

**Marc Demml**

Produktmanager
Stopfmaschinen,
Schotterpflüge
und Stabilisatoren,
Plasser & Theurer, Linz/Wien,
marc.demml@plassertheurer.com

**dr. sc. Christian Koczvara**

R&D Scientist, Abt.
Research und Simulation,
Plasser & Theurer, Linz,
christian.koczvara@plassertheurer.com

**dr. sc. Samir Omerović**

Simulationsingenieur, Abt.
Research und Simulation,
Plasser & Theurer, Linz,
samir.omerovic@plassertheurer.com

UDK: 625.1+502.17

1. Uvod

Metoda održavanja pruga prošla je dug put od ručne obrade uz korištenje vezica za spajanje tračnica pa do mehaničkog održavanja zavarenih tračnica bez rupa. Svaka komponenta kolosijeka prošla je temeljne promjene u skladu s iskustvima s pojedinačnim elementima kolosijeka i njihovim međudjelovanjima te prilagodbom lokalnim i vremenskim uvjetima. Taj proces promjena ni danas nije završen. Na kraju, ali ne manje važno, zbog trošenja i optimiranja komponenti neophodno je nastaviti znanstveno ispitivati predmetno područje.

2. Tehnološki razvitak podbijanja

Na samome početku zahtjevi za željezničke kolosijeke bili su vrlo jednostavni i bilo ih je vrlo lako zadovoljiti zbog malih brzina i malih masa prijevoznih sredstava. S porastom brzina i povećanjem opterećenja rastu i zahtjevi za kvalitetu kolosijeka kako bi se omogućio siguran i pouzdan željeznički prijevoz. Zbog toga su zahtjevi za održavanje koji se upu-

OD PIJUKA DO BEZEMISIJSKE MEHANIZACIJE ZA ODRŽAVANJE KOLOSIJEKA

Znanstveno utemeljena tehnologija podbijanja pokretač je inovacija u željezničkome sustavu. Razvoj željezničkih sustava uvjetuje pokretanje brojnih istraživanja i primjenu novih metodologija, a sve u cilju što bržeg, kvalitetnijeg i učinkovitijeg postizanja i zadržavanja projektirane kvalitete željezničkih elemenata i opreme. S obzirom na mjere zaštite okoliša, cilj je bio proizvesti mehanizaciju za održavanje pruga bez štetnih emisija.

ćuju prema upravitelju sve brojniji i postaju sve složeniji. Održavanje se danas provodi u puno kraćem roku s preciznom točnošću te pod utjecajem djelomične automatizacije, ekonomski isplativijom izvedbom i dodatno rastućim zahtjevom za strogim sekundarnim uvjetima u pogledu klimatske neutralnosti. Višestruko povećani zahtjevi mogu se zadovoljiti samo kroz opsežne istraživačke aktivnosti u kombinaciji sa suvremenim metodama simulacije. Područje istraživanja obuhvaća širok raspon istraživačkih područja koja se bave najnovijim dostignućima u senzorskoj tehnologiji, obradi podataka i znanosti o materijalima.

Sve do sredine četrdesetih godina prošlog stoljeća izrada potrebne kolosiječne geometrije bila je obilježena vrlo teškim fizičkim radom. Da bi se visina tračnice podesila, pod tračnicu su se postavljali se dizalica ili stroj za podizanje te se na taj način tračnica postavljala u konačan položaj. Tučenac se zatim što je moguće bolje uguravao ispod praga pajserom ili pijukom, ovisno o tome što je bilo učinkovitije (slika 1.). Za podešavanje smjera ko-

losijeka korišteni su tzv. okviri za rukanje (slika 2.). Takva je ručna obrada bila povezana s enormnim utroškom vremena, a i fluktuacije u kvaliteti konačne geometrije kolosijeka bile su znatne. Iako još uvijek postoje radovi koji se i danas uglavnom izvode ručno (npr. izmjena pojedinačnih pragova ili međuploča ispod tračnice), uređenje geometrije položaja i smjera kolosijeka uglavnom se obavlja strojevima za uređenje geometrije pruge. To je jedini način da se udovolji zahtjevima kvalitete geometrije kolosijeka koji su zahtjevniji zbog velikih brzina i osovinskih opterećenja.



