

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:

Habjan, T., 2015. Analiza napak na tirnicah. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Zgonc, B., somentorica Šemrov, D.): 107 str.

Datum arhiviranja: 20-07-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Habjan, T., 2015. Analiza napak na tirnicah. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Zgonc, B, co-supervisor Šemrov, D.): 107 p.

Archiving Date: 20-07-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
PROMETNOTEHNIČNA
SMER**

Kandidat:

TOMAŽ HABJAN

ANALIZA NAPAK NA TIRNICAH

Diplomska naloga št.: 516/PTS

ANALYSIS OF RAIL DEFECTS

Graduation thesis No.: 516/PTS

Mentor:

prof. dr. Bogdan Zgonc

Predsednik komisije:

doc. dr. Tomo Cerovšek

Somentorica:

asist. Darja Šemrov

Ljubljana, 19. 06. 2015

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna.«

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Tomaž Habjan izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Analiza napak na tirnicah«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 15. 6. 2015

Tomaž Habjan

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	625.14(043.2)
Avtor:	Tomaž Habjan
Mentor:	prof. dr. Bogdan Zgonc, univ. dipl. inž. grad.
Somentorica:	asist. Darja Šemrov, univ. dipl. inž. grad.
Naslov:	Analiza napak na tirnicah
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – visokošolski strokovni študij
Obseg in oprema:	107 str., 32 pregl., 39 graf., 84 sl.
Ključne besede:	tirnica, napake na tirnicah, železniško omrežje RS, analiza glavnih prog

Izvleček

V začetnem delu diplomske naloge se seznanimo s tirnico, ki je posebno oblikovan jekleni nosilec, del zgornjega ustroja železniške proge in najpomembnejši element železniških tirov, ki opravlja funkcijo vodenja vozil in direktno prevzema prometne obremenitve transportnih sredstev. Predstavimo železovo zlitino – jeklo, ki je osnovni material za izdelavo tirnic, podrobneje opišemo razvoj tirnic skozi zgodovino in postopek izdelave tirnic, predstavimo sestavne elemente in karakteristike tirnic ter opišemo najznačilnejše vrste tirnih napak in njihovih lastnosti.

V drugem delu diplomske naloge pregledamo obstoječe podatke o evidentiranih napakah na tirnicah na celotnem železniškem omrežju Republike Slovenije in analiziramo napake na tirnicah po posameznih glavnih progah na železniškem omrežju. Na osnovi primerjave med glavnimi progami ugotavljamo, da enotirne proge izstopajo po številu napak na tirnicah na kilometer proge. Opazimo tudi, da ena dvotirna proga izstopa po številu napak glede na izkoriščenost proge. Visok negativni Pearsonov koeficient korelacije kaže, da se število napak na tirnicah linearno povečuje z zmanjševanjem temperature. Analiza korelacije pri vseh ostalih obravnavanih parametrih (obraba, starost tirnice, hitrost na progi, osna obremenitev, obremenitev proge in nagib nivelete) pa ne nakazuje na obstoj izrazite linearne odvisnosti med obravnavanimi parametri in številom napak na tirnicah.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	625.14 (043.2)
Author:	Tomaž Habjan
Supervisor:	prof. Bogdan Zgonc, Ph.D.
Co – supervisor:	assist. Darja Šemrov, B.Sc.
Title:	Analyses of rail defects
Document type:	Graduation Thesis – Higher professional studies
Notes:	107 p., 32 tab., 39 graph., 84 fig.
Keywords:	rail, rail defects, Slovenian railway network, analyses of the main routes

Abstract

In the initial part of the thesis we acquaint with rails, which are specially design steel beams - parts of the substructure of the railway line and the most important elements of the railway tracks. The beams perform the function of managing the acquisition of vehicles and direct traffic loads of transport assets. We presented the iron alloy – steel, which is the basic material for the production of rails. We describe in detail the development of the rail and the process of making rails through history. We present constituent elements and characteristics of rails and describe the most typical types of rail defects and their properties.

In the second part of the thesis we review existing data on the recorded rail defects on the whole railway network of the Republic of Slovenia and analyze defects in rails for each of the main routes. We compare the main routes according to the number of defects on the rails. Upon analysis and comparison, we conclude that the single-track lines stand out by the number of defects per track kilometer. We also observe that one double track lines stands out by the number of defects on rails considering the utilization of the line. The analysis of the Pearson correlation coefficient shows that the number of defects on rails linearly increases with decrease of the temperatures. For other observed parameters (rail wear, rail age, speed on the track, axle load, the volume of traffic expressed in gross tonnage and gradient), the correlation analysis does not show any particular linear dependence.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge, strokovne nasvete in usmeritve se zahvaljujem mentorju prof. dr. Bogdanu Zgoncu in somentorici asist. Darji Šemrov.

Zahvaljujem se Slovenskim železnicam in Tehnični univerzi v Gdansku za pomoč in gradivo.

Zahvaljujem se svojim bližnjim in boljši polovici za vso spodbudo, potrpežljivost ter pomoč v času svojega študija.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE.....	I
IZJAVA O AVTORSTVU.....	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD.....	1
1.1 Splošno.....	1
1.2 Namen diplomske naloge.....	2
1.2.1 Metode dela.....	2
1.3 Struktura.....	2
2 JEKLO ZA TIRNICE.....	4
2.1 Kemična sestava jekla za tirnice	4
2.1.1 Železo	4
2.1.2 Ostali kemijski elementi.....	4
2.2 Mikrostruktura jekla.....	7
3 IZDELAVA TIRNICE.....	10
3.1 Razvoj tirnice skozi zgodovino	10
3.2 Postopek izdelave tirnice.....	13
3.2.1 Taljenje železove rude.....	13
3.2.2 Predhodna obdelava staljenega surovega železa	14
3.2.3 Osnovni oksidacijski postopek.....	15
3.2.4 Sekundarni proces	16
3.3 Vlivanje jekla	17
3.3.1 Tradicionalno vlivanje.....	17
3.3.2 Sodobni postopek vliivanja	18
3.4 Valjanje	19
3.5 Ohlajanje	20
3.6 Napake pri vliivanju v ingote	22
4 TIRNICA	25
4.1 Elementi tirnice	25
4.1.1 Glava tirnice	25
4.1.2 Vrat tirnice.....	26
4.1.3 Noga tirnice.....	26
4.2 Oblike tirnice.....	26

4.3	Karakteristike tirnice	27
4.3.1	Togost	28
4.3.2	Trdnost	28
4.3.3	Trajnost	28
4.3.4	Odpornostni moment	28
4.3.5	Vztrajnostni moment	28
4.3.6	Stabilnost	29
4.3.7	Učinkovitost	29
4.4	Kakovost tirnice	29
4.5	Označevanje tirnice	30
4.6	Dolžine tirnice	30
4.7	Sile na tirnici	31
4.7.1	Vertikalne sile	31
4.7.2	Horizontalne sile	32
4.8	Napetosti v tirnicah	33
4.8.1	Upogibne in strižne napetosti	33
4.8.2	Napetosti na kontaktu kolo–tirnica	34
4.8.3	Toplotne napetosti	35
4.8.4	Zaostale napetosti	35
4.8.5	Dinamični učinki	35
5	NAPAKE TIRNIC	36
5.1	Razdelitev tirnih napak	36
5.1.1	Tipi tirnih napak	36
5.1.2	Lokacije tirnih napak	36
5.1.3	Obsežnost tirnih napak	37
5.1.4	Označevanje tirnih napak	37
5.2	Definicija in opis napak	39
5.2.1	Glava tirnice	40
5.2.2	Vrat tirnice	49
5.2.3	Noga tirnice	54
5.3	Pregled nesreč	55
5.3.1	Hatfield	55
5.3.2	Eschede	56
6	ANALIZA NAPAK NA TIRNICAH NA ŽELEZNIŠKEM OMREŽJU RS	57
6.1	Splošno o železniškem omrežju v RS	57
6.1.1	Vrste prog po povezovalni vlogi	57
6.1.2	Vrste prog po številu tirov	58

6.1.3	Vzdrževanje prog	58
6.1.4	Glavne proge	60
6.2	Metode dela	65
6.3	Pregled napak na tirnicah na železniškem omrežju RS v obdobju 2005–2014.....	66
6.3.1	Pregled po posameznih mesecih.....	68
6.3.2	Pregled po načinih najdbe	69
6.3.3	Pregled po mestih najdbe	69
6.3.4	Pregled po območjih najdbe	70
6.3.5	Pregled po vzrokih napak	70
6.3.6	Pregled po mestih napak v tirnici	71
6.3.7	Pregled po oblikah tirnic	71
6.3.8	Pregled po proizvajalcih tirnic	72
6.3.9	Pregled po letnicah izdelave tirnic	73
6.3.10	Pregled po trdotah tirnic	74
6.3.11	Pregled po obrabi tirnic	75
6.3.12	Pregled po temperaturah.....	75
6.3.13	Pregled po hitrosti prog	76
6.3.14	Pregled po osnih obremenitvah vlakov	77
6.3.15	Pregled po obremenitvah prog	78
6.3.16	Pregled po nagibih nivelet prog.....	79
6.3.17	Pregled po elementih trase prog	80
6.3.18	Pregled po posameznih SVP	82
6.3.19	Pregled po progah.....	84
6.4	Korelacije med posameznimi sklopi podatkov	95
6.4.1	Rezultati analize korelacije za celotno obravnavano območje.....	95
6.4.2	Rezultati analize korelacije za progo Ljubljana–Jesenice	96
6.4.3	Rezultati analize korelacije za progo Divača–Koper	96
6.4.4	Rezultati analize korelacije za progo Ljubljana–Sežana	97
6.4.5	Rezultati analize korelacije za progo Dobova–Ljubljana.....	98
6.4.6	Rezultati analize korelacije za progo Zidani Most–Šentilj.....	99
7	ZAKLJUČEK.....	100
	VIRI	105

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Kemična sestava tirnic v trdnem stanju v skladu s standardom EN 13674 – 1 [7].....	5
Preglednica 2.2: Pozitivni in negativni vplivi kemijskih elementov [3, 6, 10, 12, 13, 14].....	7
Preglednica 4.1: Podatki o standardnih tirnicah in njihovih glavnih dimenzijah [52].....	25
Preglednica 4.2: Osnovni parametri profilov tirnic v skladu s standardom EN 13674 – 1 [7].....	27
Preglednica 4.3: Kakovostni razredi v skladu s standardom UIC 860 R [56].	29
Preglednica 6.1: Dolžine glavnih in regionalnih prog ter dolžine prog po številu tirov, ločene po SVP [72].	59
Preglednica 6.2: Prikaz nagibov na progovnih odsekih Ljubljana–Jesenice [75].	60
Preglednica 6.3: Prikaz nagibov na progovnih odsekih Divača–Koper [75].	61
Preglednica 6.4: Prikaz nagibov na progovnih odsekih Dobova–Ljubljana [75].	62
Preglednica 6.5: Prikaz nagibov na progovnih odsekih med Ljubljano–Sežano [75].	63
Preglednica 6.6: Prikaz nagibov na progovnih odsekih Zidani Most–Šentilj [75].	64
Preglednica 6.7: Osnovna statistika za starost in letnico izdelave tirnice	74
Preglednica 6.8: Osnovna statistika za obrabo tirnice v obdobju 2005–2014	75
Preglednica 6.9: Osnovna statistika temperature v obdobju 2005–2014	76
Preglednica 6.10: Osnovna statistika za hitrost v obdobju 2005–2014	77
Preglednica 6.11: Osnovna statistika za osno obremenitev vlaka v obdobju 2005–2014	78
Preglednica 6.12: Osnovna statistika za vzdolžni nagib nivelete proge v obdobju 2005–2014	79
Preglednica 6.13: Število napak glede na lego tirnice	80
Preglednica 6.14: Osnovna statistika za krožni lok v obdobju 2005–2014	82
Preglednica 6.15: Skupno število napak po sekcijah in velikosti sekcije glede na delež prog [72].	82
Preglednica 6.16: Skupno število napak na glavnih progah in po posameznih letih v obdobju 2005–2014	85
Preglednica 6.17: Osnovna statistika za progo Ljubljana–Jesenice	86
Preglednica 6.18: Osnovna statistika za progo Divača–Koper	88
Preglednica 6.19: Osnovna statistika za progo Ljubljana–Dobova	89
Preglednica 6.20: Osnovna statistika za progo Ljubljana–Sežana	91
Preglednica 6.21: Osnovna statistika za progo Zidani Most–Šentilj	93
Preglednica 6.22: Korelacijski koeficienti za celotno obravnavano območje	95
Preglednica 6.23: Korelacijski koeficienti za progo Ljubljana–Jesenice	96
Preglednica 6.24: Korelacijski koeficienti za progo Divača–Koper	97
Preglednica 6.25: Korelacijski koeficienti za progo Ljubljana–Sežana	97
Preglednica 6.26: Korelacijski koeficienti za progo Dobova–Ljubljana	98
Preglednica 6.27: Korelacijski koeficienti za progo Zidani Most–Šentilj	99

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 2.1: Razmerje med trdoto in odpornostjo na obrabo jekla [11].	8
Grafikon 2.2: Razmerje med razmikom perlita in odpornostjo na obrabo jekla [11].	9
Grafikon 4.1: Kakovostni razred tirnice v odvisnosti od količine prometa in polmera krožnega loka [54].	30
Grafikon 6.1: Podolžni profil proge Ljubljana–Jesenice.	60
Grafikon 6.2: Podolžni profil proge Divača–Koper	61
Grafikon 6.3: Podolžni profil proge Dobova–Ljubljana	62
Grafikon 6.4: Podolžni profil proge Ljubljana–Sežana.	63
Grafikon 6.5: Podolžni profil proge Zidani Most–Šentilj	64
Grafikon 6.6: Skupno število napak na tirnicah po posameznih letih v obdobju 2005–2014.	67
Grafikon 6.7: Razdelitev skupnega števila napak na tirnicah in investicije v vzdrževanje prog po posameznih letih v obdobju 2005–2014.	67
Grafikon 6.8: Razdelitev skupnega števila napak po mesecih	68
Grafikon 6.9: Pogostost napak glede na način najdbe.	69
Grafikon 6.10: Pogostost napak po mestih najdbe	69
Grafikon 6.11: Pogostost napak po območjih	70
Grafikon 6.12: Pogostost napak glede na vzrok nastanka	70
Grafikon 6.13: Pogostost napak glede na mesto nastanka v tirnici	71
Grafikon 6.14: Pogostost napak glede na obliko tirnice	72
Grafikon 6.15: Pogostost napak glede na proizvajalca.	72
Grafikon 6.16: Razdelitev skupnega števila napak po letnicah izdelave tirnic	73
Grafikon 6.17: Podroben prikaz števila napak glede na letnico izdelave tirnice	73
Grafikon 6.18: Pogostost napak glede na trdoto tirnice	74
Grafikon 6.19: Razdelitev skupnega števila napak po obrabi tirnic	75
Grafikon 6.20: Razdelitev skupnega števila napak po temperaturah	76
Grafikon 6.21: Razdelitev skupnega števila napak po hitrosti prog	76
Grafikon 6.22: Razdelitev skupnega števila napak po osnih obremenitvah vlakov	77
Grafikon 6.23: Razdelitev skupnega števila napak po obremenitvah prog v bruto tonah na dan	78
Grafikon 6.24: Razdelitev skupnega števila napak po nagibih nivelet prog	79
Grafikon 6.25: Pogostost napak po posameznih elementih trase proge	80
Grafikon 6.26: Pogostost napak glede na lego in stran tirnice	81
Grafikon 6.27: Razdelitev skupnega števila napak po polmerih krožnega loka	81
Grafikon 6.28: Delež napak po posameznih sekcijah znotraj glavnih nadzorništev	83
Grafikon 6.29: Razdelitev skupnega števila napak po glavnih in regionalnih progah	84
Grafikon 6.30: Razdelitev števila napak po stacionažah proge Ljubljana–Jesenice	85

Grafikon 6.31: Razdelitev števila napak po stacionažah proge Divača–Koper.....	87
Grafikon 6.32: Razdelitev števila napak po stacionažah proge Dobova–Ljubljana	89
Grafikon 6.33: Razdelitev števila napak po stacionažah proge Ljubljana–Sežana	90
Grafikon 6.34: Razdelitev števila napak po stacionažah proge Zidani Most–Šentilj	92
Grafikon 6.35: Skupno število in letno povprečje napak na tirnicah glede na dolžino in izkoriščenost glavnih prog.....	94
Grafikon 6.36: Skupno število napak na tirnicah glede na dolžino in izkoriščenost glavnih prog.....	94

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Mikroskopski posnetek mikrostrukture perlita s plastmi ferita in cementita [11].	8
Slika 3.1: Železni dodatek na leseni podlagi [22].	10
Slika 3.2: Tirnica z razširjenim srednjim delom [23].	10
Slika 3.3: Krožna proga [25].	11
Slika 3.4: Razširjena tirnica z vlakom [28].	11
Slika 3.5: Tirnica s široko glavo in ozkim vratom [30].	11
Slika 3.6: Dvoglava tirnica [32].	12
Slika 3.7: Vignolova tirnica oblike T [34].	12
Slika 3.8: Univerzalna oblika prečnega prereza tirnice [37].	13
Slika 3.9: Plavž [38].	14
Slika 3.10: Torpedo vagon [40].	15
Slika 3.11: LD-konvertor [40].	15
Slika 3.12: Zlivanje jekla v livarsko posodo [40].	16
Slika 3.13: Livarska posoda z RH-razplinjevalnikom [40].	16
Slika 3.14: Prikaz RH-vakuumskega obrata [40].	17
Slika 3.15: Shematski prikaz postopka tradicionalnega vlivanja [40].	18
Slika 3.16: Shematski prikaz postopka neprekinjenega vlivanja [40].	19
Slika 3.17: Enakomerno segrevanje [40].	20
Slika 3.18: Shematski prikaz preoblikovanja tirnice [40].	20
Slika 3.19: Vročje rezanje tirnice [40].	20
Slika 3.20: Postopno ohlajanje tirnice [40].	21
Slika 3.21: Shematski prikaz izravnave in testnega pregleda tirnice [40].	21
Slika 3.22: Vertikalno in horizontalno stiskanje tirnice [40].	21
Slika 3.23: Rezanje na dolžine in vrtanje lukenj [40].	22
Slika 3.24: Izravnava tirnic [40].	22
Slika 3.25: Shematski prikaz utrjevanja tirne glave in izravnave tirnic [40].	22
Slika 3.26: Shematski prikaz končnega pregleda in skladiščenja tirnic [40].	22
Slika 3.27: Velikost in oblika kristalnih zrn v ingotu [50].	23
Slika 4.1: Glavni elementi tirnice [52].	25
Slika 4.2: Geometrijske karakteristike 60 E1 [54].	27
Slika 4.3: Geometrijske karakteristike 54 E1 [54].	27
Slika 4.4: Označitev starejše tirnice [58].	30
Slika 4.5: Vertikalna, prečna in vzdolžna sila [59].	31
Slika 4.6: Sile in momenti na kontaktu kolo–tirnica [21].	34
Slika 4.7: Sile na kontaktu med kolesom in tirnico [59].	34

Slika 5.1: Lokacije napak na tirnici [64].	37
Slika 5.2: Napake izven območja tirnega stika/zvara	39
Slika 5.3: Napake v območju tirnega stika/zvara	39
Slika 5.4: Shematski prikaz desnega tira	40
Slika 5.5: Napake na glavi tirnice	40
Slika 5.6: Primeri prečnih razpok [64].	40
Slika 5.7: Primeri vzdolžnih razpok [64].	41
Slika 5.8: Primer prečnih razpok [64].	41
Slika 5.9: Vzdolžna navpična razpoka [64].	41
Slika 5.10: Vzdolžna navpična razpoka [64].	42
Slika 5.11: Primer obrabe s kratkim valom [64].	42
Slika 5.12: Primer obrabe z dolgim valom [64].	43
Slika 5.13: Primer navpične obrabe [64].	43
Slika 5.14: Primer luskavosti [64].	43
Slika 5.15: Primer dolgega žleba [64].	44
Slika 5.16: Filiform [64].	44
Slika 5.17: Primer luščenja vozne površine [64].	45
Slika 5.18: Primer luščenja vozne površine [64].	45
Slika 5.19: Primer luščenja GRT [64].	45
Slika 5.20: Stabilizirani in pravilni HC [64].	46
Slika 5.21: HC z razpokami [64].	46
Slika 5.22: Primer HC-razpoke [64].	46
Slika 5.23: Primer drobljenja [64].	47
Slika 5.24: Primer drobljenja [64].	47
Slika 5.25: Primer udrtine vozne površine [64].	47
Slika 5.26: Primera sledov na vozni površini [64].	48
Slika 5.27: Primer vozne površine brez sprememb [64].	48
Slika 5.28: Primer zloma tirnice zaradi zdrsa [64].	48
Slika 5.29: Primeri napak posledice zdrsov koles [64].	49
Slika 5.30: Primeri squatov [64].	49
Slika 5.31: Napake na vratu tirnice	50
Slika 5.32: Vzdolžne razpoke na prehodu vrat–glava [64].	50
Slika 5.33: Vzdolžne razpoke na prehodu vrat–noga [64].	51
Slika 5.34: Vzdolžne razpoke na prehodu glava–vrat [64].	51
Slika 5.35: Vzdolžne razpoke na prehodu vrat–noga [64].	51
Slika 5.36: Vzdolžna navpična razpoka [64].	52
Slika 5.37: Vzdolžne navpične razpoke v vratu tirnice [64].	52

Slika 5.38: Primer korozije [64].....	52
Slika 5.39: Razpoke na tirnih stikih [64].....	53
Slika 5.40: Razpoke na tirnih stikih [64].....	53
Slika 5.41: Ostale diagonalne razpoke [64].....	53
Slika 5.42: Slika redke tovarniške napake [64].....	54
Slika 5.43: Napake v nogi tirnice	54
Slika 5.44: Vzdolžna navpična razpoka na nogi tirnice [64].	54
Slika 5.45: Korozija v nogi tirnice [64].....	55
Slika 5.46: Primer zloma v obliki polmeseca [64].	55
Slika 6.1: Glavne in regionalne proge v RS [73].	57
Slika 6.2: Vrste prog po številu tirov v RS [73].....	58
Slika 6.3: Razdelitev železniškega omrežja po sekcijah za vzdrževanje prog v RS.	59

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

BOS	Osnovni oksidacijski postopek (angl. <i>Basic Oxygen Steelmaking</i>)
Br/dan	Bruto tonaža na dan
d. m.	Državna meja
EN	Evropski standard (angl. <i>European Norm</i>)
GRT	Gornji rob tirnice
HB	Trdota tirnice po Brinellu (angl. <i>Brinell Hardness</i>)
HC	Head Checks
HSB	Tirnice s povečano trdoto glave (angl. <i>Head Special Hardened</i>)
ICE 1	InterCityExpress vlaki za visoke hitrosti
JŽI	Javna železniška infrastruktura
KK	Korelacijski koeficient
KV	Koeficient variacije oz. variabilnosti
LD	Konvertor Linz & Donawitz
NZT	Neprekinjeno zavarjeni tir
RCF	Napake, ki so posledica kontaktnega utrujanja (angl. <i>Rolling Contact Fatigue</i>)
RH	Ruhrstahl-Heraeusov razplinjevalnik
RS	Republika Slovenija
SO	Standardni odklon
SV	Signalna varnost
SVP	Sekcija za vzdrževanje prog
SŽ	Slovenske železnice
UIC	Mednarodna železniška zveza (fr. <i>Union Internationale des Chemins de fer</i>)
VR	Variacijski razmik

1 UVOD

1.1 Splošno

Izum parne lokomotive, ki lahko vozi le po tirnicah, je spremenil življenje ljudi v večini držav sveta, saj je olajšal prevoz na dolge razdalje in izjemno prispeval k industrijskemu razvoju. Od nastanka prvih tirnic pa vse do danes, ko so se menjale oblike, dolžine in različne trdnosti materiala, so osnove funkcije tirnic ostale enake. Tirnice so najpomembnejši element železniških tirov, katerih glavna funkcija je nošenje in vodenje vozila. So del zgornjega ustroja železniške proge, ki direktno prevzema prometne obremenitve transportnih sredstev (vagona, vlaka).

Tirnica je posebno oblikovan podolgovati jekleni nosilec, ki pri vodenju zagotavlja voznemu kolesu zeleno smer, čvrsto in ravno podlago ter neposredni prevzem navpičnih in vodoravnih sil, ki pri vožnji nastanejo med kolesom in tirnico. Pri nošenju zagotavlja prevzem vseh statičnih in dinamičnih vertikalnih sil, ki nastajajo kot posledica napak v tiru zaradi sprememb smeri vožnje in vpliva vetra. Poleg navedenega ima tirnica tudi funkcijo povratnega vodnika v tokokrogu električne vleke in funkcijo prenašanja električnega toka za signalizacijske namene [1].

Varnost in zanesljivost železniškega sistema sta v veliki meri odvisni od zasnove in pravilnega delovanja tirnic. Tirnice so v sodobnem času izpostavljene intenzivni uporabi; sile, ki se prenašajo po njih, pa so kompleksne in spremenljive. Ker sta železo in jeklo najpomembnejša elementa za izdelavo tirnic, je poznavanje teh materialov in njihovih lastnosti (ob ustrezni kemijski sestavi in z ustreznim tehnološkim postopkom) ključno za doseg želenih lastnosti tirnic. Namreč, le pravilno zasnovana tirnica, ki ustreza vsem mehanskim in fizikalnim lastnostim, lahko opravlja svojo funkcijo ter kljubuje različnim pritiskom, obremenitvam, napetostim in temperaturnim spremembam med obratovanjem.

Zaradi ekonomskega pritiska po povečanju učinkovitosti železnic ter zmanjšanju stroškov obratovanja so se povečale hitrost, gostota prometa in osne obremenitve, kar je privedlo do povečane stopnje napak v tirnicah. Kljub vsem prednostim, ki izhajajo iz tehnološkega napredka (kvaliteten material, inšpekcijski pregledi, brušenje), se napake tirnic nenehno pojavljajo in povečujejo (število napak na kilometer proge, število neodkritih napak), zato predstavljajo objektivno nevarnost, ki vpliva na varnost železniškega prometa. Prednostna naloga vseh vpletenih v železniški industriji je zmanjšati število napak in s tem posledično zmanjšati stroške, ki nastanejo zaradi posledic zlomov in napak tirnic. Po podatkih Evropske unije znašajo slednji približno 2 milijardi evrov letno, zato je študija o napakah tirnic ključnega pomena za oblikovanje pravilne strategije vzdrževanja.

1.2 Namen diplomske naloge

Namen diplomske naloge je seznaniti se z železovo zlitino – jeklom, ki je osnovni material za izdelavo tirnic, podrobneje opisati razvoj tirnic skozi zgodovino in postopek izdelave tirnic, predstaviti sestavne elemente in karakteristike tirnic ter opisati najznačilnejše vrste tirnih napak in njihovih lastnosti ter predstaviti in analizirati napake na tirnicah, ki so se zgodile na železniškem omrežju v Republiki Sloveniji (v nadaljevanju RS) v obdobju 2005–2014. Predvsem nas bodo zanimale korelacije med številom napak na tirnicah in posameznimi sklopi podatkov.

Hipoteza, ki smo si jo postavili na začetku naloge, je sledeča:

1. Niveleta proge, osna obremenitev vlaka, hitrost in povprečna temperatura vplivajo na povečanje števila napak na tirnicah.

1.2.1 Metode dela

V diplomski nalogi smo analizirali napake na tirnicah na železniškem omrežju RS v obdobju 2005–2014. Po uvodni seznanitvi z jeklom, podrobnim opisom razvoja tirnice skozi zgodovino in postopkom izdelave tirnice s podrobno seznanitvijo elementov in karakteristik tirnic ter predstavitvijo in opisom najznačilnejših vrst tirnih napak sledi pregled in analiza napak na tirnicah na železniškem omrežju RS.

Bazo podatkov o napakah na tirnicah sestavlja skupno 954 evidentiranih napak. Podatke o napakah na tirnicah smo pridobili s strani SŽ.

Na osnovi izračunov in izsledkov osnovnih statistik smo po analizi vsake spremenljivke posebej sprejeli zaključke, ki smo jih poizkušali kar najbolje predstaviti s pomočjo grafikonov, histogramov in preglednic, ter obenem s komentarji povezali v razumljivo celoto.

V diplomski nalogi smo podali lastno videnje, ki je posledica rezultatov lastne analize napak tirnic na železniškem omrežju.

1.3 Struktura

V prvem poglavju bomo na splošno predstavili temo, namen in strukturo diplomskega dela.

V drugem poglavju se bomo seznanili z železovo zlitino – jeklom, ki je osnovni material tirnic. Predstavili bomo pomen ter vpliv drugih kemijskih elementov, poleg železa, ki jih jeklo še lahko vsebuje. Drugo poglavje bomo zaključili z opisom mikrostrukture jekla za tirnice.

V prvem delu tretjega poglavja bomo podrobneje opisali razvoj tirnice skozi zgodovino, od njenega začetka pa vse do danes. V drugem delu tretjega poglavja bomo opisali celotni postopek izdelave tirnice, ki sledi opisu in pregledu postopkov pridelave jekla za tirnice. Osredotočili se bomo na posebnosti postopkov vlivanja v ingote in neprekinjenega vlivanja ter na postopke valjanja in hlajenja. Tretje poglavje bomo zaključili s pregledom napak, ki se pojavijo med izdelavo tirnice.

V četrtem poglavju se bomo podrobneje posvetili sestavnim elementom in karakteristikam tirnic, pri čemer bomo predstavili oblike ter vrste tirnic, kakovost, označevanje in dolžine. Četrto poglavje bomo zaključili z opisom sil in napetosti, ki delujejo na tirnice.

V prvem delu petega poglavja bomo predstavili in razdelili tirne napake, pri čemer se bomo seznanili s klasifikacijo tipov napak različnih avtorjev, predstavili njihove lokacije, se seznanili z obsežnostjo tirnih napak in opisali pomen označevanja tirnih napak. V drugem delu bomo v sliki in besedi predstavili in opisali najznačilnejše vrste tirnih napak in njihovih lastnosti. Peto poglavje bomo zaključili s kratkim pregledom največjih nesreč, katerih vzrok so bile poškodovane tirnice.

V šestem poglavju bomo pregledali in analizirali napake na tirnicah na železniškem omrežju RS za obdobje 2005–2014. V začetnem delu poglavja se bomo na kratko seznanili s progami in metodami dela analize. V drugem delu se bomo posvetili pregledu napak na tirnicah celotnega železniškega omrežja RS in analizi posameznih glavnih prog, ki so odstopale po številu napak na tirnicah po posameznih parametrih.

V sedmem poglavju bomo pričujoče diplomsko delo zaključili s sklepnimi ugotovitvami in komentarji.

2 JEKLO ZA TIRNICE

Jeklo je zlitina železa in ogljika z določenim delom ostalih primesi; zaradi svoje vsestranske uporabe in raznovrstnosti je jeklo med najbolj uporabljenimi kovinskimi materiali. Izdelava jekla za tirnice temelji na skrbnem prečiščevanju in natančnem dodajanju zahtevanih elementov v ustreznem razmerju. Z ustrezno kemijsko sestavo ter toplotno obdelavo spreminjamo metalurško strukturo jekla in dosegamo njegove najboljše mehanske in fizikalne lastnosti. Za izdelavo jekla je potrebna kombinacija ogromnih količin surovin in število posameznih procesov; za pripravo ene tone jekla je potrebno približno 1,3 tone železove rude, $\frac{2}{3}$ tone premoga, $\frac{1}{5}$ tone apnenca, $\frac{1}{4}$ tone železa ali ostankov jekla, 165 ton vode in 8 ton zraka [2]; ko je jeklo izdelano, vsebuje okoli 99 % železa, 0,8 % ogljika ter nekaj ostalih primesi [2].

2.1 Kemična sestava jekla za tirnice

2.1.1 Železo

Ključna sestavina jekla je železo. Čisto železo je magnetni alotrop¹ železa ter je srebrno bele barve, zmerno trdo, raztegljivo in plastično [3]. Podobno kot večino drugih kovin tudi železa v naravi ne najdemo v elementarni obliki. V naravi se železo nahaja v obliki železove rude, predvsem magnetita (Fe_3O_4) in hematita (Fe_2O_3) [4]. Železove rude so bogate z železovimi oksidi. Izkoriščajo se le tiste, ki vsebujejo več kot 30 % železa. Železovo rudo se z ustrezno pripravo (drobljenje, ločevanje) ter s postopki redukcije in taljenja v posebnih pečeh pretvori v surovo železo. Da dobimo jeklo, ki je primerno za izdelavo tirnic, je potrebno surovo železo še predhodno izboljšati in pretaliti [5].

2.1.2 Ostali kemijski elementi

Za doseganje želenih lastnosti jekla za tirnice se železu dodajajo še ogljik, silicij, mangan, fosfor in žveplo ter drugi. Ogljik, mangan in silicij so bistvene sestavine, medtem ko sta žveplo in fosfor neizogibni nečistoči. Jeklo, v kolikor ni popolnoma oksidirano, vsebuje poleg navedenih sestavin še kisik ter sledi vodika in dušika [6]. Dovoljena kemično sestavo različnih elementov v jeklu, ki se uporablja za izdelavo tirnic, določa evropski standard EN 13674 – 1. Prikazana je v Preglednici 2.1 [7]. Učinki kemijskih elementov so predstavljeni v nadaljevanju besedila.

¹ Alotropija je pojav, ki pove, da ima trdno železo več oblik kristalne zgradbe v določenih temperaturnih intervalih oz. se ta kemijski element pojavi v več oblikah z različnimi fizikalnimi lastnostmi.

Preglednica 2.1: Kemična sestava tirnic v trdnem stanju v skladu s standardom EN 13674 – 1 [7].

Kvaliteta jekla	Kemična sestava [%]									10 ⁻⁴ [%]	
	C	Si	Mn	P max.	S max.	Cr	Al max.	V max.	N max.	O	H
R200	0,38–0,62	0,13–0,60	0,65–1,25	0,04	0,04	≤ 0,15	0,004	0,03	0,01	20	3,0
R220	0,48–0,62	0,18–0,62	0,95–1,3	0,03	0,03	≤ 0,15	0,004	0,03	0,01	20	3,0
R260	0,60–0,82	0,13–0,60	0,65–1,25	0,03	0,03	≤ 0,15	0,004	0,03	0,01	20	2,5
R260 Mn	0,53–0,77	0,13–0,62	1,25–1,75	0,03	0,03	≤ 0,15	0,004	0,03	0,01	20	2,5
R320 Cr	0,58–0,82	0,48–1,12	0,75–1,25	0,025	0,03	0,75–1,25	0,004	0,20	0,01	20	2,5
R350 HT	0,70–0,82	0,13–0,60	0,65–1,25	0,025	0,03	≤ 0,15	0,004	0,03	0,01	20	2,5
R350 LHT	0,70–0,82	0,13–0,60	0,65–1,25	0,025	0,03	≤ 0,30	0,004	0,03	0,01	20	2,5
R370 CrHT	0,68–0,84	0,38–1,02	0,65–1,15	0,025	0,025	0,35–0,65	0,004	0,03	0,01	20	1,5
R400 HT	0,88–1,02	0,18–0,42	1,15–1,35	0,025	0,025	≤ 0,30	0,004	0,03	0,01	20	1,5

Ogljik ima največji vpliv na lastnosti jekla. V jeklu je prisoten kot cementit oz. železov karbid (Fe_3C), ki nastane kot spojina železa in ogljika. Z večanjem ogljika se poveča natezna trdnost, trdota, meja tečenja, odzivnost na toplotno obdelavo in krhkost, medtem ko se zmanjšajo duktilnost, žilavost in raztezek. V skladu s standardom EN 13674 – 1 je dovoljena vsebnost ogljika v jeklu za tirnice med 0,38 % in 0,82 % [7].

Silicij koristno vpliva na lastnosti jekla, saj iz njega odstranjuje odvečni kisik. Med odstranjevalce odvečnega kisika se prišteva tudi aluminij, vendar je silicij za proizvodnjo tirnic manj škodljiv in zato bolj zaželen [3]. Silicij se uporablja tako za deoksidacijo kot tudi za zgoščevanje jekla ter povečanje trdnosti in odpornosti proti obrabi. Silicij poveča mejo tečenja za približno 10 % [8]. V skladu s standardom EN 13674 – 1 je dovoljena vsebnost silicija v jeklu za tirnice med 0,13 % in 1,12 % [7].

Fosfor je nečistoča in najbolj škodljiva primes v jeklu, ki jo tudi s postopkom taljenja zaradi naravne prisotnosti v železovi rudi ne moremo v celoti odpraviti. Fosfor v jeklu povečuje natezno trdnost, trdoto in mejo elastičnosti, obenem močno zmanjša žilavost in duktilnost ter povzroča krhkost in segregacijo materiala med strjevanjem. V skladu s standardom EN 13674 – 1 znaša najvišja dovoljena vsebnost fosforja v jeklu za tirnice 0,040 % [7].

Žveplo je škodljiva primes, ki pri vezanju z železom v železov sulfid (FeS) vpliva na lomljivost in žilavost jekla. Zaradi njegove naravne prisotnosti v železovi rudi ga je tudi s postopkom taljenja težko odpraviti. Jeklo z visoko vsebnostjo žvepla se v vročem stanju ne more preoblikovati (ker ima železov sulfid nižje tališče od temperature valjanja). Zato je takšno jeklo dovetnejše za nastanek razpok med postopkom vročega valjanja. Delež žvepla zmanjša verjetnost nastanka lusk [8], zaradi segregacije

povzroča lomljivost, zmanjšuje žilavost ter trdnostne lastnosti in pospešuje poroznost med postopkom varjenja. V skladu s standardom EN 13674 – 1 znaša najvišja dovoljena vsebnost žvepla 0,035 % [7].

