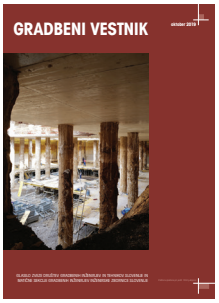
GRADBENI VESTNIK

oktober 2019

GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE IN
MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKE ZBORNICE SLOVENIJE

Poštnina plačana pri pošti 1102 Ljubljana



Gradbeni vestnik • GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKE ZBORNICE SLOVENIJE

UDK-UDC 05 : 625; tiskana izdaja ISSN 0017-2774; spletna izdaja ISSN 2536-4332.

Ljubljana, oktober 2019, letnik 68, str. 233-256

Izdajatelj:
Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200; faks 01 52 40 199 v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (MSG IZS),** ob podpori **Javne agencije za raziskovalno dejavnost RS, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Fakultete za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:
ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**, predsednik
Dušan Jukić
prof. dr. Matjaž Mikoš
IZS MSG: **Gorazd Humar**
Ana Brunčič
dr. Branko Zadnik
UL FGG: **izr. prof. dr. Sebastjan Bratina**
UM FGPA: **doc. dr. Milan Kuhta**

Glavni in odgovorni urednik:
prof. dr. Janez Duhovnik

Lektor:
Jan Grabnar

Lektorica angleških povzetkov:
Romana Hudin

Tajnica:
Eva Okorn

Oblikovalska zasnova:
Mateja Goršič

Tehnično urejanje, prelom in tisk:
Kočevski tisk

Naklada:
500 tiskanih izvodov
3000 naročnikov elektronske verzije

Podatki o objavah v reviji so navedeni v bibliografskih bazah COBISS in ICONDA (The Int. Construction Database) ter na

http://www.zveza-dgits.si.

Letno izide 12 številk. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 23,16 EUR; za študente in upokojence 9,27 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 171,36 EUR za en izvod revije; za naročnike iz tujine 80,00 EUR. V ceni je vštet DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:
SI56 0201 7001 5398 955

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
3. Članki (razen angleških povzetkov) in prispevki morajo biti napisani v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnim presledkom med vrsticami.
5. Prispevki morajo vsebovati naslov, imena in priimke avtorjev z nazivi in naslovi ter besedilo.
6. Članki morajo obvezno vsebovati: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); znanstveni naziv, imena in priimke avtorjev, strokovni naziv, navadni in elektronski naslov; oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; ključne besede v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; ključne besede (key words) v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ... naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so ti označeni še z A, B, C itn.
7. Poglavja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavja se oštevilčijo brez končnih pik. Denimo: 1 UVOD; 2 GRADNJA AVTOCESTNEGA ODSEKA; 2.1 Avtocestni odsek ... 3 ...; 3.1 ... itd.
8. Slike (risbe in fotografije s primerno ločljivostjo) in preglednice morajo biti razporejene in omenjene po vrstnem redu v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino.
9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
10. Kot decimalno ločilo je treba uporabljati vejico.
11. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki oglatih oklepajev: (priimek prvega avtorja ali kratica ustanove, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja ali ustanove morajo biti označena še z oznakami a, b, c itn.
12. V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela razvrščena po abecednem redu priimkov prvih avtorjev ali kraticah ustanov in opisana z naslednjimi podatki: priimek ali kratica ustanove, začetnica imena prvega avtorja ali naziv ustanove, priimki in začetnice imen drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
13. Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani od do; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.
14. Prispevke je treba poslati v elektronski obliki v formatu MS WORD glavnemu in odgovornemu uredniku na e-naslov: janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si. V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

Uredništvo

Vsebina • Contents

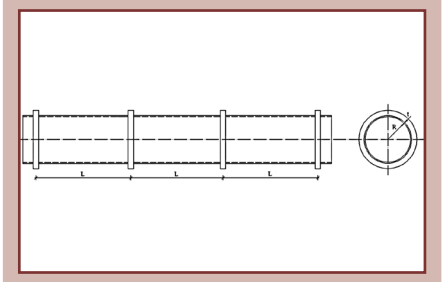
Jubilej

stran **234**
100 LET FAKULTETE ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO UNIVERZE V LJUBLJANI

Članki • Papers

stran **238**
izr. prof. dr. Stane Božičnik, univ. dipl. ekon.
doc. dr. Mojmir Uranjek, univ. dipl. inž. grad.
prof. dr. Andrej Štrukelj, univ. dipl. inž. grad.
doc. dr. Iztok Peruš, univ. dipl. inž. grad.
O PROBLEMATIKI BETONSKIH ŽELEZNIŠKIH PRAGOV V SLOVENIJI
ON THE ISSUES OF CONCRETE RAILWAY SLEEPERS IN SLOVENIA

stran **246**
prof. dr. Stojan Kravanja, univ. dipl. inž. grad.
doc. dr. Tomaž Žula, univ. dipl. inž. grad.
OPTIMIZACIJA JEKLENEGA VISOKOTLAČNEGA CEVOVODA Z OJAČITVAMI
OPTIMIZATION OF A STEEL PIPE WITH STIFFENER RINGS FOR HIGH-PRESSURE PENSTOCK



Novi diplomanti

Eva Okorn

Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Gradnja podzemnih etaž Centra Šumi v Ljubljani od zgoraj navzdol, foto Blaž Budja, univ. dipl. inž. arh.

100 LET FAKULTETE ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO UNIVERZE V LJUBLJANI

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani je 12. septembra 2019 s slavnostno akademijo v Linhartovi dvorani Cankarjevega doma v Ljubljani zaznamovala 100-letnico svojega delovanja. Fakulteta je začela delovati ob ustanovitvi ljubljanske univerze. Regent Aleksander I. Karadžordžević je 23. julija 1919 podpisal Zakon o Univerzi v Ljubljani. Takrat je bilo z zakonom ustanovljenih tudi pet fakultet na Univerzi, med katerimi je bila Tehniška fakulteta s študijem gradbeništva in geodezije oziroma zemljemerstva.

Med številnimi udeleženci akademije so bili ugledni gosti iz Slovenije in tujine – med njimi vodja Predstavništva Evropske komisije v Sloveniji dr. Zoran Stančič ter dobitniki jubilejnih nagrad ob 100-letnici fakultete. Akademijo sta vodila Maša Tiselj in Mišo Mićić, za glasbeno spremljavo akademije je poskrbel godalni kvartet Al Fine, ki je za uvod zaigral univerzitetno himno Gaudeamus igitur, skladbo Libertango pa je zatem zaigral fakultetni trio.

• **Fakultetni trio – prof. Janko Logar, prof. Vlatko Bosiljkov in študent UL FGG Žiga Vehovec igrajo skladbo Libertango.**

Sledil je nagovor dekana prof. dr. Matjaža Mikoša:

Cenjeni gospod rektor Univerze v Ljubljani, prof. dr. Igor Papič, spoštovane dekanje in cenjeni dekani fakultet in akademij Univerze v Ljubljani, spoštovani vodja Predstavništva Evropske komisije v Sloveniji dr. Zoran Stančič, spoštovani visoki gostje iz tujine in domovine, spoštovani sodelavci in sodelavke ter spoštovani študentje Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, dame in gospodje, prijatelji,

v čast in veliko osebno zadovoljstvo mi je, da lahko nagovorim ta današnji slavnostni zbor kot dekan Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, ki letos slavi 100-letnico svojega delovanja kot ena od naslednic Tehniške fakultete, ustanovne članice Univerze v Ljubljani.

Praznovanje 100. obletnice obstoja ustanove je gotovo primeren trenutek za pogled v preteklost, za premislek o prehojeni poti in tudi priložnost, da se ustanova zahvali posameznikom in ustanovam, za katere meni, da so pomembno prispevali k njenemu razvoju, pomenu, uveljavitvi in prepoznavnosti.

Današnja slavnostna akademija je namenjena tej obveznosti, ki je manj obvezujoča, kot se morda dozdeva opazovalcem s strani, in je predvsem zavezujoča, da nadaljujemo tradicijo preteklih desetletij in tudi sami prispevamo svoj del k razvoju fakultete.

Danes bomo o preteklosti slavljenca, to je o Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, še govorili, preteklost si bomo skupaj ogledali v sliki in besedi na platnu za menoj. Svoje misli ob tem slavnostnem trenutku bi rad bolj usmeril v prihodnost, v njene izzive in priložnosti, ki ležijo pred nami. A beseda ali dve o preteklosti ne škodita.

Za vso preteklo pot fakultete, vseh 100 let naše zgodovine, so zaslužni vsi njeni nekdanji zaposleni in vsi študentje, ki so – eni manj, drugi bolj – uspešno končali študijsko pot na njej. Nikoli nismo veljali za fakulteto, ki bi omogočala lahko pot do poklica. Spreminjale so se tudi povezave fakultete, nekaj let tudi zunaj objema Univerze v Ljubljani, kot del samostojne Tehniške visoke šole. Četrt stoletja je že tudi mimo, odkar vzporedno delujemo z arhitekti kot dve samostojni fakulteti. Današnja slovesnost je gotovo v veliki meri tudi njihova, lahko smo ponosni na skupno prehojeno pot.

