

Pregled suvremenih kolosiječnih konstrukcija na čvrstim podlogama

Stjepan Lakušić, Marko Vajdić

Ključne riječi

kolosiječna konstrukcija, čvrste podloge, betonska podloga, asfaltna podloga, povećane brzine, prometno opterećenje

Key words

track structure, solid bases, concrete base, asphalt base, higher speeds, traffic load

Mots clés

voie ferrée, assises solides, assise en béton, assise en enrobé, vitesses plus élevées, charge de circulation

Ключевые слова

колейная конструкция, прочные основания, бетонное основание, асфальтовое основание, повышенные скорости, транспортная нагрузка

Schlüsselworte

Geleisekonstruktion, feste Unterlagen, Betonunterlage, Asphaltunterlage, Steigerung der Geschwindigkeit, Verkehrsbelastung

S. Lakušić, M. Vajdić

Pregledni rad

Pregled suvremenih kolosiječnih konstrukcija na čvrstim podlogama

Istaknuto je da je razvoj kolosiječnih konstrukcija na betonskim i asfaltnim podlogama najviše potaknut zahtjevima za povećanjem brzina, opterećenja i kvalitetom geometrijskih odnosa u kolosijeku. Analiziraju se kolosiječne konstrukcije na čvrstim podlogama, koje se danas sve više primjenjuju na dijelovima kolosijeka u tunelima, na mostovima i na prugama za velike brzine. Uspoređene su s klasičnim kolosiječnim konstrukcijama s obzirom na tehničke, ekonomske i ekološke aspekte.

S. Lakušić, M. Vajdić

Subject review

Overview of modern track structures on solid bases

It is emphasized that the development of track structures on concrete and asphalt bases has mostly been motivated by the demand for higher speed, greater load capacity and better quality of geometrical relationships in the track. Track structures on solid bases, which are presently increasingly used in tunnels, on bridges and on high-speed railways, are analyzed. These tracks are compared with traditional track structures from the technical, economic and environmental aspects.

S. Lakušić, M. Vajdić

Ouvrage de synthèse

Aperçu des voies ferrées modernes sur assises solides

Il est souligné que le développement des voies ferrées sur les assises en béton et en enrobé a été surtout motivé par la demande pour vitesses plus élevées, capacité portante plus grande, et une meilleure qualité des relations géométriques dans la voie ferrée. Les voies ferrées sur assises solides, utilisées de plus en plus souvent dans les tunnels, sur les ponts et sur les chemins de fer à grande vitesse, sont analysées. Ces voies sont comparées avec les voies ferrées traditionnelles de point de vue technique, économique et environnemental.

С. Лакушич, М. Вайдиц

Обзорная работа

Обзор современных колеиных конструкций на прочных основаниях

Подчеркнуто, что разработка колеиных конструкций на бетонных и асфальтовых основаниях в значительной мере вызвана требованиями увеличения скоростей и нагрузок и качеством геометрических соотношений в колее. Анализируются колеиные конструкции на прочных основаниях, находящие все более широкое применение на участках колеи, находящихся в туннелях, на мостах и высокоскоростных железных дорогах. Приведено сравнение с классическими колеиными конструкциями в техническом, экономическом и экологическом аспектах.

S. Lakušić, M. Vajdić

Übersichtsarbeit

Übersicht der zeitgemässen Geleisekonstruktionen auf festen Unterlagen

Hervorgehoben wird dass die Entwicklung der Geleisekonstruktionen auf Beton- und Asphaltunterlagen meisstens durch die Forderungen nach Steigerung der Geschwindigkeiten, Belastungen und der Qualität von geometrischen Verhältnissen angeregt ist. Man analysiert die Geleisekonstruktionen auf festen Unterlagen, die zur Zeit immer mehr auf Teilen des Geleises in Tunnelen, auf Brücken und Eisenbahnlinien für hohe Geschwindigkeiten angewendet werden. Man vergleicht sie mit klassischen Geleisekonstruktionen in Hisicht auf technische, ökonomische und ökologische Aspekte.

Autori: Prof. dr. sc. **Stjepan Lakušić**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Kačićeva 26, Zagreb; **Marko Vajdić**, dipl. ing. građ., Institut IGH d.d., J. Rakuše 1, Zagreb

1 Uvod

Planirana izgradnja nove željezničke pruge Zagreb-Rijeka te planirane rekonstrukcije postojećih tunela povlače za sobom i pitanje koji tip konstrukcije gornjeg ustroja kolosijeka treba primijeniti- upotrebljava li se klasična kolosiječna konstrukcija (kolosijeci sa zastornom prizmom, slika 1.) ili treba primijeniti modernu konstrukciju kolosijeka (kolosijeci bez zastorne prizme, slika 2.). Klasične konstrukcije su uobičajeno rješenje na mreži HŽ-a, dok je primjena modernih konstrukcija gotovo zanemariva. Kod kolosijeka bez zastorne prizme, zastor kao nosivi konstrukcijski element zamijenjen je drugim stabilnijim materijalom poput betona ili asfalta. Na taj način iz kolosiječne konstrukcije gornjeg ustroja eliminiran je najslabiji element čime je duže vremensko razdoblje omogućena njezina geometrijska postojanost i stabilnost.



Slika 1. Klasična kolosiječna konstrukcija (sa zastornom prizmom)

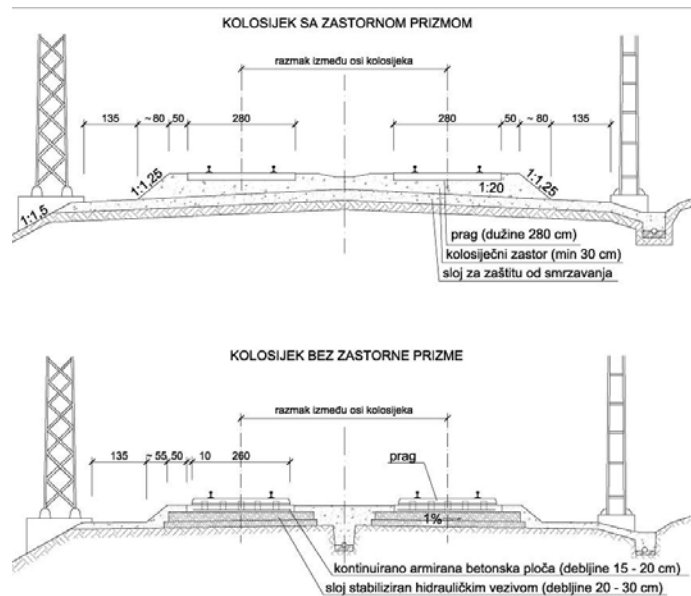


Slika 2. Kolosijek na čvrstoj podlozi (bez zastora)

