measurement of the track with a measuring train, the Austrian and Swedish models of degradation of the track were found to be the most suitable for use in the Slovenian context. The Austrian degradation model is particularly well suited for predicting degradation of the track due to various geometric errors, depending on the initial state of the track quality and traffic load. The Swedish degradation model addresses the track geometry degradation as a function of the standard deviation of the longitudinal level defects and standard deviation of the right and left alignment defects. With the introduction of technical specifications on interoperability, determination of the standard deviation of defects has become a mandatory criterion for assessing the geometric quality of the track in Slovenia as well. The applicability of both models was tested in practice along a relatively new section of track between Gornje Ležee and Divača and along a section of track between Ljubljana and Brezovica that was renovated 36 years ago. Degradation of the railway track was monitored after the last regulation by tamping machine in 2012 until 2015. The research showed a very good correlation between data actually measured and the results calculated using the proposed models.

## **ZAHVALA**

Za vso pomoč, strokovne nasvete, potrpežljivost in spodbudne besede v času nastajanja magistrskega dela se iskreno zahvaljujem mentorju, prof. dr. Bogdanu Zgoncu.

Prav tako se zahvaljujem asist. dr. Darji Šemrov za pametne in koristne nasvete.

Zahvalil bi se še vsem, ki so na kakršenkoli način pomagali s podatki pri nastanku mojega magistrskega dela.

**KAZALO VSEBINE**

<b>STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA.....</b>	<b>I</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM.....</b>	<b>III</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....</b>	<b>IV</b>
<b>ZAHVALA.....</b>	<b>V</b>
<b>LIST OF TABLES.....</b>	<b>XIV</b>
<b>LIST OF FIGURES.....</b>	<b>XVI</b>
<b>OKRAJŠAVE IN SIMBOLI.....</b>	<b>XX</b>
<b>SIMBOLI – GRŠKI.....</b>	<b>XXV</b>
<b>1 UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1 Namen in cilji.....	3
1.2 Hipoteze.....	3
1.3 Vsebina magistrskega dela.....	3
<b>2 SILE V ZGORNJEM USTROJU PROGE.....</b>	<b>5</b>
2.1 Vertikalne kolesne sile.....	5
2.2 Horizontalne kolesne sile.....	6
2.3 Prenos napetosti v zgornjem ustroju.....	6
2.4 Vrste prog glede na osno obremenitev.....	8
<b>3 DEGRADACIJA TIRA.....</b>	<b>9</b>
<b>4 DEGRADACIJSKI MODELI.....</b>	<b>16</b>
4.1 Avstrijski model.....	16
4.2 Nemški model.....	17



4.3 Model ORE .....	18
4.4 Shentonov model.....	19
4.5 Avstralski model .....	19
4.6 Japonski model (Satov model) .....	20
4.7 Japonski model (Sugiyamov model).....	21
4.8 Švedski model .....	21
4.9 Poljski model – parameter petih napak .....	23
4.10 Poljski model – kazalnik kakovosti tira <i>J</i> .....	23
4.11 Indijski model.....	24
4.12 Geometrijska degradacija tira s hierarhičnim Bayesovim modelom (HBM) .....	25
4.13 Model za napovedovanje geometrijske degradacije železniškega tira z uporabo nevronske mreže .....	28
4.14 Računalniški program Railway Maintenance Management System (RMMS) pri modeliranju degradacije .....	31
4.15 Povzetek degradacijskih modelov s kratkimi pojasnili .....	33
<b>5 TEHNIČNE SPECIFIKACIJE ZA INTEROPERABILNOST IN STANDARDI, KI DOLOČAJO KAKOVOST TIRA .....</b>	<b>38</b>
5.1 Geometrijska kakovost proge po evropskih standardih.....	38
5.1.1 Merjenje geometrijskih napak in njihove mejne vrednosti po EN 13848-1 in EN 13848-5 .....	39
5.1.1.1 Tirna širina .....	39
5.1.1.2 Vzdolžne višinske napake tira.....	41
5.1.1.3 Nadvišanje tira.....	42
5.1.1.4 Smer tira .....	42
5.1.1.5 Vegavost tira .....	44
5.2 Primerjava mejnih vrednosti napak v odvisnosti od vrste ukrepanja in hitrostnih razredov.....	46
5.3 Primerjava mejnih vrednosti napak med Pravilnikom o vzdrževanju zgornjega ustroja železniških prog in standardom EN 13848-5:2008+A1:2010.....	48
5.3.1 Tirna širina .....	49
5.3.2 Vegavost tira .....	50
5.3.3 Vzdolžne višinske napake .....	51

5.4 Standardna deviacija.....	52
5.5 Kakovost tira v odvisnosti od standardne deviacije napak po standardu EN 13848-6.....	54
5.5.1 Kakovostni razredi (A–E).....	56
5.5.2 Primerjava standardne deviacije s kakovostnimi razredi A–E .....	57
5.6 Kombinirana standardna deviacija (CoSD).....	59
<b>6 VZDRŽEVANJE ŽELEZNIŠKE INFRASTRUKTURE .....</b>	<b>60</b>
6.1 Redno vzdrževanje .....	60
6.2 Investicijsko vzdrževanje .....	61
6.3 Obnova proge (vzdrževalna dela v javno korist).....	61
6.4 Sodobna strojna mehanizacija za vzdrževanje železniške infrastrukture .....	63
6.4.1 Stroj za podbijanje tira.....	63
6.4.2 Stroj za dinamično stabilizacijo tira .....	64
6.4.3 Primerjava med strojnim podbijanjem tira in vzdrževanjem s strojem za dinamično stabilizacijo tira .....	64
6.5 Meritve geometrijskih parametrov tira .....	68
<b>7 IZRAČUN DEGRADACIJE NA PRAKTIČNEM PRIMERU.....</b>	<b>71</b>
7.1 Izračun degradacije tira zaradi posameznih napak .....	71
7.2 Izračun degradacije tira s standardno deviacijo napak .....	74
7.3 Degradacija tira na odseku proge Ljubljana–Brezovica.....	78
7.4 Primerjava degradacije tira s standardno deviacijo vzdolžnih višinskih napak med.....	84
odsekoma Gornje Ležeče–Divača in Ljubljana–Brezovica.....	84
7.5 Ugotovitve raziskovalnega dela.....	85
<b>8 ZAKLJUČEK .....</b>	<b>87</b>
<b>9 POVZETEK.....</b>	<b>89</b>
<b>10 SUMMARY .....</b>	<b>90</b>
<b>11 VIRI.....</b>	<b>91</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: EN-kategorije železniških prog (OJ L 126, 2011)	8
Preglednica 2: Vrednosti koeficientov $a_1$ in $a_0$ v odvisnosti od stanja proge (Lichtberger, 2007)	19
Preglednica 3: Degradacijski modeli	33
Preglednica 4: Primerjava degradacijskih modelov	37
Preglednica 5 in Preglednica 6 podajata mejne vrednosti ukrepanja AL, IL in IAL za posamezne napake pri tirni širini	39
Preglednica 6: Mejne vrednosti odstopanja posameznih napak tirne širine glede na vrsto ukrepanja AL, IL, IAL (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	40
Preglednica 7: Mejne vrednosti odstopanja posameznih napak tirne širine na dolžini 100 m glede na vrsto ukrepanja (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	40
Preglednica 8: Mejne vrednosti posameznih vzdolžnih višinskih napak glede na vrsto ukrepanja AL, IL, IAL (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	41
Preglednica 9: Mejne vrednosti posameznih napak smeri tira glede na vrsto ukrepanja AL, IL, IAL (EN 13848-5:2002+A1:2010, 2010)	43
Preglednica 10: Mejne vrednosti posameznih napak vegavosti tira na bazni dolžini 3,0 m glede na vrsto ukrepanja AL, IL, IAL (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	46
Preglednica 11: Ukrep v odvisnosti od vrednosti vegavosti tira (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010)	50
Preglednica 12: Dopustno višinsko odstopanje za proge v obratovanju (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010)	51
Preglednica 13: Mejne vrednosti standardne deviacije vzdolžnih višinskih napak glede na ukrepanje AL z valovno dolžino D1 (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	53
Preglednica 14: Mejne vrednosti standardne deviacije za smerne napake tira glede na ukrepanje AL z valovno dolžino D1 (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	54
Preglednica 15: Mejne vrednosti standardne deviacije smernih napak tira glede na kakovostni razred A–E (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)	56

Preglednica 16: Mejne vrednosti standardne deviacije vzdolžnih višinskih napak glede na kakovostni razreda A–E (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)	56
Preglednica 17: Življenjska doba učinkov vzdrževalnih ukrepov v odvisnosti od prometne obremenitve (Lichtberger, 2007)	62
Preglednica 18: Mejne vrednosti <i>KT</i> 500 za glavne proge na območju Slovenskih železnic (Poročilo o meritvah z FMK 004, 2015)	70
Preglednica 19: Primerjava kakovosti tira z $\sigma_{LL}$	84
Preglednica 20: Primerjava med avstrijskim in švedskim modelom	85

## KAZALO SLIK

Slika 1: Sile v zgornjem ustroju proge (Zerbst et al., 2009)	5
Slika 2: Razpored napetosti v zgornjem ustroju (Lichtberger, 2007)	7
Slika 3: Degradacija tira v funkciji polmera krivine (Larsson, 2004)	10
Slika 4: Prikaz geometrijske degradacije tira: LLL, RLL, LHA, RHA, C, GD in T (Andrade in Teixeira, 2013)	11
Slika 5: Degradacijski postopek (Lichtberger, 2001)	12
Slika 6: Podroben prikaz geometrijske degradacije tira (Guler et al., 2011)	13
Slika 7: Shematični prikaz geometrijske degradacije kakovosti tira (Lichtberger, 2007)	14
Slika 8: Degradacija tira na posameznem odseku v odvisnosti od časa (Veit, 2013)	17
Slika 9: Smerna napaka leve in desne tirnice ter nadvišanja tira (Arasteh et al., 2012)	22
Slika 10: Shematični prikaz značilne dvotirne proge z indeksi $s$ , $v$ , $k$ (Andrade in Teixeira, 2013)	26
Slika 11: Grafični prikaz modela degradacije geometrije tira na posameznem odseku proge $k$ , $v$ obravnavani progi $v$ in na območju $s$ (Andrade in Teixeira, 2015)	27
Slika 12: Posamezne izmerjene degradacijske vrednosti geometrije tira (Guler, 2013)	29
Slika 13: Uporaba programa RMMS pri modeliranju degradacije (Jovanović et al., 2015)	31
Slika 14: Degradacija geometrije tira na praktičnem primeru (Jovanović et al., 2015)	32
Slika 15: Tirna širina – novi tirnici (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)	39
Slika 16: Tirna širina – obrabljeni tirnici (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)	39
Slika 17: Vzdolžne višinske napake (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)	41
Slika 18: Nadvišanje tira (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)	42
Slika 19: Smer tira (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)	43
Slika 20: Vegavost tira (Westhuizen et al., 2013)	44
Slika 21: Mejne vrednosti ukrepanja IAL pri vegavosti tira (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	45
Slika 22: Primerjava mejnih vrednosti odstopanja od normalne tirne širine glede na vrsto ukrepanja AL, IL, IAL v odvisnosti od hitrosti (Li, 2012)	47

Slika 23: Primerjava mejnih vrednosti vzdolžnih višinskih napak z valovno dolžino D1 glede na vrsto ukrepanja AL, IL, IAL v odvisnosti od hitrosti (Li, 2012)	47
Slika 24: Primerjava mejnih vrednosti vzdolžnih višinskih napak z valovno dolžino D2 glede na vrsto ukrepanja AL, IL, IAL v odvisnosti od hitrosti (Li, 2012)	48
Slika 25: Primerjava odstopanja od normalne tirne širine med Pravilnikom o zgornjem ustroju železniških prog in evropskim standardom Geometrijska kakovost proge (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	49
Slika 26: Prikaz dopustne vrednosti vegavosti tira za merno osnovo 6 m (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	50
Slika 27: Primerjava mejnih vrednosti vzdolžnih višinskih napak v premi in krivini v milimetrih	52
Slika 28: Prikaz standardne deviacije (Jesenko, 2002)	53
Slika 29: Kumulativna frekvenčna distribucija standardne deviacije vzdolžnih višinskih napak (LL) (Track Geometry Activities, 2012)	55
Slika 30: Kumulativna frekvenčna distribucija standardne deviacije smernih napak (AL) (Track Geometry Activities, 2012)	55
Slika 31: Primerjava med standardno deviacijo za smerne napake in standardno deviacijo za višinske napake ter kakovostnimi razredi A–E (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)	57
Slika 32: Primerjava med standardno deviacijo za smerne napake in kakovostnimi razredi A–E (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)	58
Slika 33: Grafični prikaz porazdelitve kakovostnih razredov na območju evropskih železnic (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)	58
Slika 34: Primerjava med obnovljenim in neobnovljenim tirom na železniški progi cepišče Prešnica–Koper potniška (Program DrezStac, 2016)	62
Slika 35: Obstojnost dviga v odvisnosti od velikosti dviga tirnice pri strojni regulaciji (Lichtberger, 2007)	64
Slika 36: Primerjava učinka vzdrževanja s strojno regulacijo in dinamično stabilizacijo tira na kakovost tira (Lichtberger, 2007)	65

Slika 37: Delovni stroj Unimat 09-32/4S za regulacijo tira z uporabo dinamične stabilizacije tira (Hochleistung Präzision Zuverlässigkeit, 2016)	66
Slika 38: Prenos tresljajev po tiru (Hochleistung Präzision Zuverlässigkeit, 2016)	66
Slika 39: Primerjava prenosa obremenitve med dinamično stabilizacijo tira in strojno regulacijo tira (Lichtberger, 2007)	67
Slika 40: Merilna drezina FMK 004 (Bence, 2015)	69
Slika 41: Nadzor nad geometrijo tira pri merilnem vlaku FMK 004 (Bence, 2015)	69
Slika 42: Vzdolžni profil obravnavanega odseka od km 658 + 000 do km 658 + 500 (VP Ljubljana–Sežana, 2016)	72
Slika 43: Vrednosti $KT$ 500 2005–2015	72
Slika 44: Prometna obremenitev na odseku železniške proge Gornje Ležeče–Divača	73
Slika 45: Stopnja degradacije tira v odvisnosti od kumulativne prometne obremenitve	74
Slika 46: Standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak $\sigma_{LL}$	75
Slika 47: Standardna deviacija smernih napak $\sigma_S$	76
Slika 48: Degradacija tira vrednosti $Q^*$	77
Slika 49: Standardna deviacija $\sigma_{LL}$ vzdolžnih višinskih napak 2007–2012	77
Slika 50: Standardna deviacija $\sigma_S$ smernih napak 2007–2012	78
Slika 51: Standardna deviacija $\sigma_{LL}$ , prikazana na 0,25 m, na odseku proge Ljubljana–Brezovica	79
Slika 52: Primerjava izmerjene $\sigma_{LL}$ – D1 z mejnimi vrednostnimi	80
Slika 53: Standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak glede na kakovostni razred (A–E) v metrih	80
Slika 54: Primerjava izmerjene $\sigma_S$ – D1 z mejnimi vrednostnimi	81
Slika 55: Standardna deviacija smernih napak glede na kakovostni razred (A–E) v metrih	82
Slika 56: Izmerjeni $KT$ 500 na odseku proge Ljubljana–Brezovica	83
Slika 57: Primerjava degradacije tira med obnovljenim in starim tirom v obratovanju	84

**LIST OF TABLES**

Table 1: EN Categories of railway lines (OJ L 126, 2011)	8
Table 2: Values of coefficient factors $a_1$ and $a_0$ as a function of the track condition (Lichtberger, 2007)	19
Table 3: Degradation models	33
Table 4: Comparison of degradation models	37
Table 5: AL, IL, AIL – Isolated defects – Nominal track gauge to peak value (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	40
Table 6: AL, IL, AIL – Isolated defects – Nominal track gauge to mean track gauge over 100 m (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	40
Table 7: Longitudinal level - AL, IL, IAL – Isolated defects – Mean to peak value (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	41
Table 8: Alignment – AL, IL, IAL – Isolated defects – Mean to peak value (EN 13848-5:2002+A1:2010, 2010)	43
Table 9: Twist – AL, IL, IAL – Isolated defects – Zero to peak value in 3.0 m (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	46
Table 10: Measures depending on the value of twist (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010)	50
Table 11: Permissible longitudinal level deviation in railway line while under operation (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010)	51
Table 12: Limit values of standard deviation of longitudinal level defects with respect to action AL with wavelength range D1 (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	53
Table 13: Limit values of standard deviation of alignment defects to action AL with wavelength range D1 (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	54
Table 14: Limit values of standard deviation of alignment defects with respect to quality class A–E (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)	56



Table 15: Limit values of standard deviation of longitudinal level defects with respect to quality class (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)	56
Table 16: The typical life cycles of various maintenance actions (Lichtberger, 2007)	62
Table 17: Limit values for the <i>KT</i> 500 main lines in the territory of Slovenian Railways (Poročilo o meritvah z FMK 004, 2015)	70
Table 18: Comparison of track quality using $\sigma_{LL}$	85
Table 19: Comparison between the Austrian and Swedish model	85

**LIST OF FIGURES**

Figure 1: Forces in the railway superstructure (Zerbst et al., 2009)	5
Figure 2: Distribution of tension in the railway superstructure (Lichtberger, 2007)	7
Figure 3: Mechanisms for wear and fatigue as a function of radius of curvature (Larsson, 2004)	10
Figure 4: Representation of rail track geometry defects: LLL, RLL, LHA, RHA, C, GD and T (Andrade and Teixeira, 2013)	11
Figure 5: Degradation process (Lichtberger, 2001)	12
Figure 6: Detailed representation of track geometry degradation (Guler et al., 2011)	13
Figure 7: Schematic representation of geometric degradation of track quality (Lichtberger, 2007)	14
Figure 8: Degradation of the railway track in each section as a function of time (Veit, 2013)	17
Figure 9: Right and left alignment defect and cant (Arasteh et al., 2012)	22
Figure 10: Schematic representation of a typical double-track line with indices of area $s$ , segment $v$ and track section $k$ (Andrade and Teixeira, 2015)	26
Figure 11: Graphical representation of track geometry degradation model for a given track section $k$ in segment $v$ in	27
Figure 12: Measured track geometry deterioration (Guler, 2013)	29
Figure 13: Use software RMMS deterioration modelling (Jovanović et al., 2015)	31
Figure 14: Degradation of the track geometry in a practical case (Jovanović et al., 2015)	32
Figure 15: Track gauge for new rail (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)	39
Figure 16: Track gauge for worn rail (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)	39
Figure 17: Longitudinal level defects (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)	41
Figure 18: Cant (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)	42
Figure 19: Alignment (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)	43
Figure 20: Twist (Westhuizen et al., 2013)	44
Figure 21: IAL value for twist (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	45
Figure 22: Comparison of limit values of deviations from normal track gauge with respect to type of action AL, IL, IAL depending on the speed (Li, 2012)	47

Figure 23: Comparison of the limit values of the longitudinal level defects with wavelength range D1 to type of action AL, IL, IAL depending on the speed (Li, 2012)	47
Figure 24: Comparison of limit values of longitudinal level defects with wavelength range D2 with respect to type of action AL, IL, IAL depending on the speed (Li, 2012)	48
Figure 25: Comparison of deviations from normal gauge in the Slovenian Rules for the railway superstructure and the European standard Geometrical quality of track (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	49
Figure 26: Representation of permissible values of track twist on a base of 6 m (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)	50
Figure 27: Comparison of the limit values for longitudinal level defects on a straight and on a curve in millimeters	52
Figure 28: Standard deviation (Jesenko, 2002)	53
Figure 29: Cumulative frequency distribution of standard deviation for longitudinal level (LL) (Track Geometry Activities, 2012)	55
Figure 30: Cumulative frequency distribution of standard deviation for alignment level (AL) (Track Geometry Activities, 2012)	55
Figure 31: Comparison of the standard deviation for longitudinal level and alignment defects and track quality classes A–E (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)	57
Figure 32: Comparison of the standard deviation of alignment defects and track quality classes A–E (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)	58
Figure 33: Graphical representation of the distribution of quality classes of European Railways (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)	58
Figure 34: Comparison between restored and non-restored track on the railway line at the junction Prešnica–Koper (Program DrezStac, 2016)	62
Figure 35: Durability of lift depending on the lift performed (Lichtberger, 2007)	64
Figure 36: Comparison of the effect of maintenance by machine regulation and by dynamic stabilization of the track on the quality of the track (Lichtberger, 2007)	65

Figure 37: Unimat 09-32/4S tamping machine for regulation of the track using dynamic stabilization (Hochleistung Präzision Zuverlässigkeit, 2016)	66
Figure 38: Vibrations of the railway track (Hochleistung Präzision Zuverlässigkeit, 2016)	66
Figure 39: Comparison of load transfer between dynamic stabilization of the track and tamping machine (Lichtberger, 2007)	67
Figure 40: FMK 004 track geometry measuring car (Bence, 2015)	69
Figure 41: Inspection of the geometry of the track using the measuring car FMK 004 (Bence, 2015)	69
Figure 42: Longitudinal profile of the segment from km 658 + 000 to km 658 + 500 (VP Ljubljana-Sežana, 2016)	72
Figure 43: <i>KT 500</i> values from 2005 to 2015	72
Figure 44: Traffic load on the Gornje Ležeče–Divaja section of railway line	73
Figure 45: Coefficient of quality degradation of track depending on cumulative traffic load	74
Figure 46: Standard deviation of longitudinal levels defects $\sigma_{LL}$	75
Figure 47: Standard deviation of alignment defects $\sigma_S$	76
Figure 48: Degradation of the track $Q^*$ values	77
Figure 49: Standard deviation $\sigma_{LL}$ of longitudinal level defects from 2007 until 2012	77
Figure 50: Standard deviation $\sigma_S$ of alignment defects from 2007 until 2012	78
Figure 51: Standard deviation $\sigma_{LL}$ , shown in 0.25 m, on the railway line Ljubljana - Brezovica	79
Figure 52: Comparison of measured $\sigma_{LL}$ – D1 with limit values	80
Figure 53: Standard deviation of longitudinal level defect with respect to quality classes (A–E) in meters	80
Figure 54: Comparison of measured $\sigma_S$ – D1 with limit values	81
Figure 55: Standard deviation of longitudinal level defects with respect to quality classes (A–E) in meters	82
Figure 56: <i>KT 500</i> measured on the Ljubljana–Brezovica section of line	83
Figure 57: Comparison of track degradation between renewed and old track during operation	84

## KRATICE

*AL* – opozorilna meja (ang. *Alert Limit*)

*ANNs* – umetne nevronske mreže (ang. *Artificial Neural Networks*)

*C* – napaka v nadvišanju tira (ang. *Cant Defect*)

*DTS* – dinamična stabilizacija tira (ang. *Dynamic Track Stabilisation*)

*EN* – Evropski standard (ang. *European Norm*)

*GD* – odstopanje od tirne širine (ang. *Gauge Deviation*)

*GRT* – gornji rob tirnice

*HBM* – hierarhični Bayesov model (ang. *Hierarchical Bayesian Model*)

*IAL* – mejna vrednost takojšnjega ukrepanja (ang. *Immediate Action Limit*)

*IL* – intervencijska mejna vrednost (ang. *Intervention Limit*)

*LHA* – smerna napaka leve tirnice (ang. *Left Horizontal Alignment Defect*)

*LL* – višinska napaka (ang. *Longitudinal Level*)

*LLL* – vzdolžna višinska napaka leve tirnice (ang. *Left Longitudinal Level Defect*)

*MCMV* – metoda Monte Carlo markovskih verig (ang. *Markov Chains Monte Carlo*)

*MGT* – obremenitev v milijonih bruto tonah (ang. *Million Gross Tons*)

*ORE* – Inštitut za raziskave (ang. *Office for Research and Experiments*)

*RHA* – smerna napaka desne tirnice (ang. *Right Horizontal Alignment Defect*)

*RLL* – vzdolžna višinska napaka desne tirnice (ang. *Right Longitudinal Level Defect*)

*T* – vegavost tira (ang. *Twist*)

**OKRAJŠAVE IN SIMBOLI**

$A$	aktivacijska funkcija
$a_0$	koeficient odvisnosti od stanja kakovosti proge za tir v obratovanju
$a_1$	koeficient odvisnosti od stanja kakovosti proge za novi tir
$AI$	indeks smernih napak
$AL$	smerne napake s povprečjem leve in desne tirnice
$b$	bočni pospešek
$b_v$	konstanta (0,2 – za posamezni prag; 0,43 – za več pragov)
$B_i$	odstopanje podatkov pri izračunu nevronske mreže
$c$	celotno število vzorcev odseka
$c_A$	koeficient podlage tira
$CL$	medsebojna višinska razlika tirnic v prečni smeri
$C_0SD$	kombinirana standardna deviacija
$C_1$	konstanta podlage tira
$D1$	valovna dolžina $3 < \lambda \leq 25$ m
$D2$	valovna dolžina $25 < \lambda \leq 70$ m
$D3$	valovna dolžina $70 < \lambda \leq 150$ m (200 m)
$D_i$	vrednost povprečne degradacije analitičnega segmenta [mm]
$D_{ij}$	degradacija [mm]
$e_1$	posedanje po prvi ciklični obremenitvi [mm]
$E$	elastični modul jekla [ $2 \cdot 10^5$ N/m <sup>2</sup> ]
$EI$	upogibna togost [Nm <sup>2</sup> ]
$e_N$	posedanje po $N$ -cikličnih obremenitvah [mm]
$e_T$	posedanje tira po obratovalni obremenitvi $T$ [mm]
$e_v$	posedanje tirne grede [mm]
$F_e$	ekvivalent obremenitve kolesa [kN]
$F_i$	statična obremenitev kolesa tipa $i$ [kN]
$G$	tirna širina
$GI$	indeks tirne širine
$h$	nadvišanje tira
$h_i$	izboljšanje višine tira s strojno regulacijo [mm]
$i$	zaporedna številka
$I$	vhodni signal
$I_t$	vztrajnostni moment tirnice [m <sup>4</sup> ]
$j$	število osnih prehodov

$J$	koeficient kakovosti tira [mm]
$k$	odsek proge
$K$	strukturni faktor tira (1,1 – dober tir)
$k_1$	tlačna trdnost podložne gume pod tirnico [N/m]
$k_h = 51,05e^{-0,0152H}$	faktor izračuna za trdoto tirnice [N/mm <sup>2</sup> ]
$k_{l\_hrtop}, k_{l\_lrtop}, k_{l\_hr\_gauge}$	koeficient trenja (od 0,115 – dobro; do 0,497 – suho)
$k_p$	število vzorcev ocene odsekov, ki presegajo dovoljene vrednosti
$K_p$	prožnost tira [N/mm]
$KT\ 500$	indeks kakovosti tira
$l$	število pregledov proge
$L$	razdalja [m]
$L_A$	faktor vpliva tira (1 – neprekinjeno zavarjeni tir; 10 – stikovani tir)
$LL$	vzdolžne višinske napake
$L_e$	konstanta zgornjega ustroja
$m$	število meritev
$M$	faktor strukture
$m_s$	skupna teža praga, tolčenca in tampona [t]
$M_{sub}$	koeficient podajnosti tira [N/m <sup>3</sup> ]
$msvkl$	povprečni indeks kakovosti (porazdeljuje se z normalno porazdelitvijo)
$n$	število izmerjenih podatkov na preučevanem odseku proge
$N$	število osi v drugem obdobju posedanja
$N_G$	število meritev med zaporednima vzdrževalnima in obnovitvenima deloma
$N_S$	skupno število osi
$N_T$	skupno število vseh geometrijskih napak
$N_i$	število obremenitev kolesa tipa i [kN]
$N_{svkl}$	število strojnih regulacij tira od zadnje obnove proge
$N_v$	število cikličnih obremenitev
$O_i$	preračunavanja nevrona
$p$	tlačne napetosti v tirni gredi
$P$	osna teža vozila
$P_b$	maksimalne tlačne napetosti na prag zaradi obremenitve kolesa [Pa]
$P_l$	bočna kolesna sila [kN]
$p(\theta y)$	Bayesovo pravilo

$p_T$	višina težišča vozila nad GRT
$Q$	kakovost tira
$Q_0$	začetna kakovost tira
$Q_{din}$	dinamična kolesna sila
$Q_p$	kolesna sila
$Q_{qstat}$	kvazistatična kolesna sila
$Q_{stat}$	statična kolesna sila
$R$	radij krivine [m]
$Rsvkl$	koeficient (0 – proga v obratovanju; 1 – na novo obnovljena proga)
$s$	obravnavano območje proge
$S$	povprečna rast vzdolžnih višinskih napak na odseku [mm/100 dni]
$SD$	standardna deviacija
$SDA_{maint}$	predpisana standardna deviacija smernih napak pri vzdrževanju zgornjega ustroja prog [mm]
$SDA_{mes}$	izmerjena standardna deviacija smernih napak [mm]
$SDA_n$	predpisana standardna deviacija smernih napak za obnovljeno progo [mm]
$SDG_{maint}$	predpisana standardna deviacija tirne širine pri vzdrževanju zgornjega ustroja prog [mm]
$SDG_{mes}$	izmerjena standardna deviacija tirne širine [mm]
$SDG_n$	predpisana standardna deviacija tirne širine za obnovljeno progo [mm]
$SDT_{maint}$	predpisana standardna deviacija vegavosti tira pri vzdrževanju zgornjega ustroja prog [mm]
$SDT_{mes}$	izmerjena standardna deviacija vegavosti tira [mm]
$SDT_n$	predpisana standardna deviacija vegavosti tira za obnovljeno progo [mm]
$SDU_{maint}$	predpisana standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak pri vzdrževanju zgornjega ustroja prog [mm]
$SDU_{mes}$	izmerjena standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak [mm]
$SDU_{mes}$ in $SDA_{mes}$	povprečje izmerjenih standardnih deviacij za levo in desno tirnico
$SDU_n$	predpisana standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak za obnovljeno progo [mm]
$SD_{left}$	standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak leve tirnice [mm]
$SD_{right}$	standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak desne tirnice [mm]
$S_e$	standardna deviacija tirne širine [mm]
$S_i$	relativna vrednost posedanja
$S_{med}$	srednja vrednost posedanja
$SmerD$	smer desne tirnice



$SmerL$	smer leve tirnice
$S_{opt}$	optimistična vrednost posedanja
$S_{pess}$	pesimistična vrednost posedanja
$s_T$	razdalja med osmi tirnic
$StabD$	stabilnost desne tirnice
$StabL$	stabilnost leve tirnice
$S_w$	standardna deviacija vegavosti tira [mm]
$S_y$	standardna deviacija smernih napak [mm]
$S_z$	standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak [mm]
$t$	čas [leto]
$T$	prometna obremenitev [MGT/leto]
$TGI$	geometrijska kakovost tira
$TI_w$	indeks vegavosti tira
$T_{ij}$	skupna prometna obremenitev [t]
$Tsvkl$	kumulativna prometna obremenitev v bruto tonah od zadnje strojne regulacije tira
$T_t$	prometna obremenitev [t]
$UI$	indeks vzdolžnih višinskih napak
$v$	območje proge
$V$	hitrost vlaka [km/h]
$Veg_{2,5}$	vegavost tira na bazi 2,5 m
$Veg_6$	vegavost tira na bazi 6,0 m
$w$	tehtalni faktor med posameznimi geometrijskimi parametri
$W$	koeficient napake posameznega parametra
$W_5$	pet parametrov napak
$W_e$	napaka tirne širine
$W_g$	napaka v nadvišanju tira
$w_{hr1gauge}(R)$	bočna obraba tirnice pri $R \leq 500$ m
$w_{hr2gauge}(R)$	bočna obraba tirnice pri $500 < R \leq 1.200$ m
$W_{hr\_top}, W_{lr\_top}$	dinamična kolesna sila [kN]
$w_{hr\_top}$	višinska obraba tirnice (zunanja tirnica v krivini)
$w_{lr\_top}$	višinska obraba tirnice (notranja tirnica v krivini)
$W_w$	napaka vegavosti tira
$W_x$	aritmetično povprečje za vzdolžno višinsko napako, za levo in desno tirnico
$W_y$	aritmetično povprečje za smerno napako, za levo in desno tirnico

---

$x$	oddaljenost prijemališča sile
$\bar{x}$	povprečne vrednosti napak [mm]
$x_i$	vrednost parametra na mestu $i$ [mm]
$y$	posedanje tira [mm]
$y_A$	regresijska premica
$y_{svkl}$	indeks kakovosti tira
$z$	širina namišljenega vzdolžnega praga
$Z$	faktor vpliva podlage (1 – dobro; 10 – slabo)

## SIMBOLI – GRŠKI

$\alpha$	koeficient naklona začetne funkcije
$\alpha_{svk}$	začetna vrednost indeksa kakovosti standardne deviacije
$\beta$	koeficient posedanja v drugi fazi
$\beta_{svk}$	koeficient stopnje posedanja
$\Delta a$	interval vzorčenja
$\Delta N$	število osnih prehodov v začetnem obdobju posedanja
$\delta sv$	efekt propadanja
$\Sigma l$	vsota dolžin, pri čemer so vse $\sigma$ -vrednosti višje od dovoljenih mejnih vrednosti za hitrostni razred [m]
$\sigma$	standardna deviacija
$\sigma_{LL_{lim}}$	mejna vrednost standardne deviacije vzdolžnih višinskih napak za hitrostni razred [mm]
$\sigma_{S_{lim}}$	mejna vrednost standardne deviacije napak nadvišanja in povprečne smerne napake zunanje tirnice [mm]
$\sigma_{LL}$	standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak [mm]
$\sigma_S$	standardna deviacija napak nadvišanja in povprečne smerne napake zunanje tirnice [mm]
$\tau_1, \tau_2$	hitrost degradacije
$\varphi$	kot med kolesom in tirom v radiju [°]
$\omega_j$	utež

» ta stran je namenoma prazna«

## 1 UVOD

Železniški promet je precej odvisen od stanja železniške infrastrukture, hkrati pa je pomemben dejavnik ohranitve okolja in prostora. Zahteve v železniškem prometu so se skozi obdobja zelo spremenile, predvsem zaradi višjih hitrosti in prevozov vedno težjih vlakov. V današnjem času se pri transportu zahteva konkurenčnost, točnost, zanesljivost, učinkovitost, dostopnost, prilagodljivost, gospodarnost in hitrost dostave. Železniške proge so zaradi tega veliko bolj obremenjene, zato posledično prihaja do slabšanja kakovosti tira v zgornjem in spodnjem ustroju. Pri vožnji vlakov mora železniška proga prenašati vse vertikalne, bočne in vzdolžne sile. Zaradi delujočih sil prihaja do geometrijskih nepravilnosti tira in mehanskih poškodb tirnic. Geometrijske nepravilnosti izrazimo kot odstopanja glavnih geometrijskih parametrov, kot so smer tira, stabilnost tira, nadvišanje tira, tirna širina in vegavost tira, glede na projektirane vrednosti (Esveld, 2001). Pri mehanskih nepravilnostih pride do poškodb vozne površine na tirnici, valovitosti tirnic, razpok in obrabe tirnične glave. Pri vožnji vlakov po valoviti tirnici prihaja do povečanja oscilacij železniških vozil in hrupnosti vožnje. Zaradi povečanja oscilacij prihaja do povečanja dinamičnih vplivov na tirnico (Yoshihiko, 2001). Dinamične (pre)obremenitve povzročajo slabenje pritrdilnega materiala ter drobljenje in zaobljenje zrn tolčenca pod pragovi ter nastajanje kamenega drobirja v tirni gredi. Pod pragovi zato nastaja praznina, kar se odraža v napakah stabilnosti in vegavosti tira (Srebot, 2003).

V 50. letih 20. stoletja so železniške organizacije začele razvijati merilne vlake in metode za ocenjevanje geometrijske kakovosti tira. Danes z merilnim vlakom merimo parametre v zgornjem in spodnjem ustroju, podatke se nato analizira pri načrtovanju vzdrževalnih del (Li et al., 2008). Različni upravljavci železniške infrastrukture imajo različne metode ocenjevanja kakovosti tira glede na lastne predpise, veljavne standarde ter izračune standardne deviacije (Berggren et al., 2008). Upravljavec železniške infrastrukture najema za meritve geometrijskih parametrov tira moderne merilne drezine, na primer UFM 120 nizozemske družbe Eurailscout ali madžarske merilne drezine FMK 004. Meritev geometrijskih parametrov na tiru se opravlja na vsakih 25 cm. Jovanović (2004) navaja, da kakovost tira dolgoročno izboljšamo s kakovostnim vlaganjem v obnovo, s tem pa lahko precej podaljšamo življenjsko dobo tira.

S spremljanjem kakovosti tira v dobi obratovanja se preverja, kako se kakovost tira pod obremenitvijo degradira. Te podatke se lahko uporabi pri napovedovanju degradacije tira v prihodnosti. Fletcher et al. (2009), Ferreira et al. (2007), Karttunen (2012) in Lichtberger (2001) navajajo, da na degradacijo tira vplivajo različni dejavniki, kot so prometna obremenitev, nagib proge, vrsta zgornjega ustroja, stanje spodnjega ustroja, velikost horizontalnih sestavnih delov proge idr. Degradirani sestavni deli zgornjega ustroja proge povzročajo še dodatno poslabšanje geometrije tira in s tem povečanje tlačnih napetosti z zgornjega na spodnji ustroj proge.

Lichtberger (2001) navaja, da visoko raven začetne kakovosti dosežemo po vzdrževalnih delih z:

- optimalno tehnologijo obnove;
- kakovostno tirno mehanizacijo;
- vgrajevanjem visokokakovostnih materialov.

Ko posamezni sestavni deli presežejo dopustne vrednosti za slovensko železniško omrežje (le-te so predpisane v Pravilniku o vzdrževanju zgornjega ustroja prog (Uradni list RS, št. 92/2010) in v tehničnih specifikacijah za interoperabilnost v zvezi s podsistemom »infrastruktura« železniškega sistema v Evropski uniji (Uredba komisije EU, št. 1299/2014)), je treba izvesti vzdrževalna dela. Esveld (2001) navaja, da so ustrezni vzdrževalni ukrepi naslednji: strojna regulacija, dinamična stabilizacija tira, brušenje tirnic, strojno niveliranje tira, strojno sejanje tirne grede, dodajanje tolčenca, pluzenje tirne grede itd.

Vzdrževanje železniških prog delimo na redno vzdrževanje, investicijsko vzdrževanje ter na vzdrževalna dela v javno korist. Redno vzdrževanje se lahko izvaja interventno ali sistematično, investicijsko vzdrževanje se nanaša na zamenjave iztrošenih sestavnih delov proge, ugotovljenih na podlagi večkratnih pregledov, opazovanj in meritev, vzdrževalna dela v javno korist pa so povezana z izboljšanjem prometno-tehničnih in varnostnih lastnosti železniške proge (Zgonc, 2012). Vzdrževalne ukrepe po Andersson (2002) pa delimo na preventivne in korektivne. Preventivno vzdrževanje se izvaja, preden nastopijo prevelike napake na tiru, korektivno vzdrževanje pa se izvaja, ko se popravila opravljajo že po prekoračenih mejnih vrednostih geometrijskih parametrov tira oziroma ko je varnost v železniškem prometu ogrožena. Espling (2007) navaja, da je korektivno vzdrževanje vsaj trikrat dražje od preventivnega vzdrževanja. Z učinkovitim vzdrževanjem se podaljšuje doba delovanja tira, dolgoročno pa se zmanjšujejo vzdrževalni stroški.

Judge (2002) navaja, da lahko z vzdrževanjem (s strojno regulacijo, brušenjem, mazanjem tirnic) precej izboljšamo kakovost proge. Z izvedbo strojne regulacije podbijalni krampi zapolnijo vse praznine pod pragom s tolčencem in s tem povečajo naležno površino praga. Večja kot je, bolje se teža tira in teža vozečega vozila porazdelita po naležni površini praga, to pa lahko upočasni degradacijo tira.

Trenutno stopnjo degradacije tira ugotavljamo s posameznimi napakami določenih geometrijskih parametrov tira, napoved degradacije pa z modeli.

V tujini so razvili veliko modelov degradacije: od enostavnih, ki se nanašajo na en parameter, do zahtevnejših, ki upoštevajo veliko spremenljivk. Najnovejši modeli geometrijske degradacije upoštevajo hierarhični Bayesov model oziroma model z uporabo nevronske mreže.

## **1.1 Namen in cilji**

Namen magistrskega dela je preučiti teoretične osnove modelov degradacije tira zaradi geometrijskih napak. Ustrezen in učinkovit model omogoča napovedovanje degradacije tira ter načrtovanje vzdrževalnih del.