Za nami na fakulteti je preko 36000 dni zgodovine, kar je več, kot je globina Marianskega jarka v Tihem oceanu, merjena v čevljih. A ker smo se v preteklosti več vzpenjali kot potapljali v problemih, smo se slikovito zapisano že vzpeli na Mount Everest – na Čomolungmo, na najvišjo goro, če jo merimo od morske gladine na celinah. S čim lahko dokažemo to svojo smelo trditev, da smo bili v svojem razvoju uspešni?

Meril in kazalnikov je veliko, in vsak si izbere tiste, ki so zanj ugodni. Lahko se pohvalimo z več kot 8000 diplomanti vseh stopenj in smeri študija. Skupaj z njimi smo v preteklosti reševali najtežje probleme države, v kateri smo bili tisti trenutek. A nismo se ustavili le pri tem, z različnimi aktivnostmi smo posegali v mednarodni prostor – tako z uspešnim delom diplomantov v mednarodni delitvi dela, objavami v prestižnih revijah, kot sta Sci-

• Udeležence akademije je najprej nagovoril dekan UL Fgg prof. dr. Matjaž Mikoš.

• Slavnostni govornik na akademiji prof. dr. Igor Papič, rektor UL.

ence in Nature, izdajo knjig pri mednarodnih založbah, kot je Springer, izvolitvijo v mednarodne znanstvene akademije, delom v uredniških odborih mednarodno prepoznavnih znanstvenih revij, izvolitvijo na odgovorna mesta v mednarodnih strokovnih združenjih, visoko citiranostjo svojih raziskovalnih dosežkov. Mednarodne primerjave univerz so hit zadnjega desetletja – tako zadnja razvrstitev najstarejše Šanghajske lestvice fakulteto na področju gradbenega inženirstva recimo uvršča med 300 najboljših na svetu, postavlja jo ob bok sorodnim fakultetam na tehniških univerzah v Münchnu, Pragi in na Dunaju, in če verjamemo tem primerjavam, nismo na tej fakulteti nič slabši na področju gradbeništva od Univerze v Oxfordu.

Bodi dovolj o preteklosti in zgodovini, ki je nedvomno bogata in neponovljiva. O sedanjem trenutku bi lahko povedali marsikaj, a naj slavnostna akademija raje upre svoj pogled v prihodnost, v izzive, ki so pred nami in našimi otroki.

Živimo v začetku 21. stoletja, ko se želimo razviti v družbo znanja in v brezogljično družbo. Podnebnim spremembam se bomo morali prilagajati, pa če je to predsedniku do sedaj najmočnejše države na svetu všeč ali ne.

Multilateralizem v svetovni politiki se umika iskanju novega ravnotežja z drugimi centri moči. Evropa izgublja tla pod nogami in išče svojo identiteto. Ali naj fakulteta le nemo spremlja ves ta razvoj?

Gotovo ne, to ni naše poslanstvo, to ne more biti del naše vizije. Vsak od nas kot posameznik mora v sebi iskati odgovore na omenjene izzive in fakulteta mora delovati v dobro človeštva in skupnosti, v kateri živi in deluje.

Pozivam vse zaposlene na fakulteti, da v programe, ki jih izvajamo, in v svoje vsakodnevno delo zavestno in odločno umeščamo znanja, ki vodijo v razreševanje skupnih perečih problemov in izzivov. Prenovimo programe, da bodo zanimivi za mlade generacije, prenovimo pedagoške prijeme in način dela s študenti.

Naj bo praznovanje 100-letnice tisti trenutek, ko bomo s skupno energijo in zavedanjem pripadnosti fakulteti in akademski skupnosti na Univerzi v Ljubljani, z zavedanjem o zgodovinski prehojeni poti fakultete, zmogli korak k dvigu kakovosti poučevanja in raziskovanja. To je naša moralna dolžnost.

Povečajmo svojo odprtost v svet, ohranimo in bogatimo slovenski jezik, povečajmo svoja znanja in izkušnje v sodelovanju z gospodarstvom in tujino ter umestimo gradbeništvo, geodezijo, vodarstvo, stavbarstvo, okoljsko inženirstvo, prostorsko načrtovanje – celotno grajeno okolje, ki ga soustvarjamo, v napore za vzdržni razvoj, krožno gospodarstvo, pametna in varna mesta, v industrijo 4.0, v družbo 5.0.

Naše poslanstvo v družbi je jasno, naša odgovornost tudi – in ta je hkrati tudi naša zaveza, da naj fakulteta v večji meri sodeluje pri vseh razvojnih odločitvah te države in obenem bogati zakladnico svetovnega znanja. To ni lahko, je odgovorno in včasih naporno.

Akademska svoboda, ki jo uživamo kot del Univerze v Ljubljani, naj nas osebno bogati, in to vračajmo s predanim delom za mlade in za družbo, v kateri delujemo. Potem lahko tudi pričakujemo in zahtevamo, da se v družbi in predvsem v politiki slišita naš glas in naša misel.

Čestitam vsem nekdanjim zaposlenim, vsem aktivnim sodelavcem, vsem diplomantom in študentom Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Vsem nam želim uspešno nadaljnje delo, fakulteti pa rast in prepoznavnost.

Naj vsem prisotnim današnja slavnostna akademija ob 100-letnici Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani ostane v prijetnem spominu. Vsem gostom se iskreno zahvaljujem, da ste se odzvali našemu vabilu in s svojo prisotnostjo počastili ta slavnostni trenutek.

Vivat academia, vivant professores!

Za njim je udeležence nagovoril rektor Univerze v Ljubljani prof. dr. Igor Papič.

V svojem nagovoru je poudaril vlogo oziroma pomen fakultete in njenega delovanja tako z znanstvenoraziskovalnega in razvojnega vidika kot z vidika vpliva na gospodarstvo ter splošen razvoj družbe.

Fakulteta je ob 100-letnici podelila jubilejna priznanja posameznikom in institucijam za izjemen dolgoletni prispevek k razvoju fakultete, njeni uveljavitvi v Sloveniji in tujini ter za vrhunske izjemne dosežke pri raziskovalnem, razvojnoraziskovalnem ali pedagoškem delu na področjih delovanja fakultete.

Dobitniki jubilejne zlate plakete, ki so izjemno prispevali k razvoju in prepoznavnosti fakultete in univerze na mednarodni ravni, so:

- akademik prof. dr. Peter Fajfar, upokojeni profesor UL FGG
- prof. dr. Miran Saje, zaslužni profesor UL FGG
- prof. dr. Rudi Rajar, zaslužni profesor UL FGG
- prof. dr. Andrej Pogačnik, upokojeni profesor UL FGG
- prof. dr. Erik Stubkjær, Univerza v Ålborgu, Danska
- Tehniška univerza na Dunaju (Technische Universität Wien)
- Tehniška univerza München (Technische Universität München).

Za izreden prispevek k razvoju in prepoznavnosti fakultete ter stroke smo ob tej priložnosti podelili tudi srebrne plakete. Dobitniki jubilejnih srebrnih plaket so:

- Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije za znanost in umetnost (ZRC SAZU),
- Geodetski inštitut Slovenije,
- Javni raziskovalni zavod Hidroinštitut,
- Cinkarna Celje,
- izr. prof. dr. Anton Prosen,
- inž. Marjan Jenko in
- mag. Marko Cvikl.

Povzemamo kratke utemeljitve nagrad, ki so bile podeljene gradbenikom in ustanovi na področju gradbeništva:

akad. prof. dr. Peter Fajfar, upok. prof. UL FGG (zlata plaketa)

Akademik prof. dr. Peter Fajfar je prejel zlato plaketo ob 100-letnici UL FGG za svoje izjemne dosežke na raziskovalnem, pedagoškem in strokovnem področju. Peter Fajfar je v začetku 70. let zaoral v ledino potresnega inženirstva kot nove znanstvene discipline v Sloveniji, samostojno in daleč od svetovnih centrov. Kljub temu se je v pičlih desetih letih prebil v sam svetovni vrh in s tem odprl številne poti in priložnosti naslednjim generacijam raziskovalcev na tem področju in dal neizmerni prispevek k prepoznavnosti fakultete v svetovnem merilu. Lahko trdimo, da je utemeljil sodobno potresno inženirstvo v Sloveniji in odločilno prispeval, da se je ta veja znanosti povzpela v najožji evropski in svetovni vrh. Njegov najpomembnejši znanstveni dosežek je formulacija nelinearne potisne metode za potresno analizo N2. Ta metoda predstavlja pomemben mejnik v razvoju potresnega inženirstva v svetu, saj v veliki meri odpravlja temeljno kontradikcijo potresnega inženirstva, kjer se je izrazito nelinearen dinamičen odziv zaradi prevelike zahtevnosti nelinearnih metod desetletja analiziral z nepopolnimi elastičnimi modeli. Vključena je v večino sodobnih standardov.

Njegovo raziskovalno delo dosega najvišjo stopnjo odmevnosti, saj je med najbolj citiranimi znanstveniki na področju potresnega inženirstva na svetu. Rezultate svojih raziskav je z odličnimi predavanji prenašal na generacije študentov gradbeništva in pri tem z velikim inženirskim občutkom odločilno prispeval k visokemu nivoju stroke v Sloveniji. Vzgojil je številne generacije doktorskih študentov, ki so ustvarili izjemne poklicne kariere in so zasedli pomembne položaje v stroki in družbi. K prepoznavnosti in uveljavljenosti UL FGG v mednarodnem prostoru in v Sloveniji je prispeval kot dekan UL FAGG med letoma 1985 in 1987 ter dolgoletni predstojnik IKPIR in KKPI.