U literaturi se za kolosiječne konstrukcije na čvrstoj podlozi bez zastora primjenjuju različiti termini, kao npr. pločasti kolosijek (engl. *Slab Track*) ili kruti kolosijek (njem. *Feste Fahrbahn*) ili kolosijek na pločama (fr. *Voie sur dalle*). Za našu primjenu najprihvatljiviji termin bio bi "kolosijek na čvrstoj podlozi". Primjena anglosaksonskog termina "pločasti kolosijek" ne bi bila posve ispravna budući da se nosivi sloj ne mora uvijek izvoditi u obliku pločastih nosača.

2 Usporedba klasičnih i modernih kolosiječnih konstrukcija

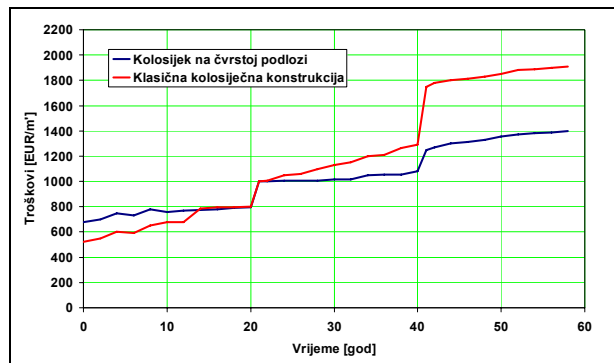
Stabilnost geometrijskog oblika kolosijeka temeljni je kriterij za međusobnu usporedbu pojedinih kolosiječnih konstrukcija. Glavni zadatak kolosiječnog zastora kod klasičnih kolosijeka jest osigurati vertikalnu i horizontalnu stabilnost kolosiječne rešetke koja se kontinuirano narušava djelovanjem dinamičkog opterećenja zbog tračničkih vozila te naprezanja uzrokovanih temperaturnim promjenama. Zbog takvih djelovanja dolazi do pomicanja, drobljenja te raspadanja zrna zastora čime se narušava geometrijski oblik kolosijeka. Također dolazi i do zapunjavanja praznog prostora između krupnijih zrna drobljenja sa sitnim česticama što uzrokuje drenažne probleme (tzv. zablacivanje zastora). Kod kolosijeka na čvrstoj podlozi problemi te vrste su otklonjeni pa je samim time i stabilnost konstrukcije u uzdužnom i poprečnom smjeru veća. Karakteristični poprečni presjek klasične kolosiječne konstrukcije i konstrukcije kolosijeka na čvrstoj podlozi prikazan je na slici 3.



Slika 3. Karakterističan poprečni presjek kolosijeka sa zastornom prizmom i bez nje

Ekonomsko tehničke studije koje se bave izgradnjom željezničke infrastrukture pokazuju da su kolosijeci na čvrstoj podlozi, u usporedbi s klasičnim kolosijecima, isplativi ako im troškovi izgradnje ne premašuju više od 30 % troškova izgradnje klasičnih kolosijeka [1]. Dosađajna iskustva iz Njemačke, Španjolske i Japana, gdje se kolosijeci na čvrstoj podlozi rabe već nekoliko desetljeća, pokazuju da su troškovi pri izgradnji ovakvih kolosijeka 50 % pa i 75 % veći od troškova klasične kolosiječne konstrukcije. Međutim primjenom modernih kolosijeka troškovi održavanja smanjili su se za 50% (na otvorenom dijelu trase) do 80% (u tunelima) u od-

nosu na troškove koji bi nastali kad bi bili primijenjeni klasični kolosijeci [2, 3 i 4]. Visoka početna ulaganja, koja predstavljaju značajni kapitalni trošak, zahtijevaju i stalne analize troškova izgradnje i održavanja. Primjer takve detaljne analize dan je na slici 4.



Slika 4. Usporedba troškova klasičnog kolosijeka i kolosijeka na čvrstoj podlozi, [5]

2.1 Prednosti kolosijeka na čvrstoj podlozi

Jedna od najznačajnijih prednosti kolosijeka na čvrstoj podlozi u odnosu na klasične kolosiječne konstrukcije očituje se ponajprije u smanjenju troškova održavanja. Očekivani uporabni vijek kolosijeka na čvrstoj podlozi je 50 do 60 godina i puno je dulji od uporabnog vijeka klasičnih kolosiječnih konstrukcija koji se kreće od 30 do 40 godina [1]. Pri brzinama većim od 160 km/h kod klasičnih kolosiječnih konstrukcija dolazi do vrtložnog uzdizanja krutih sitnijih čestica zastora uzrokovanih pojavom zračnih turbulencija između podvozja tračničkog vozila i zastora (slika 5.). Posljedica navedenog može uzrokovati oštećenja pojedinih vitalnih dijelova vlaka, poput pogonskog sustava ili sustava za kočenje, a isto tako može doći i do oštećenja glave tračnice ako se takve čestice nađu između kotača i tračnice. Kod kolosijeka na čvrstoj podlozi bez zastora ovi su problemi isključeni [6]. Primjenom kolosijeka na čvrstoj podlozi može se smanjiti poprečni profil pruge u tunelima, čime smanjujemo i cijenu izgradnje tunela. Osobito je to praktično pri elektrifikaciji ili povećanju slobodnog profila postojećih pruga [7].