Cilji dela so:

- preučiti tuje modele o degradaciji tira;
- izbrati uporaben (aplikativen) model o degradaciji tira, primeren za upravljavca železniške infrastrukture v Republiki Sloveniji;
- uporabiti izbrani model na praktičnem primeru.

## **1.2 Hipoteze**

Predmet magistrskega dela je preveritev uporabnosti izbranega degradacijskega modela na izbranem odseku železniške proge. Postavili smo naslednjo hipotezo, ki jo bomo v zaključku magistrskega dela potrdili ali ovrgli: Degradacijski modeli so primerno sredstvo za napovedovanje propadanja tira med zaporednima vzdrževanjema.

## **1.3 Vsebina magistrskega dela**

Magistrsko delo je sestavljeno iz desetih poglavij, ki so zaradi preglednosti razdeljena na več podpoglavij.

V prvem poglavju sta opredeljena problem in predmet raziskovanja, razloženi namen ter cilji magistrskega dela in predstavljeni tuji degradacijski modeli.

V drugem poglavju so prikazane in opisane sile, ki delujejo na zgornji ustroj proge. Prikazan je prenos napetosti z zgornjega ustroja na spodnji ustroj.

V tretjem poglavju sta opisana degradacija tira in geometrijska degradacija tira. Podrobneje so prikazane degradacijske krivulje, ki temeljijo na eni, dveh in treh fazah.

V četrtem poglavju so opisani in predstavljeni degradacijski modeli, ki so jih razvili tuji avtorji. Opisanih je 13 modelov in računalniški program, ki se uporablja za degradacijo.

V petem poglavju so predstavljene vrste vzdrževalnih del železniške infrastrukture. Predstavljeni so redno vzdrževanje, investicijsko vzdrževanje ter vzdrževalna dela v javno korist. Opisane so meritve geometrijskih parametrov tira in kakovost geometrije tira.

V šestem poglavju so predstavljene tehnične specifikacije za interoperabilnost, ki jih Evropska unija predpisuje na področju vzdrževanja zgornjega ustroja. Podana sta prikaz osnovnih definicij TSI in podrobnejši prikaz geometrijske kakovosti po EN 13848-1, EN 13848-5 in pr EN 13848-6.

V sedmem poglavju je na izbranem progovnem odseku na območju Slovenskih železnic prikazan izračun degradacije z izbranimi modeloma tujih avtorjev. Izračun temelji na avstrijskem in švedskem modelu.

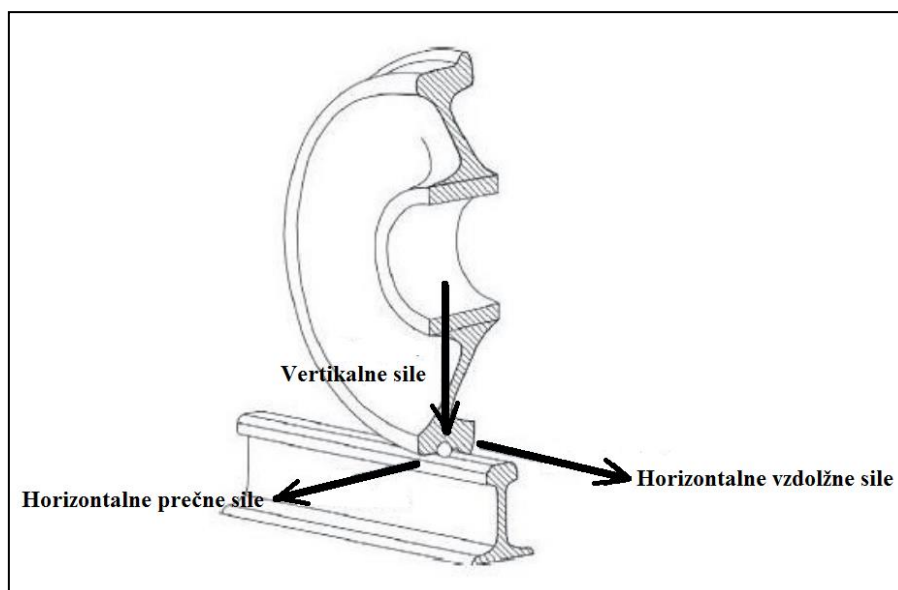
V osmem poglavju so predstavljeni rezultati raziskovanja, potrjena (ali ovržena) hipoteza, podane so tudi usmeritve za nadaljnje raziskovanje.

V devetem poglavju je povzetek.



## 2 SILE V ZGORNJEM USTROJU PROGE

Temeljni nalogi zgornjega ustroja sta vodenje tirnih vozil in prenos prometnih obremenitev na spodnji ustroj. Zgornji ustroj tako opravlja nalogi vodenja in nošenja tirnih vozil. Pri vožnji vlakov delujejo na zgornji ustroj vertikalne in horizontalne (prečne in vzdolžne) sile (Zerbst et al., 2009), ki so shematično predstavljene na prikazu Slika 1. Poleg statičnih, kvazistatičnih in dinamičnih vertikalnih kolesnih sil lahko občasno nastopijo tudi dodatne kolesne sile zaradi vetra, ki na določenih geografskih območjih niso zanemarljive.



Slika 1: Sile v zgornjem ustroju proge (Zerbst et al., 2009)

Figure 1: Forces in the railway superstructure (Zerbst et al., 2009)

Slika 1 prikazuje vertikalne in horizontalne prečne sile v obliki statičnih in dinamičnih kolesnih sil oziroma sil, ki so posledica vodenja vozil. Vertikalne in horizontalne prečne sile se s tirnice prenašajo na posamezne dele zgornjega ter spodnjega ustroja.

### 2.1 Vertikalne kolesne sile

Vertikalne kolesne sile so sestavljene iz statične, kvazistatične in dinamične komponente. Seštevek sil se izračuna po enačbi (Zgonc, 2012):

$$Q_p = Q_{stat} + Q_{qstat} + Q_{din}, \quad (1)$$

pri čemer je:

$Q_p$  = kolesna sila;

$Q_{stat}$  = statična kolesna sila;

$Q_{qstat}$  = kvazistatična kolesna sila;

$Q_{din}$  = dinamična kolesna sila.

Statična kolesna sila je sila teže mirujočega vozila, ki se v premi in horizontali porazdeli na eno kolo, enaka je polovici osne teže vozila, kar prikazuje naslednja enačba:

$$Q_{stat} = \frac{P}{2}, \quad (2)$$

pri čemer je:

$P$  = teža vozila.

Kvazistatične kolesne sile so vertikalne komponente nekompenzirane bočne sile v krivinah. Te sile v povprečju dosežejo okrog 20 % vrednosti statične kolesne sile, izrazimo jih z naslednjo enačbo:

$$Q_{qstat} = 1,2Q_{stat}. \quad (3)$$

Dinamične kolesne sile nastanejo pri gibanju vozil zaradi nepravilnosti na vozni površini tirnice ali na kolesih tirnega vozila in zaradi odstopanja od idealne geometrijske linije tira kot celote. Dinamične kolesne sile izračunamo s pomočjo dinamičnega koeficienta tako, da efektivno kolesno silo, ki je sestavljena iz statične in kvazistatične komponente, pomnožimo z dinamičnim koeficientom  $\alpha$  po naslednji enačbi (Zgonc, 2012):

$$Q_{din} = (Q_{stat} + Q_{qstat}) \alpha, \quad (4)$$

pri čemer je:

$\alpha$  = dinamični koeficient.

## 2.2 Horizontalne kolesne sile

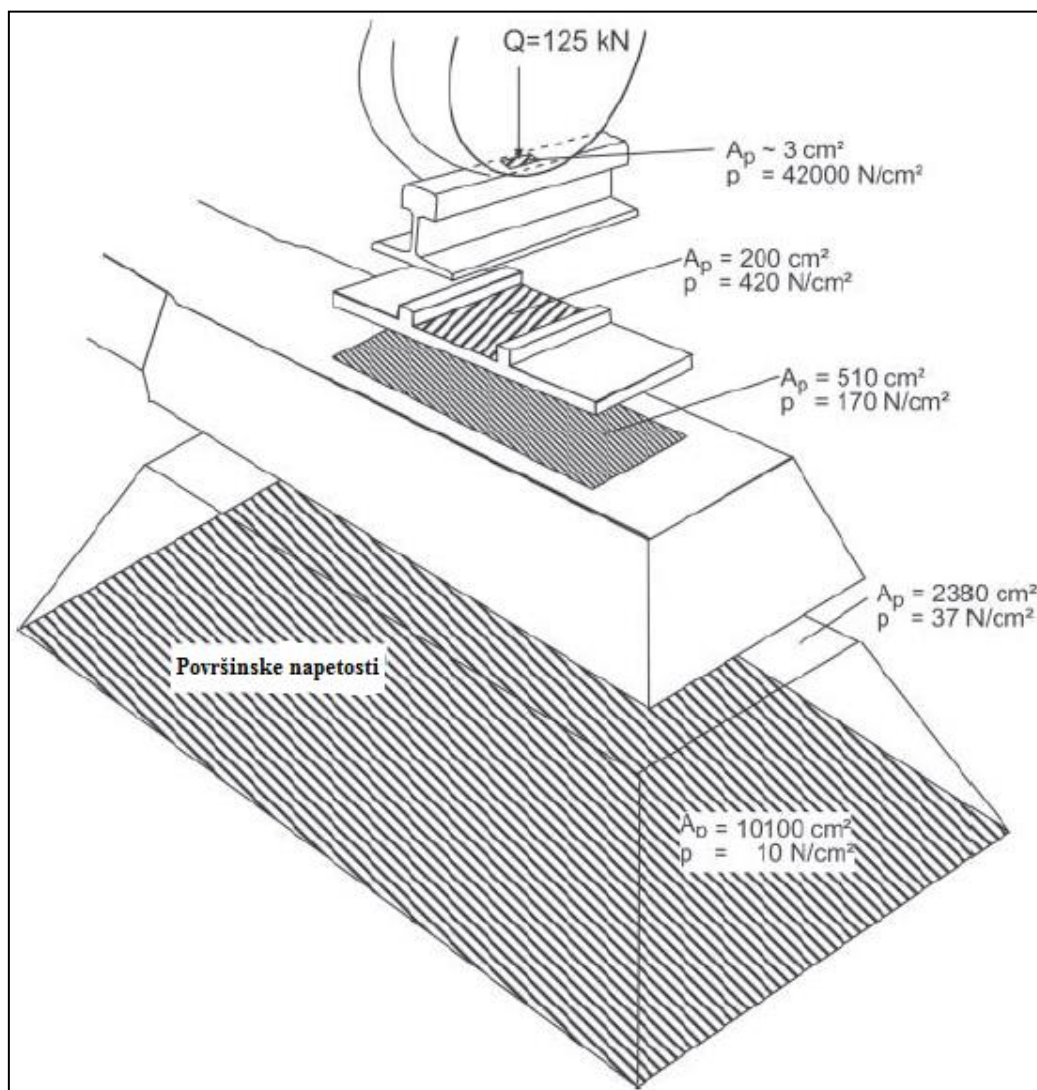
Horizontalne sile delimo na vzdolžne, kadar delujejo v smeri osi tira, in na prečne, kadar delujejo prečno na os tira. Vzdolžne horizontalne sile nastanejo zaradi zaviranja in pospeševanja vozil, oviranega raztezanja ali krčenja tirnic pri temperaturnih spremembah, potovanja tirnic, varjenja ter zaradi zaostalih napetosti v tirnici. Zaostale napetosti so posledica postopka pri izdelavi in valjanju tirnic, dosežejo vrednosti 50–100 N/mm<sup>2</sup>. Najpomembnejše so sile, ki nastanejo zaradi temperaturnih sprememb.

Prečne horizontalne sile so skoraj v celoti posledica vodenja tirnih vozil. Najpomembnejša prečna sila je sila vodenja, ki deluje na tirnico v smeri pravokotno na os tira (Zgonc, 2012).

## 2.3 Prenos napetosti v zgornjem ustroju

Pri prenosu kolesnih sil prevzemajo posamezni deli zgornjega in spodnjega ustroja napetosti. Le-te ne smejo presegati mejnih vrednosti napetosti materialov, ki sestavljajo zgornji ter spodnji ustroj proge.

Zgornji ustroj mora te napetosti prerazporediti tako, da se izogne prekomernim pritiskom praga na tirno gredo in pritiskom tirne grede na planum proge ter na spodnji ustroj. Prenos napetosti z zgornjega na spodnji ustroj je podan na prikazu Slika 2 (Lichtberger, 2007).



Slika 2: Razpored napetosti v zgornjem ustroju (Lichtberger, 2007)

Figure 2: Distribution of tension in the railway superstructure (Lichtberger, 2007)

Obstaja neposredna povezava med napetostmi in preoblikovanjem (deformacijami), ki nastanejo v zgornjem ustroju. Zmanjšanje napetosti v posameznem sestavnem delu lahko dosežemo z naslednjimi ukrepi (Kostiov in Černe, 2004):

- z uporabo močnejših profilov tirnic, ki porazdelijo sile na več pragov;
- povečanjem stične površine med tirnico in pragom;
- zmanjšanjem razdalje med pragovi;
- povečanjem stične površine praga/tirne grede;
- povečanjem debeline tirne grede.

## 2.4 Vrste prog glede na osno obremenitev

Prometna obremenitev, izražena z osno obremenitvijo in obremenitvijo na tekoči meter proge, je odločilni parameter za določitev potrebne nosilnosti oziroma kategorije proge. Glede na dopustno osno obremenitev in obremenitev na tekoči meter se proge delijo na kategorije, podane v Preglednica 1 (OJ L 126, 2011).

Preglednica 1: EN-kategorije železniških prog (OJ L 126, 2011)

Table 1: EN Categories of railway lines (OJ L 126, 2011)

Obremenitev p [t/m]		Obremenitev P [t/os]				
		A	B	C	D	E
		16,0 t	18,0 t	20,0 t	22,5 t	25,0 t
1	5,0 t/m	A	B1			
2	6,4 t/m		B2	C2	D2	
3	7,2 t/m			C3	D3	
4	8,0 t/m			C4	D4	E4
5	8,8 t/m					E5

Preglednica 1 prikazuje kategorije osnih obremenitev, ki so izražene z velikimi tiskanimi črkami (A, B, C, D, E, F, G), in kategorije obremenitev na tekoči meter, izražene z arabskimi številkami (1, 2, 3, 4, 5). Proga se razporedi v eno izmed navedenih kategorij, če je usposobljena za obratovanje z obremenitvijo, ki ustreza tej kategoriji. Glavne proge v slovenskem železniškem omrežju skoraj v celoti ustrezajo kategoriji D3. Ta kategorija je v Sloveniji razglašena kot državna kategorija.

### 3 DEGRADACIJA TIRA

Pod vplivom prometnih obremenitev se geometrijski parametri tira postopoma slabšajo. Fletcher et al. (2009) in Lichtberger (2007) so ugotovili, da so glavni vzroki degradacije tira naključno posedanje tirne grede zaradi drobljenja tolčenca, posedanja podlage, na kateri tirna greda leži, oziroma zaradi neravnosti voznih površin tirnic in neenakomernih dinamičnih sil, ki jih povzročajo tirna vozila.

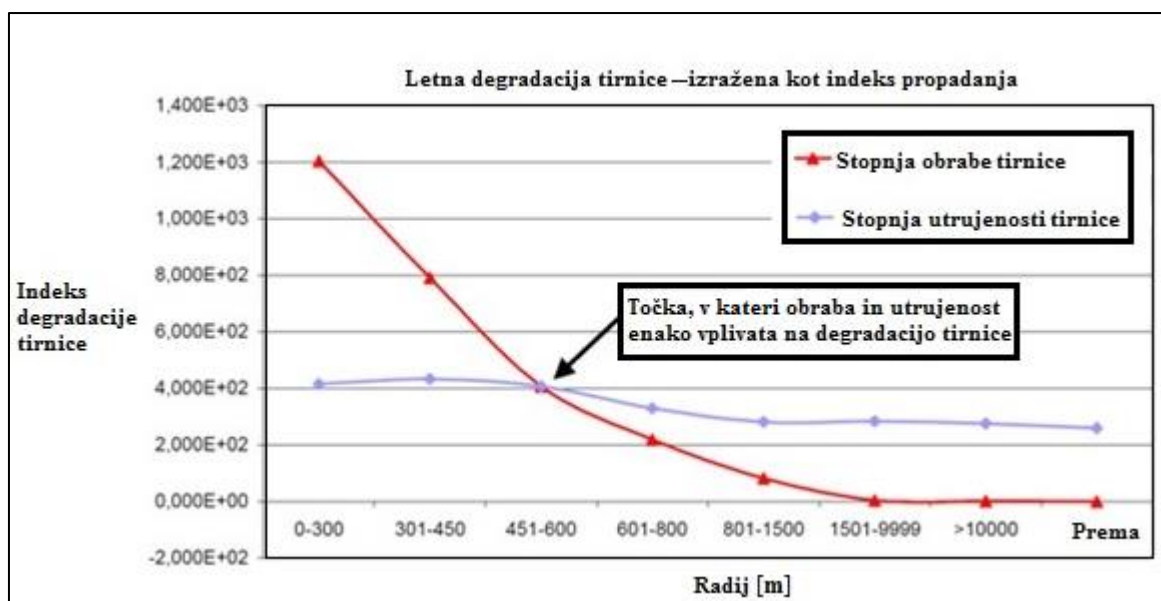
Raziskovalci Berggren (2005), Guler (2013), Mundrey (2003) in Sadeghi in Asgarinejad (2007) so ugotovili, da so za padeč kakovosti tira skoraj v celoti odločilni trije parametri: dinamične sile, osna obremenitev in hitrost vlaka. Pri višjih hitrostih vlaka se povečujejo dinamične sile, kar zelo vpliva na povečano stopnjo degradacije. Velika osna obremenitev poveča obrabo in utrujenost materiala, obrabo koles, napetosti v tiru ter pragovih. Posledično se pojavijo poškodbe na tirnicah in pragovih, kot so razpoke, obraba tirnične glave, zmanjšanje čvrstosti pritrditve tira, kar povzroči prerazporeditev obremenitev na tirno gredo. Zaradi teh poškodb se lahko poveča degradacija tira, to pa lahko vodi do potrebe po zmanjšanju hitrosti oziroma do zapore proge (Ferreira in Murray, 1997).

Ferreira (2007), Grassie (2005) in Jaiswal (2009) so ugotovili, da so pomembni vzroki za degradacijo tira obraba tirnične glave, rebričenje in utrujenost materiala.

Larsson (2004) je izvedel analizo o tem, kako radij krivine vpliva na obrabo in utrujenost tirnice. Ugotovil je, da radij krivine vpliva na degradacijo tirnice na naslednji način:

- v ostrih krivinah se degradacija tirnice odraža bolj z obrabo kot z utrujenostjo materiala;
- v premah in krivinah z večjimi polmeri se degradacija tira odraža bolj z utrujenostjo materiala kot z obrabo.

Slika 3 prikazuje, kako polmer krivine vpliva na indeks degradacije tira. Višji indeks pomeni, da bo prej prišlo do poslabšanja kakovosti železniške proge. Tako lahko sklepamo, da do radija 600 m na degradacijo tira bolj vpliva obraba tirnice, od radija 600 m dalje pa utrujenost materiala. Do podobnih ugotovitev je prišel tudi Torstensson (2012).



Slika 3: Degradacija tira v funkciji polmera krivine (Larsson, 2004)

Figure 3: Mechanisms for wear and fatigue as a function of radius of curvature (Larsson, 2004)

Karttunen (2012) ugotavlja, da:

- je degradacija v obliki vzdolžnih višinskih in smernih napak linearno odvisna od prometne obremenitve ter časovnega presledka med vzdrževalnimi deli po začetnem posedanju tirne grede;
- se stopnja degradacije lahko zelo razlikuje od odseka do odseka tudi pri na videz enakih odsekih z enako prometno obremenitvijo;
- lahko kakovost tira na posameznem odseku pred strojno regulacijo tira in po njej ostane ista.

Berggren (2005), Magel (2011) in Pita et al. (2004) so raziskali tudi vpliv togosti tira na degradacijo. Ugotovili so, da je optimum dosežen pri togosti 70–80 kN/mm z minimalnimi stroški vzdrževanja in izgube energije pri vožnji vlakov.

Drugi raziskovalci so preučevali druge vplive na degradacijo tira. Lichtberger (2001) je razpravljal o vplivu začetne kakovosti proge na hitro degradacijo. Johansson et al. (2008), Lundqvist in Dahlberg (2005), Witt (2008) trdijo, da bi lahko izbor podlage pod pragom vplival na zmanjšanje tresljajev v tleh in na zmanjšanje neenakomerne porazdelitve pritiskov. Zwanenburg (2006) opisuje, da slab material lahko povzroči večjo degradacijo, dober material pa jo upočasni, pojasnjuje pa tudi, da izbira kakovostnih materialov bistveno izboljša zanesljivost in gospodarnost obratovanja proge.

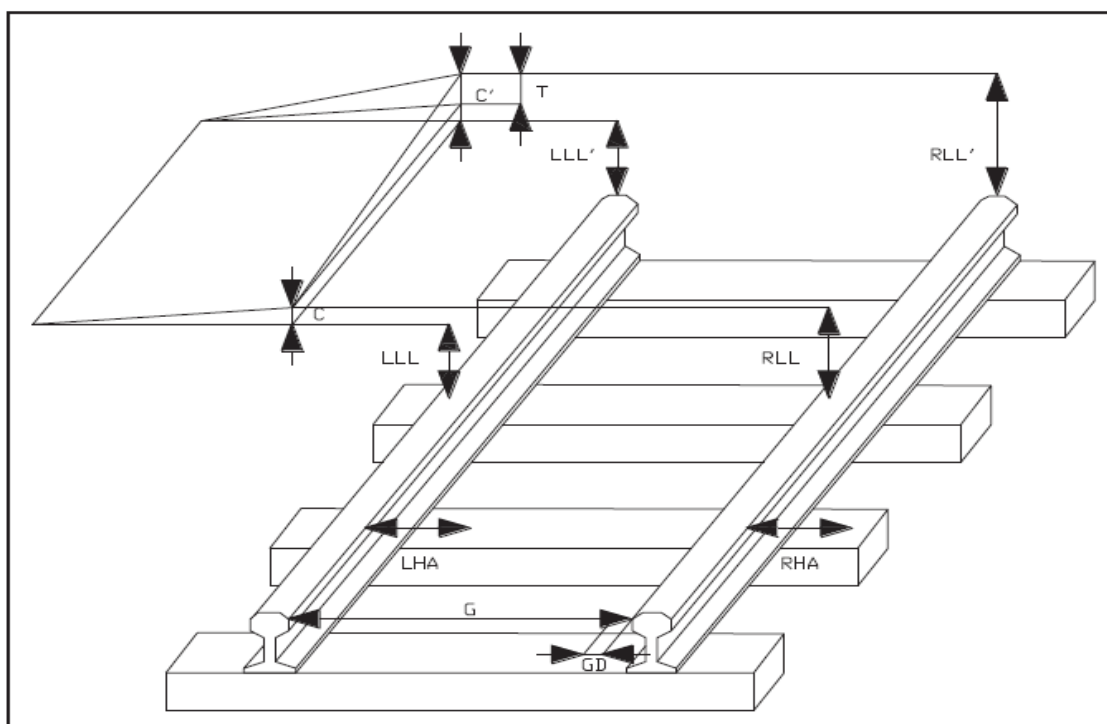
Esveld (2001) je preučeval vpliv prometne obremenitve na degradacijo tira in ugotovil, da se po prevoženih 100 milijonih bruto tonah vzdolžne višinske napake v povprečju povečajo 0,7–1,4 mm,

smerne napake pa se v povprečju povečajo 0,3–0,8 mm. Stopnja degradacije je za vzdolžne višinske napake od 1,4-krat do 3,7-krat večja od smernih napak.

Paderno (2009) navaja, da je razlog za geometrijsko degradacijo v prerazporeditvi tolčenca tirne grede zaradi obremenitve in tresljajev vozečih vlakov. Tolčenec se zaradi strojnih uravnavanj (regulacij) tira in prometnih obremenitev v amortizacijski dobi obrusi, kar lahko vodi do povečane geometrijske degradacije tira, saj pri tem medsebojna povezanost delcev ni več tako trdna. Quiroga in Schnieder (2010) poudarjata, da ima geometrijsko stanje tira zelo pomemben vpliv pri zagotavljanju varnosti in udobja v železniškem prometu.

Guler (2013) navaja, da so najpogostejši povzročitelji napak v geometriji tira neenakomerno posedanje tirne podlage pod obremenitvijo in krajevne napake na tiru: tirni stiki, blatna mesta, rebričanost tirnic itd.

Andrade in Teixeira (2013) navajata, da se lahko degradacija tirne geometrije izrazi s sedmimi napakami, kot prikazuje Slika 4.



Slika 4: Prikaz geometrijske degradacije tira: LLL, RLL, LHA, RHA, C, GD in T (Andrade in Teixeira, 2013)

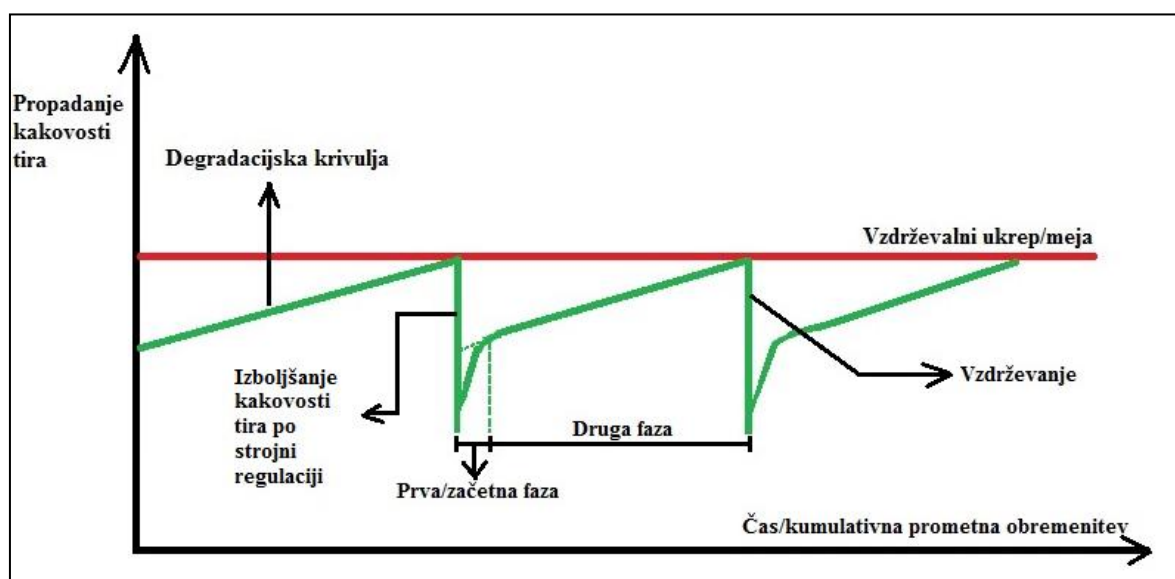
Figure 4: Representation of rail track geometry defects: LLL, RLL, LHA, RHA, C, GD and T (Andrade and Teixeira, 2013)

S prikaza Slika 4 so razvidne naslednje geometrijske napake: vzdolžna višinska napaka leve tirnice LLL (ang. *Left Longitudinal Level Defect*), vzdolžna višinska napaka desne tirnice RLL (ang. *Right*

*Longitudinal Level Defect*), smerna napaka leve tirnice LHA (ang. *Left Horizontal Alignment Defect*), smerna napaka desne tirnice RHA (ang. *Right Horizontal Alignment Defect*), napaka v nadvišanju tira C (ang. *Cant Defect*), odstopanje od tirne širine GD (ang. *Gauge Deviation*) in vegavost tira T (ang. *Twist*). Geometrijsko degradacijo tira navadno izražamo z odstopanjem geometrijskih parametrov v stabilnosti, smeri, nadvišanju, vegavosti in tirni širini, največkrat pa v obliki seštevka napak posameznih geometrijskih parametrov, izraženega z indeksom kakovosti tira, ali kot standardno deviacijo napak v odvisnosti od hitrosti (Zhao et al., 2006; Zhang in El – Sibaie, 2004). Degradacijo tira lahko ugotovljamo z izračunom standardne deviacije v odvisnosti od kumulativne prometne obremenitve ali časa. Prometna obremenitev je v primerjavi s časom primernejši kazalnik spremembe standardne deviacije napak (Andrade in Teixeira, 2015). V času eksploatacije geometrija tira sčasoma degradira, mora pa biti v tolerančnih mejah, kot jih predpisujejo tehnični predpisi. Raziskovalci (Guler et al., 2011; Jovanović, 2004; Lichtberger, 2001) opisujejo degradacijsko krivuljo kot žagasto obliko, saj kakovost tira med dvema zaporednima vzdrževanjema pada.

Mejna vrednost vzdrževanja je označena z vodoravno črto, ki določa, kdaj naj bi se vzdrževalna ali obnovitvena dela izvedla. Ko kakovost tira izboljšamo po izvedenih vzdrževalnih delih, se ciklični proces degradacije začne znova.

Slika 5 prikazuje degradacijski postopek po Lichtberger (2001). Rdeča črta predstavlja vzdrževalni ukrep/meja, zelena črta pa izboljšanje/propadanje kakovosti tira v odvisnosti od prometne obremenitve oziroma časa.



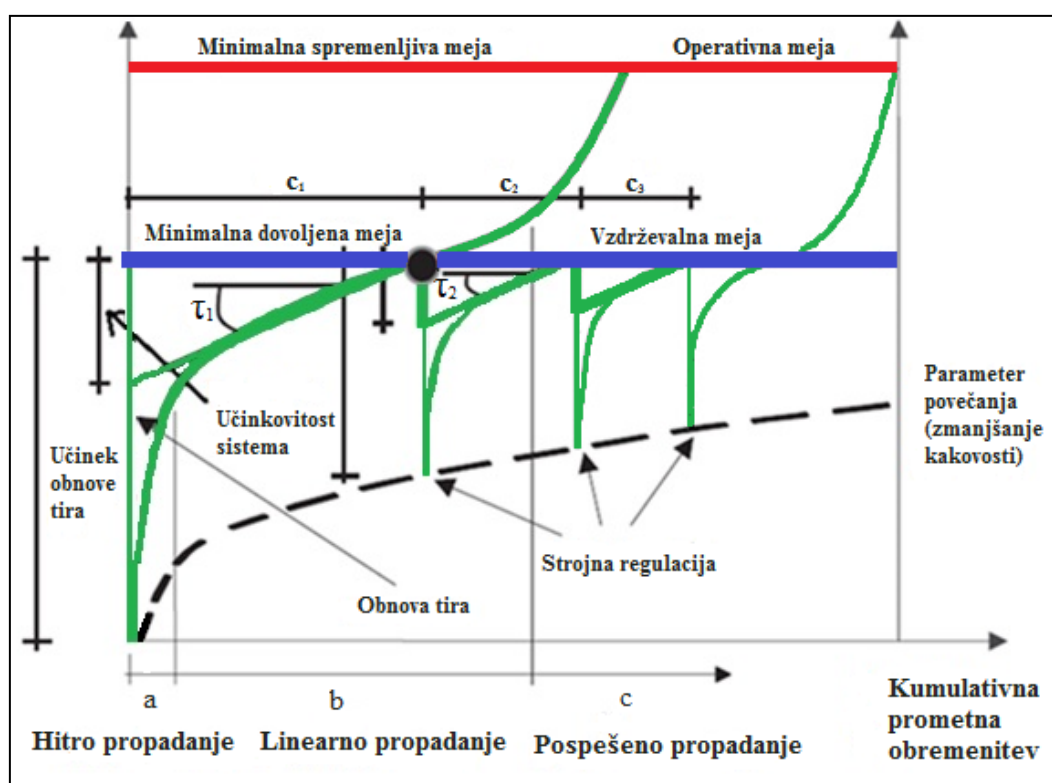
Slika 5: Degradacijski postopek (Lichtberger, 2001)

Figure 5: Degradation process (Lichtberger, 2001)



Proces degradacije po Lichtberger (2001) ima dve fazi – hitro in linearno. Prva je takoj po opravljeni strojni regulaciji, to je približno po 0,5–2,0 milijona bruto tone pripeljanega prometa. V tej fazi je značilno propadanje kakovosti tira po eksponentni degradacijski krivulji, saj se tirna greda po strojni regulaciji hitreje posede. Do posedanja pride predvsem zaradi nehomogenosti tirne grede, strukture tira in različnih obremenitev. Ko se tir dovolj stabilizira, se začne druga faza. Proces degradacije je v tej zadnji fazi počasnejši.

Slika 6 prikazuje degradacijski proces po Guler et al. (2011). Modra črta predstavlja minimalno dovoljeno mejo/vzdrževalno mejo, rdeča črta minimalno spremenljivo mejo/operativno mejo, zelena črta pa predstavlja izboljšanje/propadanje kakovosti tira v odvisnosti od prometne obremenitve.



Slika 6: Podroben prikaz geometrijske degradacije tira (Guler et al., 2011)

Figure 6: Detailed representation of track geometry degradation (Guler et al., 2011)

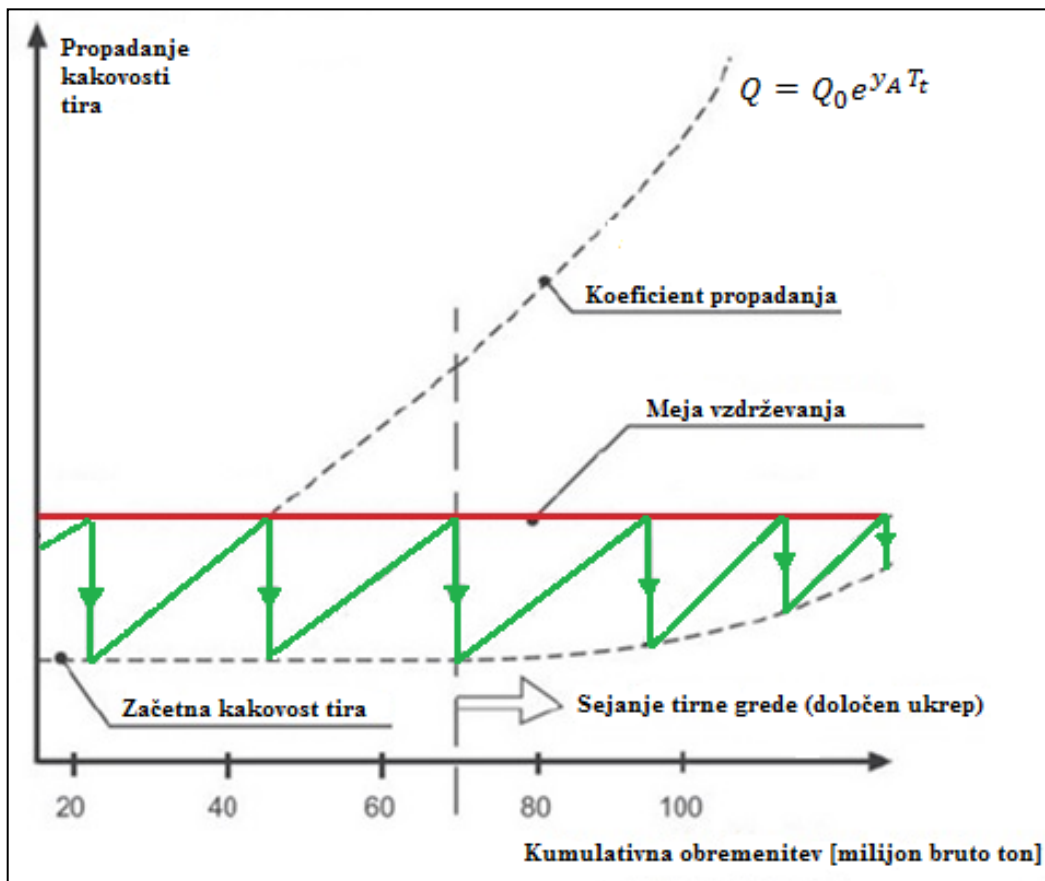
Guler et al. (2011) opisujejo tri faze degradacije: a – hitro propadanje, b – linearno propadanje in c – pospešeno propadanje. Prva in druga faza sta enaki kot po Lichtberger (2001). Guler et al. (2011) navajajo, da se druga faza propadanja razlikuje od odseka do odseka in jo je včasih težko modelirati.

Tretja faza je ob koncu ciklusa delovanja tira. Zanj je značilna pospešena degradacija, ki narašča eksponentno (Slika 6 – območje c).

Hitrost degradacije predstavlja naklon črte, ki je označen s točkami ( $\tau_1, \tau_2$ ).

Lichtberger (2007) navaja, da lahko degradacijski proces shematično poenostavimo z eno fazo. To lahko prikažemo kot linearno gibanje med dvema vzdrževalnima cikeloma oziroma med dvema opravljenima strojnima regulacijama. Pri tem se degradacijo lahko izračuna z upoštevanjem začetne kakovosti tira in eksponentne funkcije v odvisnosti od kumulativne prometne obremenitve z upoštevanjem koeficienta propadanja.

Slika 7 prikazuje poenostavljeni degradacijski proces z eno fazo (Lichtberger, 2007). Rdeča črta predstavlja mejo vzdrževanja, zelena črta pa izboljšanje/propadanje kakovosti tira v odvisnosti od prometne obremenitve.



Slika 7: Shematični prikaz geometrijske degradacije kakovosti tira (Lichtberger, 2007)

Figure 7: Schematic representation of geometric degradation of track quality (Lichtberger, 2007)

Slika 7 prikazuje linearno naraščanje med dvema vzdrževalnima cikeloma ali z eksponentnim naraščanjem degradacije tira v odvisnosti od prometne obremenitve. Do eksponentnega naraščanja pride predvsem v primeru, ko se s strojnimi sejanjem tirne grede predolgo odlašajo. Ko postane tirna greda zablata, izgubi sposobnost prerazporejanja obremenitev. To povzroči visoke tlačne napetosti

pod pragovi ter napetosti na podlago. V tem primeru postane strojna regulacija neučinkovita, zato se želene stopnje geometrijske kakovosti tira ne da doseči (Lichtberger, 2007).

Pri tem je treba geometrijske nepravilnosti tira stalno odpravljati, da se preprečijo poškodbe na tiru in s tem povezani visoki stroški pri vzdrževanju. Stanje tira je določeno s stanjem njegovih sestavin ter njegove geometrije. Ti dve skupini sestavin sta v tesni soodvisnosti znotraj zapletenega procesa degradacije in vzdrževanja. Če je geometrija tira v slabem stanju, bo to glavni vzrok za degradacijo sestavnih delov (komponent); če pa so le-ti v slabem stanju, ne bo možno učinkovito izboljšati geometrije. Vzdrževalna in obnovitvena dela se morajo prilagajati starosti tira. Poleg obremenitev, ki jim je tir podvržen, imata pomembno vlogo število in obseg vzdrževalnih del (Guler et al., 2011; Lyngby, 2009).

## 4 DEGRADACIJSKI MODELI

Tuji avtorji so razvili veliko modelov degradacije tira – od enostavnih, ki se nanašajo na en parameter, do obsežnejših, ki upoštevajo več spremenljivk, ki vplivajo na degradacijo. Avtorji so razvili degradacijske modele z napredovanjem napak v fizični strukturi, kot so posedanje tirne grede ter obraba in rebričanost tirnic. Geometrijska degradacija pa obravnava napake geometrijskih parametrov, ki so posledica vzdolžnih višinskih in smernih napak tira.

### 4.1 Avstrijski model

Avstrijski raziskovalci Hummitszch (2005), Lichtberger (2011) in Veit (2013) so razvili degradacijski model v obliki indeksa kakovosti tira  $Q$ . Indeks kakovosti tira je funkcija začetne kakovosti tira  $Q_0$ , stopnje degradacije tira  $y_A$  (ta vsebuje posamezne vzdolžne višinske in smerne napake ter napake v nadvišanju tira) ter prometne obremenitve  $T_t$ . Za preveritev modela so bile opravljene meritve na 3.800 km avstrijskih prog. Statistično so analizirali podatke o opravljenih meritvah geometrije prog, analizirali so vzdrževanje prog, tehnično stanje zgornjega in spodnjega ustroja ter prometne obremenitve na izmerjenih odsekih. Spodnja enačba je rezultat teh meritev.