Peter Fajfar je dolgoletni član SAZU. Leta 2015 je bil nagrajen s Zoisovo nagrado za življenjsko delo.

prof. dr. Rudi Rajar, zaslužni profesor UL FGG (zlata plaketa)

Prof. dr. Rudi Rajar je prejel zlato plaketo ob 100-letnici UL FGG za izjemen prispevek k razvoju fakultete, njeni uveljavitvi in ugledu v Sloveniji in v tujini ter izjemen odnos do mlajših zaposlenih sodelavcev in študentov. Je redni profesor za področje hidromehanike in hidravlike nestalnega toka ter zaslužni profesor Univerze v Ljubljani. Ves čas svojega aktivnega obdobja na UL FGG je posvetil znanstvenoraziskovalnemu delu na področju matematičnega modeliranja hidrodinamičnih, transportno-disperzijskih in biokemičnih procesov v površinskih vodah rek, jezer in morij. V mednarodnem prostoru se je še posebej uveljavil pri proučevanju valov zaradi morebitne porušitve pregrad, o čemer pričajo odmevni članki in vabljena predavanja na tujih univerzah. Novosti iz svojega raziskovalnega dela je ves čas prenašal v pedagoški proces, kjer je na podiplomskem študiju vpeljal in predaval dva nova predmeta, Inženirsko modeliranje naravnih procesov ter Matematični modeli in turbulenca. Bil je nosilec številnih organizacijskih funkcij na fakulteti: predstojnik Katedre za mehaniko tekočin z laboratorijem, predsednik študijskega odbora Oddelka za gradbeništvo, predsednik raziskovalnega odbora Oddelka, predstojnik Hidrotehnične smeri ter dolgoletni predstojnik podiplomskega študija Hidrotehnične smeri gradbeništva. Tudi po svoji upokojitvi še vedno intenzivno sodeluje z mlajšimi sodelavci, ki jih je kot široko razgledan in spoštovan mentor pravočasno vzgojil v svojem aktivnem obdobju na UL FGG.

prof. dr. Miran Saje, zasl. prof. UL FGG (zlata plaketa)

Prof. dr. Miran Saje je s svojim predanim pedagoškim delom, izjemno mednarodno široko odmevno raziskovalno dejavnostjo ter skrbjo za študente in raziskovalni naraščaj pomemb-

no prispeval k razvoju in ugledu Univerze v Ljubljani. Učil je številne predmete mehanike in pri vseh predmetih pustil neizbrisen pečat. Študenti ga poznajo po izredni skrbnosti in urejenosti predavanj. Pripravil je številna učna gradiva, med njimi štiri univerzitetne učbenike. Kot mentor je usmerjal delo pri dvanajstih zelo uspešnih doktoratih.

Bil je pionir na področju uporabe nelinearne mehanike pri modeliranju in analizi konstrukcij na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Plod njegovega poglobljenega znanstvenega dela so širitev znanja na področju nelinearne mehanike, številni izvirni računski postopki in algoritmi ter računalniški programi za analizo konstrukcij. Prispeval je pomembna in široko odmevna znanstvenoraziskovalna in aplikativna dela s področja termomehanske analize prostorskih armiranobetonskih okvirnih konstrukcij in nelinearne dinamične analize konstrukcij. Raziskovalne rezultate je objavil v več kot 95 člankih v priznanih mednarodnih revijah z visokim faktorjem vpliva. V uglednih mednarodnih revijah najdemo več kot 1300 citatov njegovih objav.

Delo prof. dr. Mirana Sajeta je izrednega pomena za Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo ter Univerzo v Ljubljani kot celoto. Njegovi dosežki so prepoznani in cenjeni med študenti, pedagogi in raziskovalci in dosegajo visoko mednarodno odmevnost.

mag. Marko Cvikl, univ. dipl. inž. grad.
(srebrna plaketa)

Magister Marko Cvikl je odličen primer prenosa znanja s fakultete v prakso in vračanja znanj iz prakse v pedagoški proces. Dolgoletno vodenje javnega podjetja Vodovod – kanalizacija v Celju, delo v Gospodarski zbornici Slovenije oz. Zbornici komunalnega gospodarstva ter ne nazadnje prepoznavanje novih zahtev časa in zato uspešna gradnja vodne infrastrukture s precejšnjim deležem evropskih sredstev so mu dala posebna znanja, ki jih lahko uspešno predaja tako študentom kot raziskovalcem na fakulteti.

Zagotavljanje komunalnih storitev na območju štirih občin prinaša veliko izzivov, pravočasna priprava na doseganje prihodnjih standardov oskrbe in standardov bivanja ter upoštevanje polne cene vode pa prinaša vrsto priložnosti za raziskave in razvoj ter inženirske rešitve prihodnjih generacij.

S svojim širokim pregledom nad razvojnimi trendi in izkušnjami, kaj vse smo že poskušali na področju voda, je pomemben član Strateškega sveta fakultete, ko se posodabljajo študijski programi in se ugotavlja, kakšne kompetence naj imajo bodoči inženirji in raziskovalci.

Javni raziskovalni zavod Hidroinštitut
(srebrna plaketa)

Javni raziskovalni zavod Hidroinštitut izhaja iz prizadevanj Društva za izgradnjo Hidrotehničnega laboratorija Tehnične fakultete v Ljubljani, ki so se začela leta 1933, nadaljevala z delom v začasnem Hidravličnem laboratoriju od leta 1935 in končala z izgradnjo poslopja Hidrotehničnega odseka z Vodogradbenim laboratorijem. Slednji se je leta 1954 odcepil od fakultete, vendar sta obe ustanovi ostali tesno povezani.

Sodelovanje odtlej uspešno poteka v obeh smereh tako pri pridobivanju akademskih stopenj kot pri prenosu znanja iz laboratorija na študente s številnih eksperimentalnih projektov za naročnike doma in po svetu. Različne upravne spremembe in gospodarska nihanja so prinesla turbulentne razmere, a korektno in učinkovito delo na raziskovalnem programu in pri projektih, svetovanju različnim uporabnikom vode in varstvu vode in varovanju pred vodo. To pa so bile vsebine, ki so bile v seznam predavanj vključene že v šolskem letu 1920/21.

Promocijo teh aktivnosti vsako leto opravimo s skupno organizacijo Goljevščkovega dne kot poklona skupnemu ključnemu strokovnjaku.

Iskrene čestitke fakulteti in vsem nagrajencem!

Posnetek slavnostne akademije je na https://www.fgg.uni-lj.si/slavnostna-akademija-ob-100-letnici-fakultete-za-gradbenistvo-in-geodezijo/.

O PROBLEMATIKI BETONSKIH ŽELEZNIŠKIH PRAGOV V SLOVENIJI

ON THE ISSUES OF CONCRETE RAILWAY SLEEPERS IN SLOVENIA

izr. prof. dr. Stane Božičnik, univ. dipl. ekon.
stane.bozicnik@um.si
doc. dr. Mojmir Uranjek, univ. dipl. inž. grad.
mojmir.uranjek@um.si
prof. dr. Andrej Štrukelj, univ. dipl. inž. grad.
andrej.strukelj@um.si
doc. dr. Iztok Peruš, univ. dipl. inž. grad.
iztok.perus@um.si
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo
Smetanova 17, 2000 Maribor

Znanstveni članek
UDK 519.87+625.1(497.4)

Povzetek | Na železniški infrastrukturi v Sloveniji se, predvsem na kraškem območju, spoprijemamo s pojavom plavajočih pragov. Za izboljšanje stanja v okviru CRP-projekta opravljamo raziskave, ki nam omogočajo boljše razumevanje tega pojava. V prispevku so predstavljeni rezultati že opravljenih raziskav. Z meritvami in matematičnimi simulacijami smo ugotovili, da je za učinkovit matematičen opis pojava potreben dinamični matematični model. Dinamični učinki namreč izrazito neugodno vplivajo na degradacijo tolčenca, ki prej ali slej privede do plavajočega praga. Izboljšanje obnašanja betonskega praga je možno z novimi sodobnimi materiali (vezivi in polnili) ob ustrezni kvantifikaciji pojava. V ta namen smo razvili tudi empirični model degradacije tolčenca, ki temelji na vizualni ekspertni oceni in ga je mogoče s predlaganim empiričnim izrazom povezati z rezultati testa micro-Deval.

Ključne besede: betonski železniški prag, plavajoči prag, degradacija tolčenca, empirični model degradacije tolčenca

Summary | On the railway infrastructure in Slovenia, especially in the karst terrain, we are facing the phenomenon of floating sleepers. In order to improve the situation, we are conducting a research, within Targeted Research Project, that enables us to better understand the related phenomena. This paper presents the results of research already carried out. Through field measurements and mathematical simulations, we have found that a dynamic mathematical model is required for effective mathematical description of the phenomenon. Dynamic effects have a markedly unfavorable impact on the degradation of the track ballast, which sooner or later leads to a floating sleeper. The behavior of the concrete sleeper can be improved by using new modern materials (binders and fillers) with adequate quantification of the phenomenon. To this end, we have also developed an empirical model of ballast degradation, based on visual expert judgment, which can be linked to the results of the micro-Deval test with the proposed empirical expression.