Slika 5. Oštećenje bukobranskog zida od izdizanja sitnijih zrna zastora

2.2 Nedostaci kolosijeka na čvrstoj podlozi

Kolosijeci na čvrstoj podlozi zahtijevaju podlogu sa strogo ograničenim vrijednostima slijeganja, zbog čega se ne mogu izvoditi u pojedinim geološkim okolnostima kao što su duboki iskopi u glinenim tlima, nasipi u mekim slojevima treseta ili u potresnim područjima bez dodatnih građevinskih zahvata. Ako slijeganja premaše svoju najviše dopuštenu vrijednost unutar svog uporabnog vijeka, to može stvoriti veliki problem u geometrijskom obliku kolosijeka, ali prouzročiti sanacije (cijena popravka). Kruta konstrukcija kolosijeka dopušta samo neznatne korekcije i poboljšanja u budućnosti. Svaka značajnija naknadna izmjena trase može biti realizirana jedino uz visoke troškove, a to je ozbiljan nedostatak. Razine buke kod kolosijeka na čvrstoj podlozi su 3 do 5 dB(A) veće u odnosu na klasične kolosijeke (drveni pragovi, zastorna prizma). Razlog je tome prije svega nedovoljna apsorpcija buke od kolosiječne konstrukcije što onda zahtijeva primjenu adekvatnih, najčešće skupih mjera vezanih za zaštitu od buke [1].

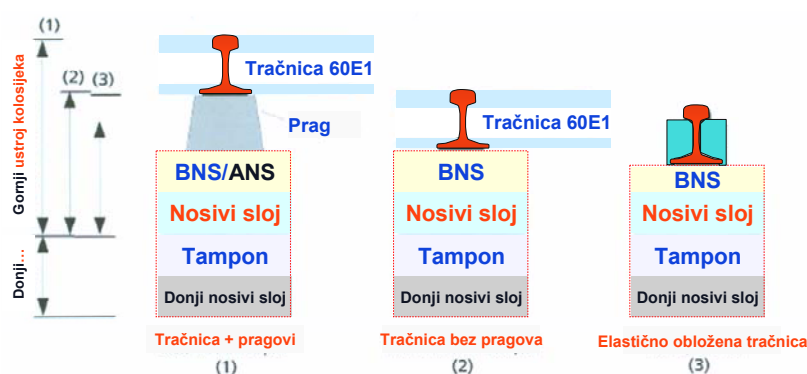
3 Razvoj kolosijeka na čvrstoj podlozi

Prvi konkretni koraci prema zamjeni klasičnih kolosiječnih konstrukcija kolosijecima na čvrstoj podlozi započeli su 1960. godine pri planiranju izgradnje velikih tunela u Švicarskoj (tunel "Bötzberg" - 1966. i tunel "Heitersberg" - 1973.) te tunela "Channel" između Engleske i Francuske. Veći interes za kolosijecima na čvrstoj podlozi potaknut je nepovoljnim ponašanjem zastorne prizme na krutoj podlozi (kolosijeci u tunelima, na mostovima i sl.). Pokazalo se i da su radovi na održavanju kolosijeka u tunelima puno teži, posebice organizacijski [6]. Najveći problem jest činjenica što je kolosiječni zastor koji je ugrađen na krutu betonsku podlogu sklon brzoj degradaciji, tj. dolazi do drobljenja zrna. Kraću izdržljivost klasičnih kolosiječnih konstrukcija na betonskoj podlozi potvrđuju iskustva iz Japana. Naime, na 515 km pruge Tokaido (Tokyo - Osaka), koja je puštena u promet 1964. godine, a kod koje se 50 % trase nalazi na građevinama ili u građevini, u razdoblju uporabe od 30 godina, bilo je potrebno dva puta izmijeniti kolosiječni zastor na 75 % trase [6]. U razdoblju između 1969. i 1971. u Njemačkoj su provedena opsežna istraživanja postojećih kolosijeka na prometno preopterećenim magistralnim prugama na kojima je promet tekao velikim brzinama. Izrađena je tzv. "HSB studija" kojom su autori upozorili na tehnička i ekonomska ograničenja klasičnih kolosijeka s obzirom na postavljene zahtjeve. Uzevši u obzir rezultate studije, 1972. godine izvedeno je prvih 60 metara kolosijeka na čvrstoj podlozi. Ispitna se dionica nalazila na željezničkom kolodvoru Rheda-Wiedenbrück kroz koji prolazi željeznička linija visokog kapaciteta između gradova

Dortmunda i Hannovera. Tragom tog sustava, prozvanog "Rheda" sustav, proizašle su mnogobrojne varijante različitih novih kolosiječnih sustava.

4 Opis konstrukcije kolosijeka na čvrstoj podlozi

Pri razmatranju kolosiječnih konstrukcija potrebno je obratiti pozornost na zahtjeve koji se postavljaju na gornji i donji ustroj kolosijeka. Shematski prikaz pojedinih tehničkih rješenja kolosijeka na čvrstoj podlozi prikazan je na slici 6. Oznake na slici imaju sljedeća značenja: BNS (betonski nosivi sloj), ANS (asfaltni nosivi sloj), dok pojam "nosivi sloj" označuje sloj stabiliziran hidrauličkim vezivom.



Slika 6. Shematski prikaz pojedinih tipova kolosijeka na čvrstoj podlozi

4.1 Gornji ustroj kolosijeka

4.1.1 Betonski nosivi sloj

Najčešća ukupna debljina betonskoga nosivoga sloja jest 200 mm. Visinsko odstupanje gornje površine dopušta se do ± 2 mm. Izrađuje se od betona otpornog na zamrzavanje s udjelom cementa između 350 do 370 kg/m^3 [1]. Udio armature u odnosu na poprečni presjek betona iznosi 0,8 do 0,9 % [1]. U slučaju izvođenja kolosijeka bez pragova, betonski je sloj potrebno dilatirati kako bi se osiguralo kontrolirano stvaranje pukotina. Betonski sloj može biti opterećen tek nakon što beton očvrstne te dosegne minimalnu tlačnu čvrstoću od 12 N/mm^2 , [1].

4.1.2 Asfaltni nosivi sloj

Debljina asfaltnog nosivog sloja kreće se od 300 do 400 mm zbog čega se izvodi u 3 do 4 sloja. Maksimalno dopušteno odstupanje izvedenog sloja jest ± 2 mm. Radi se o vrlo strogim uvjetima jer se na asfaltni sloj direktno polažu posebno oblikovani pragovi. Kretanje po asfaltnom nosivom sloju dopušteno je tek kada temperatura ugrađenog asfalta padne ispod 50 °C. Budući da je asfalt osjetljiv na UV zrake, njegova površina mora biti prekrivena kamenim agregatom, šljunkom ili sličnim materijalom [1]. U cestogradnji je očekivani uporabni vijek

asfaltnih kolosiječnih konstrukcija najčešće 30 godina, dok se kod takvih kolosijeka zahtijeva uporabni vijek od 50 godina [6].