Mangan se veže z žveplom v sicer neškodljiv manganov sulfid (MnS) in tako preprečuje vpliv te škodljive primesi. Preostali mangan, ki se ni vezal z žveplom, je pri vseh temperaturah večinoma prisoten v obliki trdne raztopine. Mangan v kombinaciji z jeklom in derivati nima neugodnih vplivov na njihove lastnosti. Ravno nasprotno, mangan povečuje trdoto jekla ter izboljšuje njegovo trdnost in žilavost. Pri vsebnosti nad okoli 0,8 % [6] omogoča višjo natezno trdnost brez izgube duktilnosti in kaljenja. Z višanjem trdnosti je jeklo odpornejše proti abrazivnim silam in elastičnosti. Dodatek mangana poveča trdnost za približno 67 % [8]. Jekla z vsebnostjo mangana se lahko preoblikujejo v vročem stanju, saj ima manganov sulfid višje tališče od temperature valjanja. Zato prisotnost mangana ne prispeva k nastanku razpok med postopkom vročega valjanja. V skladu s standardom EN 13674 – 1 je razpon dovoljene vsebnosti mangana v jeklu za tirnice med 0,65 % in 1,75 % [7].

Krom je kovina, ki se dodaja jeklu za povečanje trdnosti ter utrjenosti (angl. *hardenability*) in odpornosti proti koroziji. Obenem zmanjšuje težnjo k nastajanju oksidov [9]. V skladu s standardom EN 13674 – 1 je razpon dovoljene vsebnosti kroma v jeklu za tirnice med 0,15 in 0,30 % za jekla R200–R260 oziroma med 0,75 % in 1,25 % za jekla R320 Cr [7].

Aluminij je kovina, ki se uporablja za odstranjevanje odvečnega kisika iz jekla. Zaradi deleža aluminija postane jeklo manj občutljivo na staranje [10]. V primerjavi s silicijem ni tako zaželen element v jeklu za tirnice [3]. V skladu s standardom EN 13674 – 1 je najvišja še dovoljena vsebnost aluminija v jeklu za tirnice 0,004 % [7].

Vanadij prispeva k trdnosti jekla in odpornosti proti obrabi. V skladu s standardom EN 13674 – 1 je dovoljena vsebnost vanadija v jeklu za tirnice do 0,030 % [7].

Dušik je na splošno škodljiva primes, ki v večjih količinah povzroča krhkost jekla. Pri manjših količinah dušika in ob prisotnosti drugih kemijskih elementov v jeklu pa koristno vpliva na mehanske in korozijske lastnosti, tj. izboljšuje življenjsko dobo (angl. *fatigue life*), poveča trdnost brez zmanjšanja duktilnosti, poveča odpornost proti koroziji in koristno vpliva na obrabo. V skladu s standardom EN 13674 – 1 je dovoljen razpon dušika v jeklu za tirnice 0,009–0,010 % [7].

Kisik je ne glede na škodljive lastnosti (povzroča oksidacijo) koristen pri izdelavi jekla, saj nekoliko poveča trdoto, istočasno pa nima učinka na natezno ali končno trdnost. Obenem prisotnost kisika zmanjša duktilnost jekla in njegovo odpornost proti udarcem. V skladu s standardom EN 13674 – 1 znaša maksimalna dovoljena vsebnost kisika v jeklu za tirnice $0,20 \times 10^{-4}$ % mase [7].

Vodik je v jeklu škodljiva primes, ki povzroča krhkost in luščenje ter znižuje žilavost. Vodikov atom nastane med proizvodnim procesom jekla, tj. med postopkom taljenja in prečiščevanja z razpadom vode. Zaradi difuzije voda hitro prodre v notranjost in zapolni vse prazne prostore v strjenem jeklu. Zaradi kopičenja molekularnega vodika se pri hitrem ohlajanju večja pritisk v glavi tirnice, kar povzroča nastanek vodikovih lusk (angl. *hydrogen flakes*). Prav te, pod vplivom različnih zunanjih sil, sprožijo nastajanje utrujenostnih razpok (angl. *fatigue cracks*) v tirnici. Težavam, ki so posledica ujetega vodika, se izognemo s kontroliranim počasnim hlajenjem (pri katerem preteče dovolj časa, da se vodik difundira iz jekla) oziroma s postopkom vakuumskega odplinjevanja (pri katerem se zmanjša vsebnost vodika na sprejemljivo mejo) [11]. V skladu s standardom EN 13674 – 1 vsebnost vodika v jeklu za tirnice ne sme presegati $3,0 \times 10^{-4}$ % mase [7].

V preglednici spodaj so zbrani pozitivni in negativni vplivi posameznih kemijskih elementov, ki jih jeklo lahko vsebuje.

Preglednica 2.2: Pozitivni in negativni vplivi kemijskih elementov [3, 6, 10, 12, 13, 14].

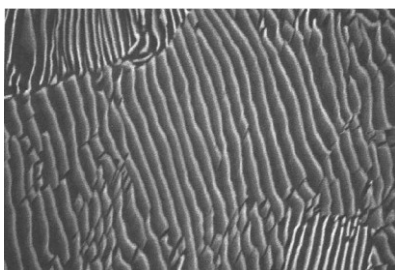
Elementi	Vplivi	
	pozitivni	negativni
Ogljik (C)	poveča trdnost, trdoto, odzivnost na toplotno obdelavo	zmanjša duktilnost, žilavost in varivost in poveča krhkost
Mangan (Mn)	deoksidacija jekla, poveča trdoto, izboljšuje trdnost in žilavost, zmanjšuje neugodne vplive žvepla,	nima neugodnih vplivov
Fosfor (P)	poveča trdnost in trdoto, poveča odpornost na atmosfersko korozijo in mejo elastičnosti	zmanjša žilavost in duktilnost, povzroča segregacijo, povzroča krhkost, zmanjša se odpornost
Žveplo (S)	nima ugodnih vplivov	povzroča lom, zmanjšuje žilavost in trdnostne lastnosti, vpliva na nastanek razpok med postopkom vročega valjanja, pospešuje poroznost med postopkom varjenja, zmanjšuje duktilnost, žilavost in varivost, zmanjšuje kvaliteto površine, močno segregira
Aluminij (Al)	dezoksidant (pomirjena jekla), večja trdnost in žilavost	nima neugodnih vplivov
Silicij (Si)	uporablja se za deoksidacijo in za zgoščevanje jekla, povečuje trdnost in odpornost proti obrabi	zmanjšuje relativno raztezanje in sposobnost hladnega preoblikovanja
Kisik (O)	povečuje trdoto	zmanjšuje duktilnost ter odpornost proti udarcem
Dušik (N)	pri višji vsebnosti odporen proti obrabi in povečuje trdnost	zmanjšuje duktilnost, povzroča krhkost, zaradi Fe ₄ N ni primeren za dinamične obtežbe
Vodik (V)	nima ugodnih vplivov	znižuje žilavost in povzroča krhkost materiala

2.2 Mikrostruktura jekla

Jeklo je metalurško najbolj tehnično dodelana zlitina z najširšim spektrom fizikalnih lastnosti (kot so žilavost, duktilnost, trdota, odpornost proti koroziji, odpornost proti obrabi itd.) med vsemi kovinami. Njegove lastnosti določa mikrostruktura, ki je splet učinka vrste dejavnikov, kot so vsebnost ogljika, kristalna mreža, kemijska sestava, proces strjevanja ter ohlajanja, postopek izdelave (toplotna obdelava, mehansko preoblikovanje). Z namensko obdelavo mikrostrukture, tj. s primerno izbiro kemijske sestave in s postopkom izdelave, zmanjšamo notranje napetosti in izboljšamo homogenost

mikrostrukture, hkrati pa dosežemo visoko trdnost ter izjemno odpornost proti obrabi in želene kombinacije ustreznih mehanskih lastnosti [15]. Razumevanje in poznavanje mikrostrukture jekla je ključnega pomena pri načrtovanju in doseganju optimalnih kombinacij ter želenih in ustreznih lastnosti jekla.

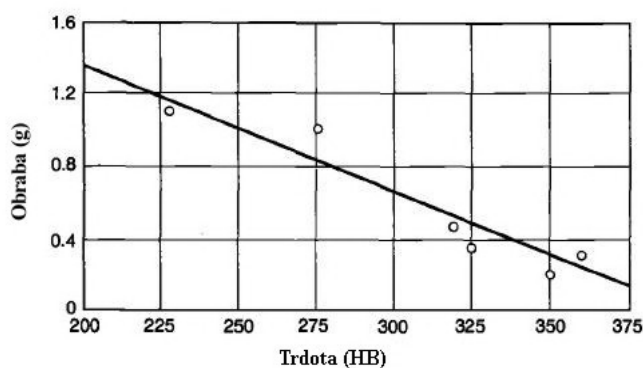
Zaradi svojih trdnostnih lastnosti je lamelni perlit idealna mikrostruktura za izdelavo jeklenih tirnic. Perlit je edinstven lamelni mikrostrukturni kompozit, sestavljen iz izmeničnih plasti mehkega ter duktilnega ferita (88 %) in plasti trdega ter krhkega cementita (12 %), glej Slika 2.1 [11]. Lamelle so med seboj usklajene, poravnane in potekajo v isti smeri. Črne lamelle označujejo ferit, bele lamelle pa cementit (Slika 2.1) [16]. Zaradi širokega razpona dobrih lastnosti ter edinstvene morfologije cementit-ferit lamelnega kompozita zagotavlja perlitno jeklo odlično odpornost proti obrabi (kontakt kolo–tirnica), visoko trdnost, trdoto in duktilnost. Prav zaradi navedenega je perlitno jeklo idealna struktura za izdelavo tirnic.



Slika 2.1: Mikroskopski posnetek mikrostrukture perlita s plastmi ferita in cementita [11].

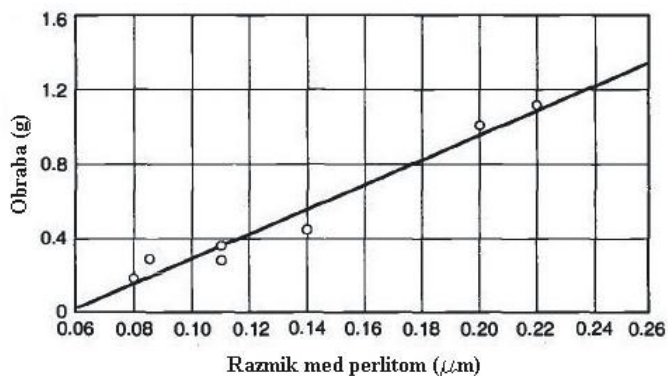
Dokazano je, da je razmik med lamelami perlita najpomembnejši parameter, ki vpliva na trdnost in odpornost proti obrabi [11]. Nadalje, debelina trdnih lamel vpliva na lastnosti perlita (tanke lamelle deformirajo in počijo), medtem ko mikrostruktura perlitnega jekla nima velikega vpliva na mejo tečenja (angl. *yield strength*) [11].

Grafikona 2.1 in 2.2 prikazujeta mehanske lastnosti jekla za tirnice.



Grafikon 2.1: Razmerje med trdoto in odpornostjo na obrabo jekla [11].

Iz Grafikona 2.1 je razvidno, da je odpornost jekla proti obrabi proporcionalna trdoti jekla, medtem ko podatki, prikazani v Grafikonu 2.2, kažejo, da se odpornost jekla povečuje na račun znižanja razmika med lamelami.



Grafikon 2.2: Razmerje med razmikom perlita in odpornostjo na obrabo jekla [11].

Iz Grafikona 2.2 je tudi razvidno, da manjši kot je razmik med lamelami perlita, večje so mehanske lastnosti in duktilnost jekla (tj. bolj se povečuje natezna trdnost jekla) [17, 18]. Ker je trdota perlita odvisna izključno od transformacijske temperature², se mora jeklo na najhitrejši možni način ohladiti na sobno temperaturo [11].

Poleg oblike in morfologije (razdalje med plastmi) so mehanske in tehnološke lastnosti jekla odvisne tudi od deleža in čistosti perlita [19].

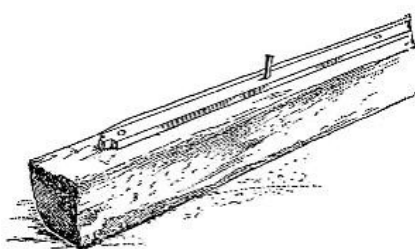
² Transformacijska temperatura je temperatura, pri kateri pride do spremembe v fazi in strukturi kovine (jekla) v času preoblikovanja, tj. med segrevanjem in/ali hlajenjem.

3 IZDELAVA TIRNICE

3.1 Razvoj tirnice skozi zgodovino

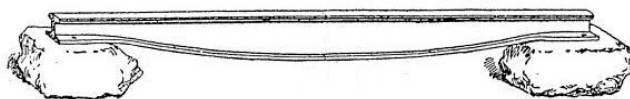
Od nastanka prvih tirnic pa vse do danes so se menjavale oblike, dolžine in trdnosti materiala, osnovne funkcije tirnic pa so ostale iste. Namenjene so nošenju in vodenju vozila.

Prve železne tirnice, katerih izumitelj je bil Richard Reynolds, so se uporabljale od leta 1760 [20]. Bile so nadgradnja lesenih tirnic, kjer je železni dodatek oblike črke U v njeni sredini zmanjšal obrabo lesene grede (Slika 3.1). Začetki uporabe takih železnih tirnic se štejejo kot zametki utrjevanja tirne glave (angl. *head hardening*) [21].



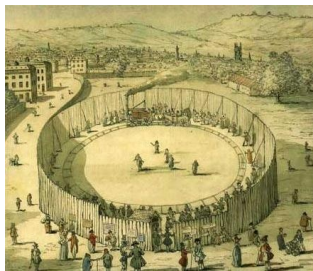
Slika 3.1: Železni dodatek na leseni podlagi [22].

William Jessop je leta 1789 razvil kovano tirnico, ki je že imela glavo ter razširitev v srednjem delu [23]. Razširitev je bila potrebna, da bi se zagotovil velik vztrajnostni moment kljub slabši kakovosti železa. Tirnice so bile podprte s kvadri kamnitih blokov (Slika 3.2).



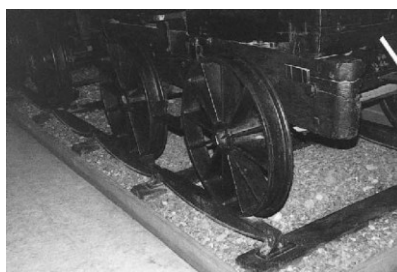
Slika 3.2: Tirnica z razširjenim srednjim delom [23].

Litoželezne tirnice niso bile zaradi slabše kakovosti železa, povečanih obremenitev, neutrjenosti vozniških površin in krhkega materiala zmožne prerazporediti obtežbe. Tako je na primer pri predstavitvi Trevithickove parne lokomotive na krožni progi iz leta 1808 (Slika 3.3) prav zaradi prevelike teže, ki je krhke tirnice niso prenesle, prišlo do zloma tirnice [24]. Z iztirjenjem lokomotive je bilo vsaj za nekaj časa konec predstavitev novih tehnologij [21].



Slika 3.3: Krožna proga [25].

Tirnice z razširjenim srednjim delom (Slika 3.2) so bile uporabljene tudi na prvi vožnji vlaka, na relaciji Stockton–Darlington (Slika 3.4). Snovalec je bil George Stephenson, in sicer 27. septembra 1825, ki je prišel v zgodovino kot dan rojstva železnic [26]. Tirna širina je znašala 1422 mm [27].



Slika 3.4: Razširjena tirnica z vlakom [28].

George Stephenson je leta 1830 na progi med Liverpoolom in Manchestrom zaradi interesa po zmanjšanju obrabe povečal tirno širino iz 1422 mm na 1435 mm in s tem zmanjšal trenje med kolesnico in tirnico – ustvaril je temelje današnji standardni tirni širini [21].

Robert L. Stevens je leta 1831 razvil tirnico z ravnim dnom v obliki črke T – s široko glavo in ozkim vratom (Slika 3.5) [29].



Slika 3.5: Tirnica s široko glavo in ozkim vratom [30].

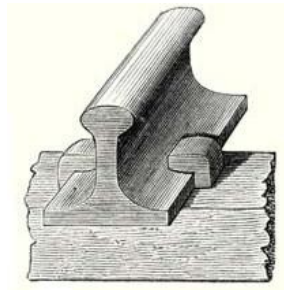
George Stephenson in Joseph Locke sta leta 1835 skonstruirala tirnico z dvema glavama (Slika 3.6) [31]. Ko se je uporabljala (zgornja) glava take tirnice obrabila pod določeno mejo, se je z obračenjem tirnice omogočila uporaba njene druge glave. Ker so tirnice ležale v kovinskih žlebovih, kjer se je

spodnja glava prav tako obrabljala in po določenem času ni bila več primerna za uporabo, so jih s časom opustili.



Slika 3.6: Dvoglava tirnica [32].

Leta 1836 je Charles Vignoles nadgradil Stevensonovo tirnico (ti. vinjolko, razvidno na Sliki 3.7), ki jo še danes uporabljamo [33].



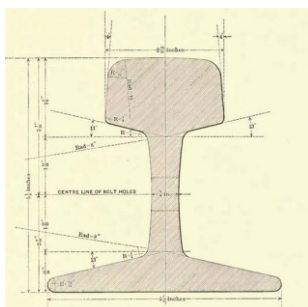
Slika 3.7: Vignolova tirnica oblike T [34].

Robert Forester Mushet je bil pionir jeklenih tirnic, ki so bile prvič uporabljene leta 1857 na železniški postaji Derby v Veliki Britaniji [35]. Takratne jeklene tirnice so imele metalurško strukturo enako današnji perlitni strukturi [36].

Sredi 19. stoletja so poceni industrijski postopki (jeklo se je izdelovalo po dveh prevladujočih metodah, in sicer z Bessemerjevim in z Siemens-Martinovim postopkom) omogočili masovno izdelavo tudi do 15 m dolgih tirnic [21]. Med Bessemerjevim postopkom, ki je bil razvit leta 1856, se je jeklo pridobivalo z znižanjem vsebnosti ogljika in silicija z vpihovanjem zraka skozi staljeno surovo železo do dopustnih meja. Med Siemens-Martinovim postopkom, ki je bil razvit okrog leta 1858, se je jeklo izdelovalo v veliki, plitvi peči, v kateri se je znižanje ogljika dosegalo z oksidacijo žlindre. Siemens-Martinov postopek je bil zaradi večje količine proizvedenega jekla pogosteje uporabljan [5], kljub temu da je bil časovno potratnejši (Siemens-Martinov postopek je trajal približno 8 ur, medtem ko je Bessemerjev postopek trajal približno 30 min [5]). V današnjem času je oba postopka izdelave nadomestil modernejši osnovni oksidacijski postopek, tj. BOS (angl. *Basic Oxygen Steelmaking*)

postopek, izveden v konvertorju Linz & Donawitz (v nadaljevanju LD)³. Pri tem se z vpihovanjem čistega kisika skozi staljeno surovo železo znižuje raven ogljika na želeno vrednost.

V Severni Ameriki so iz zgodnjih začetkov uporabe sestavljenih tirnic, ko je bila glava tirnice sestavljena iz jekla, vrat in noga tirnice pa iz železa, prešli k povsem jeklenim tirnicam. Z izjemo Velike Britanije, kjer so se dvoglave tirnice uporabljale do sredine 20. stoletja, so tirnice oblike črke T, različnih velikosti in z ravnim dnom, postale univerzalne po vsem svetu [19] (Slika 3.8).



Slika 3.8: Univerzalna oblika prečnega prereza tirnice [37].

Jeklena tirnica je zaradi odličnih lastnosti (trdnosti ter žilavosti) in zmogljivosti postala sinonim hitrega razvoja železnic po vsem svetu. Koncept jeklenih tirnic s pragovi, pritrdilnim priborom in tirne grede s spodnjim ustrojem še dandanes predstavlja klasično zasnovo železnic po vsem svetu.

3.2 Postopek izdelave tirnice

Sodoben postopek izdelave tirnice poteka avtomatsko. Pri tem se nadzorujeta tako temperatura kot tudi količina posameznih kemijskih elementov. Sprotna kontrola zagotavlja natančen vpogled v stanje jekla v vsakem trenutku.

3.2.1 Taljenje železove rude

Tradicionalno se železo pridobiva s taljenjem železove rude v posebnih pečeh, t. i. plavžih. Plavž je velika jeklena talilna peč, v kateri se s taljenjem železove rude (hematit Fe_2O_3 , magnetit Fe_3O_4), mešanice ogljika (koksa) in apnenca (kalcijevega karbonata) na osnovi vrste kemičnih reakcij odstrani nezaželene primesi.

³ LD-konvertor je dobil ime po dveh avstrijskih krajih, tj. Linzu in Donawitzu, kjer ga je avstrijsko podjetje Voestalpine prvič predstavilo in uporabilo za izdelavo tirnic.



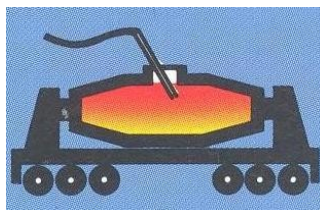
Slika 3.9: Plavž [38].

Postopek taljenja poteka tako, da se plavž z vrhnje strani v pravilnem razmerju napolni s surovinami, na dnu plavža pa se od spodaj navzgor vpiha potreben vroč zrak za izgorevanje koksa (Slika 3.9). Na dnu plavža se nahajajo odprtine za izpust staljenega železa in žindre, medtem ko so na vrhu plavža odprtine za presežek plinov, ki nastanejo med postopkom taljenja (Slika 3.9). Mešanica surovin se zaradi sile teže pomika navzdol in nalaga v plasteh. Z vpihovanjem vročega zraka se v mešanici surovin zaradi intenzivne reakcije pri izgorevanju koksa (ogljika) sprosti veliko toplote (pospeši se redukcija, odstrani se kisik iz rude) zaradi česar nastane ogljikov monoksid (CO), ki reducira železov oksid v železo. Ko se železo in žindra pri temperaturi 1538 °C [39] stalita, se nezaželene primesi ločijo od staljenega železa. Surovo železo se posede na dnu plavža, žindra pa zaradi manjše gostote nad njim. Kopičenje žindre na vrhu varuje staljeno surovo železo pred ponovno oksidacijo.

Staljeno surovo železo je osnovna surovina za izdelavo jekla za tirnice. Zaradi visokega deleža ogljika (med 3 % in 4,5 % [5]) in številnih drugih nečistoč, ki ga delajo izredno krhkega in neuporabnega, je potrebno železo pred uporabo za izdelavo jekla še pretaliti in izboljšati. Šele tako dobimo jeklo, ki je primerno za izdelavo tirnic.

3.2.2 Predhodna obdelava staljenega surovega železa

Med predhodno obdelavo gre staljeno železo skozi postopek razžveplanja. Ta poteka v posebnem vozilu (angl. *torpedo car*), kar je razvidno na Sliki 3.10: sem se staljeno železo vlije neposredno iz plavža in nato transportira do LD-konvertorja. Zaradi povečanih količin žvepla se v postopku razžveplanja staljenemu železu doda magnezij v prahu. Ob burni eksotermni reakciji in posledični sprostitvi toplote nastane magnezijev sulfid. Podobno se postopa pri desilikonizaciji (reduciranju deleža silicija) in defosforizaciji (reduciranju deleža fosforja) s pomočjo železovega oksida in žganega apna. Predhodna obdelava je odvisna od kakovosti staljenega železa iz plavža in zahtevanih končnih rezultatov.

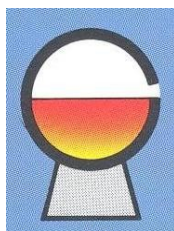


Slika 3.10: Torpedo vagon [40].

3.2.3 Osnovni oksidacijski postopek

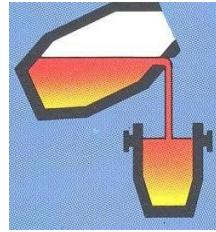
Proces predelave surovega železa v jeklo poteka v LD-konvertorju (Slika 3.11), ki se ga v nagnjenem položaju napolni z eno petino odpadnega železa in s staljenim železom iz torpedo vozila [11]. V zravnani LD-konvertor se od zgoraj z veliko hitrostjo vpiha (angl. *lance*) približno 98% čistega kisika [6], ki sproži v vroči talini nenadno reakcijo: nastane železov oksid (FeO), ki se hitro razširi skozi vročo talino. Zaradi dviga temperature na $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6] se razvije ogljikov monoksid, ki povzroči intenzivno vrenje in tako pospeši reakcijo prečiščevanja. Odpadno železo se stopi, vsebnost ogljika se v staljenem železu zmanjša, odstranijo se nezaželeni kemijski elementi in surovo železo se pretvori v jeklo.

Med postopkom vpihovanja, ki traja približno 20 minut [6], se dodaja apnenec za nastanek žlindre, da absorbira nečistoče, ki se pojavijo med procesom izdelave jekla. Nečistoče so lažje od staljene kovine in plavajo na vrhu. Odstranjuje se jih sproti.



Slika 3.11: LD-konvertor [40].

Pred koncem vpihovanja se preveri sestava staljenega jekla. V kolikor testni vzorci ne izkazujejo potrebnih kvalitiet, se jeklu dodaja predpisane zlitine. Homogenost staljenega jekla in zlitin se zagotovi z vpihovanjem argona ali dušikovega plina. Ko je postopek končan, se staljeno jeklo neposredno izlije (angl. *tapping*) v livarsko posodo. Na Sliki 3.12 je prikazano zlivanje staljenega jekla v livarsko posodo.



Slika 3.12: Zlivanje jekla v livarsko posodo [40].

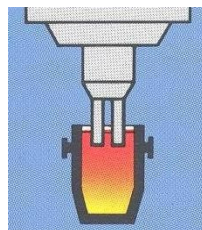
3.2.4 Sekundarni proces

Za izdelavo primerne jekla za valjanje je potrebno vsebnosti kemijskih elementov v jeklu z nadaljnjo predelavo in obdelavo znižati, da ustrezajo dovoljenim in zaželenim vrednostim. Proizvedeno jeklo vsebuje še nekaj preostalega železovega oksida in tudi vodika. Preiskave so pokazale, da prisotnost vodika v staljenem jeklu povzroči nastanek prečnih razpok (angl. *transverse fissure*) [6]. Prečne razpoke so tovarniška napaka, ki se kljub vsem nadzorom in ukrepom, tj. sušenjem materialov pred proizvodnjo, še vedno pojavlja. V preteklosti se je znižanje presežka vodika doseglo z nadzorovanim hlajenjem, v sedanjem času pa s postopkom vakuumskega razplinjevanja in/ali splakovanja z argonom.

3.2.4.1 Ruhrstahl-Heraeusov razplinjevalnik

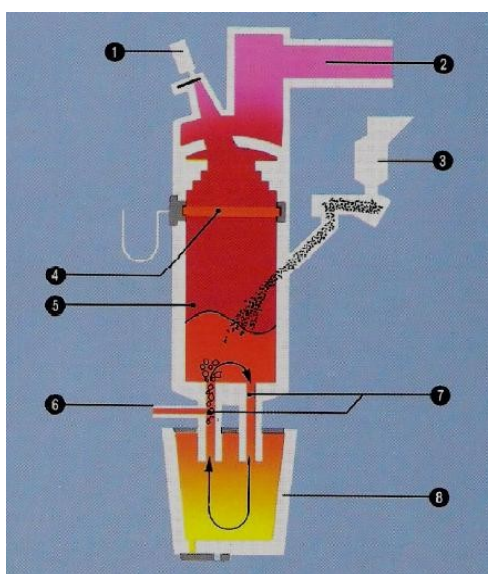
Vakuumska dekarbonizacija v Ruhrstahl-Heraeusovem (v nadaljevanju RH) razplinjevalniku je najbolj pogosto uporabljan vakuumski dekarbonizacijski postopek. Gre za pomemben metalurški proces, kjer se odvijajo kompleksne reakcije med staljenim jeklom, plini, žlindro, vsebovanimi tujki in ognjevzdržnimi materiali [41]. Poleg dekarbonizacije je postopek v RH namenjen tudi deoksidaciji in desulfurizaciji v vakuumu, odstranitvi dušika, učinkovitemu legiranju, hitri homogenizaciji jekla v livarski posodi in odstranitvi tujkov.

V livarsko posodo (Slika 3.13), ki služi zbiranju staljenega jekla, sta vstavljena dva cevasta podaljška. Na enem je nameščen dovod za vbrizgavanje inertnega plina. Da se staljeno jeklo razplini, morata biti konici cevastih podaljškov potopljeni v staljeno jeklo.



Slika 3.13: Livarska posoda z RH-razplinjevalnikom [40].

V enem od podaljškov se neprekinjeno vbrizgava inertni plin – argon (Slika 3.14, št. 6), da homogenizira temperaturo in kemične elemente. V tem podaljšku se raven staljenega jekla na račun zmanjšane gostote dviga. Po razplinitvi se nivo staljenega jekla dvigne v obeh podaljških, vendar ta nista v ravnovesju, ker teče staljeno jeklo iz prvega podaljška (kjer se je vbrizgavalo inertni plin) v drugega. Ko se neprekinjeno kroženje med vakuumsko in livarsko posodo sklene, je zaradi učinka delovanja vakuuma in mehurčkov argona, ki sprožita reakcijo vretja, vodik odstranjen iz kovine. Razplinjeno jeklo želene kakovosti se skozi drugi podaljšek vrne nazaj v posodo in s tem je postopek razplinjenja končan.



Slika 3.14: Prikaz RH-vakuumskega obrata [40].

(1: nadzorna kamera, 2: dodajanje plina, 3: dodajanje železovih zlitin, 4: grafitni grelni element, 5: vakuumsko posoda, 6: dodajanje argona, 7: vhodna in izhodna podaljška, 8: livarska posoda.)

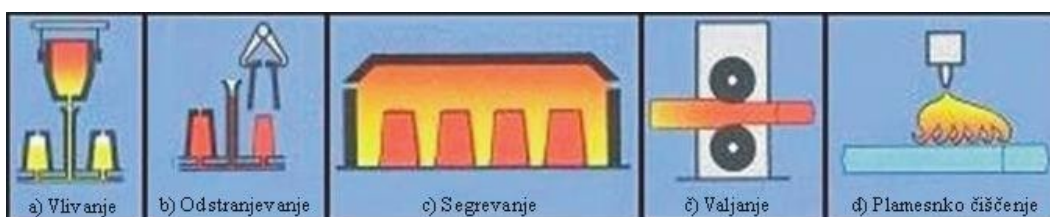
3.3 Vlivanje jekla

Vlivanje jekla je eden temeljnih postopkov pri izdelavi tirnice [15]. V nadaljevanju sta predstavljena tako tradicionalni kot tudi sodobni proizvodni postopek vlivanja jekla.

3.3.1 Tradicionalno vlivanje

Pri tradicionalni proizvodnji se staljena kovina vliva v ingote. Ingot je rezultat staljene kovine, vlite v standardno obliko kalupa pravokotnega prereza in ohlajene pod temperaturo strjevanja. Postopek vlivanj v ingote poteka po dveh metodah, in sicer od zgoraj ali od spodaj. Izbor metode je odvisen od številnih dejavnikov, tj. kakovostnega razreda jekla, namena uporabe, števila ingotov itd. Zaradi boljših površinskih rezultatov je postopek vlivanja od spodaj učinkovitejši [6].

Staljeno jeklo se skozi povezovalni kanal od spodaj sočasno vlije v kalupe (Slika 3.15 a), kjer se jeklo od zunaj proti sredini ohladi ter strdi. Ko so ingoti dovolj trdni, se kalupe odstrani (Slika 3.15 b) ter se jih prestavi v peč za segrevanje (Slika 3.15 c). Tam se jih segreva po celotni površini, da dosežejo enotno temperaturo (1180–1340 °C) [2, 6]. Ko je le-ta dosežena, sledi postopek valjanja (Slika 3.15 č), pri čem se formirajo kosi različnih dimenzij. Sledi plamensko grobo čiščenje (Slika 3.15 d), pri čemer se z vodnim curkom pod velikim pritiskom odstrani nečistoče (žlindro) z jeklene površine. Postopek vlivanja v ingote je prikazan na Sliki 3.15.



Slika 3.15: Shematski prikaz postopka tradicionalnega vlivanja [40].

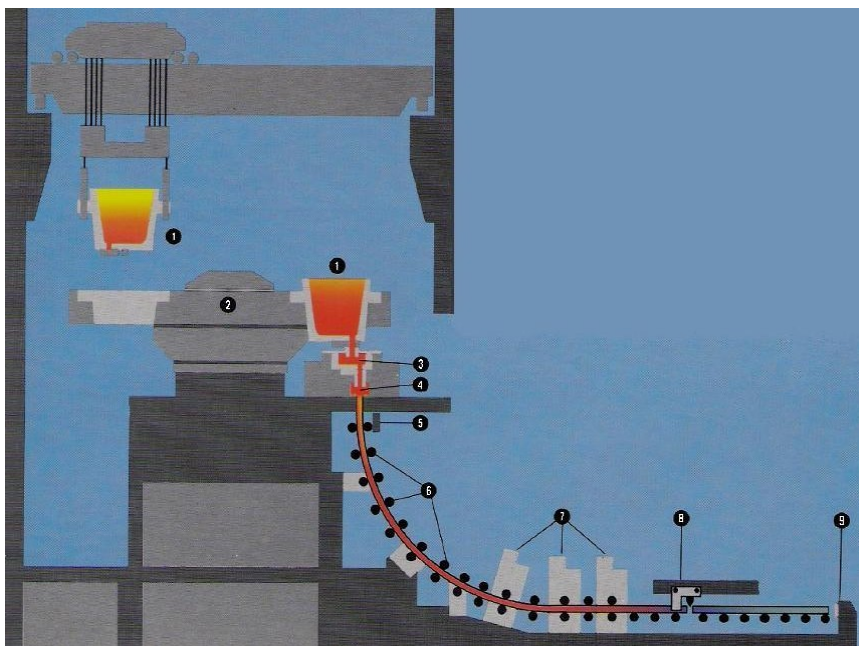
Postopek vlivanja v ingote se opušča zaradi velikih izgub energije, ki nastanejo pri dodatnih proizvodnih procesih, tj. ponovnih segrevanjih in ohlajanjih, ter zaradi pogostih napak v jeklu, ki nastanejo zaradi posledic hitrega strjevanja in ohlajanja [3].

3.3.2 Sodobni postopek vlivanja

Pri sodobnem postopku se med neprekinjenim procesom staljeno jeklo zlije neposredno v posebno posodo (angl. *ladle*) (Slika 3.16, št. 1). Posoda se z dvigalom avtomatizirano prenese na vrtljivo kupolo (angl. *turret*) (Slika 3.16, št. 2), kjer se nato namesti na izlivno mesto vlivnega stroja (angl. *casting machine*). Posoda ima na dnu nameščen lijakasto oblikovani nastavek z zapiralno napravo za uravnavanje pretoka. Staljeno jeklo se s konstantno in neprekinjeno hitrostjo izlije najprej v vmesno posodo (angl. *tundish*) (Slika 3.16, št. 3) in nato skozi drugi lijak v vodno hlajeni bakreni kalup škatlaste oblike (angl. *mould*) (Slika 3.16, št. 4). Lijak skrbi za stabilen ter neprekinjen tok in spodbuja izločevanje kisika [42].

V vodno hlajenem kalupu nastopi faza primarnega ohlajanja. Ko se delno strjeno jeklo zlije (hitrost valjev vzdržuje konstantni nivo zlitega jekla iz kalupa), elektromagnetni mešalniki (angl. *electromagnetic stirring*) (Slika 3.16, št. 5), ki so postavljeni tik pod kalupom, poskrbijo za izboljšanje kakovosti in homogenosti staljenega jekla, tj. izboljšajo kakovost zunanje ter notranje površine in izpopolnijo notranjo strukturo z zmanjševanjem vsebnost tujih delcev [43]. V naslednji fazi, tj. fazi sekundarnega ohlajanja (angl. *secondary cooling*) (Slika 3.16, št. 6), se po vročem jeklu z nizom nameščenih brizgalnih šob pod velikim pritiskom kontrolirano razpršuje voda. Jeklo se obneposrednem stiku z vodo zgosti, ohladi in strdi. Postopku strjevanja sledijo postopki izravnavanja,

plamenskega rezanja in žigosanja tirnice.



Slika 3.16: Shematski prikaz postopka neprekinjenega vlivanja [40].

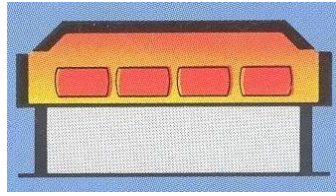
(1: posebna posoda, 2: vrtljiva kupola, 3: vmesna posoda, 4: kalup, 5: elektromagnetni mešalniki, 6: sekundarno ohlajanje, 7: izravnavanje, 8: plamensko rezanje, 9: žigosanje.)

Postopek neprekinjenega vlivanja zagotavlja optimalno kakovost končnega produkta in tudi preprečuje izgube energije, ki so pri tradicionalnem postopku izjemno velike [3]. Pri Steeluniversity pravijo, da z odpravo proizvodnih korakov ohlajanja in ponovnega segrevanja lahko zagotovimo 30 % manjše proizvodne stroške [44].

3.4 Valjanje

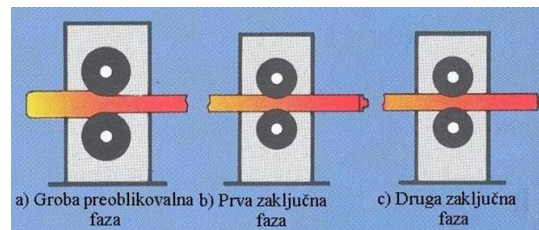
Valjanje je kontinuirano stiskanje materiala, pri katerem dobi tirnica svojo končno obliko. Obenem se formira prečni prerez tirnice. Valjanje koristno in učinkovito vpliva na lastnost tirnice, saj povzroči izboljšanje strukture zrn, uničenje škodljivih zrn (podolgovatih ali usmerjenih), homogenizacijo kovine in povečanje žilavosti ter duktilnosti.

Pred postopkom valjanja se polizdelke (angl. *bloom*) strokovno pregleda, z namenom odstraniti vse morebitne pomanjkljivosti. Sledi enakomerno segrevanje z vseh strani v pomičnih pečeh (angl. *walking – beam furnace*) (Slika 3.17) na temperaturo valjanja, ki znaša približno 1180–1340 °C [2, 6]. Kontrolirana temperatura zagotavlja ohranitev mehanskih lastnosti in dobro dimenzijsko natančnost. Postopek segrevanja traja približno dve do tri ure [45].



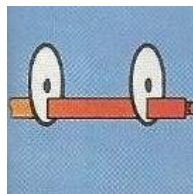
Slika 3.17: Enakomerno segrevanje [40].