Key words: concrete railway sleeper, floating sleeper, ballast degradation, empirical model of ballast degradation

1 • UVOD

V okviru ciljnega raziskovalnega projekta Razvoj inovativnega železniškega praga izvajamo na FGPA UM v sodelovanju s Zavodom za gradbeništvo Slovenije raziskave pojavov, povezanih z obnašanjem betonskih železniških pragov. Razumevanje teh pojavov in njihov učinkoviti matematični opis nam omogoča iskanje ustreznih inženirskih rešitev za izboljšanje obnašanja, večjo trajnost in učinkovitejše vzdrževanje pragov ter razvoj inovativnih pragov z boljšimi karakteristikami od obstoječih. V tem prispevku so opisane raziskave, ki se ukvarjajo predvsem z razumevanjem pojava plavajočih pragov in s tem povezanimi problemi, zato se na veljavne standarde nismo posebej sklicevali. Pomembno pa je opozoriti, da je pri projektiranju, gradnji in vzdrževanju treba upoštevati pogoje standardov CEN - EN 13230-1 (CEN, 2016a) in CEN - EN 13230-2 (CEN, 2016b) ter UIC Kodeksa 713 E (UIC, 2004), ki definirajo kriterije in postopke kontrole za materiale, betonske pragove in pritrdilni material.

Leseni železniški pragovi so v uporabi že vse od pojava železniškega transporta. V ZDA se od konca 19. stoletja uporabljajo betonski pragovi, od preloma 20. stoletja pa jih uporabljamo tudi v Evropi. Danes so oboji v uporabi po vsem svetu. Eden ključnih problemov betonskih železniških pragov v Sloveniji pa tudi marsikje drugod po svetu je relativno slaba kakovost tolčenca tirne grede, kadar ga sestavljajo dolomiti in/ali apnenci. Na kraškem območju lahko vzdolž železniške proge pogosto opazimo krajše segmente z izrazito degradacijo tolčenca (slika 1), ki je povezana s pojavom t. i. plavajočih pragov (angl. *floating sleepers*) ((Huang, 2009), (Indraratna, 2018)). S konstrukcijskega stališča je pojav povezan s spremembo togosti tirne grede in sodelujočega polprostora.

Pri rednih kontrolah in meritvah, ki jih izvaja upravljavec železniške infrastrukture, se v splošnem ugotavljajo parametri, povezani z geometrijskimi karakteristikami. Parametri, ki so povezani z materialnimi karakteristikami, in parametri odziva pa se večinoma ugotavljajo le posredno, in še to v zelo omejenem obsegu. To je tudi eden izmed razlogov, da je pojav plavajočih pragov, ki je značilen za betonske pragove, relativno slabo kvantitativno opisan v znanstveni in strokovni literaturi. Pojav je namreč posledica kombinacije neugodnih vzrokov, od katerih je osnovni sprememba togosti tirne grede in/ali planuma, ker pa gre za dinamični pojav, je celoten odziv odvisen še od časovno spremenljive zunanje obtežbe, sodelujočih mas (tolčenca, planuma in polprostora pod tirno progo) in dušenja celotnega sistema.

V tem prispevku so na kratko opisani nekateri bistveni problemi, s katerimi se spoprijemamo pri razvoju inovativnega železniškega praga pri reševanju problematike betonskih železniških pragov v Sloveniji. V prvem delu so na kratko predstavljene zahtevne eksperimentalne meritve na terenu na dveh krajših odsekih železniške proge Divača–Koper z namenom pridobitve podatkov za pripravo matematičnih modelov obnašanja tirne grede, predvsem pragov, in kvalitetnih računskih simulacij pojavov degradacije tolčenca. Sledi prikaz rezultatov testiranja novih veziv kot potencialnih materialov za izdelavo inovativnih železniških pragov. Opisan in predlagan je tudi empirični model za degradacijo tolčenca na osnovi ekspertne ocene in eksperimentalnih meritev micro-Deval. V zadnjem delu je na kratko predstavljen tudi ekonomski vidik razvoja in uvajanja novih betonskih pragov.

Slika 1 • **Plavajoči pragovi na dveh odsekih železniške proge Divača–Koper.**

2 • EKSPERIMENTALNE MERITVE NA TERENU

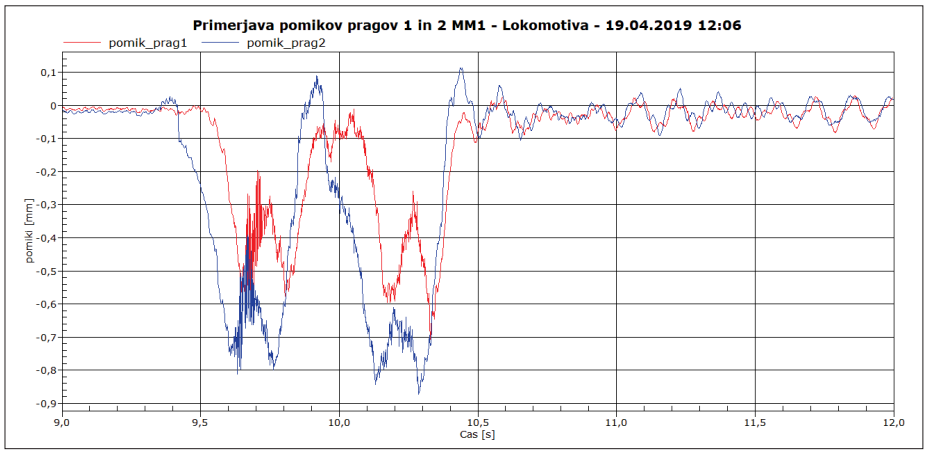
Degradacija tolčenca ter statične in dinamične veličine (npr. pomiki, hitrosti in pospeški) pod obremenitvijo so v veliki meri odvisni od debeline tirne grede, velikosti osne obremenitve, spodnjega ustroja proge (s tamponskim slojem in brez tamponskega sloja), vrste elastičnih podložk pri pritrditvi ipd. Neposrednega vpliva vseh naštetih parametrov in njihovih kombinacij ne bo mogoče eksperimentalno izmeriti/ovrednotiti. Zato razvijamo matematični model, ki nam bo omogočal opis pojava preko znanih mehanskih parametrov. Te pa, verjamemo, bomo lahko kvantificirali eksperimentalno v laboratoriju ali preko opazovanja njihovega vpliva na odziv pri numeričnih simulacijah. Prav tako nam lahko meritve in primerjava odziva na dveh tipičnih merskih mestih (dobrem in slabem, tj. mestu z degradiranim tolčencem) dajejo osnovne informacije, kako in zakaj se odzivi razlikujejo in zakaj se stanje sčasoma še poslabšuje.

Slika 2 • **Meritve pomikov na nekritičnem merskem mestu MM1 in že delno kritičnem merskem mestu MM2.**

Na železniški progi G60 Divača–cepišče Prešnica smo izbrali dve merski mesti. Obe mesti sta v premi, s čimer smo (v prvi fazi) izločili vpliv krivine na odziv. Mersko mesto MM1 na stacionaži 8242 m predstavlja intaktno območje brez poškodb, medtem ko se na merskem mestu MM2 na stacionaži 8187 m prisotne prve poškodbe, obrušenje in degradacija tolčenca in ga zato karakteriziramo kot delno kritično mesto. Na območju MM2 so se v preteklosti pojavljala kritična stanja tolčenca in pragov, mesta pa so že sanirana, pri čemer so bili betonski pragovi nadomeščeni z lesenimi.

Na obeh izbranih merskih mestih MM1 in MM2 smo z induktivnimi merilniki pomikov merili odzivne parametre pragov pri prehodu vlakovnih kompozicij in nato s kasnejšo analizo vrednotili razlike med obema območjema. Slika 2 prikazuje situacijo meritev na obeh merskih mestih. Velja omeniti, da je bilo treba zaradi narave dela, terenskih pogojev in vseh nezanesljivosti pri meritvah ter nezanesljivosti mehanskih in materialnih parametrov lokacij na eni strani ter omejene opreme na drugi strani zelo skrbno načrtovati protokol eksperimentalnih meritev in zajem podatkov.

Rezultati meritev pomikov pri prehodu lokomotive za obe merski mesti so prikazani na slikah 3 in 4. Slika 3 prikazuje pomike pri sinhroni meritvi dveh sosednjih betonskih pragov na nekritičnem merskem mestu MM1.

