

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:

Golob, T., 2014. Tir na togi podlagi. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Zgonc, B., somentorica Šemrov, D.): 74 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Golob, T., 2014. Tir na togi podlagi. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Zgonc, B., co-supervisor Šemrov, D.): 74 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
PROMETNA SMER**

Kandidatka:

TINA GOLOB

TIR NA TOGI PODLAGI

Diplomska naloga št.: 3382/PS

SLAB TRACK

Graduation thesis No.: 3382/PS

Mentor:

prof. dr. Bogdan Zgonc

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentorica:

asist. Darja Šemrov

Član komisije:

doc. dr. Tomaž Maher

doc. dr. Mitja Košir

Ljubljana, 23. 04. 2014

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **TINA GOLOB** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
»Tir na togi podlagi«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 6.4.2014

Tina Golob

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 625.1(497.4)(043.2)
- Avtor:** Tina Golob
- Mentor:** prof. dr. Bogdan Zgonc, univ. dipl. inž. grad.
- Somentorica:** asist. Darja Šemrov, univ. dipl. inž. grad.
- Naslov:** Tir na togi podlagi
- Tip dokumenta:** Diplomaska naloga – univerzitetni študij
- Obseg in oprema:** 74 str., 5 pregl., 93 sl.
- Ključne besede:** tir na togi podlagi, klasična proga, primerjava, sistem ÖBB-Porr
- Izvleček**

Zadnjih 160 let je bila večinoma v uporabi klasično grajena proga s tirno gredo, pragi in jekleno tirnico. Zagotavljanje vse večjih hitrosti vlakov, povečanje kapacitet na progah, zagotavljanje udobne in varne vožnje ter vse večja zanesljivost in razpoložljivost železniške proge, je privedlo do razvoja inovativnih sistemov za železniške proge. Tako imenovan tir na togi podlagi so prvič vgradili leta 1972, od tedaj so po celem svetu razvili veliko različnih sistemov. Togi tir je vgrajen tudi na slovensko železniško omrežje. Najnovejša je izvedba tira na togi podlagi v predorih Križiški, Jurgovski in Ležeški na odseku proge Sežana – Gornje Ležeče.

Tir na togi podlagi, v primerjavi s klasično grajeno proggo, praktično ne potrebuje vzdrževanja, zato ga vgrajujejo predvsem na hitre in zelo obremenjene proge. Zaradi možnosti neposredne pritrditve na umetne objekte, nizke konstrukcijske višine in manjše teže kot klasično grajena proga, ga vgrajujejo tudi na odseke v predorih in na mostovih. Sicer pa je prednost togega tira tudi daljša življenjska doba, boljša geometrijska stabilnost proge ter varnejša in udobnejša vožnja. Togi tir ima pomanjkljivosti, kot so visoki investicijski stroški v kombinaciji z daljšim časom gradnje, omejene možnosti popravkov po končani gradnji, višje emisije hrupa in vibracij ter draga in dolgotrajna popravila v primeru iztirjenja vlaka.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 625.1(497.4)(043.2)
Author: Tina Golob
Supervisor: Prof. Bogdan Zgonc, Ph. D.
Co-supervisor: Assist. Darja Šemrov, B. Sc.
Title: Slab track
Document type: Graduation thesis – University studies
Scope and tools: 74 p., 5 tab., 93 fig.
Keywords: slab track, conventional track, comparison, ÖBB-Porr system

Abstract

The last 160 years has been mostly used conventional track with ballasted bed, sleepers and steel rail. Ensuring the high speed rail traffic, increasing railway track capacities, providing comfortable and safe ride as well as high reliability and availability railway track, has led to development of innovative systems for railway track. The so-called slab track was first built in 1972 and since then, they have developed many different slab track systems around the world. Slab track was also built on slovenian railway network. The most recent implementation of slab track is in tunnels Križiški, Jurgovski and Ležeški on a section line Sežana – Gornje Ležeče.

In comparison to ballasted track, slab track requires no maintenance, so it is installed mainly on high speed and highly loaded lines. Due to the possibility of direct mounting rails to the structures, the low construction height and lower weight than conventional track, slab track is built on sections in tunnels and on bridges. Moreover, the advantage of slab track is also longer life cycle, better geometric stability of the track, safer and comfortable ride. Slab track has disadvantages such as higher investment costs in combination with longer time of construction, limited corrections upon completion of construction, higher vibration and noise emissions as well as expensive and longer repairs in case of derailment of the train.

ZAHVALA

Za vso pomoč in strokovne nasvete v času nastajanja diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. Bogdanu Zgoncu in somentorici asist. Darji Šemrov. Posebej se zahvaljujem tudi Primožu Srebotu, ki mi je omogočil ogled togega tira na terenu in mi podal odgovor na marsikatero vprašanje.

Diplomsko nalogo posvečam staršema, ki sta mi omogočila študij in me pri tem podpirala in spodbujala.

Hvala sošolkam in sošolcem, ki so mi polepšali študijske dni.

Hvala tudi tebi, Gašper, za spodbudne besede, ki si jih vedno izrekel v pravem trenutku.

Bolj kot v zahvalo, v opravičilo moji hčerki Lari, ki je bila prikrajšana za marsikatero igralno urico. Vse bova nadoknadili.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Namen in cilji naloge.....	3
2	KLASIČNI TIR S TIRNO GREDO	4
2.1	Spodnji ustroj.....	4
2.2	Zgornji ustroj.....	5
2.3	Prednosti in pomanjkljivosti.....	6
3	TIR NA TOGI PODLAGI	7
3.1	Uporaba tira na togi podlagi.....	8
3.2	Konstrukcija tira na togi podlagi	8
3.2.1	Spodnji ustroj.....	9
3.2.1.1	Temeljna tla	9
3.2.1.2	Zmrzlinško varna plast (ZVP).....	10
3.2.2	Zgornji ustroj.....	11
3.2.2.1	Hidravlično vezana nosilna plast (HVNP).....	11
3.2.2.2	Betonska nosilna plast (BNP)	11
3.2.2.3	Asfaltna nosilna plast (ANP)	11
3.3	Zahteve pri gradnji togega tira	12
3.3.1	Togi tir v predoru.....	12
3.3.2	Togi tir na mostni konstrukciji.....	13
3.3.3	Togi tir na nasipu	13
3.3.4	Zahteve na prehodnih območjih.....	14
3.3.4.1	Prehod med mostom in nasipom	14
3.3.4.2	Prehodno območje pred predorom	15
3.3.4.3	Prehod med klasičnim in togim tirom	15
3.3.5	Emisije hrupa in vibracij	16
4	SISTEMI TIRA NA TOGI PODLAGI	18
4.1	Sistemi s točkovno podprto tirnico.....	18
4.1.1	Pragi ali bloki vgrajeni v beton	18
4.1.1.1	Sistem Rheda.....	19
4.1.1.2	Rheda 2000	20

4.1.1.3	Sistem Heitkamp	21
4.1.1.4	Sistem Züblin.....	22
4.1.1.5	Sistem Stedef	23
4.1.1.6	Sonneville – LVT sistem	24
4.1.1.7	Sistem Walo	25
4.1.2	Pragi položeni na asfaltno ali betonsko plast	25
4.1.2.1	Sistem ATD	27
4.1.2.2	Sistem BTD	28
4.1.2.3	Sistem SATO.....	28
4.1.2.4	Sistem FFYS	29
4.1.2.5	Sistem GETRAC.....	29
4.1.3	Montažne betonske plošče	31
4.1.3.1	Sistem Shinkansen.....	32
4.1.3.2	Sistem Bögl	33
4.1.3.3	Sistem ÖBB-Porr	35
4.1.4	Monolitni sistemi	36
4.1.4.1	Travnata proga (ang. <i>Lawn track</i>).....	37
4.1.4.2	Sistem FFC	37
4.1.4.3	Sistem BES	38
4.1.4.4	Sistem BTE	39
4.1.4.5	Sistem Hochtief, Schreck-Mieves	39
4.1.4.6	Sistem PACT.....	40
4.2	Sistemi z zvezno podprto tirnico	41
4.2.1	Vgrajena tirnica.....	41
4.2.1.1	Sistema INFUNDO in Edilon.....	42
4.2.1.2	Sistem BBEST (ang. <i>Balfour Beatty Embedded Slab Track</i>).....	43
4.2.1.3	Sistem Deck Track	45
4.2.2	Vpeta in neprekinjeno podprta tirnica.....	46
4.2.2.1	Sistem Cocon Track	46
4.2.2.2	Sistem ERL	46
4.2.2.3	Sistema Vanguard in KES	47
4.2.2.4	Sistem SFF.....	48
4.2.2.5	Sistem SAARGUMMI.....	48
5	PRIMERJAVA MED SISTEMI	50
5.1	Tehnične in ekonomske značilnosti	50

5.2	Togi tir po svetu	51
5.3	Togi tir na slovenskem železniškem omrežju	52
5.3.1	Opis sistema ÖBB-Porr.....	53
5.3.2	Vgradnja sistema v predore Križiški, Jurgovski in Ležeški	56
5.3.3	Prehodna konstrukcija	59
6	PRIMERJAVA MED KLASIČNIM IN TOGIM TIROM	61
6.1	Konstruktivski elementi	61
6.1.1	Zgornji ustroj.....	62
6.1.2	Spodnji ustroj.....	64
6.2	Prednosti tira na togi podlagi.....	64
6.3	Pomanjkljivosti tira na togi podlagi	65
6.4	Stroški gradnje in vzdrževanja	66
7	ZAKLJUČEK.....	70
VIRI.....		72

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Sistemi tira na togi podlagi	18
Preglednica 2: Upogibna togost sistemov na togi podlagi (Esveld, 2001).....	50
Preglednica 3: Tehnična in ekonomska primerjava različnih sistemov (Lichtberger, 2005) ..	51
Preglednica 4: Primerjava ZU in SU klasičnega in togega tira (Quante, Ogilvie, 2001)	62
Preglednica 5: Stroški gradnje in letni stroški vzdrževanja za različne sisteme	68

KAZALO SLIK

Slika 1: Diolkova vagonka pot čez ožino Korint v Grčiji.....	1
Slika 2: Odsek tira z okroglimi lesenimi tirnicami v Tehničnem muzeju v Berlinu.....	1
Slika 3: Tirnica z obliko ribjega trebuha na kamnitih blokih.....	2
Slika 4: Klasična sestava železniške proge	4
Slika 5: Prečni prerez zemeljskega telesa v nasipu.....	5
Slika 6: Zgornji ustroj klasične proge.....	5
Slika 7: Tri klasične zasnove tira na togi podlagi	8
Slika 8: Prečni prerez proge v predoru	12
Slika 9: Tipična postavitvev togega tira na kratkih mostovih.....	13
Slika 10: Prehod med mostno konstrukcijo in nasipom	15
Slika 11: Dve dodatni tirnici na prehodu med klasičnim in togim tirom.....	16
Slika 12: Prehodno območje med klasičnim in togim tirom	16
Slika 13: Različni vzmetni sistemi	17
Slika 14: Sistem z vgrajenimi pragi in sistem z elastično podprtimi bloki	19
Slika 15: Sistem Rheda.....	19
Slika 16: Sistem Rheda 2000	20
Slika 17: Vgradnja sistema Rheda 2000	21
Slika 18: Sistem Heitkamp	22
Slika 19: Sistem Züblin.....	22
Slika 20: Postopek gradnje sistema Züblin.....	23
Slika 21: Dvodelni prag Sat S312 sistema Stedef	24
Slika 22: Sistem Sonnevile - LVT.....	24
Slika 23: Sistem LVT v predoru.....	24
Slika 24: Standardni LVT sistem in LVT sistem z visokim dušenjem	25
Slika 25: Sistem Walo	25

Slika 26: Sistem s pragi ali bloki, ki so položeni na vrh nosilne plasti	26
Slika 27: ATD sistem blizu mesta Nantenbach.....	27
Slika 28: Enodelni in dvodelni pragi sistema ATD	27
Slika 29: Sistem BTB	28
Slika 30: Sistem SATO	28
Slika 31: Sistem FFYS	29
Slika 32: Jeklen prag sistema FFYS	29
Slika 33: Reže v asfaltni plasti in betonski prag s sidrnim blokom, sidrni blok	30
Slika 34: Sistem Getrac A1 s hidravlično vezano plastjo	30
Slika 35: Sistem Getrac	31
Slika 36: Shematski prikaz sistema montažnih betonskih plošč	31
Slika 37: Sistem Shinkansen.....	32
Slika 38: Proga z ravnimi ploščami in plošče v obliki okvirja.....	33
Slika 39: Sistem Bögl	33
Slika 40: Plošča sistema Bögl	34
Slika 41: Polaganje montažnih plošč.....	35
Slika 42: Dimenzije plošče sistema ÖBB Porr	35
Slika 43: Sistem ÖBB-Porr.....	36
Slika 44: Shematski prikaz monolitnega sistema s posameznimi podpornimi točkami.....	36
Slika 45: Sistem travnate proge	37
Slika 46: Sistem FFC	38
Slika 47: Sistem BES.....	38
Slika 48: Sistem BES na testnem odseku	38
Slika 49: Sistem BTE	39
Slika 50: Sistem BTE na testnem odseku	39
Slika 51: Sistem Hochtief, Schreck-Mieves	40
Slika 52: Sistem Hochtief, Schreck-Mieves na testnem odseku	40
Slika 53: Sistem PACT.....	41

Slika 54: Shematski prikaz sistema z zvezno podprto in vgrajeno tirnico	42
Slika 55: Sistem Edilon z vgrajeno tirno konstrukcijo.....	42
Slika 56: Prehod med klasičnim in Edilon sistemom.....	43
Slika 57: Sistem BBEST z vgrajeno tirnico.....	44
Slika 58: Na mestu vgrajen podsistem	44
Slika 59: Betonska plošča z utoroma	45
Slika 60: Sistem Deck Track	45
Slika 61: Detajl tirnice in prag sistema Cocon Track.....	46
Slika 62: Sistem ERL z neprekinjeno podprto tirnico	47
Slika 63: Sistem Vanguard.....	47
Slika 64: Sistem SFF	48
Slika 65: Sistem SAARGUMMI	49
Slika 66: Zemljevid hitrih prog v Evropi	52
Slika 67: Zemljevid predvidenih in zgrajenih hitrih prog na svetu leta 2013 in 2025.....	52
Slika 68: Prvi odsek sistema ÖBB-Porr pri Langenlebarn, vgrajen leta 1989.....	53
Slika 69: Togi tir sistema ÖBB-Porr v prerezu in tlorisu.....	54
Slika 70: Betonske plošče sistema ÖBB-Porr.....	55
Slika 71: Zamenjava poškodovane plošče	56
Slika 72: Očiščeno dno predora.....	56
Slika 73: Polaganje geotekstila.....	56
Slika 74: Armaturo nosilne plasti.....	57
Slika 75: Vlivanje betona za nosilno plast	57
Slika 76: Kamionsko dvigalo.....	57
Slika 77: Panelno portalno dvigalo	57
Slika 78: Prenašanje betonskih plošč.....	58
Slika 79: Polaganje betonskih plošč.....	58
Slika 80: Vreteno M36.....	58
Slika 81: Dilatacija med dvema ploščama	58

Slika 82: Pritrdilni pribor Vossloh 300-1.....	58
Slika 83: Pritrditev tirnic 60 E1.....	58
Slika 84: Proga po vlivanju podlivnega betona.....	59
Slika 85: Končana dvotirna proga.....	59
Slika 86: Prehodna konstrukcija.....	59
Slika 87: Lepljena tirna greda.....	59
Slika 88: Prehodna konstrukcija med klasičnim in togim tirom	60
Slika 89: Armatura prehodne konstrukcije.....	60
Slika 90: Dodatna tirnica.....	60
Slika 91: Sistem 300 (Vossloh) z elastično sponko Skl 15	63
Slika 92: Primerjava stroškov klasičnega in togega tira.....	67
Slika 93: Letni stroški v €/m´ za različne sisteme	68

SEZNAM KRATIC

ANP	asfaltna nosilna plast
BNP	betonska nosilna plast
HVNP	hidravlično vezana nosilna plast
SU	spodnji ustroj
UIC	mednarodna železniška zveza
UL RS	uradni list Republike Slovenije
SŽ	Slovenske železnice
ZVP	zmrzlinosko varna plast
ZU	zgornji ustroj

1 UVOD

Najzgodnejše dokaze o vlečnih poteh, ki so predhodnik železnice, so našli v Grčiji. Okoli leta 600 pred našim štetjem je obstajala 6 do 8,5 km dolga Diolkonova vagonška pot čez ožino Korint v Grčiji. Vagone na kolesih so vlekli ljudje ali živali po poti vklesani v kamen, ki je omogočala vagonom potovati po načrtovani poti. Prve vprežne vagonške poti so se pojavile tudi na Malti in v različnih delih Rimskega imperija (Lewis, 2001).



Slika 1: Diolkova vagonška pot čez ožino Korint v Grčiji
(Vir: Lewis, 2001)

Okoli leta 1550 so se v Evropi pojavile proge za vagone v kamnolomih in premogovnikih, ki so jih vlekli konji. Vozilo so vodile proge, sestavljene iz lesenih letev na prečnih lesenih pragih, ki so ohranjali razmik tirnic. Ko je zgodnja industrijska revolucija napredovala in so obremenitve postale večje, so na vrh lesenih letev pritrdili kovane železne plošče in tako zmanjšali obrabo lesa. Tako sestavljene tirnice pa so bile prešibke za prevoz vedno težjih bremen, zato so jih konec 18. stoletja nadomestili z litoželeznimi tirnicami (Bonnett, 2005).



Slika 2: Odsek tira z okroglimi lesenimi tirnicami v Tehničnem muzeju v Berlinu
(Vir: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Round_timber_rails.jpg (3.10.2013))

Leta 1788 so izumili litoželezne tirnice, ki so imele glavo in so prvič omogočale prevoz vozil s kolesi z robnim vencem. Tirnice iz litega železa so bile krhke in so se enostavno zlomile, zato

so lahko izdelali le tirnice kratkih dolžin, ki so jih položili na kamnite bloke. Tirnice so imele obliko ribjega trebuha, saj so imele razširitev v srednjem delu. Take tirnice so uporabili na prvi železniški progi med mestoma Stokton in Darlington v Angliji, ki so jo odprli leta 1825.



Slika 3: Tirnica z obliko ribjega trebuha na kamnitih blokih
(Vir: [http://en.wikipedia.org/wiki/Permanent_way_\(history\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Permanent_way_(history))) (3.10.2013))

Podpora tirnicam so sprva predstavljali na tla položeni kamniti bloki z vodili, ki so držali tirnico pritrjeno na bloke. Bili so brez prečnih vezi, ki bi ohranjali primerno tirno širino, zato so se lahko posamezno premikali in s tem povzročali težave. Posamezni kamniti bloki so bili težki in neprimerni za uporabo na mehkih tleh. Nadomestili so jih s prečno na os položenimi lesenimi pragi, ki so se izkazali za veliko bolj ekonomične in zadovoljive.

Leta 1820 je John Birkinshaw namesto krajših tirnic iz litega železa predstavil daljše tirnice iz valjanega železa. Izdelava daljših tirnic, in s tem zmanjšanje števila stikov, ki so bili najšibkejši del proge, je znatno prispevala k eksplozivni rasti železnic. Izkušnje in nove tehnologije proizvodnje tirnic so omogočale, da so bile tirnice vedno daljše, presek tirnice pa vedno večji. Namesto iz železa so jih leta 1857 začeli izdelovati iz jekla, ki je močnejši in trpežnejši material kot železo.

Zadnjih 160 let je večina železnic po svetu grajena klasično s tirno gredo, pragi, pritrdilnim priborom in z dvema tirnicama z ravnim dnom, ki ju neposredno pritrdijo na prag. Glavne prednosti tradicionalne sestave proge so relativno nizki stroški gradnje, visoka elastičnost, relativno visoka stopnja vzdrževanja po nizki ceni in visoka absorpcija hrupa. Glavni problem, ki se pojavi pri klasičnem tiru, je počasno propadanje tolčenca zaradi prometnih obremenitev. Tolčenec je sestavljen iz zrnatega materiala v razsutem stanju, njegovo drobljenje pa povzroča vse večje geometrijske neravnine in zablatenje tirne grede s finimi delci, kar povzroča težave z odvodnjavanjem. Tolčenec je relativno težek material, kar vodi v povečanje stroškov gradnje mostov in viaduktov, v kolikor je proga grajena s tirno gredo. Sestava klasične proge ima razmeroma veliko višino, kar ima neposredne posledice za dimenzije prečnega prereza predora. Pragi v tirni gredi podpirajo tirnico vsakih 60 do 70 cm, vsak prag pa lahko povzroči napako v geometriji proge.

V zadnjem obdobju narašča uporaba hitrih vlakov, ki na poti zahtevajo večjo nosilnost in natančno geometrijo proge. Ker klasična proga s tirno gredo ne omogoča zahtevane geometrijske stabilnosti za hitre vlake, so razvili več inovativnih sistemov togega tira. Pri togem tiru so tirno gredo nadomestili z odpornejšo betonsko ali asfaltno plastjo, ki omogoča boljšo geometrijsko stabilnost proge. Prednost togega tira, v primerjavi s klasičnim tirom, je tudi daljša življenjska doba in manj potreb po vzdrževanju.

1.1 Namen in cilji naloge

Namen diplomske naloge je predstaviti koncept tira na togi podlagi ter ga primerjati s klasično grajenim tirom. Namen je tudi predstaviti sestavne dele spodnjega in zgornjega stroja ter predstaviti potrebne ukrepe za izvedbo togega tira.

Cilj diplomske naloge je opisati in predstaviti različne sisteme togega tira, ki se uporabljajo po svetu, in podrobno predstaviti sistem, ki je v uporabi na slovenskem železniškem omrežju. Cilj je tudi predstaviti prednosti in pomanjkljivosti togega tira v primerjavi s klasično grajenim tirom.

2 KLASIČNI TIR S TIRNO GREDO

Železniška proga je sestavljena iz spodnjega in zgornjega ustroja, katerih sestava je pri nas določena s pravilniki, objavljenimi v Uradnih listih RS, in sicer s Pravilnikom o zgornjem ustroju železniških prog (UL RS št. 92/2010) ter Pravilnikom o spodnjem ustroju železniških prog (UL RS št. 93/2013).

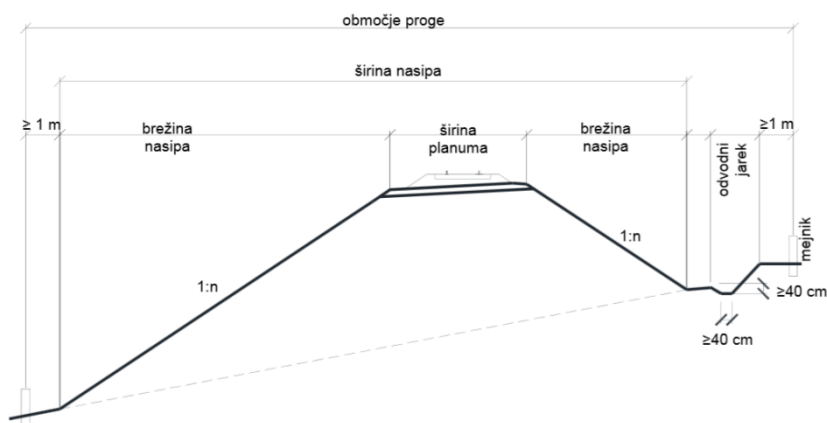


Slika 4: Klasična sestava železniške proge
(Vir: Golob, 2014)

2.1 Spodnji ustroj

Spodnji ustroj sestavljajo zemeljski in umetni objekti in je del železniške proge, ki se nahaja med zgornjim ustrojem in raščnim terenom. Njegova naloga je prenašanje obremenitev iz zgornjega ustroja na temeljna tla. Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog (UL RS št. 93/2013) določa, da zemeljsko telo sestavljajo planum proge, nevezana nosilna plast, nasip, temeljna tla, brežine useka, podporni in oporni zidovi ter drugi ukrepi, ki izboljšujejo stabilnost planuma proge. Glede na temeljna tla je lahko proga grajena na nasipu, v useku ali mešanem profilu.