Ko so polizdelki primerno toplotno obdelani, sledi formiranje oblike tirnice. Na Sliki 3.18 je shematski prikaz preoblikovanja tirnic. Najprej nastopa groba preoblikovalna faza (angl. *roughing mill*), pri čem se zmanjša velikost polizdelka. V prvi zaključni fazi (angl. *finishing stand 1*) se v nekaj prehodih formira približna oblika tirnice. V drugi zaključni fazi (angl. *finishing stand 2*) dobi tirnica svojo pravo obliko ter identifikacijsko oznako proizvajalca, oznako o kakovosti jekla in letnico proizvodnje. Ko je postopek valjanja končan, znaša temperatura tirnice okoli 800 °C [6].



Slika 3.18: Shematski prikaz preoblikovanja tirnice [40].

Sledi vroče rezanje tirnice (angl. *hot saws*) na predpisane dolžine (Slika 3.19) in v nadaljevanju postopek ohlajanja tirnice.



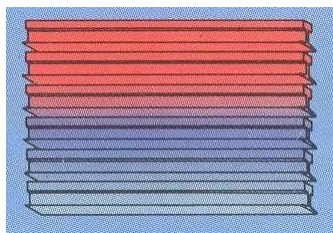
Slika 3.19: Vroče rezanje tirnice [40].

3.5 Ohlajanje

Namen kontroliranega postopnega ohlajanja je izboljšanje trdote tirnice in zmanjšanje vsebnosti vodika.

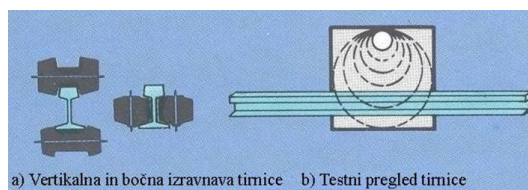
Med postopkom ohlajanja se odstranijo obloge s pomočjo vode pod velikim pritiskom (angl. *furnace scale*). Postopek ohlajanja traja toliko časa, dokler temperatura v tirnici ne pade na okoli 540 °C [2, 6]. Ohlajanje (angl. *walking – beam cooling bed*) poteka enakomerno z vseh strani (Slika 3.20), da se

prepreči škoda na površini tirnice, izkrivljanje in možnost pojava razpok [46]. Poleg tega se s kontroliranim postopnim ohlajanjem izboljša trdota tirnice in zmanjša vsebnost vodika.



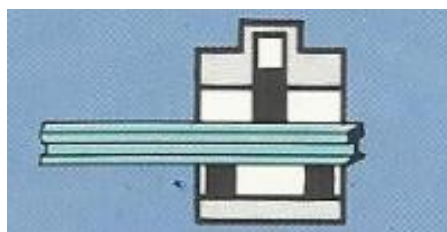
Slika 3.20: Postopno ohlajanje tirnice [40].

Ko so tirnice ohlajene, se jih z valji vertikalno in bočno izravna (angl. *roller straightener*) (Slika 3.21 a). Med postopkom izravnavanja se zmanjša vpliv zaostalih napetosti ter doseže ugodne notranje napetosti po vsem profilu tirnice. Po končanem izravnavanju sledi testni pregled (angl. *test center*) (Slika 3.21 b), pri katerem se preveri ravnost vozne površine, dimenzije in možnost pojava notranjih poškodb.



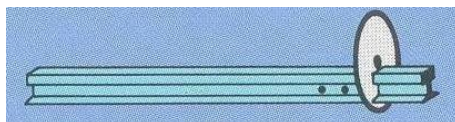
Slika 3.21: Shematski prikaz izravnavave in testnega pregleda tirnice [40].

Posebna pozornost je namenjena pregledu simetrije in višine tirnice, merjenju ravnosti vozne površine in prisotnosti morebitnih površinskih in notranjih poškodb. Prisotnost poškodb na površini tirnice se ugotovi s pomočjo avtomatskih optičnih kamer in namenskih senzorjev. Prisotnost notranjih poškodb se ugotovi z ultrazvočnimi preiskavami [47]. Tirnice se dodatno izravnavajo s horizontalnimi in vertikalnimi stiskalnicami (angl. *gag press*) (Slika 3.22).



Slika 3.22: Vertikalno in horizontalno stiskanje tirnice [40].

Proizvodni postopek se tako z rezanjem tirnice na naročene dolžine in vrtnjem lukenj konča (Slika 3.23).



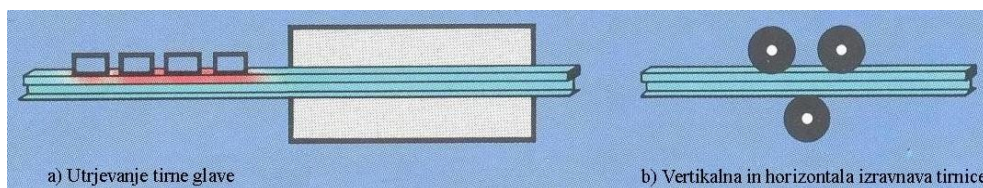
Slika 3.23: Rezanje na dolžine in vrtanje lukenj [40].

Zaradi boljše medsebojne usklajenosti (pri morebitnem kasnejšem varjenju) se tirnice še dodatno izravna (Slika 3.24).



Slika 3.24: Izravnavna tirnic [40].

Tirnice gredo skozi postopek utrjevanja tirne glave (angl. *head hardening*) (Slika 3.25 a), da se izboljša trdota glave tirnice in s tem poveča odpornost proti njeni obrabi. Tirnice se kasneje izravna v horizontalni in vertikalni smeri, kot je razvidno na Sliki 3.25 b.



Slika 3.25: Shemtski prikaz utrjevanja tirne glave in izravnavne tirnic [40].

Slika 3.26 prikazuje končni kontrolni pregled (angl. *final control*) in pripravo za skladiščenje oziroma odpošiljanje tirnic [48].



Slika 3.26: Shemtski prikaz končnega pregleda in skladiščenja tirnic [40].

3.6 Napake pri vlivanju v ingote

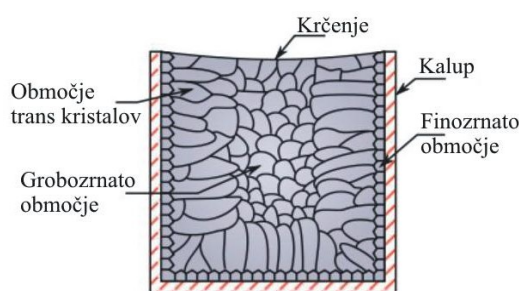
Predpogoj za brezhiben rezultat je kakovostno izdelan ingot, brez vseh votlin in odprtin, sestavljen iz enotnega materiala. Žal pa naravni procesi, ki vplivajo na strjevanje, delujejo proti tem zahtevam. Zato se napake v ingotu pojavljajo v obliki vrzeli (angl. *piping*), segregacije, votline (angl. *blow – holes*), podolgovatih struktur (angl. *columnar structure*) in notranjih razpok. Poleg omenjenih prištevamo

zraven še napake, nastale kot posledica nepravilnosti pri vlivanju (npr. prisotnost tujkov). Ker so napake sledljive, je mogoče v končnem proizvodu napake neposredno povezati s pomanjkljivostmi ingota. Prav zaradi vseh omenjenih pomanjkljivosti je tradicionalni postopek nadomestil postopek neprekinjenega vlivanja.

Vrzel v jeklu (angl. *piping*) je pogosta napaka, do katere pride pri vlivanju jekla v ingote. Nastane pri plastični deformaciji⁴ kovine zaradi takojšnjega strjevanja in ohlajevanja vlitega staljenega jekla v ingotih [3].

Ko se staljeno jeklo vlije v kalup (Slika 3.27), se zaradi stika s hladnimi stenami kalupa najhitreje ohladi prav ob stenah. Ohladitev je ob stenah kalupa zaradi velikega števila nastalih kristalnih kali največja, zato se strjevanje izvrši hitro (finozrnato območje) [49]. Ker se med hlajenjem staljeno jeklo krči, začne na površini hitro formirati zunanjo obliko. V notranjosti ingotov (v območju trans kristalov) je ohladitev zaradi manjšega števila nastalih kristalnih kali manjša, zato se jeklo ohladi in strdi šele proti koncu procesa. Kristalna zrna imajo zato podolgovato obliko, saj hitreje rastejo proti sredini odlitka.

V sredinskem delu odlitka je ohladitev najmanjša, saj so tam kristalna zrna zaradi velike hitrosti kristalizacije največja. Zaradi tega se jeklo v sredini posede in ne zapolni vseh praznih prostorov v ingotu (grobozrnato območje) [49]. Rezultat tega je, da se med valjanjem praznina v notranjosti ingota razširi in kovina nabrekne. Zato skoraj 10 % ingotov ni primernih za valjanje [3]. Ker pri postopku neprekinjenega vlivanja ni ingotov, se opisana napaka ne more zgoditi.



Slika 3.27: Velikost in oblika kristalnih zrn v ingotu [50].

Segregacija⁵ ali ločevanje je razlika v sestavi jekla, ki nastane v ingotu kot posledica:

- razlike med topnostjo plina v tekočem in trdnem jeklu,

⁴ Plastična deformacija je lastnost materiala oz. deformacija, ki po razbremenitvi ne izgine.

⁵ V trdnih raztopinah lahko atomi iz notranjosti trdnine ireverzibilno difundirajo proti površini in tvorijo novo površino, ki je lahko bistveno drugačna od notranjosti trdnine s spremenjeno površinsko energijo.

- hitrosti strjevanja jekla (pri višji hitrosti strjevanja jeklo ne segregira, pri nižji hitrosti jeklo segregira),
- velikosti ingotov (večji ingoti so v primerjavi z manjšimi nagnjeni k segregaciji, ker potrebujejo več časa za strjevanje).

Z namakanjem ingotov (pri visoki temperaturi) lahko zmanjšamo segregacijo jekla [51]. Votline (*angl. blow holes*) se v notranjosti jekla ustvarijo zaradi gibanja ujetega plina, ki nastane v ingotu med postopkom strjevanja jekla [51]. Z nadzorom razvijanja plinov med strjevanjem lahko pripomoremo, da se votline izoblikujejo le na površini ingota.

Notranje razpoke nastanejo zaradi trenja med kalupom in površino ingota. Sem štejemo prečne razpoke (nastanejo zaradi vzdolžnih napetosti na površini ingota), vzdolžne razpoke (nastanejo zaradi bočnih napetosti na površini ingota) in podpovršinske razpoke (nastanejo zaradi toplotnih stresov blizu površine) [51].

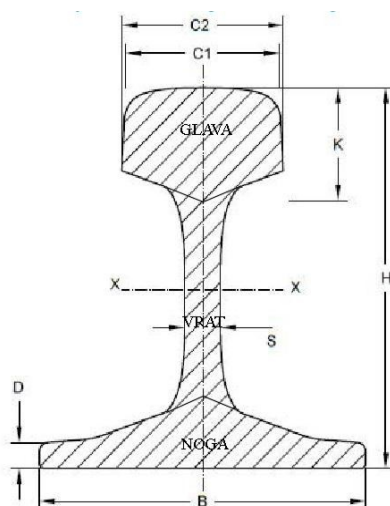
Prisotnost tujkov je posledica nepravilnosti pri vlivanju jekla. Tujki porušijo zveznost jeklene matrice in poslabšujejo izotropne⁶ lastnosti jekla [51].

⁶ Izotropija je lastnost snovi, da imajo materiali enake fizikalne lastnosti v vseh smereh.

4 TIRNICA

4.1 Elementi tirnice

Tirnica je v prerezu simetrično oblikovana in sestavljena iz treh glavnih elementov, tj. glave, vrata in noge (Slika 4.1). Elementi tirnice neposredno prevzemajo vertikalne in horizontalne sile, ki nastanejo med kolesom in tirnico pri vožnji kot posledica napak v tiru, sprememb smeri vožnje in vetra [1]. Glava tirnice mora biti dovolj visoka, da nosi in prenese obremenitve med obratovanjem; vrat tirnice mora biti dovolj debel, da prenese obremenitve med obratovanjem; noga tirnice mora biti dovolj široka, da prepreči prevrnitev ter porazdeli obtežbo preko pragov na tirno gredo. Debelina oziroma višina noge daje tirnici ustrezno prečno in vzdolžno togost ter stabilnost.



Slika 4.1: Glavni elementi tirnice [52].

Preglednica 4.1 vsebuje podrobnejše podatke o standardnih tirnicah in njihovih glavnih dimenzijah.

Preglednica 4.1: Podatki o standardnih tirnicah in njihovih glavnih dimenzijah [52].

Tip	H [mm]	B [mm]	C1 [mm]	C2 [mm]	S [mm]	K [mm]	D [mm]
49E1	149,00	125,00	67,00	70,00	14,00	51,50	10,50
54E1	159,00	140,00	70,00	72,20	16,00	49,40	11,00
60E1	172,00	150,00	72,00	74,30	16,50	51,00	11,50

4.1.1 Glava tirnice

Glava je del tirnice, ki neposredno prevzema obremenitve vlaka, zato se skozi čas zaradi prometne obtežbe obrablja. Povedano bolj natančno, zmanjšujeta se njena masa in višina, s tem posledično pa tudi vztrajnostni moment glave in cele tirnice. Glava tirnice je zaradi tega ojačena, tj. debelejša in

višja, kot je potrebno, da prevzame obremenitve kolesne dvojice. Glava predstavlja 43–47 % celotne površine prereza tirnice [53]. Oblikovana je tako, da se ujema s profilom kolesnega venca, v medsebojni interakciji delujeta kot enoten oscilatorni sistem. Obliko glavi daje kombinacija treh zakrivljenih radijev. Usklajena oblika in konveksno izbočena horizontalna vozna površina omogočata odlične vozne zmogljivosti in prispevata k zmanjšanju kontaktnih napetosti med kolesom in tirnico [3]. Dobra usklajenost zmanjšuje učinek ekscentrično obremenjenih koles na tirnico.

4.1.2 Vrat tirnice

Vrat tirnice je zasnovan tako, da zagotavlja ustrezno strižno trdnost ter ščiti pred zlomi v okolici lukenj in njenih stikov. Višina in debelina vrata imata pomembno vlogo pri prenosu obtežbe. Debelina vrata znaša $1/10$ [53] višine tirnice in se iz nevtralne osi povečuje proti glavi in nogi tirnice. Presek vrata predstavlja 18–25 % celotne površine tirnice [53]. Vrat je zaobljen proti glavi in nogi tirnice. Prehodi med vrat–glava in vrat–noga so oblikovani tako, da prevzamejo sile, ki nastanejo pri vožnji v krožnem loku. Sile (na teh mestih) v krožnem loku lahko predstavljajo tudi do 35 % osne obremenitve [3].

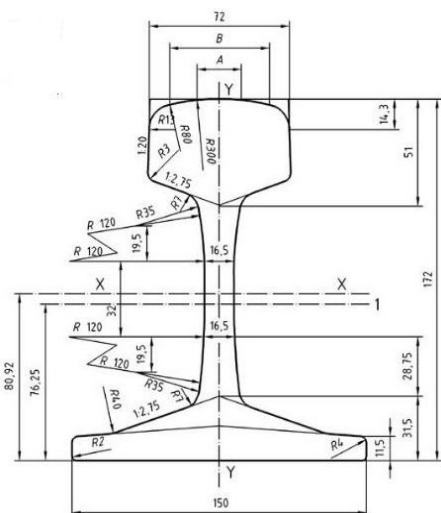
4.1.3 Noga tirnice

Noga tirnice je dovolj široka, da zagotavlja stabilnost vlaka proti prevrnitvi, omogoča večji odpor proti bočnim silam, povečuje odpornost zaradi vzdolžnih sil in znižuje pritiske, ki se prenašajo na pragove. Obenem pa je dovolj visoka, da jo lahko pritrdimo na pragove in povežemo v vzdolžni smeri. Presek noge predstavlja 33–37 % celotne površine tirnice [53]. Zgornji del noge je nagnjen po celi površini, spodnji del (noga temelja) je raven, kar omogoča prenašanje obremenitve tirnih vozil na pragove in tirno gredo. Noga tirnice ima največji vpliv na velikost vztrajnostnega momenta [53].

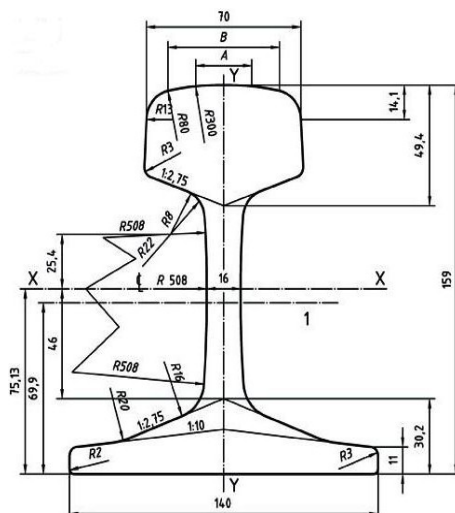
4.2 Oblike tirnice

Oblike tirnice, njene dimenzije in karakteristike morajo odgovarjati vsem pogojem, ki jim je tirnica izpostavljena. Na izbor oblike in vrste tirnice vpliva tudi maksimalna hitrost, ponavljajoča se obtežba (zaradi utrujenosti materiala) in osni pritisk, saj morajo tirnice zaradi intenzivne uporabe na progi služiti več let [53]. Pri izboru oblike tirnice in njenih ukrivljenosti (na prehodih med glavo in vratom ter vratom in nogo tirnice) imajo pomembno vlogo tudi velikosti in smeri sil (vertikalne in horizontalne), ki delujejo na/v tirnici [53].

Na omrežju SŽ je vgrajenih več tipov tirnic. Prevladujejo tirnice standardnih oblik 60 E1, 54 E1, E 49. Številke v oznaki tirnice pomenijo maso tirnice po tekočem metru. Na Sliki 4.2 in Sliki 4.3 sta prikazani tirnici oblik 60 E1 in 54 E1 in njihove geometrijske karakteristike.



Slika 4.2: Geometrijske karakteristike 60 E1 [54].



Slika 4.3: Geometrijske karakteristike 54 E1 [54].

Tirnice z večjo maso po tekočem metru so primerne za proge visoke intenzitete, tj. z večjo gostoto prometa, z večjimi osnimi obremenitvami in večjimi hitrostmi.

4.3 Karakteristike tirnice

Tirnice so sestavljene iz optimalnega razmerja jekla in z največjo možno togostjo, trdnostjo, trajnostjo, stabilnostjo ter učinkovitostjo, da se zagotovi neprekinjeno ravnost površine in ustrezno lateralno gibanje za smer kolesnih dvojic. Poleg naštetega je za nosilnost tirnice potreben ustrezen odpornostni moment W in vztrajnostni moment I , da se tirnica zoperstavlja vsem silam, ki delujejo nanjo [3]. Zaradi naštetega se od preseka tirnice enake mase išče čim večji odpornostni in čim večji vztrajnostni moment [53]. V Preglednici 4.2 so zbrani osnovni parametri tirnic, ki so najpogosteje uporabljeni na omrežju SŽ.

Preglednica 4.2: Osnovni parametri profilov tirnic v skladu s standardom EN 13674 – 1 [7].

Oblika tirnice	Masa G [kg/m]	Površina preseka A [cm ²]	Momenti		Indeksi		
			Odpornost W_x [cm ³]	Vztrajnost I_x [cm ⁴]	Stabilnost B/H	Učinkovitost W_x/G [cm ³ /kgm ⁻¹]	Togost I_x/G [cm ⁴ /kgm ⁻¹]
60 E1	60,34	76,86	335,5	3055	0,872	5,560	50,630
54 E1	50,81	68,55	276,4	2308	0,778	5,136	42,892
49 E1	49,43	62,97	240,0	1819	0,839	4,855	36,800

Kot je razvidno iz Preglednice 4.2, se tirnice razlikujejo po obliki, masi, površini preseka, momentih in indeksih. V naslednjih podpoglavjih so opisani posamezni parametri tirnic.

4.3.1 Togost

Togost tirnice je lastnost, ki pove, kako dobro tirnica vzdržuje svojo obliko pod vplivom sil. Togost tirnice določa razmerje med vztrajnostnim momentom I_x in težo tirnice G . Učinkovita in ekonomska zasnova tirnice zagotavlja največji vztrajnostni moment. Vztrajnostni moment je pokazatelj togosti tirnice in večji, kot je, bolj se tirnica zoperstavlja delovanju zunanjih in notranjih sil, ki delujejo nanjo. Navpična togost ima pomembno vlogo pri zmanjševanju upogiba tirnice in mora biti zadostna, da omogoči prenos obtežbe preko pragov na tirno gredo, stranska togost pa mora zagotavljati odpornost proti bočnim obremenitvam pod dinamično prometno obtežbo.

4.3.2 Trdnost

Trdnost tirnice je sposobnost, da obdrži svojo obliko, prostornino in vzdrži obremenitve brez odpovedi. Trdnost se odraža v njeni elastičnosti, zato mora učinkovito zasnovana tirnica zagotavljati najvišjo možno nosilno zmogljivost [3].

4.3.3 Trajnost

Trajnost tirnice je lastnost, ki se odraža v njeni obstojnosti. Na njeno obliko in življenjsko dobo posredno in neposredno vplivajo faktorji, kot so obraba na glavi tirnice in udrtine na vozni površini. Debelina glave je zasnovana tako, da omogoča zadostno rezervo v primeru vertikalne obrabe. Vozna površina in gornji rob tirnice (v nadaljevanju GRT) morata biti trdni, da se zagotovi daljša življenjska doba tirnice. Udrtine (angl. *butter*), ki nastanejo kot posledica neprekinjenega udarjanja kolesnih dvojic na stičišču tirnic, so odvisne od širine ter trdote glave tirnice, togosti in vrste spojnih delov ter kakovosti vzdrževanih stikov.

4.3.4 Odpornostni moment

Odpornostni moment vpliva na nosilnost tirnice in na obrabo glave tirnice. Odpornostni moment W_x in nosilnost tirnice določajo višina, širina in masa tirnice. Z večjim odpornostnim momentom se doseže zadostna nosilnost tirnice, ki zagotavlja varno odvijanje prometa kljub obrabi glave tirnice. Ker se tirnica lahko obrabi samo do dovoljene meje, predpisuje pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog maksimalno dovoljeno višinsko in bočno obrabo glave tirnice [55].

4.3.5 Vztrajnostni moment

Vztrajnostni moment vpliva na večjo trajnost in togost tirnice. Vztrajnostni moment določajo horizontalna in vertikalna os I_x in I_y , odpornostna momenta W_x in W_y ter površina prereza F . Zaradi večjega vztrajnostnega momenta tirnica bolje prenaša pritiske oz. se pritiski vlakovne kompozicije prenašajo na večjo dolžino, tj. večje število pragov. Pri neprekinjeno zavarjenih tirih (v nadaljevanju NZT) večji vztrajnostni moment ugodno vpliva na bočno stabilnost.

4.3.6 Stabilnost

Stabilnost tirnice je lastnost, ki pove, kako dobro tirnica prenaša obremenitev, da ohrani svojo prvotno konfiguracijo. Stabilnost določa razmerje med širino B in višino H tirnice.

4.3.7 Učinkovitost

Učinkovitost tirnice določa razmerje med odpornostnim momentom W_x in težo tirnice G .

4.4 Kakovost tirnice

Po evropskem standardu EN 13674 – 1 je za določanje kakovosti tirnic odločilna trdota vozne površine po Brinellu [7]. Tirnice se delijo na sedem kakovostnih razredov, ki so navedeni v Preglednici 4.3.

Preglednica 4.3: Kakovostni razredi v skladu s standardom UIC 860 R [56].

Kakovostni razred	Min. natezna trdnost [N/mm ²]	Območje trdote (HB)	Kemična sestava (kakovost)	Vrsta valjanih oznak
R200	680	200–240	C-Mn	Brez oznake
R220	770	220–260	C-Mn	=====
R260	880	260–300	C-Mn	=====
R260 Mn	880	260–300	C-Mn	=====
R320 Cr	1080	320–360	C-Cr	=====
R350 HT ⁷	1175	350–390	C-Mn, HT	=====
R350 LHT ⁸	1175	350–390	C-Mn, LHT	=====

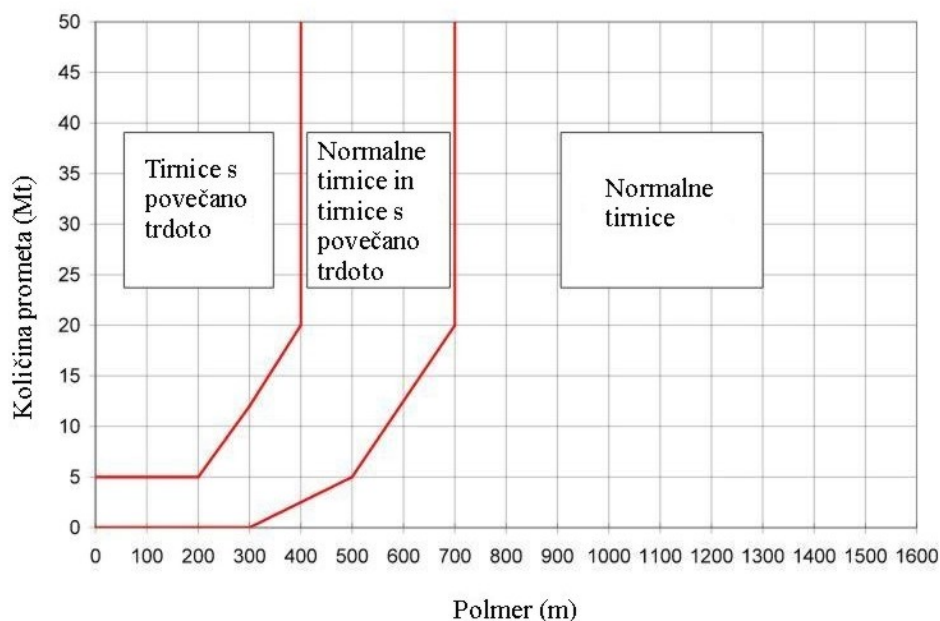
Iz Preglednice 4.3 je razvidno, da pri normalnih tirnicah, to so tirnice kakovostnega razreda R200, R220, R260 in R260 Mn, določa trdoto vozne površine delež ogljika in mangana. Tirnice kakovostnega razreda R320 Cr imajo zaradi večjega deleža kroma (Preglednica 2.1) večjo trdoto v primerjavi z normalnimi tirnicami. Tirnice kakovostnega razreda R350 HT in R350 LHT so narejene iz dveh materialov različnih trdnosti. Osnovni material za nogo in vrat tirnice je jeklo razreda R260, glava tirnice pa je toplotno obdelana, zato imajo te tirnice trdoto med 350–390 HB.

Kakovost novih tirnic mora na železniškem omrežju v RS po pravilniku o zgornjem ustroju ustrezati najmanj kakovostnemu razredu R260 z minimalno natezno trdnostjo 880 MPa [55]. V posamezne odseke prog se v RS vgrajujejo toplotno obdelane HSH-tirnice (angl. *Head Special Hardened*), kakovostnega razreda R350 HT. Odločitev o tem, kakšno tirnico izberemo za konkretni odsek proge,

⁷ HT = toplotno obdelana glava tirnice.

⁸ LHT = malo legirano jeklo in toplotno obdelana glava tirnice.

je odvisna od geometrijskih karakteristik proge, tj. od velikosti polmera krivine ter vzdolžnega nagiba nivelete in od obsega prometa [57], kar je razvidno iz Grafikona 4.1.



Grafikon 4.1: Kakovostni razred tirnice v odvisnosti od količine prometa in polmera krožnega loka [54].

4.5 Označevanje tirnice

Tirnice se med seboj ločijo po svojih oznakah, ki morajo biti v skladu s standardom EN 13674 – 1 odtisnjene na vratu vsake tirnice na razdalji 4 m [7]. Oznake morajo biti čitljive, v velikosti 20–25 mm [7]. Na tirnici je označeno ime proizvajalca oziroma identifikacijska oznaka valjarne, leto izdelave, oblika tirnice (tip), oznaka za vrsto jekla, oznaka za kakovost in smer valjanja. Na Sliki 4.4 je prikazan primer starejše tirnice, oblike S49, proizvedene v valjarni BVG Bochum leta 1963.



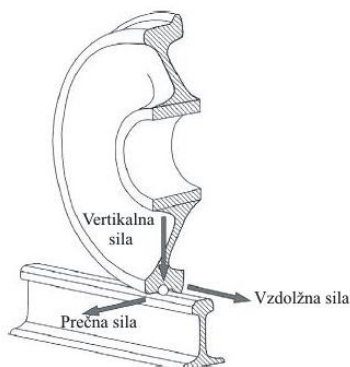
Slika 4.4: Označitev starejše tirnice [58].

4.6 Dolžine tirnice

Dolžine tirnice so v proizvodnji omejene tako z velikostjo proizvodnega obrata kot tudi z možnostjo transporta in pretvarjanja. V času stikovanih tirov so znašale dolžine tirnic 22,5 m, v novejšem času, tj. v času NZT, pa se izdelujejo tudi do 120 m dolge tirnice [1].

4.7 Sile na tirnici

Na vse elemente zgornjega ustroja in proge delujejo sile ne glede nato, ali se kompozicija premika ali miruje [53]. Sile v tirnici se delijo na vertikalne in horizontalne. Vertikalne sile se delijo na statične in dinamične, horizontalne pa na vzdolžne in prečne. Vzdolžno, prečno in vertikalno silo ter njihov vpliv na tirnico prikazuje Slika 4.5.



Slika 4.5: Vertikalna, prečna in vzdolžna sila [59].

Poleg omenjenih sil delujejo na tirnico še centrifugalne in torzijske sile. Centrifugalne sile se pojavijo pri prehodu kompozicije skozi krivino, torzijske pa zaradi gibljivih delov vozila, ki oscilirajo in prenašajo zasuke okoli svoje vzdolžne osi na kolesa in tirnice.

4.7.1 Vertikalne sile

Vertikalne sile, ki delujejo na tirnico, se delijo na statične in dinamične. Statične delujejo na tirnico v stanju mirovanja vlaka, dinamične pa v fazi gibanja vlaka.

4.7.1.1 Statične sile

V stanju mirovanja delujeta na tirnico zunanja vertikalna sila vlakovne kompozicije in notranja sila, ki nastane zaradi vpliva temperature. Zaradi temperaturnih sprememb so elementi na progi vedno v prenapetem stanju – ne glede nato, ali se promet odvija ali ne.

4.7.1.2 Dinamične sile

Pri premikanju kompozicije se statične sile dopolnjujejo z dinamičnimi komponentami, ki delujejo v različnih smereh. V horizontalni ravnini delujejo sile vzporedno in pravokotno na os tirnice, hkrati pa deluje še vertikalna komponenta teže vozila.

Dinamične sile so odvisne od položaja kolesne dvojice, ki je lahko direktno nad pragom (tirnica upogibno obremenjena) in/ali med pragovi (tirnica tlačno obremenjena). Delujoče sile, ki so spremenljivega značaja, so odvisne od velikega števila faktorjev, kot so na primer osne obremenitve

vozila, hitrost vlaka, kolesne dvojice, elementi zgornjega in spodnjega ustroja ter vrste in tip lokomotive oz. vagonov.

Vpliv dinamičnih sil je še posebej velik na tirih z deformacijo nivelete, na tirnicah s poškodovano vozno površino in z nepravilnostmi na glavi tirnice. Če na kratko povzamemo, nastanejo dinamične sile kot posledica naslednjih vplivov:

- nepravilnosti nivelete tirnice (nepodprti pragovi, nepravilno nadvišanje zunanje tirnice v krivini),
- sploščena kolesa,
- slabo vzmetenje,
- neenakomerno gibanje vozila (vijuganje, zibanje, nihanje, poskakovanje itd.).

Našteti vplivi lahko pripeljejo do situacije, da se statični pritisk v tirnici pri neugodnih razmerah podvoji, kar lahko povzroči različne učinke, od razpok do zlomov.

4.7.2 Horizontalne sile

Horizontalne sile delimo na prečne in vzdolžne sile.

4.7.2.1 Prečne sile

Prečne sile nastanejo zaradi izmeničnega naletavanja togih osi železniških vozil (tj. sinusoidnega gibanja kompozicije) kot posledica spremembe širine tirov, kolesnih dvojic ter medosnih razdalj podvozij lokomotiv in vagonov ter tudi obrabe kolesnega venca in notranjega roba glave tirnice, slabe pritrditve in temperaturnih sprememb. V krivini se prečne sile povečajo zaradi centrifugalne sile. Prevelike prečne sile, ki nastanejo v podvozju kompozicije, lahko privedejo do iztirjenja kompozicije. Ker se velikost prečnih sil težko točno izračuna, se za približek vzame 30–35 % osne obremenitve [53]. Sodobne metode merjenja so pokazale, da je omenjena vrednost dovolj dober približek resnične velikosti prečnih sil pri določanju njihovih vplivov na tirnico [53].

Napačno nadvišanje tirnice v krivini pripomore k obrabi vozne površine, in sicer višek nadvišanja povzroča večje sile na notranji tirnici, primanjkljaj nadvišanja pa na zunanji tirnici. V poletnem času lahko prečne sile zaradi naraščajočih temperatur dosežejo visoke vrednosti, kar povzroči izbočenja na tirnicah in ogrozi varnost prometa.

4.7.2.2 Vzdolžne sile

Vzdolžne sile nastanejo v smeri vožnje vzdolž tirnice ali v nasprotni smeri. V le-tej smeri nastanejo kot posledica vlečne sile ali premikanja kompozicije, v smeri vožnje pa nastanejo kot posledica zaviranja.

S spreminjanjem temperature tudi vzdolžne sile lahko dosežejo visoke vrednosti. Zaradi teh pride v poletnem času do izbočenja tira in iztirjenja. Z višanjem temperature se tirnice raztezajo, z zniževanjem pa krčijo. Ker je vzdolžna sila sorazmerna površini povprečnega preseka tirnice [53], utrpijo tirnice z večjo površino preseka večja raztezanja zaradi temperaturnih sprememb kot tirnice z manjšo površino preseka.

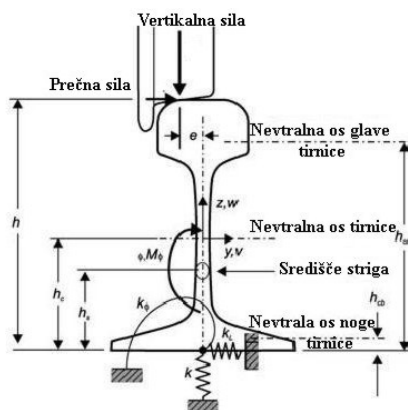
Zaradi povečane bočne odpornosti je pri klasičnem tiru potrebno paziti na dilatacijske stike, ki so šibke točke tirnice. Pri velikih krivinah se na pragove v NZT vgrajujejo kape, ki preprečujejo bočna premikanja pragov [53].

4.8 Napetosti v tirnicah

Napetosti, ki se pojavljajo v tirnicah, prispevajo k zlomom in napakam. Tirnica je izpostavljena upogibnim, strižnim, kontaktnim, rezidualnim ter toplotnim napetostim.

4.8.1 Upogibne in strižne napetosti

Upogibne in strižne napetosti nastanejo kot posledica velikih obremenitev vozil, to je maksimalnih osnih obremenitev (v Evropi se gibljejo med 21 in 25 ton, v Ameriki med 30 in 32,4 ton in Avstraliji okoli 37 ton [21]). Na stični točki med kolesno dvojico in tirnico (Slika 4.6) delujejo na tirnico vertikalne, bočne in strižne napetosti [21]. Zaradi vertikalne kolesne obtežbe se natezne vzdolžne napetosti pojavijo v nogi tirnice in na območju glava–vrat. Zaradi bočne kolesne obtežbe se natezne vzdolžne napetosti pojavijo na območju vrata in na prehodu med glavo in vratom tirnice. Če povzamemo na kratko, se tlačne napetosti pojavljajo večinoma v glavi tirnice, natezne napetosti pa v nogi tirnice. Bočne napetosti pa so tiste, ki prispevajo največji delež k zlomom. Na Sliki 4.6 so prikazane sile in momenti, ki delujejo na kontaktu med kolesom in tirnico.

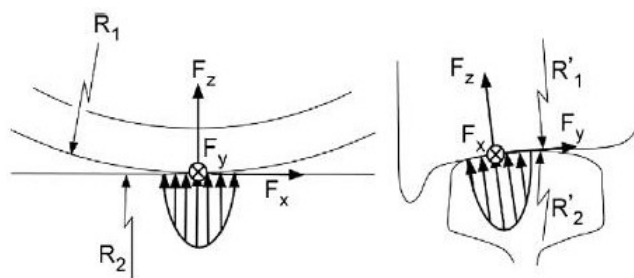


Slika 4.6: Sile in momenti na kontaktu kolo–tirnica [21].

Zaradi znatnega povečanja tlačnih napetosti pride do obrabe predvsem na glavi tirnice [21]. Čeprav obraba zmanjšuje vztrajnostni moment območja, ima zaradi oblike glave tirnice obraba le malo vpliva na napetost v nogi tirnice. To pa zato, ker se nevtralna os premakne nižje v tirnico. Ker so strižne napetosti glavni razlog napak na stikovanih tirnicah, tj. okoli odprtin na vratu, se na večini železnic vgrajuje tirnice v NZT.

4.8.2 Napetosti na kontaktu kolo–tirnica

Kontaktne napetosti so (povečane za statično in dinamično obtežbo) med kolesno dvojico in tirnico zelo visoke, saj je glava tirnice na kontaktu obremenjena upogibno, tlačno in torzijsko. Za primer, največje normalne tlačne napetosti lahko dosežejo 1500 MPa, medtem ko napetosti med kolesno dvojico in tirnico zlahka presežejo 4000 MPa, predvsem zaradi neskladja med njima ter kot posledica nepravilnosti na glavi tirnice ali zaradi nepravilnosti na samem kolesu (ploska ali ravna mesta) [21]. S pomočjo Hertzianove analize lahko smiselno predvidimo te napetosti [21]. K napetostim največ prispevajo sile zaradi obremenitve koles in sile na kontaktu med kolesno dvojico in tirnico (Slika 4.7), ki izhajajo iz gravitacije vozila (F_z), vleke vozila ali zaviranja (F_x) in bočnega vodenja (F_y) [19]. Kontaktne napetosti imajo velik vpliv na pojav napak, ki so posledica kotalnega kontaktnega utrujanja (angl. *rolling contact fatigue*, v nadaljevanju RCF) materiala na stiku med kolesom in tirnico.