4.1.3 Nosivi sloj stabiliziran hidrauličnim vezivom

Nosivi sloj od znatoga kamenog materijala stabiliziran hidrauličnim vezivom ugrađuje se ispod betonskog ili asfaltnog nosivog sloja. Najčešća je debljina ovoga sloja 300 mm. Stabilizacijska mješavina sastoji se od znatoga kamenog agregata (maksimalna veličina zrna od 32 mm) i hidrauličnog veznog sredstva, najčešće cement, s udjelom oko 110 kg/m^3 [1].

4.2 Donji ustroj kolosijeka

4.2.1 Sloj za zaštitu od zamrzavanja (tamponski sloj)

Glavna uloga tamponskog sloja jest sprječavanje kapilarnog uzdizanja vode iz temeljnog tla te konstantna odvodnja površinske vode. Tamponski sloj također služi za kompenziranje razlika krutosti pojedinih slojeva; sastoji se od čistoga šljunčanog materijala koji je otporan na trošenje i mraz te zato njegova propusnost mora biti između 1×10^{-5} i 1×10^{-4} . Zahtijevani modul elastičnosti za novi kolosijek iznosi $E_{V2} \geq 120 \text{ N/mm}^2$, dok je za nadogradnju $E_{V2} \geq 100 \text{ N/mm}^2$.

4.2.2 Temeljno tlo - planum

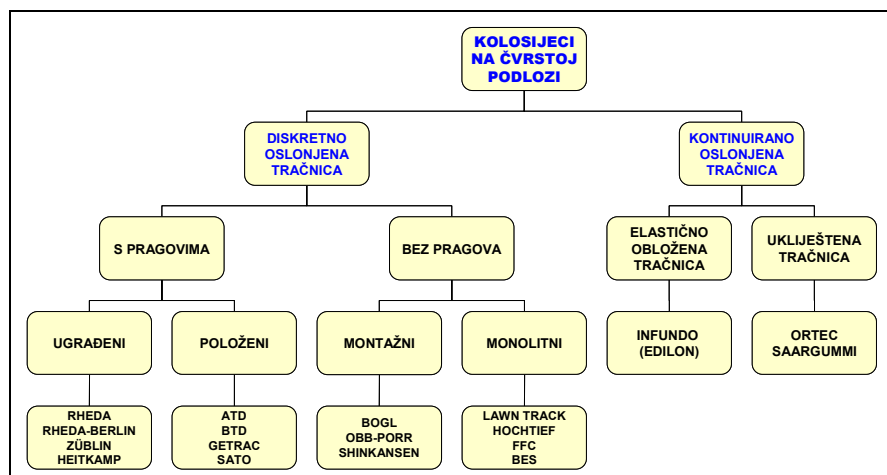
Prije izvođenja kolosijeka na čvrstoj podlozi, potrebno je provesti opsežna geomehanička ispitivanja temeljnog tla. Modul elastičnosti na površini temeljnog tla pri izgradnji novog kolosijeka mora iznositi $E_{V2} \geq 60 \text{ N/mm}^2$, dok je pri nadogradnji postojećeg njegova vrijednost $E_{V2} \geq 45 \text{ N/mm}^2$ [1]. Ovi parametri nosivosti mogu se postignuti i stabiliziranjem tla ako se za to ukaže potreba.

5 Vrste kolosijeka na čvrstoj podlozi

Na slici 7. prikazana je njihova podjela s obzirom na način oslanjanja tračnice na podlogu (diskretan ili kontinuiran), tip konstrukcije (s pragovima ili bez pragova), način izvođenja na terenu (montažna ili monolitna gradnja) te način elastičnog oblaganja tračnica.

5.1 Kolosijeci s pragovima ugrađenim u betonsku ploču

U početku razvoja ovih sustava upotrijebljeni su jednodijelni pragovi, dok se danas rabe dvodijelni. Najpoznatiji su sustavi ovog tipa kolosijeka: „Rheda“, „Züblin“ i „Hetkamp“.



Slika 7. Pregled različitih tipova kolosijeka na čvrstoj podlozi [1]

5.1.1 "RHEDA" sustav

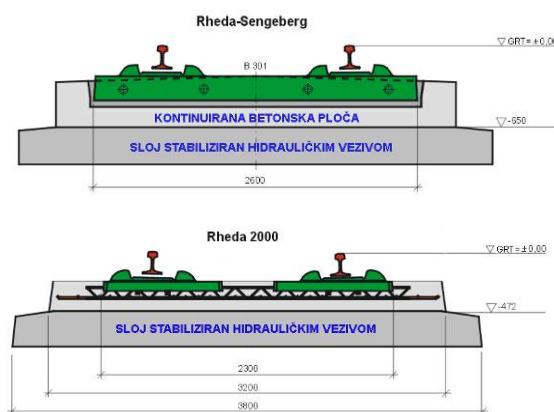
Kao što je rečeno u uvodu, naziv „Rheda“ potječe od prvog kolosijeka na čvrstoj podlozi koji je izveden 1972. godine na željezničkoj stanici Rheda-Wiedenbrück (slika 8.). Pri izvođenju ispitne dionice upotrijebljena je kontinuirano armirana ploča (ugrađena na mjestu, bez razdjelnica) debljine svega 14 cm. Na izvedenoj podlozi izvedeno je dotjerivanje kolosijeka po smjeru i visini nakon čega je ugrađen beton ispod pragova i oko pragova. Ovako izveden „Rheda“ sustav i danas nakon 35 godina funkcionira te je postao svojevrsni prototip za većinu današnjih kolosijeka na čvrstoj podlozi [6].