Degradacija tira je podana z enačbo:

$$Q = Q_0 e^{y_A T_t}, \quad (5)$$

pri čemer je:

$Q$  = kakovost tira;

$Q_0$  = začetna kakovost tira;

$y_A$  = stopnja degradacije;

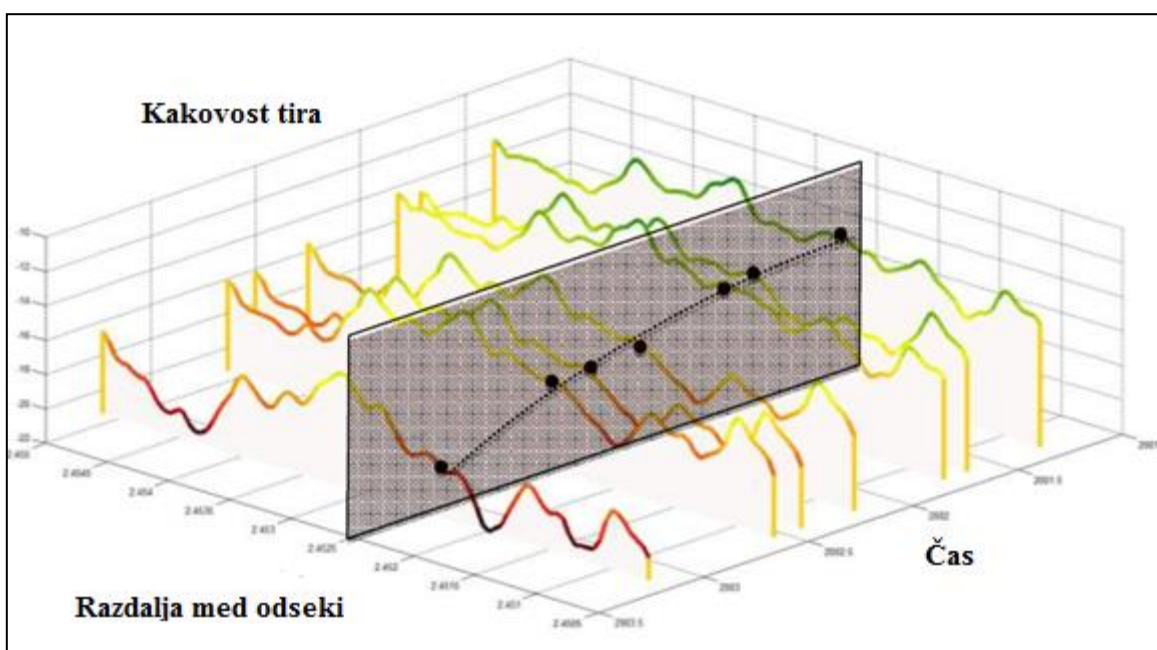
$T_t$  = prometna obremenitev.\*

\*Nekateri namesto prometne obremenitve upoštevajo čas.

Pri spremenljivki  $T_t$  se lahko uporablja čas za obravnavano obdobje, pod pogojem, da je prometna obremenitev konstantna.

Veit (2013) navaja, da je začetna kakovost tira  $Q_0$  odvisna od investicijskih vlaganj, faktor  $e^{y_A T_t}$  pa od vzdrževanja tira. Če zmanjšujemo vzdrževanje, je treba v določenem časovnem obdobju povišati investicijo.

Slika 8 prikazuje degradacijo tira na posameznih odsekih v odvisnosti od časa.



Slika 8: Degradacija tira na posameznem odseku v odvisnosti od časa (Veit, 2013)

Figure 8: Degradation of the railway track in each section as a function of time (Veit, 2013)

#### 4.2 Nemški model

Demharter (1982) obravnava degradacijo stikovanega tira, v katerem je stopnja degradacije izražena s stopnjo posedanja tirne grede  $S$ :

$$S_{opt} = 1,57p\Delta N + 3,04p^{1,21} \ln N, \quad (6)$$

$$S_{med} = 1,89p\Delta N + 5,15p^{1,21} \ln N, \quad (7)$$

$$S_{pess} = 2,33p\Delta N + 15,20p^{1,21} \ln N, \quad (8)$$

pri čemer je:

$S_i$  = relativna vrednost posedanja ( $S_{opt}$  – optimistična,  $S_{med}$  – srednja in  $S_{pess}$  – pesimistična vrednost);

$p$  = tlačne napetosti v tirni gredi [Pa];

$\Delta N$  = število osnih prehodov v začetnem obdobju posedanja;

$N$  = število osnih prehodov v drugem obdobju posedanja;

Tlačne napetosti  $p$  v tirni gredi se izračunajo po enačbi (Demharter, 1982):

$$p = M_{sub} \frac{v}{2.000bM_{sub}L_e} \sum_{osi} \frac{\sin(x/L_e) + \cos(x/L_e)}{e^{x/L_e}}, \quad (9)$$

pri čemer je:

$M_{sub}$  = koeficient podajnosti tira [ $N/m^3$ ];

$z$  = širina namišljenega vzdolžnega praga [m];

$x$  = oddaljenost prijemališča sile [m];

$L_e$  = konstanta zgornjega ustroja [m];

$V$  = hitrost vlaka [km/h].

Konstanta zgornjega ustroja  $L_e$  je podana z enačbo:

$$L_e = \sqrt[4]{\frac{4EI_t}{zM_{sub}}}, \quad (10)$$

pri čemer je:

$E$  = elastični modul jekla [2.100 N/m<sup>2</sup>];

$I_t$  = vztrajnostni moment tirnice [m<sup>4</sup>].

Demharter (1982) obravnava dve stopnji degradacije tira, in sicer začetno stopnjo posedanja takoj po vzdrževalnem delu in drugo stopnjo, pri kateri upošteva posedek, sorazmeren s številom osnih prehodov.

### 4.3 Model ORE

Inštitut za raziskave (ang. *Office for Research and Experiments*, v nadaljevanju ORE) je v 70. letih 20. stoletja razvil degradacijski model v obliki posedanja tirne grede. Model je razdeljen na dva dela. Prvi del izraža degradacijo takoj po strojni regulaciji, drugi del pa jo opisuje kot sorazmerno s številom osnih prehodov. Stopnja degradacije v modelu ORE se izračuna po enačbi (Lichtberger, 2007):

$$e_v = e_1(1 + b_v \log N_v), \quad (11)$$

pri čemer je:

$e_v$  = degradacija (posedanje tirne grede) po  $N$ -osnih prehodov [mm];

$e_1$  = degradacija (posedanje tirne grede) po strojni regulaciji [mm];

$N_v$  = število osnih prehodov;

$b_v$  = konstanta (faktor 0,2 – za posamezni prag; faktor 0,43 – za več pragov).

ORE je leta 1975 objavil drugi model degradacije v odvisnosti od prometne obremenitve, osne obremenitve in stanja proge. Degradacija je opisana z enačbo (Lichtberger, 2007):

$$e_T = a_1 + a_0 \log \frac{T_t}{2 \cdot 10^6}, \quad (12)$$

pri čemer je:

$e_T$  = degradacija (posedanje tirne grede) po prometni obremenitvi  $T$  [mm];

$T_t$  = prometna obremenitev [t];

$a_1$  in  $a_0$  = koeficienta, ki sta odvisna od stanja kakovosti proge.

Preglednica 2: Vrednosti koeficientov  $a_1$  in  $a_0$  v odvisnosti od stanja proge (Lichtberger, 2007)

Table 2: Values of coefficient factors  $a_1$  and  $a_0$  as a function of the track condition (Lichtberger, 2007)

Stanje tira	$a_0$ [mm]	$a_1$ [mm]
Dober tir	2–4	6–10
Zadovoljiv tir	4–6	10–15
Slab tir	6–10	15–20

#### 4.4 Shentonov model

Shenton (1984) je raziskoval različne parametre, ki vplivajo na degradacijo tira. Raziskave je izvedel na različnih progah v Združenih državah Amerike, Združenem kraljestvu Velike Britanije in Severne Irske in nekaterih drugih evropskih državah. Rezultat analize je enačba za določevanje posedanja tirne grede:

$$e_N = K \frac{F_e}{10} ((0,69 + 0,028h_i)N_S^{0,2} + 2,7 \cdot 10^{-6}N_S), \quad (13)$$

pri čemer je:

$e_N$  = degradacija (posedanje tirne grede) [mm];

$K$  = strukturni faktor tira (1,1 – dober tir);

$F_e$  = ekvivalent obremenitve kolesa [kN];

$h_i$  = dvig tira na projektirano višino s strojno regulacijo [mm];

$N_S$  = skupno število osi.

Ekvivalent kolesne obremenitve  $F_e$  se izračuna po enačbi (Shenton, 1984):

$$F_e = \left( \frac{\sum F_i^5 N_i}{\sum N_i} \right)^{0,2}, \quad (14)$$

pri čemer je:

$F_i$  = statična obremenitev kolesa tipa  $i$  [kN];

$N_i$  = število obremenitev kolesa tipa  $i$  [kN].

#### 4.5 Avstralski model

Avstralski model se uporablja za napoved višinske in bočne obrabe tirnic (Zhang et al., 1999).

Višinska obraba se izračuna po enačbah:

$$w_{hr\_top} = 7,6 \cdot 10^{-6} k_h k_{l\_hrtop} W_{hr\_top} \sin \varphi, \quad (15)$$

$$w_{lr\_top} = 9,5 \cdot 10^{-6} k_h k_{l\_lrtop} W_{lr\_top} \sin \varphi, \quad (16)$$

bočna obraba se izračuna po enačbah:

$$w_{hr1\_gauge}(R) = 12,1 \cdot 10^{-6} k_h k_{l\_hr1\_gauge} C_1 P_l \sin \varphi; R \leq 500, \quad (17)$$

$$w_{hr2gauge}(R) = 12,1 \cdot 10^{-6} k_h k_{l_{hr\_gauge}} C_1 P_l \sin \varphi (1,7 - 0,0014R); 500 < R \leq 1200, \quad (18)$$

pri čemer je:

$w_{hr\_top}$  = višinska obraba tirnice (zunanja tirnica v krivini);

$w_{lr\_top}$  = višinska obraba tirnice (notranja tirnica v krivini);

$w_{hr1gauge}(R)$  = bočna obraba tirnice pri  $R \leq 500$  m;

$w_{hr2gauge}(R)$  = bočna obraba tirnice pri  $500 < R \leq 1.200$  m;

$k_{l_{hr\_top}}, k_{l_{lr\_top}}, k_{l_{hr\_gauge}}$  = koeficient trenja med kolesom in tirnico (od 0,115 – slab; do 0,497 – dober);

$k_h = 51,05e^{-0,0152H}$ , H je trdota tirnice [N/mm<sup>2</sup>];

$W_{hr\_top}, W_{lr\_top}$  = dinamična kolesna sila [kN];

$C_1$  = konstanta podlage tira; pri  $R < 500$  m znaša 1, pri  $500 \leq R \leq 1.200$  m znaša  $1,7 - 0,0014 * R$ , pri  $R > 1.200$  m znaša 0;

$P_l$  = bočna kolesna sila [kN];

$\varphi$  = kot med kolesom in tirom v radianih [rad]; pri  $R = 300$  m znaša 0,0058 rad oziroma 0,33°;

$R$  = radij krivine [m].

#### 4.6 Japonski model (Satov model)

Model se uporablja za izračun posedka tira zaradi osnih prehodov v tirni zvezi. Degradacija se izračuna po enačbi Sato (1995):

$$y = \gamma(1 - e^{-\alpha j}) + \beta j, \quad (19)$$

pri čemer je:

$y$  = posedanje tira [mm];

$\gamma$  = koeficient stopnje posedanja;

$\alpha$  = koeficient naklona začetne funkcije;

$j$  = število osnih prehodov;

$\beta$  = koeficient posedanja v drugi fazi.

Sato (1995) je model razdelil na dva dela. Prvi del enačbe se nanaša na izračun posedka tira v obliki posedanja tirne grede, ko se tirna greda utrdi, se tir poseda linearno s številom osnih obremenitev. Obseg posedanja je odvisen od kakovosti in odziva tirne grede, plasti pod tolčencem ter spodnjega ustroja.



#### 4.7 Japonski model (Sugiyamov model)

Iwnicki et al. (1999) navajajo, da je Sugiyama na Japonskem preiskoval napovedovanje vzdolžnih višinskih napak tira v stotih dneh vožnje vlakov. Degradacijo tira so opisali z enačbo (Iwnicki et al., 1999):

$$S = 2,09 \cdot 10^{-3} T^{0,31} V^{0,98} M^{1,1} L_A^{0,21} Z^{0,26}, \quad (20)$$

pri čemer je:

$S$  = povprečna rast vzdolžnih višinskih napak na odseku [mm/100 dni];

$T$  = prometna obremenitev [MGT];

$V$  = povprečna hitrost [km/h];

$M$  = faktor stanja zgornjega ustroja;

$L_A$  = faktor vpliva tira (1 – neprekinjeno zavarjeni tir; 10 – stikovani tir);

$Z$  = vplivni faktor na podlago spodnjega ustroja (1 – dober; 10 – slab).

Faktor stanja zgornjega ustroja se izračuna po enačbi (Iwnicki et al., 1999):

$$M = \frac{P_b \sqrt{k_1}}{\sqrt{m_s \cdot EI \cdot K_p}}, \quad (21)$$

pri čemer je:

$P_b$  = maksimalna tlačna napetost na prag zaradi obremenitve kolesnega venca [Pa];

$k_1$  = tlačna trdnost podložne gume pod tirnico [N/m];

$m_s$  = skupna teža praga, tolčenca in tampona ( $\approx 0,6$  m) [t];

$EI$  = upogibna togost tirnice [ $\text{Nm}^2$ ];

$K_p$  = prožnost tira [N/mm], za hitre proge je 70–80 N/mm, za proge z manjšimi hitrostmi znaša 40–50 N/mm.

Nižja kot je vrednost  $M$ , manjša je degradacija.

#### 4.8 Švedski model

Švedska železniška družba Banverket uporablja za analizo stanja proge kazalnik stanja tira,  $Q$ -vrednost. Kazalnik je funkcija standardne deviacije vertikalnih  $\sigma_{LL}$  in horizontalnih  $\sigma_S$  odstopanj od srednjih vrednosti geometrijskih parametrov na 200-metrskih odsekih tira (Andersson, 2002).

$Q$ -vrednost se izračuna po enačbi (Andersson, 2002):

$$Q = 150 - 100 \frac{\left[ \frac{\sigma_{LL}}{\sigma_{LL_{lim}}} + 2 \frac{\sigma_S}{\sigma_{S_{lim}}} \right]}{3}, \quad (22)$$

pri čemer je:

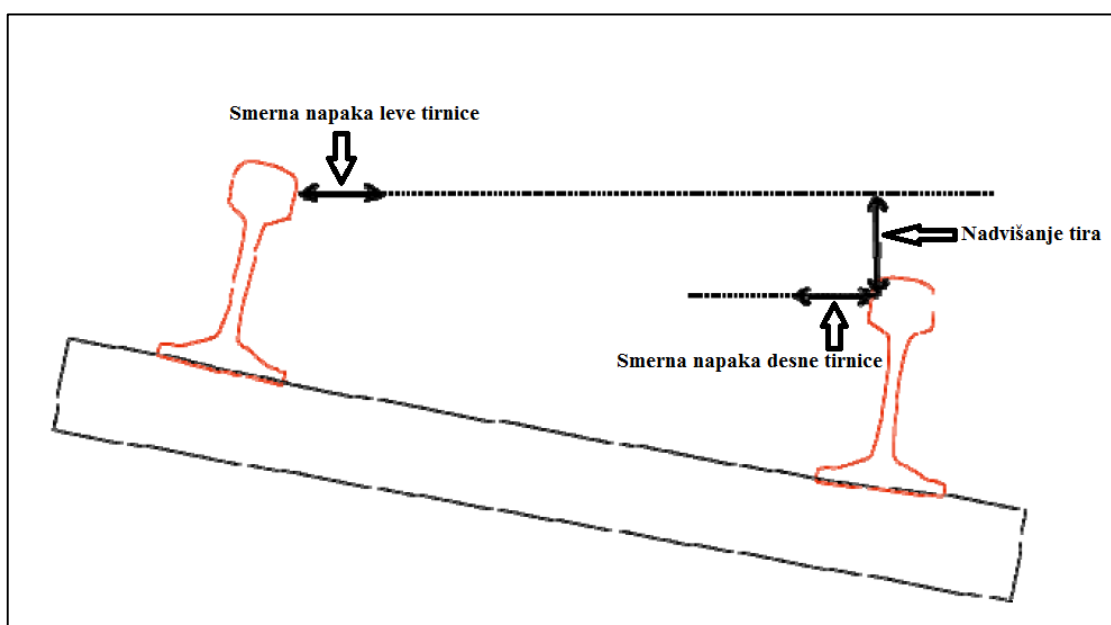
$\sigma_{LL}$  = standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak [mm];

$\sigma_S$  = standardna deviacija napak nadvišanja in povprečne smerne napake zunanje tirnice [mm];

$\sigma_{LL_{lim}}$  = mejna vrednost standardne deviacije vzdolžnih višinskih napak [mm]; za hitrostni razred 75–100 km/h znaša 1,9 mm, za hitrostni razred 100–120 km/h znaša 1,5 mm;

$\sigma_{S_{lim}}$  = mejna vrednost standardne deviacije napak nadvišanja in povprečne smerne napake zunanje tirnice [mm]; za hitrostni razred 75–100 km/h znaša 2,4 mm, za hitrostni razred 100–120 km/h znaša 1,9 mm.

Smerna napaka leve in desne tirnice ter nadvišanja tira, ki se uporablja za izračun standardne deviacije po švedskem modelu, je podana na prikazu Slika 9.



Slika 9: Smerna napaka leve in desne tirnice ter nadvišanja tira (Arasteh et al., 2012)

Figure 9: Right and left alignment defect and cant (Arasteh et al., 2012)

Vrednost  $Q = 150$  pomeni teoretično najvišjo možno vrednost kakovosti tira, sicer pa se vrednosti  $Q$  gibljejo v intervalu  $0 < Q < 120$ . Višja  $Q$ -vrednost pomeni višjo kakovost tira, nižja  $Q$ -vrednost pomeni slabšo kakovost tira.

Za razliko od večine modelov degradacije tira švedski model uporablja kot vhodni podatek standardno deviacijo geometrijskih napak in ne le posameznih geometrijskih napak. Standardna deviacija smernih ter višinskih napak je osnova za raven ukrepanja, opozorila – *Alert Limit* – in je pomemben kazalnik kakovosti tira.

#### 4.9 Poljski model – parameter petih napak

Strokovnjaki poljskih železnic so razvili model, v katerem upoštevajo pet vrst geometrijskih napak tira, ki so obravnavani kot neodvisni dogodki. Parameter petih napak se izračuna po naslednji enačbi (Madejski in Grabczyk, 2002):

$$W_5 = 1 - (1 - W_e)(1 - W_g)(1 - W_w)(1 - W_x)(1 - W_y), \quad (23)$$

pri čemer je:

$W_5$  = parameter petih napak;

$W_e$  = napake v tirni širini;

$W_g$  = napake v nadvišanju tira;

$W_w$  = napake v vegavosti tira;

$W_x$  = aritmetično povprečje vzdolžnih višinskih napak za levo in desno tirnico;

$W_y$  = aritmetično povprečje smernih napak za levo in desno tirnico.

Koeficient napak vsakega izmerjenega parametra se izračuna po enačbi:

$$W = \frac{k_p}{c}, \quad (24)$$

pri čemer je:

$W$  = koeficient napak posameznega parametra;

$k_p$  = število odsekov, ki prekoračujejo mejne vrednosti;

$c$  = celotno število obravnavanih odsekov.

Dopustne mejne vrednosti za odstopanje posameznega geometrijskega parametra so objavljene v razpravi Madejski in Grabczyk (2002).

#### 4.10 Poljski model – kazalnik kakovosti tira $J$

Madejski in Grabczyk (2002) sta kazalnik kakovosti tira  $J$  opredelila s standardno deviacijo štirih geometrijskih parametrov, in sicer kot:

$$J = \frac{S_z + S_y + S_w + 0,5 \cdot S_e}{3,5}, \quad (25)$$

pri čemer je:

$J$  = kazalnik kakovosti tira [mm];

$S_z$  = standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak [mm];

$S_y$  = standardna deviacija smernih napak [mm];

$S_w$  = standardna deviacija vegavosti tira [mm];

$S_e$  = standardna deviacija tirne širine [mm].

Standardna deviacija se izračuna po enačbi:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (26)$$

pri čemer je:

$n$  = število izmerjenih podatkov na preučevanem odseku proge;

$x_i$  = vrednost parametra na mestu  $i$  [mm];

$\bar{x}$  = povprečne vrednosti napak [mm].

Dopustne mejne vrednosti za kazalnik kakovosti  $J$  so objavljene v Madejski in Grabczyk (2002).

#### 4.11 Indijski model

Strokovnjaki indijskih železnic so razvile degradacijski model, ki upošteva standardno deviacijo geometrijskih parametrov za odseke z dolžino 200 m. Vrednost geometrijskega indeksa tira se izračuna po enačbi (Talukdar et al., 2006):

$$TGI = \frac{2UI + TI_w + GI + 6AI}{10}, \quad (27)$$

pri čemer je:

$TGI$  = geometrijska kakovost tira;

$UI$  = indeks vzdolžnih višinskih napak;

$TI_w$  = indeks vegavosti tira;

$GI$  = indeks tirne širine;

$AI$  = indeks smernih napak.

Posamezni indeksi se izračunajo po enačbah:

$$UI = 100e^{-\left(\frac{SDU_{mes} - SDU_n}{SDU_{maint} - SDU_n}\right)}, \quad (28)$$

$$TI = 100e^{-\left(\frac{SDT_{mes} - SDT_n}{SDT_{maint} - SDT_n}\right)}, \quad (29)$$

$$GI = 100e^{-\left(\frac{SDG_{mes} - SDG_n}{SDG_{maint} - SDG_n}\right)}, \quad (30)$$

$$AI = 100e^{-\left(\frac{SDA_{mes} - SDA_n}{SDA_{maint} - SDA_n}\right)}, \quad (31)$$

pri čemer je:

$SDU_{mes}$  = izmerjena standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak [mm];

$SDT_{mes}$  = izmerjena standardna deviacija vegavosti tira [mm];

$SDG_{mes}$  = izmerjena standardna deviacija tirne širine [mm];

$SDA_{mes}$  = izmerjena standardna deviacija smernih napak [mm];

$SDT_n$  = predpisana standardna deviacija vegavosti tira za obnovljeno progo [mm];

$SDG_n$  = predpisana standardna deviacija tirne širine za obnovljeno progo [mm];

$SDA_n$  = predpisana standardna deviacija smernih napak za obnovljeno progo [mm];

$SDU_{maint}$  = predpisana standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak pri vzdrževanju zgornjega ustroja prog [mm];

$SDT_{maint}$  = predpisana standardna deviacija vegavosti tira pri vzdrževanju zgornjega ustroja prog [mm];

$SDG_{maint}$  = predpisana standardna deviacija tirne širine pri vzdrževanju zgornjega ustroja prog [mm];

$SDA_{maint}$  = predpisana standardna deviacija smernih napak pri vzdrževanju zgornjega ustroja prog [mm].

$SDU_{mes}$  in  $SDA_{mes}$  se izračunata kot povprečje izmerjenih standardnih deviacij za levo  $SD_{left}$  in desno tirnico  $SD_{right}$ .

$$SD_{mes} = \frac{SD_{left} + SD_{right}}{2}, \quad (32)$$

pri čemer je:

$SD_{left}$  = standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak leve tirnice [mm];

$SD_{right}$  = standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak desne tirnice [mm].

Mejne vrednosti standardnih deviacij za indijske železnice so opisane v raziskavi Sadeghi in Asgarinejad (2008). Mejne vrednosti za geometrijski indeks TGI so opisane v raziskavi Talukdar et al. (2006).

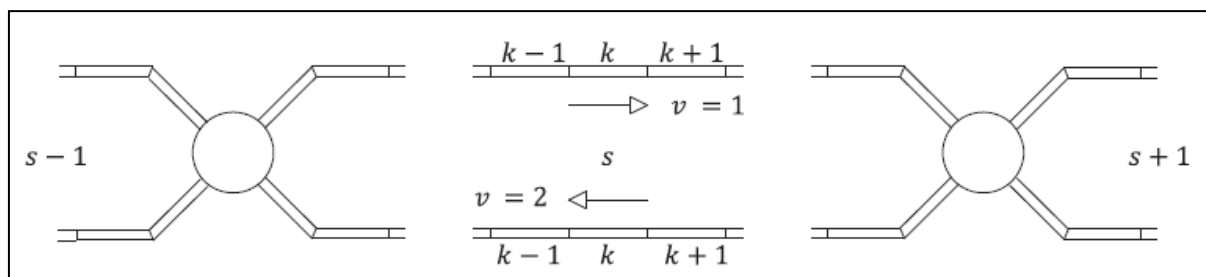
#### 4.12 Geometrijska degradacija tira s hierarhičnim Bayesovim modelom (HBM)

Andrade in Teixeira (2015) sta za napovedovanje razvoja geometrijske degradacije tira uporabila Bayesovo hierarhično modeliranje (ang. *Hierarchical Bayesian Modelling*, v nadaljevanju HBM). HBM je matematična statistična metoda, ki dopušča modeliranje prostorske korelacije med stopnjo degradacije in začetno kakovostjo. Bayesovi modeli se razlikujejo od klasične statistike v tem, da upoštevajo parametre za naključne spremenljivke. Z enačbo (33) se lahko določi verjetnostno porazdelitev. S sestavom porazdelitve  $p(\theta)$  in verjetnostjo  $p(y|\theta)$  se izračuna končna porazdelitev parametrov. Končna porazdelitev  $p(\theta|y)$  parametrov  $\theta$  za dane podatke se lahko izračuna po Bayesovem pravilu (Andrade in Teixeira, 2015):

$$p(\theta|y) = \frac{p(y|\theta) \cdot p(\theta)}{\int p(y|\theta') \cdot p(\theta') d\theta'} \propto p(y|\theta) \cdot p(\theta). \quad (33)$$

Z numeričnimi metodami sta Andrade in Teixeira (2015) uporabila Bayesov model, ki temelji na metodi Monte Carlo markovskih verig (MCMC). V modelu sta definirala indeks kakovosti tira  $y_{svkl}$

za pregled  $l$ , odsek  $k$ , obravnavano progo  $v$ , območje  $s$ , ki se porazdeljuje normalno s povprečjem  $m_{svkl}$  in varianco  $\sigma s^2$  tj.  $y_{svkl} \sim N(m_{svkl}, \sigma s^2)$ , kar je predstavljeno na prikazu Slika 10.



Slika 10: Shematični prikaz značilne dvotirne proge z indeksi  $s$ ,  $v$ ,  $k$  (Andrade in Teixeira, 2013)

Figure 10: Schematic representation of a typical double-track line with indices of area  $s$ , segment  $v$  and track section  $k$  (Andrade and Teixeira, 2015)

Andrade in Teixeira (2015) sta definirala linearno propadanje indeksa kakovosti s kumulativno prometno obremenitvijo od zadnjega vzdrževalnega ali obnovitvenega dela in začetne kakovosti, ki ima različne vrednosti za vsak tirni odsek.

Štiri predpostavke sta združila v enotno matematično obliko s povprečjem  $m_{svkl}$  indeksa kakovosti  $y_{svkl}$  in dobila naslednje enačbe:

$$m_{svkl} = [\alpha_{svk}(1 + \delta_{sv})^{N_{svkl}} + \beta_{svk}T_{svkl}]R_{svkl} + [\alpha'_{svk}(1 + \delta_{sv})^{N_{svkl}} + \beta'_{svk}T_{svkl}](1 - R_{svkl}), \quad (34)$$

$$\alpha_{svk} = \alpha_{sv} + \varepsilon_{\alpha_{svk}}, \quad (35)$$

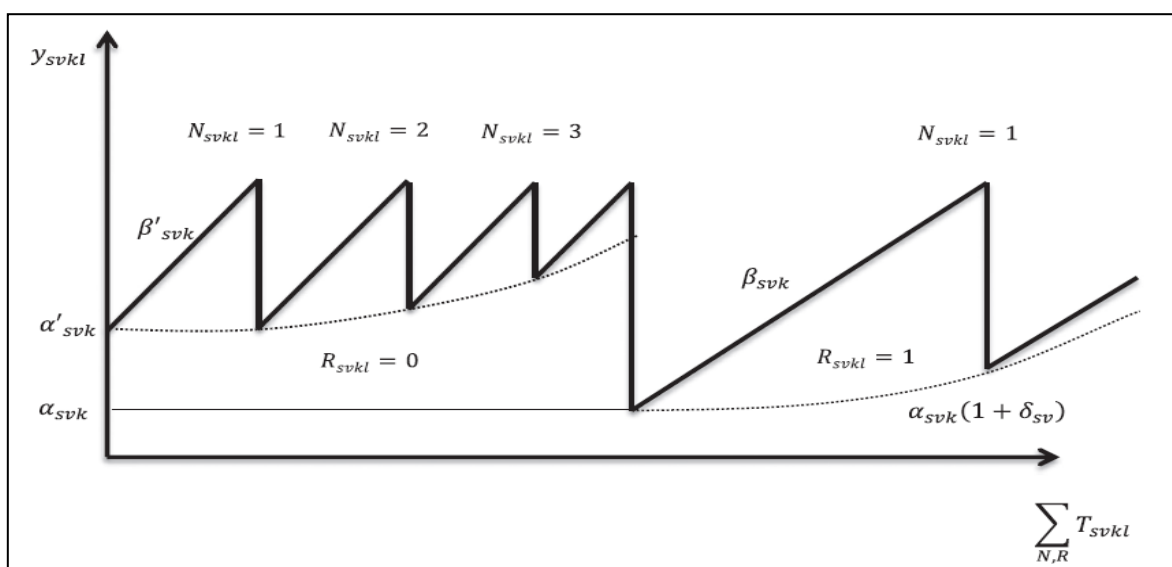
$$\alpha'_{svk} = \alpha'_{sv} + \varepsilon_{\alpha'_{svk}}, \quad (36)$$

$$\beta_{svk} = \beta_{sv} + \varepsilon_{\beta_{svk}}, \quad (37)$$

$$\beta'_{svk} = \beta'_{sv} + \varepsilon_{\beta'_{svk}}. \quad (38)$$

Parametri  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\alpha'$ ,  $\beta'$  in  $\delta$  predstavljajo hierarhično verjetnostno strukturo,  $N$ ,  $T$  in  $R$  pa so znane spremenljivke.

Prikaz Slika 11 grafično predstavlja predvideno spreminjanje povprečnega indeksa kakovosti, izraženega z enačbo 34 ( $m_{svkl}$ ).



Slika 11: Grafični prikaz modela degradacije geometrije tira na posameznem odseku proge  $k$ , v obravnavani progi  $v$  in na območju  $s$  (Andrade in Teixeira, 2015)

Figure 11: Graphical representation of track geometry degradation model for a given track section  $k$  in segment  $v$  in area  $s$  (Andrade and Teixeira, 2015)

Metodo MCMC sta Andrade in Teixeira (2015) uporabila na dvotirni portugalski progi na odseku Lizbona–Porto med osemletnim obdobjem (2001–2009) v skupni dolžini 336,2 km. Hitrost potniških vlakov na tej progi je 220 km/h, hitrost tovornih vlakov pa 120 km/h. Tir ima sistem 60 E1 z betonskimi pragovi, razmikom 600 mm in Vosslohovim pritrdilnim sistemom. Največja dovoljena obremenitev znaša 22,5 t na os. Izpis meritev je vseboval standardno deviacijo vzdolžnih višinskih napak in standardno deviacijo smernih napak tira za 200 m dolge tirne odseke. Podatki upravljavca so vsebovali prometne obremenitve ( $T_{svkl}$ ) ter zapise o vzdrževanju in obnavljanju indeksa ( $N_{svkl}, R_{svkl}$ ).

Stopnja degradacije vzdolžnih višinskih napak je za progo, na kateri ni bilo opravljenih strojnih regulacij, v povprečju vsaj 40 % višja, kot je stopnja degradacije za obnovljeno progo. Prav tako je stopnja degradacije smernih napak na odsekih prog, na katerih ni bilo opravljenih strojnih regulacij, v povprečju vsaj 60 % višja, kot znaša stopnja degradacije za obnovljeno progo. Primerjava obeh kazalnikov da v povprečju nižje vrednosti za smerne napake kot za vzdolžne višinske napake, predvsem zato, ker je proga večinoma ravninska in z velikimi radiji.

Z uporabo na primeru sta Andrade in Teixeira (2015) dokazala, da so smerne napake težje napovedljive v primerjavi z višinskimi napakami pri geometrijski degradaciji tira. Model je primeren za posnemanje (simulacijo) napovedovanja geometrijske degradacije, predpostavlja enakomerno

porazdelitev napak, primeren je za primerjavo med različnimi vzdrževalnimi in obnovitvenimi deli, za zniževanje stroškov vzdrževanja proge in izboljšanje kakovosti ter varnosti prometa.

#### 4.13 Model za napovedovanje geometrijske degradacije železniškega tira z uporabo nevronske mreže

Guler (2013) je za napovedovanje geometrijske degradacije tira uporabil nevronske mreže. Modeliranje geometrijske degradacije tira z analitičnimi metodami je zaradi velikega števila parametrov zelo zapleten problem. Empirične metode, kot je nevronska mreža (ang. *Artificial Neural Networks – ANNs*), bi bile lahko primernejše pri modeliranju geometrijske degradacije tira, saj odvisnosti med odvisnimi in neodvisnimi spremenljivkami niso dobro znane.

Mehanizem preračunavanja nevrona lahko povzamemo z enačbo (Guler, 2013):

$$O_i = A\left(\sum_{j=1}^n \omega_j I_j + B_i\right), \quad (39)$$

pri čemer je:

$A$  = aktivacijska funkcija;

$\omega_j$  = utež;

$I$  = vhodni signal;

$B$  = odstopanje;

$i$  = geometrijski parameter;

$j$  = zaporedna meritev.

Guler (2013) je uporabil ta model za 180 km železniške proge med mestoma Arifiye in Eskisehir v Turčiji. Progo je razdelil na odseke približno enakih dolžin. Uporabljene so bile naslednje spremenljivke: niveleta [‰], ukrivljenost  $1/R$  [ $1/m$ ], nadvišanje [mm], hitrost [km/h], starost [leto], tip tirnice [kg/m], dolžina tira [m] in tip praga. Okoljski vplivi (zemeljski plaz, poplave, padajoče skale in sneg) so bili določeni za vsak analitični segment z namenom raziskati vlogo okoljskih vplivov na geometrijsko degradacijo tira.

Podatke o meritvah krajevnih geometrijskih napak tira je Guler (2013) pridobil z merilnim vlakom. Izmerjeni in uporabljeni so bili naslednji geometrijski parametri: stabilnost leve in desne tirnice, smer leve ter desne tirnice, nadvišanje, vegavost in tirna širina.

Strokovnjaki turških železnic izvajajo meritve geometrije in posledično degradacijo na 3–6 mesecev (ali pogosteje), odvisno od pogojev na tiru. Za ta omenjeni primer so uporabili geometrijske podatke med letoma 2009 in 2012. Za izračun povprečne degradacije so uporabili enačbo (Guler, 2013):



$$[D_i]_{820 \times m} = \begin{bmatrix} D_{i11} & \cdots & D_{i1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{i8201} & \cdots & D_{i820m} \end{bmatrix}, \quad (40)$$

pri čemer je:

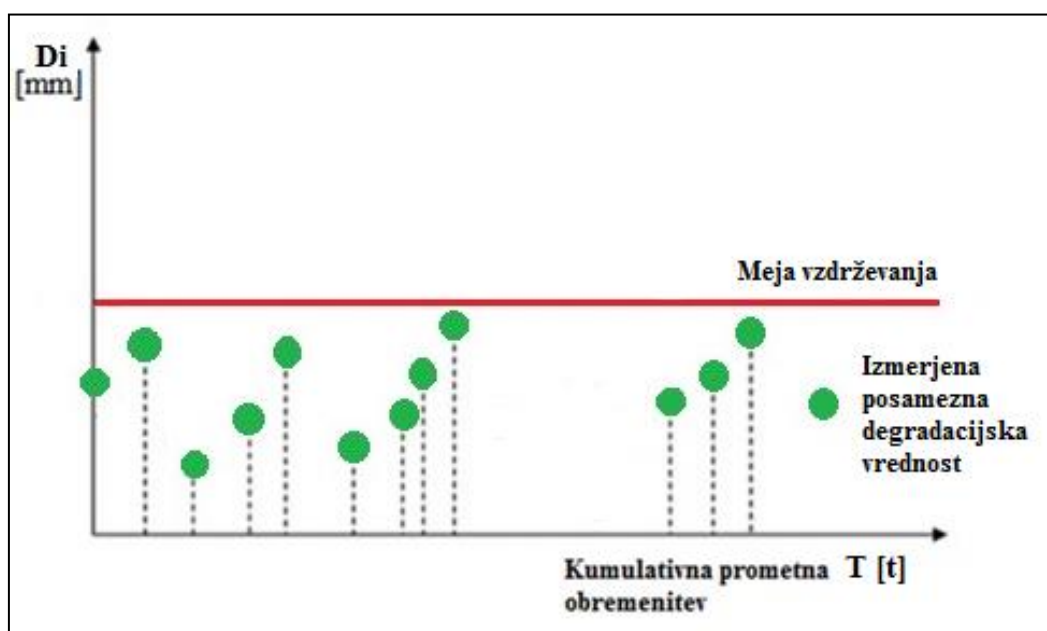
$D_i$  = vrednost povprečne degradacije analitičnega segmenta [mm];

$i$  = geometrijski parameter;

820 = število segmentov;

$m$  = število meritev.

Posamezne izmerjene degradacijske vrednosti geometrije tira so predstavljene na prikazu Slika 12.



Slika 12: Posamezne izmerjene degradacijske vrednosti geometrije tira (Guler, 2013)

Figure 12: Measured track geometry deterioration (Guler, 2013)

Slika 12 prikazuje degradacijske vrednosti na odseku med mestoma Arifiye in Eskisehir. Guler (2013) je analiziral, katera vzdrževalna in obnovitvena dela vplivajo (izboljšajo) katerega izmed geometrijskih parametrov (izdelal je model degradacije za vsak geometrijski parameter posebej), pri čemer je upošteval podatke o vzdrževanju in obnovitvenih delih v 24 mesecih.

Guler (2013) degradacijo med začetno in končno točko za vzdrževalna ter obnovitvena dela izračuna po enačbi:

$$\tau_{ij} = \frac{N \sum_{j=1}^N (T_{ij} D_{ij}) - \sum_{j=1}^N T_{ij} \sum_{j=1}^N D_{ij}}{N \sum_{j=1}^N T_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^N T_{ij})^2}, \quad (41)$$

pri čemer je:

$i$  = geometrijski parameter;

$j$  = zaporedna meritev;

$T_{ij}$  = skupna prometna obremenitev [t];

$D_{ij}$  = degradacija [mm].

Guler (2013) je predpostavil, da se stopnja degradacije izračuna s povprečno stopnjo degradacije za vsak analitični segment po enačbi za povprečno stopnjo degradacije v mm/t:

$$\tau_T = \frac{\sum \tau_{ij}}{N_T}, \quad (42)$$

pri čemer je:

$N_T$  = skupno število vseh geometrijskih napak med letoma 2009 in 2011.

V raziskavi (Guler, 2013) so bili za vhodne spremenljivke pri modelu geometrijske degradacije na umetnih nevronske mrežah uporabljeni naslednji parametri:

- $x_1$  = prometna obremenitev [t];
- $x_2$  = hitrost [km/h];
- $x_3$  = ukrivljenost [1.000/m];
- $x_4$  = niveleta [%];
- $x_5$  = nadvišanje [mm];
- $x_6$  = tip praga [0 – betonski; 1 – leseni];
- $x_7$  = tip tira [1 – 49 kg/m];
- $x_8$  = dolžina tira [0 – stikovani tir; 1 – dolgi tirni trak];
- $x_9$  = padajoče kamenje [0 – NE; 1 – DA];
- $x_{10}$  = plazina [0 – NE; 1 – DA];
- $x_{11}$  = sneg [0 – NE; 1 – DA];
- $x_{12}$  = poplava [0 – NE; 1 – DA].

Vrednosti 0 in 1 sta bili uporabljeni za kvalitativne spremenljivke med  $x_{6-12}$ .

Zanesljivost izračunanih parametrov je ocenjeval z determinacijskim koeficientom  $R^2$  za napoved opazovane vrednosti, vegavosti tira, tirne širine, smeri tira, nadvišanja tira in vzdolžnih višinskih napak tira z več statističnimi testi. Determinacijski koeficient  $R^2$  nam pove, kolikšen delež variance spremenljivke (degradacija) pojasni spremenljivka (kumulativna prometna obremenitev).