Slika 4.7: Sile na kontaktu med kolesom in tirnico [59].

(F_z – gravitacijska sila, F_x – vzdolžna sila, F_y – prečna sila.)

4.8.3 Toplotne napetosti

Toplotne napetosti se pojavijo in razvijejo v notranjosti tirnice zaradi temperaturnih sprememb. Tlačne napetosti se formirajo poleti in v hudi vročini, natezne pa se formirajo v zimskem času ob ekstremno nizkih temperaturah. Ker se raztezanje pojavlja samo v vročih poletnih mesecih, so tirnice varjene pod pogoji, ki zagotavljajo, da so pod napetostjo večino časa. Tak način vgradnje zmanjšuje možnost nastanka izbočenja, vendar poveča tveganje za nenadni krhki zlom, še posebej v zimskih mesecih, ko so temperature nizke in natezne sile največje. Ker tlačne in natezne napetosti močno vplivajo na razvoj in rast razpok, to povečuje potrebo po inšpekcijskih pregledih [21].

Posebna pozornost je namenjena slabo vzdrževanim stikovanim tirnicam, ker se na teh mestih pojavijo velike vzdolžne napetosti. Namesto stikovanih tirnic zato tirnice varijo v NZT.

4.8.4 Zaostale napetosti

Do zaostalih napetosti pride v procesu izdelave in med izravnalnim postopkom. So rezultat proizvodnega procesa. Nastanejo med postopkom ravnanja z valji ali med postopkom utrjevanja glave tirnice. Pomembno vplivajo tako na strukturno in dimenzijsko stabilnost kot tudi na življenjsko dobo. Lahko nastanejo tudi na vseh zvarih kot posledica nepravilnega sproščanja napetosti v tirnicah med postopkom varjenja. Pojavljajo se lahko tudi kasneje med samo uporabo, še posebej v kontaktni conikolo–glava tirnice, kjer prihaja zlasti v zavojih do obrabe in plastičnih deformacij vozne površine. Zaostale napetosti lahko zaradi visokih notranjih napetosti v glavi tirnice povzročijo resne poškodbe, ki lahko prispevajo k rasti razpok. Če delujejo v kombinaciji z zunanjiimi statičnimi in dinamičnimi obremenitvami, pa lahko povzročijo večje poškodbe [60]. Odkrivanje zaostalih napetosti ni lahko, zato si pomagamo s pomočjo treh merilnih tehnik. Tradicionalne destruktivne metode (angl. *strain gages*) so relativno grobe in neprimerne zaradi nezaznavanja mikronapetosti. Semidestruktivne metode so pomanjkljive, zamudne in otežene zaradi neravne površine. Bolj priljubljene in razširjene so nedestruktivne metode (ultrazvok ali rentgenski žarki) [21].

4.8.5 Dinamični učinki

Statične sile se zaradi nepravilnosti in prekinitev med tirnico in kolesno dvojico znatno povečajo. Nepravilnosti na stikih in zvarih (posledica deformacije ali obrabe) lahko zaradi velikih hitrosti povzročijo velike dinamične sile. Največkrat nastanejo izpod koles nepravilnih oblik (ploščatih oblik). Glavni razlog takšnih nepravilnosti je zdrs kolesa, ki ga povzroči nenadna prekinitev vrtenja zaradi zaviranja, ki preseže trenje med kolesom in tirnico. Ob pogostejšem pojavljanju lahko povečajo rast razpok [21].

5 NAPAKE TIRNIC

Napake na tirnicah nastanejo zaradi intenzivne uporabe tirnic, surovega in neprijetnega okolja ter nekvalitetne izdelave. Tirnica je zaradi ponavljajočih se ciklov obtežbe dovzetna za utrujenost materiala⁹, kar lahko vodi do delne ali popolne odpovedi trdnosti. Velik delež k utrujanju materiala prispevajo osne obremenitve, ki so se v zadnjih desetih letih povečale za 10 ton (iz 22,5 na 32,5 tone) [61].

5.1 Razdelitev tirnih napak

5.1.1 Tipi tirnih napak

Napake se pojavijo naključno (na lokacijah in času) zaradi številnih vzrokov, ki lahko izvirajo iz postopkov izdelave, gradnje, vzdrževanja, utrujenosti materiala itd. Različni avtorji različno klasificirajo napake.

Olofsson in Nilsson [62] sta napake zaradi kotalnega kontaktnega utrujanja materiala (angl. *RCF*) razdelila na površinske in podpovršinske napake. Površinske napake nastanejo zaradi povečane gostote prometa in povečanih osnih obremenitev, medtem ko podpovršinske napake nastanejo kot posledica metalurških napak (kot na primer luščenje ter vzdolžne in navpične razpoke).

Cannon [21] je razdelil napake tirnic v tri kategorije:

- napake, ki izvirajo iz postopka izdelave tirnice,
- napake, ki izvirajo iz poškodb, nastale so zaradi neustreznega rokovanja, ravnanja, namestitve ali uporabe (ožganine, nastale zaradi vrtečih se koles),
- napake, ki nastanejo zaradi utrujenosti materiala.

Marais in Mistry [63] sta napake razvrstila v dve skupini:

- napake, ki pripadajo tirnim spojem (angl. *flash and thermit weld*),
- napake, ki so povezane s kakovostjo tirnice.

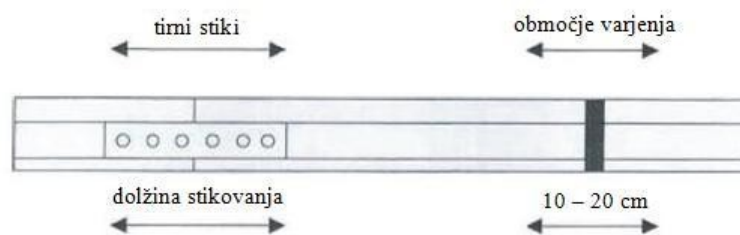
Kot poudarjajo avtorji, se napake delijo tudi na kritične in nekritične. Kritične so tiste, ki vplivajo na varnost železniškega prometa, nekritične pa nimajo vpliva na varnost in strukturno celovitost tirnice.

5.1.2 Lokacije tirnih napak

Napake se pojavljajo na celotni dolžini tirnice, in sicer na tirnih stikih, izven območja zvara/tirnega stika in v območju zvara. Na tirnih stikih se napake lahko pojavijo v območju spoj in v območju

⁹ Stanje materiala, ko zaradi dolgotrajnih in spreminjajočih se obremenitev ta izgubi trdnost.

zvara (približno 10–20 cm od zvara) [64]. Vsa preostala mesta štejemo za napake izven območja zvara in/ali tirnega stika. Shematski prikaz je predstavljen na Sliki 5.1.



Slika 5.1: Lokacije napak na tirnici [64].

Glede na prečni prerez lahko napaka nastane na glavi, vratu ali nogi tirnice (Slika 4.1).

5.1.3 Obsežnost tirnih napak

Glede na obsežnost lahko napake na tirnicah razdelimo v tri kategorije, in sicer:

- poškodbe,
- razpoke in
- zlomi.

Poškodovana tirnica je vsaka tirnica s poškodbo na površini, ki ni ne razpoka ne zlom. Razpokana tirnica je vsaka tirnica, ki ima vzdolž dolžine profila vidno eno ali več razpok, katerih napredovanje lahko pripelje do zloma. O zlomljenih tirnicah govorimo, ko se tirnica zlomi na dva dela, pri čemer povzroči njen odlomni del na vozni površini prelom, ki meri več kot 50 mm v dolžino in več kot 10 mm v globino [64].

Zlom tirnice lahko privede do iztiranja¹⁰ vozila, katerih posledice so lahko uničujoče in dolgotrajne z vidika smrti, poškodb, stroškov in zaupanja javnosti. Ker napake na tirnicah predstavljajo objektivno nevarnost, je potrebno zgornji ustroj prog (tirnice) graditi in vzdrževati tako, da se zagotovi varen in urejen železniški promet [55].

V obdobju med letoma 2005–2014, ko je bilo na železniškem omrežju v RS evidentiranih 954 napak na tirnicah, ni bilo zabeleženih iztirjenj vozil zaradi zloma tirnice [65].

5.1.4 Označevanje tirnih napak

Poškodovane tirnice imajo po standardu UIC 712 R tudi svoj naziv in šifro, ki jo sestavljajo štiri številke [64]. Vsaka številka opisuje točno določeno značilnost:

¹⁰ Iztirjenje je nesreča, v kateri železniško vozilo zapelje s svojih tirov.

- prva številka označuje lokacijo napake na tirnici (območje zvara/tirnega stika ali izven območja zvara/tirnega stika),
- druga številka označuje mesto napake na tirnici (glava, vrat, noga),
- tretja številka označuje vrsto napake v/na tirnici (vzrok in smer poteka napake v primeru zloma),
- četrta številka se uporabi po potrebi in omogoča nadaljnje razvrščanje na osnovi vrste napake.

V Preglednici 5.1 je prikazana razvrstitev in številčenje tirnih napak.

Preglednica 5.1: Seznam razvrstitve in številčenje napak na tirnicah po standardu UIC 712 R [64].

1 NAPAKE NA TIRNICAH V OBMOČJU TIRNEGA STIKA/ZVARA

10 Cela tirnica

100 Prečni zlom brez očitnega razloga

11/12 Glava tirnice

111 Prečna razpoka

112 Vzdolžna razpoka

113 Vzdolžna navpična razpoka

121 Površinska napaka

122 Luščenje vozne površine

123 Drobljenje

124 Udrtine vozne površine

125 Zdrs koles

13 Vrat tirnice

132 Vzdolžna razpoka

1321 Na prehodu vrat–glava

1322 Na prehodu vrat–noga

133 Vzdolžna navpična razpoka (angl. *piping*)

134 Korozija

135 Razpoka na tirnih stikih

139 Lap

15 Noga tirnice

153 Vzdolžna navpična razpoka

154 Korozija

2 NAPAKE NA TIRNICAH IZVEN OBMOČJA TIRNEGA STIKA/ZVARA

20 Cela tirnica

200 Prečni zlom brez očitnega razloga

21/22 Glava tirnice

211 Prečna razpoka

212 Vzdolžna razpoka

213 Vzdolžna navpična razpoka

220 Obraba:

2201 Rebričenje – kratki val

2202 Rebričenje – dolgi val

2203 Stranska ali bočna obraba

2204 Navpična obraba

221 Površinska napaka

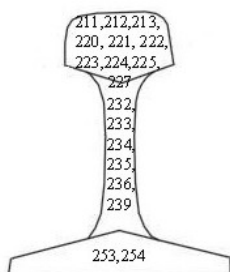
222 Luščenje

se nadaljuje...

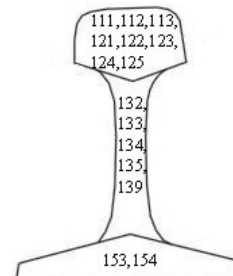
...nadaljevanje Preglednice 5.1

2221	Luščenje vozne površine
2222	Luščenje GRT
2223	<i>Head Check</i> (v nadaljevanju HC)
223	Drobljenje
224	Udrtine vozne površine
225	Zdrs koles
2251	Posamezni sledovi zdrsa koles
2252	Ponavljajoči sledovi zdrsov koles
227	Squat/razpoke in odtis vozne površine
23	Vrat tirnice
232	Vzdolžna razpoka
2321	Na prehodu vrat–glava
2322	Na prehodu vrat–noga
233	Vzdolžna navpična razpoka (angl. <i>piping</i>)
234	Korozija
235	Razpoke na tirnih stikih
236	Ostale diagonalne razpoke
239	Lap
25	Noga tirnice
253	Vzdolžna navpična razpoka
254	Korozija

Na Sliki 5.2 in Sliki 5.3 so prikazane lokacije napak, ki so zgodijo na/v tirnici. Napake so natančneje opisane in s slikami prikazane v nadaljevanju tega poglavja.



Slika 5.2: Napake izven območja tirnega stika/zvara



Slika 5.3: Napake v območju tirnega stika/zvara

5.2 Definicija in opis napak

Opisali bomo najznačilnejše vrste tirnih napak, ki se zgodijo na glavi, vratu ter nogi tirnice, njihove osnovne značilnosti ter lastnosti, vzroke nastanka. Poleg tega bomo omenili še metode, s katerimi jih odkrivamo. Zaradi lažjega razumevanja so na Sliki 5.4 podani nekateri izrazi za lažjo spremljavo spodaj opisanih tirnih napak.



Slika 5.4: Shematski prikaz desnega tira

5.2.1 Glava tirnice

Slika 5.5 prikazuje napake na glavi tirnice.



a) Območje tirnega stika/zvara

b) Izven območja tirnega stika/zvara

Slika 5.5: Napake na glavi tirnice

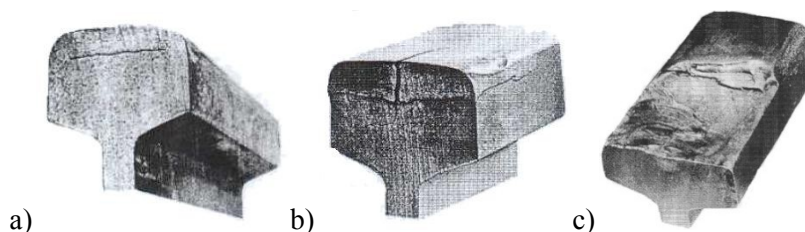
Prečne razpoke (111) se razvijejo v notranjosti glave kot posledica tovarniške napake. Izvor razpoke ni v središču glave tirnice. Zlom tirnice je neizbežen, ko doseže razpoka hkrati zunanji del glave in vrata tirnice. Območje zloma ima gladko, svetlečo obliko. Na Sliki 5.6 vidimo primer prečne razpoke. Ker se prečna razpoka lahko večkrat pojavi v isti tirnici, je potrebno imeti tirnice pod nadzorom. Razpoke se odkriva z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi. Pri ponovnem odkritju prečnih razpok v tirnici istega ulitka je potrebna takojšnja menjava tirnice in ultrazvočna preiskava.



Slika 5.6: Primeri prečnih razpok [64].

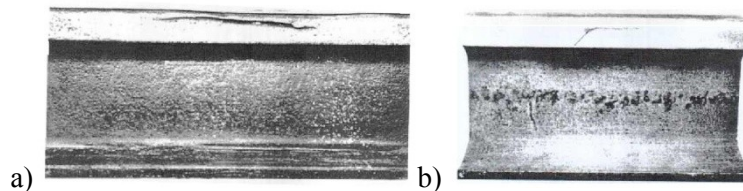
Vzdolžna razpoka (112) je posledica tovarniške napake, začne se razvijati v notranjosti glave tirnice in poteka vzporedno z vožno površino. Za razpoko je značilno postopno ločevanje zgornjega dela glave tirnice (Slika 5.7 a). Majhne razpoke, ki se pojavijo na eni ali obeh straneh glave tirnice ter v področju dilatacije, včasih spremljajo tudi navpične razpoke (Slika 5.7 b). Posledica razpok je razširitev vozne

površine, ki lahko v poznejši fazi pripelje do preloma (Slika 5.7 c). O prelomu govorimo, kadar je razkol na glavi tirnice globlji od 10 mm in daljši od 50 mm. Vzdolžne razpoke se odkriva z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi ter s testiranjem s kladivom.



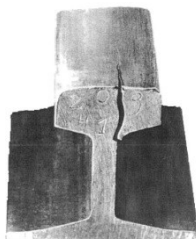
Slika 5.7: Primeri vzdolžnih razpok [64].

Vzdolžna razpoka (212) glave tirnice je posledica tovarniške napake. Razpoka poteka vzporedno z vozno površino in postopoma ločuje zgornji del glave tirnice (Slika 5.8 a). Prepoznavna je po odtisu na vozni površini, ki je značilne temne barve. Razpoka je vidna tudi na zunanji strani glave tirnice na razdalji približno 15 milimetrov od tekalne površine (Slika 5.8 a). Če se razpoka razširi navzdol, lahko pripelje vse do zloma (Slika 5.8 b). Na mestu zloma ima tirnica značilen temni obliž, preostali del zloma pa ima jasen in kristalen videz. Vzdolžno razpoko se odkriva z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi.



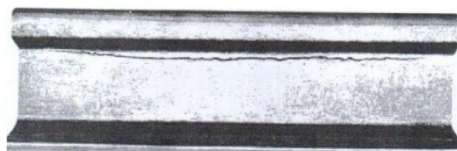
Slika 5.8: Primer prečnih razpok [64].

Vzdolžno navpična razpoka (113) glave tirnice je posledica tovarniške napake, ki se širi vzporedno z ravnino vrata tirnice in teži razdeliti glavo tirnice na dva dela (Slika 5.9). Ko razpoka doseže vozno površino, je prepoznavna po črni črti in razširitvi glave tirnice. Vzdolžne navpične razpoke se odkriva z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi ter testiranjem s kladivom.



Slika 5.9: Vzdolžna navpična razpoka [64].

Vzdolžna navpična razpoka (213) je posledica tovarniške napake, ki se razvija vzporedno v ravnini vrata tirnice in teži razdeliti glavo tirnice na dva dela. Prepoznavna je po odtisu črne črte na vozni površini, razširitvi glave tirnice in po vidnih razpokah na območju vrat–glava (Slika 5.10). Odkriva se jo z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi ter s testiranjem s kladivom.



Slika 5.10: Vz dolžna navpična razpoka [64].

Obraba (220) lahko v času razvoja predstavlja enega izmed spodnjih primerov:

- Rebričenje – kratki val (2201)

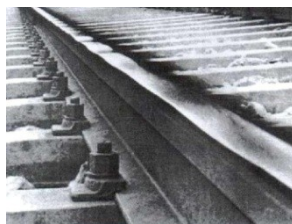
Rebričasta obraba je posledica prometne obtežbe, za katero so značilni periodični valovi na vozni površini (Slika 5.11). Val se običajno giblje v zaporedju svetlih grebenov in temnih vdolbin v dolžini med 3 in 8 cm. Rebričasto obrabo se odkrije z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi ter z opazovanji na podlagi posnetkov, narejenih s posebnimi vozili. Standard UIC 712 R priporoča brušenje tirnic, ko grbine vplivajo na podvozje vlaka in/ali udobje potnikov, ter v primerih, ko povzročijo preseganje določene ravni hrupa.



Slika 5.11: Primer obrabe s kratkim valom [64].

- Rebričenje – dolgi val (2202)

Rebričasta obraba nastane zaradi prometne obtežbe. Pri obrabi z dolgim valom ni razlik v videzu med grebeni in vdolbinami, ker je značilen odtis vozne površine neenakomeren in manj izrazit glede na idealni premočrtni profil. Val se običajno pojavi na notranjih krivinah in se giblje na dolžini med 8 in 30 cm (Slika 5.12). Napako se odkriva z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi ter z opazovanji na podlagi posnetkov, narejenih s posebnimi vozili. Standard UIC 712 R priporoča brušenje tirnic, ko grbine vplivajo na podvozje vlaka in/ali udobje potnikov, ter v primerih, ko povzročijo preseganje določene ravni hrupa.



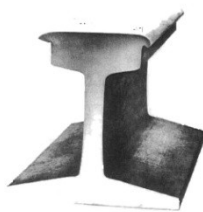
Slika 5.12: Primer obrabe z dolgim valom [64].

- Bočna obraba (2203)

Bočna obraba nastane v krivini na zunanji strani tirnice zaradi pritiskov sil kolesnega obroča. Bočno obrabo se odkrije z vizualnimi opazovanji in z merjenjem obrabe. Standard UIC 712 R priporoča nadzor bočne obrabe, kakovostno mazanje in merjenje.

- Prekomerna navpična obraba (2204)

Prekomerna navpična obraba je posledica prometne obtežbe, ki nastane zaradi sil voznega parka ter se razvija v odvisnosti od prometne obremenitve. Če prekomerna obraba povzroči prelom na oslabljenih delih tirnice, je potrebno preveriti, ali izhaja iz druge napake. Prekomerno obrabo se ugotovi na osnovi vizualnih pregledov in z merjenjem obrabe.

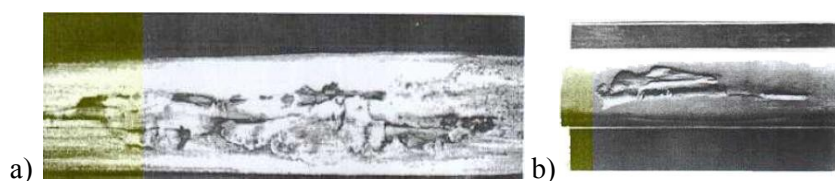


Slika 5.13: Primer navpične obrabe [64].

Površinske napake (121, 221) so posledica tovarniške napake, ki so v začetku nevidne oz. komaj vidne. Razvijejo se šele po nekem časovnem intervalu glede na prometno obremenitev. V času razvoja lahko predstavljajo enega izmed spodnjih primerov:

- Luskavost (2211)

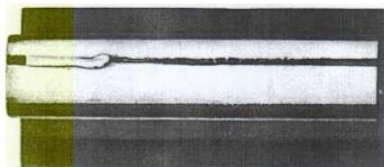
Zaradi tovarniške napake ter prometne obremenitve se tanke kovinske luske odcepijo od tekalne površine (Slika 5.14 a) in postopoma povzročijo do nekaj milimetrov globoke vdolbine na vozni površini (Slika 5.14 b).



Slika 5.14: Primer luskavosti [64].

- Dolgi žleb (2212)

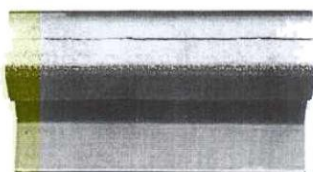
Zaradi tovarniške napake ter prometne obremenitve se del kovine približno enakomernega prereza odlomi stran od vozne površine (Slika 5.15). Dolgi žleb lahko seže tudi do nekaj metrov v dolžino, pri čemer globina ne presega nekaj milimetrov.



Slika 5.15: Primer dolgega žleba [64].

- Filiform (2213)

Filiform je tovarniška napaka – odtis, ki ne presega 2–3 mm v globino (Slika 5.16). Zaradi prometne obtežbe in posledično njene obrabe odtis (angl. *filiform*) postopoma izginja iz vozne površine, vendar ne, kadar nastopa v kombinaciji z luskavostjo.

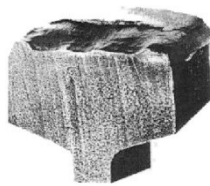


Slika 5.16: Filiform [64].

Filiform se odkrije z vizualnimi pregledi. Če žlebovi niso pregloboki, je napako mogoče odpraviti z brušenjem in preplastitvijo.

Luščenje vozne površine (122) glave tirnice je posledica prometne obtežbe. Do luščenja pride na zunanji strani glave tirnice v območju dilatacije¹¹ nekaj milimetrov pod vozno površino. Na območju tirnih stikov se lahko formira majhen rob, kjer pride do rahlega drobljenja tirnice, kar v kasnejši fazi lahko pripelje do odloma (Slika 5.17). Luščenje se odkriva z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi ter s testiranjem s kladivom. Če popravila luščenja ni mogoče urediti s preplastitvijo, je tirnico potrebno zamenjati.

¹¹ Dilatacija je prostor med dvema tirnicama, ki je namenjen predvidenemu širjenju in raztezanju zaradi temperaturnih sprememb.

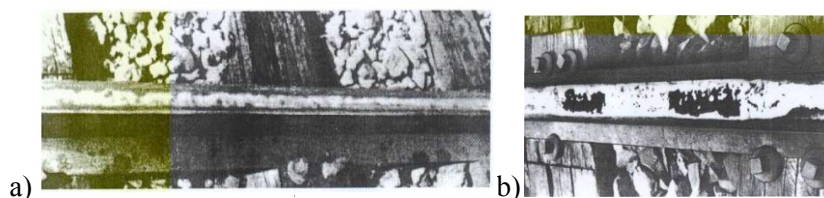


Slika 5.17: Primer luščenja vozne površine [64].

Luščenje (222) vozne površine lahko v času razvoja predstavlja enega izmed spodnjih primerov:

- Luščenje vozne površine (2221)

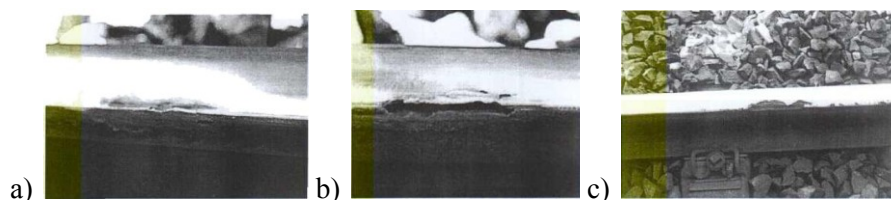
Luščenje, ki nastane kot posledica deformacije vozne površine (Slika 5.18 a), je lahko do nekaj milimetrov globoko (Slika 5.18 b). Ker luščenje ni osamljena napaka, se pogosto pojavlja na več območjih. Luščenje vozne površine se odkrije z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi.



Slika 5.18: Primer luščenja vozne površine [64].

- Luščenje GRT (2222)

Luščenje GRT je posledica prometne obtežbe. Sledovi luščenja so razporejeni po zunanji strani tirnice po celotni širini glave tirnice (Slika 5.19 a). Na mestih razpoke je značilen nastanek roba (Slika 5.19 b in Slika 5.19 c). Ker so notranje tirnice v krivinah podmazane (zaradi preprečevanja bočne obrabe), na teh mestih ne pride do pojava luščenja. Napako se odkrije z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi.

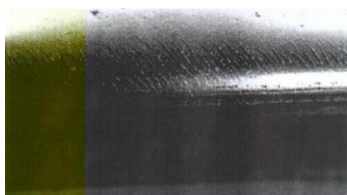


Slika 5.19: Primer luščenja GRT [64].

- HC (2223)

HC je skupina drobnih površinskih napak, posledica prometne obtežbe, ki se pojavlja v krivinah GRT (polmer loka med 1000 m in 1500 m) zaradi višjih raztezkov. Razdalje med razpokami se gibljejo od 1 milimetra do nekaj centimetrov, odvisno od lokalnih razmer in kakovosti jekla. HC razdelimo na:

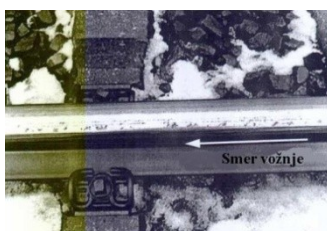
- stabilizirani in pravilni HC (Slika 5.20).



Slika 5.20: Stabilizirani in pravilni HC [64].

- HC z razpokami.

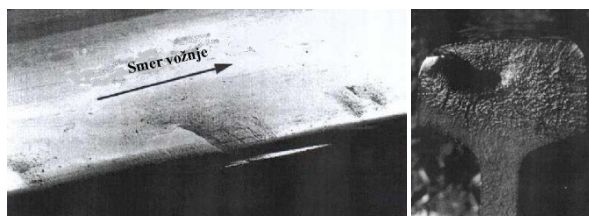
Razpoke potekajo znotraj glave tirnice glede na kot, ki je med 10 in 15 stopinjami. Razpoke lahko sežejo do globine nekaj milimetrov (Slika 5.21). Do luščenja pride, ko se razpoke, ki napredujejo vzporedno z vozno površino, skupaj združijo na GRT.



Slika 5.21: HC z razpokami [64].

- HC-razpoka.

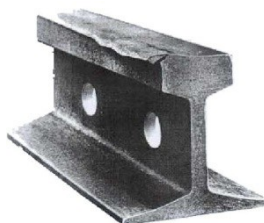
HC-razpoka se pojavi na krivini glave tirnice kot dolga razpoka temne barve, ki jo spremlja majhna jamica, ki se konča na vrhu glave tirnice (Slika 5.22). Vozna površina je pogosto razširjena. Ob rednem ponavljanju lahko povzroči večkratne zlome v dolžini več metrov, ki so kot taki še posebej nevarni. HC-razpoke se odkriva z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi. Z brušenjem se lahko včasih prepreči oziroma odloži luščenje GRT.



Slika 5.22: Primer HC-razpoke [64].

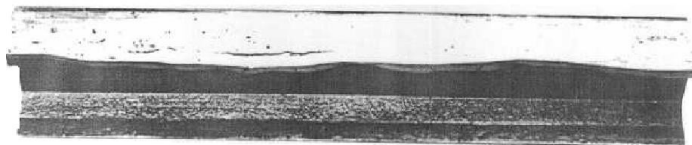
Drobljenje (123) glave tirnice je posledica prometne obtežbe, zaradi česar se zniža vozna površina ter razširi tekalna plast (Slika 5.23). Rob, ki se formira na bočni strani glave tirnice, se lahko ob

ekstremnih primerih odlomi stran od tirnice. Drobljenje se odkriva z vizualnimi pregledi. Po potrebi se lahko rob pobrusi ali preplasti.



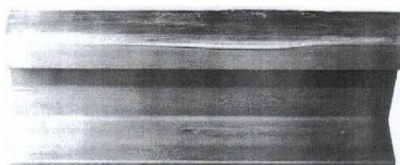
Slika 5.23: Primer drobljenja [64].

Drobljene (223) nastane zaradi prometne obtežbe, ko kolesna dvojica izpodriva stranski del tirnice, pri čemer se na zgornjem zunanjem delu glave oblikuje rob (Slika 5.24). Drobljenje se pojavlja na notranjih tirnicah v krivinah z manjšimi radiji. Ker se lahko rob razširi po celotni dolžini tirnice, je velika verjetnost, da ga kolesna dvojica postopoma odlomi stran od glave tirnice. Drobljenje se odkrije z vizualnimi pregledi. Priporoča se brušenje roba.



Slika 5.24: Primer drobljenja [64].

Udrtine vozne površine (124, 224) so tovarniška napaka, ki se pojavi na glavi tirnice. Na vozni površini jih spremlja kratka udrtina (Slika 5.25), ki nastopa običajno v kombinaciji z razširjeno kolesno dvojico. Natančen izvor udrtin se težko takoj prepozna. Udrtine se odkriva z vizualnimi pregledi.



Slika 5.25: Primer udrtine vozne površine [64].

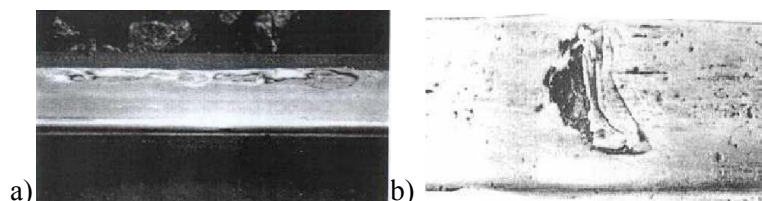
Zdrs kolesa (115, 225)

Napake na tirnicah, ki nastanejo kot posledica zdrsov koles, delimo na naslednje zdrse:

- Posamezni zdrsi (2251)

Posamezni zdrsi na glavi tirnice nastanejo zaradi prometne obtežbe, natančneje zaradi zdrsa kolesne dvojice. Sloj plasti lahko v vodoravni in prečni smeri izgine ali se razvije naprej, in sicer:

- vodoravno v glavo tirnice, kjer se ne razvija v globino, ampak pod vplivom ponavljajoče se prometne obtežbe postopoma povzroča sledove v vozni površini (Slika 5.26 a in Slika 5.26 b).



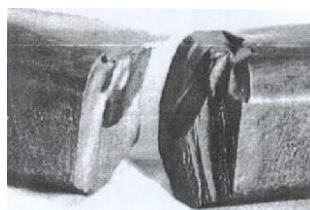
Slika 5.26: Primera sledov na vozni površini [64].

- prečno v glavo tirnice, kjer notranja razpoka napreduje proti vratu tirnice in je odtis vozne površine brez sprememb (Slika 5.27).



Slika 5.27: Primer vozne površine brez sprememb [64].

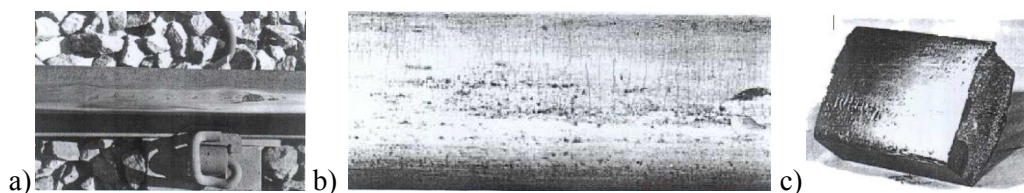
Če notranja razpoka doseže površino tirnice, vedno vodi do zloma (Slika 5.28). Zdrse se odkriva z vizualnimi pregledi. V kolikor tirnice niso preveč obrabljene, se jih lahko popravi s preplastitvijo. Ko popravilo zaradi večjega števila zdrsov ni več mogoče ali ko postanejo zdrsi škodljivi za vzdrževanje omrežja, se tirnice zamenja.



Slika 5.28: Primer zloma tirnice zaradi zdrsa [64].

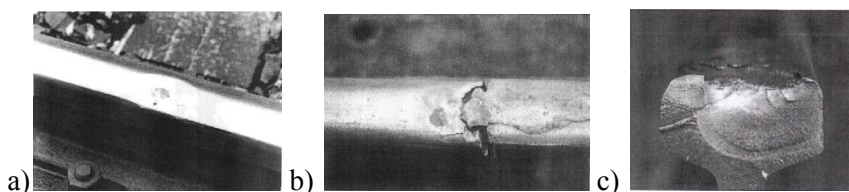
- Ponavljajoči zdrsi (2252)

Ponavljajoči zdrsi nastanejo na glavi tirnice zaradi prometne obtežbe. Na odsekih in bližinah stop signalov, kjer se pojavljajo sledovi zdrsov pri izpeljavi, prevzame vozna površina značilni rebričasti videz (Slika 5.29 a). Ta fenomen je značilen zaradi serije drobnih razpok na vozni površini, ki segajo globoko v notranjost tirnice (Slika 5.29 b). Zaradi globine razpok se občutno poveča krhkost tirnice, še posebej znatno v hladnem vremenu, kar lahko pripelje do zloma tirnice (Slika 5.29 c). Ponavljajoče zdrse se odkrije z vizualnimi pregledi, pri čemer je potrebno imeti pod nadzorom vsako tirnico, na kateri je površina glave rebričasta.



Slika 5.29: Primeri napak posledice zdrsov koles [64].

Squat (227) nastane na glavi tirnice zaradi prometne obtežbe. Squat je na vozni površini videti kot razširjeni črni madež, kjer ga spremljajo razpoke v obliki črke V ali krožnega loka (Slika 5.30 a). Razpoke se širijo pod plitvim naklonom znotraj glave. Ko dosežejo globino 3–5 mm, se širijo prečno navzdol in povzročijo zlom tirnice (Slika 5.30 b in Slika 5.30 c). Squati so še posebej nevarni zaradi večkratnih zlomov. Pojavljajo se naključno in v velikem številu na alumotermitskih¹² zvarih, rebričastih površinah ter tudi na krivinah GRT v območjih HC. Odkrivamo jih z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi.



Slika 5.30: Primeri squatov [64].

5.2.2 Vrat tirnice

Slika 5.31 prikazuje napake na vratu tirnice.

¹² Alumotermitsko varjenje je postopek varjenja s taljenjem, ki se sprošča s pomočjo energije kot toplota pri eksotermni reakciji med čistim aluminijem in železovim oksidom.



a) Območje tirnega stika/zvara

b) Izven območja tirnega stika/zvara

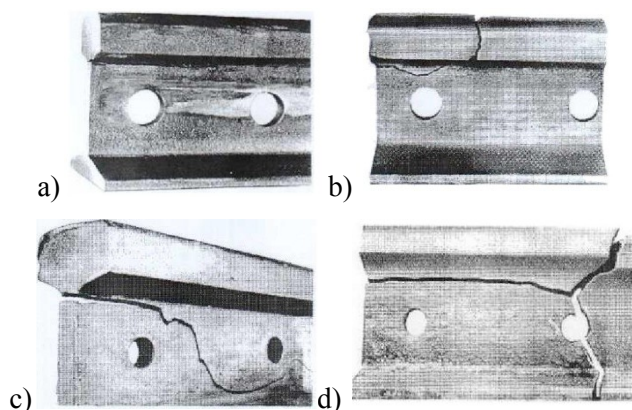
Slika 5.31: Napake na vratu tirnice

Vzdolžna vodoravna razpoka (132, 232) se pojavi na vratu tirnice v območju na prehodu vrat–glava in/ali na prehodu vrat–noga tirnice.

- Območje vrat–glava (1321)

Vzdolžna razpoka na območju vrat–glava teži k ločitvi glave od vrata tirnice. Sprva potekajo razpoke na prehodu vrat–glava vzporedno (Slika 5.32 a), v območju lukenj se lahko razvijejo navzgor (Slika 5.32 b) ali navzdol (Slika 5.32 c) ter hkrati navzgor in navzdol (Slika 5.32 d). V vseh primerih razpoka na prehodu vrat–glava pripelje do zloma tirnice.

Vzdolžne vodoravne razpoke se odkriva z vizualnimi pregledi (odstranitev vzdolžnega pritrdilnega pribora – spojki) in ultrazvočnimi pregledi ter testiranji s kladivom.

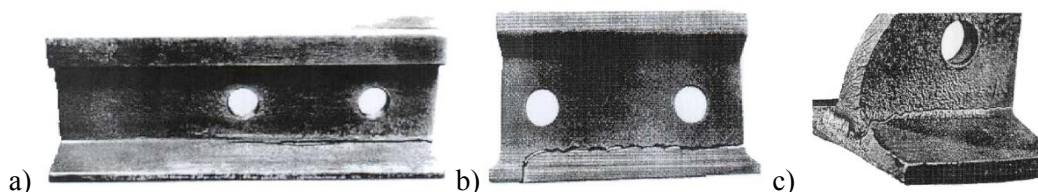


Slika 5.32: Vzdolžne razpoke na prehodu vrat–glava [64].

- Območje vrat–noga (1322)

Vzdolžna razpoka na območju vrat–noga teži k ločitvi noge od vrata tirnice (Slika 5.33 b). Sprva potekajo razpoke vzporedno na območju stičišča med vratom in nogo tirnice (Slika 5.33 a), če pa se zakrivijo navzdol ali navzgor, pripeljejo do zloma tirnice (Slika 5.33 c). Napako se odkrije z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi. Pri vizualnem ogledu je potrebno odstraniti vezni plošči na obeh

straneh vrata tirnice (2 ravni spojki).