Slika 8. Rheda-Wiedenbrück željeznička stanica s kolosiječnom konstrukcijom „Rheda“ [8]

Tijekom proteklih godina razvijen je veliki broj konstrukcijskih varijanti sustava „Rheda“. Na slici 9. prikazana su dva karakteristična sustava s jednodijelnim i dvodijelnim pragovima. Kod starijih varijanti „Rheda“ sustava, pragovi se ugrađuju na betonski nosivi sloj koji ima oblik korita. Svrha je *bočnih zidova* omogućavanje lakšega poprečnog namještanja pragova. Danas je najviše u primjeni kolosiječni sustav „Rheda 2000“ u kojem se

upotrebljavaju modificirani dvodijelni pragovi s upuštenom rešetkastom armaturom. Uzdužna armatura betonske ploče povezuje se s armaturom dvodijelnog praga nakon čega se ugrađuje beton (slika 10.) te se dobiva monolitna konstrukcija. Kod ovog sustava napušteno je koristiti oblikovno rješenje betonske nosive ploče, čime je izbjegnuto stvaranje pukotina između ugrađenog betona i prethodno izvedene betonske ploče u obliku korita, a dobivena je i manja ukupna visina konstrukcije.



Slika 9. Različiti oblici sustava „Rheda“ [9]



Slika 10. Ugradnja betona u kolosijek kod sustava „Rheda“ [10]

5.1.2 Kolosiječni sustav „Züblin“

Kompanija „Züblin“ započela je s razvojem kolosijeka na čvrstoj podlozi sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Kod ovog se sustava pragovi s odgovarajućim mobilnim uređajem ugrađuju u neukruženi betonski nosivi sloj. Konzistencija betona u koji se pragovi ugrađuju mora biti s jedne strane dovoljno "mekana" da se može ugra-

diti (utisnuti) prag uz pomoć vibracija, a s druge strane dovoljno čvrsta da ne dođe do izmicanja pragova. Na slici 11. prikazan je postupak izvođenja kolosijeka primjenom sustava „Züblin“ [11].



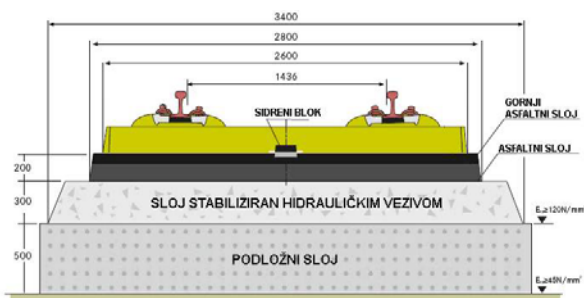
Slika 11. Ugradnja pragova u neočvrstnuli beton kod sustava „Züblin“

5.2 Kolosijeci s pragovima položenim na nosivu podlogu

Kod ove se skupine kolosijeka pragovi najčešće polažu na asfaltni nosivi sloj. Pozornost je potrebno posvetiti dugotrajnoj stabilnosti sustava zbog plastičnog ponašanja materijala na osnovi bitumena koji je podložan promjeni svojstava zbog temperaturnih utjecaja. Izvođenjem asfaltnog nosivog sloja s velikom preciznošću (± 2 mm) nema potrebe za dodatnim vertikalnim namještanjem kolosijeka. Određena odstupanja mogu se dijelom kompenzirati i namještanjem uz pomoć pričvrstnog pribora. Ovom sustavu kolosijeka pripadaju sustavi oznake: "SATO", "FFYS", "ADT", "BTD" i "GETRAC".

5.2.1 Kolosiječni sustav "GETRAC"

Sustav kolosijeka "GETRAC" (*German Track Corporation*) sastoji se od prednapetih betonskih pragova koji se trajno i elastično pričvršćuju za asfaltni nosivi sloj uz pomoć tzv. sidrenih blokova koji su načinjeni od betona velike čvrstoće (slika 12.). Sidreni blokovi služe za prenošenje uzdužnih i poprečnih opterećenja na asfaltni



Slika 12. Poprečni presjek sustava "GETRAC" s hidraulički stabiliziranim slojem [12]

nosivi sloj, bez mogućnosti narušavanja geometrijskog oblika kolosijeka. U asfaltnom sloju unaprijed se pripremi utor za prihvaćanje sidrenog bloka (slika 13.), a prostor se zapunjava s mortom za sidrenje oznake BETEC 400. "GETRAC" pragovi mogu se ugrađivati individualno, ali i kao montažni kolosiječni segmenti (kako bi se smanjilo vrijeme izvođenja).



Slika 13. Utori u asfaltnom sloju za ugradnju sidrenog bloka

Nakon što se izvede hidraulički stabilizirani nosivi sloj, ako je on potreban, slijedi izvođenje asfaltnog nosivog sloja u nekoliko tanjih slojeva. Ako se konstrukcija kolosijeka izvodi s hidraulički stabiliziranim nosivim slojem, tada debljina asfaltnih slojeva ispod betonskih pragova iznosi 200 mm; ako se ne izvodi hidraulički stabilizirani sloj, tada debljina asfaltnih slojeva iznosi 300 do 350 mm. Završni asfaltni sloj izvodi se od asfalt-betona.

5.3 Montažni sustavi kolosijeka – tzv. pločasti kolosijeci

Predgotovljene betonske ploče ugrađuju se na betonsku ili asfaltnu podlogu. S obzirom na tvorničke uvjete proizvodnje, položaj pričvršćenja tračnica, širina kolosijeka i nagib tračnica precizno su namješteni. Primjenom predgotovljenih elemenata smanjuje se potrebno vrijeme izgradnje kolosijeka. Troškovi izgradnje ovakvih sustava ponekad su i do 4 puta viši od troškova kolosijeka sa zastorom što je veliki nedostatak ove konstrukcije, [1]. Najpoznatiji kolosiječni sustavi montažnog pločastog tipa jesu: „Bögl“, „ÖBB-PORR“ te Shikansen.

5.3.1 Kolosiječni sustav „Bögl“ (Njemačka)

Sustav Bögl (slika 14.) upotrebljava montažne betonske ploče izrađene od betona s čeličnim vlaknima C45/55, debljine 20 cm, duljine 6,5 m te širine 2,55 m. Nakon proizvodnje predgotovljenih ploča dodatno se obrađuju mjesta pričvršćenja tračnica posebice ako su namijenjena za kolosijeka u krivini (slika 15.).