Determinacijski koeficienti  $R^2$  izkazujejo naslednje vrednosti za:

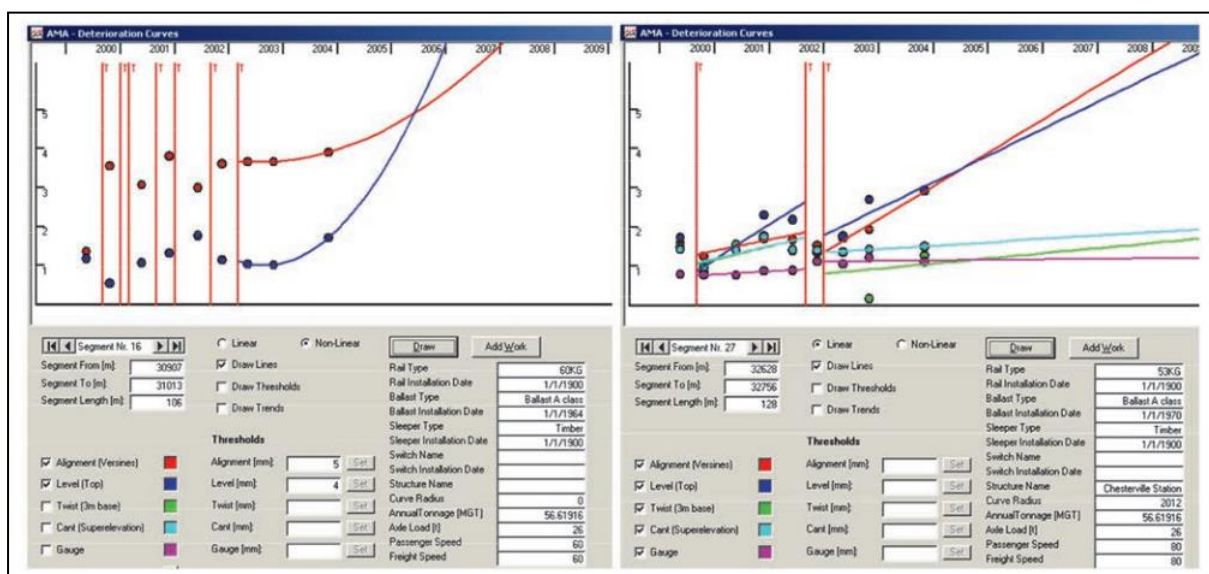
- vegavost tira ( $R^2 = 0,727$ );
- tirno širino ( $R^2 = 0,795$ );
- smer tira ( $R^2 = 0,765$ );

- nadvišanje tira ( $R^2 = 0,831$ );
- vzdolžne višinske napake tira ( $R^2 = 0,742$ ).

#### 4.14 Računalniški program Railway Maintenance Management System (RMMS) pri modeliranju degradacije

Jovanović et al. (2015) so razvili računalniški program za Upravljanje in vzdrževanje infrastrukture RMMS (ang. *Railway Maintenance Management System*) za prikaz degradacije tira. Padeč kakovosti tira se lahko prikaže z različnimi matematičnimi funkcijami (linearno, polinomsko, eksponentno) skozi časovna obdobja.

Na prikazu Slika 13 je predstavljeno modeliranje degradacije tira s program RMMS.



Slika 13: Uporaba programa RMMS pri modeliranju degradacije (Jovanović et al., 2015)

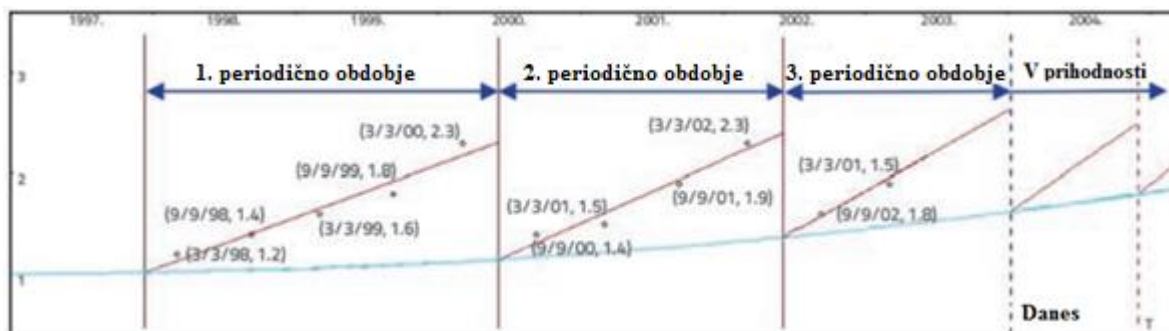
Figure 13: Use software RMMS deterioration modelling (Jovanović et al., 2015)

Pri obdelavi s programom RMMS je za izdelavo degradacije tira potrebna velika podatkovna baza z naslednjimi podatki (Jovanović et al., 2015):

- tirnica (tip, stikovana ali neskončno zvarjena, tip zvara, datum vgradnje, vgrajena nova ali stara tirnica);
- tirna greda (tip, datum vgradnje, debelina);
- prag (tip, vgrajen nov ali rabljen, skupna obremenitev pred vgradnjo, razmik, datum vgradnje);
- spodnji ustroj (geološko stanje, debelina tampona);
- kretnice (tip, radij, začetek in konec stacionaže);
- pregledi in druge meritve;
- stanje tirne grede (odstotek umazanosti z zemljo, odstotek zaraščenosti z rastlinjem);

- stanje pritrilnega materiala;
- stanje pragov (odstotek slabih pragov);
- napake na tirnici (notranje in površinske, število napak na zvaru, število napak izven območja zvara, odstotek poškodovanih tirnic);
- obraba tirnice (višinska, bočna, skupna obraba);
- valovitost tirnice (amplituda različnih valovnih dolžin, dinamične sile);
- geometrijski parametri tira (radij, nadvišanje, začetek in konec stacionaže, niveleta, prehodnice);
- obremenitev (letna obremenitev v milijonih bruto tonah, maksimalna osna obremenitev);
- hitrost (ločena za potniške in tovarne vlake);
- počasne vožnje (začetek in konec, datum, hitrost);
- zgodovina vzdrževanja (začetek in konec stacionaže, datum);
- zgodovina pregledov (začetek in konec stacionaže, datum);
- opravljene meritve (stabilnost, smer, vegavost, nadvišanje, tirna širina, indeksi kakovosti, število napak po meritvah).

Jovanović et al. (2015) so za praktični primer uporabili linearno krivuljo z izmerjeno standardno deviacijo vzdolžnih višinskih napak na 200 m posameznega odseka železniške proge Rim–Neapelj, kar prikazuje Slika 14.



Slika 14: Degradacija geometrije tira na praktičnem primeru (Jovanović et al., 2015)

Figure 14: Degradation of the track geometry in a practical case (Jovanović et al., 2015)

Slika 14 prikazuje, kako na posameznem odseku železniške proge Rim–Neapelj iz predhodnih obdobj napovemo geometrijsko degradacijo tira. Razvidno je tudi, da so v zadnjih letih potrebna pogostejša vzdrževalna dela.

#### 4.15 Povzetek degradacijskih modelov s kratkimi pojasnili

Degradacijski modeli, predstavljeni v 4. poglavju, so zbrani v (Preglednica 3).

Preglednica 3: Degradacijski modeli

Table 3: Degradation models

Številka podpoglavja	Model degradacije	Enačba
4.1	Avstrijski model	$Q = Q_0 e^{y_A T t}$
4.2	Nemški model	$S_{opt} = 1,57p\Delta N + 3,04p^{1,21} \ln N$ $S_{med} = 1,89p\Delta N + 5,15p^{1,21} \ln N$ $S_{pess} = 2,33p\Delta N + 15,20p^{1,21} \ln N$
4.3	Model ORE	$e_v = e_1(1 + b_v \log N_v)$
4.4	Shentonov model	$e_N = K \frac{F_e}{10} ((0,69 + 0,028h_i)N_S^{0,2} + 2,7 \cdot 10^{-6}N_S)$
4.5	Avstralski model	$w_{hr\_top} = 7,6 \cdot 10^{-6} k_h k_{l\_hrtop} W_{hr\_top} \sin \varphi$ $w_{lr\_top} = 9,5 \cdot 10^{-6} k_h k_{l\_lrtop} W_{lr\_top} \sin \varphi$ $w_{hr1gauge}(R) = 12,1 \cdot 10^{-6} k_h k_{l_{hrgauge}} C_1 P_l \sin \varphi ;$ $R \leq 500 \text{ m}$ $w_{hr2gauge}(R) = 12,1$ $\cdot 10^{-6} k_h k_{l_{hrgauge}} C_1 P_l \sin \varphi (1,7$ $- 0,0014R);$ $500 < R \leq 1200 \text{ m}$
4.6	Japonski model (Satov model)	$y = \gamma(1 - e^{-\alpha j}) + \beta j$
4.7	Japonski model (Sugiyamov model)	$S = 2,09 \cdot 10^{-3} T^{0,31} V^{0,98} M^{1,1} L_A^{0,21} Z^{0,26}$
4.8	Švedski model	$Q = 150 - 100 \left[ \frac{\sigma_H}{\sigma_{Hlim}} + 2 \frac{\sigma_S}{\sigma_{Slim}} \right] / 3$
4.9	Poljski model – parameter petih napak	$W_5 = 1 - (1 - W_e)(1 - W_g)(1 - W_w)(1 - W_x)(1 - W_y)$
4.10	Poljski model – sintetični kazalnik kakovosti tira	$J = \frac{S_z + S_y + S_w + 0,5 \cdot S_e}{3,5}$

se nadaljuje ....

... nadaljevanje Preglednica 3

Številka podpoglavja	Model degradacije	Enačba
4.11	Indijski model	$TGI = \frac{2UI + TI_w + GI + 6AI}{10}$
4.12	Hierarhični Bayesov model (HBM)	Bayesov model – uporaba metode Monte Carlo markovskih verig
4.13	Nevronske mreže	$[D_i]_{820 \times m} = \begin{bmatrix} D_{i11} & \cdots & D_{i1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{i8201} & \cdots & D_{i820m} \end{bmatrix}$
4.14	Program Railway Maintenance Management System (RMMS)	Program omogoča več različnih modelov degradacije. Geometrijska degradacija je kakršnekoli funkcijske oblike (linearne, polinomske, eksponentne ipd.) v odvisnosti od različnih vzdrževalnih del.

Avstrijski degradacijski model napoveduje degradacijo tira v odvisnosti od prometne obremenitve ali časa obratovanja. Za izhodišče se upošteva začetna kakovost tira  $Q_0$ , ki je odvisna od resničnega stanja tira, doseženega z vzdrževanjem ali obnovo oziroma nadgradnjo. Glede na to, da Slovenske železnice razpolagajo s podatki o prometnih obremenitvah po progovnih odsekih ter da so dostopni tudi podatki o merjenju posameznih napak z merilnim vlakom po posameznih letih, bo ta model v magistrskem delu uporabljen na praktičnem primeru.

Nemški model obravnava degradacijo stikovanega tira s stopnjo posedanja tirne grede. Stopnjo posedanja se izračuna za različne napovedi (optimistično, srednjo in pesimistično). Slabost tega modela je v tem, da je potrebna izvedba preizkusnega polja za izvedbo meritev po začetni in drugi fazi pri posedanju tirne grede. Potrebna je subjektivna ocena za določitev stanja kakovosti proge.

Model ORE predvideva degradacijo v obliki posedanja tirne grede. Model je razdeljen na dva dela. Prvi del izraža degradacijo takoj po strojni regulaciji, drugi del pa jo opisuje kot sorazmerno z obsegom prometa. Slabost tega modela je v tem, da je potrebna izvedba preizkusnega polja za meritev po strojni regulaciji glede posedka tirne grede. Potrebna je subjektivna ocena za določitev stanja kakovosti proge. V modelu nista upoštevana parametra hitrost in dinamična obremenitev.

Shentonov model predvideva degradacijo v obliki posedanja tirne grede. V modelu nista upoštevana parametra hitrost in dinamična obremenitev. Slabost je subjektivna ocena pri določanju parametra  $K$ , prav tako ni podatka, kako se na terenu meritev izvaja. Model ne predvideva hitrosti.

Avstralski model se uporablja za napoved višinske in bočne obrabe tirnic. Višinska obraba je neodvisna od radija, medtem ko sta za bočno obrabo dve različni možnosti. Posebej se model upošteva

za radije pod 500 m in za radije 500–1.200 m. Vhodni podatki za uporabo tega modela so 22,5–30,0 ton osne obremenitve, hitrost vlakov  $V = 80$  km/h, prometna obremenitev 40 milijonov bruto ton na leto, tirnice sistema 60 E1 z betonskimi pragovi,  $R = 500$  m, nadvišanje  $h = 70$  mm. Ta model ni primeren v Sloveniji, saj nimamo tako velikih prometnih obremenitev, osne obremenitve pa precej presegajo obremenitve po kategorizaciji D4.

Japonski model (Satov model) obravnava degradacijo v obliki posedanja tirne grede. Prvi del enačbe se nanaša na izračun posedka tira v obliki posedanja tirne grede, v drugi fazi pa na utrditvi tirne grede z linearnim naraščanjem števila osnih obremenitev. Slabost japonskega modela je v tem, da je potrebna izvedba preizkusnega polja za izvedbo meritev po začetni in drugi fazi pri posedanju tirne grede. Ni določeno, kako se na terenu izvajajo meritve. Model ne upošteva parametrov, kot sta hitrost in dinamična obremenitev.

Japonski model (Sugiyamov model) obravnava degradacijo za napovedovanje vzdolžnih višinskih napak v stotih dneh vožnje vlakov. Model upošteva prometno obremenitev, povprečne hitrosti vlakov, konstante zgornjega ustroja in stanje zgornjega ustroja (neprekinjeno zavarjeni tir, stikovani tir in faktor vpliva na podlago). Model je predviden za primerjavo med neprekinjenim zavarjenim tirom in stikovanim tirom. Prav tako se lahko upošteva za primerjavo med dobrim in slabim spodnjim ustrojem. Slabost je v tem, da je potrebna izvedba poskusnega polja za izvedbo terenskih meritev po posedanju tirne grede. Ni določeno, kako se na terenu meritve izvajajo.

Švedski model predvideva geometrijsko degradacijo tira v obliki kazalnika stanja  $Q$ -vrednosti. Vrednost  $Q$  je funkcija standardne deviacije geometrijskih parametrov z upoštevanjem standardne deviacije vzdolžnih višinskih napak in standardne deviacije napak nadvišanja s povprečnimi smernimi napakami zunanje tirnice z upoštevanjem mejnih vrednosti standardnih deviacij vzdolžnih višinskih napak ter napak nadvišanja s povprečnimi smernimi napakami zunanje tirnice. Vrednost  $Q$  se prikaže kot odstotek. Nižja vrednost  $Q$  pomeni slabšo kakovost tira. Za razliko od večine modelov degradacije tira švedski model uporablja kot vhodni podatek standardno deviacijo geometrijskih napak, ne uporablja le posameznih geometrijskih napak. Standardna deviacija smernih ter višinskih napak je osnova za raven ukrepanja AL po standardu EN 13848 in je tako postala pomemben kazalnik kakovosti tira. V letu 2015 se je začelo z merjenjem standardne deviacije geometrijskih napak tudi na slovenskem železniškem omrežju. Čeprav so podatki o standardni deviaciji napak za slovenske proge zbrani le za leto 2015, bo ta model uporabljen za analizo tudi pri praktičnem primeru magistrskega dela. Ta model je uporaben za tudi proge, namenjene vožnji pri visoki hitrosti.

Poljski model predvideva geometrijsko degradacijo s parametrom petih napak. Upoštevajo se napake tirne širine, nadvišanja tira, vegavosti tira, aritmetično povprečje za vzdolžne višinske in smerne napake. Degradacija po poljskem modelu temelji na standardni deviaciji štirih geometrijskih parametrov (vzdolžne višinske napake, smerne napake, vegavosti tira in tirne širine). Strokovnjaki za poljske železnice izvajajo meritev vegavosti tira na bazi 5,0 m. Slabost je izvedba meritev štirih geometrijskih parametrov s standardno deviacijo. Ta model ni ustrezen za izračun, saj nimamo teh meritev. Uporaben je za proge, namenjene vožnji pri visoki hitrosti (200 km/h).

Indijski model predvideva degradacijo z geometrijskim indeksom tira. Model se nanaša na standardno deviacijo geometrijskih parametrov vzdolžnih višinskih napak, smernih napak, vegavosti tira in tirne širine. Pri tem modelu se upoštevajo še mejne vrednosti standardnih deviacij. Strokovnjaki indijskih železnic izvajajo meritev vegavosti tira na bazi 3,6 m. Slabosti je izvedba meritev štirih geometrijskih parametrov s standardno deviacijo. Ta model ni ustrezen za izračun, saj nimamo teh meritev. Uporaben je za proge, namenjene vožnji pri visoki hitrosti.

Bayesov hierarhični model (HBM) predvideva geometrijsko degradacijo tira. Model je obravnavan po metodi Monte Carlo markovskih verig (MCMC) pri napovedovanju stopnje degradacije za vzdolžne višinske in smerne napake. Slabost je v tem, da je treba imeti posebno programsko opremo za izdelavo različnih simulacij (več kot tisoč različnih kombinacij). Prednost pa v natančnosti in zanesljivosti napovedovanja geometrijske degradacije tira. Ta model je uporaben za proge, namenjene vožnji pri visoki hitrosti.

Model z umetnimi nevronskimi mrežami se uporablja za napovedovanje geometrijske degradacije tira. Pri izračunu so upoštevane napake tirne širine, nadvišanja tira, vegavosti tira, smeri tira in vzdolžne višinske napake za zanesljivost izračunanih parametrov z determinacijskim koeficientom  $R^2$ . Slabost je v tem, da je treba imeti dobro zastavljeno in pregledno bazo podatkov za izdelavo različnih simulacij. Prednost pa je v natančnem in zanesljivem napovedovanju geometrijske degradacije tira. Uporabna je za proge, namenjene vožnji pri visoki hitrosti.

Računalniški program za Upravljanja in vzdrževanja infrastrukture RMMS omogoča različne analize geometrijske degradacije (linearno, polinomsko, eksponentno funkcijo ipd.) glede na različna vzdrževalna dela. Slabost tega programa je v tem, da ni določeno, kakšen degradacijski model se upošteva, treba pa je tudi imeti dobro zastavljeno in pregledno bazo podatkov. Prednost je natančnost in zanesljivost programa pri napovedovanju geometrijske degradacije tira. Program je uporaben za proge, namenjene vožnji pri visoki hitrosti.



Preglednica 4: Primerjava degradacijskih modelov

Table 4: Comparison of degradation models

Degradacijski model	Vhodni podatki										
	Prometna obremenitev	Kakovost tira	Hitrost	Vzdolžna višinska napaka tirnice (leva + desna)	Vegavost tira na bazi 6,0 m	Vegavost tira na bazi 2,5 m	Odstopanje od tirne širine	Napaka v nadvišanju tira	Smerna napaka tirnice (leva + desna)	Standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak (podatek iz leta 2015)	Standardna deviacija smernih napak (podatek iz leta 2015)
	$T_i$	$Q$	$V$	LLL + RLL	Veg 6	Veg 2,5	GD	C	LHA + RHA	$\sigma_{LL}$	$\sigma_S$
Avstrijski model	✓	✓									
Nemški model	✓ skupno število osi		✓								
Model ORE	✓										
Shentonov model	✓ skupno število osi										
Avstralski model	✓		✓								
Japonski model (Satov model)	✓ skupno število osi										
Japonski model (Sugiyamov model)	✓		✓								
Švedski model										✓	✓
Poljski model – parameter petih napak				✓	Meritev na bazi 5,0 m		✓	✓	✓		
Poljski model – kazalnik kakovosti tira $J$					Standardna deviacija na bazi 5,0 m		Standardna deviacija			✓	✓
Indijski model				Standardna deviacija	Standardna deviacija na bazi 3,6 m		Standardna deviacija		Standardna deviacija		
Bayesov model	✓	✓	✓							✓	✓
Nevronske mreže				✓	Meritev na bazi 3,0 m		✓	✓	✓		
Program RMMS	✓	Izračun s programom	✓	✓	Ni določeno na kakšni bazi	Ni določeno na kakšni bazi	✓	✓	✓	✓	✓

Preglednica 4 prikazuje primerjavo različnih degradacijskih modelov. Z zeleno barvo je označeno, katere podatke ima na razpolago upravljavec železniške infrastrukture v Sloveniji. Z rdečo barvo je označena ustreznost vhodnih podatkov za uporabo avstrijskega in švedskega modela. Švedski model je primeren, ker je standardna deviacija vzdolžnih višinskih in smernih napak z uveljavitvijo tehničnih specifikacij o interoperabilnosti postala obvezno merilo za oceno geometrijske kakovosti tira tudi pri upravljavcu infrastrukture.

## 5 TEHNIČNE SPECIFIKACIJE ZA INTEROPERABILNOST IN STANDARDI, KI DOLOČAJO KAKOVOST TIRA

Evropska komisija je sprejela Uredbo št. 1299/2014 o tehničnih specifikacijah za interoperabilnost (TSI) v povezavi s podsistemom »infrastruktura« železniškega sistema v Evropski uniji (Uradni list EU, št. 1299/2014). V uredbi je določeno, da se TSI uporablja za vsako novo, nadgrajeno ali obnovljeno infrastrukturo v železniškem sistemu v Evropski uniji. V Prilogi I k Direktivi 2008/57/ES je določeno, da se železniško omrežje Evropske unije na območju vseevropskega železniškega sistema za konvencionalne hitrosti in vseevropskega železniškega sistema za visoke hitrosti lahko razdeli na različne TSI-kategorije, za katere so podrobno določeni tudi najpomembnejši parametri zmožljivosti. Ker se specifikacije TSI v državah članicah uporabljajo neposredno, mora Slovenija kot članica Evropske unije poleg državnih predpisov upoštevati še evropske specifikacije TSI in druge evropske predpise, sporazume ter standarde, ki se nanašajo na zgornji ustroj železniških prog. TSI določajo mejne vrednosti posameznih napak v geometriji tira, ki zahtevajo takojšnje ukrepanje, standard EN 13848, na katerega se TSI sklicujejo, pa določa mejne vrednosti za preventivna vzdrževalna dela glede na dva kazalnika: standardno deviacijo vzdolžnih višinskih napak in standardno deviacijo smernih napak tira.

### 5.1 Geometrijska kakovost proge po evropskih standardih

Evropski standard EN 13848-5 določa mejne vrednosti za nekaj kazalnikov vsakega tipa napake glede na maksimalne dovoljene hitrosti za tri ravni ukrepanja:

1. IAL – mejna vrednost takojšnjega ukrepanja (ang. *Immediate Action Limit*): nanaša se na vrednosti, pri katerih je potrebna takojšnja omejitev hitrosti ali takojšnje popravilo napak, če so njihove dopustne vrednosti presežene;
2. IL – intervencijska meja (ang. *Intervention Limit*): nanaša se na vrednosti, ki zahtevajo ukrepanje z vzdrževanjem še pred naslednjim merjenjem;
3. AL – opozorilna mejna vrednost (ang. *Alert Limit*): nanaša se na vrednosti, ki zahtevajo analizo stanja geometrije in razmislek o načrtovanih vzdrževalnih delih.

Mejne vrednosti posameznih napak v geometriji tira, ki po TSI zahtevajo takojšnje ukrepanje, so:

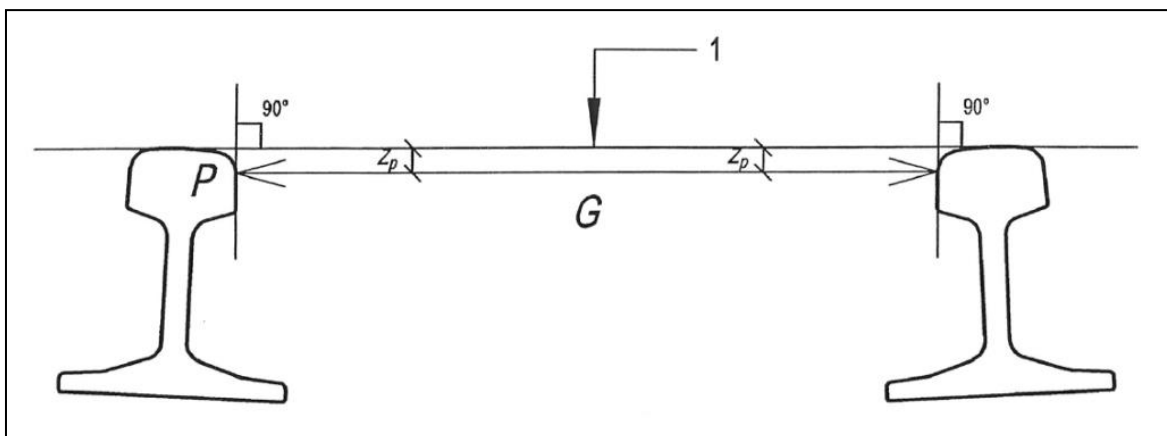
- mejna vrednost takojšnjega ukrepanja pri napakah na smeri tira;
- mejna vrednost takojšnjega ukrepanja pri višinskih napakah tira;
- mejna vrednost takojšnjega ukrepanja za posamezne napake vegavosti tira;
- mejna vrednost posamezne napake tirne širine.

Mejne vrednosti takojšnjega ukrepanja za posamezne napake geometrijskih parametrov tira so razvidne iz preglednic v nadaljevanju.

## 5.1.1 Merjenje geometrijskih napak in njihove mejne vrednosti po EN 13848-1 in EN 13848-5

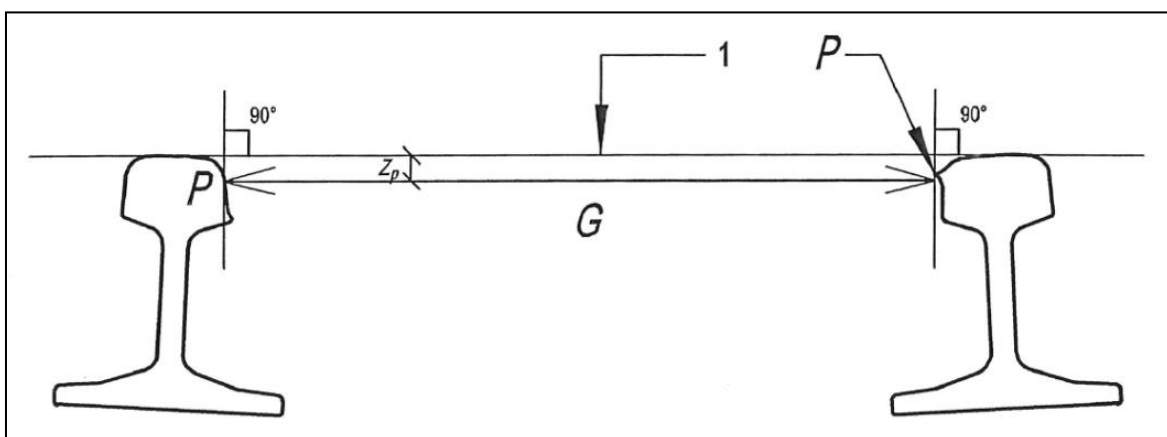
### 5.1.1.1 Tirna širina

Tirna širina je najmanjša razdalja med notranjima roboma tirničnih glav na razdalji 0–14 mm pod zgornjim robom tirnice. Tirna širina je na prikazih Slika 15 in Slika 16 označena z  $G$ .



Slika 15: Tirna širina – novi tirnici (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)

Figure 15: Track gauge for new rail (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)



Slika 16: Tirna širina – obrabljeni tirnici (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)

Figure 16: Track gauge for worn rail (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)

Preglednica 5 in Preglednica 7 podajata mejne vrednosti ukrepanja AL, IL in IAL za posamezne napake pri tirni širini.

Preglednica 6: Mejne vrednosti odstopanja posameznih napak tirne širine glede na vrsto ukrepanja AL, IL, IAL (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

Table 5: AL, IL, AIL – Isolated defects – Nominal track gauge to peak value (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

Hitrostni razred [km/h]	Mejna vrednost AL [mm]		Mejna vrednost IL [mm]		Mejna vrednost IAL [mm]	
	min	max	min	max	min	max
$V \leq 80$	-7	+25	-9	+30	-11	+35
$80 < V \leq 120$	-7	+25	-9	+30	-11	+35
$120 < V \leq 160$	-6	+25	-8	+30	-10	+35
$160 < V \leq 230$	-4	+20	-5	+23	-7	+28
$230 < V \leq 300$	-3	+20	-4	+23	-5	+28

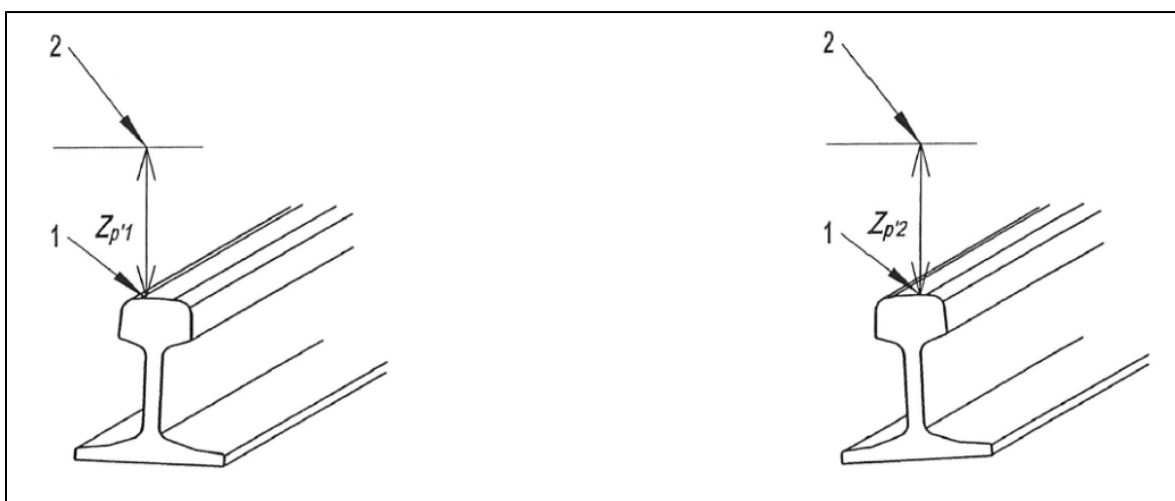
Preglednica 7: Mejne vrednosti odstopanja posameznih napak tirne širine na dolžini 100 m glede na vrsto ukrepanja (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

Table 6: AL, IL, AIL – Isolated defects – Nominal track gauge to mean track gauge over 100 m (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

Hitrostni razred [km/h]	Mejna vrednost AL [mm]		Mejna vrednost IL [mm]		Mejna vrednost IAL [mm]	
	min	max	min	max	min	max
$V \leq 40$	se ne uporablja	+25	se ne uporablja	+28	se ne uporablja	+32
$40 < V \leq 80$	-6	+25	-7	+28	-8	+32
$80 < V \leq 120$	-5	+22	-6	+25	-7	+27
$120 < V \leq 160$	-3	+16	-4	+18	-5	+20
$160 < V \leq 230$	-3	+16	-4	+18	-5	+20
$230 < V \leq 300$	-1	+16	-2	+18	-3	+20

### 5.1.1.2 Vzdolžne višinske napake tira

Slika 17 prikazuje merjenje vzdolžnih višinskih napak tira  $z_p$ .



Slika 17: Vzdolžne višinske napake (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)

Figure 17: Longitudinal level defects (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)

Mejne vrednosti ukrepanja AL, IL in IAL za posamezne vzdolžne višinske napake tira so podane v nadaljevanju (Preglednica 8).

Mejne vrednosti napak v geometriji tira so odvisne od valovne dolžine, ki se uporabi za merjenje napak, in sicer:

- D1 valovna dolžina  $3 < \lambda \leq 25$  m za hitrosti do 300 km/h;
- D2 valovna dolžina  $25 < \lambda \leq 70$  m za hitrosti 160–300 km/h;
- D3 valovna dolžina  $70 < \lambda \leq 150$  (200 m) za hitrosti  $> 250$  km/h.

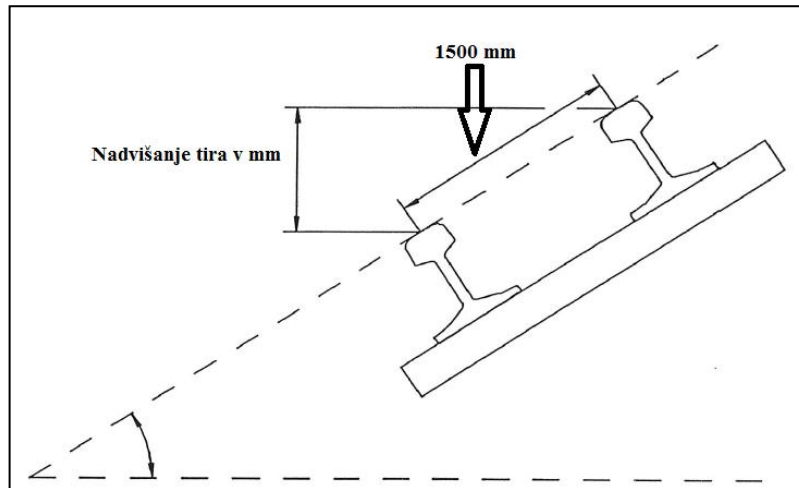
Preglednica 8: Mejne vrednosti posameznih vzdolžnih višinskih napak glede na vrsto ukrepanja AL, IL, IAL (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

Table 7: Longitudinal level - AL, IL, IAL – Isolated defects – Mean to peak value (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

Hitrostni razred [km/h]	Mejna vrednost AL [mm]		Mejna vrednost IL [mm]		Mejna vrednost IAL [mm]	
	Valovna dolžina		Valovna dolžina		Valovna dolžina	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2
$V \leq 80$	12–18	se ne uporablja	17–21	se ne uporablja	28	se ne uporablja
$80 < V \leq 120$	10–16	se ne uporablja	13–19	se ne uporablja	26	se ne uporablja
$120 < V \leq 160$	8–15	se ne uporablja	10–17	se ne uporablja	23	se ne uporablja
$160 < V \leq 230$	7–12	14–20	9–14	18–23	20	33
$230 < V \leq 300$	6–10	12–18	8–12	16–20	16	28

### 5.1.1.3 Nadvišanje tira

Nadvišanje tira je razlika med višinama zunanjega in notranjega tira, izražena v milimetrih. Meri se na sredini glave tirnice, kot prikazuje Slika 18.



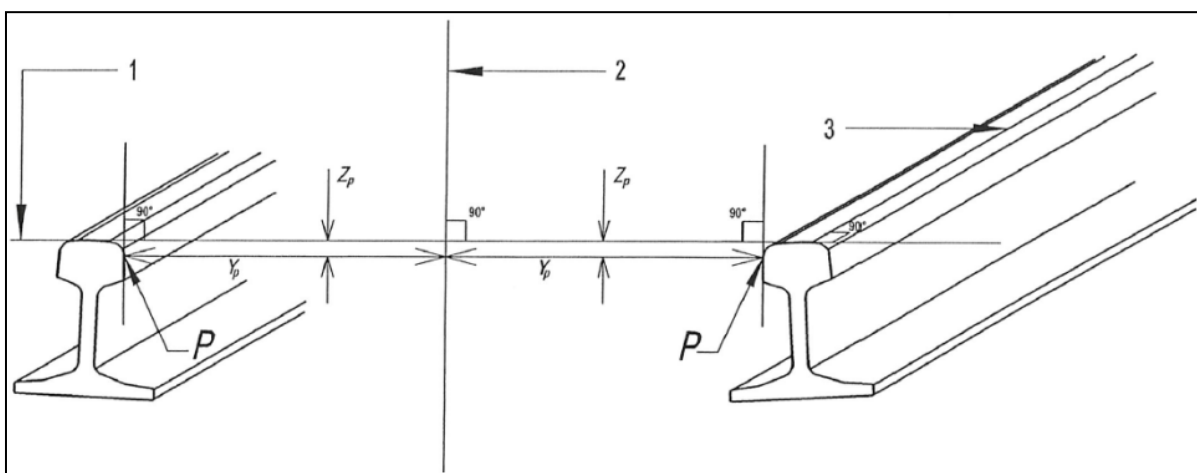
Slika 18: Nadvišanje tira (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)

Figure 18: Cant (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)

Mejne vrednosti ukrepanja AL, IL in IAL za napake v nadvišanju niso določene, saj so zajete v vegavosti tira. Največje dovoljeno nadvišanje v obratovanju je 180 mm. Na progah, namenjenih izključno potniškemu prometu, je največje dovoljeno nadvišanje v obratovanju 190 mm.

### 5.1.1.4 Smer tira

Z meritvijo smeri tira, ki se meri ločeno za desno in levo tirnico, ugotavljamo odstopanje tira od projektirane smeri preme, krožnega loka oziroma prehodnice. V geometrijsko pravilnem krožnem loku morajo biti puščice na enakih tetivah enake, v prehodnici s premočrtno sliko ukrivljenosti morajo enakomerno naraščati, v premah pa morajo biti enake 0. Na prikazu Slika 19 je prikazan odklon  $y_p$  v smeri  $z$  zaradi smernih napak tira.



Slika 19: Smer tira (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)

Figure 19: Alignment (EN 13848-1:2002+A1:2008, 2008)

Mejne vrednosti ukrepanja AL, IL in IAL za posamezne napake smeri tira so podane v nadaljevanju (Preglednica 9). Posebno pozornost je treba posvetiti napakam kratkih valovnih dolžin, ki so nevarne v primeru, če so njihove amplitude velike.

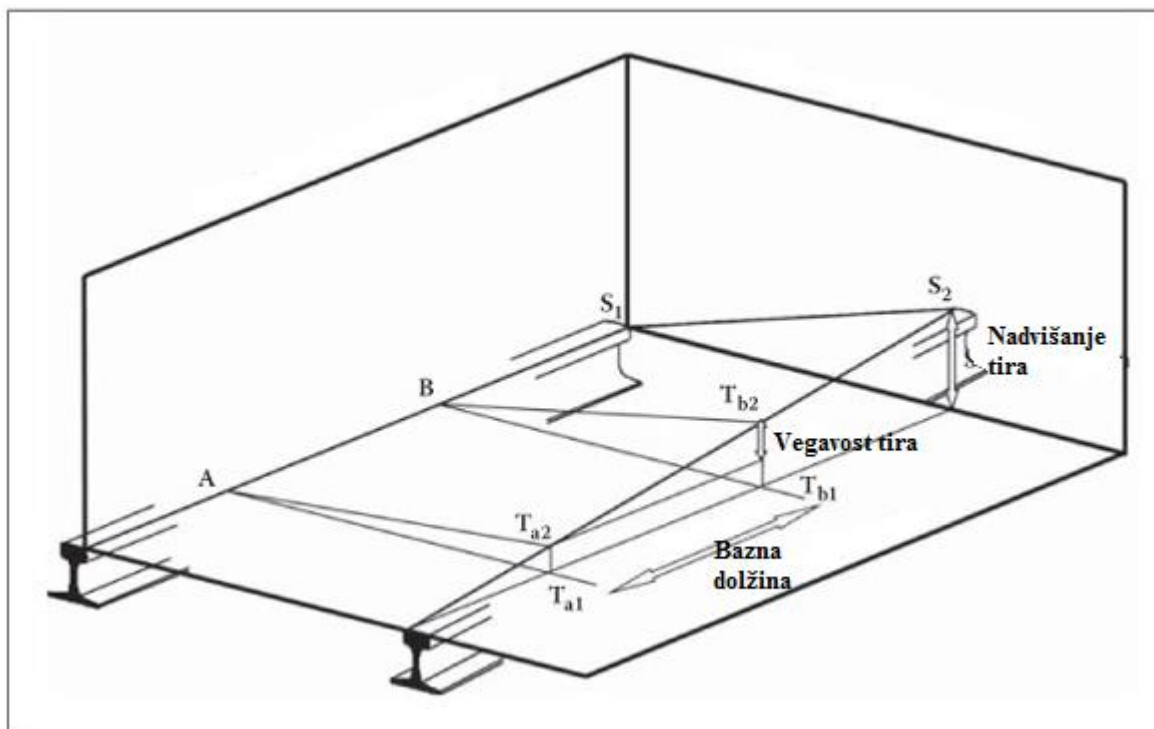
Preglednica 9: Mejne vrednosti posameznih napak smeri tira glede na vrsto ukrepanja AL, IL, IAL (EN 13848-5:2002+A1:2010, 2010)

Table 8: Alignment – AL, IL, IAL – Isolated defects – Mean to peak value (EN 13848-5:2002+A1:2010, 2010)

Hitrostni razred [km/h]	Mejna vrednost AL [mm]		Mejna vrednost IL [mm]		Mejna vrednost IAL [mm]	
	valovna dolžina		valovna dolžina		valovna dolžina	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2
$V \leq 80$	12–15	se ne uporablja	15–17	se ne uporablja	22	se ne uporablja
$80 < V \leq 120$	8–11	se ne uporablja	11–13	se ne uporablja	17	se ne uporablja
$120 < V \leq 160$	6–9	se ne uporablja	8–10	se ne uporablja	14	se ne uporablja
$160 < V \leq 230$	5–8	10–15	7–9	14–17	12	24
$230 < V \leq 300$	4–7	8–13	6–8	12–14	10	20

### 5.1.1.5 Vegavost tira

Vegavost tira je razlika v višini gornjih robov tirov na dveh prečnih prerezih na določeni dolžini tira oziroma merni osnovi. Izrazimo jo lahko v milimetrih na dolžinski meter ali v promilih (Slika 20).