Slika 2. Okvir za rukanje smjera kolosijeka, izvor: [10]



Slika 1. Ručno podbijanje, izvor: [10]

3. Prekretnice mehanizacije

Rast opsega željezničke industrije izravno je vezan uz razvoj i proizvodnju naprednih građevinskih željezničkih strojeva. Tek su ti strojevi omogućili mehaniziranje i automatiziranje pojedinih procesa, a kasnije i povezivanje gotovo svih potrebnih procesa u kompletne cjeline. Već u četrdesetim i pedesetim godinama prošlog stoljeća došlo je do revolu-



Slika 3. Jedna od prvih podbijačica Plasser & Theurer, izvor: [10]

cionarnog pomaka u uređenju kolosijeka, i to od prve mehaničke podbijačice i njezina daljnjeg razvoja do hidrauličnih podbijačica (slika 3.). Na taj se način podbijačice moglo izvoditi uz pomoć strojeva, što je olakšalo sam rad, ali i dovelo do porasta učinkovitosti u održavanju kolosijeka. Dodatni radovi poput dizanja i rukanja su se na početku izvodili ručno, točnije sve do početka šezdesetih godina prošlog stoljeća kada se podbijačice moglo opremiti agregatima za rukanje i dizanje te na taj način sve automatizirati. Daljnja prekretnica pojavila se prilikom opremanja podbijačica računalima za vođenje. Zahvaljujući korištenju računala za vođenje podbijačica „poznaje“ željenu geometriju kolosijeka te je može automatski uspostaviti koristeći agregate za dizanje i rukanje. Kroz sljedeća desetljeća kontinuirano su se razvijali radni agregati kako bi mogli kompletno samostalno strojno podbiti složene skretnice. Za dodatno podizanje učinka iskorištenosti energije i rada razvijen je kontinuirani rad strojeva. Za takav rad agregati stroja montirani su na njegov samonosivi dio (takozvani satelit), koji se neovisno o glavnome okviru stroja pomiče tijekom rada. Suprotno od cikličkoga načina rada, pri kojemu stroj cijelom dužinom ostaje stajati iznad mjesta rada i ponovno se mora pokrenuti, kod kontinuiranog načina rada stroj se cijelo vrijeme pomiče: dok podbijačica kao komplet kontinuirano vozi, satelit se koči i ubrzava kako bi se izbjeglo kočenje cijeloga stroja na mjestu rada dok radni agregati obavljaju svoj dio posla na mjestu rada. Uz očito povećanje razine učinkovitosti znatno je povećana udob-

nost posade stroja. Drugi razvojni korak bio je integracija dinamičkog stabilizatora kolosijeka [1]. On se koristi odmah nakon nabijanja i primjenjuje konstantno okomito opterećenje na rešetku kolosijeka kao i vibracije poprečno na smjer vožnje. Tom dodatnom obradom kolosijek se u cijelosti homogenizira u smislu zbijenosti i može se predvidjeti velik dio početnih slijeganja važnih za trajnu kvalitetu geometrije

kolosijeka. Osim toga svojstva poboljšana je čvrstoća kolosiječne rešetke i kolosijek se može koristiti bez ograničenja odmah nakon održavanja. Poboljšane tehnologije održavanja mogu znatno produljiti cikluse održavanja i time smanjiti ekološki otisak.

4. Primjena dekarbonizacije u održavanju kolosijeka: podbijanje bez emisija

Uz daljnji razvoj radnih agregata već nekoliko godina poseban je fokus na smanjenju ugljičnog otiska tijekom održavanja kolosijeka. Zbog toga je prvi put 2015. svijetu predstavljen Plasser & Theurov električni stroj za podbijanje (09-4X Dynamic E³). Sljedeći logičan korak bila je integracija daljnjih električnih pogona (npr. pogon podbijačkih agregata, stvaranje hidrauličkog tlaka) prema jednome sustavu: „Sve što se okreće pogoni se električnim putem“. Nakon toga uslijedio je razvoj sljedećih tipova strojeva na električni pogon [2]. Željeznički građevinski strojevi moraju se moći fleksibilno koristiti, čak i u područjima bez kontaktnog voda (nisu dostupni ili isključeni za rad na gradilištu). S tom namjenom strojevi za podbijanje na električni pogon često su opremljeni dodatnim konvencionalnim pogonom koji koristi motor s unutarnjim izgaranjem. Kako bi u budućnosti u cijelosti mogli biti odbačeni konvencionalni koncepti pogona, u fokus dolazi uporaba elektrokemijskih sustava za pohranu energije (baterije, gorive ćelije). To omogućuje rad i vožnju prugom u područjima bez dostupnoga kontaktnog voda.