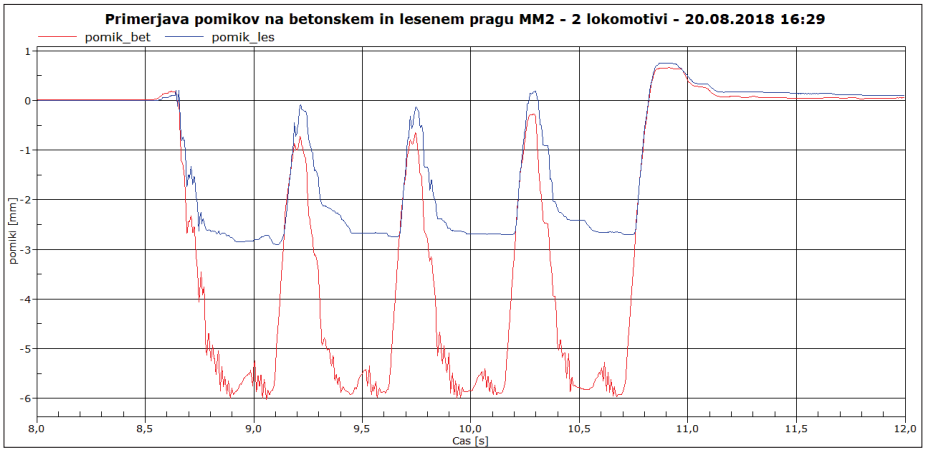


Slika 3 • **Meritve pomikov na nekritičnem merskem mestu MM1 na dveh sosednjih betonskih pragovih.**

Odziv obeh pragov pri prehodu lokomotive je podoben. Razvidno je, da gre za prehod štiriosne lokomotive, pri čemer razlike v dobljenih vrednostih lahko pripišemo lokalnim značilnostim tirne grede. Absolutne vrednosti pomikov enega in drugega praga kot tudi razlike med njima so majhne, pri čemer velja ponovno opozoriti, da gre za rezultate meritev pragov na »dobrem« (nekritičnem) mestu. Velikostni red maksimalnih pomikov je okoli 0,9 mm pri pragu 1 in okoli 0,7 mm pri pragu 2. Dobljeni rezultati so v skladu s predpisi in pričakovanimi lastnostmi tirnic, pragov in tolčenca, ki zagotavljajo udobno vožnjo in ustrezno podajnost/togost tirne grede.

Zaradi omejitev opreme ni bilo možnosti opazovanja odziva na vseh izbranih merskih mestih pri isti vlakovni kompoziciji. Kljub vsemu pa je možno v kombinaciji s podatki merilne tehnice dobiti kvalitativni in kvantitativni vpogled v obnašanje in razlike med različnimi merskimi mesti z analizo prehodov drugih podobnih vlakovnih kompozicij. Tako slika 4 prikazuje pomike pri prehodu dveh povezanih lokomotiv pri sinhroni meritvi na dveh sosednjih pragovih (betonski in leseni) delno kritičnega merskega mesta MM2. Odziva betonskega in lesenega praga se pričakovano razlikujeta. Iz odziva betonskega praga lahko vidimo, da gre za prehod dveh štiriosnih lokomotiv, saj so jasno vidne povišane vrednosti (konice) pomikov ob prehodu vsake izmed osi ter poudarjene visokofrekvenčne vibracije praga pri vsakem prihodu osi na lokacijo praga. Maksimalna vrednost pomika znaša 6 mm, kar je bistveno več kot na lokaciji »dobrega« merskega mesta MM1 (povprečen faktor povečanja pomikov znaša skoraj 8!). Pri lesenem pragu, na praktično isti lokaciji, dobimo v primerjavi z betonskim bolj zvezen odziv, manj je visokofrekvenčnih vibracij, pomiki pa so več kot za 50 % manjši. Redukcija pomikov je posledica delnega vtiskovanja tolčenca v naležno površino praga, kar je ena izmed zelo ugodnih lastnosti spodnje površine lesenega praga v primerjavi z betonskim.

Očitno je, da se togost tirne grede z degradacijo tolčenca bistveno zmanjša. Ob tem



Slika 4 • **Meritve pomikov na delno nekritičnem merskem mestu MM2 na dveh sosednjih pragovih (betonskem in lesenem).**

je treba poudariti, da je, čeprav so na merskem mestu MM2 opazni šele začetni znaki degradacije tolčenca, togost že bistveno zmanjšana v primerjavi z »dobro« lokacijo. Rezultati pripadajočih hitrosti in pospeškov, ki tukaj zaradi omejitve prostora niso prikazani, prav tako kažejo na bistveno poslabšanje dinamičnih karakteristik. Rezultati preliminarnih matematičnih modelov kažejo, da gre pri pojavu za primer kratkotrajne udarne obtežbe, približno simetrične, trikotne oblike. Že maksimalne vrednosti dinamičnega faktorja približka enojnega simetričnega sunka presegajo dovoljeno in v predpisih za projektiranje upoštevano vrednost dinamičnega faktorja 1,2, približek kratkotrajne udarne obtežbe dvojne simetrične trikotne oblike (lokomotiva) pa ga še bistveno poveča. Dinamični učinki izrazito neugodno vplivajo na degradacijo tolčenca. Na lokacijah, kjer je opazna začetna degradacija tolčenca, v mnogo primerih pride zelo hitro (v času enega ali največ dveh mesecev) do izrazite degradacije, ko je potrebna takojšnja sanacija (glej tudi poglavje *Empirični model degradacije tolčenca*). Hitrost degradacije je odvisna od materialnih in konstrukcijskih parametrov na lokaciji, katerih identifikacija še poteka.

Primerjava odziva betonskih in lesenih pragov kaže ugodnejši odziv lesenega praga, kar je pomemben kazalnik pri izbiri materialov in snovanju detajlov novih pragov.

3 • TESTIRANJE MEHANSKIH LASTNOSTI SODOBNIH VEZIV

Sodobni gradbeni materiali in veziva, sodobne tehnologije ter znanstvene raziskave s sodobnimi pristopi lahko ponudijo rešitve za izdelavo novih betonskih pragov. V ta namen so avtorji v laboratoriju Katedre za preskušanje materialov in konstrukcij na UL FGG za potrebe v tem prispevku predstavljenega problema opravili preizkuse mehanskih lastnosti posebnih veziv s komercialnim imenom *Syscoflex* ((Syscoflex 2019a), (Syscoflex 2019b)). Za ta veziva smo predvideli, da imajo fizikalne lastnosti, ki bi posamično, v kombinaciji s polnilom ali agregatom in/ali v različnih konstrukcijskih izvedenkah, lahko omogočile želeno obnašanje nove generacije betonskih železniških pragov.

Med večjimi števili veziv *Syscoflex* z različnimi lastnostmi smo se odločili za štiri, ki imajo poleg želenih lastnosti tudi lastnosti, ki ustrezajo zahtevam pri izdelavi in sanaciji betonskih železniških pragov. Lahko bi bila uporabna tudi pri zaščitah različnih betonskih konstrukcijskih in nekonstrukcijskih elementov inženirskih objektov in stavb.

Za vsa štiri veziva smo izbrali vodocementa razmerja (V/C), ki so ustrezala povprečnim priporočenim vrednostim proizvajalca. V nadaljevanju navajamo testna imena vseh štirih veziv, njihove oznake za namene raziskave in V/C-razmerja. Utežni deleži so omogočili napolnitev enega kalupa s tremi prizmami dimenzij 4 x 4 x 16 cm. Mešanje je potekalo v dveh fazah in je skupaj trajalo 5 minut, pri čemer je vsaka od faz trajala po 2 minuti in pol. Prva faza je ustrezala počasnemu mešanju, druga pa hitremu mešanju.

Preizkušana so bila naslednja veziva:

- SysCoflex-1 (oznaka MIX 1: V/C = 0.25) – dve mešanji, po eno mešanje za vsak kalup,
- SysCoflex-2 (oznaka MIX 2: V/C = 0.19) – eno mešanje za dva kalupa,
- SysCoflex-3 (oznaka MIX 3: V/C = 0.175) – eno mešanje za dva kalupa,
- SysCoflex-4 (oznaka MIX 4: V/C = 0.30) – eno mešanje za dva kalupa,
- SysCoflex-1 z glinoporom kot polnilom (oznaka MIX 5: V/C = 0.25).[1]

Eksperimentalna raziskava je potekala v treh fazah. Prva faza je ustrezala pripravi zgoraj opisanih mešanic in njihovi vgradnji v kalupe (slika 5). Druga faza je ustrezala razkalupljenju (po tridnevnem strjevanju) in pripravi tako dobljenih prizmic na dodatno 25-dnevno strjevanje pod laboratorijskimi pogoji. Pri tem smo polovico prizmic (MIX 1–MIX 4) hranili v običajnih pogojih, drugo polovico prizmic pa smo potopili v vodo. V tretji fazi smo, po 28 dneh strjevanja, prizmice preizkusili in določili pomembnejše mehanske lastnosti, kot so elastični modul in upogibna trdnost (slika 6) ter tlačna trdnost. Neodvisno od priprave vzorcev smo z rentgensko difrakcijsko analizo določili tudi kemično sestavo veziv.