Slika 20: Vegavost tira (Westhuizen et al., 2013)

Figure 20: Twist (Westhuizen et al., 2013)

Mejna vrednost takojšnjega ukrepanja pri vegavosti je skladno s točko 8.6 standarda EN 13848-5:2008+A1:2010 določena z naslednjima enačbama, ki sta odvisni od nadvišanja  $h$  in valovne dolžine  $l$  1,3–20,0 m:

za krivuljo A velja

$$h \leq \frac{R - 100}{2}, \quad (43)$$

pri čemer je:

$h$  = nadvišanje tira [mm];

$R$  = radij proge [m];

$$v = \left( \frac{20}{l} + 3 \right) \leq 7 \text{ mm/m}, \quad (44)$$

pri čemer je:

$v$  = vegavost tira [mm/m];

$l$  = valovna dolžina [m].

Pri največjem dopustnem nadvišanju  $h = 160$  mm se enačba (44) nanaša na radije  $R > 420$  m.



Maksimalna vrednost lahko znaša 7 mm/m za hitrosti  $V \leq 200$  km/h.

Maksimalna vrednost lahko znaša 5 mm/m za hitrosti  $V > 200$  km/h.

Za krivuljo B velja

$$v = \left( \frac{20}{l} + 1,5 \right) \leq 6 \text{ mm/m}, \quad (45)$$

$$h \leq \frac{R - 100}{2} < h < \frac{(R - 50)}{1,5}, \quad (46)$$

pri čemer je:

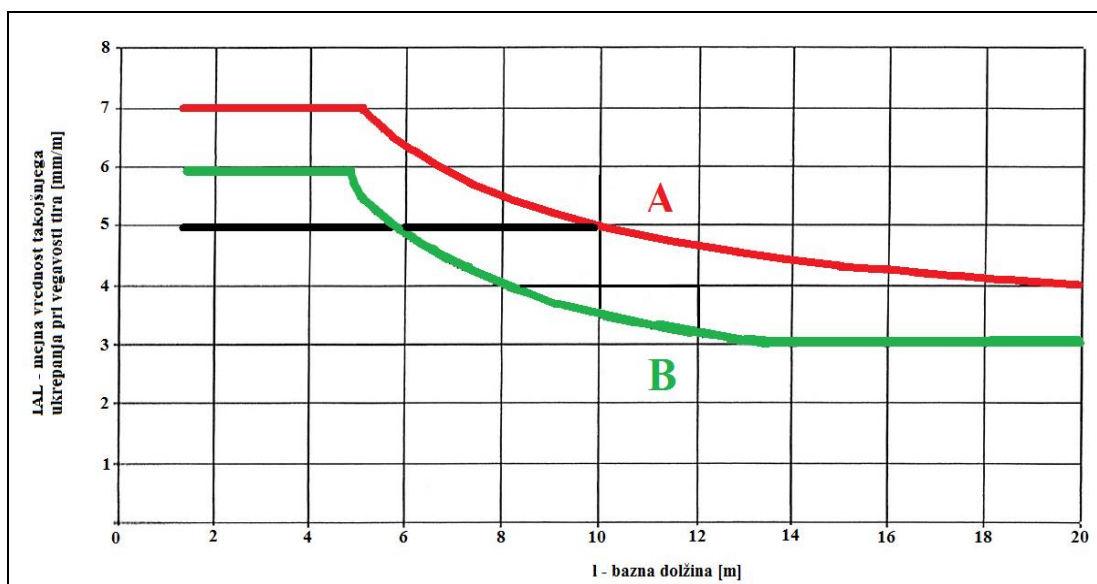
$h$  = nadvišanje tira [mm];

$v$  = vegavost tira [mm/m];

$R$  = radij proge [m].

Pri največjem dopustnem nadvišanju  $h = 160$  mm se vegavost po enačbi (45) nanaša na radije  $290 < R < 420$  m.

Grafični prikaz vegavosti tira pri mejni vrednosti takojšnjega ukrepanja IAL za krivuljo A (rdeča barva) in B (zeleno barva) je predstavljen na prikazu Slika 21.



Slika 21: Mejne vrednosti ukrepanja IAL pri vegavosti tira (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

Figure 21: IAL value for twist (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

Izračun vegavosti tira po enačbi (44) predstavlja krivuljo A, po enačbi (45) pa predstavlja krivuljo B.

Mejne vrednosti ukrepanja AL, IL in IAL za posamezne napake vegavosti tira na bazni dolžini 3,0 m so prikazane v nadaljevanju (Preglednica 10).

Preglednica 10: Mejne vrednosti posameznih napak vegavosti tira na bazni dolžini 3,0 m glede na vrsto ukrepanja AL, IL, IAL (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

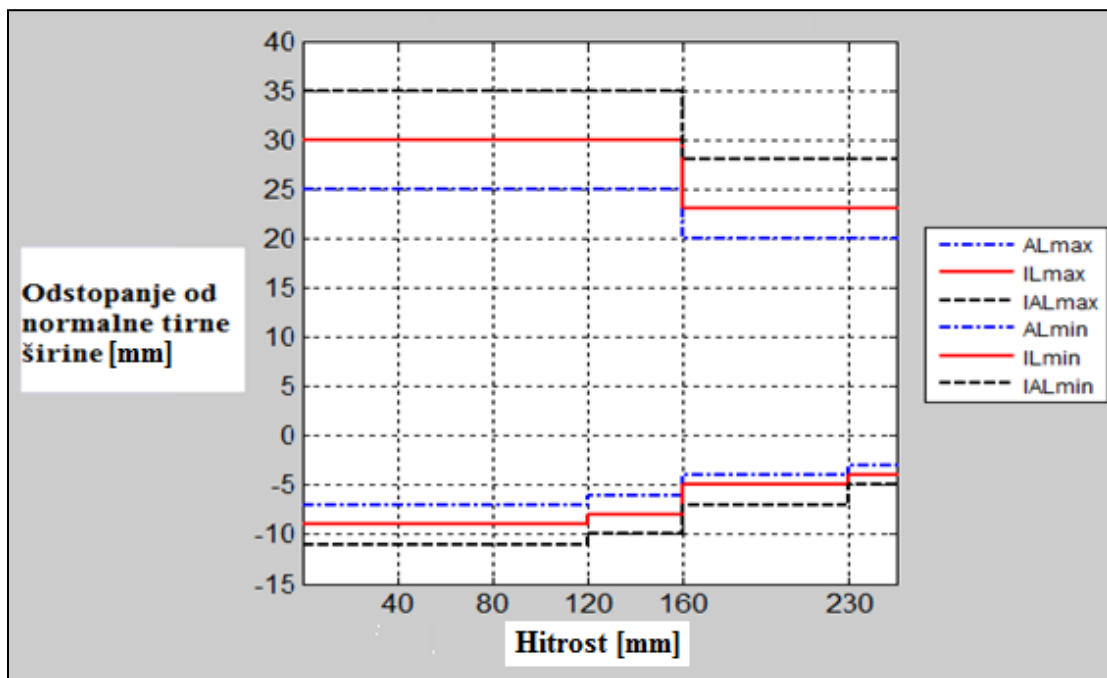
Table 9: Twist – AL, IL, IAL – Isolated defects – Zero to peak value in 3,0 m (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

Hitrostni razred [km/h]	Mejna vrednost AL [mm/m]	Mejna vrednost IL [mm/m]	Mejna vrednost IAL [mm/m]
$V \leq 80$	4	5	7
$80 < V \leq 120$	4	5	7
$120 < V \leq 160$	4	5	7
$160 < V \leq 230$	4	5	7
$230 < V \leq 300$	3	4	5

## 5.2 Primerjava mejnih vrednosti napak v odvisnosti od vrste ukrepanja in hitrostnih razredov

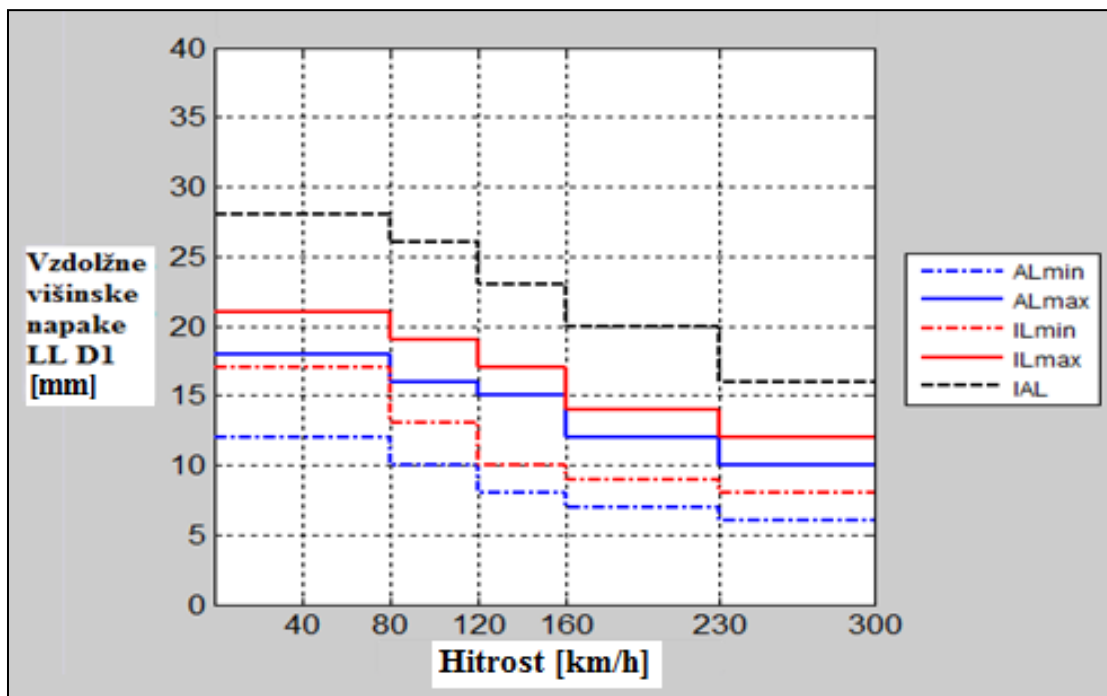
V nadaljevanju je podana grafična primerjava mejnih vrednosti odstopanj glede na vrsto ukrepanja AL (min, max), IL (min, max), IAL (min, max) po TSI v odvisnosti od hitrosti, in sicer:

- tirna širina (Slika 22);
- vzdolžne višinske napake pri D1 (Slika 23);
- vzdolžne višinske napake pri D2 (Slika 24).



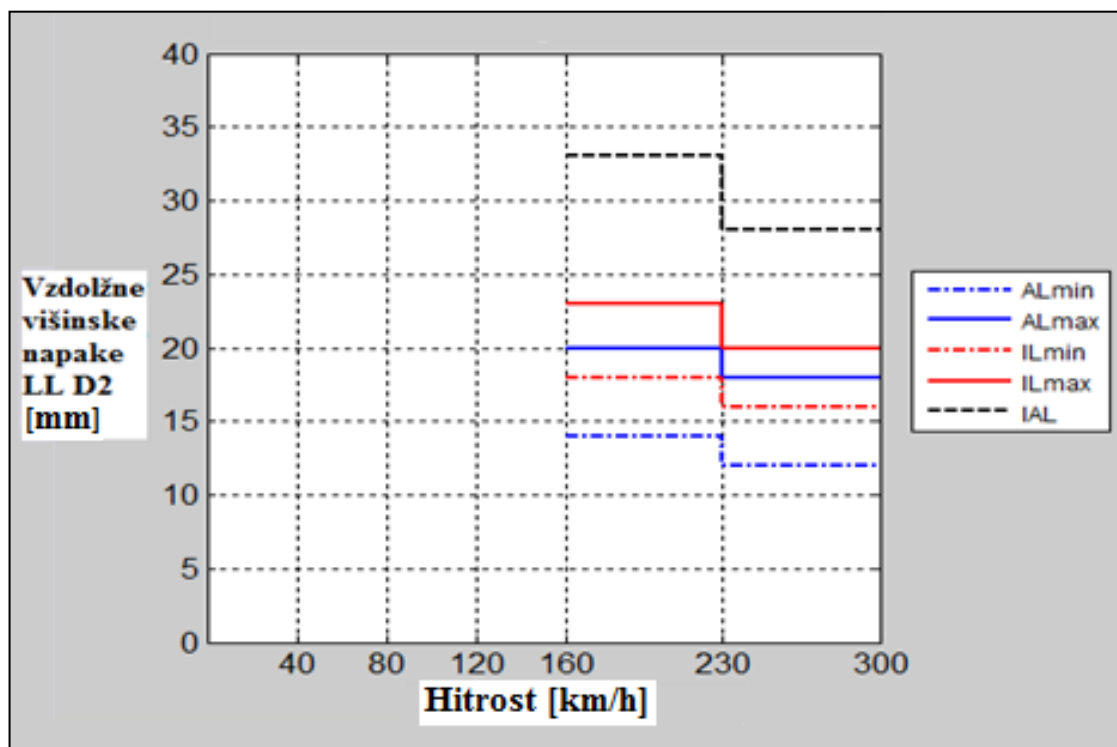
Slika 22: Primerjava mejnih vrednosti odstopanja od normalne tirne širine glede na vrsto ukrepanja AL, IL, IAL v odvisnosti od hitrosti (Li, 2012)

Figure 22: Comparison of limit values of deviations from normal track gauge with respect to type of action AL, IL, IAL depending on the speed (Li, 2012)



Slika 23: Primerjava mejnih vrednosti vzdolžnih višinskih napak z valovno dolžino D1 glede na vrsto ukrepanja AL, IL, IAL v odvisnosti od hitrosti (Li, 2012)

Figure 23: Comparison of the limit values of the longitudinal level defects with wavelength range D1 to type of action AL, IL, IAL depending on the speed (Li, 2012)



Slika 24: Primerjava mejnih vrednosti vzdolžnih višinskih napak z valovno dolžino D2 glede na vrsto ukrepanja AL, IL, IAL v odvisnosti od hitrosti (Li, 2012)

Figure 24: Comparison of limit values of longitudinal level defects with wavelength range D2 with respect to type of action AL, IL, IAL depending on the speed (Li, 2012)

### 5.3 Primerjava mejnih vrednosti napak med Pravilnikom o vzdrževanju zgornjega ustroja železniških prog in standardom EN 13848-5:2008+A1:2010

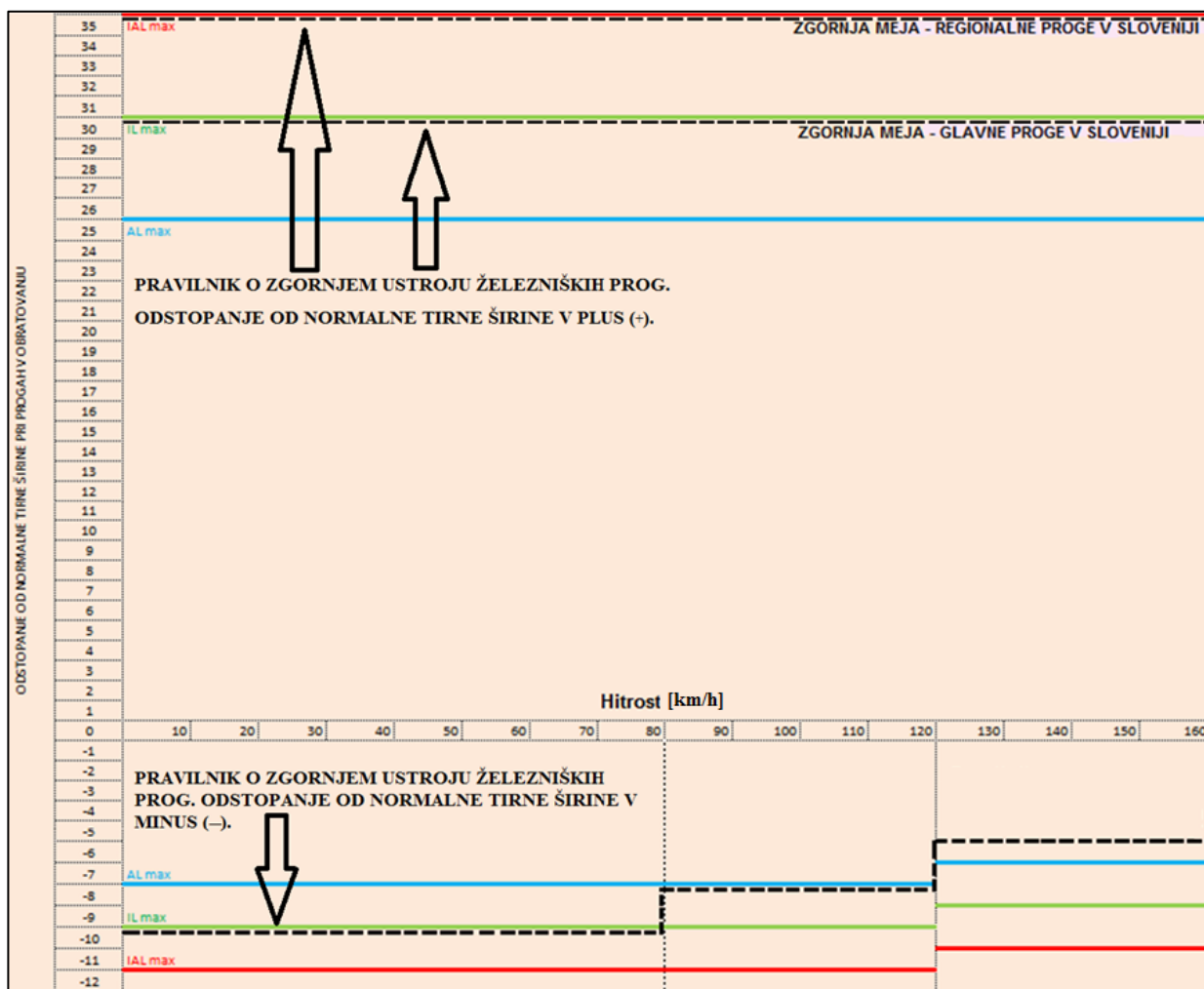
TSI se v državah članicah Evropske unije uporabljajo neposredno. TSI (1299/2014/EU) oziroma standardi, na katere se TSI sklicujejo, so deloma v nasprotju s (še nerazveljavljenim) Pravilnikom o vzdrževanju zgornjega ustroja železniških prog (Uradni list RS, št. 92/2010).

V nadaljevanju so grafično prikazana dovoljena odstopanja po Pravilniku o zgornjem ustroju železniških prog in po standardu EN 13848-5:2008+A1:2010 za naslednje geometrijske parametre:

- tirno širino (Slika 25);
- vegavost tira (Preglednica 11, Slika 26);
- vzdolžno višinsko napako (Preglednica 12, Slika 27).

### 5.3.1 Tirna širina

Slika 25 prikazuje primerjavo med Pravilnikom o zgornjem ustroju železniških prog in standardom EN 13848 glede na dovoljeno odstopanje od normalne tirne širine za različne ravni ukrepanja, AL – min, max (modra črta), IL – min, max (zelena črta) in IAL – min, max (rdeča črta), ter glede na hitrosti.



Slika 25: Primerjava odstopanja od normalne tirne širine med Pravilnikom o zgornjem ustroju železniških prog in evropskim standardom Geometrijska kakovost proge (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

Figure 25: Comparison of deviations from normal gauge in the Slovenian Rules for the railway superstructure and the European standard Geometrical quality of track (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

S prikaza Slika 27 je razvidno, da so maksimalna odstopanja od normalne tirne širine enaka po pravilniku in standardu, v Pravilniku o zgornjem ustroju železniških prog pa je za maksimalno tirno širino glavnih prog in deloma za minimalno širino vseh prog strožje merilo.

### 5.3.2 Vegavost tira

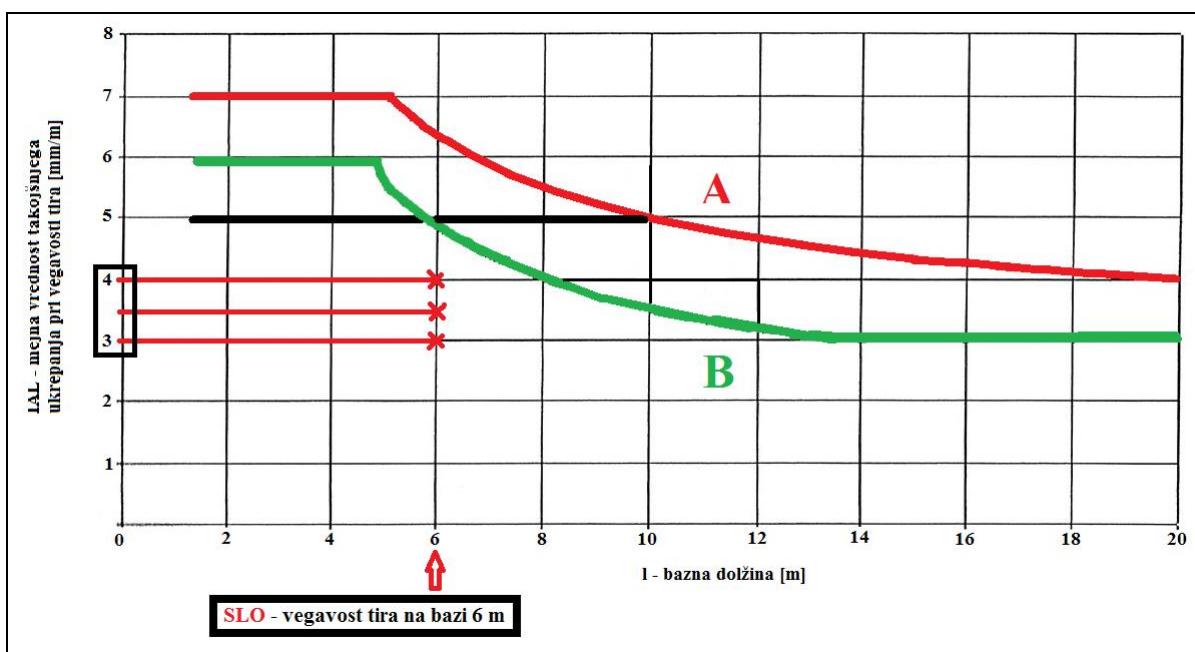
Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog določa dovoljene vrednosti vegavosti tira samo na merni osnovi 6 m, evropski standard pa določa merjenje vegavosti na merni osnovi 1,3–20,0 m. Po pravilniku smejo prevzemne tolerance novih, nadgrajenih in obnovljenih tirov ter tirov po izvedenih načrtovanih vzdrževalnih delih znašati največ 1,5 mm/m za hitrostni razred do vključno 120 km/h oziroma 1,0 mm/m za hitrost nad 120 km/h do vključno 160 km/h. Mejna vrednost vegavosti tira pri obratovanju sme biti 4,0 mm/m za hitrosti  $V \leq 50$  km/h, 3,5 mm/m za hitrosti  $50 \text{ km/h} < V < 100$  km/h, 3,0 mm/m za hitrosti  $V > 100$  km/h. V primeru prekoračitve dovoljenih mej vegavosti tira je treba znižati dovoljene hitrosti vlaka, v skrajnem primeru pa zapreti tir (glej Preglednica 11).

Preglednica 11: Ukrep v odvisnosti od vrednosti vegavosti tira (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010)

Table 10: Measures depending on the value of twist (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010)

Vegavost tira	Hitrostna omejitev
$18 < \text{vegavost} \leq 21 \text{ mm}$	$V_{\max} \leq 100 \text{ km/h}$
$21 < \text{vegavost} \leq 24 \text{ mm}$	$V_{\max} \leq 50 \text{ km/h}$ (rok odprave 24 ur)
vegavost $> 24 \text{ mm}$	zapora tira takoj po meritvi in odprava napake

Primerjava mejnih vrednosti takojšnjega ukrepanja za vegavost po standardu EN 13848-5:2008+A1:2010 v odvisnosti od merne osnove in po Pravilniku o zgornjem ustroju železniških prog (Uradni list RS, št. 92/2010) za merno osnovo 6 m je predstavljena na prikazu Slika 26.



Slika 26: Prikaz dopustne vrednosti vegavosti tira za merno osnovo 6 m (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

Figure 26: Representation of permissible values of track twist on a base of 6 m (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

S prikaza Slika 26 je razvidno, da ima trenutno veljavni Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog (Uradni list RS, št. 92/2010) precej strožje omejitve glede vegavosti tira na osnovi 6 m. Označba na osi y predstavlja dopustne mejne vrednosti vegavosti tira za 3,0 mm/m, 3,5 mm/m in 4,0 mm/m.

### 5.3.3 Vzdolžne višinske napake

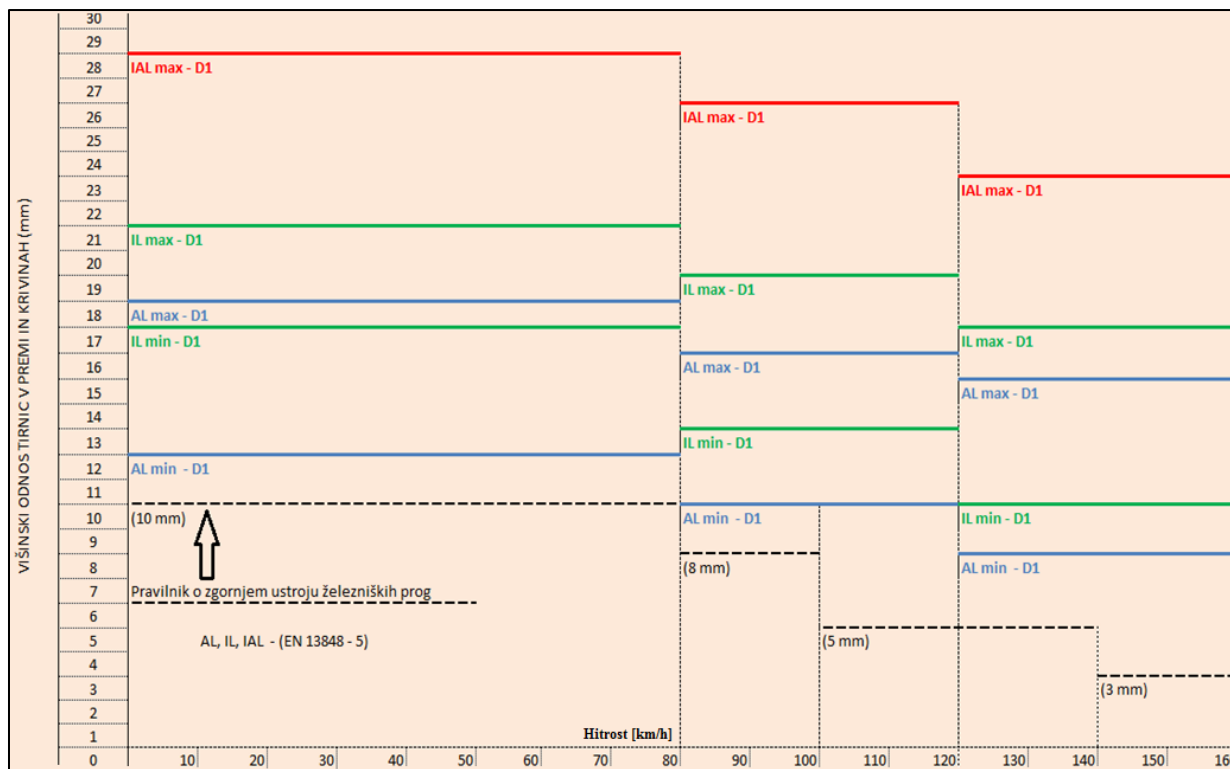
Po pravilniku o zgornjem ustroju morata biti zgornja roba tirnih trakov na enaki višini, če je proga v premi. Dovoljeno odstopanje v medsebojni višinski legi sosednjih tirnih trakov oziroma odstopanje od projektiranega nadvišanja novih ter pri obnovi ali nadgradnji obstoječih prog je  $\pm 2,0$  mm. Dopustna odstopanja po Pravilniku o zgornjem ustroju železniških prog v medsebojni višinski legi tirnih trakov v premi oziroma odstopanja od projektiranega nadvišanja na progah v obratovanju so prikazana v Preglednica 12.

Preglednica 12: Dopustno višinsko odstopanje za proge v obratovanju (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010)

Table 11: Permissible longitudinal level deviation in railway line while under operation (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010)

Dopustno odstopanje	Hitrostni razred
$\pm 3,0$ mm	$V_{\max} > 140$ km/h
$\pm 5,0$ mm	$100 < V_{\max} \leq 140$ km/h
$\pm 8,0$ mm	$80 \leq V_{\max} \leq 100$ km/h
$\pm 10,0$ mm	$V_{\max} < 80$ km/h

V nadaljevanju (Slika 27) je predstavljen grafični prikaz primerjave mejnih vrednosti vzdolžnih višinskih napak (AL min, AL max, IL min, IL max, IAL max) med Pravilnikom o zgornjem ustroju železniških prog in evropskim standardom EN 13848-5:2008+A1:2010.



Slika 27: Primerjava mejnih vrednosti vzdolžnih višinskih napak v premi in krivini v milimetrih

Figure 27: Comparison of the limit values for longitudinal level defects on a straight and on a curve in millimeters

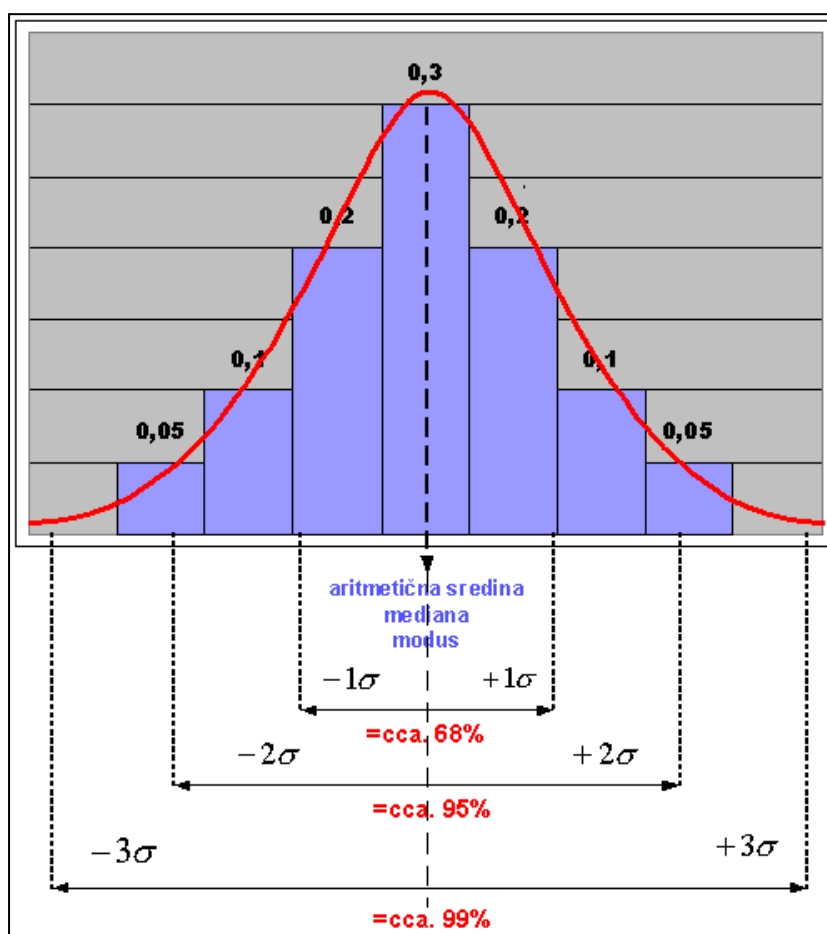
S prikaza Slika 27 je razvidno, da ima Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog v primerjavi s standardom EN 13848-5:2008+A1:2010 glede mejnih vzdolžnih višinskih napak strožje omejitve.

#### 5.4 Standardna deviacija

Za določitev geometrijske kakovosti tira se po standardih EN 13848-5:2008+A1:2010 in pr EN 13848-6:2012.19.1 uporablja še standardna deviacija vzdolžnih višinskih ter smernih napak.

Standardna deviacija je statistični kazalnik, ki meri povprečno razpršenost (variabilnost) napak na danem progovnem odseku glede na srednjo vrednost napak. Ta kazalnik ima enake enote kot slučajna spremenljivka (posamezni geometrijski parameter v milimetrih). V nadaljevanju (Slika 28) so prikazani srednja vrednost (aritmetična sredina), modus in mediana ter enojna, dvojna in trojna standardna deviacija normalne distribucije. Obseg statistične verjetnosti upošteva  $1 \sigma$ ,  $2 \sigma$  ali  $3 \sigma$  standardne deviacije. Na primer:  $1 \sigma$  ustreza 68 % verjetnosti zajetja vseh rezultatov razsipanja okrog srednje vrednosti.





Slika 28: Prikaz standardne deviacije (Jesenko, 2002)

Figure 28: Standard deviation (Jesenko, 2002)

Preglednica 13: Mejne vrednosti standardne deviacije vzdolžnih višinskih napak glede na ukrepanje AL z valovno dolžino D1 (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

Table 12: Limit values of standard deviation of longitudinal level defects with respect to action AL with wavelength range D1 (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

Hitrostni razred [km/h]	Standardna deviacija [mm]
	D1
$V \leq 80$	2,3–3,0
$80 < V \leq 120$	1,8–2,7
$120 < V \leq 160$	1,4–2,4
$160 < V \leq 230$	1,2–1,9
$230 < V \leq 300$	1,0–1,5

Evropski standard EN 13848-5:2008+A1:2010 za standardno deviacijo vzdolžnih višinskih napak se uporablja samo za ukrepanje po AL. V primeru, da je standardna deviacija presežena, je treba analizirati stanje geometrije in razmisliti o načrtovanih vzdrževalnih delih.

Preglednica 14: Mejne vrednosti standardne deviacije za smerne napake tira glede na ukrepanje AL z valovno dolžino D1 (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

Table 13: Limit values of standard deviation of alignment defects to action AL with wavelength range D1 (EN 13848-5:2008+A1:2010, 2010)

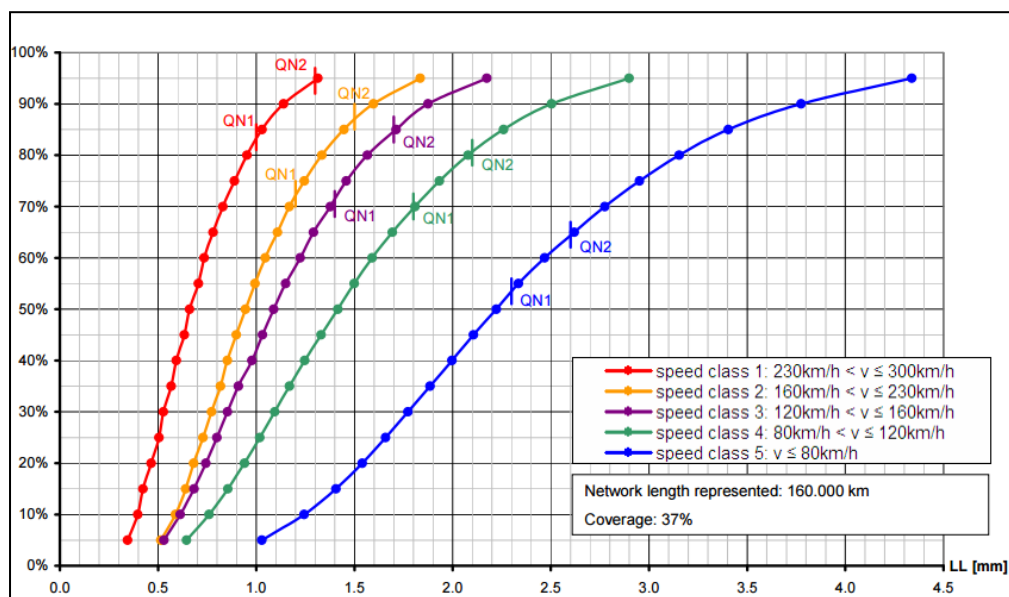
Hitrostni razred [km/h]	Standardna deviacija [mm]
	D1
$V \leq 80$	1,5–1,8
$80 < V \leq 120$	1,2–1,5
$120 < V \leq 160$	1,0–1,3
$160 < V \leq 230$	0,8–1,1
$230 < V \leq 300$	0,7–1,0

Evropski standard EN 13848-5:2008+A1:2010 za standardno deviacijo smernih napak se uporablja samo za ukrepanje po AL. V primeru, da je le-ta presežena, je treba razčleniti stanje geometrije in pripraviti načrt vzdrževalnih del.

### 5.5 Kakovost tira v odvisnosti od standardne deviacije napak po standardu EN 13848-6

Že v 90. letih so v Evropi začeli razmišljati o ustreznih predpisih oziroma standardih geometrijske kakovosti tira. Leta 2012 je v raziskavi ETQS (ang. *Evaluation Tool for Qualitative Studies*) za določitev kakovostnega razreda geometrijske kakovosti tira v odvisnosti od hitrosti in mejnih vrednosti standardnih deviacij za vzdolžne višinske in smerne napake sodelovalo 13 (od skupno 28) članic Evropske unije.

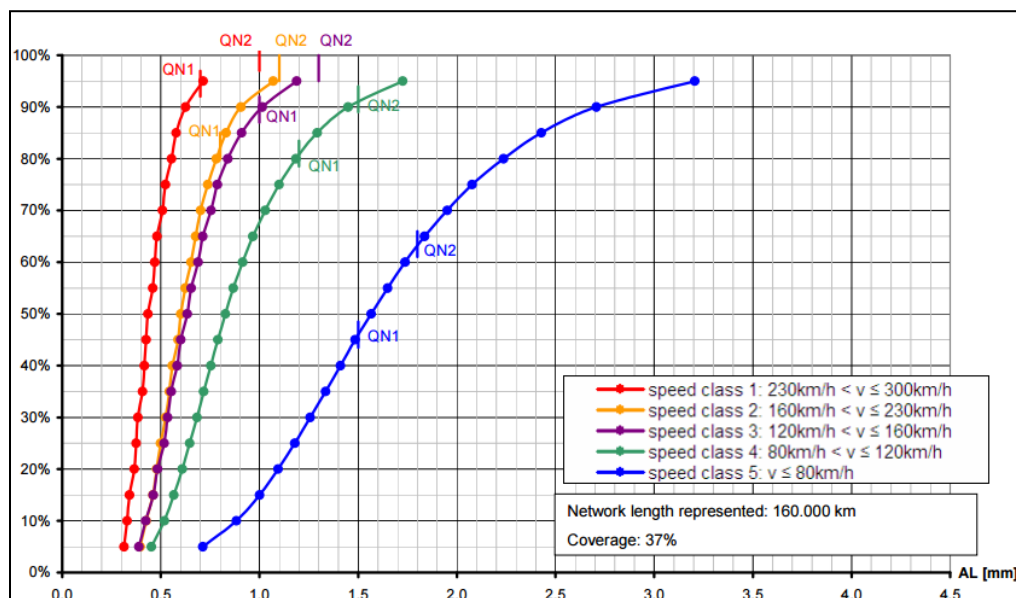
Na osnovi standarda EN 13848-6 so v nadaljevanju na prikazih Slika 29 in Slika 30 predstavljeni rezultati meritev geometrijske kakovosti tira za vzdolžne višinske ter smerne napake, ki temeljijo na standardnih odklonih v odvisnosti od hitrostnih razredov. Rezultati meritev ETQS so pridobljeni na območju evropske železniške mreže kot priporočilo pri preizkušanju tirnih vozil na železniških odsekih. Vrednosti do QN1 se upošteva za načrtovanje rednih vzdrževalnih del, vrednosti do QN2 so vrednosti, pri katerih je treba izvesti manjša vzdrževalna dela. Vrednosti QN3 so približno za 20 % večje od vrednosti QN2.