Gradnja spodnjega ustroja zahteva veliko pozornost, saj morajo biti vse plasti kakovostno vgrajene. Kakovost gradnje zemeljskega telesa se ugotavlja z ustrežno stopnjo zgoščenosti po Proctorju D_{Pr} in z vrednostjo deformacijskega modula E_{v2} , kot to določa Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog (UL RS št. 93/2013).



Slika 5: Prečni prerez zemeljskega telesa v nasipu
(Vir: Pravilnik o SU železniških prog, 2013)

2.2 Zgornji ustroj

Meja med zgornjim in spodnjim ustrojem je planum nevezane nosilne plasti. Zgornji ustroj klasične proge predstavlja tirna greda, v katero je položena tirna rešetka, sestavljena iz dveh jeklenih tirnic in lesenih, jeklenih ali prednapetih betonskih pragov. Funkcija zgornjega ustroja je vodenje tirnih vozil ter prenos in razporeditev prometnih obremenitev na spodnji ustroj. Na podlagi Pravilnika o zgornjem ustroju železniških prog (UL RS št. 92/2010), zgornji ustroj v širšem smislu sestavljajo tudi naprave, kot so kretnice, tirna križišča, tirni zaključki, okretnice in prenosnice ter dilatacijske naprave.

Oblika, kakovost, mere ter način izdelave sestavnih delov zgornjega ustroja so predstavljene v Pravilniku o zgornjem ustroju železniških prog (UL RS št. 92/2010).



Slika 6: Zgornji ustroj klasične proge
(Vir: <http://www.plassertheurer.com/en/machines-systems> (8.10.2013))

2.3 Prednosti in pomanjkljivosti

Klasična proga s tirno gredo ima relativno nizke investicijske stroške ter visoko stopnjo elastičnosti in absorpcije hrupa. Pomembna prednost klasičnega tira je enostavno vzdrževanje ob relativno nizkih stroških (Esveld, 1997). Inženirji imajo z gradnjo klasičnega tira 160 let izkušenj, zato se lahko izognejo večjemu tveganju pri gradnji, saj je sistem gradnje močno optimiziran. V primeru iztirjenja vlaka je postopek popravila proge enostaven in opravljen v relativno kratkem času.

Sicer pa ima klasični tir tudi nekaj pomanjkljivosti. Poslabšanje stanja tirne grede pri visokih hitrostih ustvarja drobljenje tolčenca, zato prihaja do geometrijskih sprememb, katerih posledica so večje dinamične obremenitve in posledično napake na tirnici in kolesu. Obraba tirne grede z vdori finih delcev iz spodnjih plasti povzroči zablatenje tirne grede in s tem zmanjšanje njene propustnosti. Tolčenec, ki sestavlja tirno gredo, je zelo težek material, zato klasični tir zahteva močnejšo strukturo in boljše temelje v primeru gradnje mostov in viaduktov. Konstrukcijska višina klasičnega tira je razmeroma visoka, kar ima neposredne posledice za večje premere predorov in njegove dostopne točke. Na mostovih in v predorih, kjer se uporablja gradnja s tirno gredo, je potrebno zagotoviti dodatno elastičnost proge z uporabo pritrtilnega pribora z večjo elastičnostjo (Esveld, 2001).

3 TIR NA TOGI PODLAGI

Tir na togi podlagi, imenovan tudi togi tir, je sodobna oblika proge, ki jo uspešno uporabljajo po vsem svetu. Pri tiru, grajenem na togi podlagi, je tirna greda nadomeščena z betonsko ali asfaltno nosilno plastjo, ki zagotavlja stabilnejši položaj. V primerjavi s tirno gredo je ta površina zelo toga, zato je potrebno elastičnost proge zagotoviti z vstavljanjem elastičnih elementov pod tirnico ali prage.

Prvi koraki v smeri gradnje togega tira so se začeli leta 1960, ko so načrtovali gradnjo dolgih predorov v Švici in predor pod Rokavskim prelivom med Anglijo in Francijo. Večje zanimanje za togi tir je povečalo neugodno obnašanje tirne grede na togi podlagi (proge v predorih in na mostovih) in posledično več zapor prog zaradi vzdrževalnih del. Leta 1972 so zgradili prvih 60 metrov tira na togi podlagi na železniški postaji Rheda-Wiedenbrück, prek katere poteka visoko zmogljiva železniška proga med mestoma Dortmund in Hannover. Na podlagi tega sistema togega tira, imenovanega Rheda, izhaja mnogo različic tira na togi podlagi (Lakušič, Vajdič, 2011).

Čeprav je večina sedanjih železniških tirov še vedno grajena tradicionalno s tirno gredo, se v zadnjem času vse pogosteje uveljavlja tir na togi podlagi. Glavne prednosti so nižje zahteve po vzdrževanju in s tem večja razpoložljivost proge, nizka višina konstrukcije in nizka teža. Izkušnje na hitrih progah so razkrile, da je pri progah s tirno gredo potrebno več vzdrževanja, saj pri visokih hitrostih prihaja do drobljenja tolčenca in s tem do več vzdrževalnih in obnovitvenih del. Glavni problem so zapore na močno obremenjenih progah in velik delež umetnih objektov na hitrih progah. Na hitrih progah obstaja omejitev vzdrževalnih del na nekaj ur, zato ne preseneča povečanje priljubljenosti modelov prog, ki potrebujejo malo vzdrževalnih del (Esveld, 2001).

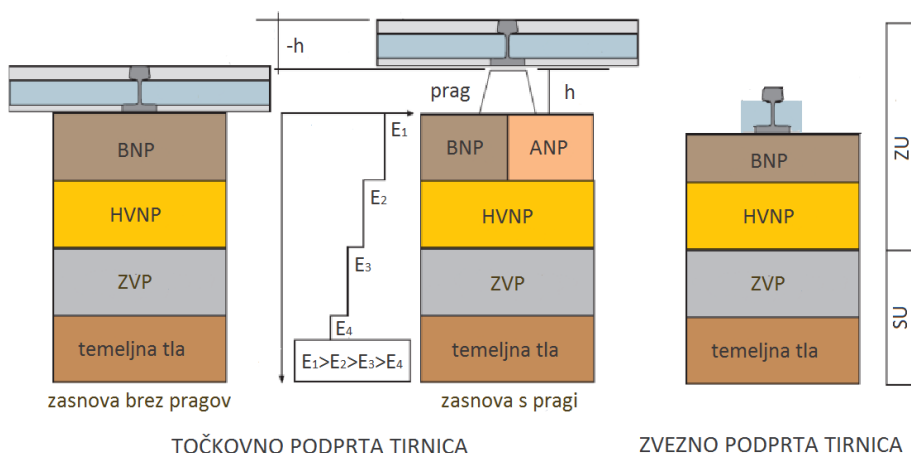
Tehnologija tira na togi podlagi dokazano izkazuje večjo učinkovitost in daljšo življenjsko dobo, kot tir s tirno gredo. Pričakovana življenjska doba tira, grajenega na togi podlagi, je od 50 do 60 let, medtem ko pri tiru grajenem s tirno gredo ta znaša od 30 do 40 let (Lichtberger, 2005). Pomanjkljivost togega tira so visoki investicijski stroški, zato ni pričakovati, da bo v prihodnosti ta oblika postala prevladujoča.

3.1 Uporaba tira na togi podlagi

Danes se tir na togi podlagi uporablja predvsem na hitrih in zelo obremenjenih progah. Intervali med vlaki so na bolj obremenjenih progah kratki, zato je pri klasični progi problem zapor zaradi vzdrževanja proge. Togi tir ne zahteva veliko vzdrževanja, zato tudi ni potrebnih zaporah prog. Proge za visoke hitrosti so omejene z zelo togimi geometrijskimi parametri, kar pomeni, da je velik delež proge zgrajen na umetnih objektih. Tir na togi podlagi ima možnost neposredne pritrditve na objekt. Na odseke v predore, na mostove in na nasipe se vgrajuje tudi zaradi nižje konstrukcijske višine in nižje teže v primerjavi s klasično grajenim tirom. Nižja konstrukcijska višina ima neposreden vpliv na svetlo višino predora pri že obstoječih predorih. Prav tako je togi tir primeren za celoten železniški sistem in različne vrste rekonstrukcij v okviru obstoječih prog, saj potrebuje manj vzdrževanja kot klasično grajena proga.

3.2 Konstrukcija tira na togi podlagi

Konstrukcija tira na togi podlagi je sestavljena iz petih plasti: temeljna tla, zmrzlinško varna plast (ZVP), hidravlično vezana nosilna plast (HVNP), betonska (BNP) ali asfaltna nosilna plast (ANP) in tirnica. Slika 7 prikazuje tri različne zasnove tira na togi podlagi, togi tir s točkovno podprto tirnico (tirnica je lahko podprta s pragi ali pa brez) in tir z zvezno podprto tirnico.



Slika 7: Tri klasične zasnove tira na togi podlagi
(Vir: Budisa, 2003)

Pred projektiranjem in gradnjo togega tira je potrebno obravnavati več specifičnih zahtev. Zahteve so oblikovane predvsem glede zgornjega (uporaba na mostovih, prehodih in v predorih) in spodnjega ustroja, kot tudi posebne zahteve v zvezi s signalizacijo in elektronskimi sistemi, varnostjo, omejitvijo hrupa, vremenskimi razmerami in dinamičnimi učinki. Zahteve so odvisne tako od uporabljenega sistema in materialov, kot tudi od vrste prometa.

3.2.1 Spodnji ustroj

Zahteve za spodnji ustroj so zelo visoke, saj tir na togi podlagi zahteva stabilna temeljna tla, ki se praktično ne posedajo. Prilagoditev geometrije proge po končani gradnji je zelo omejena, zato je nujno potrebna priprava spodnjega ustroja, ki ne dopušča posedkov.

Pred gradnjo tira na togi podlagi je potrebno opraviti obsežne preiskave tal. V ta namen je potrebno izvesti raziskavo tal vsakih 50 metrov do globine 6 metrov. Za razliko od klasičnega tira, kjer je potrebno zagotoviti zemeljske ukrepe do globine 0,5 m pod zmrzlinso varno plastjo, je pri togem tiru potrebno zagotoviti zemeljske ukrepe do globine 2,5 m pod nosilno ploščo. Mehka, kohezivna ali organska tla v temeljnih tleh je potrebno zamenjati na globini najmanj 4 m pod zgornjim robom proge. Upoštevati in preveriti je potrebno posledice strukturnih ukrepov, kot so kopanje, polnjenje tal ali znižanje ravni podtalne vode. Zaradi teh zahtev zemeljska dela pri tiru, grajenem na togi podlagi, povzročajo precej višje stroške gradnje, kot pri tradicionalno grajenem tiru (Lichtberger, 2005).

3.2.1.1 Temeljna tla

Planum temeljnih tal tira na togi podlagi mora imeti deformacijski modul za novogradnje $E_{v2} \geq 60 \text{ MN/m}^2$, za nadgradnje pa $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$. Te parametre je možno doseči na tri načine: z dinamičnim stiskanjem, zemeljskimi izboljšavami s pomočjo apna in cementa ali z zamenjavo temeljnih tal. Temeljna tla morajo biti zgoščena do globine treh metrov, stopnja zgoščenosti po Proctorju pa mora biti $D_{pr} = 0,98 - 1,0$ (Lichtberger, 2005).

V primerjavi s klasično progo, so zahteve za planum temeljnih tal pri togem tiru precej višje. Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog (UL RS št. 93/2013) namreč določa, da je deformacijski modul temeljnih tal klasične proge odvisen od lege pod planumom proge in

mora biti $E_{v2} > 20 - 60 \text{ MN/m}^2$. Prav tako je stopnja zgoščenosti po Proctorju odvisna od lege pod planumom proge in znaša $D_{Pr} \geq 0,92 - 0,98$.

Na Nizozemskem in v nekaterih delih Japonske, kjer imajo tla nizko nosilnost, so ukrepi za izboljšanje vertikalne togosti tal neizogibne. Možne rešitve vključujejo izboljšanje tal, globoko mešanje, injektiranje in uporabo pilotov. Injektiranje vključuje vbrizgavanje tekoče malte na osnovi cementa ali apna, ki se kasneje strdi. Globoko mešanje pa vsebuje mešanico materiala s tekočo ali suho malto na osnovi cementa, apna ali pepela (Esveld, 2001).

3.2.1.2 Zmrzlinško varna plast (ZVP)

Zmrzlinško varna plast je nevezana nosilna plast, ki jo sestavlja material, odporen na vremenske vplive in zmrzal. Njena glavna naloga je hitro odvajanje površinskih voda in preprečevanje kapilarnega dviga iz spodnjih plasti, zato mora imeti vrednosti prepustnosti med $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ in $1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. Zmrzlinško varna plast služi tudi za kompenzacijo razlik v togosti različnih plasti proti temeljnemu tlom. Deformacijski modul togega tira za nove proge mora biti $E_{v2} \geq 120 \text{ MN/m}^2$, za nadgradnjo proge pa $E_{v2} \geq 100 \text{ MN/m}^2$. Zmrzlinško varna plast ne sme biti tanjša kot 70 cm. Potrebno jo je vgraditi v vsakem primeru, saj je predpogoj za dolgo življenjsko dobo togega tira (Lichtberger, 2005).

Pri klasično grajeni progi Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog (UL RS št. 93/2013) določa, da je nevezana nosilna plast, skupaj z ustreznim nasipnim slojem ali temeljnimi tlemi, del zmrzlinško varnega sloja. Pri izvedbi novih in nadgradnji obstoječih prog, je vgradnja nevezane nosilne plasti obvezna. Debelina plasti je odvisna od globine zmrzovanja, najmanjša dovoljena debelina plasti je 30 cm. V primeru, ko se pri obstoječih progah izvaja nadgradnja in v nosilnih plasteh pod tirno gredo ni bilo vgrajene zmrzlinško varne plasti, se lahko debelina nevezane nosilne plasti poveča največ do 80 cm. Deformacijski modul za gradnje in nadgradnje na interoperabilnih progah mora biti $E_{v2} > 100 \text{ MN/m}^2$, na neinteroperabilnih pa $E_{v2} > 80 \text{ MN/m}^2$. Stopnja zgoščenosti po Proctorju mora biti $D_{Pr} \geq 0,98$.

V primerjavi s klasično progo, so zahteve za nevezano nosilno plast togega tira precej večje, saj pri klasičnem tiru zadostuje deformacijski modul $E_{v2} > 100 \text{ MN/m}^2$. Sloj zmrzlinško varne plasti pri tiru na togi podlagi ne sme biti tanjši kot 70 cm, medtem ko je pri klasičnem tiru nevezana nosilna plast omejena na razpon med 30 in 80 cm.

3.2.2 Zgornji ustroj

Zgornji ustroj klasične proge sestavljajo tirna greda, pragi in tirnice. Sestava zgornjega ustroja togega tira je precej drugačna. Sestavljajo ga namreč hidravlično vezana nosilna plast, na njo vgrajena betonska ali asfaltna plast, tirnice ter, pri določenih sistemih, tudi pragi.

3.2.2.1 Hidravlično vezana nosilna plast (HVNP)

Na zmrzljivo varno plast se vgradi hidravlično vezana nosilna plast, katere tipična debelina znaša 300 mm. Sestavlja jo mešanica mineralnega agregata iz naravnega peščenjaka, drobljenega peska in kamnitega drobirja (največja velikost zrn je 32 mm), stabilizirana s hidravličnim vezivom. Za vezivo se uporablja Portland cement, katerega količina v plasti znaša približno 110 kg/m^3 . Hidravlično vezano nosilno plast položijo finišeerji, običajno v dveh plasteh, njena minimalna širina znaša 3,8 m (Lichtberger, 2005).

3.2.2.2 Betonska nosilna plast (BNP)

Tipična debelina betonske nosilne plasti znaša 200 mm. Vgrajeni beton mora biti odporen na zmrzal, količina cementa v betonu mora biti med 350 in 370 kg/m^3 . Delež armature v betonu mora biti med 0,8 in 0,9 % prereza betona, saj se s tem omeji nastajanje razpok. Za doseg kontroliranega nastajanja razpok je potrebno, pri sistemih brez pragov, površino nosilne plasti prerezati v presledkih približno na 2 metra. Betonsko nosilno plast se lahko obremeni šele potem, ko se beton strdi in doseže minimalno odpornost proti tlaku nad 12 MN/m^2 . Višinsko dopustno odstopanje površine sloja je ± 2 mm. Minimalna debelina betonske plasti znaša 180 mm (Lichtberger, 2005).

3.2.2.3 Asfaltna nosilna plast (ANP)

Asfaltno nosilno plast finišeerji nanesejo v štirih plasteh s skupno debelino 300 mm. Največje višinsko dovoljeno odstopanje površine sloja je ± 2 mm. Obremenitev asfaltno nosilne plasti je dovoljena, ko je temperatura asfalta pod 50°C . Asfalt je občutljiv na UV žarke, zato mora biti njegova površina pokrita s kamnitim drobirjem, gramozom ali podobnim materialom (Lichtberger, 2005).

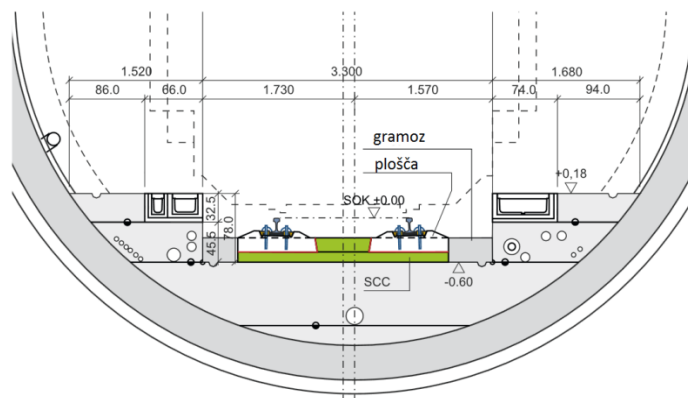
3.3 Zahteve pri gradnji togega tira

Togi tir je primeren za vgradnjo v predore, na mostne konstrukcije, nasipe in na prehodna območja, vendar je pri tem potrebno upoštevati določene zahteve. Posebne zahteve se nanašajo tudi na emisije hrupa in vibracij.

3.3.1 Togi tir v predoru

V splošnem je v predor mogoče vgraditi vse sisteme togega tira. Na to, kateri sistem se bo vgradil v predor, ima pogosto vpliv svetli prostor, ki je na voljo v prečnem prerezu predora. Togi tir je primeren za vgradnjo v predore s primernimi geološkimi pogoji, kjer trdno predorsko dno omogoča namestitvev sistema neposredno na tla predora. Uporaba v predorih je zelo učinkovita v smislu gradnje, vzdržljivosti in ekonomičnosti.

Na uporabo togega tira v predoru vpliva nizka konstrukcijska višina, ki je pogosto znižana z zmanjšanjem debeline betonske plasti. Zmanjšanje vzdrževalnih posegov na minimum omogoča omejitev prisotnosti delavcev v predoru in posledično njihovo večjo varnost. Zasnova togega tira mora biti prilagojena drenažnim sistemom, saj je v predoru potrebno zagotoviti primerno odvodnjavanje. Tir na togi podlagi omogoča dostop reševalnim vozilom v primeru nesreč.

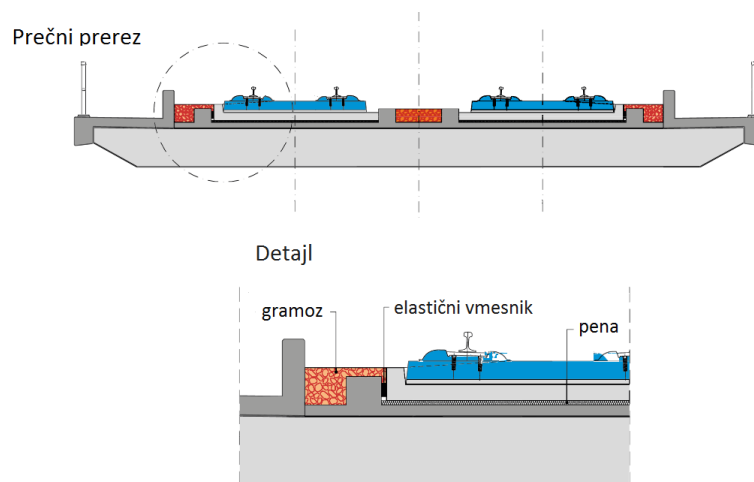


Slika 8: Prečni prerez proge v predoru
(Vir: Slab Track Austria, 2012)

3.3.2 Togi tir na mostni konstrukciji

Toga mostna konstrukcija zagotavlja trdne temelje za togi tir, vendar je pri tem potrebno upoštevati gibanje mostu. Proga z neprekinjeno zvarjenim tirom na mostu lahko, zaradi temperaturnih nihanj, pospeškov in zaviranja tirnih vozil ter lezenja in krčenja, razvije precejšnje vzdolžne sile v tirnici. Zaradi gibanja mostu je potrebno togi tir prilagoditi posebnim tehničnim pogojem na mostovih ter omejiti napetosti. Vzdolžna dilatacija mora absorbirati deformacije brez ustvarjanja večjih vzdolžnih obremenitev tirnice. Manjše sile na koncu mostu je mogoče doseči z zmanjšanjem razdalje med nosilci ali z zmanjšanjem togosti podpor nosilca (Slab track systems ..., 2007).

Pri kratkih mostovih, katerih razpon je manjši kot 25 m, obstaja več možnih rešitev za zagotovitev tehničnim pogojem. Ploščo tira se lahko loči z drsno podlogo in trdo peno, ki preprečuje prenos vzdolžnih sil, kar omogoča svobodno gibanje plošče. Sile v pritrdilnem priboru se lahko zmanjšajo tako, da se prage na vrhu armiranobetonske plošče togo poveže na most ali pa se uporabi sistem brez pragov, z direktnim pritrdilnim priborom. Na mostovih, dolgih do 15 m, se lahko zadostno togost proge zagotovi s sistemi z zvezno podprto tirnico (Esveld, 2001).



Slika 9: Tipična postavitev togega tira na kratkih mostovih
(Vir: Slab track systems on different substructures, 2007)

3.3.3 Togi tir na nasipu

Togi tir na nasipu zahteva posebno pozornost zaradi posedkov, ki se jih lahko kompenzira le s pritrdilnim priborom. Še pred gradnjo togega tira je potrebno temeljito in obširno spremljati posedke, saj je ocena pričakovanega posedka izjemnega pomena. Ko je gradnja nasipa

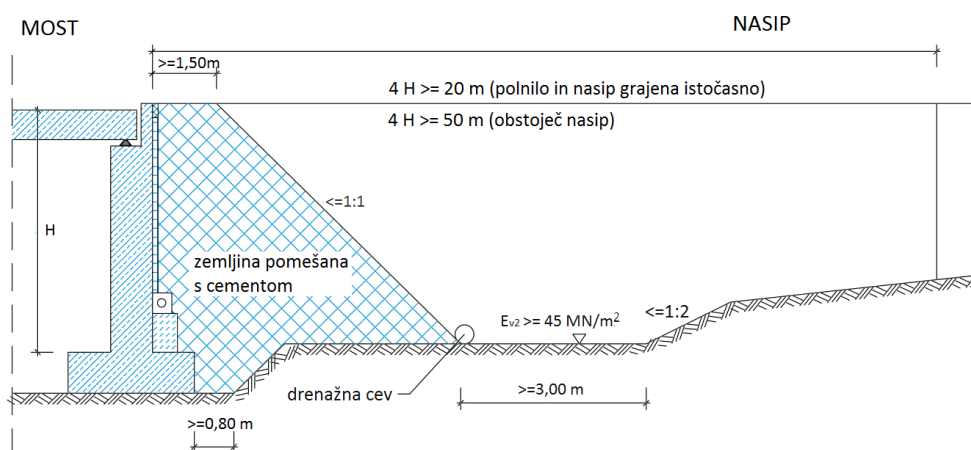
končana, je potrebno določiti geodetske merilne točke in jih spremljati vsaj enkrat mesečno. Iz dobljenih podatkov lahko sklepamo, kakšen preostali posedek se lahko pričakuje (Lichtberger, 2005).