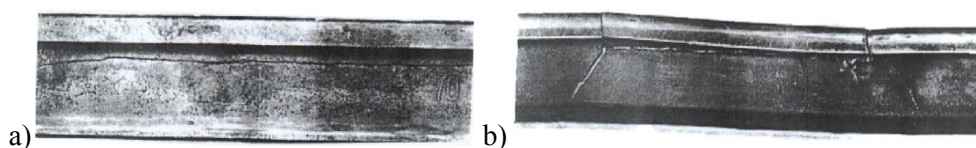


Slika 5.33: Vzдолžne razpoke na prehodu vrat–noga [64].

Vzдолžna razpoka (232) se pojavi na vratu tirnice v območju na prehodu vrat–glava in/ali na prehodu vrat–noga tirnice.

- Območje glava–vrat (2321)

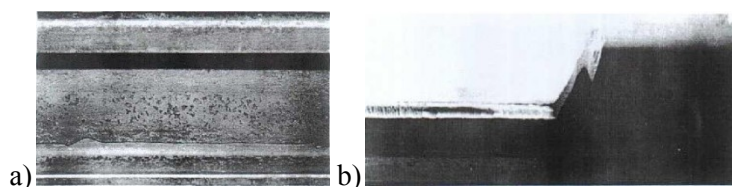
Vzдолžna razpoka na območju glava–vrat je posledica tovarniške napake. Razpoka poteka vzporedno na območju prehoda med vratom in glavo tirnice (Slika 5.34 a). Ko razpoka napreduje, se utegne zakriviti navzgor ali navzdol (Slika 5.34 b), kar pripelje do popolnega zloma. Napako se odkrije z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi.



Slika 5.34: Vzдолžne razpoke na prehodu glava–vrat [64].

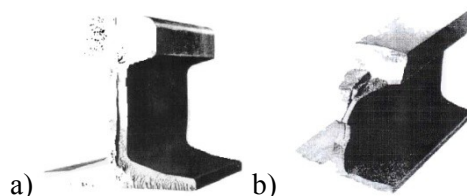
- Območje vrat–noga (2322)

Vzдолžna razpoka na območju vrat–noga je napaka, ki poteka vzporedno na prehodu vrat–noga (Slika 5.35 a). Ko razpoka napreduje, se lahko zakrivi navzgor ali navzdol (Slika 5.35 b) in v vseh primerih pripelje do zloma tirnice. Napako se odkrije z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi.



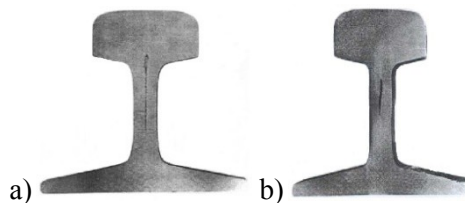
Slika 5.35: Vzдолžne razpoke na prehodu vrat–noga [64].

Vzdolžna navpična razpoka (133) na vratu tirnice je tovarniška napaka, znana pod imenom *piping*; zanjo je značilna vertikalna diskontinuiteta po dolžini tirnega vrata. *Piping* lahko v kombinaciji z/ali brez druge napake povzroči zlom tirnice (Slika 5.36 a in Slika 5.36 b). V izjemnih primerih se lahko okoli spojnih odprtin na obeh straneh tirnega vrata pojavi nabreklost, ki povzroči razpokanost vozne površine. Razpoke se odkriva z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi.



Slika 5.36: Vz dolžna navpična razpoka [64].

Vzdolžna navpična razpoka (233) na vratu tirnice je tovarniška napaka, za katero je značilna vzdolžna navpična razpoka v vratu tirnice (Slika 5.37 a in Slika 5.37 b). Če se pojavlja v kombinaciji z drugo napako, povzroči zlom. V izjemnih primerih lahko opazimo nabrekliho na obeh straneh vrata tirnice, ki se kombinira z rahlo nabrekliho vozne površine pod pravim kotom. Napaka se odkrije z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi, pri čemer se je potrebno osredotočiti na nabreklino v vratu.



Slika 5.37: Vz dolžne navpične razpoke v vratu tirnice [64].

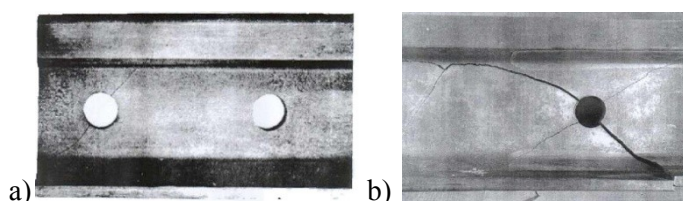
Korozija (134, 234) je kompleksni proces, ki nastane na vratu tirnice zaradi prometne obtežbe ter delovanja različnih kemičnih snovi v zraku in vodi (Slika 5.38). Največkrat se pojavi na vratu tirnice, zlasti v predorih ter na nivojskih prehodih. Če se zaradi korozije zmanjša debelina vrata ter posledično oblika profila, lahko povzroči zlom tirnice. Korozijo se odkrije z vizualnim pregledom. Po odstranitvi je potrebno opraviti občasne meritve debeline vrata. Potrebno je odstraniti vsako tirnico, kjer se debelina vrata prekomerno zmanjša.



Slika 5.38: Primer korozije [64].

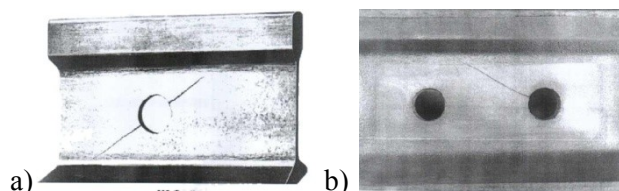
Razpoke na tirnih stikih (135, 235)

Razpoke na tirnih stikih (135) na vratu tirnice nastanejo zaradi prometne obtežbe; napredujejo iz lukenj za spojne vijake (Slika 5.39 a) ter se razvijajo pod kotom 45 stopinj v značilne zvezdaste oblike. Če razpoke napredujejo v prej opisanem vrstnem redu, lahko pride do zloma (Slika 5.39 b). Ker je verjetnost pojava razpok v veliki meri odvisna tudi od kakovosti vrtanja, se zmanjšata nastanek in razvoj razpok z uporabo posebnih tehnik v kombinaciji s kvalitetno vrtalno površino. Po predhodni odstranitvi spojnk na tirnem vratu se prisotnost morebitnih razpok odkriva z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi.



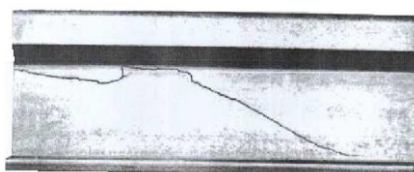
Slika 5.39: Razpoke na tirnih stikih [64].

Razpoke na tirnih stikih (235) na vratu tirnice nastanejo zaradi prometne obtežbe, na vratu tirnice se širijo od robov lukenj naprej pod kotom 45 stopinj (Slika 5.40 a in Slika 5.40 b). Verjetnost pojava te vrste razpok je v veliki meri odvisna od kakovosti vrtanja. Kakovostna površina in uporaba posebnih tehnik vrtanja znatno zmanjšata možnost zloma. Razpoke se odkriva z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi.



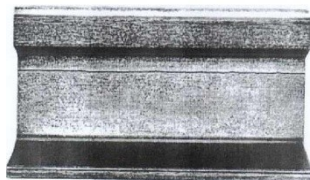
Slika 5.40: Razpoke na tirnih stikih [64].

Ostale diagonalne razpoke (236) na vratu tirnice so posledica tovarniških napak, kjer je k razvoju in širjenju razpok pripomoglo nekvalitetno valjanje. Razpoke, ki težijo k ločitvi glave ali noge tirnice od vrata tirnice, se lahko širijo navzgor in navzdol vzdolž radija ter vzdolž krivin (Slika 5.41). Odkriva se jih z vizualnimi in ultrazvočnimi pregledi.



Slika 5.41: Ostale diagonalne razpoke [64].

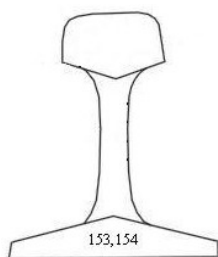
Lap (139, 239) je posledica tovarniške napake, ki nastane na vratu tirnice med proizvodnim procesom valjanja (ravna črta je vzporedna osi valjanja) kot presežek kovine na območju vrat–glava oziroma vrat–noga tirnice (Slika 5.42). Vse tirnice iz istega kalupa so lahko predmet enake napake, kar je potrebno upoštevati pri nadzoru. Lap se odkriva z vizualnimi pregledi.



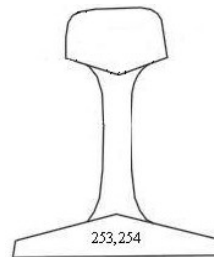
Slika 5.42: Slika redke tovarniške napake [64].

5.2.3 Noga tirnice

Slika 5.43 prikazuje napake na nogi tirnice.



a) Območje tirnega stika/zvara



b) Izven območja tirnega stika/zvara

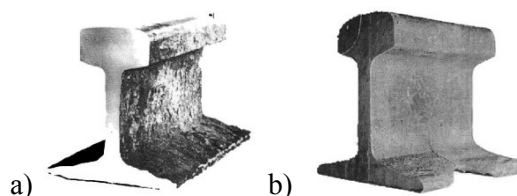
Slika 5.43: Napake v nogi tirnice

Vzdolžna navpična razpoka (153, 253) je posledica tovarniške napake, ki nastane na/v nogi tirnice med proizvodnim procesom valjanja. Razpoka ima sprva obliko majhne vzdolžne črte, ki se nahaja na srednjem delu spodnje strani stopala tirnice. Zaradi prometne obtežbe se lahko razvije v razpoko (Slika 5.44 c). V hladnem vremenu lahko razpoka povzroči nenadni zlom tirnice. Zlom je na splošno zelo poševen, posebej na vratu, zato se vzdolžno razpoko odkrije šele, ko že pride do zloma (Slika 5.44 b). Ker se razpoka lahko pojavi na več mestih iste tirnice, je potrebno pred vgradnjo biti še posebej pozoren na tirnice iz istega kalupa. V kolikor se take tirnice odkrijejo, jih je potrebno odstraniti. Razpoke te vrste se odkrije z vizualnimi pregledi.



Slika 5.44: Vz dolžna navpična razpoka na nogi tirnice [64].

Korozija (154, 254) v nogi tirnice nastane zaradi prometne obtežbe in se pojavi v predorih ter na nivojskih prehodih (križiščih) kot posledica delovanja kemičnih snovi v zraku, vodi ter zaradi elektrokemičnih procesov v naravi. Rja se postopoma lomi od noge in zmanjšuje debelino noge tirnice (Slika 5.45 a in Slika 5.45 b), zaradi česar pride do zloma tirnice.



Slika 5.45: Korozija v nogi tirnice [64].

Nadaljnji zlomi lahko izvirajo tudi iz majhnih razpok, ki so locirane na spodnji strani stopala tirnice, kot je na primer nenaden zlom v obliki polmeseca (Slika 5.46). Nadaljnje zlome se odkriva z vizualnimi pregledi, pri čemer se vsako tirnico, katere profil noge je neobičajno zmanjšan, nemudoma odstrani.



Slika 5.46: Primer zloma v obliki polmeseca [64].

5.3 Pregled nesreč

V nadaljevanju bomo na kratko opisali dva primera nesreč, nastalih zaradi iztirjenj. V prvem primeru je bil vzrok iztirjenja vlaka posledica že obstoječih napak v tirnicah (RCF), v drugem primeru pa je bil vzrok posledica frakture kovinske pnevmatike na hitrem vlaku ICE 1.

5.3.1 Hatfield

Oktobra leta 2000 se je na progi London–Leeds v bližini Hatfielda zgodila železniška nesreča, ki je bila posledica napak in slabega stanja tirnic. Vlaku je pri veliki hitrosti iztiril v krivini zaradi zloma zunanje tirnice [66]. Raziskave so pokazale, da so v območju stika med kolesno dvojico in tirnico obstajale številne razpoke na vozni površini. Zaradi nesreče je bil sprožen strogi inšpekcijski program, ki je pokazal, da so bile tirnice na omenjenem odseku v zelo slabem stanju [66].

Vzrok za nesrečo je bil RCF, ki se je pojavil v območju med stikom kolesne dvojice in tirnice. V premeru območja, ki ni bil večji kot 0,7 milimetrov [67], so se ustvarile sile glede na intenzivnost

kontaktnega pritiska in povzročile površinske poškodbe na tirnici (razpoke na GRT ali na glavi tirnice). Ugotovljeno je bilo, da so bile razpoke v začetni fazi majhne, ko pa so dosegle približno 30 mm v dolžino, je bil zlom tirnice zelo verjeten [67].

Ker se bile razpoke najdene bliže sredini tirnice, so najprej sklepali, da so za nesrečo krive lažne dinamične sile med kolesno dvojico in tirnico [67]. Zaradi razpok na gornjem robu glave tirnice se je kasneje vendarle izkazalo, da je bil zlom bistveno kompleksnejši. Dodatne raziskave so pokazale, da so na območju stika med kolesno dvojico in tirnico že obstajale številne razpoke, ki so prodrle vse do vznožja tirnice, zato je tirnica na dolžini 30 m enostavno razpadla [67].

V raziskavah, ki so po nesreči zajemale omrežja prog v Veliki Britaniji, so ugotovili, da se v zavojih polmera približno 1500 m, tj. v območju med kolesno dvojico in višjo zunanjo tirnico, zaradi presežka sil pojavlja predvsem RCF [67]. Raziskave so pokazale tudi, da se RCF v ravnini pojavijo običajno v povezavi s kretnicami in križanji.

5.3.2 Eschede

Junija leta 1998 se je na progi Hannover–Hamburg v bližini Eschede zgodila najhujša železniška nesreča v novejši zgodovini Nemčije, ko se je hitri vlak vrste ICE 1 pri veliki hitrosti zaradi zloma kolesa iztiril in trčil v cestni nadvoz, ki se je nato zrušil nanj [68]. Raziskave so pokazale, da je bil vzrok za nesrečo posledica frakture kovinske pnevmatike in serije dogodkov, ki so se odvijali le nekaj minut pred usodnim iztirnjenjem vlaka [68, 69, 70].

Približno 6 km pred nesrečo je na kolesu zaradi ponavljajočih se cikličnih deformacij prišlo do frakture materiala, zaradi česar se je del odlomljenega kolesa zarinil v potniško kabino, preostali pa je segal ven in je oviral vožnjo [69, 70].

Približno 200 m pred nesrečo se je štrleči del kolesa na vagonu številka tri zataknil ob kretnici [69, 70]. Tirnico je dvignilo v vlak, ta se je pri hitrosti 200 km/h dvignil in iztiril. Vlak je trčil v cestni nadvoz, ta se je zrušil in padel na vlak, kamor so naleteli in trčili še preostali vagoni [68, 70].

Raziskave so pokazale, da so bila na vlakih ICE 1 prvotno nameščena monoblok kolesa, tj. kolesa, ki so narejena iz enega kosa [69]. Zaradi glasnosti in pritožb potnikov v jedilnem vagonu so bila zamenjana z drugimi kolesi, ki so bila narejena iz dveh delov, tj. kovinske pnevmatike in osnovnega kolesa, ki ga je obkrožala 20 mm [69] debela guma, ki je skrbela za blaženje. Ta kolesa so rešila vprašanje vibracije pri potovalni hitrosti, niso pa bila testirana pri veliki hitrosti, vse dokler se ni pripetila nesreča. Po nesreči so bila na vlake ICE 1 ponovno nameščena monoblok kolesa [69].



Slika 6.3: Razdelitev železniškega omrežja po sekcijah za vzdrževanje prog v RS.

Dolžine glavnih in regionalnih prog ter dolžine enotirnih in dvotirnih prog, za katere so zadolžene posamezne sekcije, so prikazane v Preglednici 6.1.

Preglednica 6.1: Dolžine glavnih in regionalnih prog ter dolžine prog po številu tirov, ločene po SVP [72].

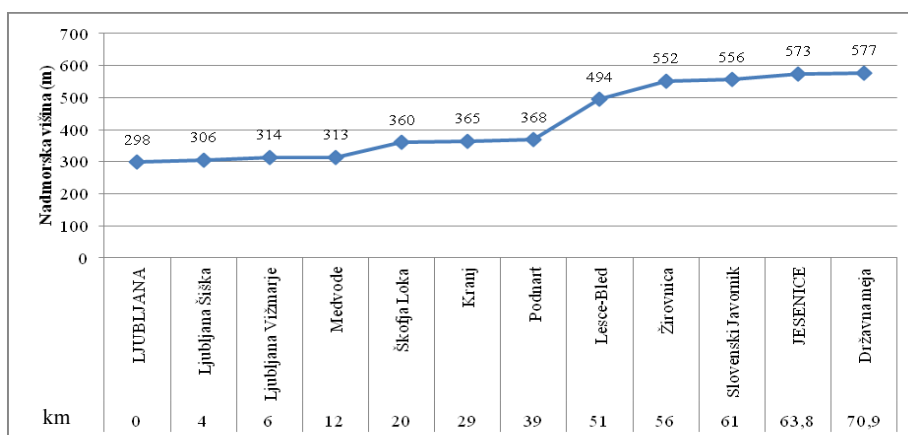
SVP	Glavne proge (G)		Regionalne proge (R)		Dvotirne proge (D)		Enotirne proge (E)		Skupaj (G + R)	Skupaj (D + E)	Delež prog
	km	%	km	%	km	%	km	%			
Ljubljana	135,1	22	237,3	40	71,3	22	301,1	34	372,4	372,4	31
Postojna	194,8	32	163,7	27	116,6	35	241,9	28	358,5	358,5	29
Maribor	156,3	25	110,9	18	18,7	6	248,5	28	267,2	267,2	22
Celje	126,3	21	88,8	15	124	37	91,1	10	215,1	215,1	18
Skupaj	612,5	100	600,7	100	330,3	100	882,9	100	1213,2	1213,2	100

6.1.4 Glavne proge

- Ljubljana–Jesenice

Glavna železniška proga Ljubljana–Jesenice je enotirna proga dolžine 63,8 km, ki omogoča maksimalno osno obremenitev 22,5 t [72, 74]. Ta proga je najbolj obremenjena proga v RS. Njena izkoriščenost je 98% [74]. Prepustna moč proge znaša 76 vlakov na dan [74].

Grafikon 6.1 predstavlja podolžni profil proge med Ljubljano in Jesenicami.



Grafikon 6.1: Podolžni profil proge Ljubljana–Jesenice

Iz Grafikona 6.1 vidimo, da poteka trasa na dolžini 30 km, tj. od Ljubljane do Kranja, v vzponu pretežno ravninskega terena z maksimalnim 10‰ vzponom med Medvodami in Škofjo Loko [75]. Od Podnarta naprej se proga vzpenja vse do Slovenskega Javornika in ne presega 16 ‰ [75], po manjšem spustu (6 ‰) [75] se proga do Jesenic zopet dvigne. Enotirna proga med Ljubljano in Jesenicami, ki vse od zgraditve ni doživela bistvenih sprememb, predstavlja zaradi vožnje vlakov po istem tiru v obeh smereh ozko grlo omrežja.

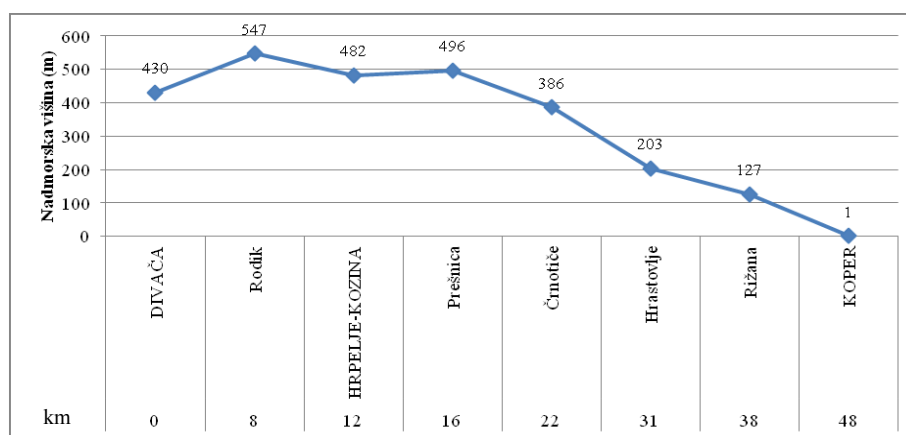
Preglednica 6.2: Prikaz nagibov na progovnih odsekih Ljubljana–Jesenice [75].

Odsek	Ljubljana	Šiška	Vižmarje	Medvode	Škof. Loka	Kranj
Km	0	4	6	12	20	29
Vzpon [%]	/	3	5	3	10	6
Padec [%]	/	0	0	4	0	7
Odsek	Podnart	Lesce-Bled	Žirovnica	Slo. Javornik	Jesenice	d. m.
Km	39	51	56	61	63,8	70,9
Vzpon [%]	4	16	15	14	13	0
Padec [%]	0	0	0	6	1	21

- Divača–Koper

Glavna železniška proga Divača–Koper je enotirna proga dolžine 48 km, ki omogoča maksimalno osno obremenitev 22,5 t [72, 74]. Proga je ena izmed najbolj obremenjenih in maksimalno izkoriščenih progovnih odsekov v RS (96 % od Divače do Prešnice in 92 % od Prešnice do Kopra) [74]. Po progi se ob enem prepelje 56 % celotnega pretovora v koprskem pristanišču [76]. Prepustna moč proge med Divačo in Koperom znaša 72 vlakov na dan [74].

Grafikon 6.2 predstavlja podolžni profil proge med Divačo in Koperom.



Grafikon 6.2: Podolžni profil proge Divača–Koper

Iz Grafikona 6.2 vidimo, da poteka proga od Divače proti Rodiku v kratkem strmem 20‰ vzponu, kjer se proga naprej proti Hrpeljam–Kozini spusti (20 ‰) in dvigne (7 ‰) do Prešnice [75]. Od Prešnice naprej proti Koperu proga v strmem spustu na dolžini 33 km premaga 495 m nadmorske višine z največjim nagibom 25 ‰ [26]. Proga predstavlja ozko grlo zaradi izrazito neugodnega terena z velikimi vzponi, zato ne ustreza današnjim prometnim zahtevam in naraščajočemu prometu Luke Koper.

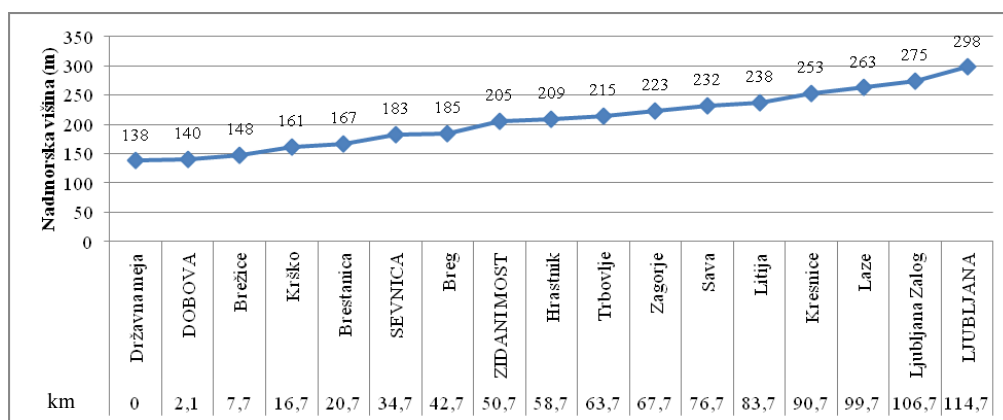
Preglednica 6.3: Prikaz nagibov na progovnih odsekih Divača–Koper [75].

Odsek	Divača	Rodik	Hrpelje-Kozina	Prešnica	Črnotiče	Hrastovlje	Rižana	Koper
Km	0	8	12	16	22	31	38	48
Vzpon [%]	/	20	0	7	0	0	0	0
Padec [%]	/	0	20	7	25	25	25	0

- Dobova–Ljubljana

Glavna železniška proga Dobova–Ljubljana je dvotirna proga dolžine 114,7 km, ki omogoča maksimalno osno obremenitev 22,5 t [72, 74]. Kot je razvidno iz letnih poročil SŽ, je proga med Zidanim Mostom in Ljubljano najpomembnejši progovni odsek v RS po številu pripeljanih potniških in tovornih vlakov na dan; tu se je v zadnjih desetih letih v povprečju peljalo 129 vlakov na dan, ne glede na to, da je proga izkoriščena le 43% [74]. Izkoriščenost odseka od Dobove proti Zidanemu Mostu je 22% [74]. Prepustna moč proge med Dobovo in Zidanim Mostom znaša 292 vlakov na dan, med Zidanim Mostom in Ljubljano pa 300 vlakov na dan [74].

Grafikon 6.3 predstavlja podolžni profil proge med Dobovo in Ljubljano.



Grafikon 6.3: Podolžni profil proge Dobova–Ljubljana

Iz Grafikona 6.3 vidimo, da se proga iz začetnih 138 m nadmorske višine počasi in enakomerno vzpenja vse do Ljubljane do nadmorske višine približno 300 m v nagibu 1–4 ‰ [75]. Značilno za progo je, da večino časa poteka ob strugi reke Save.

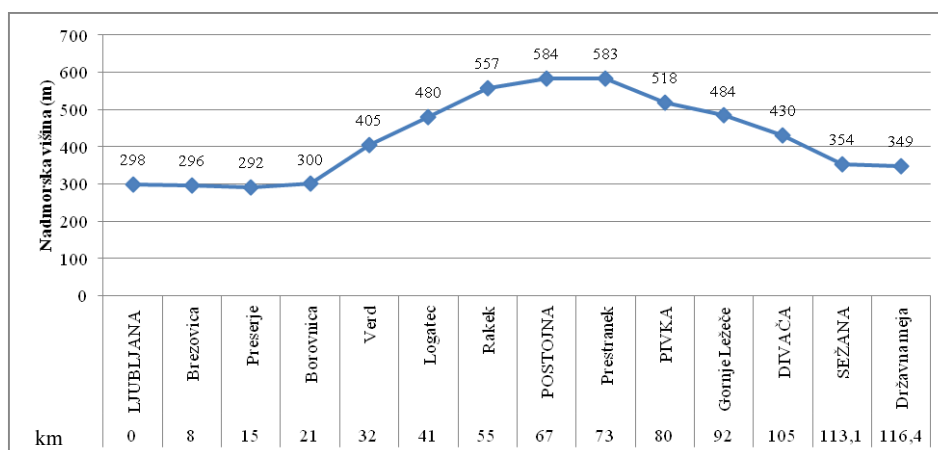
Preglednica 6.4: Prikaz nagibov na progovnih odsekih Dobova–Ljubljana [75].

Odsek	d. m.	Dobova	Brežice	Krško	Brestanica	Sevnica	Breg	Zid. Most
Km	0	2,1	7,7	16,7	20,7	34,7	42,7	50,7
Vzpon [‰]	/	1	4	4	4	2	4	2
Padec [‰]	/	1	1	1	1	0	1	0
Odsek	Hrastnik	Zagorje	Sava	Litija	Kresnice	Laze	Zalog	Ljubljana
Km	58,7	63,7	76,7	83,7	90,7	99,7	106,7	114,7
Vzpon [‰]	2	3	3	3	3	3	4	
Padec [‰]	0	0	0	1	0	1	0	1

- Ljubljana–Sežana

Glavna železniška proga Ljubljana–Sežana je dvotirna proga dolžine 116,6 km, ki omogoča maksimalno osno obremenitev 22,5 t [72, 74]. Izkoriščenost proge je 87%, prepustna moč proge pa znaša 135 vlakov na dan [72].

Grafikon 6.4 predstavlja podolžni profil proge med Ljubljano in Sežano.



Grafikon 6.4: Podolžni profil proge Ljubljana–Sežana

Iz Grafikona 6.4 vidimo, da poteka proga prvih 21 km na nadmorski višini približno 300 m, od Borovnice naprej pa se dviga v maksimalnem vzponu 12 ‰ [75] do najvišje ležeče postaje na celotnem omrežju v RS, Postojne s 584 metri nadmorske višine [77]. Proga se od Postojne pa vse do Sežane spušča med 7 in 10 ‰ [75].

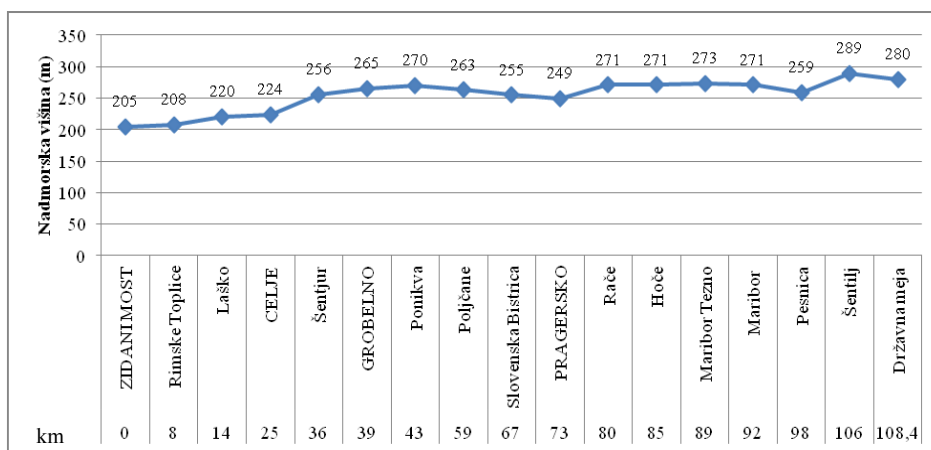
Preglednica 6.5: Prikaz nagibov na progovnih odsekih med Ljubljano–Sežano [75].

Odsek	Ljubljana	Brezovica	Preserje	Borovnica	Verd	Logatec	Rakek
km	0	8	15	21	32	41	55
Vzpon [‰]	/	1	1	3	12	12	12
Padec [‰]	/	3	2	1	0	0	0
Odsek	Postojna	Prestranek	Pivka	G. Ležeče	Divjača	Sežana	d. m.
km	67	73	80	92	105	113,1	116,4
Vzpon [‰]	8	0	8	0	0	0	0
Padec [‰]	7	8	0	7	7	8	10

- Zidani Most–Šentilj

Glavna železniška proga Zidani Most–Šentilj je dvotirna proga dolžine 108,4 km, ki omogoča maksimalno osno obremenitev 22,5 t (med odseki Celje–Ponikva in Pragersko–Hoče) ter 20 t [72, 74] na vseh preostalih mestih. Proga je 64% izkoriščena [74]. Prepustna moč proge med Zidanim Mostom in Mariborom znaša 185 vlakov na dan, med Mariborom in Šentiljem pa 62 vlakov na dan [74].

Grafikon 6.5 predstavlja podolžni profil proge med Zidanim Mostom in Šentiljem.



Grafikon 6.5: Podolžni profil proge Zidani Most–Šentilj

Iz Grafikona 6.5 vidimo, da se trasa proge na prvih 43 km med Zidanim Mostom in Ponikvo vzpenja v nagibu med 3 in 4 ‰ [75]. Od tam naprej se proti Pragerskem proga spusti z maksimalnim naklonom nivelete 9 ‰ [75] ter se nato do Maribora izmenično spušča in vzpenja.

Preglednica 6.6: Prikaz nagibov na progovnih odsekih Zidani Most–Šentilj [75].

Odsek	Zid. Most	Rim. Toplice	Laško	Celje	Šentjur	Grobelno	Ponikva	Poljčane	Slo. Bistrica
Km	0	8	14	25	36	39	43	59	67
Vzpon [‰]	/	3	3	3	3	3	4	7	5
Padec [‰]	/	0	0	2	0	0	0	9	9
Odsek	Pragersko	Rače	Hoče	Tezno	Maribor	Pesnica	Šentilj	d. m.	
Km	73	80	85	89	92	98	196	108,4	
Vzpon [‰]	9	6	3	2	2	9	7	0	
Padec [‰]	9	0	2	1	6	9	1	7	

6.2 Metode dela

Na osnovi pridobljenih podatkov s strani SŽ bomo v nadaljevanju diplomske naloge pregledali in analizirali napake na tirnicah na železniškem omrežju RS. Vsi podatki o napakah na tirnicah so bili zbrani sicer po posameznih sekcijah za vzdrževanje prog v obdobju 2005–2014, ki so shranjeni na posebnih evidenčnih listih in se hranijo v arhivu področnih SVP. Bazo podatkov o napakah na tirnicah v obravnavanem obdobju sestavlja skupno 954 evidentiranih napak, ki jo sestavljajo naslednji parametri:

- številka dokumenta,
- datum najdbe,
- mesec najdbe,
- številka najdbe,
- SVP,
- nadzorništvo,
- proga,
- med postajama/postaja,
- km,
- registrirana z drezino UST 96,
- številka tira/kretnice,
- način najdbe,
- mesto najdbe,
- pragovi,
- razmik med pragovi,
- oblika najdbe,
- območje najdbe,
- način izvora napake v profilu,
- oblika vara,
- oblika stika,
- temperatura ob napaki,
- posledica napake,
- oblika tirnice,
- trdota tirnice,
- obraba tirnice,
- proizvajalec tirnice,
- letnica tirnice,
- maksimalna hitrost proge,
- obremenitev proge,
- nagib nivelete proge,
- prema/prehodnica/krožni lok,
- tirnica,
- tirni trak,
- zapora tira,
- počasna vožnja,
- hitrost znižana,
- način odprave napake.

Pri analizi smo upoštevali parametre, za katere smo smiselno predvidevali, da imajo lahko vpliv na napake na tirnicah (kot so npr. temperatura, maksimalna osna obremenitev, obremenitev proge, dovoljena hitrost). Ker je bilo število napak na tirnicah na regionalnih progah v primerjavi z glavnimi progami zanemarljivo, smo pozornost namenili analizi napak na glavnih progah.

Z računalniškim programom Microsoft Office Excel 2007 smo zbrane podatke uredili in razvrstili ter izračunali osnovne statistike posameznih dejavnikov.

Za večjo preglednost in poenostavitev obdelave smo obravnavane podatke razdelili v razrede, ki smo jih določili s pomočjo Sturgesovega pravila¹⁶. Poskrbeli smo, da nobena vrednost ni ostala brez razreda oziroma da se nobena vrednost ni pojavila v dveh različnih razredih.

Izračun frekvenc razredov¹⁷ je zajemal:

- absolutno frekvenco, ki pove, koliko napak se je zgodilo v posameznem razredu,
- relativno frekvenco, ki pove, kolikšen delež (%) vseh napak se je zgodil v posameznem razredu,
- kumulativno frekvenco, ki pove, kolikšen delež (%) napak se je zgodil do posameznega razreda.

Izračun osnovnih statistik je zajemal:

- povprečje oz. aritmetično sredino, ki poda grobo oceno o razporeditvi vrednosti v spremenljivki,
- mediano, tj. tisto vrednost enote populacije, od katere ima polovica enot manjšo, druga polovica pa večjo vrednost,
- modus, tj. vrednost, ki se najpogosteje pojavlja,
- najmanjšo in največjo vrednost,
- variacijski razmik (v nadaljevanju VR), tj. mero variabilnosti, ki jo definiramo kot razliko med največjo in najmanjšo vrednostjo v populaciji,
- standardni odklon (v nadaljevanju SO), tj. povprečno razliko posameznih vrednosti analize od povprečne vrednosti, ki pove, kako so posamezne vrednosti razvrščene okoli aritmetične sredine,
- koeficient variacije oz. variabilnosti (v nadaljevanju KV), tj. razmerje med standardnim odklonom in aritmetično sredino, izraženo v odstotkih, ki prikazuje razpršitev posameznih vrednosti okoli aritmetične sredine,
- korelacijski koeficient (v nadaljevanju KK), tj. številka mera linearne podobnosti med dvema spremenljivkama (meri smer in moč linearne zveze med dvema spremenljivkama).

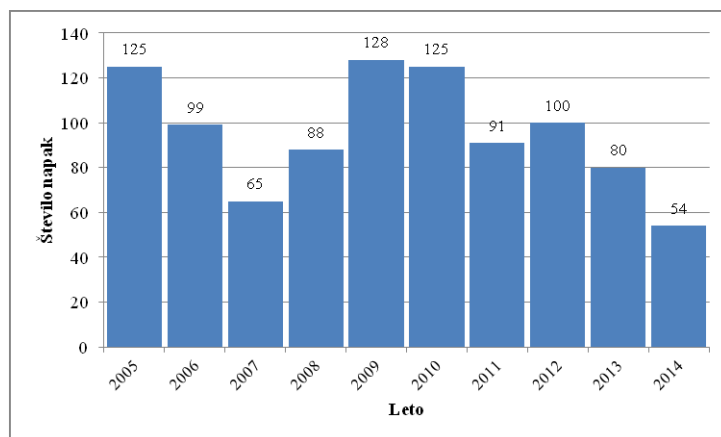
6.3 Pregled napak na tirnicah na železniškem omrežju RS v obdobju 2005–2014

Premajhna vlaganja v razvoj in vzdrževanje javne železniške infrastrukture (v nadaljevanju JŽI) se odražajo na vse večjem številu napak tirnic na slovenskem omrežju ter v slabši funkcionalni usposobljenosti ter njenih negativnih vplivih [78]. Iz letnih poročil SŽ je razvidno, da se stanje JŽI zaradi nezadostnih vlaganj v lastni razvoj ne izboljšuje [65]. Potrebno je poudariti, da se stanje JŽI

¹⁶ $k \approx 1 + 3.32 \log N$ (N = število enot populacije)

¹⁷ Frekvenca razreda pove, kako pogosto v analizi naletimo na napake v posameznem razredu.