Slika 14. Poprečni presjek pločastog kolosijeka tipa „Bögl“ [9]



Slika 15. Tvornička proizvodnja predgotovljenih ploča [13]

Predgotovljene montažne ploče međusobno se povezuju u uzdužnom smjeru sa stezaljkama na navoj. Točna visina i položaj ploča postiže se uz pomoć uređaja za namještanje integriranog u armiranobetonске ploče. Nakon pravilnog pozicioniranja ploča, u prostor ispod ploča ugrađuje se specijalni cementni mort. Nakon očvršćivanja morta, obavlja se povezivanje u uzdužnom smjeru te popunjava praznina između ploča s betonom.

5.3.2 Kolosiječni sustav ÖBB-PORR (Austrija)

Kod ovoga sustava armiranobetonска ploča tlocrtnih dimenzije 5,2 m × 2,4 m (slika 16.) s dva otvora, polaže se na betonsku podlogu [14]. Ploče su s donje strane premazane elastomernim materijalom debljine 2 do 3 mm. Nakon pozicioniranja ploča, u prostor ispod ploča te unutar otvora ugrađuje se beton na mjestu te se na taj način osigurava stabilnost kolosijeka [15].

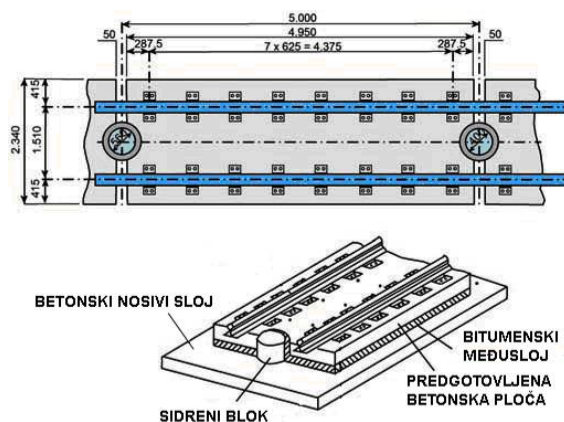


Slika 16. Montaža pločastog kolosijeka tipa "ÖBB-PORR"

5.3.3 Shinkansen pločasti kolosijeci (Japan)

Pločasti kolosijeci su se u Japanu primjenjivali već 1972. godine na brzom liniji Shinkansen (između Tokya i Osake). Prednapete ploče postavljene su na cementom stabiliziranu podlogu (slika 17.). Sprječavanje horizontalnih i

poprečnih pomaka ploča riješeno je primjenom sidrenih blokova koji su kruto povezani s betonskom podlogom. Ploče su ugrađene na specijalni bitumensko-cementni mort.

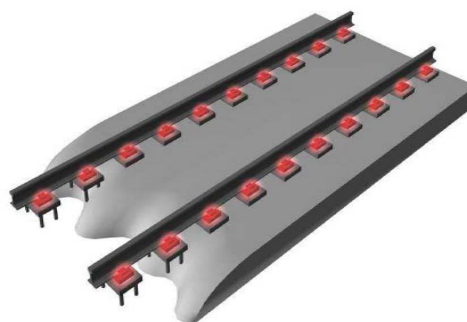


Slika 17. Poprečni presjek pločastog kolosijeka tipa „Shinkansen“ [16]

Održavanje kolosijeka na dijelu s pločastim kolosijekom bez zastora iznosi 18-33 % potrebnog održavanja klasičnih kolosijeka sa zastorom. Najveći nedostatak takve kolosiječne konstrukcije jest u bitumensko-cementnom mortu koji je nedovoljno otporan na zamrzavanje.

5.4 Monolitni sustav kolosijeka bez pragova

Monolitni sustavi kolosijeka su sustavi bez pojedinačnih pragova. Kod takvih sustava primjenjuju se isključivo betonski nosivi slojevi, a točke pridržanja tračnice integriraju se u betonski nosivi sloj koji se najčešće izvodi *in situ* uz pomoć finišera s kliznom oplatom. Moguće visinsko odstupanje izvedenog sloja mora biti u grani-



Slika 18. Shematski prikaz monolitnoga kolosiječnog sustava

cama od ± 2 mm, [1]. Ovoj skupini sustava pripadaju kolosiječni sustavi oznake: "Lawn" i "FFC". Kod kolosiječnog sustava "FFC" (Feste Fahrbahn Crailsheim) povezivanje tračnice s podlogom ostvaruje se sidrenim vijcima koji se ugrađuju u betonsku nosivu ploču. Shematski prikaz takvih sustava kolosijeka vidi se na slici 18. Ovoj skupini sustava pripadaju i tramvajski sustav "DEPP" koji se primjenjuje u Zagrebu i Osijeku.

5.5 Elastično obložene tračnice - kontinuirano oslanjanje

Kod ovog su kolosiječnog sustava ugrađene tračnice kontinuirano pridržane. Tračnice se ugrađuju u uzdužne utore izvedene u betonskoj ploči, a nakon namještanja kolosijeka po smjeru i visini ispunjavaju se elastičnim materijalom. Materijal se ugrađuje lijevanjem u utore ili žljebove. Nakon oblaganja tračnicama se više ne može ispraviti položaj. Shematski prikaz takvih sustava kolosijeka vidi se na slici 19. Od ovih sustava najviše su u primjeni EDILON i INFUNDO.



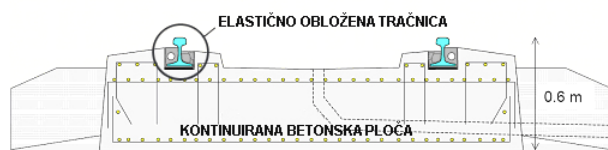
Slika 19. Shematski prikaz kolosijeka s elastično obloženim tračnicama

5.5.1 Kolosiječni sustavi „INFUNDO“ i „EDILON“

Kod kolosiječnog sustava „INFUNDO“ (slika 20.) tračnice su zabrtvljene sintetičkim elastomernim materijalom čime se postiže kontinuirano oslanjanje na podlogu. U usporedbi s klasičnim pričvršnim priborom za tračnice ovaj sustav ima sedam puta veći otpor klizanja. Vrlo sličan sustavu „INFUNDO“ je sustav pločastih kolosijeka „EDILON“ (slika 21.).