Slika 29: Kumulativna frekvenčna distribucija standardne deviacije vzdolžnih višinskih napak (LL) (Track Geometry Activities, 2012)

Figure 29: Cumulative frequency distribution of standard deviation for longitudinal level (LL) (Track Geometry Activities, 2012)

Os x prikazuje standardno deviacijo vzdolžnih višinskih/smernih napak, os y pa kumulativno frekvenčno distribucijo za posamezno standardno deviacijo v odvisnosti od hitrosti.



Slika 30: Kumulativna frekvenčna distribucija standardne deviacije smernih napak (AL) (Track Geometry Activities, 2012)

Figure 30: Cumulative frequency distribution of standard deviation for alignment level (AL) (Track Geometry Activities, 2012)

Os x prikazuje standardno deviacijo vzdolžnih višinskih/smernih napak, os y pa kumulativno frekvenčno distribucijo za posamezno standardno deviacijo v odvisnosti od hitrosti.

### 5.5.1 Kakovostni razredi (A–E)

Mejne vrednosti standardne deviacije smernih napak določajo kakovostni razredi (A–E) v odvisnosti od hitrosti. Območje hitrosti je 80–300 km/h.

Preglednica 15: Mejne vrednosti standardne deviacije smernih napak tira glede na kakovostni razred A–E (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)

Table 14: Limit values of standard deviation of alignment defects with respect to quality class A–E (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)

Hitrostni razred [km/h]	Mejne vrednosti standardne deviacije – smerne napake				
	kakovostni razred				
	A	B	C	D	E
$V \leq 80$	< 0,90	1,25	1,95	2,70	> 2,70
$80 < V \leq 120$	< 0,50	0,70	1,05	1,45	> 1,45
$120 < V \leq 160$	< 0,45	0,55	0,75	1,00	> 1,00
$160 < V \leq 230$	< 0,40	0,50	0,70	0,90	> 0,90
$230 < V \leq 300$	< 0,35	0,40	0,50	0,65	> 0,65

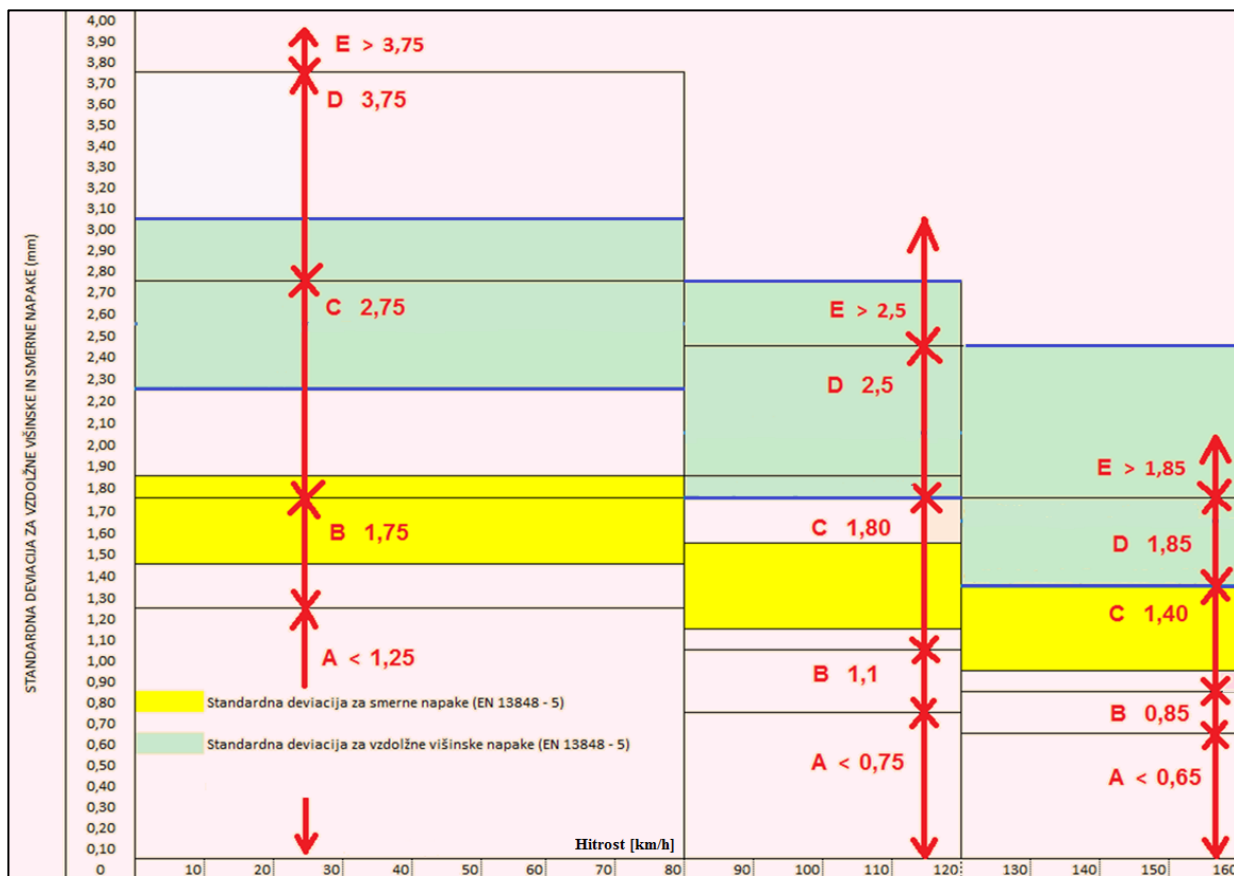
Preglednica 16: Mejne vrednosti standardne deviacije vzdolžnih višinskih napak glede na kakovostni razreda A–E (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)

Table 15: Limit values of standard deviation of longitudinal level defects with respect to quality class (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)

Hitrostni razred [km/h]	Mejne vrednosti standardne deviacije – vzdolžne višinske napake				
	kakovostni razred				
	A	B	C	D	E
$V \leq 80$	< 1,25	1,75	2,75	3,75	> 3,75
$80 < V \leq 120$	< 0,75	1,10	1,80	2,50	> 2,50
$120 < V \leq 160$	< 0,65	0,85	1,40	1,85	> 1,85
$160 < V \leq 230$	< 0,60	0,75	1,15	1,60	> 1,60
$230 < V \leq 300$	< 0,40	0,55	0,85	1,15	> 1,15

### 5.5.2 Primerjava standardne deviacije s kakovostnimi razredi A–E

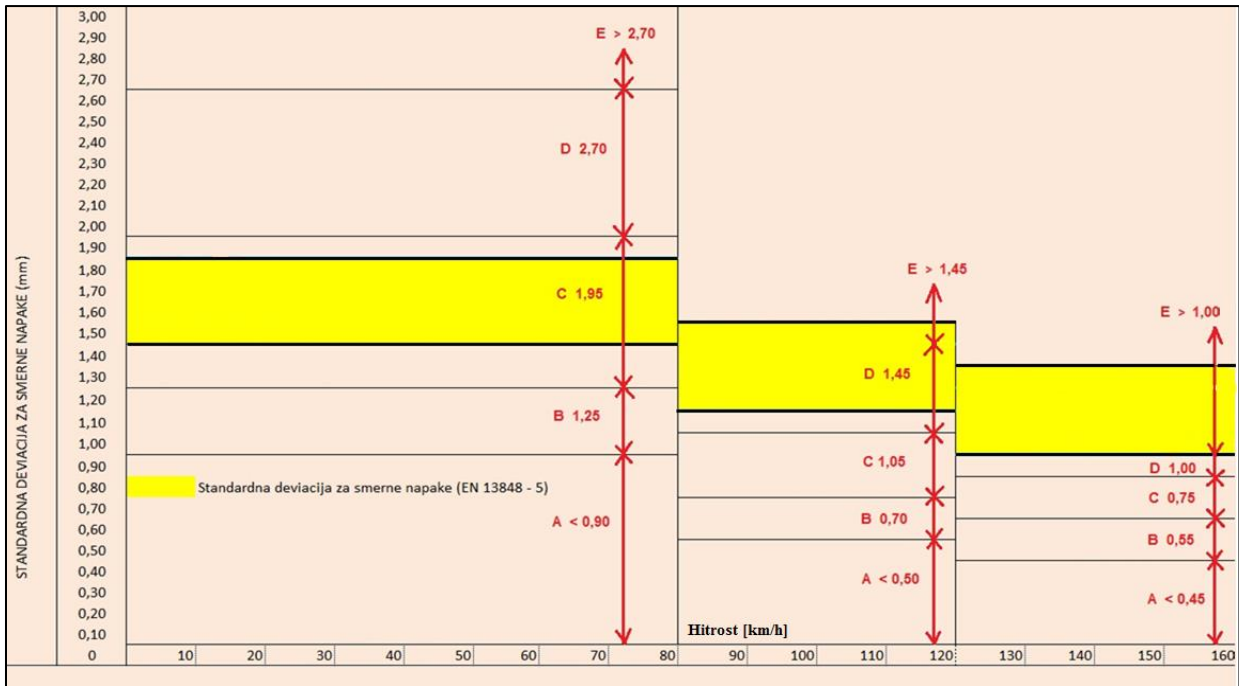
V nadaljevanju (Slika 31) so prikazane mejne vrednosti standardnih deviacij za vzdolžne višinske in smerne napake. Z zeleno barvo je označeno območje vzdolžnih višinskih napak, z rumeno pa območje smernih napak. Za primerjavo so prikazani kakovostni razredi A–E po EN 13848-6:2012.19.1 pri različnih hitrostih.



Slika 31: Primerjava med standardno deviacijo za smerne napake in standardno deviacijo za višinske napake ter kakovostnimi razredi A–E (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)

Figure 31: Comparison of the standard deviation for longitudinal level and alignment defects and track quality classes A–E (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)

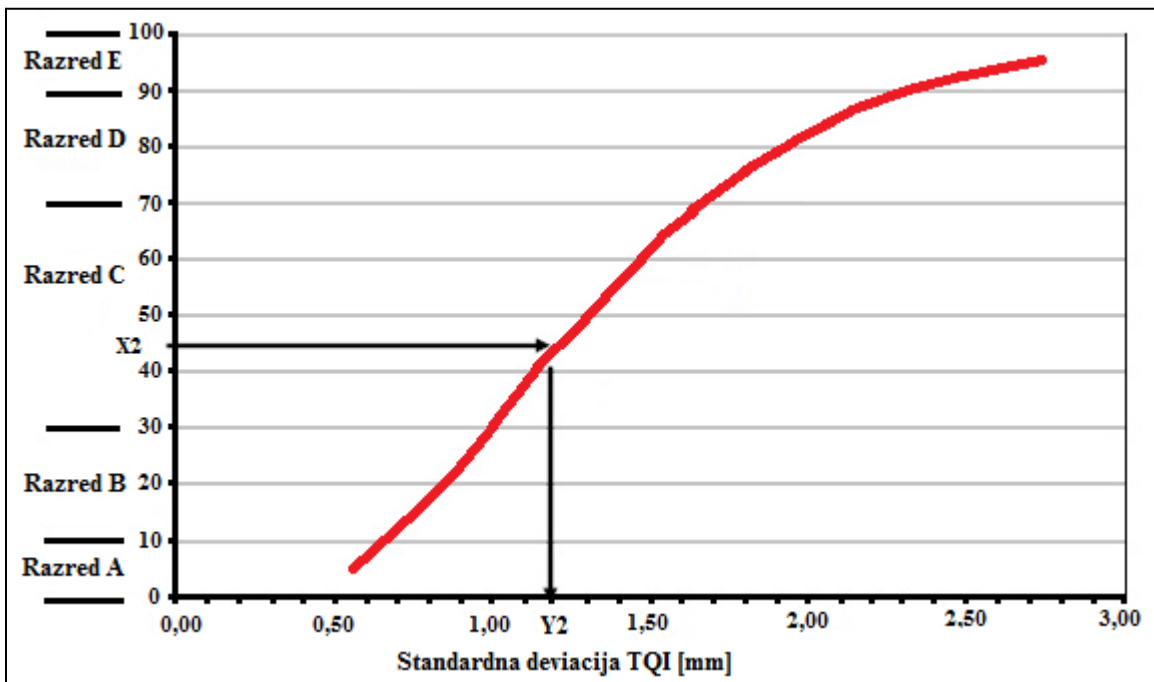
Na prikazu Slika 32 so predstavljeni kakovostni razredi s standardno deviacijo za smerne napake v primerjavi s kakovostnimi razredi A–E.



Slika 32: Primerjava med standardno deviacijo za smerne napake in kakovostnimi razredi A–E (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)

Figure 32: Comparison of the standard deviation of alignment defects and track quality classes A–E (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)

Na prikazu Slika 33 je predstavljen grafični prikaz kakovostnih razredov (A–E) na območju evropskih železnic. V razredu A je kakovost tira najboljša, v razredu E pa je kakovost najslabša.



Slika 33: Grafični prikaz porazdelitve kakovostnih razredov na območju evropskih železnic (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)

Figure 33: Graphical representation of the distribution of quality classes of European Railways (pr EN 13848-6:2012.19, 2012)

## 5.6 Kombinirana standardna deviacija (CoSD)

Oceno splošne kakovosti geometrije tira na posameznem odseku tira lahko opravimo tudi z vsoto standardnih deviacij napak različnih geometrijskih parametrov, kar prikazuje naslednja enačba (pr EN-6:2012.19):

$$CoSD = \sqrt{w_{AL} \cdot SD_{AL}^{-2} + w_G \cdot SD_G^{-2} + w_{CL} \cdot SD_{CL}^{-2} + w_{LL} \cdot SD_{LL}^{-2}}, \quad (47)$$

pri čemer je:

*CoSD* = kombinirana standardna deviacija;

*SD* = standardna deviacija napak posameznih geometrijskih parametrov;

*w* = tehtalni faktor pri posameznih geometrijskih parametrih;

*AL* = smerne napake, povprečje leve in desne tirnice;

*G* = tirna širina;

*CL* = medsebojna višinska razlika tirnic v prečni smeri;

*LL* = vzdolžne višinske napake.

Kombinirana standardna deviacija se uporablja za napake kratkih valovnih dolžin D1 z izračunom na 200 m dolžine.

## 6 VZDRŽEVANJE ŽELEZNIŠKE INFRASTRUKTURE

Vzdrževanje železniške infrastrukture je organiziranje ali izvajanje del, ki so potrebna za ohranjanje obratovalne sposobnosti železniške proge. Vzdrževanje železniške infrastrukture je gospodarska javna služba, ki jo na podlagi koncesije izvaja upravljavec infrastrukture. Vzdrževanje železniških prog delimo na redno vzdrževanje, investicijsko vzdrževanje ter vzdrževalna dela v javno korist (Zgonc, 2012).

### 6.1 Redno vzdrževanje

Redno ali tekoče vzdrževanje so dela, ki ohranjajo normalno obratovalno sposobnost železniške proge in zagotavljajo prometno varnost. Redno vzdrževanje imenujemo tudi zamenjava v okviru vzdrževanja, kar pomeni zamenjavo posameznih sestavin pri preventivnem in korektivnem vzdrževanju z deli, ki imajo enako nalogo ter delujejo enako. S pregledi stanja zgornjega ustroja ugotovljamo morebitne napake ali pomanjkljivosti, ki bi lahko vplivale na varnost železniškega prometa (Zgonc, 2012). Redno vzdrževanje se izvaja interventno ali sistematično.

Interventno vzdrževanje pomeni sprotno odpravljanje posameznih napak, ugotovljenih na podlagi pregledov proge ali rezultatov merilnih voženj. Te napake je treba hitro odpraviti, saj lahko vplivajo na varnost ali rednost prometa. Sem sodijo krajevna popravila širine tira, zamenjave posameznih pragov, zamenjave poškodovanih tirnic, posamezne zamenjave pritrdilnega ali veznega materiala, mazanje tirnic, krajevna smerna in višinska popravila tira ali kretnic, dopolnitev tolčenca itd. Interventno vzdrževanje se navadno izvaja z ročnimi orodji ali lahkiimi ročnimi stroji brez zapore proge v presledkih med posameznimi vlaki.

Sistematično vzdrževanje se izvaja na podlagi predhodno izdelanega načrta potrebnih vzdrževalnih del. Načrt temelji na podatkih merilnih voženj in oceni splošnega stanja zgornjega ustroja. Dela se izvajajo s posebnimi progovzdrževalnimi stroji le ob zapori tira. Zgonc (2012) navaja, da sistematična vzdrževalna dela zajemajo predvsem:

- podbijanje in regulacijo tira s ciljem popravka (korekcije) višinskih in smernih geometrijskih napak na tiru ali kretnicah;
- stabilizacijo tirne grede s posebnimi vibracijskimi stroji za učvrstitev tirne grede;
- profiliranje oziroma pluženje tirne grede z namenom oblikovanja tirne grede v geometrijsko pravilni prečni profil;
- sejanje tirne grede;
- kemično uničevanje trave in plevela v tirni gredi;
- strojno brušenje tirnic – cilj je ponovna vzpostavitev geometrijsko pravilne tirnične glave in ravne vozne površine tirnice.



## **6.2 Investicijsko vzdrževanje**

Investicijsko vzdrževanje obsega dela, ki se izvajajo na daljša časovna obdobja. To so predvsem sistematične obnove posameznih delov ali odsekov proge, s katerimi se ne spreminja celotnega delovanja železniškega podsistema ali njegove namenskosti. Zamenjave v okviru vzdrževanja se od obnove ločijo po tem, da omogočajo uskladitev progovnih parametrov s tehničnimi specifikacijami za interoperabilnost TSI. Investicijsko vzdrževanje je smiselno izvesti ob splošni in trajni iztrošenosti posameznih sestavnih delov proge, kar se ugotovi na podlagi večkratnih pregledov, opazovanj in meritev (Zgonc, 2012).

## **6.3 Obnova proge (vzdrževalna dela v javno korist)**

Obnova proge pomeni zamenjavo celotnega zgornjega ustroja proge z novim materialom, po potrebi tudi popravilo spodnjega ustroja z vgraditvijo tamponskega sloja ustrezne debeline ter ureditev odvodnjavanja proge. Z obnovo lahko izboljšamo geometrijske parametre proge in povečamo osno obremenitev proge. Obnova proge se izvede takrat, ko se proga z rednim ter investicijskim vzdrževanjem ne more več gospodarno vzdrževati v stanju, kakršnega zahteva varnost in urejenost prometa, oziroma ko je stanje zgornjega ustroja degradirano do te meje, da kljub intenzivnemu vzdrževanju in zamenjavi posameznih delov zgornjega ustroja ni več mogoče zagotavljati varnega prometa v skladu s pogoji, določenimi z voznim redom.

Vzdrževalna dela v javno korist so dela, s katerimi lahko izboljšamo prometno-tehnične in varnostne lastnosti železniške proge. Največkrat se uporabljajo tudi za usposobitev proge za višje osne obremenitve ter višje hitrosti na progi (Zgonc, 2012).

Za ponazoritev je na prikazu Slika 34 predstavljeno stanje geometrijske kakovosti geometrije tira med obnovljenim in neobnovljenim odsekom na železniški progi cepišče Prešnica–Koper potniška. Tir od km 17 + 140 do km 19 + 140 je v celoti obnovljen.



Slika 34: Primerjava med obnovljenim in neobnovljenim tirom na železniški progi cepišče Prešnica–Koper potniška (Program DrezStac, 2016)

Figure 34: Comparison between restored and non-restored track on the railway line at the junction Prešnica–Koper (Program DrezStac, 2016)

Učinki vzdrževalnih ukrepov za posamezne sestavine tirne strukture imajo določeno življenjsko dobo, ta pa je odvisna tudi od prometne obremenitve. Ti učinki so prikazani v Preglednica 17.

Preglednica 17: Življenjska doba učinkov vzdrževalnih ukrepov v odvisnosti od prometne obremenitve (Lichtberger, 2007)

Table 16: The typical life cycles of various maintenance actions (Lichtberger, 2007)

Vzdrževalni ukrep	Kumulativna prometna obremenitev v bruto tonah	Doba delovanja v letih
Strojna regulacija tira	40–70 milijonov	4–5
Brušenje tira	20–30 milijonov	1–3
Sejanje tirne grede	150–300 milijonov	12–15
Zamenjava tirnic	300–1.000 milijonov	10–15
Zamenjava lesenih pragov	250–600 milijonov	20–30
Zamenjava betonskih pragov	350–700 milijonov	30–40
Zamenjava pritrtilnega materiala	100–500 milijonov	10–30
Zamenjava tirne grede	200–500 milijonov	20–30
Obnova tira	več kot 500 milijonov	več kot 40

Sejanje tirne grede je priporočljivo samo hkrati z drugimi velikimi posredovanji, na primer na 20 let pri lesenih pragovih, na 30 let pri betonskih pragovih. Za strojno regulacijo tira je na primer

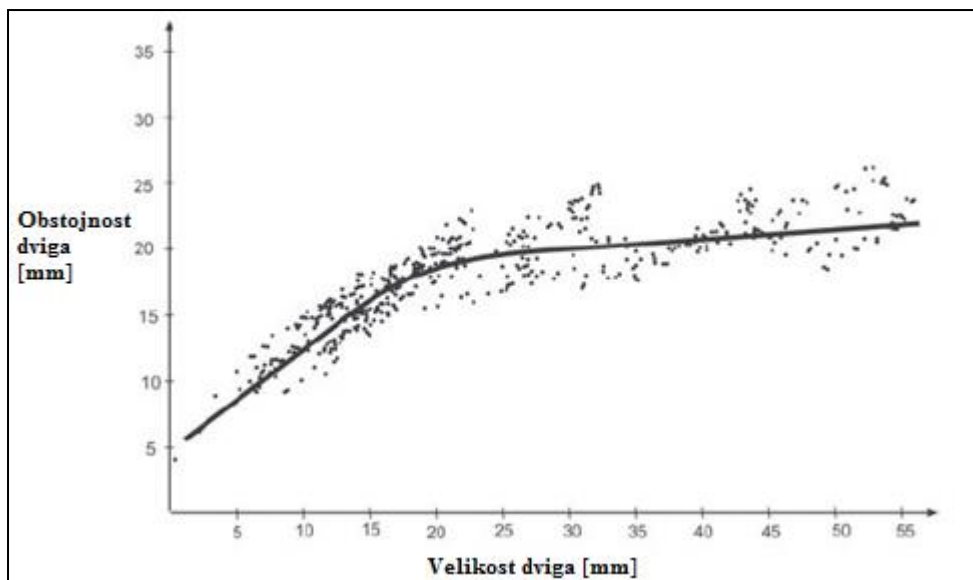
priporočeno, da se vzdrževalno delo izvede po prevoženih 40–70 milijonih bruto tonah oziroma po 4–5 letih. Odločilni dejavniki pri upoštevanju vzdrževalnega ukrepa so prometne obremenitve.

#### **6.4 Sodobna strojna mehanizacija za vzdrževanje železniške infrastrukture**

Tir mora biti na projektirani višini in smeri. Dinamične sile s tem povzročajo geometrijska odstopanja, zato to pospešuje degradacijo. Nadaljnje degradacije tira preprečujemo z vzdrževalnimi deli. Manjša vzdrževalna dela, s katerimi odpravljamo krajevne napake na tiru, se odpravljajo ročno oziroma z uporabo lahke mehanizacije. Večja vzdrževalna dela se v celoti odpravljajo s sodobno strojno mehanizacijo (s strojem za podbijanje in dinamično stabilizacijo tira).

##### **6.4.1 Stroj za podbijanje tira**

Strojno podbijanje tira se izvaja s težkimi vzdrževalnimi stroji, ki hkrati s podbijanjem pragov tir tudi višinsko in smerno uravnajo. Pri tleh imajo stroji vgrajene podbijalne krampe, ki prodirajo v tirno gredo med posameznimi pragovi; z direktnimi, linearnimi tresljaji ter asinhrono vibracijsko frekvenco 35 Hz pa ustvarijo zadostno zgostitev ter ustrezno homogenost in kompaktnost grede. Krajevne napake vegavosti, stabilnosti in smeri se odpravljajo pri strojni regulaciji (Srebot, 2003). Takoj po izvedeni strojni regulaciji se tir nekoliko spusti, višina tega spusta pa je odvisna od velikosti dviga. Za dvige pod 15–20 mm ni potrebno nobeno dodatno popravilo, saj tirna greda in tir obstaneta na isti višini. V primeru dviga za 40 mm se tirna greda sčasoma posede za okoli 20 mm. Če s strojno regulacijo dvignemo tir za 15–20 mm, se tirna greda ne posede. Če pa dvignemo za 20–50 mm, se tirna greda skupaj posede na 20 mm. Slika 35 prikazuje posedanje, ki se zgodi pri različnih velikostih dviga tirne rešetke (Lichtberger, 2007).



Slika 35: Obstojnost dviga v odvisnosti od velikosti dviga tirnice pri strojni regulaciji (Lichtberger, 2007)

Figure 35: Durability of lift depending on the lift performed (Lichtberger, 2007)

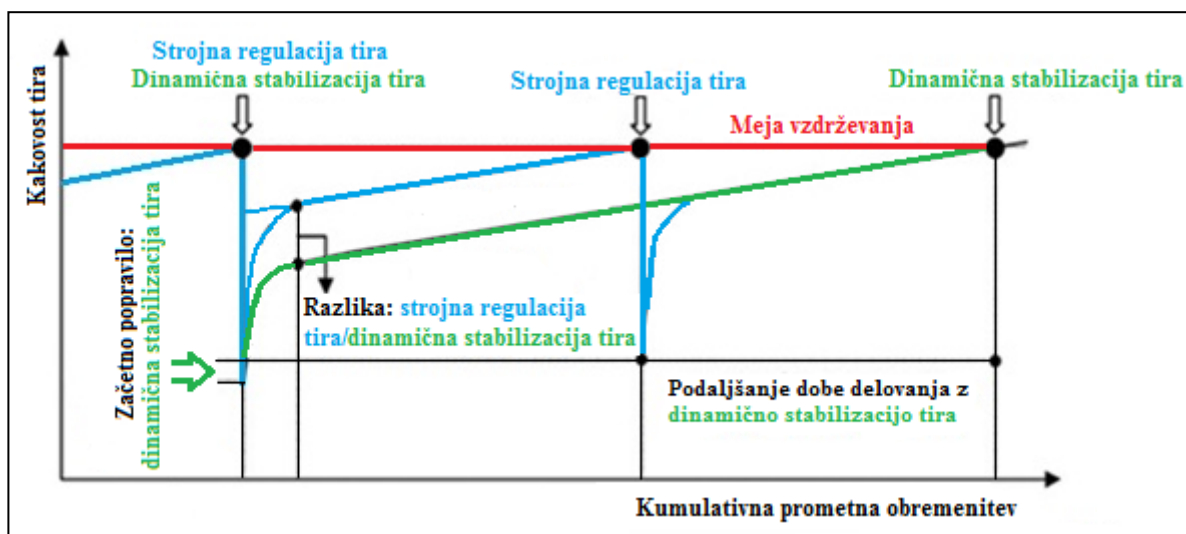
#### 6.4.2 Stroj za dinamično stabilizacijo tira

Po strojni regulaciji je tir višinsko in smerno uravnan, tirna greda pa podbita v dosegu podbijalnih vilic stroja. Z dodatno stabilizacijo tirne grede dosežemo, da se tirna rešetka temeljito zasidra v gredo.

Stroj za dinamično stabilizacijo tira ima posebne postavne vozičke, po katerih je tir obremenjen z vertikalno statično obtežbo, pri taki obremenitvi pa se po vozičku prenašajo na tir horizontalni tresljaji prečno na os tira.

#### 6.4.3 Primerjava med strojnim podbijanjem tira in vzdrževanjem s strojem za dinamično stabilizacijo tira

Na prikazu Slika 36 je predstavljena primerjava degradacije tira po vzdrževanju s strojno regulacijo in po vzdrževanju z dinamično stabilizacijo.



Slika 36: Primerjava učinka vzdrževanja s strojno regulacijo in dinamično stabilizacijo tira na kakovost tira (Lichtberger, 2007)

Figure 36: Comparison of the effect of maintenance by machine regulation and by dynamic stabilization of the track on the quality of the track (Lichtberger, 2007)

Z izvedbo stabilizacije tira se vzdrževalni interval podaljša za 30 % (Lichtberger, 2007). S tem dobimo stabilno, varno in dolgoročno obstojno stanje tira.

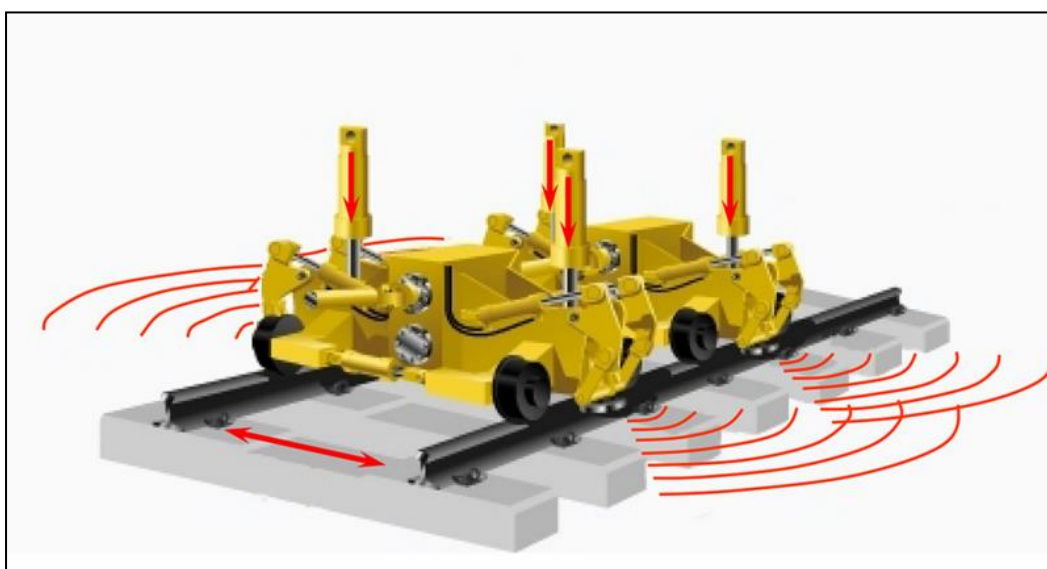
Pri novejših vzdrževalnih strojih (na primer Express 09-4x), ki lahko istočasno strojno uravnajo štiri pragove v istem delovnem ciklusu, je vgrajena naprava za dinamično stabiliziranje tira (DTS). Tak vzdrževalni stroj je prikazan v nadaljevanju (Slika 37).



Slika 37: Delovni stroj Unimat 09-32/4S za regulacijo tira z uporabo dinamične stabilizacije tira (Hochleistung Präzision Zuverlässigkeit, 2016)

Figure 37: Unimat 09-32/4S tamping machine for regulation of the track using dynamic stabilization (Hochleistung Präzision Zuverlässigkeit, 2016)

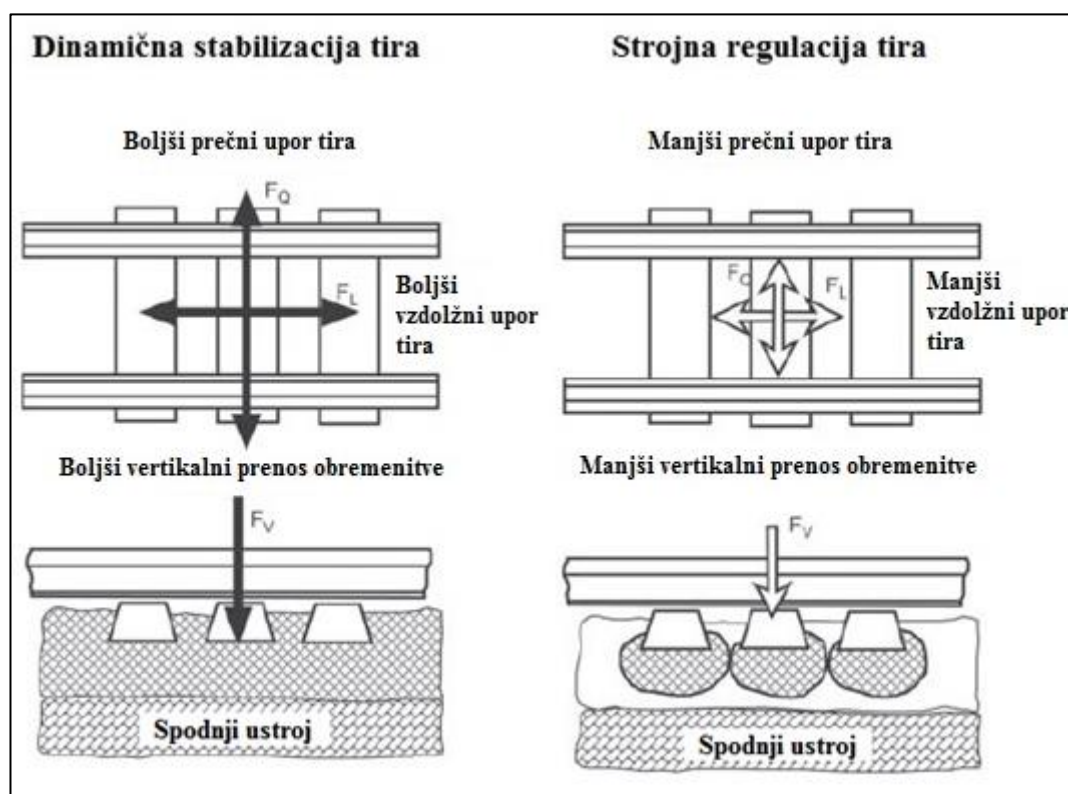
Vibrirajoči sestavni deli stroja za dinamično stabiliziranje tira zajamejo obe tirnici z valjnimi zaponkami in vpeljejo horizontalno oscilacijo tira pod stalno vertikalno obremenitvijo, kar je predstavljeno na prikazu Slika 38.



Slika 38: Prenos tresljajev po tiru (Hochleistung Präzision Zuverlässigkeit, 2016)

Figure 38: Vibrations of the railway track (Hochleistung Präzision Zuverlässigkeit, 2016)

Pri tresljajih se izboljša prenos sil v vseh treh smereh, kot je razvidno na prikazu Slika 39.



Slika 39: Primerjava prenosa obremenitve med dinamično stabilizacijo tira in strojno regulacijo tira (Lichtberger, 2007)

Figure 39: Comparison of load transfer between dynamic stabilization of the track and tamping machine (Lichtberger, 2007)

Slika 39 prikazuje izboljšanje prečnega in vzdolžnega upora tira z dinamično stabilizacijo v primerjavi s strojno regulacijo tira. V vertikalni smeri to povzroči homogenost tirne grede in preprečitev tvorjenja praznin pod pragovi. Izboljšana odpornost tira povzroči zmanjšanje dinamičnih sil med kolesom in tirnico, ki nastanejo zaradi nepravilnosti kolesa ali glave tirnice. Raziskave Plasser in Theurer (Hochleistung Präzision Zuverlässigkeit, 2016) so pokazale, da je prečno vibriranje sedemkrat učinkovitejše kot vertikalno vibriranje pri utrjevanju tirne rešetke (Lichtberger, 2007). Stroj za dinamično stabiliziranje tira posledično proizvede bolj konsistentno utrditev tirne grede kot pri vertikalni utrditvi (Lichtberger, 2007). Dinamična stabilizacija tira omogoča enakomerno strukturo tirne grede pod pragovi, kar zagotavlja bistveno daljšo obstojnost geometrije tira znotraj dopustnih mejnih vrednosti. Z dinamično stabilizacijo tira povečamo vrednosti vzdolžnega upora za 30–50 % v primerjavi s strojno regulacijo. Dosežena stabilnost tira z dinamično stabilizacijo tira je enaka stabilnosti po prevoženih 100.000 bruto tonah (Lichtberger, 2007).



## 6.5 Meritve geometrijskih parametrov tira

Za načrtovano ugotavljanje stanja tira se v okviru rednega vzdrževanja izvaja merjenje geometrijskih parametrov z ročnimi merili ali posebnimi merilnimi vozili. Merjenje z merilnimi vozili je lahko brezkontaktno ali kontaktno, lahko je inercialno z merjenjem pospeškov, lahko pa temelji na merjenju tetiv na bazi treh točk. Merilna vozila se razlikujejo tudi po tem, ali so namenjena le merjenju parametrov zgornjega ustroja, merjenju parametrov vozne mreže in/ali merjenju parametrov spodnjega ustroja. Njihove merilne naprave in postopki merjenja morajo ustrezati določilom standarda EN 13848 in omogočati medsebojno primerljivost (Zgonc, 2012).

Merilne vožnje se opravljajo:

- na odsekih prog, katerih največja dovoljena progovna hitrost je večja od 120 km/h in po katerih obratujejo vlaki z vklopljeno nagibno tehniko, dvakrat na leto, presledek med posameznimi merjenji je dolg največ osem mesecev;
- na glavnih progah (ne glede na hitrost) najmanj dvakrat na leto (spomladi in jeseni), presledek med posameznimi merjenji je dolg največ osem mesecev;
- na regionalnih progah enkrat na leto, presledek med merjenji je dolg največ 15 mesecev.

Glavni geometrijski parametri, ki jih je treba meriti z merilnim vozom, so širina tira, vegavost tira, smer tira, nadvišanje in stabilnost tira (Zgonc, 2012). Omogočeno mora biti računanje standardnih deviacij in celotnega signala standardne deviacije na različnih dolžinah, začevši s 100 m. Če so dovoljene tolerance odstopanja posameznih parametrov prekoračene, je treba načrtovati in izvršiti ustrezen vzdrževalni ukrep ali zmanjšati omejitev hitrosti po Pravilniku o zgornjem ustroju železniških prog.

Merilne vožnje v Sloveniji med letoma 1997 in 2002 ter od 2005 naprej izvaja Madžarska merilna drezina FMK 004 (Slika 40).

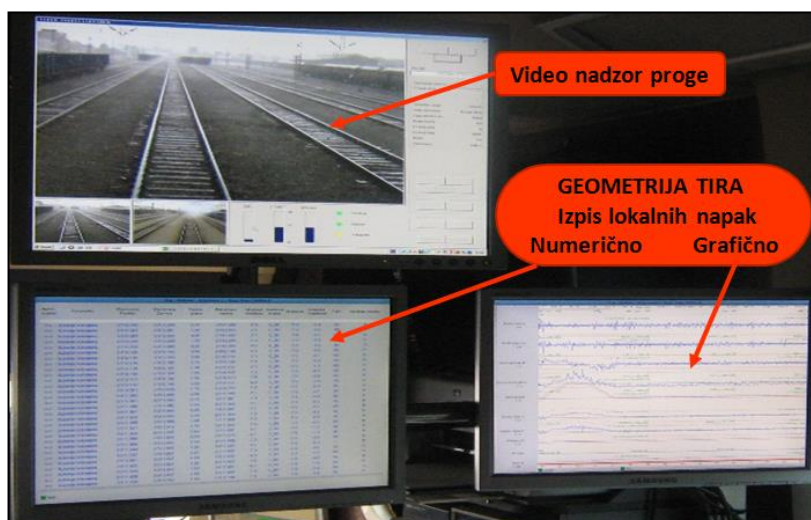




Slika 40: Merilna drezina FMK 004 (Bence, 2015)

Figure 40: FMK 004 track geometry measuring car (Bence, 2015)

Ta merilni vlak lahko vozi z največjo potovalno hitrostjo (100 km/h), kar je hkrati tudi največja hitrost merjenja. Podatki se merijo s tremi merilnimi kolesi, ki se nahajajo na sredinskem podstavnem vozičku merilnega vlaka. Meritve glavnih geometrijskih parametrov se izvajajo na vsakih 25 cm železniške proge. Merilni vlak omogoča prikaz standardne deviacije napak na različno dolgih odsekih. Pri vožnji merilnega vlaka je treba stalno izvajati nadzor nad geometrijo tira, kar je prikazano v nadaljevanju (Slika 41).



Slika 41: Nadzor nad geometrijo tira pri merilnem vlaku FMK 004 (Bence, 2015)

Figure 41: Inspection of the geometry of the track using the measuring car FMK 004 (Bence, 2015)

Za ugotavljanje stanja tira se z merilnim vlakom izvaja merjenje geometrijskih parametrov tira. Po opravljenih meritvah se analizira kakovost tira *KT 500*, ki je odvisna od odstopanj od srednjih ali projektiranih geometrijskih parametrov. Vrednost *KT 500* je vsota ploščin med krivuljo posameznega parametra in izhodiščno abscisno črto na 500-metrskem odseku, pridobljeno iz grafikona merilne vožnje (Poročilo o meritvah z FMK 004, 2015). Vrednost *KT 500* je odvisna od vrednosti naslednjih parametrov: stabilnosti leve in desne tirnice, smeri leve in desne tirnice ter vegavosti tira. *KT 500* se izračuna po enačbi:

$$KT\ 500 = \frac{StabL + StabD + SmerL + SmerD + Veg2,5 + Veg6}{3} \quad (48)$$

Vrednosti *KT 500* določa, ali je na določenem odseku tir dober, zadovoljiv ali pa so potrebna vzdrževalna dela. Za različne vozne hitrosti so določene različne mejne vrednosti (Preglednica 18) (Poročilo o meritvah z FMK 004, 2015).