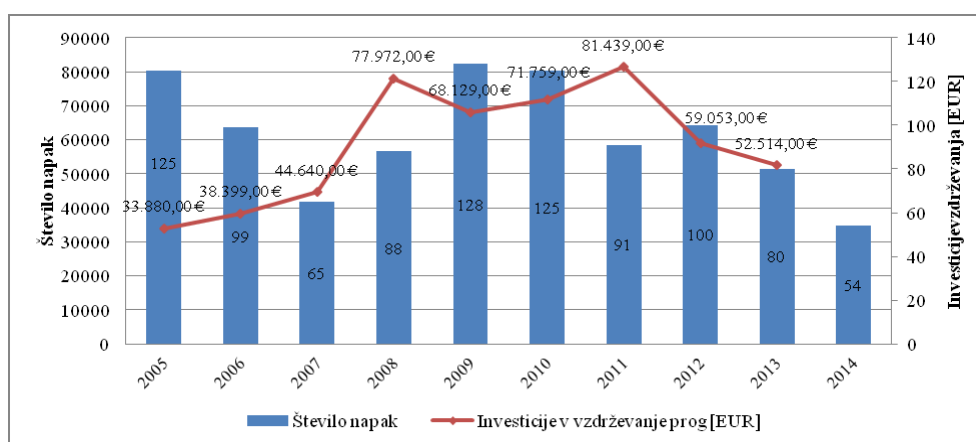
ocenjuje v okviru sprotnih vzdrževalnih del tako na spodnjem kot tudi na zgornjem ustroju železniških prog, kjer so napake na tirnicah le eno izmed rednih vzdrževalnih del. Na Grafikonu 6.6 je prikazano skupno število napak na tirnicah po posameznih letih na celotnem železniškem omrežju v RS v obdobju 2005–2014.



Grafikon 6.6: Skupno število napak na tirnicah po posameznih letih v obdobju 2005–2014

V desetletnem obdobju je bilo evidentiranih 954 napak, v povprečju 95,4 napak na leto. Iz Grafikona 6.6 je razvidno, da število napak niha med 54 in 128, pri čemer skoki med dvema zaporednima letoma ne presegajo 40. V prvih treh letih, vključenih v analizo (2005–2007), se je število napak skoraj preplopolovilo. Nato se je v letu 2009 število napak povečalo za približno 100 % v primerjavi z letom 2007. Po letu 2009 se ponovno začne trend upadanja, ki se je z izjemo leta 2012 nadaljeval vse do leta 2014.

Grafikon v nadaljevanju prikazuje razdelitev skupnega števila napak na tirnicah in investicije v vzdrževanje prog po posameznih letih v obdobju 2005–2014.



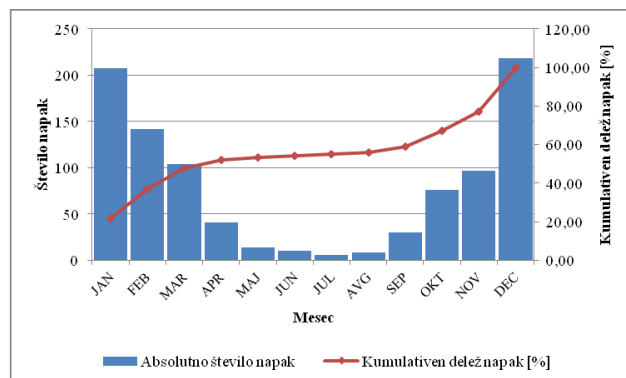
Grafikon 6.7: Razdelitev skupnega števila napak na tirnicah in investicije v vzdrževanje prog po posameznih letih v obdobju 2005–2014

V devetletnem obdobju je bilo za investicijsko vzdrževanje prog porabljenih 527.785,00 EUR oz. v povprečju 58.642,78 EUR po posameznem letu [65]. Iz Grafikona 6.7 lahko vidimo, da se je število napak med letoma 2005–2007 zmanjševalo, medtem ko so se vlaganja v vzdrževanje prog povečevala. Zanimivo je, da se trend zmanjševanja števila napak ni nadaljeval v naslednjih letih. Namreč, število napak se je v letih 2008–2010 povečevalo neodvisno od skoraj enkrat večjih vlaganj v vzdrževanje prog. Vrhunec vlaganj nastopi v letu 2011 (81.439,00 EUR) [65], nato se začne trend zmanjševanja vlaganja v vzdrževanje prog. Število napak se v letih po najvišjih vlaganjih tudi zmanjšuje.

Denar za vzdrževanje prog je namenjen in porabljen v okviru vzdrževalnih del, ki obsegajo dela tako na spodnjem ustroju (vzdrževanje pobočij, nasipov, kanalov, drenaž, predorov, galerij, mostnih konstrukcij itd.) kot tudi na zgornjem ustroju železniških prog (pregledi, kontrole, meritve prog, tirov, kretnic, NZT, uravnavanje tira po osi in višini, pregled napak, ugotovljenih z ultrazvokom itd.). Zato predvidevamo, da investicija v vzdrževanje prog ni bila izključno namenjena samo odkrivanju in odpravi napak na tirnicah, kar pomeni, da nihanja števila napak skozi posamezna leta ne moremo preprosto povezati z investicijami vzdrževanja prog po posameznih letih.

6.3.1 Pregled po posameznih mesecih

V Grafikonu 6.8 je prikazano absolutno število in kumulativni delež napak na tirnicah po posameznih mesecih v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.



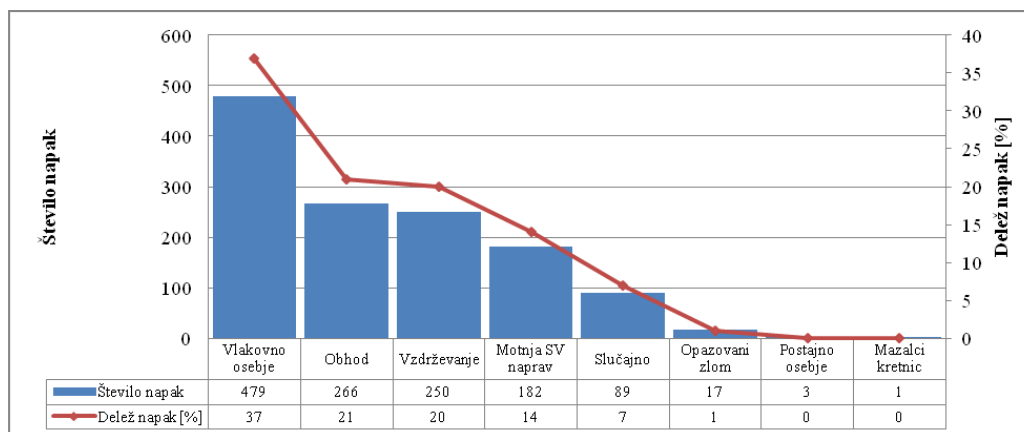
Grafikon 6.8: Razdelitev skupnega števila napak po mesecih

Iz Grafikona 6.8 je razvidno, da se napake na tirnicah pojavljajo skozi vse leto. Lahko vidimo, da sta izraziti konici, ki odstopata po številu napak, meseca december in januar, kjer se zgodi 426 oz. 44,65 % vseh napak na tirnicah. Če zraven prištejemo še mesece oktober, november, februar in marec, kjer je zabeleženih skupaj 845 oz. 88,57 % napak, vidimo, da predstavljajo omenjeni meseci večinski del vseh evidentiranih napak. Poleg tega opazimo, da se v toplejših mesecih, tj. od aprila do septembra, napake na tirnicah pojavljajo redkeje, pri čemer najmanj v mesecu juliju, tj. 6 oz. 0,63 %.

Menimo, da je v zimskem času zaradi večjih nateznih sil v tirnici in manjši žilavosti materiala število napak na tirnicah večje.

6.3.2 Pregled po načinih najdbe

Na Grafikonu 6.9 je prikazano absolutno število napak in kumulativni delež napak na tirnicah glede na način najdbe v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.

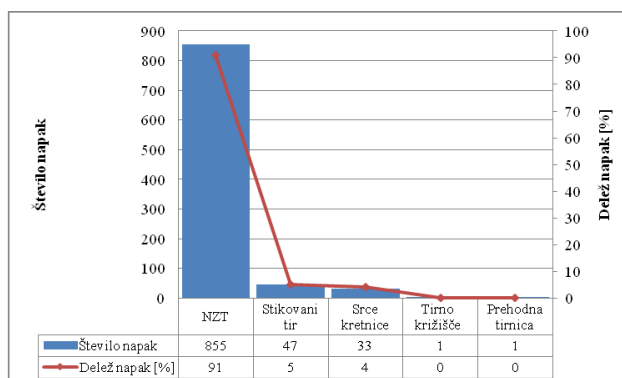


Grafikon 6.9: Pogostost napak glede na način najdbe

Iz Grafikona 6.9 je razvidno, da so bile napake na tirnicah v 479 primerih oz. 37 % najdene s strani vlakovnega osebja. Poleg tega opazimo, da je bilo pri obhodu in vzdrževanju najdenih skupno 516 oz. 41 % napak. Poleg naštetega opazimo, da so se v 182 primerih oz. 14 % napake na tirnicah našle s pomočjo uporabe signalnovarnostnih napravah (v nadaljevanju SV). Prispevki ostalih so zanemarljivi.

6.3.3 Pregled po mestih najdbe

V Grafikonu 6.10 je prikazano absolutno število in delež napak na tirnicah glede na posamezno mesto najdbe v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.

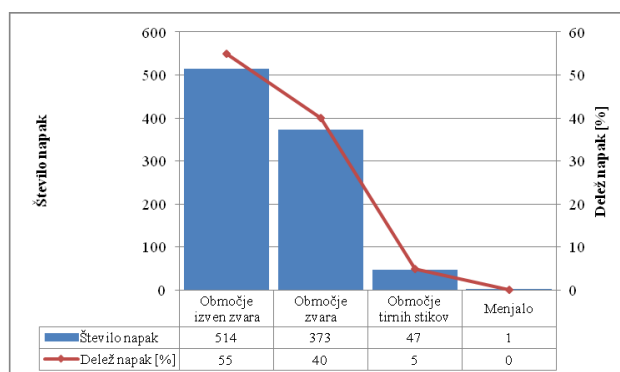


Grafikon 6.10: Pogostost napak po mestih najdbe

Iz Grafikona 6.10 je razvidno, da je večina evidentiranih napak (855 oz. 91 %) locirana na tirnicah, vgrajenih v NZT. Poleg tega vidimo, da so bile napake na ostalih mestih precej redek pojav. Ker je NZT sodobna konstrukcija, ki se na omrežju SŽ izvede pri vseh gradnjah, obnovah ali pri zamenjavah tirnic z novimi [55], sledi, da je povečano število napak razumljivo.

6.3.4 Pregled po območjih najdbe

V Grafikonu 6.11 je prikazano absolutno število in delež napak na tirnicah glede na območje najdbe v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.

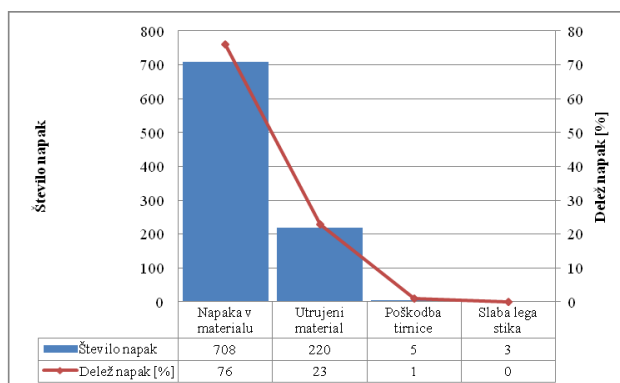


Grafikon 6.11: Pogostost napak po območjih

Iz Grafikona 6.11 je razvidno, da je bilo nekaj več kot polovica napak, tj. 514 oz. 55 %, najdenih v območju izven zvara ali tirnega stika. Do velike večine preostalih, tj. 373 oz. 40 % napak, je prišlo v območju zvara. V območju tirnih stikov so napake zanemarljive, ker se je njihovo število zmanjšalo zaradi vgrajevanja tirnic v NZT.

6.3.5 Pregled po vzrokih napak

V Grafikonu 6.12 je prikazano absolutno število in delež napak na tirnicah glede na vzrok nastanka v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.



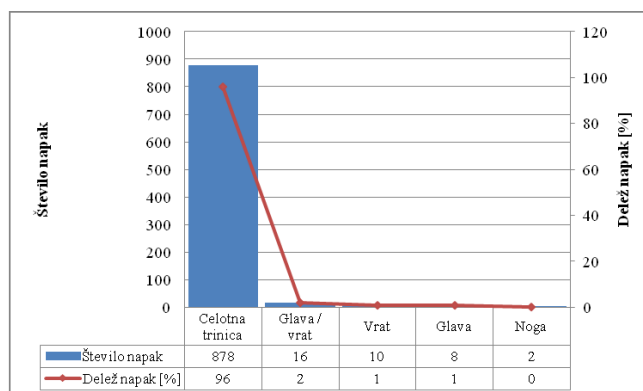
Grafikon 6.12: Pogostost napak glede na vzrok nastanka

Iz Grafikona 6.12 je razvidno, da je bil v skoraj treh četrtinah oz. 74% vzrok za nastanek napak na tirnicah napaka v materialu. Opazimo tudi, da je bilo zaradi utrujenega materiala evidentiranih 220 oz. 23 % napak na tirnicah.

Menimo, da je število napak na tirnicah zaradi utrujenosti materiala razmeroma majhno (23 %) glede na povprečno starost tirnice (32,17 leta), povečane osne obremenitve in večje obremenitve prog, ki so samo v zadnjih desetih letih v povprečju znašale 140.499.559,500 brt (bruto ton na dan) po glavni progi.

6.3.6 Pregled po mestih napak v tirnici

V Grafikonu 6.13 je prikazano absolutno število in delež napak na tirnicah glede na mesto njihovega pojava v tirnici v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.

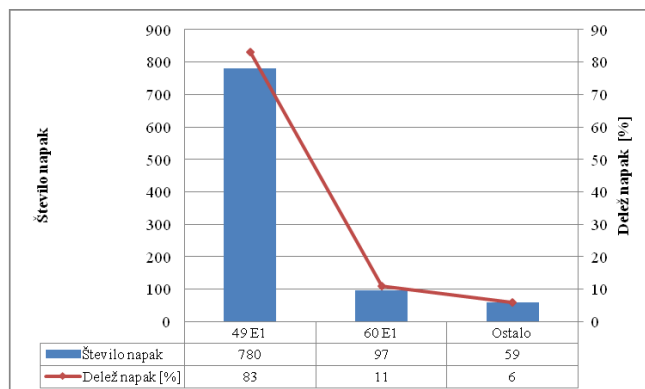


Grafikon 6.13: Pogostost napak glede na mesto nastanka v tirnici

Iz Grafikona 6.13 je razvidno, da se je v 878 primerih oz. v 96 % napaka pripetila po celotnem prečnem prerezu tirnice, in sicer zaradi preloma. Napake na preostalih delih tirnice so zanemarljive. Po standardu UIC 712 R [64] se napake na tirnicah, ki se zgodijo po celotnem prerezu tirnice, zgodijo brez očitnega razloga.

6.3.7 Pregled po oblikah tirnic

V Grafikonu 6.14 je prikazano absolutno število in delež napak na tirnicah glede na obliko tirnice v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.



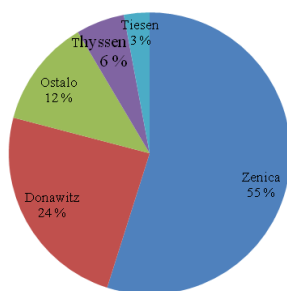
Grafikon 6.14: Pogostost napak glede na obliko tirnice

(Pod Ostalo spadajo tirnice naslednjih oblik: 54 E1, Xa, S45, S49, S50, M45a, FS46 in XIIŽ.)

Iz Grafikona 6.14 je razvidno, da so se napake na tirnicah v večini primerov (780 oz. 83 %) zgodile na tirnici oblike 49 E1. Njihova povprečna starost znaša 31,79 leta. Napake na ostalih oblikah tirnic so zanemarljive. Potrebno je poudariti, da so tirnice oblike 49 E1 najpogosteje vgrajena oblika tirnice v železniškem omrežju RS, zato je večji odstotek napak pričakovan in ne odraža njihove slabše kvalitete v primerjavi z ostalimi oblikami tirnic, katerih delež je občutno manjši.

6.3.8 Pregled po proizvajalcih tirnic

V Grafikonu 6.15 je prikazano absolutno število in delež napak na tirnicah glede na proizvajalca tirnic v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.



Grafikon 6.15: Pogostost napak glede na proizvajalca.

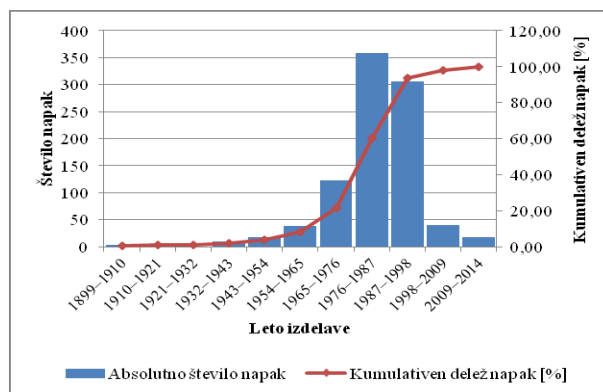
(Pod Ostalo spadajo proizvajalci Klockner, Morawitz, Krupp, TZ, HB, MR, K, Graz, VAE Apcarom, Niš, Savona, Alpine, BWQ, Mink, MH, MST Teschen.)

Iz Grafikona 6.15 je razvidno, da se je več kot polovica od skupno 954 napak v obravnavanem obdobju zgodila na tirnicah iz tovarne Zenica (55 %).

Potrebno je poudariti, da so tirnice iz Zenice najpogosteje vgrajene v železniško omrežje v RS, zato je večji odstotek napak pričakovan in ne odraža njihove slabše kvalitete v primerjavi z ostalimi proizvajalci, katerih delež je manjši.

6.3.9 Pregled po letnicah izdelave tirnic

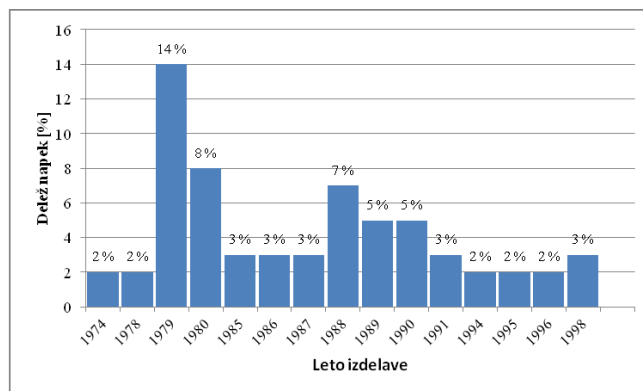
V Grafikonu 6.16 je prikazano absolutno število in kumulativni delež napak na tirnicah glede na letnico izdelave tirnice v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.



Grafikon 6.16: Razdelitev skupnega števila napak po letnicah izdelave tirnic

Iz Grafikona 6.16 je razvidno, da se je 664 oz. 72,25 % napak zgodilo na tirnicah, ki so bile izdelane med letoma 1976–1998. Vidimo, da je napak na tirnicah starejših letnic razmeroma malo.

Podroben prikaz števila napak na tirnicah glede na letnico izdelave tirnice prikazuje Grafikon 6.17.



Grafikon 6.17: Podroben prikaz števila napak glede na letnico izdelave tirnice

Iz Grafikona 6.17 je razvidno, da je bilo 39 % vseh napak na tirnicah evidentiranih na tirnicah letnikov 1979, 1980, 1988, 1989 in 1990. Med njimi izstopajo tirnice letnikov 1979 (14%), 1980 (8%) in 1988 (7 %). Potrebno je poudariti, da so tirnice treh letnikov izdelave (1979, 1980, 1988) najpogosteje vgrajene v železniško omrežje v RS, zato je večji odstotek napak pričakovan in ne odraža njihove slabše kvalitete v primerjavi z ostalimi tirnicami, katerih delež je manjši. V kolikor so napake na tirnicah omenjenih letnikov nastale kot posledica tovarniških napak (ulitki istega kalupa), je potrebno preventivno zamenjati še ostale vgrajene tirnice omenjenih letnikov.

Preglednica 6.7 prikazuje osnovno statistiko za starost in letnico izdelave tirnice v obravnavanem obdobju 2005–2014.

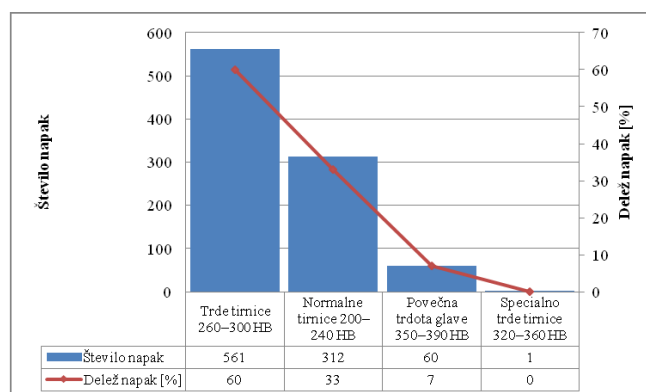
Preglednica 6.7: Osnovna statistika za starost in letnico izdelave tirnice

Podatek	Povprečje	Mediana	Modus	Najmanj	Največ	VR	SO	KV	Število
Starost [leto]	32,71	31	36	1	116	115	13,99	0,43	905
Letnica izdelave	1982,29	1984	1979	1899	2014	115	13,99	0,01	905

Iz Preglednice 6.7 zaključimo, da so se napake na tirnicah zgodile, ko je starost v povprečju znašala 32,71 leta, da se je polovica vseh napak zgodila pri letniku 1984, da so se napake najpogosteje pojavljale na tirnicah letnika 1979 (14 %) in da je bila najstarejša evidentirana tirnica z napako tirnica letnika 1899.

6.3.10 Pregled po trdotah tirnic

V Grafikonu 6.18 je prikazano absolutno število in delež napak na tirnicah glede na trdoto tirnice v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.



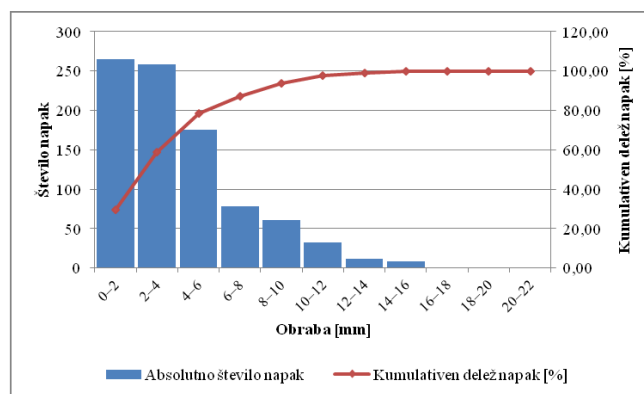
Grafikon 6.18: Pogostost napak glede na trdoto tirnice

Iz Grafikona 6.18 je razvidno, da po številu napak na tirnicah odstopajo tirnice s trdoto 200–240 HB (33 %) in 260–300 HB (60 %). Omenimo lahko, da so bile napake na tirnicah s trdoto 350–390 HB evidentirane na glavnih progah Ljubljana–Sežana (odsek med Brezovico–Pivko) ter Divača–Koper in Dobova–Ljubljana. Lahko omenimo tudi, da so bile napake na tirnicah trdote 320–360 HB evidentirane samo na glavni progi Ljubljana–Jesenice (odsek Lesce–Bled–Žirovnica).

Ker mora kakovost tirnic na železniškem omrežju v RS ustrezati najmanj trdoti 260–300 HB [65], predvidevamo, da sta trdnostna razreda tirnic med 200–240 HB in 260–300 HB najpogosteje vgrajena v železniško omrežje RS, zato je večje število napak na tirnicah omenjenih razredov pričakovano.

6.3.11 Pregled po obrabi tirnic

Obraba je stalni proces, ki nastane na kontaktu med kolesno dvojico in tirnico. V Grafikonu 6.19 je prikazano absolutno število in kumulativni delež napak po obrabi tirnic v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.



Grafikon 6.19: Razdelitev skupnega števila napak po obrabi tirnic

Iz Grafikona 6.19 je razvidno, da je največje število napak, tj. 523 oz. 58,70 %, zabeleženih na tirnicah, obrabljenih med 0 in 4 mm. Iz grafikona je mogoče razbrati tudi, da se na tirnicah z visoko obrabo napake redko pojavljajo. Slednje je razumljivo, če upoštevamo, da v skladu s Pravilnikom o zgornjem ustroju železniških prog obraba tirnice, ki je še v uporabi, ne sme presegati dovoljenih toleranc. Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog določa dovoljeno obrabo za glavne proge, in sicer za tirnice oblike 49 E1 (12 mm) ter za trinice oblike 60 E1 (14 mm) [55]. Zato se vse tirnice, ko dosežejo dovoljene tolerančne meje obrabe, menja. Zaradi menjav je posledično takih tirnic (in torej tudi napak na/v njih) v uporabi manj.

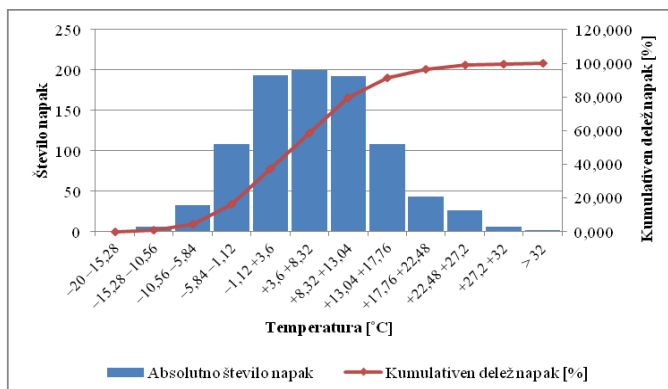
Preglednica 6.8: Osnovna statistika za obrabo tirnice v obdobju 2005–2014

Podatek	Povprečje	Mediana	Modus	Najmanj	Največ	VR	SO	KV	Število
Obraba [mm]	4,55	4	2	0	21	21	3,27	0,72	892

Iz Preglednice 6.8 lahko zaključimo, da so se napake na tirnicah zgodile, ko je znašala obrabljenost tirnice v povprečju 4,55 mm, da so se napake najpogosteje pojavljale pri obrabljenosti 2 mm in da je znašal razpon obrabljenosti 0–21 mm.

6.3.12 Pregled po temperaturah

V Grafikonu 6.20 je prikazano absolutno število in kumulativni delež števila napak na tirnicah po temperaturah v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.



Grafikon 6.20: Razdelitev skupnega števila napak po temperaturah

Iz Grafikona 6.20, ki prikazuje odvisnost števila napak od temperature, je razvidno, da je do največjega števila napak, tj. 586 oz. 63,69 %, prišlo v temperaturnem razponu med $-1,12$ °C in $13,04$ °C. Opazimo, da je histogram simetrično porazdeljen.

Menimo, da je število napak odvisno od zunanje temperature, pri čemer napake na tirnicah nastanejo pri nižjih temperaturah (zmanjša se žilavost materiala), ko so tirnice obremenjene z natezno silo.

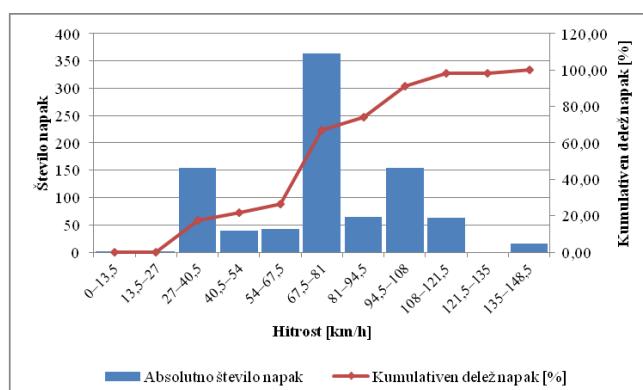
Preglednica 6.9: Osnovna statistika temperature v obdobju 2005–2014

Podatek	Povprečje	Mediana	Modus	Najmanj	Največ	VR	SO	KV	Število
Temperatura [°C]	2,01	2	5	-20	32	52	8,07	4,02	920

Iz Preglednice 6.9 lahko zaključimo, da so se napake na tirnicah zgodile, ko je znašala temperatura v povprečju $2,01$ °C, da so se napake najpogosteje pojavljale pri temperaturi 5 °C in da je znašal temperaturni razpon od -20 do 32 °C.

6.3.13 Pregled po hitrosti prog

V Grafikonu 6.21 je prikazano absolutno število in kumulativni delež števila napak na tirnicah po hitrosti prog v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.



Grafikon 6.21: Razdelitev skupnega števila napak po hitrosti prog

Iz Grafikona 6.21 je razvidno, da se je največje število napak, tj. 364 oz. 40,53 %, zgodilo pri hitrosti 67,5–81 km/h. Ker proge v RS ne omogočajo višjih hitrosti (razen po posameznih odsekih), je razumljivo, da se napake pri hitrosti 121,5–135 km/h niso pojavljale.

Potrebno je poudariti, da so hitrosti na železniškem omrežju v RS omejene zaradi geometrijskih elementov, tehničnega stanja in opremljenosti prog ter tehničnih značilnosti vlaka, zato je število napak, ki se zgodijo pri hitrosti 67,5–81 km/h, pričakovano večje.

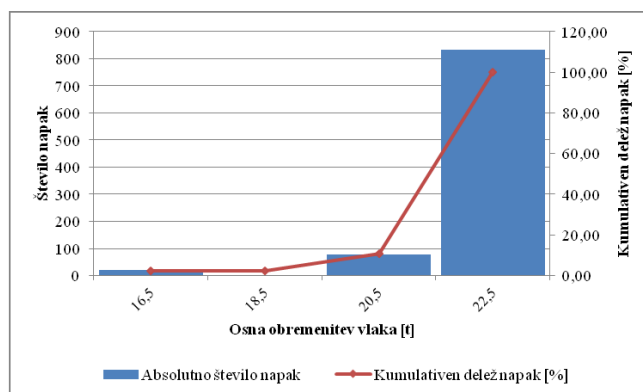
Preglednica 6.10: Osnovna statistika za hitrost v obdobju 2005–2014

Podatek	Povprečje	Mediana	Modus	Najmanj	Največ	VR	SO	KV	Število
Hitrost [km/h]	75,08	75	70	10	145	135	24,5	0,33	898

Iz Preglednice 6.10 zaključimo, da so se napake na tirnicah zgodile, ko je znašala hitrost proge v povprečju 75,08 km/h in da so se napake najpogostejše pojavljale pri hitrosti 70 km/h.

6.3.14 Pregled po osnih obremenitvah vlakov

V Grafikonu 6.22 je prikazano absolutno število in kumulativni delež števila napak na tirnicah po osnih obremenitvah vlakov v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.



Grafikon 6.22: Razdelitev skupnega števila napak po osnih obremenitvah vlakov

Iz Grafikona 6.22 je razvidno, da se je največje število napak, tj. 832 oz. 89,27 %, zgodilo pri osni obremenitvi 22,5 t. Ker so glavne proge z osno obremenitvijo 22,5 t določene za normalno kategorijo prog v RS, lahko zaključimo, da je število napak povsem pričakovano. Iz tega razloga je tudi število napak v ostalih kategorijah primerno manjše oz. se napake ne pojavljajo tako pogosto.

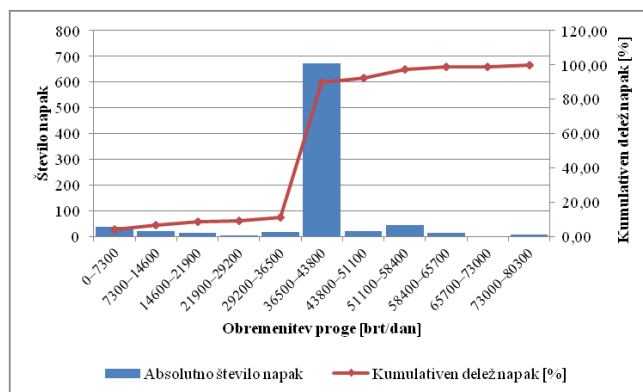
Preglednica 6.11: Osnovna statistika za osno obremenitev vlaka v obdobju 2005–2014

Podatek	Povprečje	Mediana	Modus	Najmanj	Največ	VR	SO	KV	Število
Oсна obremenitev [t/os]	22,13	22,5	22,5	16	22,5	6,5	1,18	0,05	933

Kot je razvidno iz Grafikona 6.23 in iz Preglednice 6.11, lahko zaključimo, da so se napake na tirnicah najpogosteje pojavljale pri osni obremenitvi 22,5 t.

6.3.15 Pregled po obremenitvah prog

V Grafikonu 6.23 je prikazano absolutno število in kumulativni delež števila napak na tirnicah po obremenitvah prog v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.



Grafikon 6.23: Razdelitev skupnega števila napak po obremenitvah prog v bruto tonah na dan

Iz Grafikona 6.23 je razvidno, da se je največje število napak, tj. 674 oz. 78,74 % zgodilo, ko je obremenitev znašala med 36.500 in 43.800 brt/dan. Opazimo tudi, da so napake na tirnicah v ostalih obremenitvenih razredih zelo redek pojav. Ker večina glavnih prog omogoča osno obremenitev 22,5 t, je večje število napak (ko je obremenitev okoli 40.000 brt/dan) povsem pričakovano.

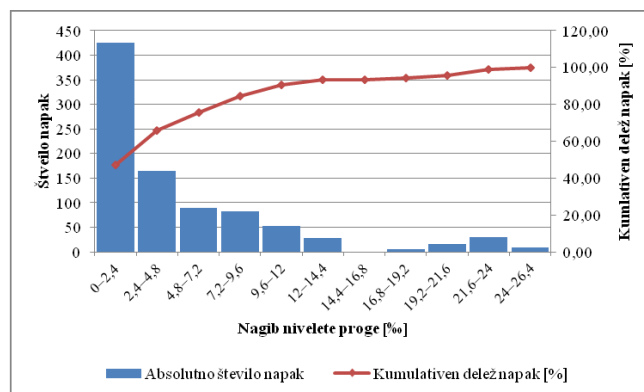
Preglednica 6.8: Osnovna statistika za obremenitev proge v bruto tonah na dan v obdobju 2005–2014

Podatek	Povprečje	Mediana	Modus	Najmanj	Največ	VR	SO	KV	Število
Obremenitev [brt/dan]	38.501,12	40.000	40.000	1.000	80.000	79.000	1.1056,1	0,29	856

Iz Preglednice 6.8 lahko zaključimo, da so se napake na tirnicah zgodile, ko je obremenitev proge v povprečju znašala 38.501,12 brt/dan, da se napake najpogosteje pojavljajo pri obremenitvi 40.000 brt/dan ter da je znašala največja obremenitev proge, ko je prišlo do napake, 80.000 brt/dan.

6.3.16 Pregled po nagibih nivelet prog

V Grafikonu 6.24 je prikazano absolutno število in kumulativni delež števila napak na tirnicah po nagibih nivelet prog v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.



Grafikon 6.24: Razdelitev skupnega števila napak po nagibih nivelet prog

Iz Grafikona 6.24 je razvidno, da se je največje število napak na tirnicah, tj. 421 oz. 46,88 %, zgodilo na nagibu nivelete¹⁸ 0–2,4 ‰. Opazimo, da se na nagibu nivelete proge od 16,8 do 19,2 ‰ napake na tirnicah niso pojavljale. Ker glavnih prog z omenjenim nagibom ni, je število pričakovano. Poleg tega opazimo, da se število napak na progah z nagibom nivelete od 19,2 do 24 ‰ povečuje. To pripisemo dejstvu, da potekajo proge na posameznih odsekih, kot je to na relaciji Divača–Koper, po izrazito neugodnem terenu s strmimi vzponi ter spusti, ki presegajo 20 ‰ [55], zato je povečano število napak na tirnicah pričakovano.

Potrebno je poudariti, da je odsekov glavnih prog z velikimi nagibi nad 20 ‰ malo, razen proge Divača–Koper, zato je število napak na tirnicah gledano iz absolutnega stališča majhno in ne odraža dejanskega stanja. Tako menimo, da večji nagibi vplivajo na število napak na tirnicah.

Preglednica 6.12: Osnovna statistika za vzdolžni nagib nivelete proge v obdobju 2005–2014

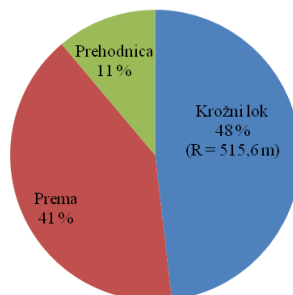
Podatek	Povprečje	Mediana	Modus	Najmanj	Največ	VR	SO	KV	Število
Nagib nivelete [%]	4,81	2,5	0	0	25,6	25,6	5,86	1,22	898

Iz Preglednice 6.12 lahko zaključimo, da so se napake na tirnicah zgodile, ko je vzdolžni nagib nivelete v povprečju znašal 4,81 ‰, da se je polovica vseh napak zgodila na nagibu nivelete do 2,5 ‰ in da je znašal največji nagib nivelete proge 25,6 ‰, ko je prišlo do napake. Le-ta je bil zabeležen na glavni progji Divača–Koper, na odseku med cepiščem Prešnica–Črnotiče.

¹⁸ Niveleta proge je črta (izražena v promilih), ki označuje potek osi železniške proge glede na nadmorsko višino.

6.3.17 Pregled po elementih trase prog

V Grafikonu 6.25 je prikazan delež števila napak na tirnicah po elementih trase prog v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.



Grafikon 6.25: Pogostost napak po posameznih elementih trase proge

Iz Grafikona 6.25 je razvidno, da se je skoraj polovica napak (48 %) zgodila na tirnicah v horizontalnem krožnem loku¹⁹ oz. v krivini, povprečnega polmera 515,6 m. Vidimo tudi, da se velik del napak na tirnicah (41 %) zgodi v premi²⁰. Napake na tirnicah v prehodnici²¹ predstavljajo 11% delež.