3.3.4 Zahteve na prehodnih območjih

Prehod vozila iz bolj elastičnega klasičnega dela proge na del proge, grajene na togi podlagi, povzroča vibracije podvozja vozila zaradi nenadne spremembe v togosti proge. To pripelje do negativnih posledic, tako za tirna vozila, kot tudi za progo, ki se počasi poseda. Neenakomerno posedanje proge vpliva na stabilnost proge in posledično na udobje in varnost vožnje. Nenadna sprememba v elastičnosti proge na relativno kratkih prehodnih območjih neposredno vpliva na dinamiko vožnje. Za preprečitev neugodnih učinkov je priporočljivo zgraditi prehodna območja na način, da se togost proge s tirno gredo postopno povečuje dokler ne doseže togosti tira na togi podlagi (Lakušič in sod., 2010). Standardna rešitev za prehodna območja med različnimi konstrukcijami je uporaba prehodnih klinov, vgrajenih med spodnji in zgornji ustroj proge, ter dodatne elastične plasti na bolj togi strani prehoda.

3.3.4.1 Prehod med mostom in nasipom

Mostna in zemeljska konstrukcija morata imeti enako vrsto podlage, da je njuno posedanje enotno. Na začetku nasipa je potrebno namestiti klin iz zmesi zemljine s 3 – 5 % vsebnostjo cementa, kot je prikazano na Slika 10. Dolžina polnila je odvisna od zemljine nasipa. V primeru, ko sta polnilo in nasip grajena istočasno, je minimalna dolžina polnila štirikratna višina nasipa, ali več kot 20 m. V primeru obstoječega nasipa pa je minimalna dolžina štirikratna višina nasipa, ali več kot 50 m (Slab track systems ..., 2007).



Slika 10: Prehod med mostno konstrukcijo in nasipom
(Vir: Slab track systems on different substructures, 2007)

3.3.4.2 Prehodno območje pred predorom

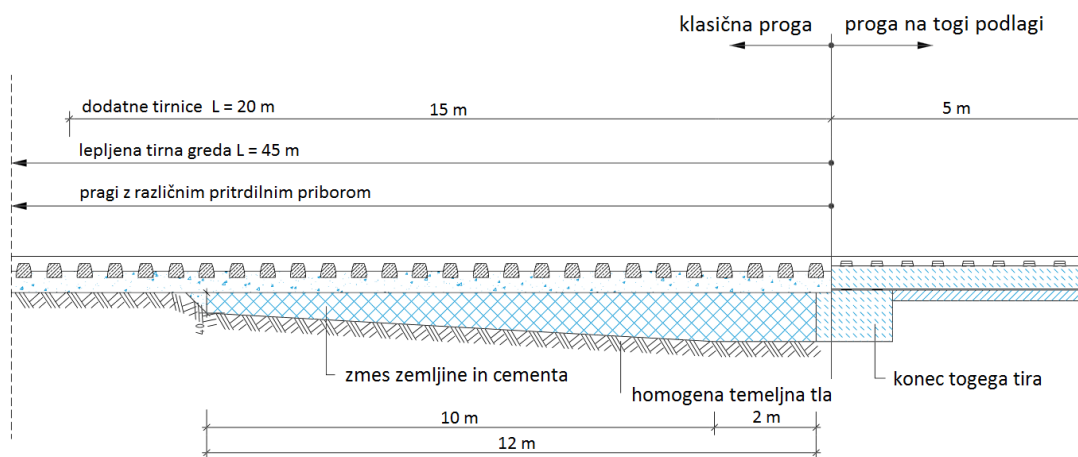
Za zmanjšanje razlike v togosti med togo konstrukcijo v predoru in odprto progo, je potrebno prehodno območje zgraditi tako, da zagotovimo postopen prehod med obema konstrukcijama. To lahko naredimo na več načinov. Pod togi tir, ki se nahaja na koncu plošče predora, se namesti elastični sloj v obliki penaste plošče. Najmanjša razdalja penaste plošče je 3,50 m in je postavljena neposredno pod ploščo predora. Na podlagi razmer spodnjih slojev in nosilnosti se lahko uporabi klin iz zmesi zemljine in cementa (Slab track systems ..., 2007).

3.3.4.3 Prehod med klasičnim in togim tirom

Dve konstrukciji, ki se razlikujeta v togosti, posedanju in prožnosti, je potrebno med seboj povezati in prilagoditi. Prilagoditev se lahko doseže na več načinov. Večjo togost se doseže s postopnim zmanjševanjem elastičnosti tirnega pribora. Posedki se zmanjšajo s stabilizacijo tirne grede s kemičnimi vezivi (lepljenje tirne grede) ali pa z uporabo sider na koncu plošče proge. Prožnost proge se izenači z dvema dodatnima tirnicama v dolžini 20 m, pri čemer 5 m tirnice leži na togem tiru in 15 m na klasičnem tiru, kot je prikazano na Slika 111. Dodatni ukrep je namestitev naležne konstrukcije v spodnjih plasteh in klin iz zmesi zemljine in 3 – 5 % cementa, kar prikazuje Slika 12 (Slab track systems ..., 2007).



Slika 11: Dve dodatni tirnici na prehodu med klasičnim in togim tirom
(Vir: Srebot, 2011)



Slika 12: Prehodno območje med klasičnim in togim tirom
(Vir: Slab track systems on different substructures, 2007)

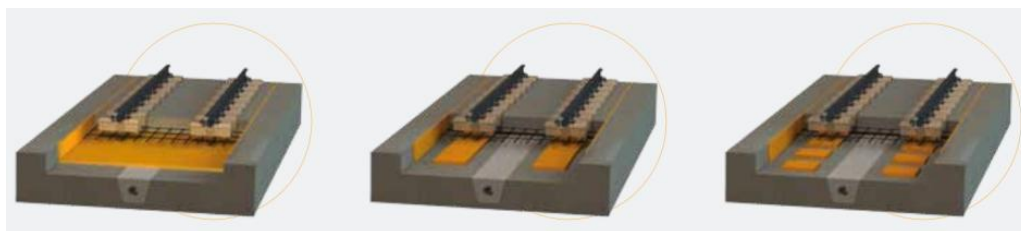
3.3.5 Emisije hrupa in vibracij

Emisije hrupa so pri tiru na togi podlagi bistveno večje kot pri klasično grajenem tiru. Razlog za to je pomanjkanje tirne grede, ki bi absorbirala hrup. Višje emisije hrupa so izključno zaradi narave konstrukcije togega tira, ki se izrazito povečajo v frekvenčnem območju med 250 in 1000 Hz. Emisije hrupa pri togem tiru so za 5 dB večje kot pri klasično grajenem tiru z lesenimi pragi (Lichtberger, 2005).

Vibracije in emisije hrupa na močno poseljenih območjih je potrebno znižati tako, da kakovost življenja prebivalcev ali proizvodni procesi v bližini niso zmanjšani. Za znižanje vrednosti vibracij in hrupa je bilo izvedeno veliko poizkusov z najrazličnejšimi mediji, ki absorbirajo hrup, vendar večina ni bila zahtevano trajno stabilna ali pa je bila njihova uporaba predraga. Zadovoljivo zmanjšajo hrup protihrupne pregrade, uporaba elastično

podprtih pragov in vstavljanje zajetne količine materiala za absorpcijo hrupa na plošče (Lichtberger, 2005).

Eden od najbolj učinkovitih sistemov za zmanjšanje emisij hrupa in vibracij je uporaba vzmetnih sistemov (ang. *spring mass system*), ki absorbirajo hrup in vibracije. To pomeni, da je sistem togega tira postavljen na vrh močno elastično podprte plošče. Napredni vzmetni sistemi temeljijo na modularni strukturi proge, ki obsega spodnji ustroj proge z betonsko podložno ploščo, elastične blazine, ki dušijo zvok in vibracije, neprekinjeno vzmetno ploščo ter nad njo zgornji ustroj sistema togega tira.



Slika 13: Različni vzmetni sistemi
(Vir: <http://www.getzner.com> (12.11.2013))

4 SISTEMI TIRA NA TOGI PODLAGI

Poglavje opisuje različne sisteme tira na togi podlagi, ki so jih razvili po vsem svetu. Sistemi se delijo glede na način podpiranja tirnice (točkovno ali zvezno podprta tirnica), tip konstrukcije (s pragi ali brez) ter glede na način gradnje na terenu (montažna ali monolitna gradnja). V Preglednica 1 je predstavljena delitev sistemov togega tira na šest kategorij, vsaka od njih ima svoje specifične lastnosti.

Preglednica 1: Sistemi tira na togi podlagi

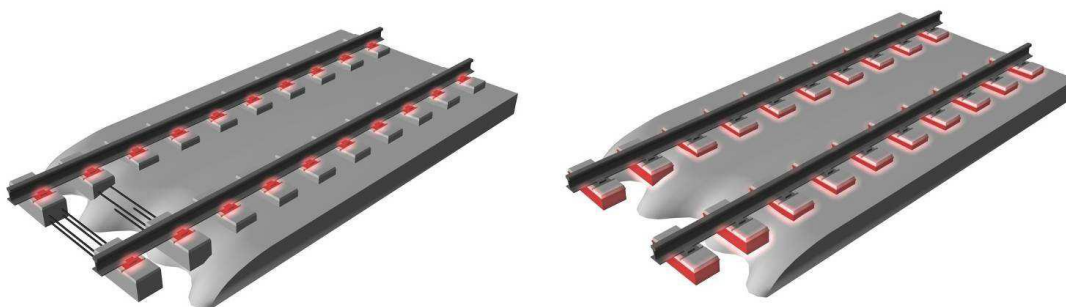
SISTEMI TIRA NA TOGI PODLAGI					
Točkovno podprta tirnica (ang. <i>discrete rail support</i>)				Zvezno podprta tirnica (ang. <i>continuous rail support</i>)	
S PRAGI ALI BLOKI		BREZ PRAGOV			
Vgrajeni v beton (ang. <i>embedded in concrete</i>)	Položeni na asfaltno ali betonsko plast (ang. <i>on top of asphalt – concrete roadbed</i>)	Montažne betonske plošče (ang. <i>prefabricated concrete slabs</i>)	Monolitni sistemi (ang. <i>monolithic designs</i>)	Vgrajena tirnica (ang. <i>embedded rail</i>)	Vpeta in neprekinjeno podprta tirnica (ang. <i>clamped and continuously supported rail</i>)
Rheda	ATD	Shinkansen	Travnata	INFUNDO	Cocon Track
Rheda 2000	BTD	Bögl	proga	Edilon	ERL
Heitkamp	Sato	ÖBB-Porr	FFC	BBEST	Vanguard
Züblin	FFYS		BES	Deck Track	KES
Stedef	Getrac		BTE		SFF
Sonneville –			Hochtief		Saargummi
LVT			PACT		
Walo					

4.1 Sistemi s točkovno podprto tirnico

4.1.1 Pragi ali bloki vgrajeni v beton

Najbolj znani primeri tira na togi podlagi z vgrajenimi pragi so sistemi Rheda, Heitkamp in Züblin. V to skupino spadajo tudi LVT proge (ang. *Low Vibration Track*). To so proge z nizkimi vibracijami, kjer so pragi elastično podprti. Gumijasto korito pod pragi ali

posameznimi bloki zagotavlja visoko stopnjo elastičnosti in s tem dobro izolacijo hrupa in vibracij. Primeri prog z niskimi vibracijami so sistemi Stedef, Sonnevile-LVT in Walo.

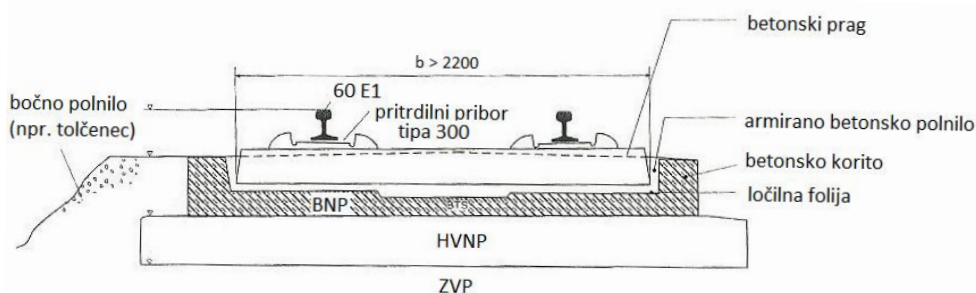


Slika 14: Sistem z vgrajenimi pragi in sistem z elastično podprtimi bloki
(Vir: <http://conference.europoint.eu/highspeed2009/hubertrhomborg.pdf> (20.7.2013))

4.1.1.1 Sistem Rheda

Sistem Rheda so razvili v Nemčiji, njegovo ime pa izvira iz prvega tira zgrajenega na togi podlagi leta 1972, na postaji Rheda-Wiedenbrück. Sistem je brez patentnih pravic, zato so se razvile njegove številne strukturne različice. Kljub nenehnemu razvoju vsi modeli sistema Rheda temeljijo na izvorni klasični zasnovi.

Sistem uporablja metodo gradnje zgoraj - navzdol. Betonske prage dolžine 2,60 m položijo v koritasto obliko plošče in jih smerno in višinsko prilagodijo, da dosežejo natančen položaj proge. Po prilagoditvi prostor v betonskem koritu zapolnijo z betonom (Lichtberger, 2005).



Slika 15: Sistem Rheda
(Vir: Lichtberger, 2005: str. 317)

Zaradi nenehnega razvoja in optimizacije prvotnega sistema Rheda, je nastalo več oblik sistema: Rheda - Sengeberg, Rheda-Berlin, Rheda-Berlin-HGV in Rheda 2000. Celotna višina zgornjega ustroja različnih Rheda modelov je med 830 mm in 961 mm.

ekscentrične enote, katero vrtenje prilagaja tirnico. Z vreteni na koncu pragov nastavijo potrebno nadvišanje in nato še višinski položaj tirnice. Postopek namestitve zgoraj - navzdol zagotavlja, da sistem kar najbolje izpolnjuje zahteve za natančnost. Betonski bloki so zasnovani tako, da omogočajo uporabo vseh običajnih elastičnih pritrdilnih priborov, ki so pomembni za doseganje vertikalne podajnosti tirnice in nemoteno potovanje vlaka (Esveld, 2001).



Slika 17: Vgradnja sistema Rheda 2000

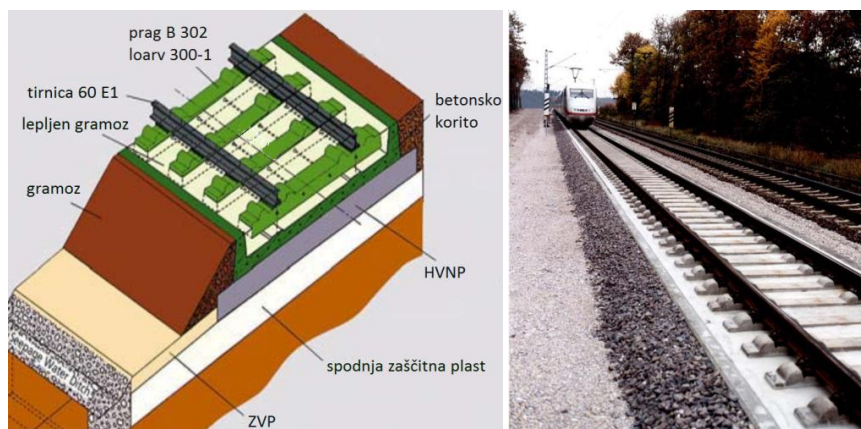
(a) polaganje betonske nosilne plasti, (b) polaganje montažnih elementov, (c) groba poravnava proge, (d) vreteno za višinsko nastavitev, (e) palica za širjenje, (f) ročno vlivanje betona
(Vir: Rheda 2000® ballastless track system, 2011)

Struktura betona je na hitrih progah podvržena visokim dinamičnim obremenitvam, zato so zahteve glede kakovosti in vgradnje betona zelo visoke. Beton zahtevane konsistence neprekinjeno vlijejo v eno smer in s tem preprečijo vnos zraka pod prage. Hkrati beton zgostijo s pomočjo vibracijske opreme, ki zagotavlja visoko kakovost strukture betona in s tem optimalno vez s pragi. Opažne elemente po zgoščevanju betona sprostijo in po šestih urah odstranijo od monolitne plošče s pragi. Čas cikla usklajen s posamičnimi operacijami omogoča dnevno proizvodnjo 500 m proge (Esveld, 2001).

4.1.1.3 Sistem Heitkamp

Sistem Heitkamp so leta 1998 položili v Nemčiji na testnem odseku, dolgem 390 m. Njegova osnovna struktura je podobna klasičnemu modelu sistema Rheda z betonskim koritom, le da za polnilo v betonskem koritu, namesto betona, uporabljajo gramoz. Gramozno polnilo omogoča uporabo stroja za smerno in višinsko regulacijo, ki nastavi tirnico v določen položaj.

Po nastavitvi pravilnega položaja tirnice, praznine v gramoznem materialu zalijejo s cementno emulzijo (Lichtberger, 2005).

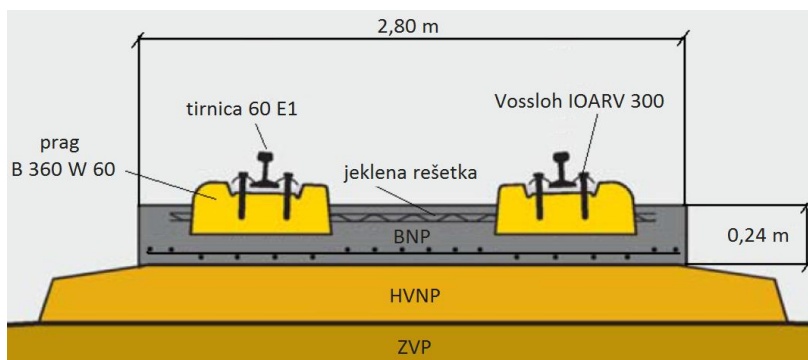


Slika 18: Sistem Heitkamp
(Vir: <http://www.uic.org/apps/presentation/kowalski.pdf> (10.8.2013))

4.1.1.4 Sistem Züblin

Sistem Züblin je prav tako nastal v Nemčiji in se imenuje po mestu, kjer je bil prvič vgrajen. Razvoj sistema se je začel leta 1974 in se takoj osredotočil na rešitev z visoko ekonomično metodo gradnje. Trudili so se doseči visoko stopnjo mehanizacije v kombinaciji z nizkimi stroški dela in visoko dnevno proizvodnjo proge.

Sistem Züblin uporablja enodelne ali dvodelne prage, ki so vgrajeni v monolitno betonsko ploščo. Glavna razlika v primerjavi s sistemom Rheda je dejstvo, da so betonski pragi potisnjeni v svež beton s pomočjo vibracij. Beton mora biti prave konsistence, ki dovoljuje da so pragi vanj potisnjeni z vibriranjem in hkrati preprečuje da pragi, zaradi svoje teže, vanj potonejo. V sistemu je dovolj prostora za vstavljanje zaščitnih materialov proti hrupu, zapleteno pa je zamenjati prag.



Slika 19: Sistem Züblin
(Vir: <http://www.zueblin.de> (14.8.2013))

Slika 20 prikazuje postopek gradnje sistema Züblin. Na hidravlično vezano nosilno plast namestijo armaturo in opažne elemente z integrirano tirnico, po kateri se premikajo proizvodnji stroji. Finišer z betonom zapolni prostor med opažnimi elementi. S pomočjo vibracij v sveže vlit beton potisnejo okvirje, na katerih so povezani pragi. Predhodni okvir deluje kot fiksna točka za naslednji okvir, točen položaj pa določijo z računalniškim teodolitom. Površino betonske plošče ročno zgladijo in po določenem času, ko je beton dovolj trden, odstranijo okvirje. Na svoje mesto pritrdijo še elastični pritrdilni pribor in tirnice. Med osem urnim delavnikom lahko proizvedejo od 150 do 200 metrov proge (Esveld, 2001).

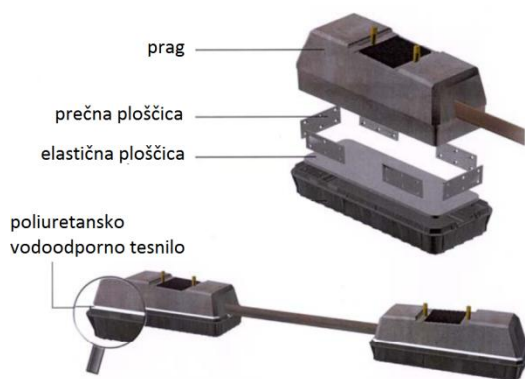


Slika 20: Postopek gradnje sistema Züblin
(Vir: <http://ict.uiuc.edu/railroad/CEE/pdf/PPT's/Spring09/Steidl%202-27-09.pdf> (15.8.2013))

Uporaba jeklene armature v plošči v glavnem doseže pravilen vzorec razpok in njihove sprejemljive širine. Pri tej metodi armaturne palice niso položene v nevtralno linijo, ampak bolj proti dnu betonske plošče, ki ji doda nekaj upogibne trdnosti. S povečanjem višine plošče in količino armature je metoda Züblin primernejša za gradnjo na območjih, kjer obstajajo negotovosti glede nosilnost tal (Esveld, 2001).

4.1.1.5 Sistem Stedef

Francoski sistem Stedef najpogosteje uporabljajo v predorih in na progah za visoke hitrosti. Dvodelni prag je sestavljen iz dveh betonskih blokov, ki sta med seboj povezana z jekleno palico (Esveld, 2003). Spodnji del vsakega bloka je obdan z gumijastim koritom, ki loči blok od betonske plošče in mu dovoljuje, da se premika gor in dol brez obrabe betonske plošče. Gumijasto korito zagotavlja visoko stopnjo elastičnosti, ki omogoča dobro izolacijo pred hrupom in vibracijami. Po namestitvi pragov in tirnic ter urejanju geometrije proge, med nosilno konstrukcijo in gumijastim koritom, vlijejo betonsko polnilo. Beton namestijo tako, da so pragi delno vgrajeni v beton (Bilow, Randich, 2000).

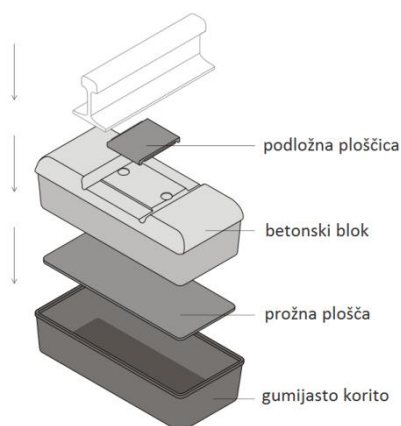


Slika 21: Dvodelni prag Sat S312 sistema Stedef
(Vir: http://www.uic.org/cdrom/2008/11_wcrr2008/pdf/I.1.4.1.3.pdf (15.8.2013))

4.1.1.6 Sonneville – LVT sistem

Švicarski Sonneville - LVT sistem je podoben sistemu Stedef. Po svetu je zgrajenih več kot 900 km prog (Low Vibration Track, 2010). Ena najpomembnejših prog s tem sistemom na svetu, zgrajena leta 1994, je 100 km dolga dvotirna proga v predoru pod Rokavskim prelivom, ki povezuje Anglijo in Francijo.

LVT sistem je sestavljen iz samostojnega betonskega bloka, prožne ploščice in gumijastega korita, kot prikazuje Slika 22. Pri pritrditvi tirnic se uporablja elastično podložno ploščico. Prožna ploščica določa porazdelitev obremenitev in zmanjšuje vpliv nizkih frekvenc vibracij, podložna ploščica pod tirnico pa ščiti pred vplivi višjih frekvenc. Gumijasto korito omogoča neovirane deformacije, ki skupaj s kakovostno prožno ploščico pri dinamičnih obremenitvah, vodi do nizke togosti sistema. Velika prednost sistema je enostavna zamenjava blokov in njihovih podpornih točk (prožne ploščice, gumijasto korito,..) (Low Vibration Track, 2010).