4.1. Identifikacija i analiza važnih parametara

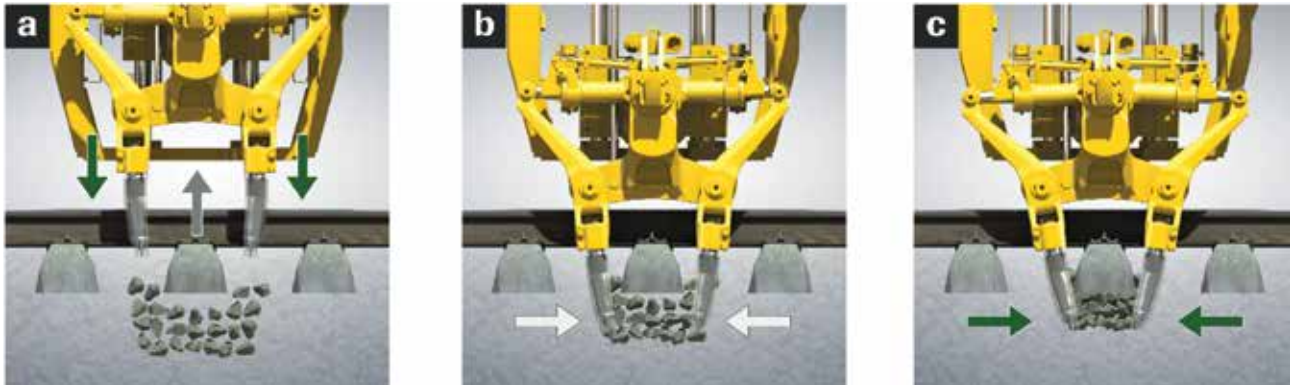
Uz smanjenje lokalno nastalih emisija postupnom elektrifikacijom u izgradnji željeznica odlučujuću ulogu ima i interval održavanja jer se troškovi održavanja mogu smanjiti duljim vijekom trajanja kolosijeka, što željeznički sustav čini još atraktivnijim. Kako bi dugotrajno dobro uporabno stanje kolosijeka moglo biti zajamčeno, bitno je proizvesti visokokvalitetnu kolosiječnu rešetku bez dodatnog opterećenja na kamen. Princip asinkronog podbijanja pod jednakim tlakom dokazana je tehnologija koja omogućuje najvišu kvalitetu podbijanja. Preko hidrauličkog cilindra na rame podbijača djeluje stalna sila. Podbijači za nabijanje koriste silu nabijanja kako bi kamen gurnuli ispod praga i u kombinaciji s vibracijom djeluju kao alat za popunjavanje i zbijanje. Frekvencija vibracija, amplituda vibracija, primijenjeni tlak stiskanja i odgovarajuće vrijeme stiskanja (vidi u nastavku) ključni su parametri koji imaju znatan utjecaj na rezultat podbijanja. Ti su parametri određivani empirijski tijekom desetljeća [3] i obično su navedeni u smjernicama željezničkih infrastrukturnih tvrtki. Tehnološki napredak u području mjerne tehnologije i metoda simulacije sada omogućuje još detaljniju analizu podbijanja.

4.2. Faze podbijanja

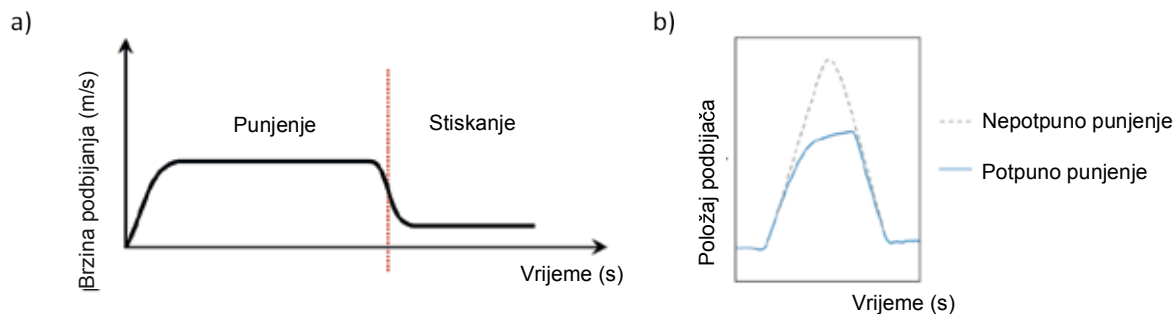
Za točan je pregled svrsishodno podijeliti postupak podbijanja u više faza, ovisno o izmjeni djelovanja agregata prema kamenu (slika 4.):

- dizanje/rukanje i prodiranje (slika 4. a)
- punjenje (slika 4. b)
- zbijanje (slika 4.c).