Preglednica 18: Mejne vrednosti *KT 500* za glavne proge na območju Slovenskih železnic (Poročilo o meritvah z FMK 004, 2015)

Table 17: Limit values for the *KT 500* main lines in the territory of Slovenian Railways (Poročilo o meritvah z FMK 004, 2015)

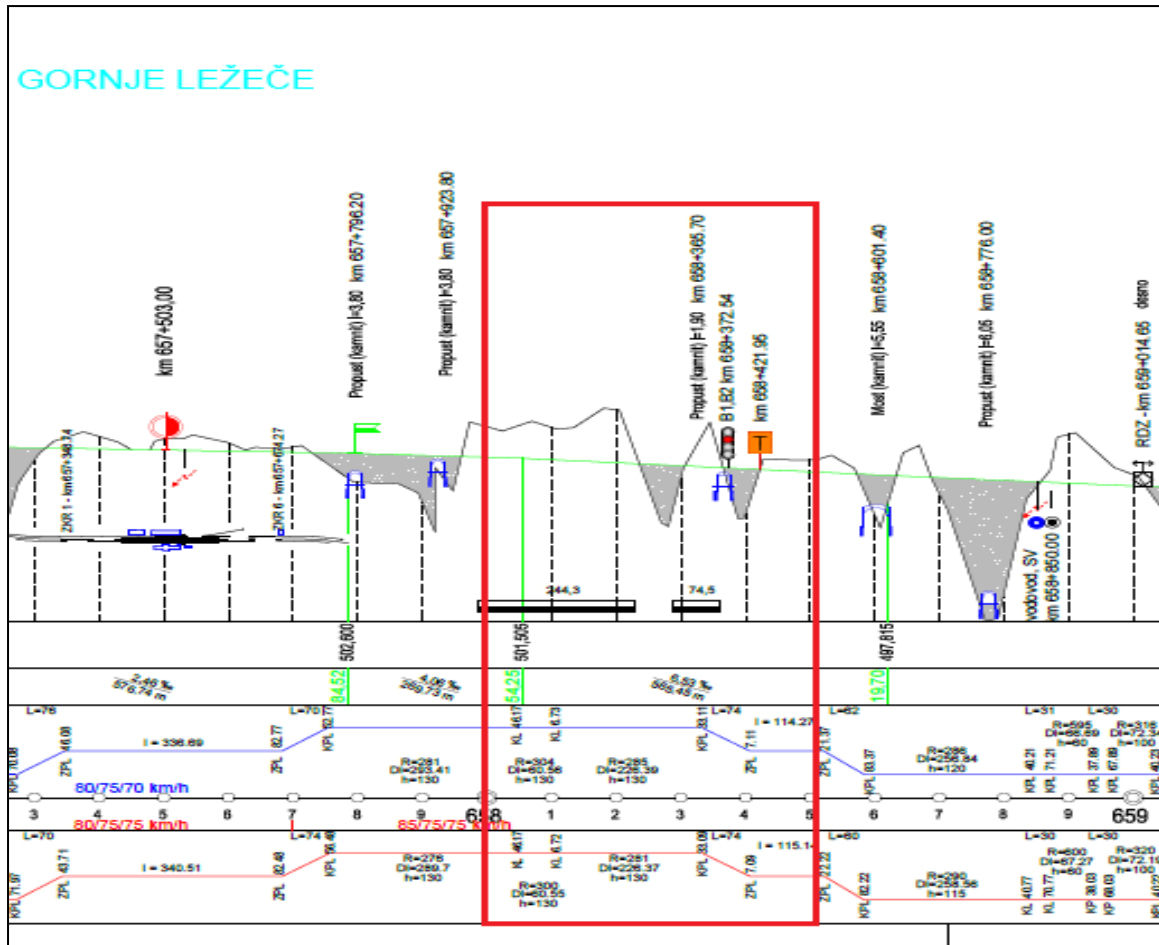
Hitrost	Dober tir	Zadovoljiv tir	Vzdrževalni ukrepi
do 40 km/h	≤ 169	169 < <i>KT 500</i> ≤ 322	> 322
41–60 km/h	≤ 138	138 < <i>KT 500</i> ≤ 252	> 252
61–80 km/h	≤ 120	120 < <i>KT 500</i> ≤ 208	> 208
81–100 km/h	≤ 108	108 < <i>KT 500</i> ≤ 181	> 181
101–120 km/h	≤ 98	98 < <i>KT 500</i> ≤ 159	> 159
121–140 km/h	≤ 91	91 < <i>KT 500</i> ≤ 143	> 143
141–160 km/h	≤ 86	86 < <i>KT 500</i> ≤ 131	> 131

## **7 IZRAČUN DEGRADACIJE NA PRAKTIČNEM PRIMERU**

Degradacijo tira ugotavljamo s posameznimi napakami določenih geometrijskih parametrov tira, v novejšem času pa tudi s standardno deviacijo višinskih in smernih napak tira. V nadaljevanju tega poglavja podajamo izračun degradacije tira zaradi posameznih napak na odseku železniške proge Gornje Ležeče–Divača. Uporabljeni bodo podatki z izmerjeno kakovostjo tira, prometno obremenitvijo za izračun degradacije tira po avstrijskem modelu. V drugem delu bo uporabljen izračun degradacije s standardno deviacijo napak prav tako na odseku proge Gornje Ležeče–Divača po švedskem modelu. V tretjem delu bo prikazana degradacija tira na odseku proge Ljubljana–Brezovica s standardno deviacijo vzdolžnih višinskih in smernih napak. Sledi primerjava degradacije tira s standardno deviacijo vzdolžnih višinskih napak med izbranimi odsekoma Gornje Ležeče–Divača in Ljubljana–Brezovica.

### **7.1 Izračun degradacije tira zaradi posameznih napak**

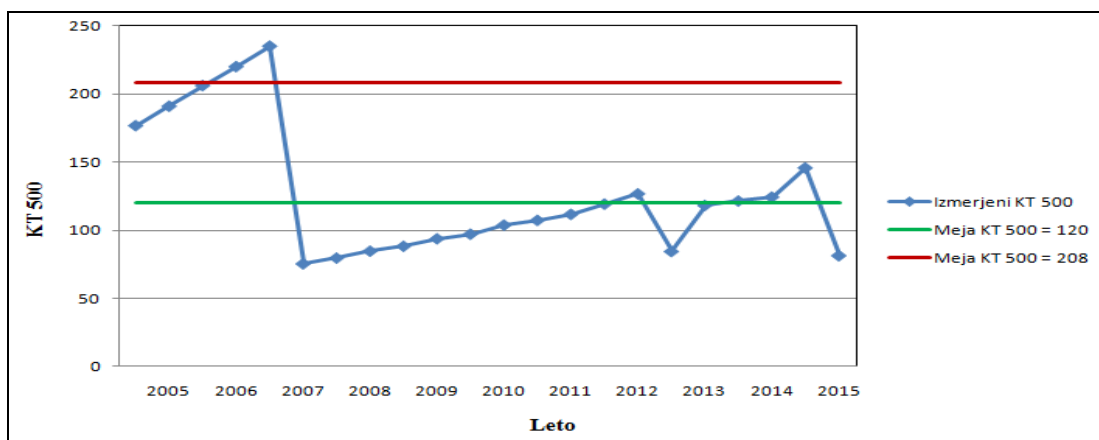
Za izračun degradacije tira zaradi posameznih napak smo izbrali odsek železniške proge Gornje Ležeče–Divača od km 658 + 000 do km 658 + 500. Primerjali smo resnično izmerjeno degradacijo kakovosti tira v obdobju od leta 2007 do leta 2015 v odvisnosti od prometne obremenitve z izračunano degradacijo tira po avstrijskem modelu. Zgornji ustroj železniške proge je bil obnovljen leta 2007 s tirnicami sistema 60 E1, z elastično pritrditvijo Pandrol na lesenih pragovih. Največja dovoljena progovna hitrost na obravnavanem odseku je za vlake z nagibno tehniko 85 km/h, za ostale potniške ter tovarne vlake pa 75 km/h. Za ta omenjeni odsek smo se odločili, saj od obnove tira leta 2007 do leta 2012 niso bila potrebna vzdrževalna dela. V vzdolžnem profilu je prikazan obravnavani odsek na prikazu Slika 42. Vhodni podatki za analizo so opravljene meritve kakovosti tira *KT* 500 ter prometna obremenitev za obdobje 2005–2015 (Slika 43 in Slika 44).



Slika 42: Vzdolžni profil obravnavanega odseka od km 658 + 000 do km 658 + 500 (VP Ljubljana–Sežana, 2016)

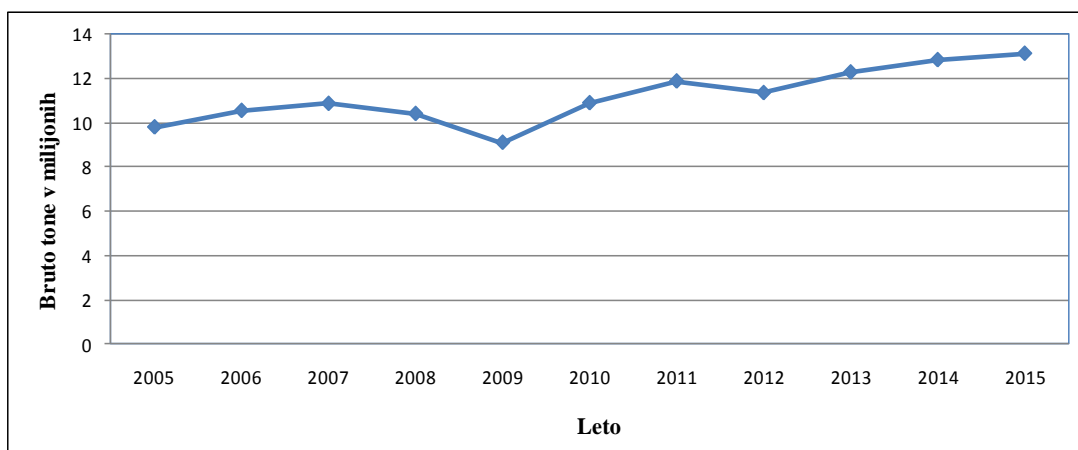
Figure 42: Longitudinal profile of the segment from km 658 + 000 to km 658 + 500 (VP Ljubljana–Sežana, 2016)

Na prikazu Slika 43 je predstavljeno spreminjanje kakovosti tira *KT 500* za obdobje 2005–2015 na osnovi rezultatov meritev z merilnim vlakom in mejnimi vrednostmi *KT 500* (Preglednica 18).

Slika 43: Vrednosti *KT 500* 2005–2015Figure 43: *KT 500* values from 2005 to 2015

S slike je razvidno, da je bila pred obnovo tira (leta 2007) vrednost kakovosti tira  $KT\ 500$  235, po obnovi pa 76. Kakovost tira se je z obnovo bistveno izboljšala, od leta 2007 pa se je zaradi prometne obremenitve postopoma degradirala, kar kaže vrednost  $KT\ 500$  po letu 2007, ki počasi narašča. Meja  $KT\ 500 = 120$  pomeni, da je tir v dobrem stanju. Vrednosti med 120 in 208 predstavljajo zadovoljiv tir. V primeru, da so vrednosti večje od 208, pa pomeni, da so potrebna vzdrževalna dela (strojna regulacija, obnova ali nadgradnja proge).

Na prikazu Slika 44 je predstavljena prometna obremenitev na odseku železniške proge Gornje Ležeče–Divača v milijonih bruto tonah po posameznih letih.



Slika 44: Prometna obremenitev na odseku železniške proge Gornje Ležeče–Divača

Figure 44: Traffic load on the Gornje Ležeče–Divača section of railway line

Od leta 2005 do leta 2008 je bila na tem odseku povprečna letna bruto obremenitev približno deset milijonov bruto ton. Leta 2009 se je ta sicer nekoliko zmanjšala, po tem letu pa je počasi naraščala do skoraj 14 milijonov bruto ton v letu 2015.

Na osnovi razpoložljivih vhodnih podatkov (prometne obremenitve,  $KT\ 500$ ) smo primerjali resnično degradacijo tira po enačbi (5):

$$Q = Q_0 e^{y_A},$$

pri čemer je:

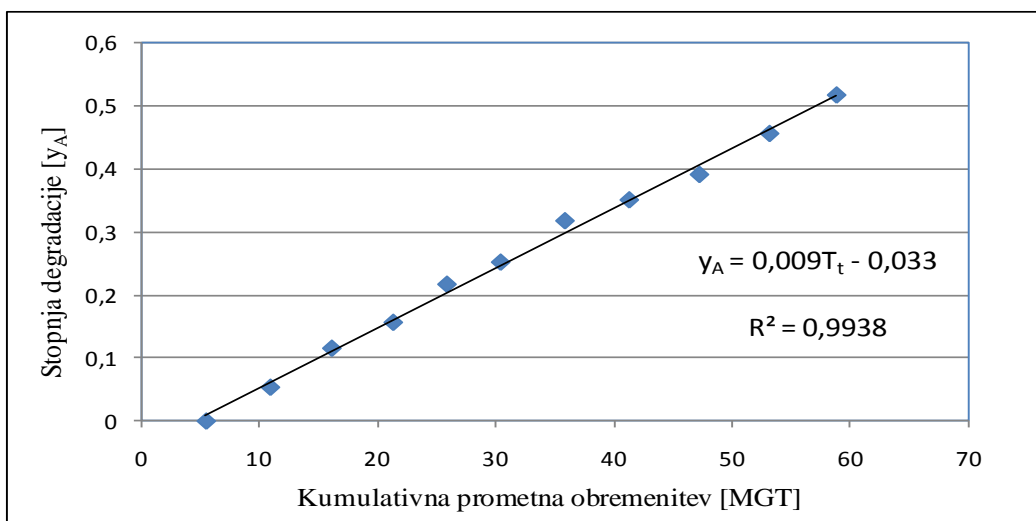
$Q$  = kakovost tira;

$Q_0$  = začetna kakovost tira (za leto 2007 znaša vrednost  $KT\ 500$  76);

$y_A$  = regresijska premica ( $y_A = 0,009T_t - 0,033$ );

$T_t$  = prometna obremenitev v milijonih bruto tonah.

Regresijska premica  $y_A$  kot funkcija prometne obremenitve in stopnje degradacije je izračunana po metodi najmanjših kvadratov, predstavljena je na prikazu Slika 45.



Slika 45: Stopnja degradacije tira v odvisnosti od kumulativne prometne obremenitve

Figure 45: Coefficient of quality degradation of track depending on cumulative traffic load

Slika 45 prikazuje propadanje kakovosti tira v odvisnosti od prometne obremenitve.  $X$ -os predstavlja kumulativno prometno obremenitev,  $y$ -os pa stopnjo degradacije.

Degradacijo tira po prevoženih 60 milijonih bruto tonah med letoma 2007 in 2012 izračunamo z naslednjo enačbo:

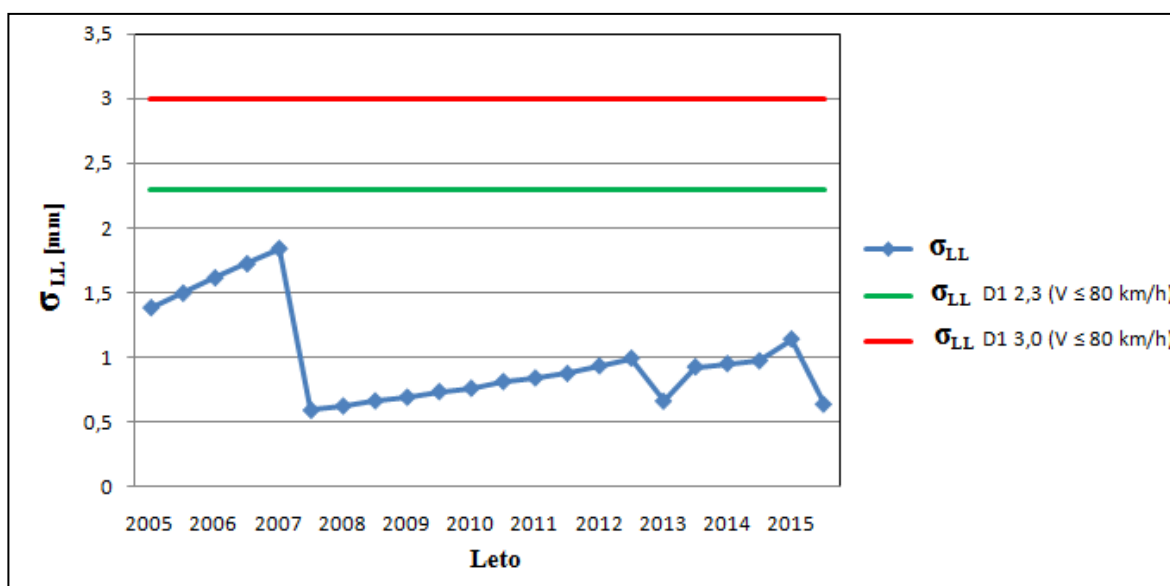
$$Q = Q_0 e^{y_A} = 76 e^{(0,009 * 60 - 0,033)} = 126.$$

Iz izračuna sledi, da se je degradacija tira na odseku proge Gornje Ležeče–Divača, merjena s  $KT$  500, zaradi posameznih napak po prevoženih 60 milijonih bruto tonah povečala s 76 točk na 126 točk. Dobljeni izračuni zelo dobro ponazarjajo resnično stanje degradacije, predstavljeno na prikazu Slika 43. Stanje degradacije je bilo pridobljeno z meritvami merilnega vlaka. Čeprav se v obdobju od 2007 do 2012 niso izvajala nikakršna vzdrževalna dela, stanje proge kljub poslabšanju še vedno ni preseglo mejnih vrednosti ukrepanja po  $KT$  500.

## 7.2 Izračun degradacije tira s standardno deviacijo napak

Na odseku proge Gornje Ležeče–Divača od km 658 + 000 do km 658 + 200 smo izvedli tudi analizo degradacije tira na osnovi standardne deviacije višinskih in smernih napak na 200-metrskih odsekih po delno prilagojenem švedskem modelu. Švedski model za izračun  $Q$ -vrednosti, ki je kazalec kakovosti tira v odvisnosti od standardne deviacije vertikalnih  $\sigma_{LL}$  in horizontalnih odstopanj  $\sigma_S$  od srednjih vrednosti geometrijskih parametrov tira, uporablja standardno deviacijo z merilnim vlakom izmerjenih napak na 200-metrskih odsekih tira. Ugotavljanje  $Q$ -vrednosti ni namenjeno napovedovanju

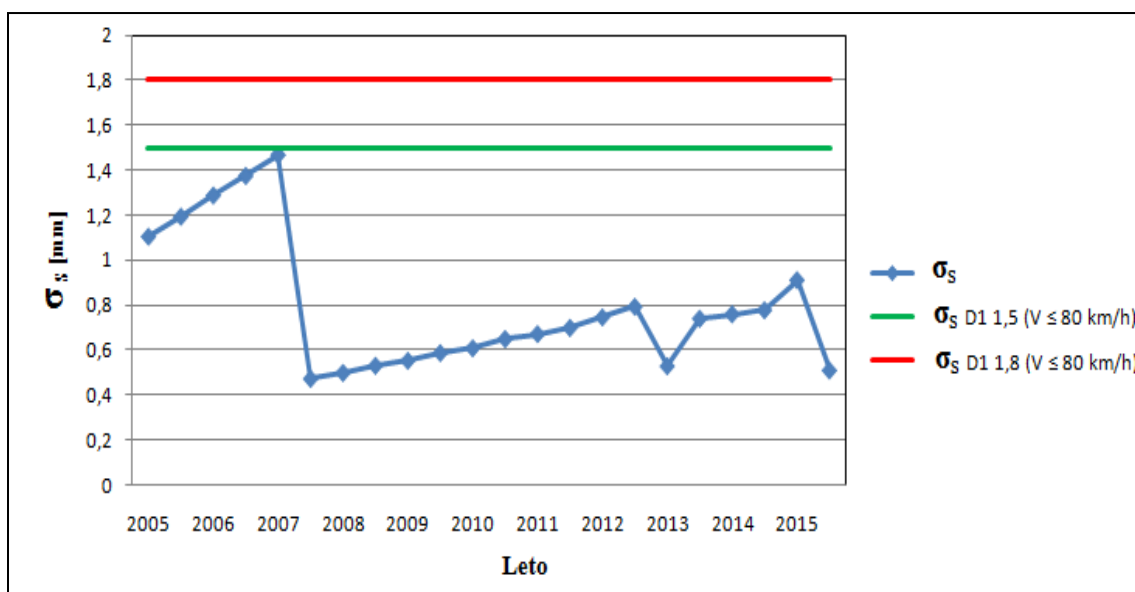
degradacije tira, kot to omogoča na primer avstrijski model, namenjeno je namreč le ugotavljanju potrebe po regulaciji tira glede na izmerjene podatke. Merjenje standardne deviacije geometrijskih napak je bilo na slovenskem železniškem omrežju v letu 2015 prvič izvedeno, dosedanje meritve tira pa so omogočale le ugotavljanje posameznih napak tira v obliki *KT 500*. Da bi ugotovili standardno deviacijo tudi za pretekla leta (2005–2014), smo standardno deviacijo izračunali na osnovi razmerja med standardno deviacijo višinskih in smernih napak ter deležem kakovosti tira *KT 500* v letu 2015, pri čemer smo pri *KT 500* upoštevali le višinske in smerne napake. Rezultati izračuna standardnih deviacij  $\sigma_{LL}$  in  $\sigma_S$  z mejnimi vrednostmi (Preglednica 13, Preglednica 14) so razvidni s prikazov Slika 46 in Slika 47.



Slika 46: Standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak  $\sigma_{LL}$   
Figure 46: Standard deviation of longitudinal levels defects  $\sigma_{LL}$

Slika 46 prikazuje, da je pred obnovo tira leta 2007 standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak znašala 1,84 mm, po obnovi tira pa 0,60 mm. Standardna deviacija  $\sigma_{LL}$  je 2007–2015 počasi naraščala do vrednosti 1,14 mm. Jeseni 2012 in jeseni 2015 so bila opravljena vzdrževalna dela, kar je izboljšalo standardno deviacijo na vrednost 0,64 mm.

Podobno kaže tudi standardna deviacija smernih napak na prikazu Slika 47.

Slika 47: Standardna deviacija smernih napak  $\sigma_s$ Figure 47: Standard deviation of alignment defects  $\sigma_s$ 

Slika 47 prikazuje, da je pred obnovo tira leta 2007 izračunana standardna deviacija  $\sigma_s$  smernih napak znašala 1,48 mm, po obnovi tira pa 0,47 mm. Standardna deviacija je 2007–2015 počasi naraščala do vrednosti 0,91 mm. Jeseni 2012 in jeseni 2015 so bila opravljena vzdrževalna dela, kar je izboljšalo standardno deviacijo na vrednost 0,51 mm.

Izračunane standardne deviacije  $\sigma_{LL}$  in  $\sigma_s$  smo primerjali z mejnimi vrednostmi glede na način ukrepanja AL, kot ga določa standard EN 13848. Iz rezultatov izračuna sledi, da so vrednosti obeh standardnih deviacij pod mejnimi vrednostmi ukrepanja AL, tako da strojna regulacija tira tudi po prevoženih 60 milijonih bruto tonah še ni potrebna.

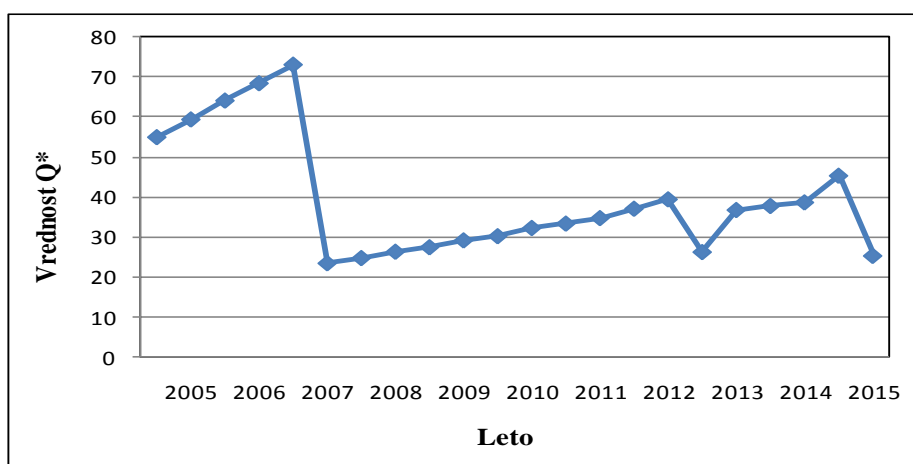
Za primerjavo smo uporabili še izračun  $Q$ -vrednosti po švedskem modelu, ki smo ga prilagodili tako, da smo upoštevali le drugi člen, ki pomeni degradacijo tira, in sicer:

$$Q = 150 - 100 \frac{\left[ \frac{\sigma_H}{\sigma_{Hlim}} + 2 \frac{\sigma_S}{\sigma_{Slim}} \right]}{3},$$

$$Q^* = 100 \frac{\left[ \frac{\sigma_H}{\sigma_{Hlim}} + 2 \frac{\sigma_S}{\sigma_{Slim}} \right]}{3}.$$

Na prikazu Slika 48 je predstavljena degradacija po  $Q^*$ .



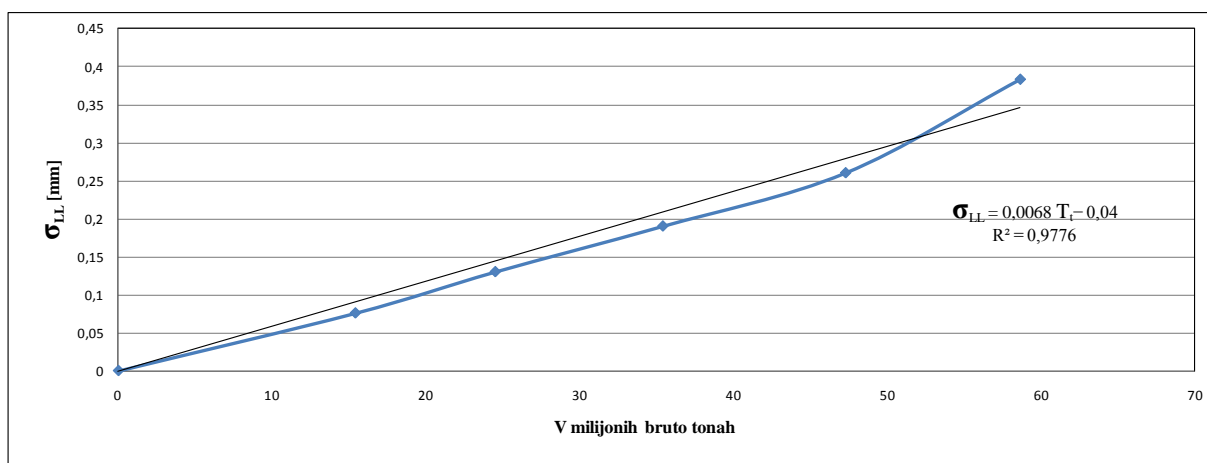


Slika 48: Degradacija tira vrednosti  $Q^*$   
Figure 48: Degradation of the track  $Q^*$  values

Slika 48 kaže, da je bila pred obnovo tira leta 2007 degradacijska vrednost  $Q^*$  73,6 mm, po obnovi pa 23,7 mm. Degradacija  $Q^*$  je v obdobju 2007–2015 počasi naraščala do vrednosti 48,2 mm. Jeseni 2012 in jeseni 2015 sta bili opravljene strojni regulaciji, kar je izboljšalo vrednost  $Q^*$  na 25,4 mm.

Iz rezultatov sledi, da se izračunana degradacija po švedskem modelu, ki temelji na standardni deviaciji geometrijskih napak, na 200-metrskih progovnih odsekih zelo dobro ujema z izmerjenimi podatki meritev z merilnim vlakom. Pri tem je treba opozoriti, da je bila standardna deviacija resnično izmerjena le v letu 2015, za ostala leta pa izračunana iz  $KT 500$ , kar dopušča določena odstopanja, ki pa ne morejo bistveno vplivati na ključne ugotovitve.

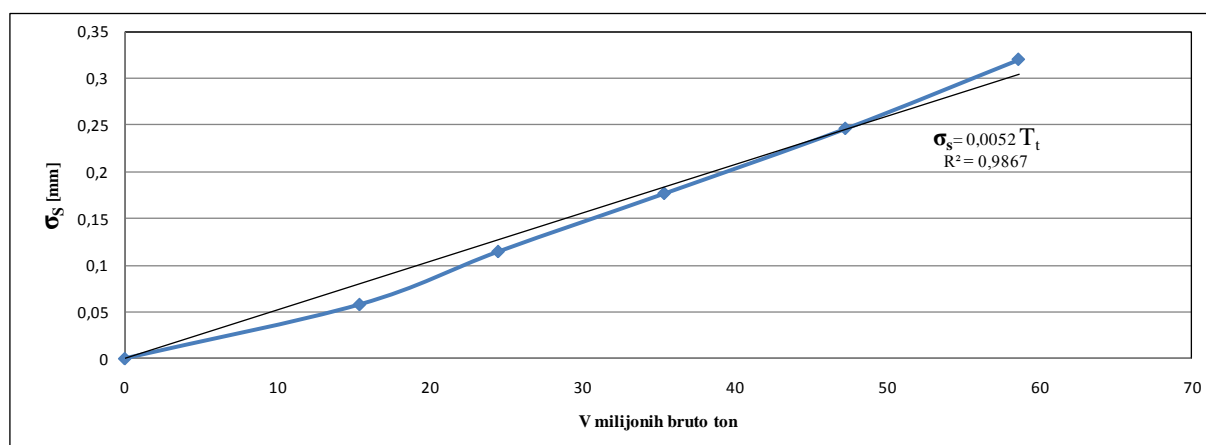
Na prikazu Slika 49 je predstavljena še degradacija tira na osnovi standardne deviacije vzdolžnih višinskih napak 2007–2012 v odvisnosti od prometne obremenitve.



Slika 49: Standardna deviacija  $\sigma_{LL}$  vzdolžnih višinskih napak 2007–2012  
Figure 49: Standard deviation  $\sigma_{LL}$  of longitudinal level defects from 2007 until 2012

Slika 49 prikazuje degradacijo standardne deviacije glede na kumulativno prometno obremenitev v milijonih bruto tonah na izbranem 200-metrskem odseku železniške proge Gornje Ležeče–Divača od km 658 + 000 do km 658 + 200. Po obnovljenem tiru leta 2007 in prevoženih 60 milijonih bruto tonah so se vzdolžne višinske napake povečale za 0,4 mm.

Na prikazu Slika 50 je predstavljena še degradacija tira na osnovi standardne deviacije smernih napak 2007–2012 v odvisnosti od prometne obremenitve.



Slika 50: Standardna deviacija  $\sigma_s$  smernih napak 2007–2012

Figure 50: Standard deviation  $\sigma_s$  of alignment defects from 2007 until 2012

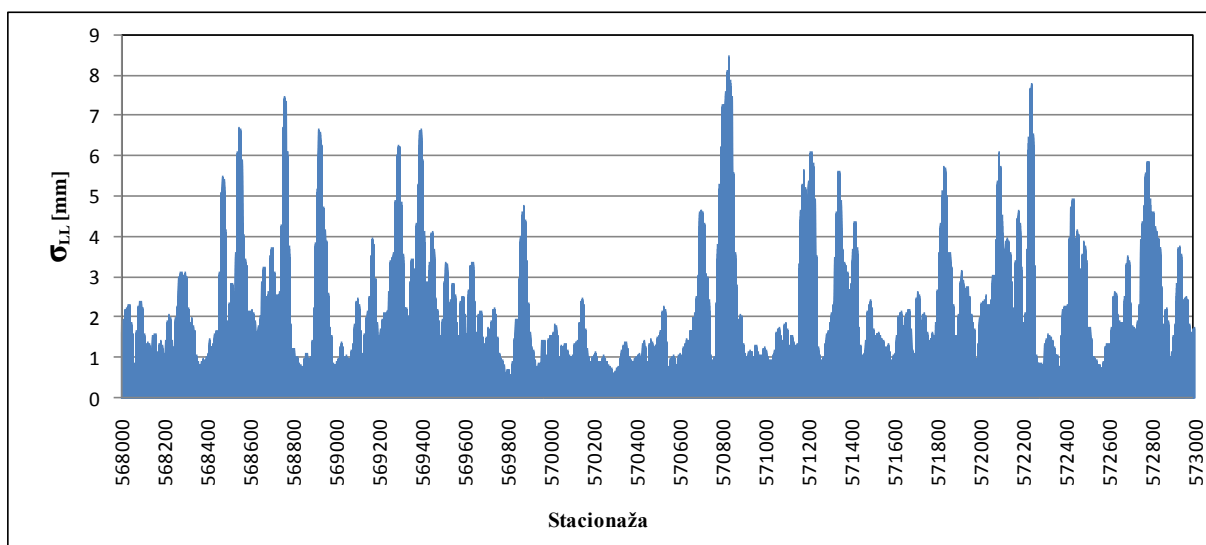
Slika 50 prikazuje degradacijo standardne deviacije glede na kumulativno prometno obremenitev v milijonih bruto tonah na izbranem 200-metrskem odseku železniške proge Gornje Ležeče–Divača od km 658 + 000 do km 658 + 200. Po obnovljenem tiru leta 2007 in prevoženih 60 milijonih bruto tonah so se vzdolžne višinske napake povečale za 0,32 mm.

### 7.3 Degradacija tira na odseku proge Ljubljana–Brezovica

Podrobnejšo analizo degradacije tira na osnovi izmerjene standardne deviacije vzdolžnih višinskih napak  $\sigma_{LL}$  na 0,25 m in  $\sigma_{LL}$  na 200 m ter izmerjene kakovosti tira s  $KT$  500 za leto 2015 smo izvedli tudi na odseku proge levega tira Ljubljana–Brezovica od km 568 + 000 do km 573 + 000.

Ta progovni odsek je razmeroma star, saj je bil obnovljen leta 1979 z lesenimi pragovi in tirnicami 60 E1. Degradacijo tira smo po zadnji strojni regulaciji leta 2012 spremljali do leta 2015. Največja dovoljena progovna hitrost na tem odseku proge je 100 km/h.

Na prikazu Slika 51 je predstavljena standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak na 0,25 m na odseku Ljubljana–Brezovica.

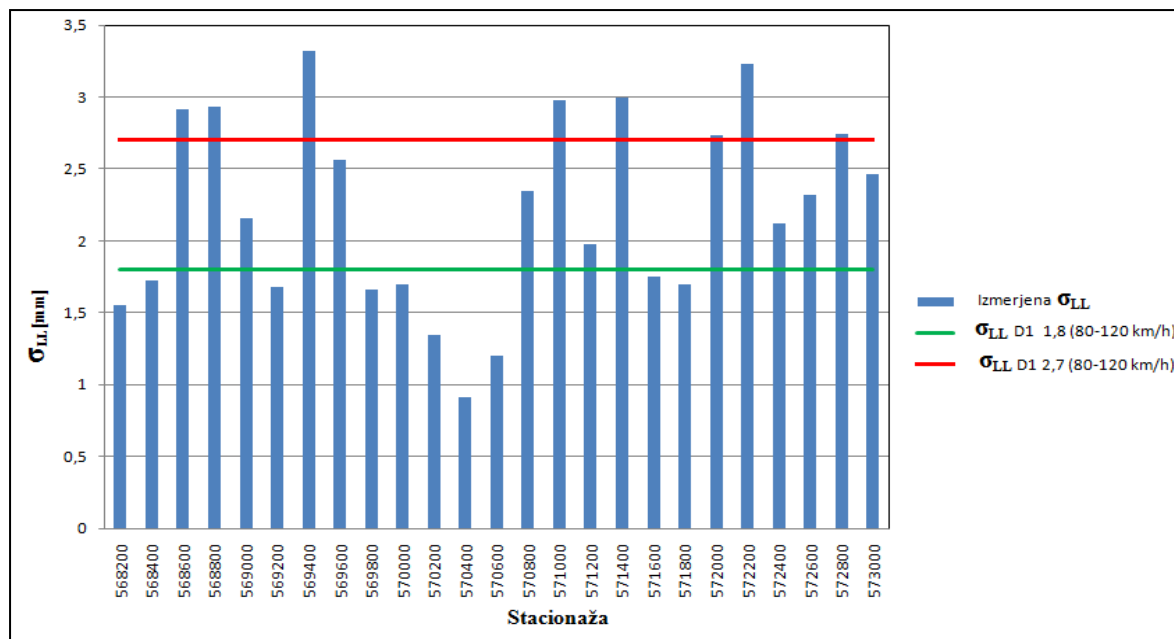


Slika 51: Standardna deviacija  $\sigma_{LL}$ , prikazana na 0,25 m, na odseku proge Ljubljana–Brezovica

Figure 51: Standard deviation  $\sigma_{LL}$ , shown in 0.25 m, on the railway line Ljubljana - Brezovica

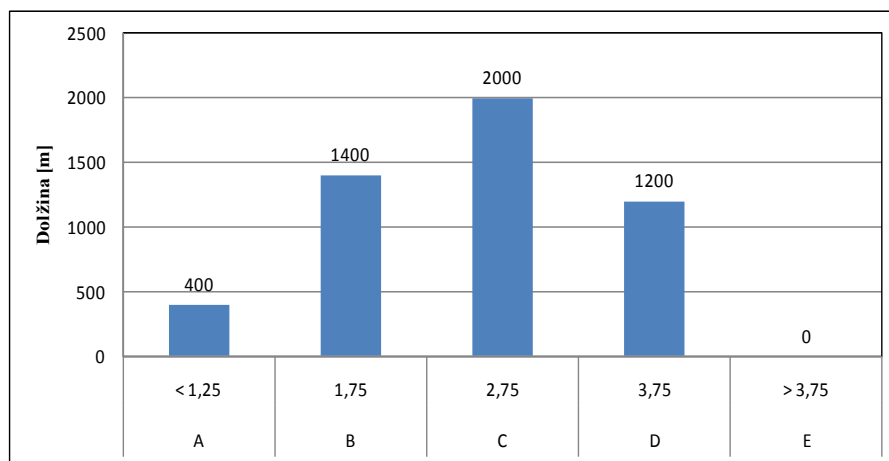
Prikazana standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak, merjena na 0,25-metrskih odsekih, prikazuje vsa slaba krajevna mesta, ki so trenutno na progi (slaba stabilnost zaradi zablatenja tirne grede, slabo ali neurejeno odvodnjavanje proge, slaba nosilnost planuma proge). Na osnovi takega grafičnega prikaza krajevnih napak upravljavec proge na terenu precej lažje opravi pregled stanja proge, kakor če bi bila kakovost tira prikazana na daljših odsekih, na primer 200-metrskih odsekih (Slika 52).

Primerjava izmerjene  $\sigma_{LL} - D1$  na 200-metrskih odsekih proge z mejnimi vrednostmi (Preglednica 13) na odseku železniške proge Ljubljana–Brezovica je predstavljena na prikazu Slika 52.

Slika 52: Primerjava izmerjene  $\sigma_{LL}$  – D1 z mejnimi vrednostimiFigure 52: Comparison of measured  $\sigma_{LL}$  – D1 with limit values

S prikaza Slika 52 je razvidno, da je pri šestih 200-metrskih odsekih prišlo do prekoračitve mejnih vrednosti ukrepanja po AL. Vrednosti standardnih deviacij vzdolžnih višinskih napak pri hitrosti 80–120 km/h so v presledku 1,8–2,7 mm in zahtevajo ukrepanje po AL. To pomeni, da je treba napake odpraviti do naslednje meritve.

V nadaljevanju bomo prikazali mejne vrednosti standardne deviacije glede na kakovostni razred po pr EN 13848-6:2012.19 v metrih z izmerjenimi standardnimi deviacijami vzdolžnih višinskih napak na obravnavanem 5-kilometrskem odseku Ljubljana–Brezovica (Slika 53 in Slika 56). Upoštevali smo mejne vrednosti standardne deviacije višinskih napak glede na kakovostni razred A–E (Preglednica 16) za hitrostni razred 80–120 km/h.