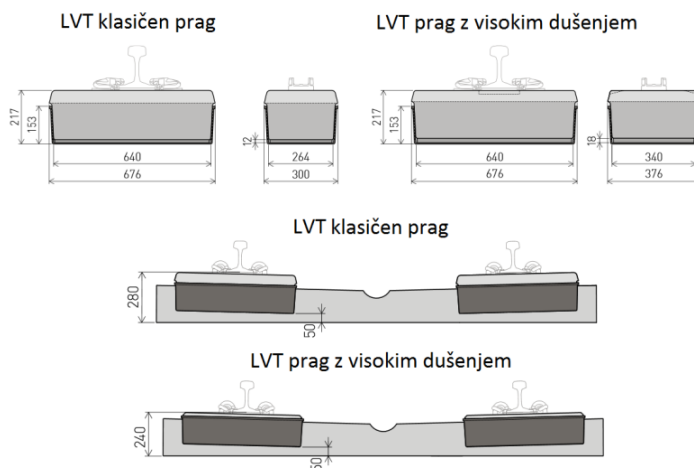


Slika 22: Sistem Sonneville - LVT
(Vir: Low Vibration Track, 2010)



Slika 23: Sistem LVT v predoru
(Vir: Low Vibration Track, 2010)

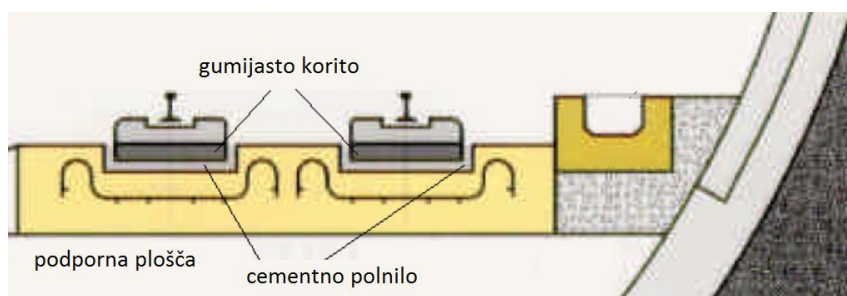
Najnovejša različica sistema se imenuje LVT sistem z visokim dušenjem (ang. *LVT high attenuation*), ki ima večje betonske bloke in mehkejše prožne ploščice. Posledica teh dveh lastnosti je nižja naravna frekvenca sistema, zato se ga uporablja pri progah z višjimi zahtevami glede dušenja hrupa in vibracij (Low Vibration Track, 2010).



Slika 24: Standardni LVT sistem in LVT sistem z visokim dušenjem
(Vir: Low Vibration Track, 2010)

4.1.1.7 Sistem Walo

Tudi švicarski sistem Walo sestavljajo betonski bloki z gumijastim koritom. Na betonsko nosilno plast namestijo betonske bloke na točno določen položaj in nato vlijejo beton. Sistem najpogosteje uporabljajo v predorih (Esveld, 2003).

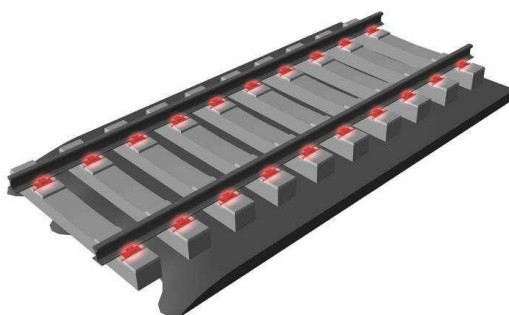


Slika 25: Sistem Walo
(Vir: Esveld, 2003)

4.1.2 Pragi položeni na asfaltno ali betonsko plast

V tej skupini sistemov tira na togi podlagi so pragi običajno položeni na asfaltno nosilno plast. Material na osnovi bitumna je podvržen spremembam lastnosti zaradi temperaturnih vplivov,

zato je potrebno posebno pozornost nameniti njegovi dolgoročni stabilnosti. Asfaltno nosilno plast namestijo finišeji, s katerimi je mogoče doseči raven natančnosti ± 2 mm in primanjkljaj nadvišanja do 180 mm. Višinska nastavitve proge zaradi natančno izdelanega vrhnjega sloja ni potrebna. Odstopanja, nastala zaradi proizvodnega procesa, lahko kompenzirajo s pritrdilnim priborom. Nosilna plast zagotavlja togo in ravno podlago za prage, prostor med njimi pa je mogoče zapolniti z materialom, ki zagotavlja dodatno stabilnost in zmanjšuje emisije hrupa (Esveld, 2001). Tako asfaltne, kot betonske površine običajno slonijo na hidravlično vezani betonski plasti debeline 30 cm, asfaltna plast pa je lahko položena tudi na bitumensko osnovo.



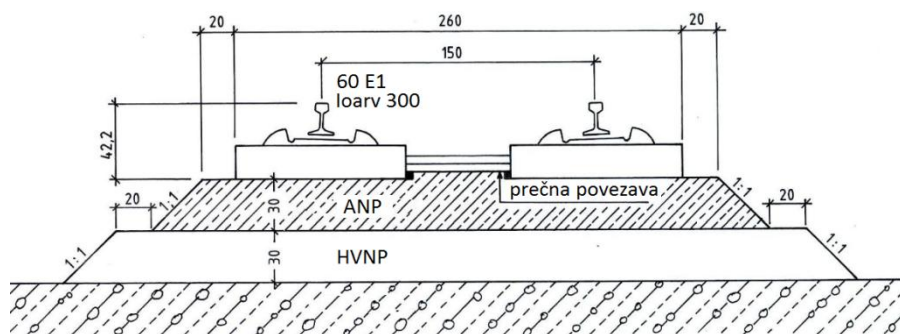
Slika 26: Sistem s pragi ali bloki, ki so položeni na vrh nosilne plasti
(Vir: <http://conference.europoint.eu/highspeed2009/hubertrhomberg.pdf> (20.7.2013))

V primerjavi z betonsko nosilno plastjo, so na asfaltni nosilni plasti hrup in vibracije manjše zaradi lastnosti asfalta, notranjega dušenja. Pozitivna lastnost tovrstne proge je rahla plastična prilagodljivost. Pri večjih pritiskih se asfalt pod določenimi pragi deformira zaradi viskozno - elastičnih lastnosti, dokler ne doseže novega ravnovesja, pri čemer se pritiski izravnajo. Asfalt ne zahteva utrjevanja, saj je polaganje pragov možno takoj po ohlajanju asfalta, zato se dosega visoka produktivnost gradnje. Sistem omogoča lahko zamenjavo pragov v primeru poškodb pri iztiranju vlaka (Esveld, 2001).

Za asfaltne površine je potrebno, poleg nosilnosti, upoštevati tudi pojav deformacij, ki jih povzročata čas in razlike v temperaturi in so odvisne od viskozno - elastičnega obnašanja asfalta. Temperaturne razmere v asfaltni plasti, ki so višje od 20°C , povečajo količino plastičnih deformacij na področju obremenjenih stikov. Te deformacije je potrebno omejiti zaradi točnosti višinske nastavitve in zadostnega odtekanja površinskih voda. Odpornost proti plastičnim deformacijam se lahko poveča z uporabo zdrobljenega peska za asfaltne zmesi. Površino asfaltne plasti se lahko pokrije z absorpcijskimi plastmi, ki so včasih potrebne tudi za zmanjšanje emisij hrupa (Leykauf, Lechner, 2001).

4.1.2.1 Sistem ATD

Sistem ATD so leta 1993 razvili v Nemčiji. Sestavljen je iz hidravlično vezane nosilne plasti na vrhu katere je vgrajena asfaltna nosilna plast in neposredno na njo položeni pragi. Razvili so posebne asfaltne zmesi, ki zagotovijo 50 do 60-letno življenjsko dobo pod različnimi vremenskimi pogoji. Da dosežejo potrebno ravnost, asfalt polagajo v slojih. Za skupno debelino 30 cm je potrebno položiti najmanj štiri plasti asfalta (Esveld, 2001).



Slika 27: ATD sistem blizu mesta Nantenbach
(Vir: Leykauf, Lechner, 2001)

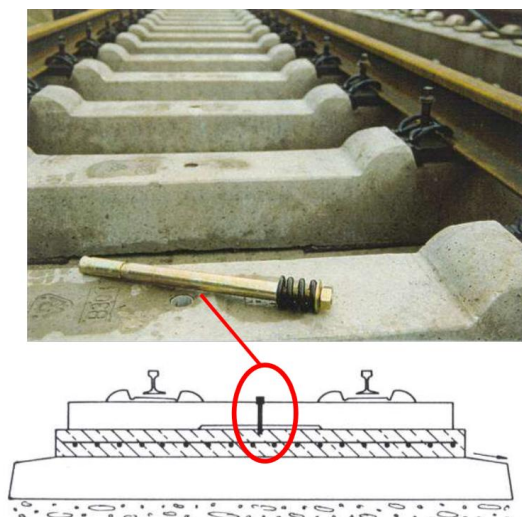
Sistem ATD ima v sredini proge greben, ki zagotavlja odpornost proti bočnim silam. Po smerni nastavitvi tirnic preostali prostor med grebenom, vrhno plastjo in pragom zapolnijo z elastičnim sintetičnim materialom (Esveld, 2001). Uporabljajo tako enodelne, kot tudi dvodelne prage. Enodelni pragi so opremljeni z zarezo na spodnji površini, kjer se nahaja greben.



Slika 28: Enodelni in dvodelni pragi sistema ATD
(Vir: Asphalt in Railway Tracks, 2003)

4.1.2.2 Sistem BTD

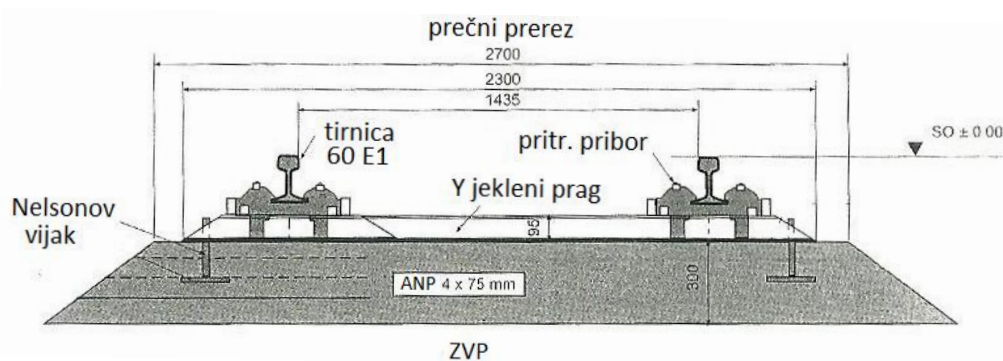
Pri sistemu BTD uporabljajo samo enodelne prage, ki jih položijo na betonsko plast. Na hidravlično vezano plast namestijo betonsko nosilno plast in vanjo izvrtajo luknje. Vsak drugi prag ima v središču luknjo, skozi katero vtaknejo jeklen vtič in utrdijo povezavo med pragom in betonsko nosilno plastjo (Lichtberger, 2005).



Slika 29: Sistem BTD
(Vir: Lechner, 2011)

4.1.2.3 Sistem SATO

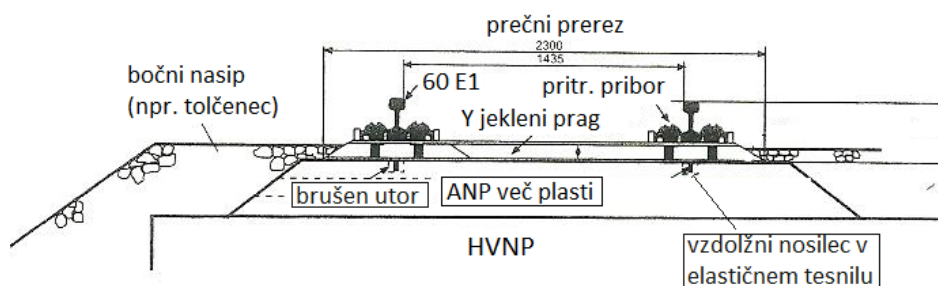
Sistem SATO sestavljajo jekleni pragi v obliki črke Y, ki so položeni na asfaltno nosilno plast. Jeklene prage z Nelsonovimi vijaki privarjajo na ravne jeklene trakove, ki potekajo v vzdolžni smeri tira. Ravni jekleni pragi so, skupaj z vijaki, vgrajeni v asfaltno nosilno plast. Tako so jekleni pragi pritrjeni v horizontalni in vertikalni smeri (Lichtberger, 2005).



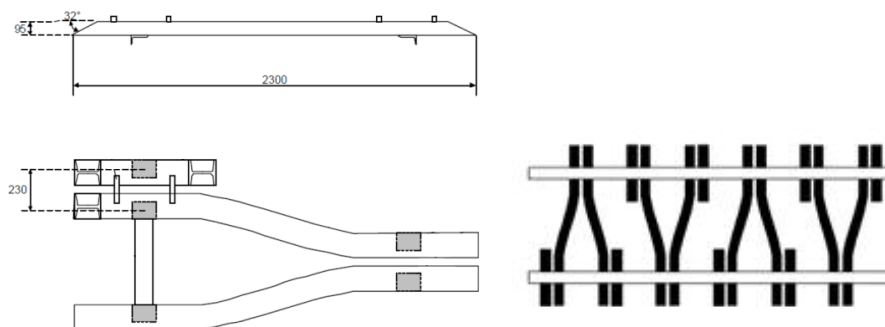
Slika 30: Sistem SATO
(Vir: Lichtberger, 2005: str. 321)

4.1.2.4 Sistem FFYS

Nadaljnji razvoj sistema SATO je privedel do sistema FFYS. Jekleni pragi so postavljeni na asfaltno nosilno plast. Sistem zagotavlja odlično stabilnost položaja ter nižje stroške zaradi hitrega in enostavnega postopka namestitve. Sodoben jeklen prag je ustvarjen iz dveh nosilcev v obliki črke S in dveh delov nosilca. Za povezovanje jeklenih profilov uporabljajo dva spodnja in šest zgornjih prečnih nosilcev, ki so privarjeni na stranice nosilca. Dva spodnja prečna nosilca sta vključena v brušen utor v asfaltni nosilni plasti in sta povezana z asfaltno plastjo s tesnilnim sredstvom. To omogoča prenašanje bočnih sil (Lichtberger, 2005).



Slika 31: Sistem FFYS
(Vir: Lichtberger, 2005: str. 322)



Slika 32: Jeklen prag sistema FFYS
(Vir: Budisa, 2003)

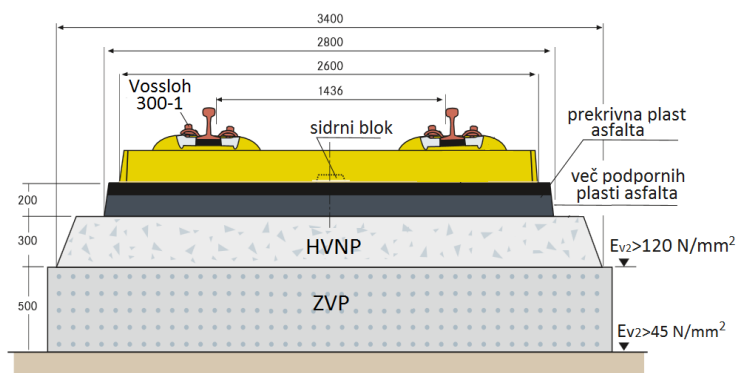
4.1.2.5 Sistem GETRAC

Sistem GETRAC je sestavljen iz prednapetih betonskih pragov, ki so trajno in elastično pritrjeni v asfaltno nosilno plast s pomočjo sidrnih blokov. Sidrni bloki so iz betona visoke trdnosti in prenašajo vzdolžne in prečne obremenitve iz tira v asfaltno nosilno plast, brez možnosti izkrivljanja geometrije proge (Lakušič, Vajdić, 2010).



Slika 33: Reže v asfaltni plasti in betonski prag s sidrnim blokom, sidrni blok
(Vir: Lakušič, Vajdič, 2010)

Obstajata dva modela sistema, Getrac A1 in Getrac A3. Model Getrac A1 ima 2,6 m dolge betonske prage in ga uporabljajo pri projektih, kjer ni prostorskih omejitev. Pri modelu Getrac A3 pa so betonski pragi dolgi 2,4 m in so nekoliko širši, zato so primerni za projekte s prostorskimi omejitvami, kot so ozki tuneli. Pragi modela A3 imajo večjo nosilno površino, ki zmanjšuje kontaktni pritisk med pragom in asfaltom. To omogoča zmanjšanje debeline asfaltna plasti za 5 cm, zaradi česar je model A3 bolj primeren tudi za nadgradnjo obstoječih ozkih tunelov z zagotavljanjem dodatnega prostora (Getrac ballastless track system, 2012).



Slika 34: Sistem Getrac A1 s hidravlično vezano plastjo
(Vir: Getrac ballastless track system, 2012)

Ena od glavnih prednosti sistema Getrac je preprosta vgradnja. Na hidravlično vezano nosilno plast, če je ta potrebna, namestijo asfalt, ki obsega podporno in prekrivno plast. Če konstrukcija vsebuje hidravlično vezano plast, znaša debelina asfalta pod betonskimi pragi 200 mm. Če hidravlične vezane plasti ni, pa debelina asfalta znaša od 300 do 350 mm (Lakušič, Vajdič, 2010). V fazi polaganja asfaltnih plasti je natančnost bistvenega pomena, saj podporne točke kasneje dopuščajo le manjše popravke. V asfalt izrežejo vdolbine za sidrne bloke v točno določenih presledkih. Robovi rezane vdolbine morajo biti pravokotni, njena globina pa mora biti vsaj 6 cm. Prage sistema lahko namestijo posamezno ali kot montažne segmente, kar skrajša čas namestitve. Po polaganju pragov, stroj opravi smerno nastavitve proge. Za vsako podporno točko je potrebna milimetrska natančnost. Vsakemu

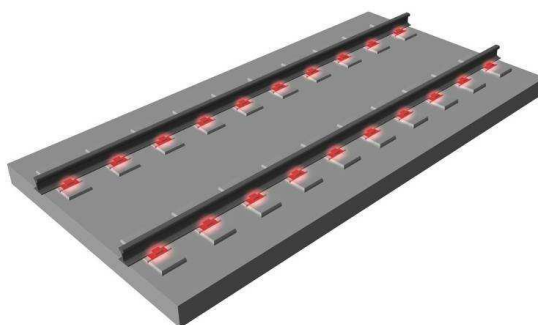
petemu ali šestemu pragu sidrni blok zalijejo z malto, da progo začasno pritrdijo in preprečijo spremembe v položaju proge. Sledi zalivanje vseh sidrnih blokov s posebno malto visoke kakovosti z majhnim krčenjem, ki zagotavlja trajno povezavo z asfaltno plastjo. Zadnji korak je postavitve in varjenje tirnic na podporne točke (Getrac ballastless track system, 2012).



Slika 35: Sistem Getrac
(Vir: Asphalt in Railway Tracks, 2003)

4.1.3 Montažne betonske plošče

Ti sistemi tira na togi podlagi so sestavljeni iz armiranih ali prednapetih betonskih plošč, ki jih vgradijo na betonsko ali asfaltno nosilno plast. Plošče ohranjajo stalen in varen naklon ter širino dveh vrst tirnic hkrati. Med proizvodnjo vanje vgradijo sistem za pritrjevanje tirnic. Metoda gradnje zgoraj – navzdol omogoča prilagajanje plošč nad nosilno konstrukcijo in vlivanje cementno bitumenske malte med plošče in podporno konstrukcijo. Cementno bitumenska malta, običajno debeline med 3 in 7 cm, dovoljuje ločitev plošče od podporne konstrukcije v primeru zamenjave plošč. Po drugi strani pa lahko bitumenska malta povzroči skrbi glede življenjske dobe in nagnjenosti k lomljenju koncev montažnih plošč (Poročilo UIC, 2002).

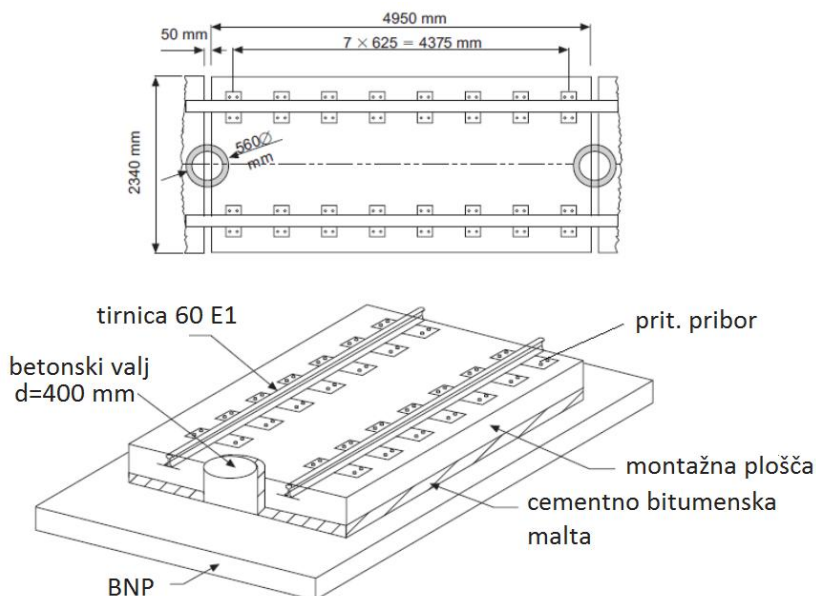


Slika 36: Shematski prikaz sistema montažnih betonskih plošč
(Vir: <http://conference.europoint.eu/highspeed2009/hubert rhomb erg.pdf> (20.7.2013))

Sistemi z montažnimi betonskimi ploščami so v uporabi v več državah po svetu. Sisteme uporabljajo na območjih občutljivih v zvezi s hrupom in vibracijskimi motnjami. Prednosti sistema so visoka kakovost montažnih elementov, visoka stopnja mehanizacije in posledično hitra gradnja, neposredna prilagoditev in pritrditev tirnic ter enostavna zamenjava obrabnih delov. Sistem je izredno učinkovit, vendar pa je njegova slabost velika strukturna višina ter visoka cena (Esveld, 2001).

4.1.3.1 Sistem Shinkansen

Sistem Shinkansen je bil razvit in prvič uporabljen na Japonskem leta 1972 (Lichtberger, 2005). Sestavljen je iz hidravlično vezane nosilne plasti in armirane prednapete betonske plošče dimenzij 4,93 m × 2,34 m × 0,19 m (v predoru debelina plošče meri 0,16 m). Vsaka plošča tehta približno 5 ton (Esveld, 2001). Plošče so med seboj povezane z betonskimi valji, ki so povezani s strukturo betonske nosilne plasti in tako preprečujejo bočno in vzdolžno gibanje plošč. Pod in med ploščo je vbrizgana cementna bitumenska malta, razen v redkih primerih, ko se pod ploščo uporabi guma za preprečitev hrupa in vibracij. Posebno pozornost je potrebno nameniti cementno bitumenski malti, saj se je v preteklosti že izkazalo, da ni dovolj odporna proti zmrzovanju (Lichtberger, 2005).



Slika 37: Sistem Shinkansen
(Vir: Esveld, 2001: str. 247)

Obstajata dve vrsti betonskih plošč, ravne plošče in plošče v obliki okvirja. Do razvoja slednjih je prišlo zaradi optimizacije porabe bitumenske malte, manjše porabe materiala za

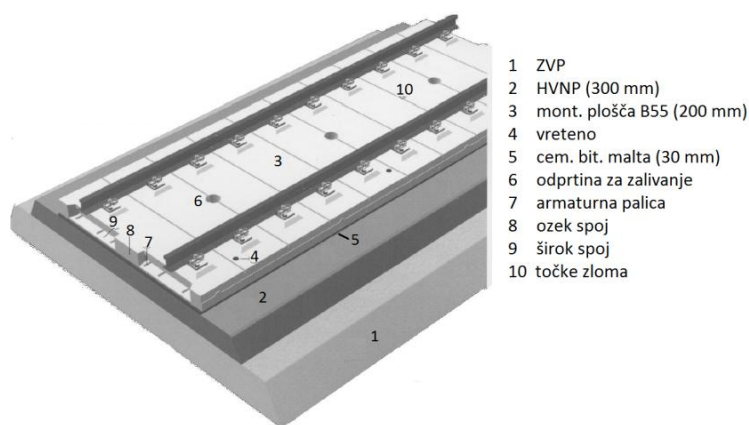
izdelavo plošče in posledično nižje teže plošče. Uporabljajo jih predvsem v predorih (Esveld, 2001).