Dobljeni rezultati eksperimentalnih raziskav specialnih veziv *Syscoflex* kažejo, da vzorci veziv v splošnem dosegajo vrednosti, ki jih navaja proizvajalec. Razlike so največje pri tlačni trdnosti – vrednosti v dveh primerih precej presegajo navedene, v dveh primerih pa so vrednosti v povprečju nekoliko manjše od navedenih. Glede na to, da točne sestave preiskovanih materialov ne poznamo, smo upoštevali dva protokola nege vzorcev, pri čemer je prišlo do pomembnih razlik med vzorci, negovanimi v vodi, in vzorci, negovanimi v laboratorijskih pogojih. Vzorci, negovani v vodi, dosegajo manjše vrednosti upogibnih trdnosti v primerjavi z vzorci, sušenimi na zraku pri normalnih laboratorijskih pogojih. Po drugi strani pa prvi v povprečju za več kot 30 % presegajo tlačne trdnosti drugih. Dobljeni rezultati kažejo na pomembnost izbranega

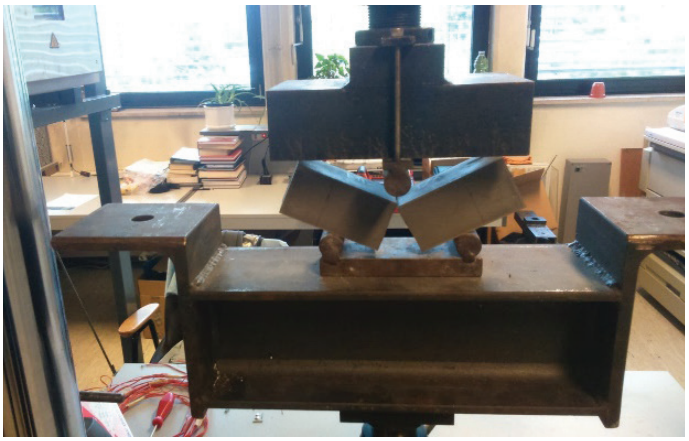
[1] Enaka mešanica veziva kot pri MIX 1, le da je dodano polnilo – vlažni glinopor. Gre za primer mešanja veziva z agregatom, vendar ne v smislu običajnega mešanja z agregatom po presejalni krivulji, ampak v smislu dodajanja polnila, ki zmanjša porabo veziva, pri čemer naj se kar najboljše ohranijo deklarirane mehanske lastnosti veziva.

Slika 5 • **Priprava kalupov (levo) in vgrajena mešanica MIX 5 (desno) na Katedri za preskušanje materialov in konstrukcij na UL FGG.**

protokola nege in vpliv le-tega na mehanske lastnosti preskušancev. Ugotavljamo, da bi z ustrezno nego vzorcev (in posledično konstrukcijskih elementov) lahko v splošnem izboljšali njihove mehanske lastnosti oz. brez večjih težav dosegali zahtevane standarde.

Poudariti je treba, da se opisani rezultati nanašajo le na veziva, in ne na mešanice veziv in agregata. Preliminarne raziskave mešanic (z vzorca. V nadaljnjih raziskavah bi bilo treba proučiti, katera so ustrezna polnila, ki bi zmanjšala porabo veziva, vseeno pa bi zagotovila ustrezne mehanske lastnosti elementa, narejenega iz mešanice veziva in polnila/agregata. Kritično je predvsem zmanjšanje tlačne trdnosti, ki pa se lahko, kot kažejo rezultati negovanja vzorcev v vlažnem in mokrem okolju, pomembno reducira.

nosti, ki bodo najbolj ustrezale standardom za železniške betonske pragove. Optimizacija bi morala vključevati tudi izbiro oz. določitev najboljših pogojev nege. Ena izmed možnosti za izboljšanje lastnosti betonskih pragov se kaže v izdelavi in uporabi dvoslojnih pragov, pri čemer bi bil spodnji del praga izdelan izključno iz specialnih veziv, katerih odlične elastične lastnosti so bile potrjene v opisanih



Slika 6 • **Določanje »dinamičnega« elastičnega modula z GindoSonicom (levo) in določanje upogibne trdnosti (desno).**

normnim peskom in perlitom) kažejo, da ostaja elastični modul približno enak kot v primeru veziva, bistveno pa se zmanjša tlačna trdnost

Dobljeni rezultati kažejo, da bi bilo mogoče optimirati mešanice specialnih veziv in različnih polnil za doseganje mehanskih last-

eksperimentih. Zgornji, večinski del praga pa bi se izdelal klasično tako kot pri uporabi trenutne tehnologije.

4 • EMPIRIČNI MODEL DEGRADACIJE TOLČENCA

Tolčenec v Sloveniji mora ustrezati navodilom za kakovost ((UI, 1995), (UI, 1996)). Kot smo ugotovili v uvodnem poglavju, je za primere plavajočih pragov na železniških progah v Sloveniji značilna močna degradacija tolčenca, ki je povezana (tudi) s preostalo življenjsko dobo betonskih pragov (You, 2019).

V povezavi s tem pojavom različni avtorji predlagajo nove teste za določitev stanja tolčenca (Lama, 2011) in programske rešitve na podlagi na znanju oprtih (ekspertnih) sistemov (Chiachíoa, 2019). Pojavljajo se tudi predlogi za avtomatizirano računalniško oceno degradacije tolčenca (Guo, 2019), pri

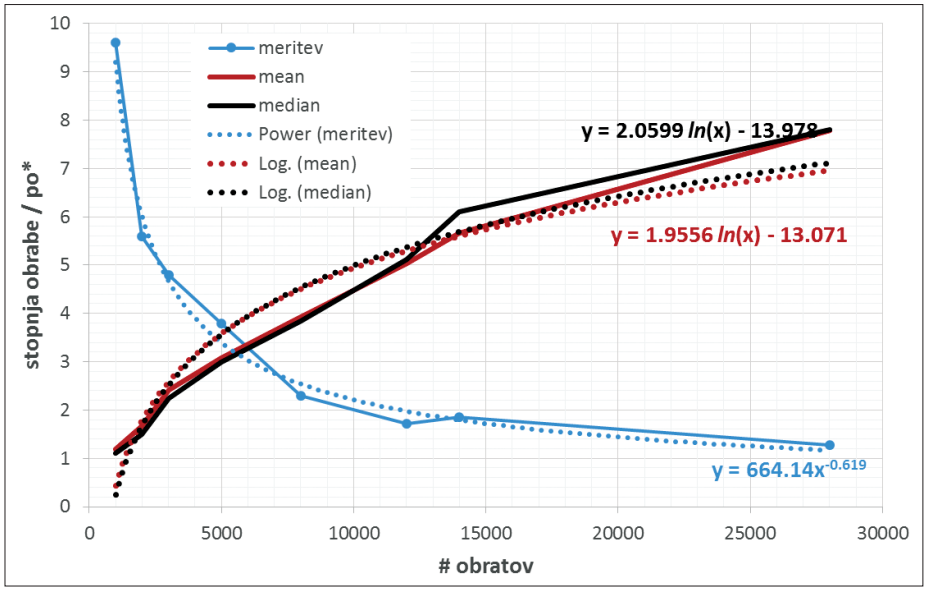
čemer pa do praktične uporabe še ni prišlo. Zato v okviru projekta razvijamo lastni model, ki temelji na zbranih podatkih s slovenskih železniških prog.

Subjektivno stopnjo degradacije tolčenca smo želeli objektivno povezati s stanjem na posamičnih železniških odsekih in rezultati meritev obrabe z napravo micro-Deval. Subjektivno stopnjo degradacije tolčenca je mogoče dobiti s pregledom stanja, ki ga

Slika 7 • **Naprava Micro-Deval (levo) in vzorec, pripravljen na testiranje (desno) na ZAG Slovenije.**

opravi več ocenjevalcev na terenu, objektivno stanje obrabe pa nam lahko da standardna izvedba testa micro-Deval z meritvami vmesnih stanj. Na ta način lahko ob predpostavki, da obstaja porazdelitvena funkcija (angl. *pdf*) ocene stopnje obrabe tolčenca, poiščemo matematično zvezo v obliki empirične funkcije, ki povezuje dejansko obrabo pri različnem številu ciklov (obratov v napravi micro-Deval – glej sliko 7) s srednjo vrednostjo oz. matematičnim upanjem ocen več ocenjevalcev.

Na Zavodu za gradbeništvo (ZAG) smo v ta namen opravili relativno enostaven, vendar časovno in logistično zahteven eksperiment. Najprej je na terenu zbrane vzorce tolčenca z različnih degradiranih lokacij na železniški progi dvanajst ocenjevalcev s pomočjo doseženega konsenza razvrstilo po obrabi od intaktnega vzorca do najbolj obrabljenega. Ta lestvica je služila za pomoč pri oceni obrabe vzorca, vzetega pri različnem številu obratov iz naprave micro-Deval. Pri tem ocenjevalci niso vedeli niti, ali gre pri vsakem ocenjevanju za obrabo pri večjem številu obratov, kot pri prejšnjem niti za dejansko število obratov. Izvajalci analize tako dobljenih podatkov niso poznali niti lestvice niti posameznih ocenjevalcev. Z vsemi temi ukrepi smo želeli narediti eksperiment čim bolj objektiven.



Slika 8 • **Empirični model za zvezo med obrati v napravi micro-Deval (# obratov na horizontalni osi) in obrabo, izraženo s stopnjo degradacije tolčenca (stopnja obrabe in po* na vertikalni osi).**

V analizi smo upoštevali rezultate vseh dvanajstih ocenjevalcev. Izračunali smo povprečno vrednost, mediano in druge statistične parametre ocene stopnje degradacije tolčenca pri različnem številu obratov valja v napravi micro-Deval. Po postopku metode najmanjših kvadratov smo za povprečno vrednost in mediano *stopnje obrabe* na 10-stopenjski lestvici določili koeficienta relativno enostavnega funkcijskega nastavka v obliki

$$y = a \ln(x) + b \qquad (1).$$

V izrazu je y stopnja obrabe in x število obratov valja naprave micro-Deval. Na sliki 8 polne črte predstavljajo rezultate meritev, črtkane črte pa pripadajoče funkcije, ki opisujejo matematično soodvisnost med spremenljivkami. Povprečna obraba (*po**) na sliki 8 je normirana obraba, izračunana po izrazu

$$po^* = \frac{obraba\ [g]}{\#\ obratov} \cdot 100 \qquad (2).$$

V izrazu je obraba (*g*) izmerjena obraba (teža finih, prašnih in odkrušenih delcev v gramih) in # obratov, število obratov med prejšnjo in trenutno meritvijo. Funkcijski nastavek za to zvezo ima obliko

$$y = a\, x^b \qquad (3).$$

Na osnovi dobljenih rezultatov in analize, prikazanih na sliki 8, lahko zaključimo naslednje:

- Največjo obrabo (*po**) je mogoče opaziti v začetnih ciklih (modra krivulja), ko degradacijo tolčenca na terenu šele zaznavamo. S slike je razvidno, da se skoraj 70 % obrabe zgodi pri prvih 5000 obratih, preostalih 30 % pa se zgodi v naslednjih 23.000 obratih.