Slika 20. Poprečni presjek kolosiječnog sustava „INFUNDO“ [1]



Slika 21. Kolosiječni sustav „EDILON“ [17]

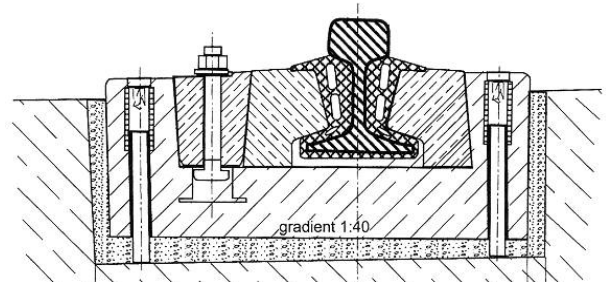
5.6 Kontinuirano pridržane uklještene tračnice

Ovom sustavu kolosijeka pripadaju kolosiječni sustavi „SFF“ (*Schwingungsgedämpfte Feste Fahrbahn* – kruti kolosijeci s prigušenim vibracijama) i „SAARGUMMI“.

5.6.1 Kolosiječni sustav „SFF“

Kolosiječni sustav „SFF“ (slika 22.) sastoji se od profiliranih koritastih pragova koji su ugrađeni na betonski

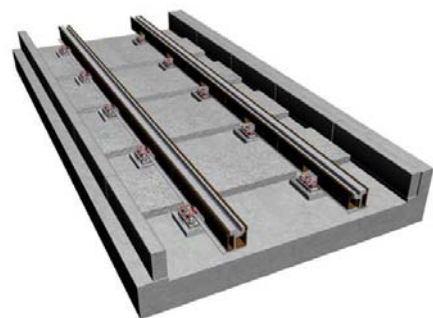
nosivi sloj kao uzdužni pragovi. Tračnica je obložena gumenim brtvilima koji su pritegnuti za tračnicu uz pomoć oblikovanoga betonskoga montažnog elementa koji je vijkom povezan s betonskim koritom. Pridržanje tračnice izvodi se preko vrata tračnice, dok nožica tračnice slobodno visi iznad betonske podloge. Gumeni profil pranja uz tračnicu i betonski element te djeluje kao brtvilo.



Slika 22. Poprečni presjek kolosiječnog sustava „SFF“ [1]

6 Iskustva s kolosijecima na čvrstoj podlozi u Hrvatskoj

U Hrvatskoj se kolosijeci na čvrstoj podlozi primjenjuju na tramvajskim prugama u Zagrebu i Osijeku. Primjenjuje se monolitni sustav kolosijeka bez pragova, kako je navedeno u točki 5.4. Naime, na prethodno izvedenoj betonskoj ploči debljine 25 cm provodi se montaža kolosijeka, tj. dotjerivanje kolosijeka po smjeru i visini te izrada pričvršćenja tračnica (ugradnja sidrenih vijaka, izrada ležajnih mjesta od sintetičkog mikrobetona). Način zatvaranja kolosijeka (opločenja) odabire se ovisno o položaju kolosijeka. Prikaz takve konstrukcije vidi se na slici 23. Takav tip konstrukcije primijenjen je 2002. godine i na željezničkom kolosijeku u Rijeci (Krešimirova ulica). Razlog odabira bio je puno manja visina konstrukcije u odnosu na klasičnu kolosiječnu konstrukciju (slika 24.).



Slika 23. Konstrukcija tramvajskog kolosijeka u Zagrebu

Od 1992. do 1994. godine na Hrvatskim je željeznicama provedeno ispitivanje kolosijeka na čvrstoj podlozi na dijelu pruge Zagreb-Sisak [18]. Ispitana je konstrukcija kolosijeka s predgotovljenim betonskim pločama koje su se polagale na asfaltno slojeve (slika 25.). No, nije

došlo do primjene takvih konstrukcija na mreži HŽ-a niti su se nakon toga provodila daljnja ispitivanja na ovom području.



Slika 24. Izgradnja željezničkog kolosijeka u Rijeci (2002.)



Slika 25. Kolosijek na čvrstoj podlozi na pruzi Zagreb – Sisak (ispitna dionica)

7 Usporedba pojedinih kolosiječnih sustava na čvrstoj podlozi

Jedan od važnih parametara vezan za kolosiječne konstrukcije, osim njihove nosivosti, svakako je ukupna debljina konstrukcije. U tablici 1. navedene su debljine pojedinih slojeva različitih tipova kolosijeka na čvrstoj podlozi, kao i ukupna visina pojedinog tipa konstrukcije. Budući da je razvoj kolosijeka na čvrstoj podlozi bez zastora kratak, nedostatak dugoročnog iskustva otežava ocjenjivanje pojedinih tipova konstrukcija. Pouzdane spoznaje mogu se očekivati tek za nekoliko godina. Vrlo važan parametar svakako je cijena izgradnje ovih kolosijeka. Cijena izgradnje klasičnih kolosiječnih konstrukcija iznosi oko 350 EUR/m' [19]. Troškovi pojedinih tipova kolosijeka na čvrstoj podlozi prikazani su u tablici 2. Kod navedene usporedbe nisu uzeti u obzir troškovi zemljanih radova koji su kod ovih sustava kolosijeka veći u usporedbi s klasičnim kolosiječnim konstrukcijama. Dosadašnja iskustva pokazuju da udio troška za sam kolosijek iznosi manje od 10 % cje-

lokupne investicije. Čak do 65 % kapitalnog troška otpada na klasične zemljane radove i izgradnju infrastrukturnih građevina kao što su tuneli i mostovi. Negdje oko 25 % investicije potrebno je za elektrifikaciju sustava i signalizaciju. U konačnoj analizi, manji profili tunela te manje debljine konstrukcije samog mosta (zahvaljujući manjoj težini kolosijeka) rezultiraju manjim troškovima izgradnje. Dodatna razlika u troškovima između izgradnje kolosijeka na čvrstoj podlozi i klasičnih kolosijeka kompenzira se uštedama nastalim primjenom ovih novih sustava. U nekim slučajevima te uštede mogu nadoknadi povećana početna ulaganja [6].