Slika 38: Proga z ravnimi ploščami in plošče v obliki okvirja
(Vir: http://www.jrft.go.jp/11English/pdf/p_rw_010.pdf (15.8.2013))

4.1.3.2 Sistem Bögl

Sistem Bögl so razvili in prvič uporabili v Nemčiji leta 1977. Ta montažni sistem je sestavljen iz betona, ojačanega z jeklenimi vlakni, debeline 20 cm, dolžine 6,45 m in širine 2,55 m ali 2,80 m. Plošče so v prečni smeri prednapete, v vzdolžni smeri pa plošče povezujejo armaturne palice, ki jih naknadno napnejo (Esveld, 2001). Značilnost montažnih plošč so točke zloma, razporejene med podpornimi točkami (zareze vsakih 0,65 m), da bi preprečili naključno nastajanje razpok na plošči. Zaradi posebej oblikovanih točk proti razpokam, so se plošče pretvorile v sistem širokih pragov, vezanih v vzdolžni smeri (Lichtberger, 2005). Posebni vijačni spoji (vretena), ki so vgrajeni v ploščo, zagotavljajo enostavno in hitro prilagajanje plošč.



Slika 39: Sistem Bögl
(Vir: Budisa, 2003)

Žerjav položi plošče na vrh betonske ali asfaltno – betonske nosilne plasti. Armaturne palice, ki so vzdolžno položene in se raztezajo do konca plošče, so med seboj ohlapno povezane. Tirnice položijo na mesto in jih pritrdijo. Plošče prilagodijo s pomočjo šest vgrajenih vreten. Zunanje robove plošče zapolnijo z malto, nato pa pod plošče skozi posebne luknje injicirajo cementno bitumensko malto. Ko se malta strdi, plošče v dveh korakih trdno povežejo med seboj. Sprednji del plošče je nazobčan in najprej ožji spoj med ploščami zapolnijo z betonom. Ko se beton strdi, privijejo matico čez obe palici in tako dosežejo prednapete sile. Z betonom zapolnijo še širše spoje med ploščami in tako ustvarijo neprekinjeno in togo ploščo. Ta sistem nima cilindričnih valjev za preprečevanje vzdolžnih in prečnih premikov, ampak je odvisen izključno od tornega upora med ploščami, injicirano cementno bitumensko malto in betonsko površino (Esveld, 2001).



Slika 40: Plošča sistema Bögl
(Vir: Esveld, 2003)

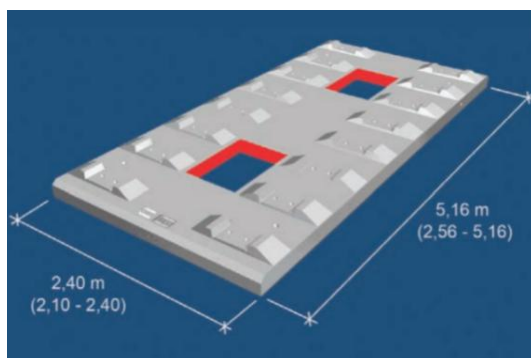
Sicer pa je to sistem, ki ima veliko prednosti. Proizvodnja plošč v tovarni zagotavlja odlično kakovost plošč, ki se jih hitro in enostavno namesti. Enostavno pa je tudi zamenjati poškodovane dele ali cele enote. Če pride do večjih posedkov, plošče med seboj ločijo z rezanjem cementne malte, s katero so zatesnili stike med dvema ploščama. Zamenjavo plošč izvajajo s pomočjo vgrajenega vretena, nastalo odprtino po menjavi pa ponovno zapolnijo s cementno bitumensko malto. Plošča brez pritrdilnega pribora tehta približno 9 ton (Lichtberger, 2005).



Slika 41: Polaganje montažnih plošč
(Vir: <http://pavement.wes.army.mil/papers/41/Presentation41.pdf> (20.8.2013))

4.1.3.3 Sistem ÖBB-Porr

Sistem Öbb-Porr so razvili v Avstriji in ga testno položili leta 1989. Glavni element sistema je 5,16 m dolga elastično podprta armiranobetonska plošča.



Slika 42: Dimenzije plošče sistema ÖBB Porr
(Vir: System ÖBB-Porr ..., 2007)

Montažne plošče so položene na trdno podlago, kjer jih z uporabo vreten namestijo v točen položaj in nato zalijejo z samozgoščevalnim podlivnim betonom. Podlivni beton vlivajo skozi dve konusno oblikovani pravokotni odprtini v plošči, ki delujeta kot vložek med montažno ploščo in podlivnim betonom. Na vse površine plošče, ki so v stiku s podlivnim betonom, je nanesen elastični sloj debeline 2,5 – 3 mm, ki služi za dušenje mehanskih vibracij in ločitev plošče in podlivnega betona za lažjo zamenjavo poškodovanih plošč. Na ploščo je vgrajenih osem pritrdilnih točk za tirnice z medsebojnim razmikom 65 cm. Sistem se s težo 1 tone na tekoči meter, smatra kot lahek sistem železniške proge (Lichtberger, 2005).

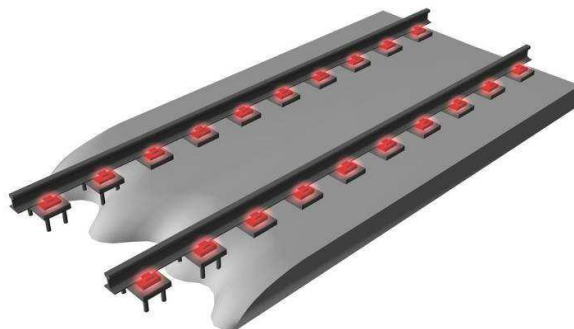


Slika 43: Sistem ÖBB-Porr
(Vir: System ÖBB-Porr ,... 2007)

Podrobnejši opis in potek vgradnje sistema je opisan v poglavju 5.3.

4.1.4 Monolitni sistemi

Monolitne sisteme sestavlja neprekinjena betonska plast in neposredno na njo pritrjen elastični pritrdilni pribor. Monolitno betonsko plast na mestu ustvari finiŝer ali pa skupaj povežejo montažne betonske ploŝče. Monolitni sistemi so trdi in dovolj togi, da se pod prometno obremenitvijo obnaŝajo kot neprekinjeno podprt elastični nosilec. Zaradi velike togosti je sistem primeren za ŝibka in mehka tla, saj se obremenitev porazdeli po precej daljŝem in ŝirŝem območju. Sistem je izredno učinkovit tudi na mostovih, saj je pritrdilni pribor lahko neposredno pritrjen na vrh jeklene ali betonske konstrukcije. S tem je mostna konstrukcija lažja, odpravljene pa so tudi težave s pragi (Esveld, 2001). Posebno pozornost je potrebno nameniti nastanku razpok v betonski nosilni plasti ter sprejeti ustrezne ukrepe za preprečevanje razpok, ki jih povzroča pritrdilni pribor.



Slika 44: Shematski prikaz monolitnega sistema s posameznimi podpornimi točkami
(Vir: <http://conference.europoint.eu/highspeed2009/hubertrhomberg.pdf> (20.7.2013))

4.1.4.1 Travnata proga (ang. *Lawn track*)

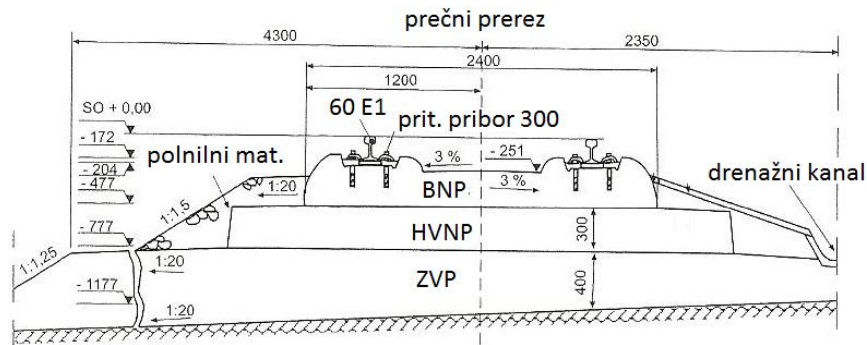
Osnovo sistema predstavljata armiranobetonska nosilca, ki sta s sidrnimi vezmi povezana s 300 mm debelo armirano drenažno betonsko plastjo. Drenažna plast je opremljena s prečnimi ojačitvami, ki preprečujejo spremembe tirne širine v primeru nastanka vzdolžnih razpok (Lechner, 2008). V predhodno izvrtane luknje na vzdolžnih nosilcih so vstavljene tirne sponke, s katerimi je pritrtilni pribor pritrjen na nosilca (Lichtberger, 2005). Prostor med betonskima nosilcema in zunanji površinami je napolnjen s peskom in substratom, ki zagotavlja hranilne snovi za posejano travinje. Poleg povečanja zelenih območij, je prednost sistema tudi zmanjšanje emisij hrupa v primerjavi s progami, ki so grajene z betonskimi ali asfaltnimi površinami. Sistem travnatih prog je zelo priljubljen za mestne prevozne sisteme, kot so tramvaji (Lechner, 2008).



Slika 45: Sistem travnate proge
(Vir: http://www.travetto.de/pdf/downloads/praes_rasengleissysteme.pdf (22.8.2013))

4.1.4.2 Sistem FFC

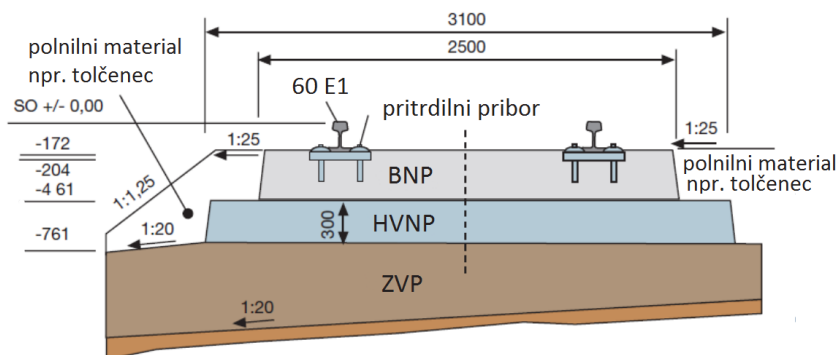
Sistem FFC vključuje betonsko nosilno plast v obliki profiliranega betonskega praga neskončne dolžine in vložke za pritrtilni pribor, ki jih z vibracijami vstavijo v svež beton (Lichtberger, 2005). Finišer po vstavitvi vložkov oblikuje posamezne podporne točke pritrtilnega pribora in zagotovi natančno nastavitve geometrije proge. Sledi mu poseben stroj, ki namešča vmesnike za pritrtilni pribor (Poročilo UIC, 2002). Na vsaki tretji podporni točki je zareza, ki služi za nadzor nastajanja razpok in odvaja meteorno vodo.



Slika 46: Sistem FFC
(Vir: Lichtberger, 2005: str. 324)

4.1.4.3 Sistem BES

Sistem BES je sestavljen iz hidravlično vezane betonske plasti, nad njo pa je vgrajena armiranobetonska plast s posameznimi podpornimi točkami za pritrdilni pribor. Sistem je bil razvit v Nemčiji in uporablja isti postopek gradnje kot sistem FFC (Poročilo UIC, 2002). Sistem BES so leta 1996 zgradili blizu Waghäusla na testnem odseku dolgem 400 m (Lechner, 2008).



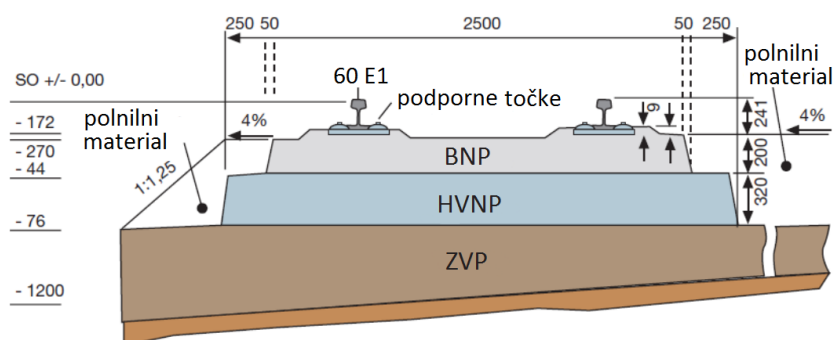
Slika 47: Sistem BES
(Vir: Poročilo UIC, 2002)



Slika 48: Sistem BES na testnem odseku
(Vir: Lechner, 2008)

4.1.4.4 Sistem BTE

Sistem BTE sestavlja hidravlično vezana plast in nad njo armiranobetonska plast, v katero so vdelane osnovne plošče pritrdilnega pribora. Betonska nosilna plast je opremljena z dvema neprekinjenima ojačitvama in z zarezi vsakih 6,5 m, ki zagotavljajo hitro odtekanje meteorne vode iz površine proge (Mörscher, 1999). Tudi sistem BTE so leta 1996 zgradili blizu Waghäusla, na testnem odseku dolgem 400 m (Lechner, 2008).



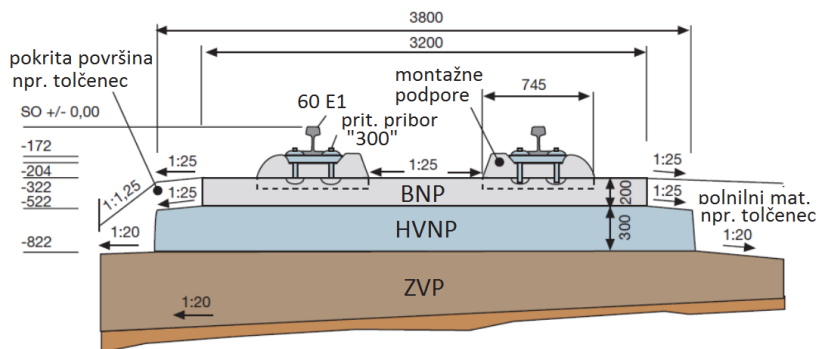
Slika 49: Sistem BTE
(Vir: Poročilo UIC, 2002)



Slika 50: Sistem BTE na testnem odseku
(Vir: Mörscher, 1999)

4.1.4.5 Sistem Hochtief, Schreck-Mieves

Sistem sestavlja betonska nosilna plast nad hidravlično vezano plastjo in uporablja vgrajene betonske podporne točke za tirnico. Za vsako posamezno podporno točko so štiri povezovalna sidra, zazibana v svež beton nosilne plošče. Vsaka podporna točka je natančno vgrajena na mestu samem in izdelana iz betona, okrepljenega z jeklenimi vlakni. Površina betonske nosilne plasti je zasnovana z nagibom, ki neposredno odvaja meteorno vodo (Mörscher, 1999).



Slika 51: Sistem Hochtief, Schreck-Mieves
(Vir: Poročilo UIC, 2002)

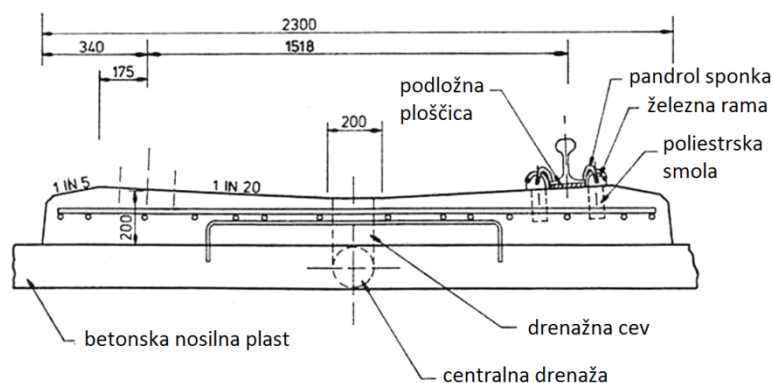


Slika 52: Sistem Hochtief, Schreck-Mieves na testnem odseku
(Vir: Mörscher, 1999)

4.1.4.6 Sistem PACT

Sistem PACT so razvili v Veliki Britaniji in ga leta 1984 položili na testnem odseku dolgem 280 m. Testni odsek se je dobro obnesel, zato so sistem namestili v 15 km dolg enotirni odsek v predor McDonald v Kanadi (Bilow, Randich, 2000).

Sistem sestavlja betonska nosilna plast debeline 22,9 cm in širine 2,43 m, ki jo polaga prilagojen finiher. V strjen beton izvrtajo luknje in vgradijo vložke za pritrdilni pribor. Neprekinjeno zvarjeni tir položijo na gumijasto podložno ploščico in ga pritrdijo na vložke vgrajene v betonsko ploščo (Bilow, Randich, 2000).



Slika 53: Sistem PACT
(Vir: Bilow, Randich, 2000)

4.2 Sistemi z zvezno podprto tirnico

Sisteme z zvezno podprto tirnico delimo na sisteme, kjer so tirnice z elastičnimi polnili vgrajene v betonsko plast in na sisteme, kjer so tirnice na betonsko plast položene in vpete. Pojavljajo se redkeje kot sistemi s točkovno podprto tirnico.

4.2.1 Vgrajena tirnica

Pri sistemih z vgrajeno tirnico je tirnica neprekinjeno pritrjena in podprta z elastično zmesjo iz plute in poliuretana, ki obdaja celotni profil tirnice, razen glave. Vgrajeni tir potrebuje utor v betonski nosilni plasti, ki zadrži vlito elastično zmes in tirnico. Utori v betonski plošči določajo smerno in višinsko nastavitvev tirnice, tirno širino in naklon. Na dno utora položijo elastično zmes in na njo tirnico. Na točen položaj jo namestijo s pomočjo polnilnih blazinic pod nogo in elastičnih klinov ob straneh tirnice. Tirnico po končani namestitvi s segrevanjem sprostijo, nato pa v utor vlijejo elastično zmes (Esveld, 2001). Betonska plošča je lahko montažna ali narejena na mestu samem, njena izdelava zahteva visoko natančnost, saj za fino nastavitvev proge skoraj ni nobene možnosti.



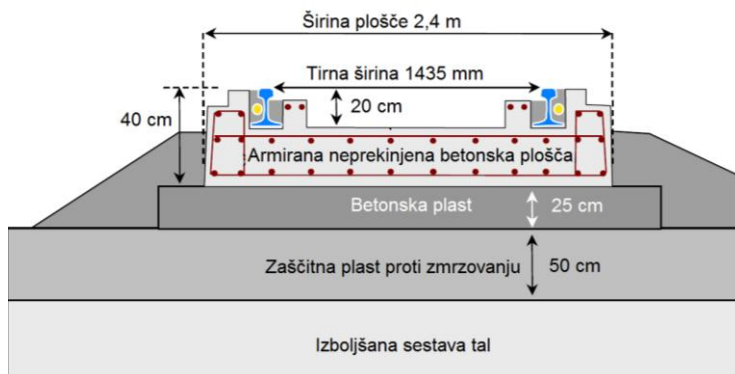
Slika 54: Shematski prikaz sistema z zvezno podprto in vgrajeno tirnico
(Vir: <http://conference.europoint.eu/highspeed2009/hubertrhomberg.pdf> (20.7.2013))

Prednosti sistema so manjše emisije hrupa zaradi elastično podprte tirnice in povečanje življenjske dobe tirnic. Pri sistemih z neprekinjeno elastično podprto tirnico ni dinamičnih sil povzročenih zaradi sekundarnega upogiba med posameznimi podpornimi točkami. Višina konstrukcije je lahko manjša pri prehodih čez cesto, saj imajo sistemi možnost vgradnje nižjih tirnic. (Esveld, 2001).

Glavno predvideno področje uporabe sistemov z vgrajeno tirnico so proge za visoke hitrosti in mestni potniški promet (tramvaj, podzemne železnice in metroji). Sistem je predvsem primeren za površine, ki so skupne tirnim vozilom, pešcem in avtomobilom.

4.2.1.1 Sistema INFUNDO in Edilon

Sistem Edilon so razvili na Nizozemskem in ga leta 1976 testno položili na progi s hitrostjo vlakov do 160 km/h (Esveld, 2001). Nadaljnji razvoj sistema je leta 1995 privedel do sistema INFUNDO. Sistema imata enaka načela gradnje in konstrukcijske značilnosti.



Slika 55: Sistem Edilon z vgrajeno tirno konstrukcijo
(Vir: Esveld, 1997)

Oba sistema uporabljata tradicionalno zgradbo tira na togi podlagi z zmrzlinško varno plastjo, hidravlično vezano plastjo in betonsko nosilno ploščo. Finišer na mestu oblikuje neprekinjeno armirano betonsko plast, višine 40 cm in širine 2,40 m, z dvema utoroma v obliki črtke U. Minimalna debelina betonske plasti pod utorom je 20 cm. Elastične podložne trakove, iz plute ali gume, položijo v utore in nanje položijo tirnice. Tirnice namestijo na določen položaj ter utore napolnijo s trajno dvokomponentno elastično maso. Tirnice ne potrebujejo nobenega dodatnega pritrdilnega pribora, saj so po celi dolžini vgrajene v elastični material (Quante, Ogilvie, 2001).

Horizontalne in vertikalne sile absorbira elastična dvokomponentna masa okoli tirnic in pluta pod njo. Trajen elastični material zagotavlja, da so tirnice vedno homogeno podprte, elastičnost materiala pa je lahko posebej prilagojena s spreminjanjem sestavnih razmerij. Ta edinstven material združuje posebne lastnosti naravne plute s posebej razvitimi polimeri.



Slika 56: Prehod med klasičnim in Edilon sistemom
(Vir: <http://www.garneki.pl/liseczek/17935490/system-szyny-w-otulinie-edilon> (22.8.2013))

4.2.1.2 Sistem BBEST (ang. *Balfour Beatty Embedded Slab Track*)

Podobno rešitev za zmanjšanje hrupa so leta 2000 razvili v podjetju Balfour Beatty Rail s sistemom BBEST. Sistem so prvič uspešno namestili v Španiji leta 2002 in kasneje v Veliki Britaniji leta 2003. Za doseg boljših zvočnih lastnosti in nižje konstrukcijske višine v sistem vgrajujejo pravokotne tirnice (Esveld, 2003).

Poleg pravokotne tirnice sistem sestavlja plastična lupina, armirana s steklom, in ploščice iz mikroceličnega poliuretana v obliki črke U, ki se prilega plastični lupini. Tirnica in ploščica sta zamenljivi, medtem ko je lupina trajno vlita v beton. Podsystem tovarniško sestavijo, namestijo v utore v betonski plošči, poravnajo na ± 1 mm natančnosti in ga nato s fugiranjem pritrdijo na položaj (Ingham, Penny, 2003).



Slika 57: Sistem BBEST z vgrajeno tirnico
(Vir: Esveld, 2003)

Prednost sistema je v njegovi preprostosti, saj obstajata le dve glavni komponenti – tirnica in ploščica v obliki črke U. Sistem dosega nizke vibracije, emisije hrupa pa so manjše ali enake kot pri tiru grajenem s tirno gredo. Nizek profil sistema omogoča večjim vozilom in tovorom prehod preko obstoječe infrastrukture. Tirnico lahko s tirnim vozilom ultrazvočno pregledajo skozi celoten prerez (Ingham, Penny, 2003).