- Razlika med mediano in povprečno vrednostjo je minimalna (rdeča in črna krivulja, polni črti); nekoliko večje odstopanje je pri 14.000 obratih. Če ob vseh nezanesljivostih rezultatov in modelov razliko zanemarimo, lahko predpostavimo in za opis pojava uporabimo normalno porazdelitveno funkcijo, pri kateri povprečna vrednost in mediana sovpadata.
- Enostavna funkcijska zveza za povprečno vrednost stopnje obrabe je primerna za praktično uporabo. Na osnovi vizualnih ocen ocenjevalcev/ekspertov lahko s pomočjo funkcijske zveze enostavno povežemo stopnjo degradacije tolčenca in število obratov naprave micro-Deval (ki vsebuje tudi časovno komponento).
- Za vsakdanjo praktično uporabo bi bilo treba določiti najmanjše število ocenjevalcev stopnje degradacije tolčenca na terenu za zadostno/sprejemljivo natančnost ocene.
- V raziskavi so bili uporabljeni vzorci tolčenca s približno enako mineraloško sestavo in mehanskimi karakteristikami. V tem prispevku predlagani izraz za srednjo vrednost stopnje degradacije tolčenca po enačbi (1) je zato primeren le za železniške proge s tolčencem podobnih karakteristik.

5 • EKONOMSKI VIDIK

Pri oceni tržnega potenciala in oceni možnih prihrankov smo izhajali iz naslednjih predpostavk:

- proizvodna cena novega železniškega praga ne bo bistveno odstopala od obstoječih cen železniških pragov,
- obseg in struktura stroškov za vzdrževanje železniške infrastrukture v Sloveniji bo v povprečju, tudi v prihodnje, vrednostno na ravni povprečja zadnjih nekaj let.

V strukturi vseh stroškov vzdrževanja železniške infrastrukture v Sloveniji, ki znaša 28 mio. EUR letno, znašajo stroški dela 18 mio. EUR (ki se vodijo na letni ravni kot enotna stroškovna postavka), stroški »materiala« znašajo okoli 5 mio. EUR in stroški storitev zunanjih izvajalcev prav tako okoli 5 mio. EUR.

Z analizo razpoložljivih natančnejših podatkov *Pisarne vzdrževanja železniške infrastrukture Ljubljana* smo izvedli simulacijski izračun, ki je upošteval vse kalkulacijske elemente možnih prihrankov na področju vzdrževanja železniške infrastrukture. Pod pogojem, da bi uvedli nov železniški prag z želenimi in predvidenimi lastnostmi, znaša izračunani prihranek 14,13 % celotnih letnih stroškov vzdrževanja železniške infrastrukture na segmentu železniške infrastrukture, ki ga pokriva ta pisarna.

Na osnovi simulacijskega izračuna in na osnovi ekspertnih ocen lahko za celotno Slovenijo ocenimo, da bi lahko z novim železniškim pragom prihranili med 13 % in 15 % stroškov vzdrževanja železniške infrastrukture ob pogoju, da bi imel železniški prag pričakovane lastnosti. To konkretno pomeni skupni prihranek na letni ravni med 3,6 in 4,2 mio. EUR.

6 • SKLEP

Pri sodobnih betonskih železniških pragovih, ki imajo v splošnem daljšo življenjsko dobo in so bolj ekonomični v primerjavi z lesenimi, se v Sloveniji, predvsem na kraškem terenu, soprijemamo s problemom plavajočih pragov. Da bi izboljšali stanje v okviru CRP-projekta *Razvoj inovativnega železniškega praga* opravljamo raziskave, ki nam omogočajo boljše razumevanje tega pojava, njegovo kvantifikacijo in posledično razvoj ustreznega betonskega železniškega praga. Ugotovitve lahko strnemo:

- Rezultati meritev pomikov na dobri mestih (kjer ni degradacije tolčenca) kažejo, da se pri običajni obtežbi pri betonskih pragovih pojavljajo absolutni majhni pomiki, ki ustrezajo pričakovanemu odzivu.
- Na mestih z začetno degradacijo tolčenca so pomiki po absolutnih vrednostih že bistveno večji (dosegajo faktorje do 8 v primerjavi s pragovi na »dobrih« mestih). Leseni pragovi na takšnih mestih imajo ugodnejši odziv, ki se kažejo v manjših doseženih pomikih in so brez visokofrekvenčnih vibracij.
- Dinamični učinki izrazito neugodno vplivajo na degradacijo tolčenca in jih ne moremo zanemariti. Matematični opis pojava degradacije tolčenca mora temeljiti na dinamičnem modelu.
- Kot ena izmed možnosti zmanjšanja vpliva dinamičnih učinkov se kaže uporaba sodobnih veziv, lahko kot samostojnih materialov, lahko v kombinaciji s polnili ali v različnih konstrukcijskih izvedenkah. Preliminarne raziskave kažejo, da bi s skrbno načrtovanimi protokoli nege in kombinacijami teh veziv z različnimi polnili lahko dosegli osnovne zahtevane mehanske karakteristike ob istočasno ugodnih karakteristikah odziva (npr. nekoliko manjša togost kot pri obstoječih betonskih pragovih, vtiskovanje tolčenca v naležno površino praga).
- Meritev degradacije tolčenca s testom micro-Deval z vmesnimi prekinitvami je pokazala, da se večina obrabe zgodi v začetnih ciklih, pri čemer je degradacijo pogosto relativno težko opaziti.
- Za namen kvantifikacije degradacije tolčenca v okviru opisanega projekta razvijamo lasten empiričen model, ki temelji na vizualni ekspertni oceni. Objektivna ocena degradacije temelji na povprečni oceni več ekspertov, v prispevku predlagana enačba pa tako določeno oceno povezuje z obrabo testa micro-Deval, ki nadalje omogoča oceno obrabe in posledično tudi napoved časovnega poteka degradacije. Zadnje raziskave še potekajo.

7 • ZAHVALA

Avtorji prispevka se zahvaljujejo Ministrstvu za infrastrukturo RS in Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS) za financiranje CRP-projekta *Razvoj inovativnega železniškega praga,* v okviru katerega so bile opravljene predstavljene raziskave. Zahvala gre tudi članom Katedre za preskušanje materialov in konstrukcij na UL FGG, ki so nam velikodušno ponudili pomoč pri izvedbi raziskav specialnih veziv, in partnerju pri projektu, Zavodu za gradbeništvo Slovenije, ki nam je s svojimi ocenjevalci eksperti, ki sicer ne sodelujejo pri projektu, omogočil učinkovito izvedbo eksperimenta za določitev stopnje degradacije tolčenca. Jerneju Kukovici gre zahvala za pomoč pri pridobivanju podatkov za ekonomsko vrednotenje/upravičenost uvajanja novega železniškega praga v Sloveniji.

8 • LITERATURA

CEN - EN 13230-1:2016, Railway applications — Track — Concrete sleepers and bearers —Part 1: General requirements, 1 May, 2016a.

CEN - EN 13230-2:2016, Railway applications — Track — Concrete sleepers and bearers — Part 2: Prestressed monoblock sleepers, 1 November, 2016b.

Chiachíoa, J., Chiachíoa, M., Prescotta, D., Andrews, J., A knowledge-based prognostics framework for railway track geometry degradation, Reliability Engineering and System Safety 181, 127–141, 2019.

Guo, Y., Markine, V., Zhang, X., Qiang, W., Jing, G., Image analysis for morphology, rheology and degradation study of railway ballast: A review, Transportation Geotechnics 18, 173-211, 2019.

Huang, H., Tutumluer, E., Dombrow, W., Laboratory characterization of fouled railroad ballast behavior. Journal of the Transportation Research Board, No. 2117, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., pp. 93–101, 2009.

Indraratna, B., Ngo, T., Ballast Railroad Design: SMART-UOW Approach, CRC Press, Taylor&Francis Group, 158 p, 2018.

Lama, H. F., Wong, M. T., Railway Ballast Diagnose through Impact Hammer Test, Procedia Engineering 14, 185–194, 2011.

Syscoflex 1 - Spletna stran proizvajalca Syscoflex, https://syscofox.com/page/2/, 11. 09. 2019.

Syscoflex 2 - Tehnična dokumentacija proizvajalca Syscoflex za vezivo SysCo-scass-elast, https://syscofox.files.wordpress.com/2017/06/scass-elast-syscofox.pdf, 11. 09. 2019.

You, R., Kaewunruen, S., Evaluation of remaining fatigue life of concrete sleeper based on field loading conditions, Engineering Failure Analysis 105, 70–86, 2019.

UIC-Kodex 713 E:2004, Bemessung von Monoblockschwellen aus Beton, November 2004.