Preglednica 6.13: Število napak glede na lego tirnice

Element	Leva tirnica	[%]	Desna tirnica	[%]
Krožni lok	209	50	212	50
Prehodnica	46	46	55	54
Prema	148	43	199	57

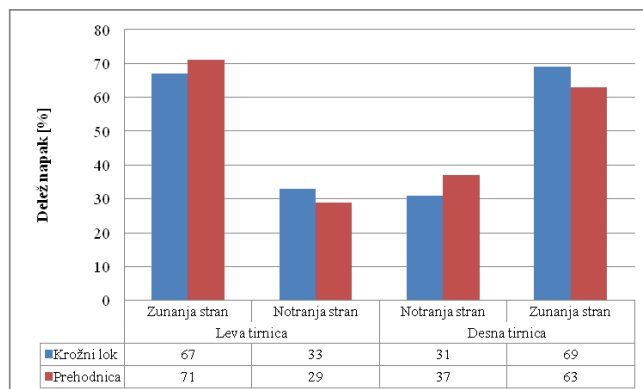
Iz Preglednice 6.13 je razvidno, da je bilo v premi in prehodnici nekaj več napak evidentiranih na desni tirnici (57 % in 54 %), v krožnem loku pa so bile napake enakomerno porazdeljene tako na levi kot na desni tirnici.

V Grafikonu 6.26 je prikazan delež napak na tirnicah glede na lego in stran tirnice v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.

¹⁹ Krožni lok je določen s polmerom R [m] in omogoča spremembo smeri.

²⁰ Prema je ravnina, ki je določena s smerjo in dolžino ter omogoča prehod v prehodnico.

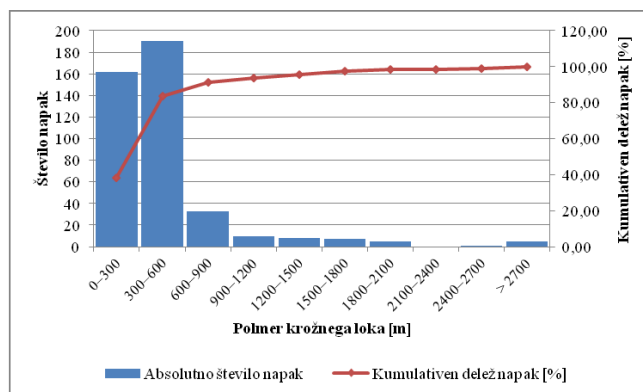
²¹ Prehodnica je krivulja, ki omogoča prehod iz preme v horizontalni krožni lok.



Grafikon 6.26: Pogostost napak glede na lego in stran tirnice

Zaradi nepopolnosti podatkov pregled ni zajemal podatkov o številu napak na tirnicah, ki so se zgodile v premi. Opazimo, da so se napake na tirnicah pogosteje pojavljale na zunanji tirnici ne glede na lego (tj. leva ali desna tirnica) oz. neodvisno od krožnega loka ali prehodnice. Poleg tega vidimo, da je bilo na tirnicah na prehodnici v primerjavi s krožnim lokom nekoliko večje število napak zabeleženih na levi zunanji tirnici (za približno 4 %). Na desni zunanji tirnici pa je bilo ravno obratno; tu je bilo število napak na tirnicah na krožnem loku za približno 5 % večje kot na tirnicah na prehodnici.

V Grafikonu 6.27 je prikazano absolutno število in kumulativni delež napak na tirnicah po polmerih krožnega loka v obravnavanem obdobju.



Grafikon 6.27: Razdelitev skupnega števila napak po polmerih krožnega loka

Iz Grafikona 6.27 je razvidno, da je bila večina napak, tj. 323 oz. 76,72 %, zabeležena, ko je znašal polmer krožnega loka med 150 in 600 m. Vidimo tudi, da se napake v krivinah polmera 900 m in več ne pojavljajo pogosto.

Na obstoječih progah v RS je večina radijev zaradi geometrijskih karakteristik železniškega omrežja majhnih, zato je večji odstotek napak na tirnicah manjših radijev pričakovan in ne odraža njihovih slabših karakteristik v primerjavi z ostalimi radiji, katerih delež je manjši.

Preglednica 6.14: Osnovna statistika za krožni lok v obdobju 2005–2014

Podatek	Povprečje	Mediana	Modus	Najmanj	Največ	VR	SO	KV	Število
Krožni lok [m]	515,61	375	300	150	6250	6100	492,49	0,96	421/533

Iz Preglednice 6.14 zaključimo, da so se napake na tirnicah zgodile, ko je znašal polmer krožnega loka v povprečju 515,61 m, da so se napake najpogosteje pojavljale na tirnicah polmera krožnega loka 300 m in da je bil največji polmer krožnega loka, na katerem so zabeležili napako na tirnicah, evidentiran na progi Ljubljana–Jesenice, točneje med postajama Podnart in Lesce. Meril je 6.250 m.

6.3.18 Pregled po posameznih SVP

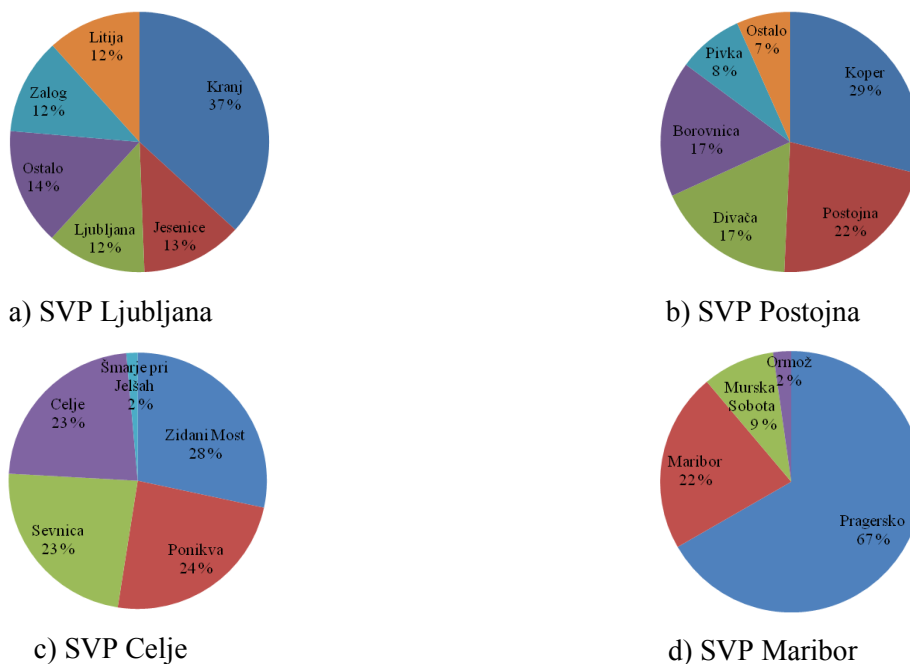
V Preglednici 6.15 je prikazano skupno število in delež napak ter število napak na tirnicah na kilometer proge po sekcijah in velikost sekcije glede na delež vseh prog in glavnih prog v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju v RS.

Preglednica 6.15: Skupno število napak po sekcijah in velikosti sekcije glede na delež prog [72].

SVP	Št. napak			Velikost sekcije po deležu prog	Glavne proge	
	Σ	[%]	Σ /km proge	[%]	[km]	[%]
Ljubljana	425	44	3,14	31	135,1	22
Postojna	343	36	1,67	29	194,8	32
Celje	141	15	0,90	18	156,3	25
Maribor	45	5	0,35	22	126,3	21

Iz Preglednice 6.15 je razvidno, da po številu napak prevladujeta SVP Ljubljana in SVP Postojna, kjer je bilo skupaj zabeleženih 774 oz. 80 % vseh napak v obravnavanem desetletnem obdobju. Večje število zabeleženih napak na tirnicah gre pripisati velikosti sekcij (skupaj pokrivata 60 % vseh prog) in največjemu deležu glavnih prog, tj. 329,9 km oz. 54 % prog. Iz preglednice sledi, da je število napak v SVP Celje v primerjavi s SVP Maribor večje za skoraj 200 % ne glede na to, da pokriva SVP Maribor za 4 % več prog kot SVP Celje. Ne glede na razliko v dolžini glavnih prog, ki je le 30 km, večje lahko število napak na tirnicah po kilometru proge pripišemo večji izkoriščenosti glavnih prog po progovnih odsekih, ki znašajo v SVP Celje 222 vlakov na dan – v primerjavi s 135 vlaki na dan v SVP Maribor [65].

Grafikon 6.28 prikazuje delež napak na tirnicah po posameznih sekcijah znotraj glavnih nadzorništev.



Grafikon 6.28: Delež napak po posameznih sekcijah znotraj glavnih nadzorništev

Iz Grafikona 6.28 a je razvidno, da SVP Ljubljana sestavlja dvanajst posameznih nadzorništev in da po številu napak prevladuje nadzorništvo v Kranju, kjer so zabeležili malo več kot eno tretjino vseh napak (37 %). Večje število napak na tirnicah v nadzorništvu Kranj pripišemo večji izkoriščenosti (98 %) enotirne glavne proge Ljubljana–Jesenice [74]. V ostalih nadzorništvih so deleži napak približno enakomerno razporejeni. SVP Ljubljana obsega približno 31 % prog oz. 372,4 km prog, od tega 135,1 km glavnih prog in 237,3 km regionalnih prog [72].

Iz Grafikona 6.28 b je razvidno, da je SVP Postojna sestavljena iz desetih posameznih nadzorništev, kjer po številu evidentiranih napak prevladujeta nadzorništvi v Kopru in Postojni. Pri omenjenih nadzorništvih je skupaj zabeležena polovica (51 %) vseh napak. Velik del prispevata še nadzorništvi v Divači in Borovnici (35 %). SVP Postojna obsega približno 29 % prog oz. 358,5 km prog, od tega 194,8 km glavnih prog in 163,7 km regionalnih prog [72]. Večje število napak na tirnicah v nadzorništvu Koper pripišemo kombinaciji strmih vzponov in padcev proge ter izkoriščenosti (96 %) enotirne glavne proge Divača–Koper [74].

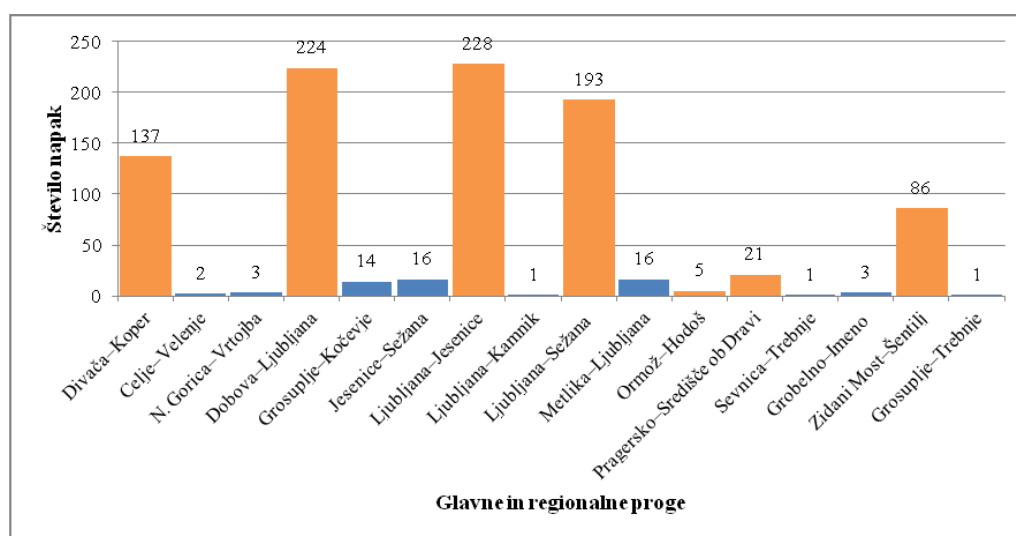
Iz Grafikona 6.28 c je razvidno, da SVP Celje sestavlja pet posameznih nadzorništev in da so napake enakomerno razporejene po vseh nadzorništvih, razen v Šmarju pri Jelšah, kjer se napake ne pojavljajo tako pogosto, saj je to regionalna proga. SVP Celje obsega približno 18 % prog oz. 215,1 km prog, od tega 126,3 km glavnih prog in 88,8 km regionalnih prog [72].

Iz Grafikona 6.28 d je razvidno, da SVP Maribor sestavljajo štiri posamezna nadzorništva, kjer po številu napak na tirnicah močno prevladuje nadzorništvo v Pragerskem – z dvotretjinskim deležem oz.

67 % vseh napak. Napake, zabeležene v nadzorništvu v Pragerskem, skupaj z napakami, ki so jih zabeležili pri nadzorništvu v Mariboru, predstavljajo 89% delež vseh evidentiranih napak na tirnicah v SVP Maribor. SVP Maribor obsega približno 22 % prog oz. 267,5 km prog, od tega 156,3 km glavnih prog in 110,9 km regionalnih prog [72]. Večje število napak na tirnicah v nadzorništvu Pragersko je posledica velikega vzpona glavne proge (9 %) na odseku Zidani Most–Šentilj [74].

6.3.19 Pregled po progah

V Grafikonu 6.29 je prikazan shematski prikaz evidentiranih napak na tirnicah po progah v obravnavanem obdobju na celotnem železniškem omrežju RS.



Grafikon 6.29: Razdelitev skupnega števila napak po glavnih in regionalnih progah

Od skupno 32 prog [65], ki so namenjene železniškemu prometu, so bile napake na tirnicah evidentirane na šestnajstih progah, od tega je bilo sedem glavnih in devet regionalnih prog. Iz Grafikona 6.29 vidimo, da po številu napak na tirnicah odstopajo glavne proge. Tam se je zgodilo 894 napak, kar predstavlja 94% delež vseh evidentiranih napak na tirnicah na celotnem železniškem omrežju RS.

Menimo, da je povečano število napak na glavnih progah posledica dejstva, da so glavne proge del najvažnejših mednarodnih železniških prog, kjer se večina transporta tudi opravi. Zato je tudi pričakovano, da je število napak tam značilno večje kot na regionalnih progah. V nadaljevanju se bomo osredotočili le na najpomembnejše glavne proge železniškega omrežja RS, ki odstopajo po številu napak na kilometer proge. Regionalne proge bomo iz analize izpustili.

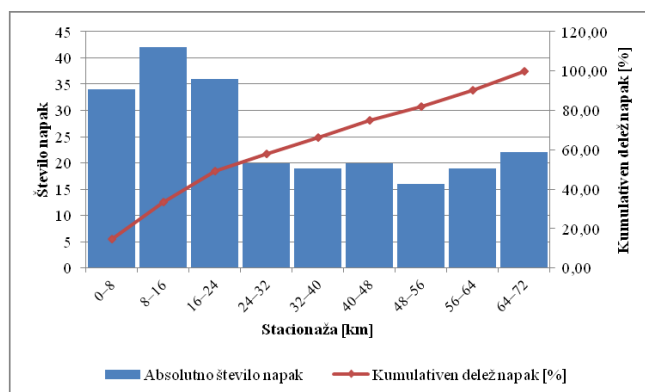
V Preglednici 6.16 je predstavljeno skupno število napak na glavnih progah in po posameznih letih v obdobju 2005–2014.

Preglednica 6.16: Skupno število napak na glavnih progah in po posameznih letih v obdobju 2005–2014

Progovni odsek	Dolžina [km]	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Skupaj
Ljubljana–Jesenice	70,9	24	9	18	32	35	26	23	20	21	20	228
Dobova–Ljubljana	114,7	34	26	15	18	40	35	17	19	14	6	224
Ljubljana–Sežana	116,6	18	14	16	18	18	32	20	23	23	11	193
Divača–Koper	48	10	17	7	7	15	16	20	19	15	11	137
Zid. Most–Šentilj	108,4	13	11	4	8	7	7	10	16	5	5	86
Skupaj	458,6	99	77	60	83	115	116	90	97	78	53	868

6.3.19.1 Ljubljana–Jesenice

V Grafikonu 6.30 je prikazano absolutno število in kumulativni delež napak na tirnicah po stacionažah proge Ljubljana–Jesenice v obravnavanem obdobju na železniškem omrežju RS.



Grafikon 6.30: Razdelitev števila napak po stacionažah proge Ljubljana–Jesenice

Iz Preglednice 6.16, ki prikazuje skupno število napak na glavnih progah in po posameznih letih v obdobju 2005–2014, je razvidno, da je bilo na progi Ljubljana–Jesenice na dolžini 70,9 km skupno evidentiranih 228 napak oz. 26 % vseh napak na glavnih progah, v povprečju 22,80 na leto. V preglednici vidimo, da število napak niha med 9 in 35 na leto, pri čemer skoki med dvema zaporednima letoma ne presegajo 15. Med letoma 2005–2006 se je število napak zmanjšalo za skoraj več kot dvakrat in se do leta 2009 povečalo za skoraj trikrat, do največjega števila napak v enem letu, tj. 35 napak. Po letu 2009 se je začel trend upadanja, ki se je nadaljeval vse do leta 2014.

Iz Grafikona 6.30 je razvidno, da je bilo 112 napak evidentiranih na prvih 24 kilometrih proge oz. če povemo z drugimi besedami, se je med Ljubljano ter na pol poti med Škofjo Loko in Kranjem zgodilo 49,12 % vseh napak. Še posebej odstopa odsek med 8. in 16. kilometrom, kjer se proga med Medvodami in Škofjo Loko naglo dvigne iz 3 % na 10 %. Poleg tega vidimo, da se napake od 24.

kilometra naprej, čeprav se proga od Podnarta naprej vzpenja (13–16 ‰, glej Preglednico 6.2), skozi celotno traso pojavljajo približno v enakem številu, kar je približno 20 napak na vsakih 8 km.

Ker je začetni del proge pretežno ravninski (na dolžini 24 km premaga le dobrih 65 m nadmorske višine), sklepamo, da na večje število napak na tirnicah vzdolžni nagib nima večjega vpliva na njihov nastanek.

Preglednica 6.17: Osnovna statistika za progo Ljubljana–Jesenice

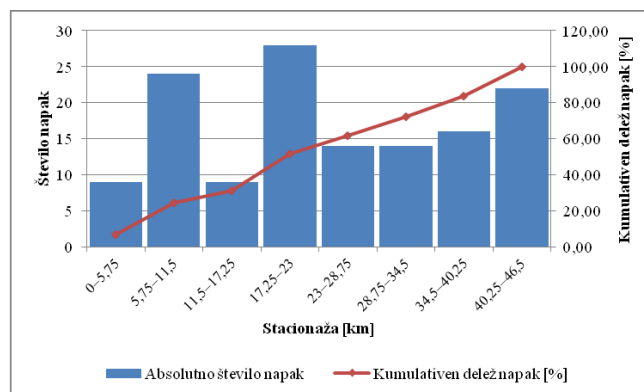
Podatek	Povprečje	Mediana	Modus	Najmanj	Največ	VR	SO	KV	Število
Temperatura [°C]	-0,2	-1	-2	-19	25	44	7,04	5,3	228
Obraba [mm]	5,18	5	5	0	21	21	2,93	0,57	208
Starost [leto]	36,65	36	36	5	81	76	11,74	0,32	225
Letnica izdelave	1978,35	1979	1979	1934	2010	76	11,74	0,01	225
Nagib nivelete [‰]	3,94	2,89	1,88	0	14,25	14,25	3,41	0,86	226
Obremenitev proge [brt/dan]	38.782,22	40.000	40.000	4.000	80.000	76.000	7.615,3	0,2	225
Hitrost [km/h]	82,52	85	100	25	110	85	25,89	0,31	228
Krožni lok [m]	574,92	525	550	200	6250	6050	632,99	1,1	109
Oсна obremenitev vlaka [t/os]	22,47	22,5	22,5	20	22,5	2,5	0,24	0,01	228

Iz Preglednice 6.17 zaključimo, da so se napake na tirnicah na progi Ljubljana–Jesenice v povprečju zgodile pri temperaturi $-0,2$ °C oz. tik pod lediščem, da se je razpon temperatur gibal med -19 °C in 25 °C ter da so se napake najpogosteje pojavljale pri temperaturi -2 °C. Povprečna starost tirnice je bila 36,65 leta. Najpogosteje se napake pojavljajo na tirnici letnika 1979. Najstarejša tirnica z napako je bila iz leta 1934. Napake so v povprečju nastale pri hitrosti 82,52 km/h, pri obrabi 5,18 mm in nagibu proge 3,94 ‰.

Glede na celotno opazovano obravnavano območje menimo, da napake na enotirni progi Ljubljana–Jesenice nastopijo zaradi visoke izkoriščenosti proge (98 %) v kombinaciji v povprečju najnižjih zabeleženih temperatur ($-0,2$ °C), največjih povprečnih hitrosti (82,52 km/h) in v povprečju najstarejših tirnic (36,65 leta).

6.3.19.2 Divača–Koper

V Grafikonu 6.31 je prikazano absolutno število in kumulativni delež napak na tirnicah po stacionažah proge Divača–Koper v obravnavanem obdobju na železniškem omrežju RS.



Grafikon 6.31: Razdelitev števila napak po stacionažah proge Divača–Koper

Iz Preglednice 6.16, ki prikazuje skupno število napak na glavnih progah in po posameznih letih v obdobju 2005–2014, je razvidno, da je bilo na progi Divača–Koper na dolžini 48 km skupno evidentiranih 137 napak oz. 16 % vseh napak na glavnih progah, v povprečju 13,7 na leto. Iz preglednice vidimo, da število napak niha med 7 in 20 na leto, pri čemer skoki med dvema zaporednima letoma ne presegajo 10. Med letoma 2005–2006 se je število napak povečalo za skoraj enkrat ter se do leta 2008 zmanjšalo in ustalilo pri 7. Trend naraščanja se je nadaljeval od leta 2009 naprej vse do največjega števila napak v enem letu, tj. 20 v letu 2011. Po letu 2011 se je začel trend upadanja, ki se je nadaljeval vse do leta 2014.

Iz Grafikona 6.31 je razvidno, da je bila skoraj ena tretjina napak (52 oz. 38,25 %) evidentirana med 5. (5,75) in 11. (11,5) kilometrom proge ter med 17. (17,25) in 23. kilometrom. Če povemo z drugimi besedami, se je med Divačo in Rodikom ter malo pred postajo Hrpelje–Kozina zgodilo 17,64 % vseh napak na tirnicah. Od Prešnice do malo izven Črnotič se je zgodilo 20,59 % vseh napak. Poleg tega tudi opazimo, da je med odsekoma od začetne točke merjenja do 5. (5,75) kilometra in med 11. (11,5) ter 17. (17,25) kilometrom evidentirano enako število napak (9) ne glede na to, da se trasa proge v prvem odseku vzpenja (20 ‰), v drugem pa se nagib nivelete proge giblje okoli 7 ‰.

Menimo, da je glavni razlog za povečano število napak na tirnicah izrazito neugoden teren v kombinaciji naglih vzponov in padcev nivelete proge, ki se gibljejo med 7 in 25 ‰. Sklenemo, da ima večji vzdolžni nagib vpliv na število napak na tirnicah.

Preglednica 6.18: Osnovna statistika za progo Divača–Koper

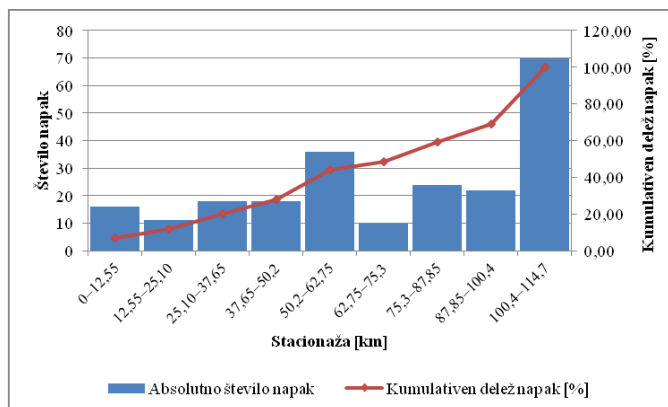
Podatek	Povprečje	Mediana	Modus	Najmanj	Največ	VR	SO	KV	Število
Temperatura [°C]	3,85	3	5	-13	25	38	6,58	1,71	137
Obraba [mm]	4,96	4	2	0	15	15	3,94	0,79	137
Starost [leto]	22,86	24	27	3	66	63	10,89		132
Letnica izdelave	1992,14	1991	1988	1949	2012	63	10,89	0,01	132
Nagib nivelete [%]	11,03	8	0	0	25,6	25,6	9,72	0,88	137
Obremenitev proge [brt/dan]	43.262,85	38.860	38.860	38.860	60.200	21.340	7234,3	0,17	137
Hitrost [km/h]	62,59	70	70	35	75	40	12,86	0,21	137
Krožni lok [m]	440,16	350	300	180	3000	2820	347,85	0,79	82
Oсна obremenitev vlaka [t/os]	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	0	0	0	137

Iz Preglednice 6.18 zaključimo, da so se napake na tirnicah na progi Divača–Koper v povprečju zgodile pri temperaturi 3,85 °C, da se je razpon temperatur gibal od -13 °C do 25 °C in da so se napake najpogosteje pojavljale pri temperaturi 5 °C. Povprečna starost tirnice je bila 22,86 leta. Najpogosteje se napaka pojavlja na tirnici letnika 1988. Najstarejša tirnica z napako je bila iz leta 1949. Napake so v povprečju nastale pri hitrosti 62,59 km/h, pri obrabi 4,96 mm in v nagibu proge 11,03 %.

Glede na celotno opazovano obravnavano območje menimo, da napake na enotirni progi Divača–Koper nastopijo zaradi visoke izkoriščenosti proge (96 %) ter v kombinaciji z največjo obremenitvijo v bruto tonah na dan (43.262,85 brt/dan), največjimi nagibi (11,03 %) in majhnimi krožnimi loki (440,16 m). Na tem območju so v povprečju najmlajše tirnice (22,86 leta), na katerih so evidentirane napake.

6.3.19.3 Dobova–Ljubljana

V Grafikonu 6.32 je prikazano absolutno število in kumulativni delež napak na tirnicah po stacionažah proge Dobova–Ljubljana v obravnavanem obdobju na železniškem omrežju RS.



Grafikon 6.32: Razdelitev števila napak po stacionažah proge Dobova–Ljubljana

Iz Preglednice 6.16, ki prikazuje skupno število napak na glavnih progah in po posameznih letih v obdobju 2005–2014, je razvidno, da je bilo na progi Dobova–Ljubljana na dolžini 114,7 km skupno evidentiranih 224 napak oz. 26 % vseh napak na glavnih progah, v povprečju 22,4 na leto. Iz preglednice vidimo, da število napak niha med 6 in 40 na leto, pri čemer skoki med dvema zaporednima letoma ne presegajo 22. Od leta 2005, ko je bilo evidentiranih 34 napak, se je v naslednjih dveh letih število napak zmanjševalo. Trend povečevanja števila napak se je v naslednjih dveh letih nadaljeval vse do največjega števila napak (40) v letu 2009. Po letu 2009 se ponovno začne trend upadanja, ki se je z izjemo leta 2012 nadaljeval vse do leta 2014.

Iz Grafikona 6.32 je razvidno, da je bilo največje (70) število napak na tirnicah evidentiranih med 100. (100,4) in 114. (114,7) kilometrom oz. če povemo z drugimi besedami, se je med Lazami in Ljubljano, kjer je proga v vzponu 3–4 ‰, zgodilo 31,11 % vseh napak. Menimo, da je razlog za povečano število napak na omenjenem odseku večja obremenjenost proge (večje število vlakov).

Preglednica 6.19: Osnovna statistika za progo Ljubljana–Dobova

Podatek	Povprečje	Mediana	Modus	Najmanj	Največ	VR	SO	KV	Število
Temperatura [°C]	1,12	1	2	–17	20	37	7,45	6,63	211
Obraba [mm]	4,02	3	2	0	13	13	2,65	0,66	210
Starost [leto]	30,97	29	27	7	72	65	10,17	0,33	208
Letnica izdelave	1984,03	1986	1988	1943	2008	65	10,17	0,01	208
Nagib nivelete [‰]	1,55	1,2	0	0	14,318	14,32	2,12	1,37	192
Obremenitev proge [brt/dan]	39.741,78	40.000	40.000	10.000	80.000	70.000	6.410,04	0,16	224

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 6.19

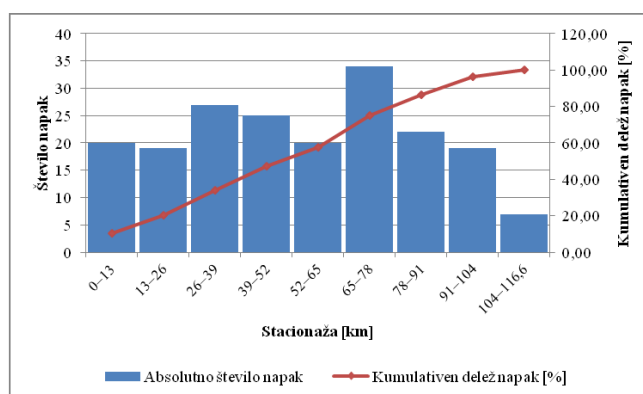
Hitrost [km/h]	81,16	90	100	30	145	115	32,15	0,4	213
Krožni lok [m]	500,58	362	500	175	1562	1387	335,02	0,67	96
Osna obremenitev vlaka [t/os]	22,49	22,5	22,5	22	22,5	0,5	0,06	0,01	211

Iz Preglednice 6.19 zaključimo, da so se napake na dvotirni progi Dobova–Ljubljana v povprečju zgodile pri temperaturi 1,12 °C, da se je razpon temperatur gibal od –17 °C do 20 °C in da so se napake najpogosteje pojavljale pri temperaturi 2 °C. Povprečna starost tirnice je bila 30,97 leta. Najpogosteje se napaka pojavlja na tirnici letnika 1988. Najstarejša tirnica z napako je bila iz leta 1943. Napake so v povprečju nastale pri hitrosti 81,16 km/h, pri obrabi 4,02 mm in v nagibu proge 1,55 ‰.

Glede na celotno opazovano obravnavano območje menimo, da napake na progi Dobova–Ljubljana ne izstopajo po nobenem izmed navedenih parametrov, razen po tem, da je bil povprečni nagib nivelete, kjer so bile napake evidentirane, najmanjši izmed vseh, in sicer 1,55 ‰.

6.3.19.4 Ljubljana–Sežana

V Grafikonu 6.33 je prikazano absolutno število in kumulativni delež napak na tirnicah po stacionažah proge Ljubljana–Sežana v obravnavanem obdobju na železniškem omrežju RS.



Grafikon 6.33: Razdelitev števila napak po stacionažah proge Ljubljana–Sežana

Iz Preglednice 6.16, ki prikazuje skupno število napak na glavnih progah in po posameznih letih v obdobju 2005–2014, je razvidno, da je bilo na progi Ljubljana–Sežana na dolžini 116,4 km skupno evidentiranih 193 napak oz. 22 % vseh napak na glavnih progah, v povprečju 19,3 napake na leto. Iz preglednice vidimo, da število napak niha med 11 in 32 na leto, pri čemer skoki med dvema zaporednima letoma ne presegajo 14 napak. Med letoma 2005–2006 je opaziti manjši upad števila

napak, med letoma 2006–2013 pa se je število napak enakomerno povečevalo, z izjemo leta 2010, ko je število napak naraslo do največjega števila v enem letu (32). Po letu 2013 sledi naglo zmanjšanje števila napak za približno 50 %. Kot zanimivost omenimo, da je v letih, ko je prišlo do naglega povečanja in zmanjšanja števila napak, znašala povprečna izmerjena temperatura med 4 in 6,45 °C.

Iz Grafikona 6.33 zaključimo, da je bila večina (34) napak na tirnicah evidentirana med 65. in 78. kilometrom; če povemo z drugimi besedami, se je med Postojno in Pivko zgodilo 17,62 % vseh napak. Poleg tega tudi opazimo, da število napak narašča od 26. kilometra, tj. od Borovnice naprej, ko se trasa proge vzpne na 12 ‰, pri čemer se trend rasti napak med 52. in 65. kilometrom zmanjšuje ne glede na to, da se proga vzpenja do najvišje ležeče železniške postaje v RS – Postojne (542 metrov nadmorske višine).

Preglednica 6.20: Osnovna statistika za progo Ljubljana–Sežana

Podatek	Povprečje	Mediana	Modus	Najmanj	Največ	VR	SO	KV	N/M
Temperatura [°C]	2,2	1	5	–18	32	50	8,81	4,01	192/1
Obraba [mm]	4,27	4	0	0	12	12	3,12	0,73	193/0
Starost [leto]	31,4	30	36	8	106	98	12,61	0,4	187/6
Letnica izdelave	1983,6	1985	1979	1909	2007	98	12,61	0,01	187/6
Nagib nivelete [‰]	4,87	5,48	0	0	11,5	11,5	4,04	0,83	193/0
Obremenitev proge [brt/dan]	41.680,52	40.000	40.000	1.000	80.000	79.000	5.785,31	0,4	193/0
Hitrost [km/h]	71,06	75	75	10	100	90	16,17	0,23	193/0
Krožni lok [m]	619,06	300	300	220	3000	2780	647,07	1,05	62
Osna obremenitev vlaka [t/os]	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	0	0	0	193/0

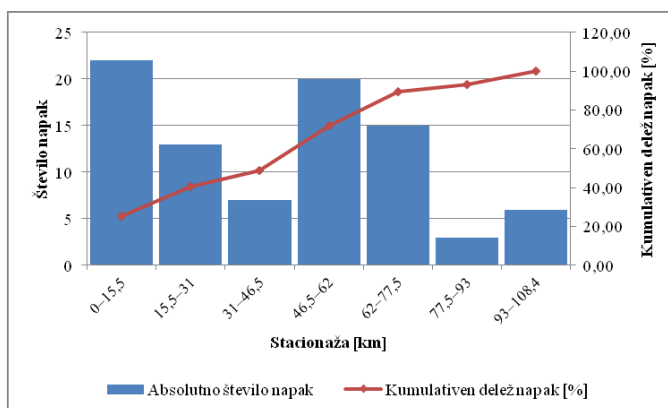
Iz Preglednice 6.20 zaključimo, da so se napake na dvotirni progi Ljubljana–Sežana v povprečju zgodile pri temperaturi 2,2 °C, da se je razpon temperature gibal od –18 °C do 32 °C in da so se napake najpogosteje pojavljale pri temperaturi 1 °C. Povprečna starost tirnice je bila 31,4 leta. Najpogosteje se napaka pojavlja na tirnici letnika 1979. Najstarejša tirnica z napako je bila iz leta 1909. Napake so povprečju nastale pri hitrosti 71,06 km/h, pri obrabi 4,27 mm in v nagibu proge 4,87 ‰.

Glede na celotno opazovano obravnavano območje menimo, da napake na dvotirni progi Ljubljana–Sežana razen največjega povprečnega krožnega loka med vsem progami (619,09 m) in nekoliko večjih

obremenitvah v bruto tonah na dan (41.680,52 brt/dan) ne izstopajo posebej po nobenem izmed parametrov.

6.3.19.5 Zidani Most–Šentilj

V Grafikonu 6.34 je prikazano absolutno število in kumulativni delež napak na tirnicah po stacionažah proge Zidani Most–Šentilj v obravnavanem obdobju na železniškem omrežju RS.



Grafikon 6.34: Razdelitev števila napak po stacionažah proge Zidani Most–Šentilj

Iz Preglednice 6.16, ki prikazuje skupno število napak na glavnih progah in po posameznih letih v obdobju 2005–2014, je razvidno, da je bilo na progi Zidani Most–Šentilj na dolžini 108,4 km skupno evidentiranih 86 oz. 10 % vseh napak na glavnih progah, v povprečju 8,6 napake na leto. Iz preglednice vidimo, da število napak zelo neenakomerno niha med 4 in 16 na leto, pri čemer skoki med dvema zaporednima letoma ne presegajo 11 napak. Število napak se je med letoma 2005–2007 zmanjševalo, vse do najmanjšega števila napak v enem letu (4). Od leta 2008 naprej se je število napak povečalo za skoraj 100 % ter se v letih 2009–2010 malenkostno zmanjšalo. Med letoma 2011–2012 sledi povečanje števila napak – do največjega števila napak v enem letu (16), v letu 2013 nato sledi naglo zmanjšanje za več kot 70 %. Število napak se je v letu 2014 ustalilo.

Iz Grafikona 6.34 zaključimo, da se je največ napak na tirnicah pripetilo med začetno točko merjenja in 15. (15,5) kilometrom in med 46. (46,5) in 62. kilometrom. Če povemo z drugimi besedami, se je med Zidanim Mostom in Laškim ter med Ponikvo in Slovenko Bistrico zgodilo 49,44 % vseh napak. Na omenjenem delu proge na dolžini začetne točke merjenja do 15. (15,5) kilometra znaša vzpon proge 3 ‰, od 46. (46,5) do 62. kilometra pa se proga izmenično vzpenja (4–7 ‰) in pada (9 ‰). Kot zanimivost omenimo, da znaša na odsekih z največjim številom napak maksimalna osna obremenitev 20,5 t.

Preglednica 6.21: Osnovna statistika za progo Zidani Most–Šentilj

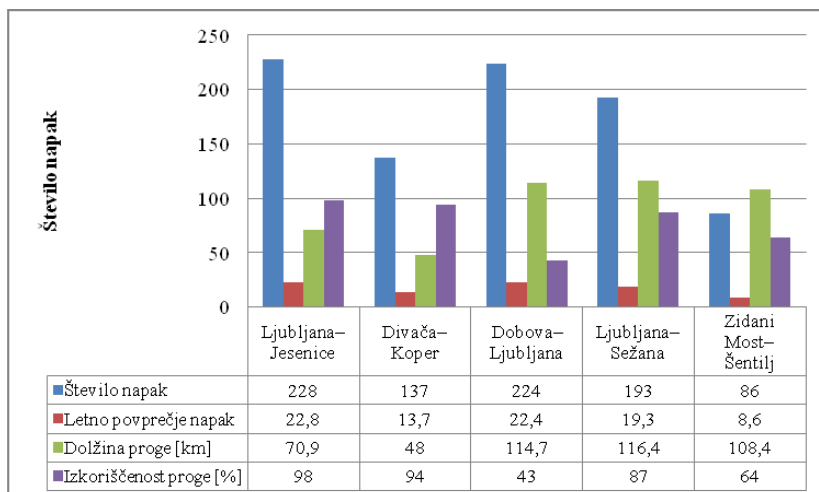
Podatek	Povprečje	Mediana	Modus	Najmanj	Največ	VR	SO	KV	Število
Temperatura [°C]	4,83	6	8	-12	18	30	6,92	1,43	78/8
Obraba[mm]	2,47	2	2	0	9	9	1,68	0,68	71/9
Starost [leto]	30,31	27	26	1	49	48	9,93	0,33	77/9
Letnica izdelave	1984,69	1988	1989	1966	2014	48	9,93	0,01	77/9
Nagib nivelete [%]	4,13	2,725	0	0	10	10	3,42	0,83	66/20
Obremenitev proge [brt/dan]	36.785,71	40.000	40.000	20.000	40.000	20.000	7.310,32	0,24	42/40
Hitrost [km/h]	78,62	80	80	35	120	85	18,68	0,24	/
Krožni lok [m]	552,76	346	500	155	2500	2345	520,04	0,94	33
Oсна obremenitev vlaka [t/os]	21,87	22,5	22,5	20	22,5	2,5	1,07	0,05	78/8

Iz Preglednice 6.21 zaključimo, da so se napake na dvotirni progi Zidani Most–Šentilj v povprečju zgodile pri temperaturi 4,83 °C, da se je razpon temperature gibal od -12 °C do 18 °C in da so se napake najpogosteje pojavljale pri temperaturi 8 °C. Povprečna starost tirnice je bila 30,31 leta. Najpogosteje se napaka pojavlja na tirnici letnika 1989. Najstarejša tirnica z napako je bila iz leta 1966. Napake so v povprečju nastale pri hitrosti 78,62 km/h, pri obrabi 2,47 mm in v nagibu proge 4,13 %.