Slika 58: Na mestu vgrajen podsistem
(Vir: Ingham, Penny, 2003)

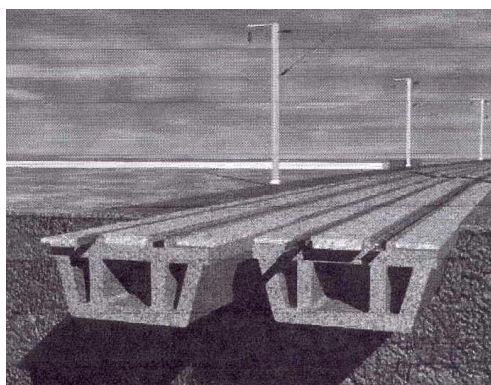
Posedki so redki, saj je osnovni problem z vdorom vode odpravljen z uvedbo zaščitne plošče. Zaradi manjših vibracij do večine posedkov pride še pred namestitvijo tirnice. Vsak manjši preostali posedek tirnice lahko popravijo z nastavitvijo debelejših ploščic ali z dvigom betonske plošče. Vsak tak ukrep je redek in če sploh pride do njega, je lociran le čez majhen del dolžine tirnice. V primeru zloma tirnice ni veliko posledic, saj ostaja tirnica v celoti podprta, tudi če je zlomljena. Promet lahko vozi preko zlomljene tirnice z zmanjšano hitrostjo. Sicer pa stalna prožna horizontalna in vertikalna podpora tirnice bistveno zmanjšuje potencial za lomljenje tirnice (Ingham, Penny, 2003).



Slika 59: Betonska plošča z utoroma
(Vir: Penny, Ingham, 2003)

4.2.1.3 Sistem Deck Track

Sistem Deck Track so razvili na Nizozemskem. Leta 1999 so blizu Rotterdama odprli testni odsek v dolžini 200 m. To je sistem z visoko upogibno togostjo in je posebej zasnovan za uporabo na mehkih tleh. Sestavljajo ga montažni ali na mestu vlti betonski nosilci. Tirnice so lahko vgrajene ali pa neposredno pritrjene na betonsko površino. Površina proge je praktično betonska »votla cev«, ki ima približno enako težo kot odstranjena prst. Visoka upogibna togost konstrukcije preprečuje diferencialne posedke in zmanjšuje vibracije. Visoka torzijska togost pa zagotavlja stabilno osnovo za progo tudi na mehkih tleh. Lokalno pomanjkanje nosilnosti tal ne povzroča težav, saj sistem deluje kot most in tako pokrije šibke točke v tleh (Esveld, 2001).

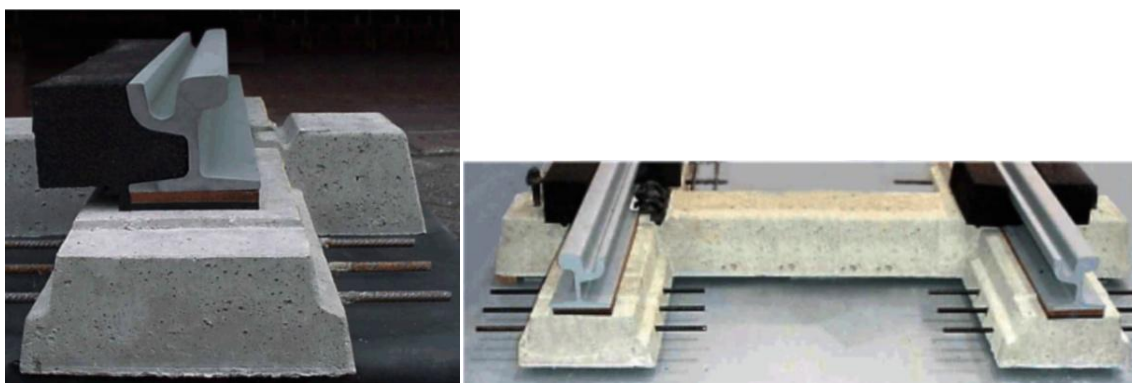


Slika 60: Sistem Deck Track
(Vir: Bilow, Randich, 2000)

4.2.2 Vpeta in neprekinjeno podprta tirnica

4.2.2.1 Sistem Cocon Track

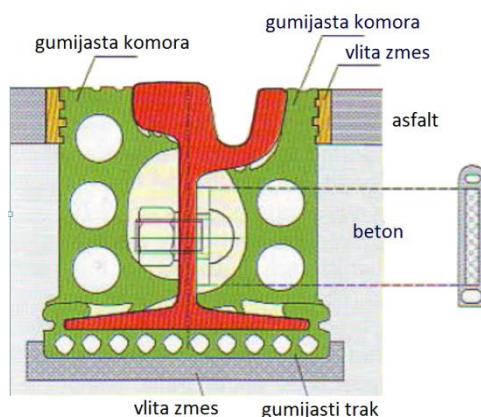
Sistem je posebej zasnovan za tramvaje, njegov glavni cilj pa je zmanjšanje proizvodnje hrupa. Sestavljen je iz kombiniranega prečnega in vzdolžnega betonskega praga H oblike, ki zagotavlja neprekinjeno podporo za CDM trak. Na trak, ki absorbira hrup in vibracije, položijo tirnico in jo pritrdijo z elastičnim pritrdilnim priborom. Pritrdilni pribor je nameščen na križanjih med prečnim in vzdolžnim delom praga, razdalja med njimi je 1200 mm. CDM trak je prilepljen na vzdolžne elemente praga in je sestavljen iz dveh plasti. Prva plast je mehka prilagoditvena plast, ki se stisne in izgubi 40% svoje debeline, ko pritrdijo tirnico. Druga plast prenaša obremenitve in je vsaj petkrat trša kot prilagoditvena plast. Elastomer iz plute in gume, ki zagotavlja zvočno zaščito, skupaj s CDM trakom namestijo med pritrdilno vzmet in tirnico, ter tako preprečijo neposreden stik. Tirnico vgradijo v komoro z materialom iz visoko kakovostne reciklirane gume, ki pomaga preprečiti stik med tirnico in betonom (Esveld, 2001).



Slika 61: Detajl tirnice in prag sistema Cocon Track
(Vir: <http://www.aa-hk.hk/cdm/32/32e.html> (29.8.2013))

4.2.2.2 Sistem ERL

Phoenix je razvil sistem z neprekinjeno podprto tirnico, ki se imenuje ERL. Sistem sestavlja elastično podprta tirnica s pritrdilnim priborom ali brez. Elastično podporo pod tirnico zagotavlja gumijast trak z zračnimi komorami. Tirnica je vgrajena v posebno gumijasto komoro, ki zagotavlja manjše emisije hrupa in deluje kot prehod med tirnico in površino ceste. Visoka kakovost betonske nosilne plasti zagotavlja podporo celotnega progovnega okvirja in obeh tirnic, ki sta med seboj povezani z jeklenimi palicami za zagotovitev tirne širine (Esveld, 2001).

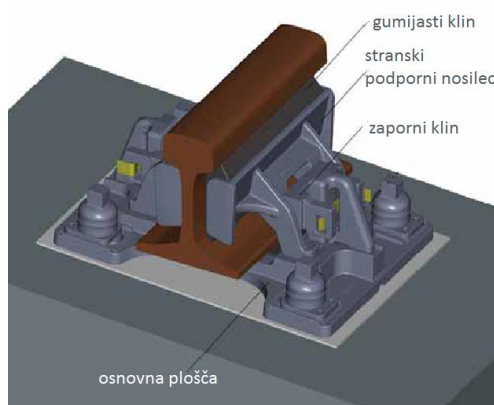


Slika 62: Sistem ERL z neprekinjeno podprto tirnico
(Vir: Esveld, 2001: str. 263)

4.2.2.3 Sistema Vanguard in KES

Sistema Vanguard, ki ga je razvil Pandrol, in KES, ki ga je razvil Phoenix, sta sistema z novim načinom pritrjevanja tirnice. Tirnico podpirajo elastični elementi pod glavo tirnice, ki zagotavljajo neprekinjeno elastično podporo tirnice.

Pri sistemu Vanguard noga tirnice ni podprta. Elastične trakove na mestu držijo stranski podporni nosilci, ki so pritrjeni na betonsko nosilno plast. Ta vrsta pritrdilnega pribora omogoča bistveno večje vertikalne odklone. Izboljšava omogoča tudi boljše dušenje dinamičnih sil, ki nastajajo na vmesniku med kolesom in tiri, saj zmanjšuje prenašanje dinamičnih sil preko pritrjevanja v okolico. Zaradi dušenja vibracij in nizke strukturne višine je sistem Vanguard primeren za proge v predorih na mestnih območjih (Esveld, 2001).

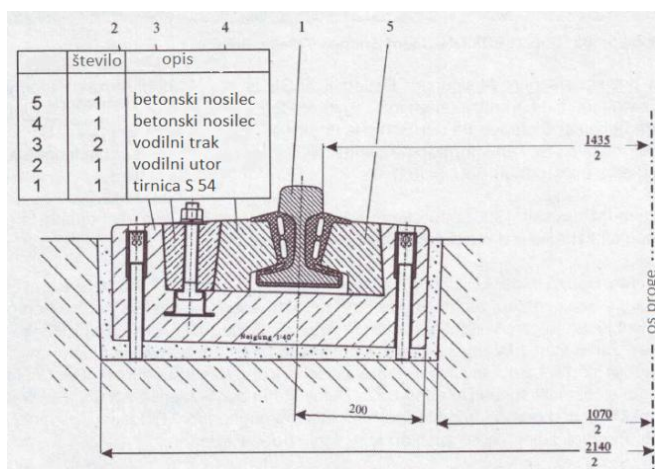


Slika 63: Sistem Vanguard
(Vir: <http://www.pandrol.com/downloads/vanguard.pdf> (29.8.2013))

Sistem KES je bil razvit leta 1990 za mestne železnice v nemških mestih. V nasprotju s sistemom Vanguard so elastični trakovi nameščeni po celotni višini tirnice. Sistem KES deli podobna konstrukcijska načela kot sistem ERL, le da so jekleni ali betonski profili priviti z nateznimi vijaki, ki držijo prednapete elastične trakove na mestu. Sistem KES zahteva več materiala in natančnejšo namestitev v primerjavi s sistemom Vanguard (Esveld, 2001).

4.2.2.4 Sistem SFF

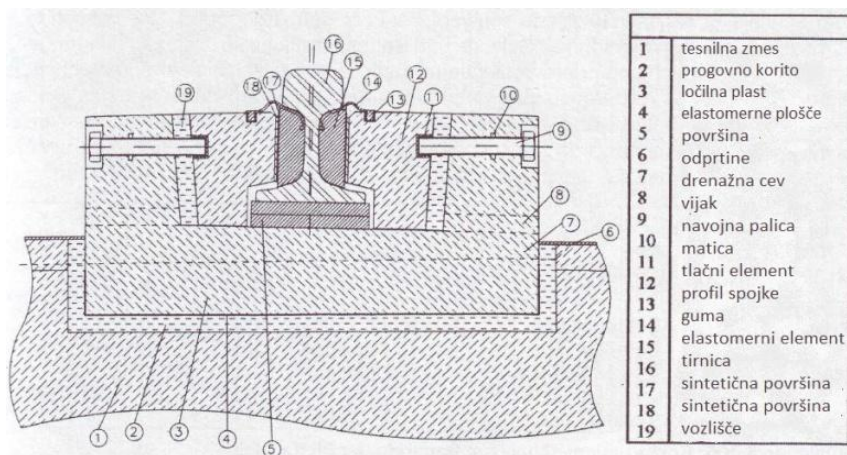
Sistem SFF je sistem na togi podlagi, ki omogoča dušenje vibracij. Sistem uporablja profilirano korito za vgradnjo vzdolžnih pragov, ki so vstavljeni v betonsko nosilno plast. Neprekinjeno podporo zagotavlja elastična zmes, ki obdaja tirnico. Pragi so oprti v utor s profiliranim betonskim montažnim elementom s pomočjo vijčnih povezav. Tirnica je podprta z elastično zmesjo pod glavo tirnice in prosto visi nad dnom korita, kar omogoča dušenje vibracij. Gumijast profil oklepa tirnico in beton ter deluje kot plomba. Voda, ki pronica v sistem, se zbere pod nogo tirnice in odteče skozi stranske odprtine (Lichtberger, 2005).



Slika 64: Sistem SFF
(Vir: Lichtberger, 2005: str. 329)

4.2.2.5 Sistem SAARGUMMI

Sistem uporablja progovno korito brez profila. Vzdolžne prage lahko položijo ali vstavijo v betonsko nosilno plast. Tirnice neprekinjeno podpira elastična zmes. S profiliranimi pritrdilnimi telesi z nastavljivimi navojnimi vijaki tirnice poravnajo in nastavijo. Višina in stranski položaj, tirna širina kot tudi nagib tirnice so nastavljeni z vzdolžnimi pragi (Lichtberger, 2005).



Slika 65: Sistem SAARGUMMI
(Vir: Lichtberger, 2005: str. 330)

5 PRIMERJAVA MED SISTEMI

Med sistemi tira na togi podlagi so pomembne razlike z vidika strukturne stabilnosti, upogibne togosti, višine konstrukcije, proizvodnje hrupa, dovoljene največje hitrosti, vzdrževanja, stroškov gradnje ter časa izgradnje. Sistem togega tira, ki bi bil primeren za vse vrste prog, ne obstaja. Dobro poznavanje posameznih značilnosti sistemov je edini način, da najdemo čim boljši sistem za pogoje uporabe. Zaradi kratke zgodovine togega tira in posledično pomanjkanja dolgoročnih izkušenj, je težko ovrednotiti posamezne sisteme. Bistveno je, da izbrani sistem izpolnjuje zahteve proge.

5.1 Tehnične in ekonomske značilnosti

Zgornji ustroj vsakega sistema togega tira ima različno upogibno togost, ki se mora upoštevati v skladu s pogoji tal, saj je celoten sistem odvisen izključno od svoje nosilnosti. Sistemi z nizko upogibno togostjo so odvisni samo od nosilnosti in togosti tal. Montažne ali monolitne plošče so lahko komaj izpostavljene upogibnim obremenitvam. V primeru nezanesljivih in mehkih tal, armirana plošča zagotavlja dodatno trdnost, saj deluje kot most čez šibkejšo točko in lokalne deformacije v spodnjem ustroju (Esveld, 2001).

Preglednica 2: Upogibna togost sistemov na togi podlagi (Esveld, 2001)

SISTEMI TIRA NA TOGI PODLAGI	Upogibna togost	
	nizka	visoka
Pragi ali bloki vgrajeni v beton	←————→	
Pragi na asfaltni ali betonski plasti	←————→	
Montažne betonske plošče	←————→	
Monolitni sistemi	←————→	
Vgrajena tirnica	←————→	
Vpeta in neprekinjeno podprta tirnica	←————→	

Sistemi imajo različno višino zgornjega ustroja, ki je običajno odločilna pri njegovi uporabi. Sisteme z nizko strukturno višino pogosteje vgradijo v predore, kjer je prostor omejen. Nižja konstrukcijska višina vodi tudi do nižjih stroškov gradnje predora. Ostali parametri, ki vplivajo na odločitev o najbolj primernem sistemu, so emisije hrupa, izkušnje s sistemom, potrebe po vzdrževanju, investicijski stroški, hitrost izgradnje, enostavnost prenove ter največja

dovoljena hitrost na progih. Lichtberger (2005) je v Preglednica 3 ovrednotil našete parametre.

Preglednica 3: Tehnična in ekonomska primerjava različnih sistemov (Lichtberger, 2005)

SISTEM	Leto izgradnje	Hitrost v [km/h]	Višina [cm] *	Ocena hrupa **	Cena [€/m] ***	Dnevna proizvodnja [m]	Ocena obnove **
Rheda	1972	300	63	2	1198	172	3
Rheda - Berlin	1997	300	67	3	630	170	3
Züblin s pragi	1988	300	60	2	550	200	2
Züblin BTE	1996	300	44	1	475	200	1
ATD	1993	300	70	2	600	200	2
BTD	1994	300	63	2	-	350	2
GETRAC	1995	300	72	2	625	270	2
SATO, FFYS	1984	200	61	2	600	350	1
Travnata proga	1998	160	80	2	-	-	-
Heitkamp	1998	160	78	3	-	200	3
FFC	1998	300	48	1	470	200	1
INFUNDO	1995	160	-	1	470	200	1

* Višina je merjena od vrha HVNP do zgornjega roba tirnice

** Ocena: 1 = priporočljivo, 2 = zadovoljivo, 3 = potrebuje izboljšavo

*** Cena se nanaša na stroške izgradnje ZU brez HVNP

5.2 Togi tir po svetu

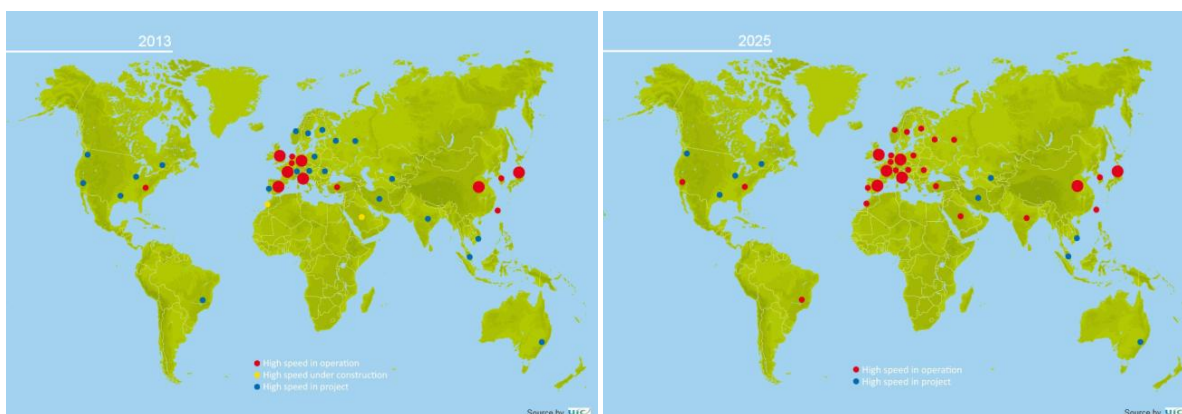
Po celem svetu je v uporabi veliko različnih sistemov tira na togi podlagi, katerih vgradnja je še posebno v zadnjih desetletjih zelo obširna. Zaradi vedno bolj obremenjenih prog in višjih zahtev za hitre proge, uporaba togega tira s časom narašča. Na odločitev o izbiri najprimernejšega sistema poleg upogibne togosti in višine konstrukcije sistema, vplivajo tudi izkušnje posameznega sistema pridobljene skozi leta gradnje in uporabe. Znanje o togem tiru je omejeno in številne izjave o njihovi uspešnosti temeljijo na dobro preizkušenih hipotezah in ne na dejanskih dokazih zaradi njihovega relativno mladega statusa. Starejši in daljši (v smislu zgrajene dolžine prog) sistem ima na voljo boljše informacije o dejanski uspešnosti.

Na svetu, še posebej v Evropi, je gradnja prog za visoke hitrosti v porastu. Slika 66 prikazuje že zgrajene hitre proge in proge, ki so v gradnji v Evropi leta 2013. Slika 67 pa prikazuje zemljevid predvidenih in zgrajenih hitrih prog leta 2013 in 2025 na celem svetu.



Slika 66: Zemljevid hitrih prog v Evropi

(Vir: http://www.uic.org/IMG/pdf/20131101_d_high_speed_lines_in_the_world_maps.pdf (22.12.2013))



Slika 67: Zemljevid predvidenih in zgrajenih hitrih prog na svetu leta 2013 in 2025

(Vir: http://www.uic.org/IMG/pdf/20131101_d_high_speed_lines_in_the_world_maps.pdf (22.12.2013))

5.3 Togi tir na slovenskem železniškem omrežju

Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog (UL RS št. 92/2010) določa, da zgornji ustroj železniške proge sestavljajo tirnice, tirni pribor, pragi in tirna greda ali pa je grajen kot zgornji ustroj na togi podlagi kot tir brez tirne grede na betonski plošči ali jeklenih konstrukcijah ali tir na asfaltnih podlagah. S tem določilom je omogočena vgradnja tira na togi podlagi tudi na slovensko železniško omrežje.

Tir na togi podlagi je v Sloveniji vgrajen v predoru Poganeek, na glavni železniški progi Dobova - Ljubljana, in v predorih Križiški, Jurgovski in Ležeški, na odseku železniške proge Košana - Gornje Ležeče, na glavni železniški progi Ljubljana - Sežana - državna meja.

V predoru Poganeek sta bila do obnove leta 1998 oba tira izvedena klasično, s tirno gredo in lesenimi pragi. Zaradi nenehnih težav s stabilnostjo so oba tira ob prenovi zgradili na betonski podlagi. Glede na obstoječo dokumentacijo so prednapete armiranobetonske prage smerno in višinsko uravnali glede na geometrijo tira v predoru in jih nato zabetonirali v armiranobetonsko ploščo (Pervinšek, 2014).

Odsek Košana – Gornje Ležeče sestavljajo odprta proga in predori Križiški, Jurgovski in Ležeški. Odsek je bil pred obnovo v izredno slabem stanju, saj so bile tirnice prekomerno obrabljene, pragi in pritrdilni pribor je bil dotrajan, tirna greda pa je bila tako zablatena, da zgornji ustroj ni bilo več možno strojno vzdrževati. Na odseku je bila vpeljana počasna vožnja s hitrostjo 40 km/h. Odsek je bil s tehničnega vidika popolnoma dotrajan, njegovo vzdrževanje je bilo ekonomsko neracionalno, zato je bil uveden ukrep o izvedbi potrebne prenove odseka. Odprto progo se prenovili po klasični izvedbi, v predore pa so vgradili sistem tira na togi podlagi ÖBB - Porr. Prenovo železniške proge v predorih so končali leta 2011.

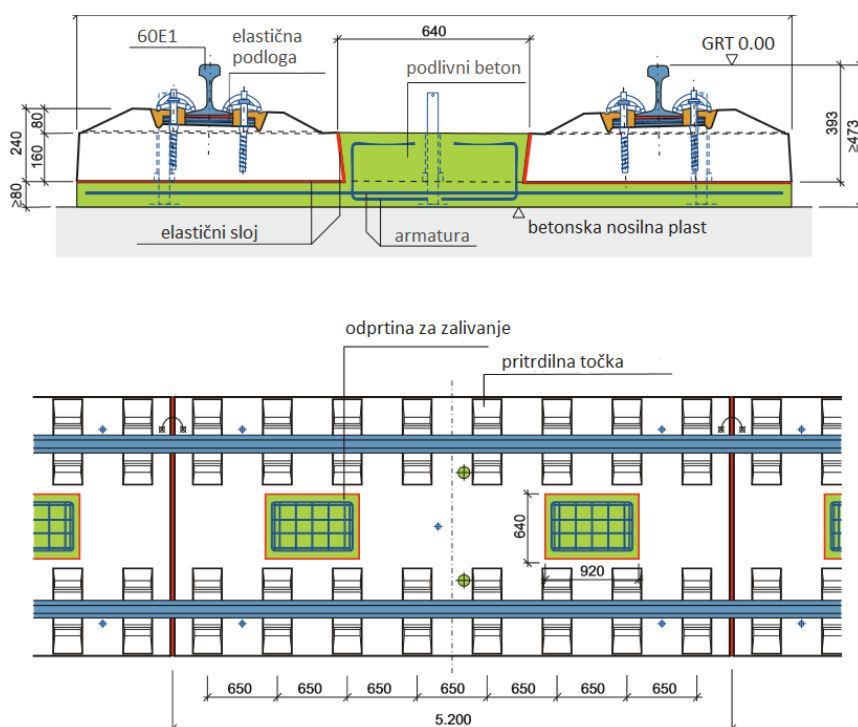
5.3.1 Opis sistema ÖBB-Porr

Sistem ÖBB-Porr je skupen dosežek avstrijskih železnic (ÖBB) in gradbenega podjetja A. PORR AG. Najstarejši odsek sistema je v obratovanju od leta 1989 brez stroškov popravil in vzdrževanja (Slab Track Austria, 2012).



Slika 68: Prvi odsek sistema ÖBB-Porr pri Langenlebarn, vgrajen leta 1989
(Vir: Pichler, Fenske, 2013)

Glavni element sistema je elastično podprta armiranobetonska plošča dimenzij 5,16 m x 2,4 m x 0,16 m – 0,24 m. Montažno betonsko ploščo s pomočjo portalnega dvigala položijo na hidravlično vezano nosilno plast ali na betonska predorska tla, jo natančno namestijo s pomočjo vreten in nato zalijejo s samozgoščevalnim podlivnim betonom. Za vlivanje podlivnega betona pod betonske plošče služita dve konusno oblikovani pravokotni odprtini dimenzij 0,91 m x 0,64 m. Na dno plošče in na stene pravokotnih odprtin je nanesen elastični sloj debeline 2,5 – 3 mm, ki služi za dušenje vibracij in zmanjšano prenašanje hrupa ter ločitev plošče in podlivnega betona za lažjo zamenjavo poškodovanih plošč. Na ploščo je vgrajenih osem parov pritrdilnih točk za tirnice tipa Vossloh 300-1 z medsebojnim razmikom 65 cm. Montažna betonska plošča tehta 5 ton.