Prilikom postavljanja rešetke kolosijeka (podizanja i rukanja) izravno ispod pragova koje treba podbiti stvara se šupljina koja se mora ispuniti kamenom i zbiti tijekom naknadnog podbijanja. Zatrpavanje se izvodi dodatnim pomicanjem pojedinačnih podbijača tako da se kamen transportira iz međuprostora pragova u područje ispod praga. Preklapajuća vibracija od 35 Hz podbijača omogućuje potrebno zbijanje ispod praga. Hidrostatska napetost (sila sa svih strana) po završetku podbijanja posebno je korisna za najveću moguću podbijenost kamena.



Slika 4. a) Prag se podiže, a ispod praga nastaje prazan prostor. b) Stiskanjem se puni prazan prostor koji je nastao podizanjem praga. c) Zbijanje zbog djelovanja vibracija na kamen, izvor: [10]



Slika 5. a) Tok brzine podbijanja kod punjenja i stiskanja. b) Izmjeren pomak podbijanja za potpuno i nepotpuno punjenje, izvor: [10]

4.3. Punjenje: osnova za savršenu podlogu

Pravilno popunjavanje šupljine nastale postupkom podizanja i rukanja temelj je za dugotrajnu poziciju kolosijeka. Ako se nedovoljno popunjavanje ne otkrije, ne može se postići optimalna podbijenost (osobito u području neposredno ispod pragova, koje je tijekom normalnog rada izloženo najvećim opterećenjima). Rezultat je pojava individualnih pogrešaka.

Neodgovarajuće popunjavanje može biti posljedica visokih vrijednosti dizanja, kratkog vremena stiskanja, nedovoljne količine kamena među pragovima ili na mjestima gdje već postoje prazna mjesta. Standardi i smjernice željezničkih infrastrukturnih poduzeća, koji reguliraju minimalne vrijednosti vremena podbijanja ili višestruko podbijanje kod određenih vrijednosti dizanja, smanjuju rizik pojave pojedinačnih pogrešaka koje nastaju zbog nedovoljnog zatrpavanja. Međutim, ne mogu ih spriječiti u cijelosti.

Princip asinkronog podbijanja pod jednakim tlakom ima posebnu prednost.

Zahvaljujući unaprijed definiranoj sili stiskanja, kretanje ramena podbijača potpuno se automatski prilagođava okolnostima. To se može objasniti na sljedeći način: sve dok šupljina nije potpuno ispunjena kamenom, otpor je nizak. Uz unaprijed definiranu konstantnu silu to dovodi do veće brzine podbijanja. Ako je šupljina ispunjena, povećava se otpor i usporava podbijanje (slika 5.a). Kao rezultat put podbijanja uvijek se automatski prilagođava nastaloj šupljini. Osim toga tim se principom postiže podbijanje koji ne šteti kamenu (konstantna kvazistatička sila podbijanja). Nekoliko istraživačkih projekata dokazalo je dugovječnost geometrije kolosijeka postignute tom tehnologijom [4] [5].

Kako bi se dodatno optimirala ionako visoka kvaliteta podbijanja i kako bi se izbjegle pojedinačne pogreške, Plasser & Theurer je u suradnji sa sveučilištima i infrastrukturnim operatorima širom svijeta razvio sustav koji nadzire i ocjenjuje proces pozicioniranja svakog ramena podbijača zasebno – Plasser TampingControl. Na temelju tih analiza može se izvesti karakteristična vrijednost za punjenje.

Na slici 5. b prikazan je primjer kretanja podbijanja s potpunim ili nepotpunim punjenjem. Ako se tijekom podbijanja otkrije nepotpuno punjenje, rukovatelj strojem upozorava se na njegovu pojavu te se stvaranje šupljih prostora ispod pragova može spriječiti dodatnim podbijanjem kako bi se dodatno poboljšalo kvalitetu podbijanja.