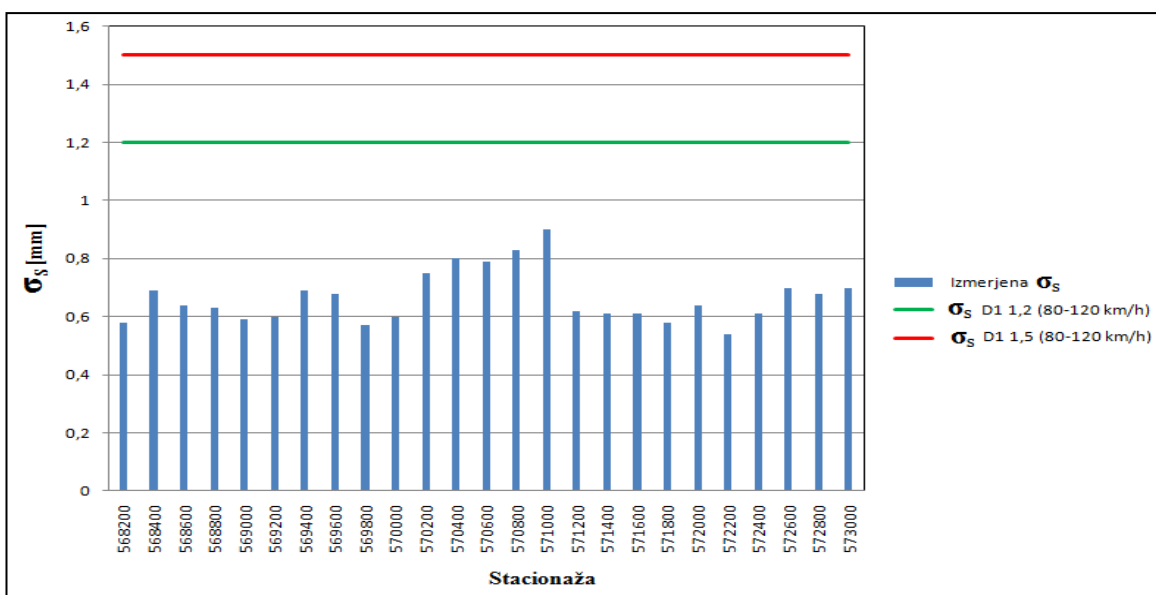


Slika 53: Standardna deviacija vzdolžnih višinskih napak glede na kakovostni razred (A–E) v metrih

Figure 53: Standard deviation of longitudinal level defect with respect to quality classes (A–E) in meters

Slika 53 prikazuje, da je za obravnavani 5-kilometrski odsek Ljubljana–Brezovica za kakovostni razred A uvrščenih 400 m (8 %) proge, za razred B 1.400 m (28 %), za razred C 2.000 m (40 %), za razred D 1.200 m (24 %) in za razred E 0 m (0 %).

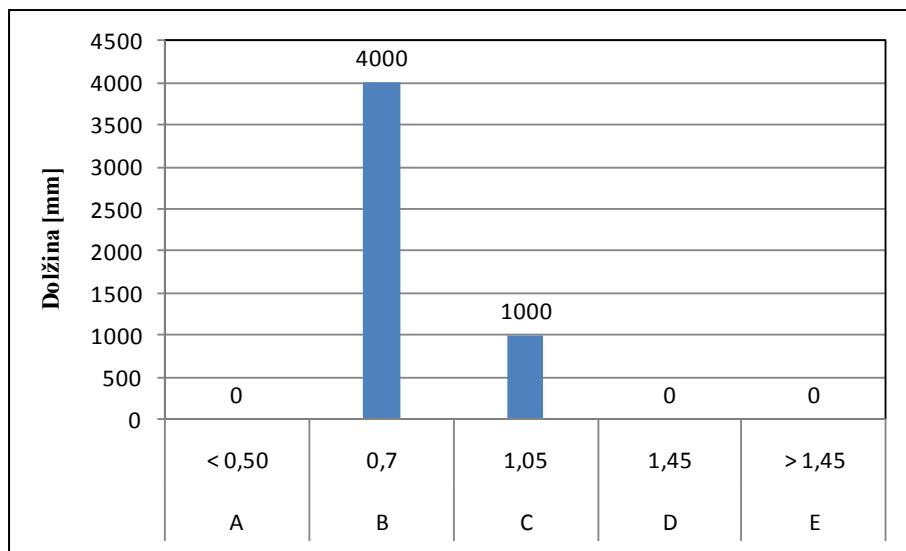
Primerjava izmerjene  $\sigma_S - D1$  na 200-metrskih odsekih proge z mejnimi vrednostmi (Preglednica 14) na odseku železniške proge Ljubljana–Brezovica je predstavljena na prikazu Slika 54.



Slika 54: Primerjava izmerjene  $\sigma_S - D1$  z mejnimi vrednostmi

Figure 54: Comparison of measured  $\sigma_S - D1$  with limit values

Slika 54 prikazuje, da nikjer na 200-metrskih odsekih ni prišlo do prekoračitve mejnih vrednosti ukrepanja po AL. Upoštevali smo mejne vrednosti standardne deviacije višinskih napak glede na kakovostni razred A–E (Preglednica 16) za hitrostni razred 80–120 km/h.

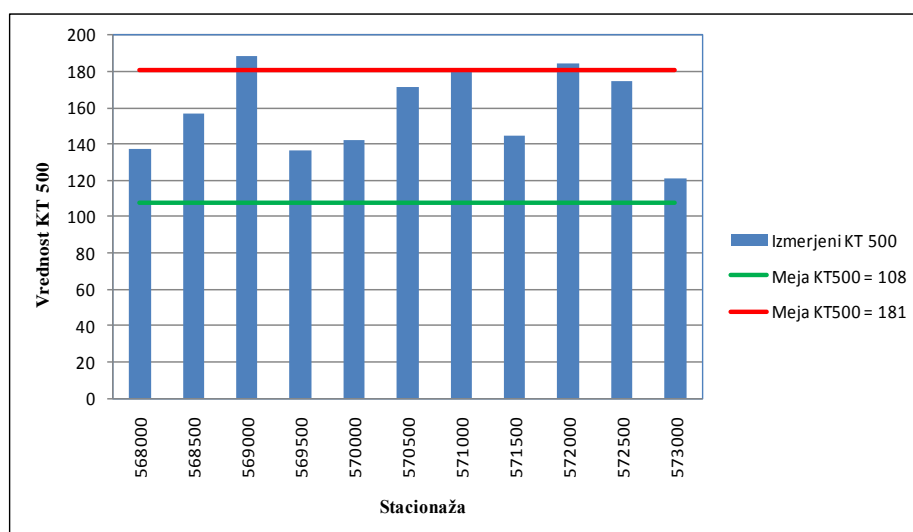


Slika 55: Standardna deviacija smernih napak glede na kakovostni razred (A–E) v metrih

Figure 55: Standard deviation of longitudinal level defects with respect to quality classes (A–E) in meters

Slika 55 prikazuje, da je za obravnavani 5-kilometrski odsek Ljubljana–Brezovica za kakovostni razred A uvrščenih 0 m (0 %) proge, za razred B 4.000 m (80 %), za razred C 1.000 m (20 %), za razred D 0 m (0 %) in za razred E 0 m (0 %).

Za primerjavo smo z zadnjimi jesenskimi meritvami leta 2015 opravili tudi analizo kakovosti tira z mejnimi vrednostmi *KT* 500 (Preglednica 18) na odseku proge Ljubljana–Brezovica, kar je predstavljeno na prikazu Slika 56.



Slika 56: Izmerjeni *KT 500* na odseku proge Ljubljana–Brezovica

Figure 56: *KT 500* measured on the Ljubljana–Brezovica section of line

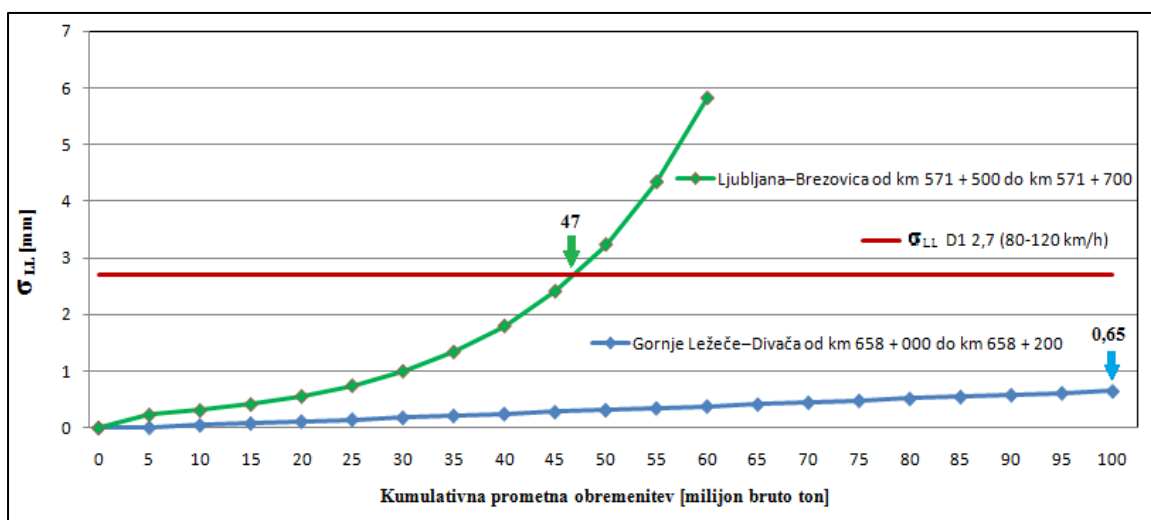
Slika 56 prikazuje izmerjene vrednosti *KT 500* na obravnavanem odseku Ljubljana–Brezovica od km 568 + 000 do km 573 + 000. Meja *KT 500* = 108 pomeni, da je tir v dobrem stanju. V primeru, da so vrednosti večje od 181, pa pomeni, da so potrebni vzdrževalni ukrepi (strojna regulacija, obnova ali nadgradnja proge).

Primerjava izmerjene  $\sigma_{LL} - D1$  z mejnimi vrednostnimi po EN 13848-5:2008+A1:2010 za obravnavani odsek L50 Ljubljana–Brezovica od km 568 + 000 do km 573 + 000 je pokazala, da je obstoječa železniška proga primerna za vožnjo pri 100 km/h, čeprav se na posameznih mestih pojavijo krajevne napake, ki na obravnavanem odseku proge dosegajo vrednosti  $\sigma_{LL}$  nad 3,0.

#### 7.4 Primerjava degradacije tira s standardno deviacijo vzdolžnih višinskih napak med odsekoma Gornje Ležeče–Divača in Ljubljana–Brezovica

V tem poglavju je podana primerjava degradacije tira, določene s standardno deviacijo vzdolžnih višinskih napak za odsek Gornje Ležeče–Divača in odsek Ljubljana–Brezovica (Slika 57).

Izhodišči za oba odseka sta pravilni geometrijski legi. Pravilna geometrijska lega je bila na odseku Gornje Ležeče–Divača dosežena z obnovo, na odseku Ljubljana–Brezovica pa s strojno regulacijo obstoječega tira.



Slika 57: Primerjava degradacije tira med obnovljenim in starim tirom v obratovanju

Figure 57: Comparison of track degradation between renewed and old track during operation

Slika 57 prikazuje degradacijo tira s standardno deviacijo zaradi vzdolžnih višinskih napak med izbranimi odsekoma Gornje Ležeče–Divača in Ljubljana–Brezovica. Na odseku proge Ljubljana–Brezovica smo natančno analizirali 200-metrski odsek od km 571 + 500 do km 571 + 700; na odseku proge Gornje Ležeče–Divača pa smo natančno analizirali 200-metrski odsek od km 658 + 000 do km 658 + 200. Kumulativna prometna obremenitev na odseku Ljubljana–Brezovica 1979–2015 je znašala 400 milijonov bruto ton, zato je bilo treba zadnjih pet let redno izvajati vzdrževalna dela (strojne in ročne regulacije tira) dvakrat na leto (spomladi in jeseni) zaradi zagotavljanja varnega železniškega prometa. Po prevoženih 30 milijonih bruto tonah je kakovost tira s standardno deviacijo vzdolžnih višinskih napak na starem tiru petkrat večja kot pri obnovljenem tiru. Vzdolžne višinske napake novega tira naraščajo linearno, pri starem tiru pa napake naraščajo eksponentno. Na odseku Gornje Ležeče–Divača po prevoženih 100 milijonih bruto tonah kakovost tira s standardno deviacijo vzdolžnih višinskih napak znaša 0,65 mm, kar je primerljivo po raziskavah Esveld (2001) in Lichtberger (2011), prikazano pa v Preglednica 19. Na odseku Ljubljana–Brezovica bi po prevoženih 47 milijonih bruto tonah kakovost tira s standardno deviacijo vzdolžnih višinskih napak padla do vrednosti 2,7 mm, kar predstavlja ukrepanje po AL.

Preglednica 19: Primerjava kakovosti tira z  $\sigma_{LL}$



Table 18: Comparison of track quality using  $\sigma_{LL}$

Avtor	Kakovost tira z $\sigma_{LL}$
Esveld (2001)	0,7–1,4 mm/100 MGT
Lichtberger (2011)	0,6 mm/100 MGT 2,4 mm/100 MGT
Srebot (2016)	Gornje Ležeče–Divača od km 658 + 000 do km 658 + 200: 0,65 mm/100 MGT – dober tir

Rezultati analize potrjujejo hipotezo glede povečanja vzdolžnih višinskih napak v odvisnosti od prometne obremenitve, ki jo navajata tudi Esveld (2001) in Lichtberger (2011).

### 7.5 Ugotovitve raziskovalnega dela

V magistrskem delu smo s praktičnim primerom preverili uporabnost avstrijskega in švedskega modela. Preglednica 20 prikazuje parametre, ki so bili uporabljeni pri izbranem degradacijskem modelu.

Preglednica 20: Primerjava med avstrijskim in švedskim modelom

Table 19: Comparison between the Austrian and Swedish model

Uporabljeni parameter	Degradacijski model	
	avstrijski	švedski
$KT\ 500$	✓	
$T_t$	✓	
$\sigma_{LL}$		✓
$\sigma_S$		✓

V 4. poglavju Degradacijski modeli so bili predstavljeni različni tuji modeli. Izračun degradacije tira smo uporabili na odseku proge Gornje Ležeče–Divača, obnovljenem leta 2007, in na odseku Ljubljana–Brezovica, obnovljenem leta 1979. Izbira temelji na avstrijskem degradacijskem modelu, v poglavju 4.1 smo predstavili teoretična izhodišča. Za izbrani švedski model so v poglavju 4.8 podana teoretična izhodišča. Izbira degradacijskega modela je temeljila na uporabnosti razpoložljivih podatkov o prometnih obremenitvah po progovnih odsekih ter na podatkih merjenja posameznih napak z merilnim vlakom v posameznih letih. Avstrijski degradacijski model napoveduje degradacijo tira v odvisnosti od prometne obremenitve ali časa obratovanja. Za izhodišče smo upoštevali parameter  $KT\ 500$ , ki je precej odvisen od resničnega stanja tira, doseženega z vzdrževanjem oziroma obnovo ali nadgradnjo, in prometno obremenitev  $T_t$ . Švedski model smo uporabili za analizo degradacije tira na osnovi standardne deviacije vertikalnih  $\sigma_{LL}$  in horizontalnih  $\sigma_S$  odstopanj od srednjih vrednosti geometrijskih parametrov tira na 200-metrskih progovnih odsekih. Meritve standardne deviacije na

200-metrskih progovnih odsekih so bile na slovenskih železnicah prvič izvedene v letu 2015, zaradi tega je bil potreben izračun standardne deviacije za predhodna leta (2005–2014) na osnovi razmerja med standardno deviacijo višinskih in smernih napak ter deleža kakovosti tira *KT* 500 v letu 2015, pri čemer se je pri *KT* 500 upoštevalo le višinske in smerne napake.

Pri švedskem modelu za hitrostni razred 75–100 km/h znaša vrednost  $Q = 75$ . Če  $Q$ -vrednost pade pod 75, je treba izvesti strojno regulacijo tira. Analiza je pokazala, da pri obeh obravnavanih progah še niso potrebna vzdrževalna dela oziroma hitrostne omejitve, saj je bila vrednost za odsek Gornje Ležeče–Divača  $Q = 126$ , vrednost za odsek Ljubljana–Brezovica pa  $Q = 99$ . Obravnavani odsek za progo Ljubljana–Brezovica po švedskem modelu je še primeren za hitrost 100 km/h. Opravljena analiza na starem odseku proge Ljubljana–Brezovica je pokazala, da degradacija tira poteka precej hitreje kot na odseku Gornje Ležeče–Divača in da so zaradi tega potrebna velika vzdrževalna dela pri zagotavljanju ustrezne kakovosti tira pri vožnji vlakov.

## 8 ZAKLJUČEK

Naloga železniške gradbene vzdrževalne službe je redno vzdrževanje zgornjega in spodnjega ustroja, preden tir degradira v tolikšni meri, da so potrebne omejitve hitrosti (počasne vožnje) oziroma zapore železniških prog. Zadnjih nekaj desetletij je bilo opravljenih veliko preizkusov in poskusov razvijanja ustreznih metod za ocenjevanje stanja tira. Napoved degradacije lahko s predlaganimi modeli koristno uporabimo pri prihodnjih vzdrževalnih delih tudi na slovenskem železniškem omrežju. V strokovni literaturi lahko sicer najdemo več modelov o geometrijski degradaciji tirov, problem pa se pojavi pri izboru najustrežnejšega modela glede na posebne razmere območja, za katerega odgovarja posamezni upravljavec. Vsaka država drugače izvaja meritve oziroma ima različne tehnične predpise glede vzdrževanja. Degradacijski modeli so izdelani za ugotavljanje posedanja tirne grede, obrabe tirnic in geometrijskih napak tira ter so namenjeni predvsem pravočasnemu načrtovanju vzdrževalnih del.

Glavni razlog za degradacijo tira v dobi delovanja je prometna obremenitev. Brez ustreznega vzdrževanja se stanje tira lahko poslabša do take stopnje, da je potrebno znižanje progovne hitrosti ali celo zavora tira. Vzdrževalna dela je treba načrtovati pravočasno in na način, ki bo zagotavljal, da se bodo parametri železniškega tira ohranjali znotraj dopustnih meja na varen ter stroškovno učinkovit način. Upravljavec infrastrukture mora železniški tir redno spremljati vidno in z meritvami (ročno, mehansko ali lasersko). Pri zaznavanju napake se izvedejo ustrezna vzdrževalna in obnovitvena dela. Geometrijski parameter določenega segmenta se šteje za degradiranega, kadar vzdrževalna in obnovitvena dela niso več učinkovita. Pri tem procesu se upoštevajo mejne vrednosti za vzdrževalna in obnovitvena dela. Proces degradacije geometrije pa je zelo odvisen tudi od preteklega vzdrževanja.

Način merjenja geometrijskih parametrov proge in mejne vrednosti ukrepanja zelo podrobno določa standard EN 13848 1–6. Cilj standarda je določiti edinstven pristop za oceno geometrijske kakovosti tira v državah članicah. V prvem delu sta določena terminologija in okvir za specifikacijo geometrijskih parametrov tira, kot so tirna širina, vzdolžne višinske napake, smer tira, stabilnost, nadvišanje tira in vegavost tira. Peti del standarda EN 13848 določa minimalne zahteve za kakovost geometrije tira in podaja varnostne mejne vrednosti za vsak parameter. Standard določa tri stopnje kakovosti za doseganje varnosti med obratovanjem in zagotavljanjem večnamenskega ter nemotenega železniškega prometa.

V magistrskem delu so predstavljeni različni teoretični modeli degradacije tira zaradi geometrijskih napak. Glede na to, da upravljavec železniške infrastrukture v Republiki Sloveniji razpolaga s podatki o prometnih obremenitvah po progovnih odsekih ter s podatki o merjenju posameznih napak z merilnim vlakom v posameznih letih, sta bila kot najprimernejša za uporabo v slovenskem okolju avstrijski in švedski model degradacije tira.

Avstrijski degradacijski model napoveduje degradacijo tira v odvisnosti od prometne obremenitve ali časa obratovanja. Za izhodišče se upošteva začetna kakovost tira  $Q_0$ , ki je odvisna od resničnega stanja tira, doseženega z vzdrževanjem oziroma obnovo ali nadgradnjo. Analiza degradacije tira zaradi posameznih napak na odseku železniške proge Gornje Ležeče–Divača, izračunana po avstrijskem modelu in primerjana z rezultati meritev, kaže, da dobljeni rezultat, izračunan po modelu, zelo dobro ponazarja resnično stanje degradacije.

Švedski model obravnava kakovost tira v odvisnosti od standardne deviacije vertikalnih  $\sigma_{LL}$  in horizontalnih  $\sigma_S$  odstopanj od srednjih vrednosti geometrijskih parametrov tira na 200-metrskih progovnih odsekih. Ker so bile meritve standardne deviacije na 200-metrskih progovnih odsekih v Sloveniji prvič izvedene v letu 2015, je bil potreben izračun standardne deviacije za predhodna leta (2005–2014) na osnovi razmerja med standardno deviacijo višinskih in smernih napak ter deleža kakovosti tira *KT 500* v letu 2015, pri čemer se je pri *KT 500* upoštevalo le višinske in smerne napake. Iz rezultatov izračuna sledi, da se izračunana degradacija po švedskem modelu, ki temelji na standardni deviaciji geometrijskih napak, zelo dobro ujema z izmerjenimi podatki meritev z merilnim vlakom na obravnavanem odseku proge Gornje Ležeče–Divača.

S primerjavo med rezultati po avstrijskem in švedskem modelu ter resničnimi meritvami geometrijskih napak v tiru lahko potrdimo hipotezo, da so pravilno izbrani degradacijski modeli primerno sredstvo za napovedovanje propadanja tira med zaporednima vzdrževanjema.

Pri oceni stanja tira so zelo pomembne učinkovite, zanesljive in ustrezne meritve geometrijskih parametrov z merilnim vlakom. Na osnovi pridobljenih podatkov pa je zelo pomembna tudi zanesljiva analiza pri načrtovanju vzdrževalnih del.

V prihodnosti bodo potrebni vedno boljši in prilagodljivejši modeli, da bomo lahko z učinkovitimi in dostopnimi podatki ustrezno ter zanesljivo napovedovali geometrijsko degradacijo tira. Eden izmed takih degradacijskih modelov so tudi nevronske mreže.

Uporaba degradacijskih modelov bo železnicam omogočala izvedbo dolgoročnih posnemanj (simulacij) obnašanja tira, uravnoveženja učinkovitosti vzdrževanja z obnovo in dobljeno kakovostjo s stroški vzdrževalnih ter obnovitvenih del in s pregledi. Model mora omogočati popoln in stalen nadzor nad varnostjo, zanesljivostjo in udobjem prometa ter kakovostjo infrastrukturnih sredstev.

## 9 POVZETEK

Pri dinamičnih obremenitvah se geometrijski parametri tira postopoma slabšajo oziroma degradirajo. Najpogostejši vzroki za degradacijo tira so neenakomerno posedanje tira zaradi nehomogenosti podlage, neustreznega vzdrževanja, slabega stanja zgornjega in spodnjega ustroja ipd. Prikazane in opisane so degradacijske krivulje po različnih fazah. Prva faza je po opravljeni strojni regulaciji, začetek druge faze je po stabilizaciji tira. Za zadnjo oziroma tretjo fazo je značilna pospešena degradacija, ki narašča eksponentno. Pri napovedovanju degradacije tira je treba vedeti, kdaj bodo mejne vrednosti geometrijskih parametrov tira prekoračene, da se pravočasno odločimo za učinkovito načrtovanje vzdrževalnih in obnovitvenih del ali za druge ukrepe, ki zagotavljajo varnost železniškega prometa. V magistrskem delu so opisani modeli degradacije tira zaradi geometrijskih napak, izbira modela, ki je primeren za uporabo v Sloveniji in za uporabo na praktičnem primeru izbranega progovnega odseka. V magistrskem delu je podrobno opisan pojem degradacija tira. Obravnavani so različni teoretični modeli za izračun in napoved degradacijskega procesa. Prikazani so načini merjenja geometrijskih parametrov proge in mejne vrednosti ukrepanja z veljavnim standardom EN 13848 1–6. Glede na razpoložljive podatke o prometnih obremenitvah po posameznih progovnih odsekih in podatke o merjenju tira z merilnim vlakom, sta se kot najprimernejša za uporabo na območju Slovenije pokazala avstrijski in švedski model degradacije tira. Avstrijski degradacijski model je primeren predvsem za napovedovanje degradacije tira zaradi posameznih geometrijskih napak v odvisnosti od začetnega stanja kakovosti tira in prometne obremenitve. Švedski degradacijski model pa obravnava geometrijsko degradacijo tira v odvisnosti od standardne deviacije vzdolžnih višinskih napak in standardne deviacije smernih napak leve ter desne tirnice. Ugotavljanje standardne deviacije napak je namreč z uveljavitvijo tehničnih specifikacij o interoperabilnosti postal obvezno merilo za oceno geometrijske kakovosti tira tudi v Sloveniji. Uporaba obeh modelov temelji na praktičnem primeru na sorazmerno novem progovnem odseku Gornje Ležeče–Divača in na progovnem odseku Ljubljana–Brezovica, obnovljenem pred 36 leti. Degradacijo tira smo po zadnji strojni regulaciji leta 2012 spremljali do leta 2015. Analiza temelji na zelo dobrem ujemanju resničnih izmerjenih podatkov na terenu z rezultati, izračunanimi s predlaganimi modeli.

## 10 SUMMARY

Under dynamic loading the geometric parameters of railway track gradually deteriorate or degrade. The most common causes of degradation of the track are uneven settling of the track due to inhomogeneity of the base, inadequate maintenance, poor state of the upper and lower structure, etc. Degradation curves are shown and described in different phases. The first phase occurs after machine regulation, and the second phase begins after track stabilization. The third and last phase is characterized by accelerated degradation that grows exponentially. In predicting the degradation of the track we need to know when the limits of the geometric parameters of the track are exceeded in order to decide in due time for effective planning of maintenance and renovation work and for taking other measures to ensure railway safety. This master's thesis describes models of track degradation due to geometry defects and selects a model suitable for use in Slovenia and for use in a practical case of a selected section of railway line. This master's thesis presents in detail the concept of degradation of the track. Different theoretical models for the calculation and prediction of the degradation process are discussed. Methods of measuring geometrical parameters of the track and limit values for taking action in accordance with the standard EN 13848 1 through 6 are shown. Based on the available data on traffic loads by individual rail sections and data on the measurement of the track with a measuring train, the Austrian and Swedish models of degradation of the track were found to be the most suitable for use in the Slovenian context. The Austrian degradation model is particularly well suited for predicting degradation of the track due to various geometric errors depending on the initial state of the track quality and traffic load. The Swedish degradation model addresses the track geometry degradation as a function of the standard deviation of the longitudinal level defects and standard deviation of the right and left alignment defects. Determination of the standard deviation of defects has become a mandatory criterion for assessing the geometric quality of the track in Slovenia as well. The applicability of both models was tested in practice along a relatively new section of track between Gornje Ležee and Divača and along a section of track between Ljubljana and Brezovica that was renovated 36 years ago. Degradation of the railway track was monitored after the last regulation by tamping machine in 2012 until 2015. The research showed a very good correlation between data actually measured and the results calculated using the proposed models.

## 11 VIRI

Andersson, M. 2002. Strategic planning of track maintenance. Report, Department of infrastructure, KTH. Sweden: 59 str.

Andrade, A. R., Teixeira, P. F. 2012. A Bayesian model to assess rail track geometry degradation through its life-cycle. Department of Civil Engineering, Instituto Superior Tecnico (IST), Technical University of Lisbon, Lisboa, Portugal, Research in Transportation Economics 36: 1–8.

Andrade, A. R., Teixeira, P. F. 2013. Hierarchical Bayesian modelling of rail track geometry degradation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 2013 (24 May 2013): str. 227–364.

Andrade, A. R., Teixeira, P. F. 2015. Statistical modelling of railway track geometry degradation using Hierarchical Bayesian models. Portugal, Reliability Engineering and System Safety 142 (May 2015): str. 169–183.

Arasteh, I., Schunnesson, H., Juntti, U., Nissen, A., Larsson-Kraik, P. 2012. Evaluation of track geometry maintenance (tamping) in Swedish heavy haul railroad – A case study. Lulea University of Technology, Sweden: str. 1–8.

Bence, P. 2015. Clearance gauge measuring and post processing practice in Hungary. Diagnostic Engineering, MAV Central Rail and Track Inspection, ppt presentation: str. 1–32.

Berggen, E. 2005. Dynamic track stiffness measurement: a new tool for condition monitoring of track substructure. KTM Engineering Science, Stockholm, Sweden: str. 85.

Berggren, E. G., Li, M. X. D., Spännar, J. (2008). A new approach to the analysis and presentation of vertical track geometry quality and rail roughness. Wear 265, 9–10: 1488–1496.

Bing, A. J., Gross, A. 1983. Development of railway track degradation models. Transportation Research Record: str. 27–31.

Demharter, K. 1982. Setzungsverhalten des Gleisrostes unter vertikaler Lasteinwirkung. Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München: str. 36.

Espling, U. 2007. Maintenance strategy for a railway infrastructure in a regulated environment, PhD thesis, Division of Operation and Maintenance Engineering, Lulea University of Technology: str. 171.

Esveld, C. 2001. Modern railway track, 2nd edn. Delft University of Technology Pub. Netherlands: str. 324.

Grassie, S. 2005. Rolling contact fatigue on the British railway system. United Kingdom. Wear 258: str. 7–8.

Guler, H., Jovanović, S., Evren, G. 2011. Modelling railway track geometry deterioration. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport 164: str. 65–75.

Guler, H. 2013. Prediction of railway track geometry deterioration using artificial neural networks: a case study for Turkish state railways. Department of Civil Engineering, University of Sakarya, Structure and Infrastructure Engineering, 10, 5: 614–626.

Hochleistung Präzision Zuverlässigkeit. 2016. Plasser & Theurer.  
<http://www.plassertheurer.com> (Pridobljeno 26. 2. 2016.)

Hummitsch, R. 2005. Calculation Schemes for MDZ and Modified Standard Deviation. Technical University of Graz: str. 16.

Iwnicki, S., Grassie, W., Kik. 1999. Track settlement prediction using computer simulation tools. Vehicle System Dynamics Supplement: str. 37–46.

Johansson, A., Nielsen, J., Bolmsvik, R., Karlstrom, A. 2008. Under sleeper pads – Influence on dynamic train track interaction. Wear, 265: 1479–1487.

Ferreira, L., Murray, M. 1997. Modelling rail track deterioration and maintenance current practices and future needs. Transport Reviews: str. 207–221.

Fletcher, D., Franklin, F., Kapoor, A. 2009. Rail surface fatigue and wear, Wheel – rail interface handbook, Cambridge, UK: str. 280–310.



Jaiswal, J. 2009. Characterisation of microstructural deformation as a function of rail grade, Report D4.3.6, Innotrack: 30 str.

Jesenko, M. 2002. Statistika in verjetnost. Fakulteta za organizacijske vede. Kranj, Univerza v Mariboru.

[http://www1.fov.unimb.si/jesenko\\_manca/Glavna%20stran/Statistika%20in%20verjetnost%202002\\_03/FORMULE/formule.htm](http://www1.fov.unimb.si/jesenko_manca/Glavna%20stran/Statistika%20in%20verjetnost%202002_03/FORMULE/formule.htm) (Pridobljeno 21. 5. 2015.)

Jovanović, S. 2004. Railway track quality assessment and related decision making. Systems, Man and Cybernetics. IEEE International Conference, 6: 5038–5043.

Jovanović, S., Guler, H., Čoko, B. 2015. Track degradation analysis in the scope of railway infrastructure maintenance management system, Građevinar 3/2015: 247–258.

Judge, T. 2002. To grind, or not to grind? Railway Age, 203, 11: 33 str.

Karttunen, K. 2012. Mechanical track deterioration due to lateral geometry irregularities, Thesis for the degree of licentiate of engineering in solid and structural mechanics. Goteborg, Sweden, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology: 32 str.

Kostiov, L., Černe, B. 2004. Primerjava uporabnosti betonskega in lesenega praga v konstrukciji zgornjega ustroja železniških prog. Portorož, 7. Slovenski kongres o cestah in prometu: 6 str.

Larsson, D. 2004. A study of the track degradation proces related to changes in railway traffic. Lulea, Sweden, Division of operation and maintenance engineering, Lulea University of Technology: 82 str.

Li, M., Berggren, E. G., Berg, M., Persson, I. 2008. Assessing track geometry quality based wavelength spectra and track – vehicle dynamic interaction. Vehicle System Dynamics: str. 261–276.

Li, M. 2012. Assessment of track geometry quality: TSI, EN Standard and BVF/BVS. Sweden, 17th Nordic Seminar on Railway Technology Tammsvik Herrgard: 20 str.

Lichtberger, B. 2001. Track maintenance strategies for ballasted track - a selection. Rail Engineering. International, 2: 13–16.

Lichtberger, B. 2007. Track Compendium: Formation, Permanent way, maintenance, economics. Hamburg, Germany, 1st Edition: 621 str.

Lundqvist, A., Dahlberg, T. 2005. Railway track stiffness variations – consequence and countermeasures. Milan, Italy, Proceeding of the 19th IAVSD symposium on dynamics of vehicles on the roads and on tracks: 7 str.

Lyngby, N. 2009. Railway track degradation: Shape and Influence factors. International Journal of Performability Engineering, 5, 2: 177–186.

Madejski, J., Grabczyk, J. 2002. Continuous geometry measurement for diagnostics of track and switches. Delft, Netherlands, Proceedings of the International Conference on Switches Delft University of Technology: 21 str.

Magel, E. 2011. Rolling contact fatigue: a comprehensive review, Washington DC, USA, Department of Transportation, Federal railroad administration: 132 str.

Mundrey, J. S. 2003. Railway track engineering, New Delhi, India: 642 str.

Olofsson, U., Telliskivi, T. 2003. Wear, plastic deformation and friction of two rail steels – a full scale test and a laboratory study: str. 80–93.

ORR, Office of Rail Regulation, 2008. Best Practice Study A report on the programme of international visits carried out by ORR between July–October 2007. Summary Report, Version 3: str. 41.

Paderno, C. 2009. Simulation of ballast behaviour under traffic and tamping process, 9 th Swiss Transport Research Conference, Monte Verita/Ascona, Switzerland: 22 str.

Pita, A. L., Teixeira, P. F., Robuste, F. 2004. High speed and track deterioration: the role of vertical stiffness of the track., Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineering, 218: 31–40.

Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog (Uradni list RS, št. 92/2010 z dne 19. 11. 2010).

Sadeghi, J., Akbari, B. 2006. Field investigation on effect of railway track geometry parameters on rail wear. International journal of Zhejiang University, Science A: str. 1846–1855.

Sadeghi, J., Asgarinejad, H. 2007. Influences of track structure, geometry and traffic parameters on railway deterioration. *International Journal of engineering*: str. 625–633.

Sadeghi, J., Asgarinejad, H. 2008. Development of Improved Railway Track Degradation Models. *International Journal of Structure and infrastructure Engineering*: 4 str.

Sato, Y. 1995. Japanese studies on deterioration of ballasted track. Japan, *Vehicle system dynamic*: str. 197–208.

Shenton, M. J. 1984. Ballast deformation and track deterioration. *Proceedings of a Conference on Track Technology*. University of Nottingham: str. 253–265.

Srebot, P. 2003. Analiza kriterijev diagnostike tira za načrtovanje del sprotnega vzdrževanja zgornjega ustroja prog. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Prometna smer: 57 str.

Quiroga, L. M., Schnieder, E. 2010. A heuristic approach to railway track maintenance scheduling, 12th International Conference on Computer System Design and Operation in Railways and other Transit Systems, eds. B. Ning and C. A. Brebbia (Beijing, China): str. 687–699.

Talukdar, K., Arulmozhi, U., Prabhakar, K., Satyanarayan, 2006. Project Presentation Improvement of TGI Value by Computer Analysis. India, Ministry of Railways Indian Railways Institute of Civil Engineering: 18 str.

Track Geometry Activities. 2012. WG 28, CEN TC256-SC1 Seminar, Zagreb: 22 str.

Torstensson, P. 2012. Rail corrugation growth on curves, PhD thesis, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology: str. 659–666.

Uredba o tehničnih specifikacijah za interoperabilnost (TSI) v zvezi s podsistemom »infrastruktura« železniškega sistema v Evropski uniji št. 1299/2014 z dne 18. 11. 2014.

Veit, P. 2013. Sustainable Track. Graz University of Technology. Institute for Railway Engineering and Transport Economics: 36 str.

Westhuizen, J. V. D., Grabe, P. J. 2013. The integration of railway asset management information to ensure maintenance effectiveness. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering* 55, 3: 18–29.

Witt, S. 2008. The influence of under sleeper pads on railway track dynamic. Linköping University: 55 str.

Yoshihiko, S. 2001. New railway track dynamics. China, China Railway: 7 str.

Yousefikia, M., Moridpour, S., Setunge, S., Mazloumi, E. 2014. Modeling degradation of tracks for maintenance planning on a tram line. School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, RMIT University, Melbourne, Australia. *Journal of Traffic and Logistics Engineering* 2, 2: 86–91.

Zerbst, U., Lunden, R., Edel, K. O. et al. 2009. Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails – a review. *Engineering fracture mechanics* 76, 17: 2563–2601.

Zhang, J., Murray, H., Ferreira, L. 1999. An Integrated Model for Track Degradation Prediction. UK, Word Transport Research, Selected Proceedings of the 8th Word Conference on Transport Research: str. 527–539.

Zgonc, B. 2012. *Železniška infrastruktura*. Portorož, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet: 222 str.

Zhao, J., Chan, A., Roberts, C. 2006. Optimizing policies of railway ballast tamping and renewal. *Transportation Research Record*: str. 50–56.

Zhang, Y., El – Sibaie, M. 2004. Objective track quality indices. *Transportation Research Record*: str. 81–87.

Zwanenburg, W. J. 2006. Degradation processes of switches and crossing. Railway condition monitoring, The Institution of Engineering and Technology International Conference: str. 115–119.

### **Standardi:**

EN 13848-1:2002+A1:2008. July 2008. Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 1: Characterisation of track geometry. European Committee for standardization, Brussels, CEN: 25 str.

EN 13848-2:2006. May 2006. Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 2: Measuring systems – Track recording vehicles. European Committee for standardization, Brussels, CEN: 34 str.

EN 13848-3:2009. April 2009. Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 3: Measuring systems – Track construction and maintenance machines. European Committee for standardization, Brussels, CEN: 25 str.

EN 13848-4:2011. December 2011. Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 4: Measuring systems – Manual and lightweight devices. European Committee for standardization, Brussels, CEN: 29 str.

EN 13848-5:2008+A1:2010. April 2010. Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 5: Geometric quality levels – Plan line. European Committee for standardization, Brussels, CEN: 22 str.

OJ L 126. (2011). Commission Decision of 26 April 2011 concerning a technical specification for interoperability relating to the "infrastructure" subsystem of the trans – European conventional rail system (notified under document C(2011) 2741) Text with EEA rele. OJ.

Pr EN 13848-6:2012.19. Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 6: Characterisation of geometric quality, CEN/TC 256: 26 str.

UIC (International Union of Railways). 2006. Lasting Infrastructure Cost Benchmarking (LICB). UIC, Paris, France.

UIC 518 Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic Behavior – Safety – Track fatigue – Ride quality, International Union of Railways, 3 rd edition. 2012. <http://wenku.baidu.com/view/d32e764d2b160b4e767fcf77.html###> (Pridobljeno 4. 3. 2016.)

Uredba komisije (EU) št. 1299/2014 z dne 18.11.2014. Tehnične specifikacije za interoperabilnost v zvezi s podsistemom »Infrastruktura« železniškega sistema v Evropski uniji. (Uradni list EU, št. 1299/2014).

**Ostalo:**

Program DrezStac. 2016. Računalniški program za analizo geometrije tira po opravljenih meritvah geometrijskih karakteristik prog na območju Republike Slovenije z merilno drezino MAV EM 120 (FMK 004), Prometni inštitut Ljubljana d.o.o.

Poročilo o meritvah z FMK 004. 2015. Poročilo o opravljenih meritvah geometrijskih karakteristik prog na območju Republike Slovenije z merilno drezino MAV EM 120 (FMK 004), Prometni inštitut Ljubljana d.o.o., maj 2015, interno gradivo Slovenskih železnic: 100 str.

VP Ljubljana–Sežana. 2016. Vzdolžni profil železniške proge Ljubljana–Sežana od km 633 + 500 do km 682 + 499,00. Služba za gradbeno dejavnost – Pisarna Postojna, interno gradivo Slovenskih železnic.