Slika 69: Togi tir sistema ÖBB-Porr v prerezu in tlorisu
(Vir: System ÖBB-Porr ..., 2007)

Plošče proizvajajo v tovarni ali montažnih obratih s sistemom za zagotavljanje visoke kakovosti. Jekleni okvirji za izdelavo betonskih plošč so prilagodljivi, zato se plošče lahko z milimetrsko natančnostjo prilagajajo različnim radijem. Skladiščijo jih samo v tovarni in jih od tu neposredno z vagoni transportirajo na lokacijo. Vsaka plošča je označena s šifro, tako se plošče med seboj ne morejo zamenjati in se lahko v vsakem trenutku identificirajo, če je potrebno začasno skladiščenje. Raztovarjanje opravlja portalno ali kamionsko dvigalo, odvisno od potreb začasnega skladiščenja (System ÖBB-Porr ..., 2007).



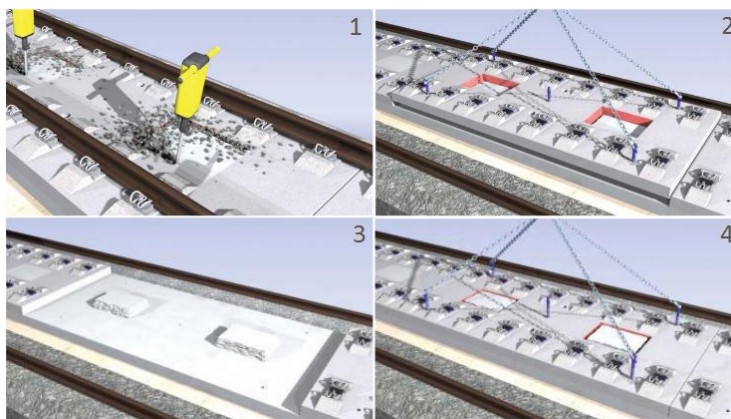
Slika 70: Betonske plošče sistema ÖBB-Porr
(Vir: Tiring, 2010)

Na podlagi razpoložljivega prostora zmes samozgoščevalnega betona vgrajujejo neposredno ali preko črpalke do največ 500 m. Debelina podlivnega betona praviloma znaša več kot 8 cm, tako znaša konstrukcijska višina, do gornjega roba tirnice 60 E1, najmanj 47,3 cm. Z uporabo modificiranega, nearmiranega podlivnega betona (debeline več kot 4 cm) lahko v primeru potreb dosežejo manjšo konstrukcijsko višino (najmanj 43,3 cm). Na ta način dosežejo potrebno znižanje proge za zagotavljanje večjega svetlega profila, npr. v starih obstoječih predorih. Samozgoščevalni beton omogoča vgrajevanje brez vibracij in tako ne vpliva na nastavitev proge. Med utrjevanjem betona konusni odprtini delujeta kot sidri, ki držita ploščo vertikalno in horizontalno pri miru (System ÖBB–Porr ..., 2007).

Sistem ÖBB-Porr vgrajujejo na trdna tla ali na podkonstrukcije z majhnim posedanjem, kot so tla v predoru, mostne konstrukcije ali na hidravlično vezani nosilni sloj. Elastična vgradnja sistema omogoča dobro porazdelitev obremenitev na progi. Elastični sloj gumijastega granulata na dnu plošče in na stenah odprtin omogoča, da se sile zaradi prometnih obremenitev dobro razporedijo in tako zmanjšajo obremenitve v večslojnem sistemu proge (System ÖBB–Porr ..., 2007).

Poleg varnega prenašanja bremen v železniškem prometu je potrebno zagotoviti tudi absorpcijo okoljskih vplivov in odvajanje površinskih voda. Dve plošči proge med seboj loči 40 mm širok spoj, ki kompenzira deformacije zaradi lezenja, krčenja ali temperaturnih sprememb. Spoji lahko služijo tudi za odvodnjavanje površinske vode ali kot prostor za križanje kablov. Plošči sta med seboj povezani le s tirnicami (Slab Track Austria, 2012).

Prednost sistema je v hitri zamenjavi poškodovanih betonskih plošč. Elastični sloj pod ploščo in na stenah pravokotnih odprtin ločuje ploščo in podlivni beton. Podlivni beton, s katerim sta zapolnjeni odprtini, lahko izrežejo in tako v treh do štirih urah zamenjajo poškodovano betonsko ploščo (System ÖBB–Porr ..., 2007).



Slika 71: Zamenjava poškodovane plošče
(Vir: Pichler, Fenske, 2013)

5.3.2 Vgradnja sistema v predore Križiški, Jurgovski in Ležeški

Odsek proge na slovenskem železniškem omrežju Košana – Gornje Ležeče je zaradi dotrajanosti potreboval obnovo. V predore na tem odseku so vgradili sistem togega tira ÖBB-Porr. V predorih je pred sanacijo potekala dvotirna klasična železniška proga, zato je prva faza prenove obsegala sanacijo enega tira in njegovo popolno zaporo, medtem ko je na drugem tiru promet potekal, z občasnimi zaporami, skoraj nemoteno.

Najprej so delavci odstranili obstoječo progo in opravili izkop materiala do temeljnih oziroma predorskih tal. Na dno predora so položili geotekstil in nanj vgradili drenažni beton. Geotekstil je preprečeval izpiranje drobnih zemeljskih delcev iz spodnjih plasti v drenažni beton.



Slika 72: Očiščeno dno predora
(Vir: Tiring, 2010)



Slika 73: Polaganje geotekstila
(Vir: Tiring, 2010)

Na drenažni beton so položili armaturo za betonsko nosilno plast. Betoniranje nosilne plasti je potekalo brez opaža, saj so tako v predoru dobili ravno betonsko podlago. Po koncu

betoniranja nosilne plasti je ostala vidna zgornja armatura, ki sega v področje podlivenega betona in deluje kot podlaga betonskim ploščam.



Slika 74: Armatura nosilne plasti
(Vir: Srebot, 2011)



Slika 75: Vlivanje betona za nosilno plast
(Vir: Tiring, 2011)

Ko je bila betonska nosilna plast dovolj utrjena, je sledilo polaganje montažnih plošč na mesto vgradnje. Običajno se to izvede s portalnim dvigalom, saj lahko portalno dvigalo namesti ploščo na progo neposredno s transportnega vagona in tako ni potrebno vmesno skladiščenje ali prelaganje plošč (System ÖBB–Porr ..., 2007). Obstoječi predori na odseku imajo nizek svetli profil, zato polaganje plošč s portalnim dvigalom ni bilo mogoče. Montažne plošče so najprej položili na tla s pomočjo kamionskega dvigala, na mesto vgradnje pa so jih prepeljali s panelnim portalnim dvigalom.



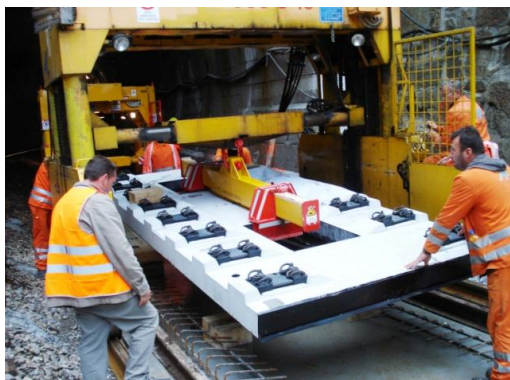
Slika 76: Kamionsko dvigalo
(Vir: Tiring, 2010)



Slika 77: Panelno portalno dvigalo
(Vir: Tiring, 2010)

S panelnim portalnim dvigalom so montažne plošče položili na betonsko nosilno plast in jih s pomočjo lesenih distančnikov položili na mesto vgradnje z natančnostjo ± 1 cm. Točen položaj betonskih plošč so opravili z uporabo vreten M36, ki zagotavljajo natančno nastavitev proge. Vretena se nahajajo na sredini in v vsakem kotu plošče. S pomočjo kovinskega

distančnika so dosegli 40 mm širok spoj med dvema ploščama, v katerega so po končani vgradnji vstavili gumijasti element (Srebot, 2014).



Slika 78: Prenašanje betonskih plošč
(Vir: Tiring, 2010)



Slika 79: Polaganje betonskih plošč
(Vir: Tiring, 2010)



Slika 80: Vreteno M36
(Vir: Srebot, 2011)

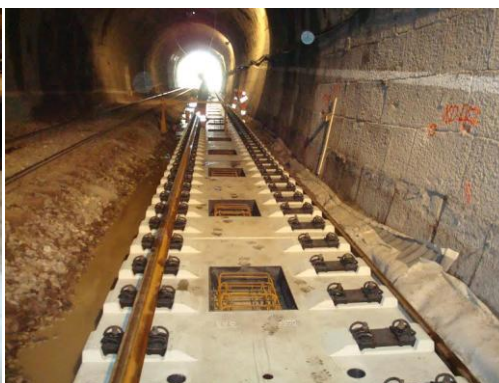


Slika 81: Dilatacija med dvema ploščama
(Vir: Golob, 2014)

Po smerni in višinski nastavitvi betonskih plošč so s pomočjo pritrdilnega pribora Vossloh 300-1 pritrdili tirnice 60 E1. Pred vlivanjem samozgoščevalnega podlivnega betona so namestili armaturo še v pravokotne odprtine v plošči.



Slika 82: Pritrdilni pribor Vossloh 300-1
(Vir: Srebot, 2010)



Slika 83: Pritrditev tirnic 60 E1
(Vir: Srebot, 2010)

Pa nastavitvi proge in pritrditvi tirnic je bilo na vrsti le še vlivanje samozgoščevalnega podlivnega beton. S folijo so zaščitili plošče in v pravokotne odprtine v plošči vlili podlivni beton. Ko je bila prva odprtina napolnjena, so se premaknili do naslednje odprtine, dokler niso bile vse odprtine zalite s podlivnim betonom. Samozgoščevalni beton omogoča vgradnjo brez vibriranja, zato ne vpliva na nastavitev proge (Srebot, 2014).



Slika 84: Proga po vlivanju podlivnega betona
(Vir: Tiring, 2011)



Slika 85: Končana dvotirna proga
(Vir: Srebot, 2011)

5.3.3 Prehodna konstrukcija

Prehod med togim in klasičnim tirom zahteva prilagoditev togosti, prožnosti in posedanja obeh tirov. Prehodna konstrukcija sistema ÖBB-Porr je zasnovana z lepljenjem tirne grede in dvema dodatnima tirnicama dolžine 20 m (5 m na togem in 15 m na klasičnem tiru).



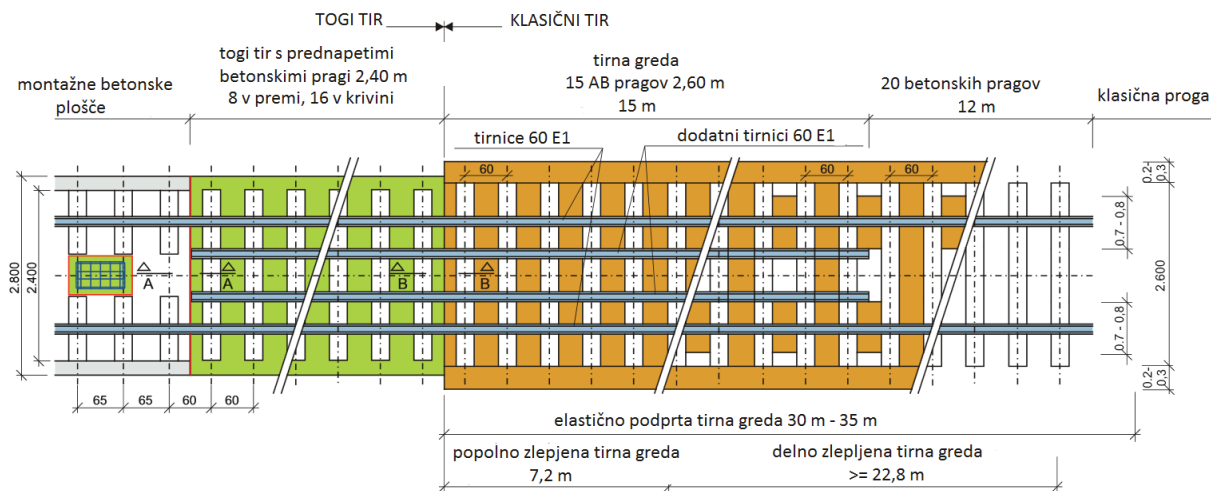
Slika 86: Prehodna konstrukcija
(Vir: Golob, 2014)



Slika 87: Lepljena tirna greda
(Vir: Golob, 2014)

Prehodna konstrukcija med klasičnim in togim tirom ÖBB-Porr je zasnovana s štirimi odseki. Prvi odsek predstavlja togi tir z 2,40 m dolgimi prednapetimi betonski pragi in dodatni tirnici. Drugi odsek sestavlja klasični tir dolžine 15 m z 2,60 m dolgimi armiranobetonskimi pragi in

dodatnima tirnicama. Del odseka je tirna greda popolnoma zlepljena, ostali del pa delno. Tretji odsek meri 12 m, sestavljajo ga betonski pragi in delno zlepljena tirna greda. Četrti odsek predstavlja klasična proga.



Slika 88: Prehodna konstrukcija med klasičnim in togim tirom
(Vir: System ÖBB–Porr ..., 2007)



Slika 89: Armatura prehodne konstrukcije
(Vir: Srebot, 2011)



Slika 90: Dodatna tirnica
(Vir: Golob, 2014)

6 PRIMERJAVA MED KLASIČNIM IN TOGIM TIROM

Stabilnost geometrije proge je osnovno merilo za primerjavo posameznih struktur proge. Glavna naloga tirne grede na klasični progi je zagotoviti vertikalno in horizontalno stabilnost tirne rešetke, ki nenehno slabi zaradi delovanja dinamičnih obremenitev prometa. Zaradi dinamičnih obremenitev prihaja do premikanja in drobljenja tolčenca, kar dodatno poslabša geometrijo proge in povzroča hrupno potovanje vlakov. Prav tako v tirni gredi prihaja do zapolnitev praznih prostorov s finimi delci, kar povzroči zablatenje in posledično slabše odvodnjavanje tirne grede. Pri visokih hitrostih in transportu težkih tovornih vlakov, je tirna greda najšibkejši element klasične proge, zato so jo nadomestili z bolj odpornim nosilnim materialom, kot sta beton in asfalt. Tir na togi podlagi, v nasprotju s klasičnim tirom, tirnice pritrdi posredno ali neposredno na površino betonske ali asfaltne nosilne plasti. V nasprotju s tolčencem beton in asfalt ne kažeta nobenih ali zelo rahle plastične deformacije zaradi obremenitev tirnih vozil.

Glavni razlogi za odločitev o uporabi togega tira na progah za visoke hitrosti so manjše zahteve po vzdrževanju, tišja vožnja in višja raven potovalnega udobja. Primer manjšega vzdrževanja proge je togi tir na železniški postaji Rheda-Wiedenbrück, ki je bil od leta 1972 kos hitrosti do 200 km/h in je v letih uporabe ostal skoraj brez stroškov vzdrževanja (Quante, Ogilvie, 2001). Z natančnim položajem geometrije proge vlak z visoko hitrostjo omogoča visoko stopnjo udobja za potnike. Hitri vlaki (300 km/h) zahtevajo zelo stabilno progo, ki vodi vlak čim bolj nemoteno. Poleg tega ima togi tir, v primerjavi s klasično progo, 2 do 3-krat daljšo življenjsko dobo, večjo obratovalno razpoložljivost proge in manjše možnosti potencialnih nesreč zaradi manj vzdrževalnih del ter nižje statične in dinamične obremenitve tal zaradi porazdelitve obtežb preko betonske ali asfaltne nosilne plasti. Sicer pa ima togi tir visoke investicijske stroške, daljši čas proizvodnje in montaže, omejene možnosti pri prilagajanju spremembam v obratovanju proge ter višje emisije hrupa in vibracij.

6.1 Konstrukcijski elementi

Preglednica 4: Primerjava ZU in SU klasičnega in togega tira (Quante, Ogilvie, 2001) prikazuje primerjavo sestave zgornjega in spodnjega ustroja klasičnega in togega tira. Pri izbiri najprimernejše sestave proge je potrebno upoštevati vse okoliščine, v katerih bo izbrana proga uporabljena.

Preglednica 4: Primerjava ZU in SU klasičnega in togega tira (Quante, Ogilvie, 2001)

	KLASIČNI TIR	TOGI TIR
Z U	<ul style="list-style-type: none"> ○ Tirnice ○ Pritrdilni pribor ○ Podpora tirnice s pragi ○ Tirna greda 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Tirnice ○ Pritrdilni pribor ○ Podpora tirnice: <ul style="list-style-type: none"> - točkovna (pragi ali podporne točke) - zvezna (vgrajene ali vpete tirnice) ○ Betonska ali asfaltna plast ○ Hidravlično vezana nosilna plast
S U	<ul style="list-style-type: none"> ○ Zgornja nevezana nosilna plast; delno kot zmrzlinško varna plast ○ Spodnja nevezana plast: zemeljski ukrepi z zgoščevanjem ali izboljšanjem zemljine ○ (Izboljšana) temeljna tla 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Zgornja nevezana nosilna plast: zmrzlinško varna plast ○ Spodnja nevezana plast: zemeljski ukrepi z zgoščevanjem ali izboljšanjem zemljine ○ (Izboljšana) temeljna tla

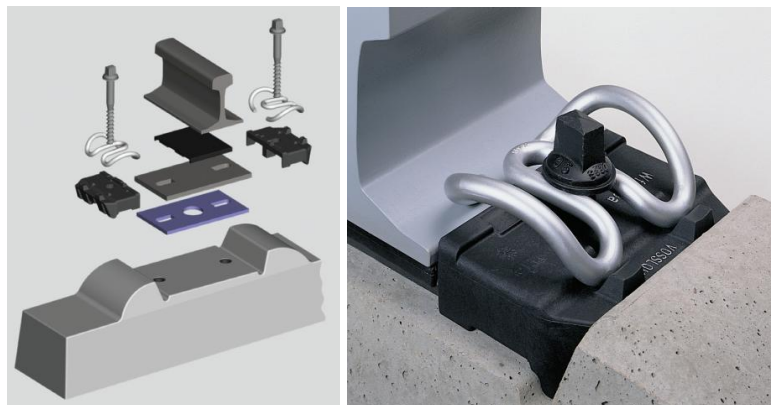
6.1.1 Zgornji ustroj

Zgornji ustroj klasičnega tira sestavljajo tirnice, ki so s pritrdilnim priborom pritrjene na prage. Pragi, običajno leseni, betonski ali jekleni, so položeni na tirno gredo, ki absorbira hrup in vibracije ter prenaša obremenitve na spodnji ustroj. Namesto tirne grede so pri togem tiru nameščene vezane plasti (hidravlično vezana nosilna plast ter betonska ali asfaltna plast). Pri tiru na togi podlagi je potrebno zagotoviti zaščitne ukrepe za emisije hrupa tako, da se pod tirnice ali prage namesti elastične ploščice. Pri klasično grajenem tiru podpora tirnici nudijo pragi, ki tirnico podpirajo na vsakih 60 cm. Togi tir pa lahko tirnico podpira točkovno (s pragi ali brez) ali zvezno, kar izboljša stabilnost geometrije proge.

Za tir na togi podlagi se uporablja standardni profil tirnice 60 E1. Ostali profili tirnice, kot je 54 E1, se uporabljajo pri nižjih hitrostih ali nižjih osnih obremenitvah ter v primeru potrebne nižje konstrukcijske višine (Quante, Ogilvie, 2001).

Za tir na togi podlagi je primeren višinsko in smerno nastavljiv pritrdilni pribor, ki omogoča prilagoditev geometrije proge zaradi odstopanja pri namestitvi ali pri naknadnem posedanju tal. Pritrdilni pribor po procesu gradnje omogoča namestitev geometrije proge za ± 5 mm v vodoravni smeri in ± 26 mm za višinsko prilagoditev proge. Ta rezerva omogoča popravke sprememb v položaju tirnice zaradi proizvodnih nepravilnosti in delovnih obremenitev

(Esveld, 2001). Nastavljiv pritrdilni pribor je trenutno na voljo le pri sistemih s točkovno podprto tirnico, zato mora biti proga z zvezno podprto tirnico izdelana z veliko natančnostjo. Največkrat uporabljen pritrdilni pribor pri togem tiru so elastične pritrdilne sponke različnih tipov.



Slika 91: Sistem 300 (Vossloh) z elastično sponko Skl 15
(Vir: <http://www.vossloh-fastening-systems.com> (10.10.2013))

S pragi najenostavneje nastavimo zahtevano geometrijo proge togega tira. Lahko so povezani skupaj s tirnico in tako tvorijo progovno ploščo ali pa so na betonsko oziroma asfaltno plast položeni ločeno. Uporaba montažnih pragov zagotavlja visoko raven kakovosti in omogoča natančno geometrijo proge. Za različne sisteme togega tira je možna uporaba različnih vrst pragov. Najpogosteje v sisteme togega tira vgrajujejo posebej oblikovane betonske prednapete ali jeklene prage. Za razliko od tira na togi podlagi, se pri nas na klasično progo največ vgrajujejo leseni in enodelni betonski pragi. Življenjska doba pragov iz trdega lesa je ocenjena na 20 do 30 let, življenjska doba betonskih pragov na 30 do 50 let (Zaletelj, Flerin, 2006).

Največja razlika med obema vrstama tira je uporaba tirne grede pri klasičnem tiru in uporaba vezanih plasti pri togem tiru. Vezane plasti pri togem tiru so sestavljene iz zgornje (betonska ali asfaltna plošča) ter spodnje vezane plasti (hidravlično vezana nosilna plast). Hidravlično vezana nosilna plast pomaga plastem spodnjega ustroja, da se izognejo preobremenitvam zaradi dinamičnih obremenitev, s čimer pomagajo zagotoviti dolgoročno varnost celotnega sistema.

6.1.2 Spodnji ustroj

Sestava spodnjega ustroja obeh vrst tirov je precej podobna. Mehka in kohezivna tla je potrebno pri obeh vrstah tira zamenjati z boljšim materialom ali pa jih izboljšati s pomočjo apna ali cementa. Pred gradnjo spodnjega ustroja togega tira so potrebne obsežnejše raziskave terena. Prav tako je potrebno pri togem tiru zagotoviti precej globlje zemeljske ukrepe. Višje zahteve togega tira se odražajo tudi v višjih vrednostih parametrov, kot sta stopnja zgoščenosti po Proctorju D_{Pr} in deformacijski modul E_{v2} .

6.2 Prednosti tira na togi podlagi

V primerjavi s klasično grajeno progjo, so glavne prednosti togega tira v splošnem večja stabilnost proge, daljša življenjska doba in bistveno zmanjšanje vzdrževanja proge ter posledično nižji stroški oviranja prometa.

Proga, grajena na togi podlagi, v veliki meri ne potrebuje vzdrževanja. Vzdrževalna dela, kot so smerna in višinska regulacija tira ter čiščenje tolčenca, niso potrebna. Stroški vzdrževanja znašajo 20 – 30% stroškov vzdrževanja klasično grajene proge (Esveld, 2001). Zaradi nižjih zahtev po vzdrževanju delavci na progi porabijo manj časa, kar izboljša njihovo varnost. Redka vzdrževalna dela se lahko opravljajo v nočnih izmenah, posledično so manjši stroški oviranja prometa, proge so manj zasedene, večja je njihova razpoložljivost in zanesljivost.

Pričakovana življenjska doba togega tira je od 50 do 60 let, klasičnega tira pa od 30 do 40 let (Lichtberger, 2005). Čeprav je investicijski strošek tira na togi podlagi precej večji, daljša življenjska doba in minimalne vzdrževalne zahteve pomenijo, da so na splošno celotni življenjski stroški togega tira nižji, kot pri tradicionalno grajenem tiru.