4.4. Stiskanje: osnovni uvjet za stabilan položaj kolosijeka

Kako bi se što dulje zadržao što precizniji položaj kolosijeka, tijekom faze podbijanja mora se postići visoka (potpuna) zbijenost. To se postiže stiskanjem i preklapajućom vibracijom od 35 Hz s amplitudom od četiri do pet milimetara. Nekoliko je ispitivanja pokazalo da te postavke dovode do povremenog gubitka kontakta između podbijača i okolnoga kamena (tzv. matrica kamena) [6] [7]. To omogućuje kratkotrajno kretanje pojedinačnih komada kamena, a zauzvrat preslagivanje i učinkovito zbijanje.

Maksimalno moguće stiskanje na svakome pragu uvijek je bolje od sažimanja na

određenu ciljnu vrijednost. To se temelji na činjenici da sljedeće standardno opterećenje od prometa vlakova uvijek dovodi do naknadnog zbijanja balasta. Ako se ta zbijenost što potpunije predvidi nabijanjem (i upotrebom dinamičkog stabilizatora kolosijeka), smanjuje se i slijeganje uzrokovano prometnim opterećenjem, a geometrija kolosijeka ostaje dugotrajnija. Nasuprot tomu, kada postoji podbijanje prema ciljanoj vrijednosti, zbog prometa vlakova dolazi do veće naknadne kompresije, što također dovodi do većeg slijeganja prilikom korištenja.

4.5. Metode simulacije za optimiranje podbijanja

Plasser & Theurer neprestano radi na optimiranju podbijanja te pritom primjenjuje najnovije metode simulacije. Na primjer, utjecaj amplitude vibracija i frekvencije vibracija na ostvarivu podbijenosti ispitivan je pomoću DEM-a (metoda diskretnih elemenata). U tu je svrhu virtualno reproduciran pokus [3] poznat iz osamdesetih godina prošlog stoljeća. Rezultati dobiveni u to vrijeme mogli su se reproducirati primjenom DEM simulacije [8]. Posebne prednosti takvih virtualnih eksperimenata leže u mogućnosti testiranja širokih ras-

pona parametara na relativno jednostavan način. Točno reproducirana početna situacija može se koristiti uvijek iznova. Na taj se način obećavajući parametri mogu odabrati i testirati u praksi tijekom kasnijih testova na terenu.

Još jedna prednost DEM-a jest mogućnost virtualnog pogleda unutar zastora. Na slici 6. prikazani su raspodjela sile pod prometnim opterećenjem na donjoj strani praga i putanja sile unutar matrice zastora kao funkcija vremena podbijanja. Jasno se može vidjeti da je veća vjerojatnost da će prag biti podložan točkastome opterećenju ako je vrijeme podbijanja vrlo kratko (0,6 s) (slika 6.a – područja obojana crvenom bojom). S vremenom podbijanja od 1,2 sekunde vidljiva je homogenija raspodjela opterećenja sa znatno nižim vrhovima naprezanja. Daljnje produljenje vremena podbijanja ima samo slabiji učinak.

Slično se ponašanje može uočiti i u raspodjeli sile unutar matrice zastora. S kraćim vremenima podbijanja vidljiva je jasna akumulacija visokih kontaktnih sila u matrici zastora (slika 6. b – crvene linije). Dulje vrijeme podbijanja od 1,2 sekunde pokazuje znatno manje opterećenje pojedinačnoga kamena zastora. Iz tog se može zaključiti da prekratko vrijeme podbijanja dovodi do većeg opterećenja zastora tijekom redovitoga rada. Rezultat je ubrzano starenje zastora zbog veće vjerojatnosti loma zrna kamena pod utjecajem prometa i skraćenog vijeka trajanja kolosiječne rešetke jer vršci sile mogu dovesti i do većeg slijeganja [9]. Informacije koje se mogu dobiti iz takvih računalnih eksperimenata često nisu dostupne u konvencionalnim terenskim testovima ili se mogu izmjeriti samo uz veliki napor.