Glede na celotno opazovano obravnavano območje menimo, da je na dvotirni progi Zidani Most–Šentilj manjše število napak posledica kombinacije manjše izkoriščenosti proge (64 %), najmanjše obremenitve proge (36.785,71 brt/dan), večjih krožnih lokov (552,76 m) in zaradi višje povprečne temperature (4,83 °C) kot na območjih, kjer pride do napak na tirnicah zaradi nižjih temperatur.

6.3.19.6 Primerjava glavnih prog

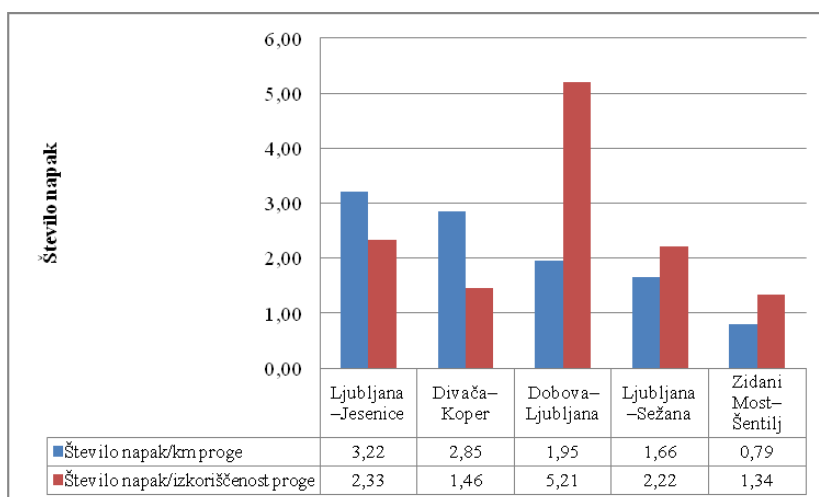
V Grafikonu 6.35 sta prikazana primerjava skupnega števila in letnega povprečja napak na tirnicah glede na dolžino glavnih prog ter podatek o izkoriščenosti proge za obdobje 2005–2014.



Grafikon 6.35: Skupno število in letno povprečje napak na tirnicah glede na dolžino in izkoriščenost glavnih prog

Iz Grafikona 6.35 vidimo, da je bilo največje število napak na tirnicah evidentirano na progah Ljubljana–Jesenice (228) ter Dobova–Ljubljana (224). Poleg tega tudi vidimo, da sta bili najbolj izkoriščeni progi Ljubljana–Jesenice (98 %) in Divača–Koper (94 %).

Grafikon 6.36 podaja primerjavo med glavnimi progami glede na število napak na tirnicah, ki jih normiramo po izbranih parametrih, tj. po dolžini in izkoriščenosti prog.



Grafikon 6.36: Skupno število napak na tirnicah glede na dolžino in izkoriščenost glavnih prog

Iz Grafikona 6.36 vidimo, da se je največ napak na kilometer proge zgodilo na progah Ljubljana–Jesenice (3,22) ter Divača–Koper (2,85). Opazimo lahko še, da je glede na izkoriščenost proge največ napak na tirnicah evidentiranih na dvotirni progah Dobova–Ljubljana (5,21). Na omenjeni progah se je zgodilo skoraj enkrat več napak na tirnicah kot na progah Ljubljana–Jesenice (2,33). Ker je proga

Ljubljana–Jesenice po enem izmed dveh parametrov najbolj izstopajoča, menimo, da je razlog za povečano število napak na tirnicah v veliki izkoriščenosti enotirne proge.

6.4 Korelacije med posameznimi sklopi podatkov

6.4.1 Rezultati analize korelacije za celotno obravnavano območje

V Preglednici 6.22 so prikazani korelacijski koeficienti za celotno obravnavano območje.

Preglednica 6.22: Korelacijski koeficienti za celotno obravnavano območje

	Št. napak	Temp.	Obraba	Letnica	Starost	Hitrost	Oсна obr. vlaka	Obr. proge	Nagib nivelete
Št. napak	/	-0,923	-0,557	0,566	-0,566	0,816	0,507	0,534	-0,428
Temp.	-0,923	/	0,527	-0,592	0,592	-0,872	-0,546	-0,615	0,539
Obraba	-0,557	0,527	/	-0,684	0,684	-0,681	-0,834	-0,563	0,404
Letnica	0,566	-0,592	-0,684	/	-1,000	0,835	0,634	0,581	-0,331
Starost	-0,566	0,592	0,684	-1,000	/	-0,835	-0,634	-0,581	0,331
Hitrost	0,816	-0,872	-0,681	0,835	-0,835	/	0,694	0,698	-0,442
Oсна obr. vlaka	0,507	-0,546	-0,834	0,634	-0,634	0,694	/	0,810	-0,677
Obr. proge	0,534	-0,615	-0,563	0,581	-0,581	0,698	0,810	/	-0,872
Nagib nivelete	-0,428	0,539	0,404	-0,331	0,331	-0,442	-0,677	-0,872	/

Iz Preglednice 6.22 razberemo, da je kar nekaj parametrov, ki so med seboj izrazito linearno povezani. Število napak na tirnicah je najizraziteje linearno odvisno od temperature (tedaj je normirana korelacija najbližje maksimalni vrednosti ± 1). Na osnovi visoke negativne vrednosti korelacije ($r = 0,923$) ugotovimo, da se število napak na tirnicah linearno povečuje z zmanjševanjem temperature.

Naslednji parameter, ki je močno linearno povezan s številom napak na tirnicah, je hitrost. Na osnovi visoke pozitivne korelacije ($r = 0,816$) lahko sklenemo, da se število napak na tirnicah linearno povečuje z večanjem hitrosti.

Opazimo lahko tudi, da je poleg temperature in hitrosti tu še veliko ostalih parametrov, ki so srednje močno linearno povezani s številom napak na tirnicah. Mednje sodijo obraba, letnica ali starost tirnice, osna obremenitev vlaka, obremenitev proge in nagib nivelete. Obraba, nagib in starost tirnice so negativno povezani s številom napak na tirnicah; podatki osnih obremenitev vlaka in obremenitev proge pa pozitivno povezani. Ker se bomo osredotočili le na sklope parametrov, ki korelirajo s številom napak na tirnicah, bomo ostale sklope linearno povezanih parametrov izpustili iz obravnave.

6.4.2 Rezultati analize korelacije za progo Ljubljana–Jesenice

V Preglednici 6.23 so prikazani korelacijski koeficienti za enotirno progo Ljubljana–Jesenice.

Preglednica 6.23: Korelacijski koeficienti za progo Ljubljana–Jesenice

	Št. napak	Temp.	Obraba	Letnica	Starost	Hitrost	Oсна obr. vlaka	Obr. proge	Nagib nivelete
Št. napak	/	-0,864	0,757	-0,459	0,444	0,382	-0,075	0,193	-0,283
Temp.	-0,864	/	-0,780	0,638	-0,629	-0,506	0,318	-0,093	0,409
Obraba	0,757	-0,780	/	-0,463	0,460	0,383	-0,255	0,071	-0,012
Letnica	-0,459	0,638	-0,463	/	-0,999	-0,004	0,637	0,220	0,669
Starost	0,444	-0,629	0,460	-0,999	/	0,002	-0,673	-0,246	-0,650
Hitrost	0,382	-0,506	0,383	-0,004	0,002	/	-0,003	0,265	-0,067
Oсна obr. vlaka	-0,075	0,318	-0,255	0,637	-0,673	-0,003	/	0,557	0,163
Obr. proge	0,193	-0,093	0,071	0,220	-0,246	0,265	0,557	/	0,218
Nagib nivelete	-0,283	0,409	-0,012	0,669	-0,650	-0,067	0,163	0,218	/

Iz Preglednice 6.23 razberemo, da sta med osmimi parametri dva, ki sta izrazito linearno povezana s številom napak na tirnicah, in sicer temperatura ter obraba tirnice. Poleg tega lahko tudi opazimo, da obstaja med številom napak na tirnicah in letnico oz. starostjo ter hitrostjo srednje izrazita negativna oz. pozitivna linearna povezava. Med preostalimi parametri in številom napak na tirnicah pa linearne povezave ni.

Vidimo, da sta temperatura in število napak na tirnicah zelo močno negativno linearno povezana med seboj. Izrazitost linearne povezave je za progo Ljubljana–Jesenice v primerjavi s celotnim obravnavanim območjem nekoliko nižja ($-0,923 > -0,864$), vendar lahko na osnovi visoke vrednosti normiranega korelacijskega koeficienta še vedno zaključimo, da nižja, kot je temperatura, več napak na tirnicah lahko pričakujemo.

Za razliko od celotnega omrežja, kjer je med obrabo in številom napak na tirnicah negativna in le srednje močna povezava, je na progi Ljubljana–Jesenice izrazitost omenjene povezave pozitivna in visoka ($r = 0,757$). Sklenemo lahko, da večja, kot je obraba tirnice, več napak na tirnicah lahko pričakujemo.

6.4.3 Rezultati analize korelacije za progo Divača–Koper

V Preglednici 6.24 so prikazani korelacijski koeficienti za enotirno progo Divača–Koper.

Preglednica 6.24: Korelacijski koeficienti za progo Divača–Koper

	Št. napak	Temp.	Obraba	Letnica	Starost	Hitrost	Oсна obr. vlaka	Obr. proge	Nagib nivelete
Št. napak	/	-0,812	-0,344	0,289	-0,261	0,398	-0,431	-0,177	0,366
Temp.	-0,812	/	0,241	-0,259	0,247	-0,530	0,269	-0,184	-0,481
Obraba	-0,344	0,241	/	-0,108	0,062	-0,232	-0,194	-0,053	0,097
Letnica	0,289	-0,259	-0,108	/	-0,993	0,783	-0,107	-0,348	0,667
Starost	-0,261	0,247	0,062	-0,993	/	-0,803	0,129	0,359	-0,709
Hitrost	0,398	-0,530	-0,232	0,783	-0,803	/	-0,131	0,086	0,676
Oсна obr. vlaka	-0,431	0,269	-0,194	-0,107	0,129	-0,131	/	-0,038	-0,104
Obr. Proge	-0,177	-0,184	-0,053	-0,348	0,359	0,086	-0,038	/	-0,236
Nagib nivelete	0,366	-0,481	0,097	0,667	-0,709	0,676	-0,104	-0,236	/

Iz Preglednice 6.24 razberemo, da je med osmimi parametri eden, ki je izrazito linearno povezan s številom napak na tirnicah, in sicer temperatura. Na osnovi visoke vrednosti normiranega korelacijskega koeficienta tudi za progo Divača–Koper ($r = -0,812$) lahko sklenemo, da nižja, kot je temperatura, več napak se lahko pričakuje na tirnicah.

Opazimo tudi, da je poleg temperature še nekaj parametrov, ki so srednje močno linearno povezani s številom napak na tirnicah. Mednje sodijo obraba, osna obremenitev vlaka, nagib nivelete in hitrost. Obraba in osna obremenitev vlaka so negativno povezani s številom napak na tirnicah, podatki nagiba nivelete in hitrosti pa pozitivno povezani. Med preostalimi parametri in številom napak na tirnicah ni linearne povezave.

6.4.4 Rezultati analize korelacije za progo Ljubljana–Sežana

V Preglednici 6.25 so prikazani korelacijski koeficienti za dvotirno progo Ljubljana–Sežana.

Preglednica 6.25: Korelacijski koeficienti za progo Ljubljana–Sežana

	Št. napak	Temp.	Obraba	Letnica	Starost	Hitrost	Oсна obr. vlaka	Obr. proge	Nagib nivelete
Št. napak	/	-0,890	-0,629	-0,161	0,161	0,092	-0,691	-0,060	-0,305
Temp.	-0,890	/	0,652	0,142	-0,142	-0,089	0,419	0,018	0,135
Obraba	-0,629	0,652	/	-0,341	0,341	-0,535	0,385	-0,400	0,577
Letnica	-0,161	0,142	-0,341	/	-1,000	0,531	0,082	0,953	-0,255
Starost	0,161	-0,142	0,341	-1,000	/	-0,531	-0,082	-0,953	0,255
Hitrost	0,092	-0,089	-0,535	0,531	-0,531	/	-0,025	0,424	-0,656

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 6.25

Oсна obr. vlaka	-0,691	0,419	0,385	0,082	-0,082	-0,025	/	-0,028	0,388
Obr. proge	-0,060	0,018	-0,400	0,953	-0,953	0,424	-0,028	/	-0,139
Nagib nivelete	-0,305	0,135	0,577	-0,255	0,255	-0,656	0,388	-0,139	/

Iz Preglednice 6.25 razberemo, da je med osmimi parametri le temperatura tista, ki je izrazito linearno povezana s številom napak na tirnicah ($r = -0,890$). Tudi za to progo lahko torej sklenemo, da nižja, kot je temperatura, več napak se lahko pričakuje na tirnicah.

Vidimo tudi, da sta tu dva parametra (obraba in osna obremenitev vlaka), ki imata srednje močno negativno linearno povezavo s številom napak na tirnicah. Pri negativni korelaciji lahko zaključimo, da večja vrednost ene količine (obraba, osna obremenitev) pogojuje manjše vrednosti druge količine (število napak na tirnicah).

Med ostalimi parametri (letnica ali starost tirnice, hitrost, obremenitev proge in nagib nivelete) in številom napak na tirnicah linearne povezave ni.

6.4.5 Rezultati analize korelacije za progo Dobova–Ljubljana

V Preglednici 6.26 so prikazani korelacijski koeficienti za dvotirno progo Dobova–Ljubljana.

Preglednica 6.26: Korelacijski koeficienti za progo Dobova–Ljubljana

	Št. napak	Temp.	Obraba	Letnica	Starost	Hitrost	Oсна obr. vlaka	Obr. proge	Nagib nivelete
Št. napak	/	-0,798	-0,437	0,240	-0,240	0,146	-0,120	0,257	-0,120
Temp.	-0,798	/	0,167	-0,395	0,395	-0,351	0,264	-0,557	0,049
Obraba	-0,437	0,167	/	-0,632	0,632	-0,441	0,067	-0,312	0,110
Letnica	0,240	-0,395	-0,632	/	-1,000	0,872	0,102	0,672	0,156
Starost	-0,240	0,395	0,632	-1,000	/	-0,872	-0,102	-0,672	-0,156
Hitrost	0,146	-0,351	-0,441	0,872	-0,872	/	0,064	0,449	0,542
Oсна obr. vlaka	-0,120	0,264	0,067	0,102	-0,102	0,064	/	-0,186	-0,045
Obr. proge	0,257	-0,557	-0,312	0,672	-0,672	0,449	-0,186	/	-0,250
Nagib nivelete	-0,120	0,049	0,110	0,156	-0,156	0,542	-0,045	-0,250	/

Iz Preglednice 6.26 razberemo, da je med osmimi parametri le temperatura tista, ki je izrazito linearno povezana s številom napak na tirnicah ($r = -0,798$). Poleg tega opazimo tudi, da med ostalimi

parametri, razen pri obrabi z negativno šibko povezavo, in številom napak na tirnicah ni linearnih povezav.

6.4.6 Rezultati analize korelacije za progo Zidani Most–Šentilj

V Preglednici 6.27 so prikazani korelacijski koeficienti za dvotirno progo Zidani Most–Šentilj.

Preglednica 6.27: Korelacijski koeficienti za progo Zidani Most–Šentilj

	Št. napak	Temp.	Obraba	Letnica	Starost	Hitrost	Oсна obr. vlaka	Obr. proge	Nagib nivelete
Št. napak	/	-0,635	-0,109	-0,135	0,135	-0,249	0,059	-0,361	0,250
Temp.	-0,635	/	-0,374	0,430	-0,430	0,210	0,551	0,176	-0,640
Obraba	-0,109	-0,374	/	-0,909	0,909	-0,312	-0,817	-0,702	0,591
Letnica	-0,135	0,430	-0,909	/	-1,000	0,264	0,771	0,377	-0,606
Starost	0,135	-0,430	0,909	-1,000	/	-0,264	-0,771	-0,377	0,606
Hitrost	-0,249	0,210	-0,312	0,264	-0,264	/	-0,062	0,326	-0,414
Oсна obr. vlaka	0,059	0,551	-0,817	0,771	-0,771	-0,062	/	-0,133	-0,661
Obr. proge	-0,361	0,176	-0,702	0,377	-0,377	0,326	-0,133	/	-0,276
Nagib nivelete	0,250	-0,640	0,591	-0,606	0,606	-0,414	-0,661	-0,276	/

Iz Preglednice 6.27 lahko razberemo, da med nobenim od osmih obravnavanih parametrov in številom napak na tirnicah ne obstaja izrazita linearna odvisnosti. Obstaja srednje močna negativna linearna povezava med temperaturo ter šibka negativna linearna povezava med obremenitvijo proge in številom napak na tirnicah. Med preostalimi parametri in številom napak na tirnicah linearne povezave ni.

7 ZAKLJUČEK

Namen diplomske naloge je bil seznaniti se z železovo zlitino – jeklom, ki je osnovni material za izdelavo tirnice, podrobneje opisati razvoj tirnice skozi zgodovino in njen postopek izdelave, predstaviti sestavne elemente in karakteristike tirnice ter opisati najznačilnejše vrste tirnih napak in njihovih lastnosti.

Drugi namen diplomske naloge je bil pregledati in analizirati napake na tirnicah, ki so se zgodile na železniškem omrežju v RS v obdobju 2005–2014, ter poiskati in ugotoviti odvisnost med posameznimi sklopi podatkov, ki vplivajo na povečanje števila napak na tirnicah.

Na železniškem omrežju v RS je bilo v obdobju 2005–2014 evidentiranih 954 napak na tirnicah. Na osnovi opravljene analize napak na tirnicah smo ugotovili, da število napak na tirnicah med zaporednimi leti niha. V povprečju pa se jih zgodi 95,4 v enem letu.

Napake na tirnicah se pojavljajo skozi vse leto. Po številu napak odstopata meseca december in januar, v katerih se zgodi 44,65 % vseh napak na tirnicah. Najmanj napak pa se zgodi v poletnih mesecih. Večina evidentiranih napak (91 %) je locirana na tirnicah, vgrajenih v NZT. Nekaj več kot polovica napak na tirnicah (55 %) je bila evidentirana v območju izven zvara oz. na sredini dolžine tirnice, velika večina preostalih (40 %) pa v območju zvara. V 74 % je vzrok za nastanek napake na tirnici napaka v materialu. V 96 % primerov se napaka pripeti na celotnem prečnem prerezu tirnice zaradi preloma.

Večina napak na tirnicah (94 %) se zgodi na glavnih progah železniškega omrežja RS. To gre pripisati dejstvu, da so glavne proge del najvažnejših mednarodnih železniških prog, kjer se opravi tudi večina transporta, zato je število napak na tirnicah precej večje kot na regionalnih progah.

Največ napak na tirnicah na kilometer proge se zgodi na enotirnih progah Ljubljana–Jesenice (3,22) in Divača–Koper (2,85). Opazimo lahko še, da je glede na izkoriščenost proge največ napak na tirnicah evidentiranih na dvotirni progi Dobova–Ljubljana (5,21). Na omenjeni dvotirni progi se zgodi skoraj enkrat več napak na tirnicah kot na enotirni progi Ljubljana–Jesenice (2,33).

Na osnovi opravljene analize smo potrdili začetno hipotezo o vplivu povprečne temperature na število napak na tirnicah. Pri štirih od petih glavnih prog je število napak na tirnicah najizraziteje linearno odvisno od temperature (tedaj je normirana korelacija najbližje maksimalni vrednosti ± 1). Na osnovi visoke negativne vrednosti korelacije ($r = -0,923$) smo sklenili, da se število napak na tirnicah linearno povečuje z zmanjševanjem temperature.

Na osnovi opravljene analize smo zavrgli začetno hipotezo o vplivu povprečnega nagiba nivelete proge, hitrosti proge in osne obremenitve vlaka na število napak, saj pri nobeni od petih glavnih prog število napak na tirnicah ni izrazito linearno odvisno od omenjenih parametrov.

VIRI

- [1] Zgonc, B. 2012. Železniška infrastruktura. Portorož, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet: str. 21–24, 102.
- [2] Office of railroad safety. 2011. Track inspector Rail defect reference manual. First edition. Federal railroad administration: str. 8–37.
<http://www.fra.dot.gov/Elib/Details/L03531> (Pridobljeno 3. 6. 2014.)
- [3] Mundrey, J. S. 2000. Railway track engineering. Third edition. New Delhi, Tata McGraw – Hill Publishing Company Limited: str. 19–67.
http://books.google.si/books/about/Railway_Track_Engineering.html?id=PzA3N6eP4TYC&redir_esc=y (Pridobljeno 28. 4. 2014.)
- [4] Iron ore. 2015. <http://geology.com/rocks/iron-ore.shtml> (Pridobljeno 12. 3. 2015.)
- [5] Campbell, F. C. 2008. Elements of metallurgy and engineering alloys. Ohio, ASM international: str. 351–353.
<https://books.google.si/books?id=6VdROgeQ5M8C&lpg=PA370&ots=V-otsbZlay&dq=Structure%2FProperty%20Relationships%20in%20Irons%20and%20Steels&pg=PP1#v=twopage&q=Structure/Property%20Relationships%20in%20Irons%20and%20Steels&f=true> (Pridobljeno 17. 12. 2014.)
- [6] Kumar, A. 2007. Rail Steel. Third edition. Pune, Indian railways institute of civil engineering: str. 20–51.
http://wiki.iricen.gov.in/doku/lib/exe/fetch.php?media=iricen_books:railsteel.pdf (Pridobljeno 30. 4. 2014.)
- [7] oSIST pr EN 13674 – 1: 2009. Železniške naprave – Zgornji ustroj – Tirnica – 1. del: Vignolove tirnice z maso 46 kg/m in več – Railway applications – Track – Rail – Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above.
- [8] Sahay, S. S., Mohapatra, G., Totten, E. G. 2009. Overview of pearlitic rail steel: Accelerated cooling, quenching, microstructure, and mechanical properties. Pune. Tata research development and design centre. Journal of ASTM international 6, 7: str. 4–5.
http://www.researchgate.net/publication/228663930_Overview_of_Pearlitic_Rail_Steel_Accelerated_Cooling_Quenching_Microstructure_and_Mechanical_Properties (Pridobljeno 30. 12. 2014.)
- [9] Ergum, C. The effects of the alloying elements on the properties of steels: str. 2–6.
<http://web.itu.edu.tr/~erguncela/iml213/hafta-4.pdf> (Pridobljeno 30. 12. 2014.)
- [10] Kožuh, S. 2010. Specijalni čelici. Sisak, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet: str. 10–18.
<http://www.simet.unizg.hr/nastava/predavanja/diplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/specijalni-celici> (Pridobljeno 27. 12. 2014.)
- [11] Davis, J. R. 1998. Structure / property. Relationships in iron and steels. Metals handbook desk edition. Second edition. Ohio, ASM International: str. 153–173.

http://www.asminternational.org/documents/10192/1850176/06542G_Sample.pdf/dede6563-0f07-473e-9e19-82e29371c5ae (Pridobljeno 15. 12. 2014.)

[12] Beg, D. 1999. Jeklene konstrukcije I, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 10 str.

[13] Androić, B., Dujmović, D., Džeba, I. 1994. Metalne konstrukcije 1. Zagreb. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet. Institut građevinarstva Hrvatske: str. 25–26.

[14] Patents. 2015. <http://www.google.com/patents/EP2247764A1?cl=en> (Pridobljeno 24. 2. 2015.)

[15] Vodopivec, F. 2002. Kovine in zlitine. Kristalna zgradba, mikrostruktura, procesi, sestava in lastnosti. Ljubljana. Inštitut za kovinske materiale in tehnologije: str. 173–230.

[16] Totalmateria. 2014.

<http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=246> (Pridobljeno 30. 12. 2014.)

[17] Krauss, G. 2005. Steels. Processing, structure, and performance. Ohio, ASM international: str. 283–287.

http://books.google.si/books?id=59yWLw0HlzMC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (Pridobljeno 17. 12. 2014.)

[18] Chard, A. 2011. Deformations of inclusions in rail steel due to rolling contact. Birmingham, University of Birmingham: str. 13.

http://theses.bham.ac.uk/3295/1/Chard_12_MRes.pdf (Pridobljeno 22. 12. 2014.)

[19] Tata steel. 2014. <http://resources.schoolscience.co.uk/Corus/16plus/steelch3pg4.html> (Pridobljeno 4. 5. 2014.)

[20] Kohlmaier, G., Sartory, V. B. 1991. Houses of glass. A nineteenth – century building type. Munich (Cambridge), MIT press: str. 69.

<https://books.google.si/books?id=whSQRim1yBkC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false> (Pridobljeno 12. 2. 2015.)

[21] Canon, D. F. et al. 2003. Rail defect: an overview. Derbyshire. Fracture of Engineering materials structures. Volume 26, Issue 10. Blackwell Publishing Ltd: str. 865–887.

DOI: 10.1046/j.1460-2695.2003.00693.x (Pridobljeno 31. 3. 2014.)

[22] Chapter4. 2014. <http://www.buffalohistoryworks.com/ptracks/chapter4/chapter4.htm> (Pridobljeno 8. 8. 2014.)

[23] Bianculli, J. A. 2003. Trains and technology. The American railroad in the nineteenth century. Volume 3. Track and structure. Newark, University of Delaware, Rosemont publishing & printing corporation: str. 11–12.

http://books.google.si/books/about/Trains_and_Technology_Track_and_structur.html?id=7T3qECx0CLUC&redir_esc=y (Pridobljeno 11. 2. 2015.)

[24] Trevithick, R. 2014. <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/604469/Richard-Trevithick> (Pridobljeno 28. 7. 2014.)

- [25] Catch me who can. 2014. http://en.wikipedia.org/wiki/Catch_Me_Who_Can (Pridobljeno 8. 8. 2014.)
- [26] Mohorič, I. 1968. Zgodovina železnic na Slovenskem, Ljubljana: 7, str. 535.
- [27] Curley, R. 2012. The complete history of railroads: trade, transport, and expansion. First edition. New York, Britannica educational publishing: str. 5.
https://books.google.si/books?id=idabAAAAQBAJ&pg=PA4&lpg=PA4&dq=stockton+darlington+george+1422mm&source=bl&ots=Cg3_GKRnE2&sig=VUT6QhOieKTD1wSAvgk2sJOxUpc&hl=en&sa=X&ei=hPMkVfedKoyosAGO_oDoBw&ved=0CD0Q6AEwBQ#v=onepage&q=stockton%20darlington%20george%201422mm&f=false (Pridobljeno 5. 4. 2015.)
- [28] Practical railway engineering. 2014. <http://www.scribd.com/doc/30565078/Practical-Railway-Engineering> (Pridobljeno 9. 8. 2014.)
- [29] Dow, A. 2014. The railway. British track since 1804, Pen & Sword books: str. 270–300.
http://books.google.si/books/about/The_Railway.html?id=wG9tBQAAQBAJ&redir_esc=y (Pridobljeno 12. 2. 2015.)
- [30] RailCrossSections. 2015. <http://www.trainweb.org/gsof/RailCrossSections.jpg> (Pridobljeno 5. 4. 2015.)
- [31] Brown, B. A. 1866. Engineering facts and figures. An annual register of progress in mechanical engineering and construction. London & Edinburgh. A Fullarton & co.: str. 276.
<https://books.google.si/books?id=WB11AAAAMAAJ> (Pridobljeno 8. 4. 2015.)
- [32] Archive. 2014. http://srhcblog.blogspot.com/2013_02_01_archive.html (Pridobljeno 9. 8. 2014.)
- [33] Thompson, F. M. L. 1990. The University of London and the world of learning 1836–1986. London, Published by the Hambledon press: str. 136.
http://books.google.si/books/about/The_University_of_London_and_the_World_o.html?id=UKjkgdHh8tsC&redir_esc=y (Pridobljeno 12. 2. 2015.)
- [34] Product info. 2014. http://www.lisztprints.com/Locomotives-&-Railways/c215/p929/Rail-pad-and-a-Vignoles-rail/product_info.html (Pridobljeno 4. 9. 2014.)
- [35] Cobb, M. H. 2012. Dictionary of metals. Novelty, ASM International: str. 295.
http://books.google.si/books/about/Dictionary_of_Metals.html?id=ODsvB5gNs8sC&redir_esc=y (Pridobljeno 12. 2. 2015.)
- [36] Science in parliament, 1996. British steel: Innovation in rail steel. University of Cambridge
<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/parliament.html> (Pridobljeno 26. 3. 2014.)
- [37] Rail section drawing. 2014.
http://en.wikipedia.org/wiki/Rail_profile#mediaviewer/File:PRR_rail_section_drawing.png (Pridobljeno 8. 8. 2014.)
- [38] Rail brochure. 2014. http://jindalsteelpower.com/product_broucher/rail_brochure.pdf (Pridobljeno 23. 5. 2014.)

- [39] Kraut, B. 2011. Krautov strojniški priročnik. Petnajsta slovenska izdaja. Predelana. Ljubljana: str. 386–388.
- [40] Thyssen Stahl AG brochure. 1988. Thyssen rails. Duisburg: str. 6–7. (Pridobljeno 23. 5. 2014.)
- [41] Van Ende, M. A., Kim, Y. M., Cho, M. K. 2011. A kinetic model for the Ruhrstahl Heraeus (RH) degassing process. Metallurgical and materials transactions B. Volume 42B, Issue 3. Gyeongbuk. The minerals, metals & materials society and ASM international: str. 477–489.
DOI: 10.1007/s11663 – 011 – 9495 – 4
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11663-011-9495-4#page-1> (Pridobljeno 5. 6. 2014.)
- [42] Steel making process. 2014.
<http://www.steel.org/en/Making%20Steel/How%20Its%20Made/Processes/Processes%20Info/The%20Basic%20Oxygen%20Steelmaking%20Process.aspx> (Pridobljeno 7. 5. 2014.)
- [43] Continuous casting process. 2014. <http://ispatguru.com/electromagnetic-stirring-in-continuous-casting-process/> (Pridobljeno 24. 4. 2014.)
- [44] Steel university. 2014.
<http://www.steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?catid=199&pageid=2081272067>
(Pridobljeno 13. 5. 2014.)
- [45] Voestalpine. 2014.
http://www.voestalpine.com/schienen/static/sites/c011/downloads/managementsysteme_en/Environmental_Statement_2013.pdf (Pridobljeno 4. 5. 2014.)
- [46] Shepard, R. R. 2004. Continuous casting produces high – quality steel: str. 34.
<http://www.aws.org/itrends/2004/07/it0704-33.pdf> (Pridobljeno 11. 5. 2014.)
- [47] Papaalias, Ph. M, Roberts, C. and Davis, L. C. 2008. A review on non-destructive evaluation of rails. State of the art and future development. Birmingham, University of Birmingham. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Journal of rail and rapid transit: 222, 4: str. 367–384. DOI: 10.1243/09544097JRRT209.
<http://pif.sagepub.com/content/222/4/367.abstract> (Pridobljeno 15. 1. 2015.)
- [48] Alternative control technique document. No emissions from iron and steel mills. 1994. North Carolina, Emission standard division, Office of air quality and standards, U.S. Environmental protection agency: str. 3–15.
EPA – 453/R – 94 – 065
http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/iron_act.pdf (Pridobljeno 24. 4. 2014.)
- [49] Velikost kristalnih zrn. 2014.
http://www2.sts.si/arhiv/tehn/projekt6/kristalna%20zgradba/velikost_kristalnih_zrn.htm (Pridobljeno 13. 5. 2014.)
- [50] Metal working. 2013. http://en.wikipedia.org/wiki/Casting_%28metalworking%29 (Pridobljeno 18. 3. 2013.)

- [51] Tupkary, R. H, Tupkary, V. R. 2008. An introduction to modern steel making. Seventh edition. Khanna publishers: str. 8–517.
http://nptel.ac.in/courses/113104059/lecture_pdf/Lecture%2032.pdf (Pridobljeno 2. 3. 2015.)
- [52] ThyssenKrupp. 2010. RailwayTrackManualPart1.pdf: str. 212–02.
<http://archive.is/www.tkgftgleistechnik.de> (Pridobljeno 14. 3. 2013.)
- [53] Milojković, T. 1986. Gornji stroj železnica, Beograd: str. 5–60.
- [54] Railgrade selection. 2014. http://www.innotrack.net/IMG/pdf/d415-f3-railgrade_selection.pdf (Pridobljeno 18. 9. 2014.)
- [55] Pravilnik o zgornjem ustroju. Uradni list RS, št. 92/2010: 13803. (4., 39., 40. člen.)
<https://www.uradni-list.si/1/content?id=100807> (Pridobljeno 17. 3. 2015.)
- [56] UIC 860 R. 2008. Technical specification for the supply of rails. 9th edition.
- [57] UIC 721 E. 2005.
- [58] Lasten vir.
- [59] Zerbst, U., Lunden, R., Edel, K. O. et al. 2009. Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails – a review. Engineering fracture mechanics. Volume 76. Issue 17: str. 2563–2601.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.09.003>
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794409002707> (Pridobljeno 26. 9. 2014.)
- [60] Thakur, R. C., Topno, R., Krishna, B., Roy, B. et al. 2006. Residual stress measurement in rails. Hyderabad. Indian society for non – destructive testing: str. 1.
<http://www.ndt.net/article/nde-india2006/files/tp-21-pap.pdf> (Pridobljeno 8. 9. 2014.)
- [61] Allen, R. 1999. Finding best practice at the wheel / rail interface. International railway journal, Volume 6: str. 48–50.
<http://www.worldcat.org/title/international-railway-journal-and-rapid-transit-review-irj/oclc/60623442> (Pridobljeno, 7. 4. 2015.)
- [62] Olofsson, U., Nilsson, R. 2002. Surface cracks and wear of rail. A full scale test on a commuter train track. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Volume 216: 4: str. 249–264.
<http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A7014&dswid=-3078> (Pridobljeno 7. 4. 2015.)
- [63] Marais, J. J., Mistry, K. C., 2003. Rail integrity management by means of ultrasonic testings. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structure. Volume 27, Issue 10: str. 931–938.
- [64] UIC 712 R. 2002. Rail defects. Fourth edition: str. 5–70.
- [65] Letna poročila. 2015. <http://www.slo-zeleznice.si/sl/podjetje/zamedije/letnaporocila> (Pridobljeno 20. 4. 2015.)
- [66] Hatfield rail crash. 2015. <http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Hatfield+rail+crash> (Pridobljeno 14. 1. 2015.)
- [67] Doherty, A., Clark, S., Care, R. et al. 2005. Why rail crack. Issue 23.
<http://www.ingenia.org.uk/ingenia/articles.aspx?Index=318> (Pridobljeno 19. 1. 2015.)

- [68] Eschede train disaster. 2015. <http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Eschede+train+disaster> (Pridobljeno 14. 1. 2015.)
- [69] Esslinger, V., Kieselbach, R., Koller, R. et. al. 2003. The railway accident of Eschede – technical background. Dubendorf. Engineering failure analysis. Volume 11, Issue 4: str. 515–535. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630704000214> (Pridobljeno 14. 1. 2015.)
- [70] National geographic. Seconds from disaster – derailment at Eschede. https://www.youtube.com/watch?v=uY1NNJ7_7hg(Pridobljeno 8.4.2015).
- [71] Letna poročila. 2015. http://www.slozeleznice.si/uploads/SZ/letna_porocila/letno%20porocilo%202013/LP13A4%20-%20Komplet.net.pdf (Pridobljeno 5. 2. 2015.)
- [72] Proge. 2015. http://www.slozeleznice.si/uploads/SZ/program_omrezja_2015_4/PO_2015_4_Priloga_3_1a_Proge.pdf (Pridobljeno 28. 4. 2015.)
- [73] Pregledne karte. 2015. http://www.slozeleznice.si/uploads/SZ/program_omrezja_2015_4/PO_2015_4_Priloga_3_2_Pregledne_karte.pdf (Pridobljeno 28. 4. 2015.)
- [74] Index. 2015. <http://www.miniaturna-zeleznica.com/index.php> (Pridobljeno 20. 4. 2015.)
- [75] Nagibi in upori. 2015. http://www.slozeleznice.si/uploads/SZ/program_omrezja_2015_4/PO_2015_4_Priloga_3_5_Nagibi_in_upori.pdf (Pridobljeno 28. 4. 2015.)
- [76] Arhiv novic. 2015. <http://www.luka-kp.si/slo/medijski-koticek/arhiv-novic/3626> (Pridobljeno 31. 3. 2015.)
- [77] Superlativi. 2015. http://www.slozeleznice.si/sl/podjetje/infrastruktura/zeleznisko_omrezje/superlativi (Pridobljeno 31. 3. 2015.)
- [78] Letno poročilo. 2015. http://www.slozeleznice.si/uploads/pictures/gallery/file/SZ_Letno_Porocilo_2005_SLO.pdf (Pridobljeno 17. 3. 2015.)
- [79] Pesec, W., Hochfellner, R, 2015. Voest Alpine. Predavanje in debata. Kam gre razvoj tirnic. Ljubljana (21. 5. 2015.)