Toga podlaga podpira tirnico v nespremenljivem položaju in tako so odstopanja v geometriji proge manjša in manj verjetna. Toga podlaga zagotavlja veliko večjo bočno in vzdolžno stabilnost. Nespremenljiva geometrija proge izboljša udobje potnikov, manjša je obraba podvozja vozil, bistveno so manjši tudi stroški vzdrževanja proge.

Sistemi tira na togi podlagi imajo nižjo konstrukcijsko višino ter manjšo težo in širino kot enakovreden sistem s tirno gredo. Nižja konstrukcijska višina ima prednost predvsem pri uporabi v predorih. Zaradi manjše teže konstrukcije je manjša tudi stalna obremenitev tal.

Tir na togi podlagi, v primerjavi s klasičnim tirom, povzroča več emisij hrupa in vibracij. Vendar pa je mogoče togi tir načrtovati tako, da izpolnjuje zahtevana merila na področju

emisij. Za vsak sistem se lahko elastični sestavni deli izberejo tako, da je zagotovljeno optimalno ravnovesje med akustično izvedbo in stabilnostjo.

Togi tir zagotavlja večjo stroškovno učinkovitost pri postavitvi nove proge, saj se bolje prilagaja terenu. V ožjih krivinah se lahko uporabi večje presežke ali primanjkljaje nadvišanja. V primeru rekonstrukcije klasične proge v togi tir, kjer proga ostane na enakem položaju, stroškovne učinkovitosti ni. Zato ni smotno celotne klasične proge rekonstruirati v togi tir, temveč le določene odseke (npr. v predorih). Bolj smotrna je uporaba togega tira za novogradnje (Lichtberger, 2005).

Smiselna uporaba togega tira je tudi na območjih, kjer primanjkuje primerne materiala za tirno grede. Prav tako je na nekaterih področjih, zaradi okoljskih razlogov, potrebno preprečiti sproščanje prahu iz tirne grede.

Izravnava manjših premikov togega tira je možna s popravki do 26 mm v navpični in do 5 mm v vodoravni smeri (Esveld, 2001).

Togi tir lahko kompenzira presežek in primanjkljaj nadvišanja na progi z mešano uporabo tovrnega in potniškega prometa in pri tem ne povzroča spreminjanja položaja proge.

Prednost togega tira je tudi boljša dostopnost za intervencijska in reševalna vozila v predorih.

6.3 Pomanjkljivosti tira na togi podlagi

Tir na togi podlagi ima tudi nekaj pomanjkljivosti. V splošnem so to visoki investicijski stroški v kombinaciji z daljšim časom gradnje, omejene možnosti popravkov po končani gradnji ter višje emisije hrupa in vibracij.

Tir na togi podlagi zahteva visoke investicijske stroške, saj gradnja zahteva obsežne ukrepe za pripravo temeljnih tal. Spodnji ustroj mora biti homogen in zmožen nositi naložene obremenitve brez večjih posedanj. Tir na togi podlagi ne more biti zgrajen v določenih geoloških okoliščinah, kot so globoka glinena tla, nasipi na mehkih šotnih plasteh in na potresnih območjih. Kakovost tira je potrebno zagotoviti z ustreznimi ukrepi na visoki ravni zagotavljanja kakovosti. To pomeni dodatne stroške in čas za gradbena dela ter njihov nadzor. Vsaka napaka v kakovosti gradnje ostane v celotni življenjski dobi tira, odpraviti pa jo je mogoče le z uporabo dragih ukrepov.

Ocenjena življenjska doba togega tira je od 50 do 60 let (Lichtberger, 2005). To velja le ob predpostavki, da v celotni življenjski dobi pride do pričakovanih sprejemljivih posedkov. V

primeru iztirjenja vlaka ali drugih nepredvidljivih dogodkov, ki bi povzročili večjo škodo na progi, je popravilo škode lahko zelo drago. Sušenje in utrjevanje betona je dolgotrajno, kar pomeni, da resna nesreča vodi v dolgoročno in drago zaprtje proge. Sistem togega tira je razmeroma mlad, zato ni dovolj informacij o dejanski uspešnosti njegove življenjske dobe. Po koncu življenjske dobe togega tira so potrebni veliki investicijski stroški za ponovno vzpostavitev proge.

Obstaja veliko različnih sistemov togega tira, zato gradnja, vzdrževanje in popravila v veliki meri niso avtomatizirana. Množica obstoječih sistemov ovira inovacije ter postopno izboljšanje sistemov. Optimalna rešitev bi bila omejitev na enega ali dva standardizirana sistema.

Cementno betonska plošča je toga nosilna plast, ki se lahko nenadoma zlomi, potem ko doseže svojo obratovalno trdnost. Prilagoditev večjim premikom ali spremembam v geometriji proge je mogoče izvesti le s težavo in z dragimi ukrepi.

Zmrzlinosko varna plast togega tira (debeline vsaj 70 cm) je precej debelejša kot pri klasičnem tiru. Potrebno jo je vgraditi v vsakem primeru, saj je predpogoj za dolgo življenjsko dobo togega tira.

Emisije hrupa so pri tiru na togi podlagi precej višje (5 dB) kot pri klasičnem tiru (Lichtberger, 2005). Potrebni so primerni ukrepi za zaščito pred emisijami hrupa, kar poveča investicijske stroške.

6.4 Stroški gradnje in vzdrževanja

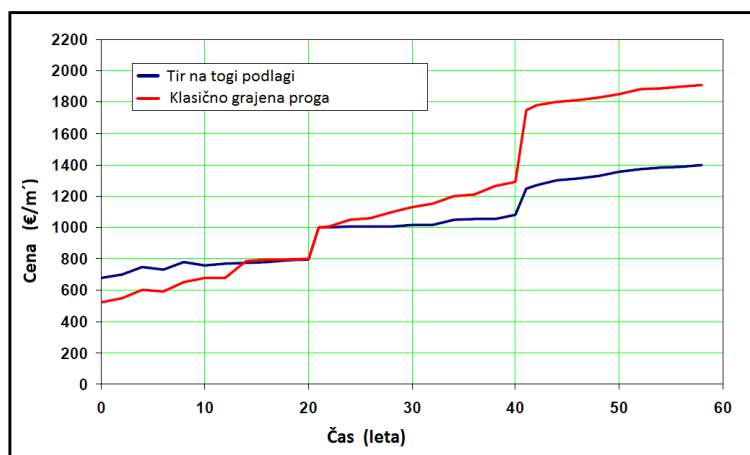
Tehnični vidiki tira na togi podlagi so se skozi leta uporabe optimizirali, dejanski stroški gradnje pa se niso kaj dosti zmanjšali. Na vgradnjo togega tira na hitre proge so predvsem vplivali togi geometrijski parametri in posledično velik delež proge grajene na umetnih objektih. Vgradnja togega tira je vedno bolj pogosta tudi na konvencionalnih progah, predvsem na področjih težjega dostopa, kot so predori. To ne velja samo za novogradnje, ampak vedno bolj tudi za rekonstrukcije prog.

Ekonomske in tehnične študije, ki se ukvarjajo z izgradnjo železniške infrastrukture, kažejo, da je togi tir, v primerjavi s klasičnim tirom, dobičkonosen le, če stroški gradnje ne presegajo 30% stroškov gradnje klasičnega tira (Lichtberger, 2005). Dosedanje izkušnje iz Nemčije, Španije in Japonske, kjer se togi tir uporablja že več desetletij, kažejo, da so stroški togega tira za 50 do 70% večji kot pri klasičnem tiru. Vendar pa je uporaba sodobnih sistemov

stroške vzdrževanja zmanjšala za 50% na odprti progi in do 80% v predorih, v primerjavi s stroški vzdrževanja klasične proge (Lakušič, Vajdić, 2011).

Najcenejši meter togega tira stane okoli 500 €, povprečna cena za klasično grajeni tir pa stane okoli 350 € na vgrajeni meter. Večina sistemov togega tira stane med 750 in 1100 € na tekoči meter. Čeprav novejša študije kažejo, da je cena togega tira z daljšo dolžino proge manjša in tudi, če so metode gradnje optimizirane, je cenovni faktor togega tira še vedno 1,5 do 2-krat večji kot klasični tir (Lichtberger, 2005).

V preteklosti so za izbiro sistema proge upoštevali le investicijski strošek, danes pa, poleg investicijskega stroška, upoštevajo tudi stroške vzdrževanja celotne življenjske dobe proge. Graf na Slika 92: Primerjava stroškov klasičnega in togega tira prikazuje rezultate zadnjih analiz, ki kažejo, da je togi tir dolgoročno ekonomsko učinkovitejši kot klasični tir.

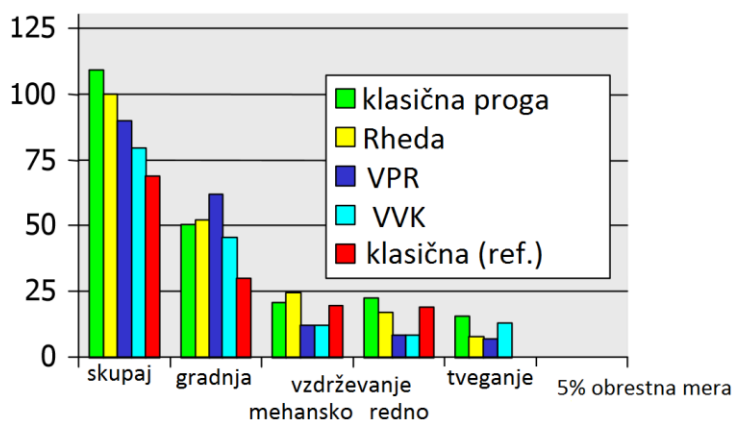


Slika 92: Primerjava stroškov klasičnega in togega tira
(Vir: Lakušič, Vajdić, 2011)

Esveld (1999) je ekonomsko med seboj primerjal različne sisteme togega tira in klasično grajeni tir. Za primerjavo je izbral klasični tir in sisteme togega tira (sistem Rheda, sistem s tirnico vgrajeno v betonsko ploščo in sistem s tirnico neposredno pritrjeno na betonsko ploščo). Za omenjene sisteme je uporabil LCC (ang. Life Cycle Cost) metodo in izračunal stroške celotne življenjske dobe posameznega sistema. Rezultati so zapisani v Preglednici 5, kjer je posebej ovrednotil stroške gradnje zgornjega ustroja (brez hidravlično vezane nosilne plasti) in letne stroške vzdrževanja.

Preglednica 5: Stroški gradnje in letni stroški vzdrževanja za različne sisteme

Ocena stroškov	Stroški gradnje [€/m]	Letni stroški [€/m]
Vgrajena tirnica – pritrjena na bet. ploščo (VPR)	1200	90
Vgrajena tirnica – vključena v bet. ploščo (VVK)	910	80
Rheda	1270	100
Klasični tir	1000	110



Slika 93: Letni stroški v €/m' za različne sisteme

Vir: Esveld, 1999

Kljub temu, da pri analizi ni upošteval dejavnikov, kot so večja dostopnost tira, manjša stalna obtežba na spodnji ustroj proge in manjša konstrukcijska višina, LCC analiza jasno ponazarja, da so vsi sistemi togega tira v življenjski dobi cenejši kot klasično grajen tir.

Ekonomska učinkovitost tira na togi podlagi, v primerjavi s klasičnim tirom, je večja predvsem zaradi nižjih stroškov vzdrževanja. Proga togega tira je bolj toga, zato ne pride do posedanja in do nepravilne geometrije tira. Pragi so betonski, zato ni potrebnega vzdrževanja, kot pri lesenih pragih na klasični progi. Prav tako ni tirne grede, ki bi jo bilo potrebno smerno in višinsko regulirati, da bi vzdrževali natančno geometrijo proge. Vzdrževalna dela pri klasični progi se izvajajo s posebno mehanizacijo (nivelirni ravnalni stroj, plug, sejnalnik ipd.), katere najem je zelo drag. Pri togem tiru so stroški uničevanja vegetacije precej manjši ali pa jih pravzaprav sploh ni. Dosedanje analize so pokazale, da je glavni strošek vzdrževanja togega tira zamenjava obrabljenih tirnic.

Po drugi strani pa se je vzdrževanje klasične proge ves čas izboljševalo in je danes v veliki meri avtomatizirano s stroji, ki so natančni in učinkoviti pri doseganju stabilnejšega položaja proge. Togi tir do neke mere tudi zahteva vzdrževanje oziroma popravila zaradi poškodb proge, ki so zahtevna, draga in dolgotrajna, kot se je izkazalo na hitri progi Berlin - Hannover.

Na progi je prišlo do posedka (20 mm), zato so hitrost na odseku proge začasno omejili na 70 km/h. Popravila so vključevala dvig proge in zgoščevanje zemljine na globini 2 do 6 metrov pod tirnico. Popravilo je bilo drago, saj so dela opravljali s posebnimi stroji in v nočnih izmenah. Po drugi strani pa v primeru poškodb klasičnega tira avtomatizirani stroji opravijo rekonstrukcijo proge v zelo kratkem času (Lichtberger, 2005).

Togi tir je zagotovo ekonomsko učinkovitejši le v predorih in v stabilnih okoliščinah, kjer ni potrebnih dodatnih del za spodnji ustroj. Na nasipih in odprtih progah je izbira klasičnega tira ekonomsko učinkovitejša, saj je cenovni faktor togega tira, zaradi omejitve posedkov spodnjega ustroja, 2 do 2,5 - krat večji kot pri klasičnem tiru (Lichtberger, 2005).

7 ZAKLJUČEK

Razvoj železniških prog je v novejšem času privedel do inovativnih sistemov, ki ponujajo velik potencial za hitre in močno obremenjene proge. Hitre proge so omejene s togimi geometrijskimi parametri, zato je velik delež prog zgrajen na umetnih objektih. Na močno obremenjenih progah so intervali med vlaki zelo kratki, zato je problem z zaporami prog zaradi vzdrževanja. Togi tir pa praktično ne potrebuje vzdrževanja. Primeren je za novogradnje, kot tudi za obnovo in nadgradnjo proge. Zaradi možnosti neposredne pritrditve na objekt, nižje konstrukcijske višine in manjše teže je primeren predvsem za vgradnjo v predore in na mostove. Manj vzdrževanja, manjša obraba tirnih vozil, višja življenjska razpoložljivost ter manj zapor zaradi vzdrževanja prog pripomorejo k stroškovni učinkovitosti tira na togi podlagi.

V diplomski nalogi so predstavljeni različni sistemi tira na togi podlagi, ki se uporabljajo po svetu in podrobneje opisan sistem, ki je vgrajen na slovenskem železniškem omrežju. Informacije glede njihovih dimenzij, države iznajdbe, opisa gradnje in nadaljnjega razvoja omogočajo lažje odločanje o najprimernejšem sistemu za vgradnjo na določeni progi. Predstavljena je struktura tira na togi podlagi in lastnosti sestavnih delov spodnjega in zgornjega ustroja ter njihova primerjava s klasično grajeno progo. Vgradnja togega tira ima določene omejitve zaradi specifičnih zahtev za spodnji ustroj, prehodna območja ter emisije hrupa in vibracij. Znanje o sistemih je nujno za zagotovitev uspešne gradnje togega tira in njegovo zanesljivo uporabo.

Z vzpostavitvijo novih koridorjev prog za visoke hitrosti in tovorni promet so dejavniki, kot so daljša življenjska doba, nižji stroški vzdrževanja, razpoložljivost in zmogljivost za večje hitrosti in osne obremenitve, pridobili na pomenu. V tem pogledu tir na togi podlagi ponuja veliko prednosti v primerjavi s klasičnim tirom. Investicijski stroški togega tira so razmeroma visoki, vendar pa manjše potrebe po vzdrževanju, višja konstrukcijska stabilnost in daljša življenjska doba pomenijo, da je v mnogih primerih vgradnja tira na togi podlagi primernejša. Proga, ki potrebuje malo vzdrževanja, je logični element v konceptu, kateremu cilj je zagotoviti zadostno zanesljivost in razpoložljivost proge.

Povpraševanje po uporabi togega tira tako na novih, kot tudi na obstoječih progah, narašča. Tir na togi podlagi ima veliko prednosti predvsem na hitrih in močno obremenjenih progah. Kljub prednostim togega tira, danes še vedno prevladuje uporaba klasično grajene proge s tirno gredo.

Še vedno obstajajo pomanjkljivosti sistemov togega tira, kot so daljši čas namestitve, omejene možnosti prilagajanja proge po končani gradnji in pogosto višje emisije hrupa. Najpomembnejša pomanjkljivost so visoki investicijski stroški, zato ni pričakovati, da bo ta oblika železniške proge postala prevladujoča. Stroškovno učinkovita infrastruktura je namreč ključni dejavnik za preživetje in nadaljnji uspeh železnic.

VIRI

Asphalt in Railway Tracks. 2003.

http://www.eapa.org/usr_img/position_paper/asphalt_railway_tracks.pdf

(Pridobljeno 25. 8. 2013)

Bilow, D. N., Randich, G. M. 2000. Slab track for the next 100 years.

http://www.arena.org/files/library/2000_Conference_Proceedings/00047.pdf

(Pridobljeno 10. 8. 2013.)

Bonnett, C. 2005. Practical railway engineering. London, Imperial College Press: 1 str.

Budisa M. 2003. Advanced track design.

<http://pavement.wes.army.mil/papers/41/Paper41.pdf> (Pridobljeno 13. 7. 2013.)

Esveld, C. 2001. *Modern Railway Track, Second Edition*. Delft University of Technology: str. 231-274.

Esveld, C. 1997. Innovations in railway track.

<http://www.esveld.com/Download/TUD/Innovations.PDF> (Pridobljeno 22. 7. 2013.)

Esveld, C. 1999. Recent developments in slab track application.

http://www.esveld.com/Download/TUD/RailTech_99.PDF (Pridobljeno 30. 7. 2013.)

Esveld, C. 2003. Recent developments in slab track.

http://www.esveld.com/Download/TUD/ERR_Slabtrack.pdf (Pridobljeno 22. 7. 2013.)

Getrac ballastless track system. 2012.

http://www.railone.com/fileadmin/dateien/03_Broschueren/EN/Getrac_EN2012_ebook.pdf

(Pridobljeno 25. 7. 2013.)

High speed lines in the world. 2013.

http://www.uic.org/IMG/pdf/20131101_high_speed_lines_in_the_world.pdf

(Pridobljeno 22. 12. 2013.)

Ingham, D. M., Penny, C. 2003. The Search for the Ideal Trackform.

http://www.arena.org/files/library/2003_Conference_Proceedings/0065.pdf

(Pridobljeno 12. 8. 2013.)

Lakušić, S., Ahac, M., Haladin, I. 2010. Track stability using ballast bonding method. Portorož, DRC, 10. Slovenski kongres o cestah in prometu: str. 332-340

Lakušić, S., Vajdić, M. 2011. Pregled suvremenih kolosiječnih konstrukcija na čvrstim podlogama. Zagreb, Građevinar 63: str. 125-134

Lechner, B. 2008. Developments in ballastless track technology for sustainable and efficient high speed and urban transportation networks. Munich, Chair and Institute for Road, Railway and Airfield Construction, Munich University of Technology.

Lechner, B. 2011. Railway Concrete Pavements. Florianopolis, 2nd International Conference on Best Practices for Concrete Pavements.

<http://www.ibracon.org.br/eventos/53cbc/pdfs/BernhardLechner.pdf> (Pridobljeno 12. 8. 2013.)

Lewis, M. J. T. 2001. Railways in the Greek and Roman world. A Selection of Papers from the First International Early Railways Conference, str. 11-12

<http://www.sciencenews.gr/docs/diolkos.pdf> (Pridobljeno: 10. 9. 2013.)

Leykauf, G., Lechner, B. 2001. Design of Ballastless Track Structures using sleeper panels fixed on concrete or asphalt pavements. München, Technische Universität München.

http://www.uic.org/cdrom/2001/wcrr2001/pdf/sessions/2_1_4/360.pdf

(Pridobljeno 15. 9. 2013.)

Lichtberger, B. 2005. Track Compedium. Hamburg, Eurailpress Tetzlaff – Hestra GmbH & Co.: str. 309-332

Low vibration track (LVT). 2010.

[http://www.vigier-rail.ch/fileadmin/media/vigier-](http://www.vigier-rail.ch/fileadmin/media/vigier-rail/downloads/Low%20Vibration%20Track%20LVT_englisch.pdf)

[rail/downloads/Low%20Vibration%20Track%20LVT_englisch.pdf](http://www.vigier-rail.ch/fileadmin/media/vigier-rail/downloads/Low%20Vibration%20Track%20LVT_englisch.pdf) (Pridobljeno 10. 8. 2013.)

Mörscher, J. 1999. Slab Track Roadbeds in Germany – Implementation and Experience.

http://www.arena.org/files/library/1999_Conference_Proceedings/00054.pdf

(Pridobljeno 10. 8. 2013.)

Pervinšek, R. 2014. Predor Poganeč. SŽ-Infrastruktura d.o.o. Služba za gradbeno dejavnost, Pisarna Ljubljana. Komunikacija po elektronski pošti. (3. 4. 2014.)

Pichler, D., Fenske, J. 2013. Ballastless track systems experiences gained in Austria and Germany.

http://www.arena.org/files/library/2013_Conference_Proceedings/Ballastless_Track_Systems-Experiences_Gained_in_Austria_and_Germany.pdf (Pridobljeno 14. 2. 2014.)

Poročilo UIC. 2002. Feasibility study »ballastless track«.

http://www.uic.org/IMG/pdf/Feasibility_study_Report_march_2002.pdf

(Pridobljeno 20. 8. 2013.)

Quante, F., Ogilvie N. 2001. Innovative Track Systems – Criteria for their Selection.

Innovations for a cost effective Railway Track, november 2011: str. 14-21

[http://www.transport-](http://www.transport-research.info/Upload/Documents/200602/20060203_155817_12061_Promain_Innovations_1.pdf)

[research.info/Upload/Documents/200602/20060203_155817_12061_Promain_Innovations_1.pdf](http://www.transport-research.info/Upload/Documents/200602/20060203_155817_12061_Promain_Innovations_1.pdf) (Pridobljeno 4. 7. 2013.)

Rheda 2000[®] ballastless track system. 2011.

http://www.railone.com/fileadmin/dateien/03_Broschueren/EN/Rheda2000_EN_2011_ebook.pdf (Pridobljeno 2. 8. 2013.)

Slab Track Austria. 2012. [http://www.porr-](http://www.porr-group.com/fileadmin/content/03_Leistungen/03_Infrastruktur/04_Bahnbau/Prospekt_OEBB-Porr_FF-System_en.pdf)

[group.com/fileadmin/content/03_Leistungen/03_Infrastruktur/04_Bahnbau/Prospekt_OEBB-Porr_FF-System_en.pdf](http://www.porr-group.com/fileadmin/content/03_Leistungen/03_Infrastruktur/04_Bahnbau/Prospekt_OEBB-Porr_FF-System_en.pdf) (Pridobljeno 10. 2. 2014.)

Slab track systems on different substructures. 2007.

http://www.ssf-ing.de/fileadmin/web_data/downloads/projects_en/Slab_track_en.pdf

(Pridobljeno 17. 8. 2013.)

Srebot, P. 2014. Vgradnja sistema ÖBB-Porr. Slovenske železnice d.o.o., Služba za gradbeno dejavnost, Pisarna Postojna. Osebna komunikacija. (20. 3. 2014.)

System ÖBB–Porr elastically supported track base plate, Slab track. 2007.

http://www.mabatrack.com/cxdata/media/produkte/files/prospekt-oebb-porr-ff-system-ref317b_englisch_datei_12.pdf (Pridobljeno 14. 9. 2013.)

Zaletelj, M., Flerin, G. 2006. Sodobni trendi pri posodabljanju in vzdrževanju železniške infrastrukture z uporabo "LCC" metode. Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: str. 7-9

URADNI LISTI

UL RS, št. 92/2010. Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog. Ljubljana: Ur. I. RS, št. 92/2010: 13803.

UL RS, št. 93/2013. Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog. Ljubljana: Ur. I. RS, št. 93/2013: 10191.