Tablica 1. Pregledna usporedba debljina kolosiječnih konstrukcija na čvrstoj podlozi [1]

Tip konstrukcije	Debljina pojedinih slojeva u kolosiječnoj konstrukciji [mm]			
	Betonski nosivi sloj	Asfaltni nosivi sloj	Stabilizirani nosivi sloj	Udaljenost od nožice tračnice
Rheda	360		300	759
Rheda	400		300	779
Heitkamp	531		300	889
Züblin	280		300	727
SATO		300	300	857
FFYS		300	300	737
ATD		300	300	849
BTD	200		300	757
GETRAC		300	300	849
Lawn Track	300		300	635
FFC	273		300	605
INFUNDO	200		300	522

8 Zaključak

Primjenom modernih kolosiječnih konstrukcija osigurava se: stabilnost kolosijeka, preciznost geometrijskog oblika, udobnost vožnje, raspoloživost kolosijeka, dugi vijek trajanja te niska cijena održavanja tijekom eksploatacije. Uporabni vijek od najmanje 50 godina, s malo ili bez preventivnih i korektivnih radova, kolosijeci na čvrstoj podlozi pružaju veliku iskoristivost i učinkovitost kod pruga za velike brzine. Ova tehnologija osigurava i veliku dnevnu učinkovitost tako da se ovi kolosijeci sve više primjenjuju kod novogradnje i za veće rekonstrukcije postojećih kolosijeka. Područja su primjene kod kojih prednost ove tehnologije još nije iskorištena: nadogradnja i modernizacija već postojećih željezničkih pruga izvedenih s klasičnim kolosijekom, izgradnja novih glavnih željezničkih pruga za brzine do 230 km/h te razvoj željezničkih linija za teški teretni promet. Argumenti koji se i dalje znaju čuti protiv upotrebe tehnologije kolosijeka na čvrstoj podlozi kao zamjenske opcije

Tablica 2. Tehnička i ekonomska usporedba pojedinih tipova kolosijeka na čvrstoj podlozi [1]

Tip konstrukcije	Godina izgradnje	Brzina [km/h]	Debljina konstrukcije [cm]	Ocjena buke	Cijena izgradnje (EUR/m')	Dnevna učinkovitost [m]	Ocjena obnove
Rheda	1972	300	63	B	1198	172	C
Rheda - Berlin	1997	300	67	C	630	170	C
Züblin -pragovi	1988	300	60	B	550	200	B
Züblin BTE	1996	300	44	A	475	200	A
ATD	1993	300	70	B	600	200	B
BTD	1994	300	63	B	-	350	B
GETRAC	1995	300	72	B	625	270	B
SATO, FFYS	1984	200	61	B	600	350	A
Lawn Track	1998	160	80	B	-	-	-
Heitkamp	1998	160	78	C	-	200	C
FFC	1998	300	48	A	470	200	A
INFUNDO	1995	160	-	A	470	200	A

A - preporučuje se; B - zadovoljava; C - potrebno usavršiti sustav

Cijena izgradnje:

kolosiječna konstrukcija od gornjeg ruba stabiliziranoga nosivog sloja ili podnožja tunela ili potkonstrukcije mosta

Dnevna učinkovitost: podrazumijeva se osamsatno radno vrijeme

za klasične sustave za brzine do 230 km/h, u osnovi se odnosi na veći trošak početne investicije (20 do 40 %). Ti argumenti imaju odlučujuću ulogu ako se promatra kraće razdoblje. Takav pristup, međutim, ne uzima u obzir činjenicu da je uporabni vijek kolosijeka na čvrstoj podlozi produžen te da su troškovi održavanja sma-

njeni, kao i da će sveukupni troškovi nove željezničke pruge imati pozitivni učinak.

Ako se danas razmatra izgradnja kolosijeka, tada s ekonomskog i tehničkog aspekta kolosijeci na čvrstoj podlozi su inženjerski opravdani.

LITERATURA

- [1] Lichtberger, Bernhard: *Track Compendium*, Eurailpress, Hamburg, 2005., str. 309-332.
- [2] Bilow, David N., Randich, Gene M.: *Slab track for the next 100 years*, Portland Cement Association, 2000.
- [3] Subhash, C.S., Yogesh, V.: *Case Studies – High speed rail system (> 250km/h)*, Sr.Professional Course (P.Way), Session No. 721 (08.01.2007 to 09.01.2007).
- [4] UIC Infrastructure Commission, Civil Engineering Support Grup: Feasibility study „ballastless track“, 2002.
- [5] RTR Special – Maintenance & Renewal, Eurailpress, Hamburg, 2007., str. 76-78.
- [6] RTR Special - Slab track, Eurailpress, Hamburg, 2006.
- [7] Knittel, S., Schreiber, C.: *"Renovation of Railway Tunnels under Operation"*, RTR Special – Maintenance and Renewal, Eurailpress, Hamburg, 2007., str. 51-55
- [8] Siegmann, Jürgen: *Feste Fahrbahn:Weg zu einer wirtschaftlicheren Bahn?*, Braunschweig, 2005
- [9] Bachmann, Hans: *Modern Track Technologies State-of-the-Art*, The European Railway Review Conference, Manchester, 2003.
- [10] RHEDA 2000 – The ballastless track with concrete supporting layer, RAIL.ONE GmbH Pfleiderer track systems, Neumarkt, Germany, www.railone.com
- [11] On the track with Züblin, Ed. Züblin AG, Stuttgart, Germany, www.zueblin.de
- [12] GETRAC – The ballastless track system on asphalt, RAIL.ONE GmbH Pfleiderer track systems, Neumarkt, Germany, www.railone.com
- [13] FF BÖGL – Progress is built on ideas, Max Bögl Bauunternehmung GmbH & Co KG, Neumarkt, Germany, www.max-boegl.de
- [14] Beran Herbert: "Feste Fahrbahn" Lainzer Tunnel, Porr-Nachrichten, 153-2008, str. 40-41.
- [15] Darr, E., Fiebig, W.: *Feste Fahrbahn – Konstruktion und Bauarten für Eisebahn und Straßenbahn*, Eurail Press, Hamburg, 2006.
- [16] Esveld, Coenraad: *Modern railway track*, TU Delft, Netherlands, 2001., str. 231.-253.
- [17] Esveld, Coenraad: *Recent developments in slab track*, European railway review, 2003, str. 81-85.
- [18] Stipetić, A.: *Model željezničkog kolosijeka na čvrstoj podlozi u funkciji velikih brzina*, doktorska disertacija, Zagreb 1993.
- [19] Esveld, Coenraad: *SLAB TRACK: A Competitive Solution*, TU Delft, Netherlands, 1999.