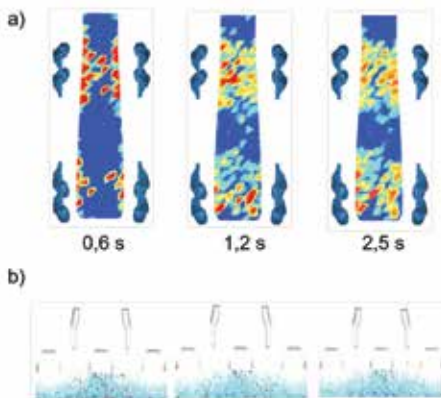
5. Zaključak

Zbog klimatskih je promjena željeznički sustav, uzor ekološki prihvatljivog prijevoza ljudi i robe kao ni jedno drugo prijevozno sredstvo, godinama sve više u fokusu politike i društva. Buduća dodatna ulaganja neizbježno će dovesti do povećanja broja mjera koje se primjenjuju prilikom radova na održavanju i izgradnji. Te mjere održavanja imaju prilično po-

dređenu ulogu u javnoj percepciji. Kao što je već opisano, u području održavanja kolosijeka bilo je nekoliko razvojnih faza. Razvoj je krenuo od uglavnom ručnog upravljanja, a zatim je u nekoliko faza pod premisom ekonomičnosti i učinkovitosti doveo do povećanja opsega mehanizacije i automatizacije. Iduće je doba već stiglo, a jedan je od novih prioriteta drastično smanjenje štetnih emisija. Tvrtka Plasser & Theurer oslanja se na sve veći raspon električnih strojeva. Osim što se koriste bez emisija, imaju prednost zbog znatno niže razine onečišćenja bukom, što je osobito povoljno u urbanim područjima. Istodobno su važni ciljevi smanjenje količine posla (i troškova) i povezano produljenje intervala održavanja. Konkretno, intenzivno iskorištena infrastruktura i kraće zatvaranje pruga zahtijevaju daljnje optimiranje mjera održavanja. Kako bi kontinuirano razvijala podbijanje, tvrtka Plasser & Theurer godinama intenzivno surađuje sa sveučilištima i operatorima infrastrukture. Znanstvena saznanja stečena u sklopu tih projekata objavljuju se u stručnim časopisima i ugrađuju u razvoj proizvoda. Cilj je razviti još učinkovitije strojeve kako bi ekološki otisak održavanja pruge bio nizak i kako bi se smanjili troškovi za operatora.

LITERATURA

- [1] S. Feurig; W. Stah.; S. Freudenstein; B. Antony; F. Auer. 2020. Der dynamische Gleisstabilisator (DGS) auf dem Prüfstand. *Eisenbahntechnische Rundschau*, br. 5.
- [2] R. Hauke; H. Steinwenker; J. Rebeck. 2017. E³ – elektrisierende Technologie für Gleisbaumaschinen. *Eisenbahningenieur*, br. 12.
- [3] J. Fischer. 1983. *Einfluss von Frequenz und Amplitude auf die Stabilisierung von Oberbauschotter*. disertacija.
- [4] M. Fellinger. 2016. *Validierung der Instandsetzungsmengen der Standardelemente Gleis der ÖBB* (Master Thesis). Graz.
- [5] F. Auer; R. Schilder; M. Zuzic; H. Breyermann. 2008. 13 years of experience with



Slika 6. a) Raspored opterećenja na donjemu dijelu praga (crveno: maksimalno opterećenje). Jasno se vidi da prekratko vrijeme podbijanja (0,6 s) dovodi do znatno smanjene nosive površine pragova. Pod utjecajem prometa povećava se opterećenje zrna, što posljedično dovodi do povećanog lomljenja zrna. b) Putovi prijenosa opterećenja u matrici zastora. Crvene linije prikazuju područja pod velikim opterećenjem kao rezultat prometa: opasnost od lomljenja zrna, izvor: [10]

rail-mounted formation rehabilitation on the Austrian network. rtr. br. 1.

- [6] O. Barbir. 2022. *Development of Condition-Based Tamping Process in Railway Engineering*. disertacija. Beč.
- [7] O. Barbir; D. Adam; F. Kopf; J. Pistor; F. Auer; B. Antony. 2018. Development of condition-based tamping process in railway engineering. *Repair and Maintenance Strategies of Geotechnical Structures*, br. 2.
- [8] S. Omerović; C. Koczwar; H. Daxberger; B. Antony; F. Auer. 2021. Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode im Eisenbahnbau. *Eisenbahningenieur*, br. 7.
- [9] O. Barbir; S. Omerović; C. Koczwar; B. Antony. 2023. Von der Idee zum Produkt: Digitale Produktentwicklung im Bahnbau. *Eisenbahningenieur Kompodium*.
- [10] Plasser & Theurer, Export von Bahnbaumaschinen, Gesellschaft M.B.H.)

SAŽETAK

OD PIJUKA DO BEZEMISIJSKE MEHANIZACIJE ZA ODRŽAVANJE KOLOSIJEKA

Rast opsega željezničke industrije izravno utječe na razvoj i proizvodnju modernih građevinskih željezničkih strojeva. Tako su se za održavanje kolosijeka provodila istraživanja u cilju stvaranja automatiziranih strojeva koji omogućuju brzo i kvalitetno održavanje pruge uz što kraće prekide željezničkog prometa i uz, naravno, što nižu cijenu održavanja. S obzirom na to da se željeznički promet smatra zelenim, ekološkim, osviještenom vrstom prometa, važno je razvijati i zelene oblike održavanja željezničkih sustava. Tako je i nastala ekološka mehanizacija za održavanje kolosijeka bez emisija štetnih za okoliš.

Ključne riječi: kolosijek, strojevi, održavanje, zaštita okoliša

Kategorizacija: Stručni rad

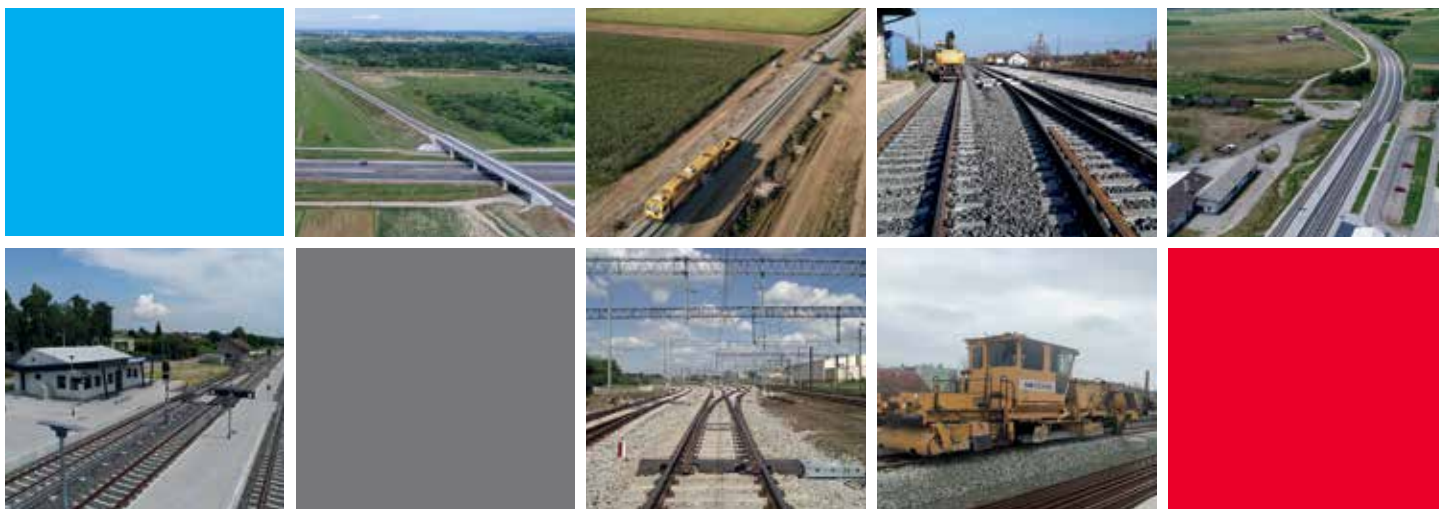
SUMMARY

FROM PICKS TO EMISSION-FREE MACHINERY FOR RAILWAY TRACK MAINTENANCE

The growth of the scale of the railway industry directly affects the development and production of modern construction railway machinery. So, for a railway track maintenance, research was carried out with the aim of creating automated machines that enable fast and high-quality track maintenance with the shortest possible interruptions of the rail traffic and, of course, with the lowest possible cost of the maintenance. Considering that railway transport is a green, ecological, conscious type of transport, it is important to develop a green types of maintenance for railway infrastructures system. That is how it was created the ecological mechanization for railway track maintenance without emissions damaging or the environment.

Key words: Railway track, machinery, maintenance, environmental protection

Categorization: professional paper



U službi najboljih infrastruktura
u Hrvatskoj



Gradimo održivu
budućnost

Brazil | Danska | Hrvatska | Kolumbija | Letonija | Litva | Meksiko
Peru | Portugal | Španjolska | Švedska | Urugvaj

www.comsa.com