Ul, Uradni list št. 39/1995, (1851), Navodilo za kakovost in nadzor kakovosti tolčenca za gramozno gredo železniških tirov, 1995.

Ul, Uradni list št. 75/1996, (4011), Navodilo o spremembah navodila za kakovost in nadzor kakovosti tolčenca za gramozno gredo železniških tirov, 1996.

OPTIMIZACIJA JEKLENEGA VISOKOTLAČNEGA CEVOVODA Z OJAČITVAMI

OPTIMIZATION OF A STEEL PIPE WITH STIFFENER RINGS FOR HIGH-PRESSURE PENSTOCK

prof. dr. Stojan Kravanja, univ. dipl. inž. grad.
stojan.kravanja@um.si
doc. dr. Tomaž Žula, univ. dipl. inž. grad.
tomaz.zula@um.si
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo
Smetanova 17, 2000 Maribor

Znanstveni članek
UDK 624.014.2:627.844(497.4)

Povzetek | Članek obravnava optimizacijo jeklenega visokotlačnega cevovoda z ojačitvami, vgrajenega v izvrtan tunel v hribino. Cevovod je dimenzioniran kot samonosilna jeklena cilindrična lupina s krožnimi ojačitvami brez sodelovanja hribine in okoliškega betona. Optimizacija cevovoda je izvedena z nelinearnim programiranjem, NLP. V ta namen je bil modeliran optimizacijski model PIPEOPT-SR. Optimizacijski model vsebuje namensko funkcijo mase jeklene konstrukcije, ki je podvržena sistemu pogojnih (ne) enačb iz statične analize in dimenzioniranja cevovoda v skladu s priporočili C.E.C.T. V sklepu članka je predstavljen primer optimizacije visokotlačnega cevovoda z ojačitvami črpalne hidroelektrarne Kozjak, locirane v bližini Maribora.

Ključne besede: optimizacija, nelinearno programiranje, NLP, jeklena cev z ojačitvami, visokotlačni cevovod

Summary | The paper deals with the optimization of a steel pipe with stiffener rings for high-pressure penstock built in a bored tunnel. The penstock is designed to be self-resistant steel cylindrical shell with stiffener rings, constructed without the assistance of the surrounding concrete and rock. The optimization of the penstock is performed by the non-linear programming approach, NLP. For this purpose, an optimization model PIPEOPT-SR was developed. The model comprises the mass objective function of the steel structure, which is subjected to the design and dimensioning constraints, defined according to C.E.C.T. Recommendations. A numerical example at the end of the paper presents the optimization of the high-pressure penstock with stiffener rings for the Pump Hydropower Plant Kozjak, located close to the city of Maribor, Slovenia.

Key words: optimization, non-linear programming, NLP, steel pipe with stiffener rings, high-pressure penstock

1 • UVOD

Članek obravnava optimizacijo jeklenega visokotlačnega cevovoda z ojačitvami, vgrajenega v izvrtan tunel v hribino. Tovrstni visokotlačni cevovodi se gradijo za dovajanje vode pod visokim tlakom za hidroelektrarne. V nasprotju z referencami ((Kravanja, 2014), (Kravanja, 2015)), kjer je bil jekleni cevovod obravnavan kot gladka cev brez ojačitev, je v tem prispevku obravnavan cevovod kot samonosilna jeklena cilindrična lupina z navarjenimi krožnimi ojačitvami (slika 1). Sodelovanje hribine in okoliškega betona pri nosilnosti jeklene cevi ni upoštevano. Ojačitve je smiselno navariti na jekleno cev povsod tam, kjer je cev obremenjena z znatnim zunanjim vodnim tlakom. Računsko dobimo zaradi upoštevanja ojačitev tanjšo steno cevi ter nižjo maso in izdelavne stroške jeklene konstrukcije. Jeklena konstrukcija obbetoniranega cevovoda v hribini je namreč v splošnem obremenjena tako z notranjim kakor tudi z zunanjim vodnim tlakom, zato je treba narediti:

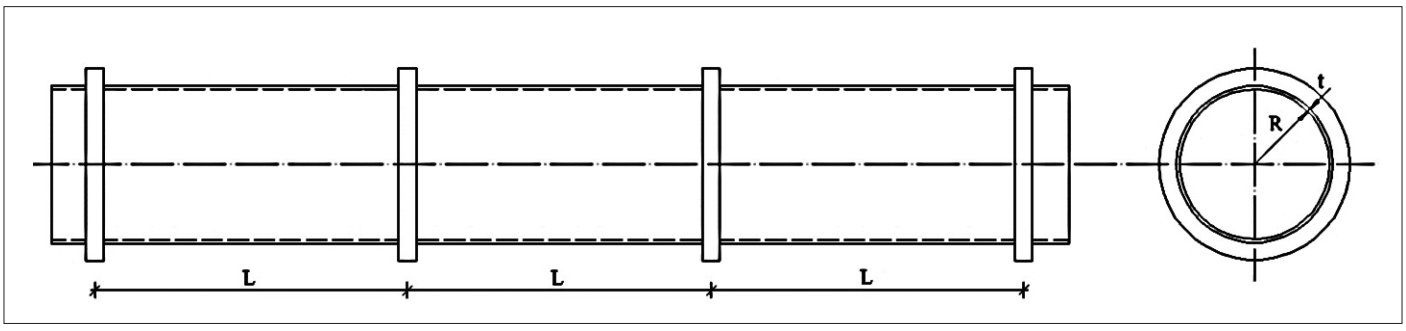
- izračun jeklenega cevovoda na notranji tlak, kjer poleg hidrostatičnega tlaka mirujoče vode upoštevamo še hidrodinamični vpliv prehodnih pojavov (vodni udar padajoče vode iz akumulacijskega jezera v prazno cev) brez upoštevanja zunanjega tlaka na cev,
- izračun jeklenega cevovoda na zunanji tlak podzemne vode (višina terena nad cevjo) pri praznem cevovodu.

Ker standardi Evrokod ((SIST EN 1993, 2007a), (SIST EN 1993, 2007b)) podajajo samo določena splošna izhodišča za dimenzioniranje cevovodov, in ne obravnavajo cevovodov, vbetoniranih v tunele, smo pri enačbah dimenzioniranja uporabili C.E.C.T.-priporočila (C.E.C.T. Recommendations, 1979). Osnovno teorijo stabilnosti cilindričnih lupin, obremenjenih z zunanjim tlakom, je podal (Timoshenko, 1940), teorijo cilindričnih lupin s krožnimi ojačitvami pa so pozneje še razvijali ((Amstutz, 1950), (Amstutz, 1953)) in (Kollbrunner, 1956). Slednja teorija je upoštevana tudi v priporočilih C.E.C.T. Soavtor zadnjega citiranega dela inž. Milosavljević je bil vodja biroja v nekdanji Metalni, kjer so sprojektirali in zgradili veliko visokotlačnih cevovodov svetovnih referenc.

Leta 1979 je Metalna dokončala izgradnjo 1400 m dolgega visokotlačnega cevovoda za hidroelektrarno Bajino Bašto v Srbiji s premerom 4,20 m–6,30 m in vodnim tlakom 95 barov. Uporabili so japonsko jeklo HT780 z natezno trdnostjo 780 N/mm^2. Vodilni konstruktor cevovoda je bil inž. Janez Raztresen, vodja biroja za cevogradnje. Leta 1985 so konstruktorji Metalne pod vodstvom inž. Janeza Raztresena sprojektirali in izdelali tlačni cevovod Chiew Larn, Tajska, s premerom 11,20 m in tlakom 12 barov, ki je še danes uvrščen med največje cevovode na svetu (Kravanja, 1988). Za to elektrarno je bil izdelan tudi takrat drugi največji razdelilnik na svetu dolžine 80,7 m, z vstopnim premerom cevi 11,20 m, tremi izstopnimi premeri 6,00 m, obremenjenimi z vodnim tlakom 12 barov. Konstruktor razdelilnika je bil prof. dr. Janez Kramar ((Kramar, 1985), (Kramar, 1990)). V Chiew Larnu je bilo uporabljeno japonsko jeklo SHT50A z natezno trdnostjo 500 N/mm^2.

Kar nekaj inženirjev raziskovalcev se danes ukvarja z optimizacijo cevovodov. Optimizacijo majhnih hidroelektrarn in cevovodov s celoštevilskim programiranjem zasledimo v viru (Tapia, 2018), optimizacija tunelov hidroelektrarn z genetskim algoritmom je opisana v (Fathi-Moghadam, 2013), optimizacijo cevovoda z ojačitvami so z enostavnim genetskim algoritmom in direktnim iskanjem predstavili v (Bai, 2013), optimizacijo armature cevovoda s programom ABAQUS so prikazali v (Wu, 2012), optimizacijo cevovoda nadalje obravnava vir (Gu, 2011), optimizacija cevovoda z genetskim algoritmom je obravnavana tudi v (Haghighipour, 2010), optimizacija prereza cevovoda in črpalne hidroelektrarne z evolucionarnimi algoritmi je opisana v (Anagnostopoulos, 2008), stabilnost cevovoda z nevtronskimi mrežami in simuliranim ohlajanjem so opisali v (Dong, 2008) in optimizacijski model jeklenega obbetoniranega cevovoda z uporabo ANSYS Optimization Toolbox je opisan v (Li, 2008).

S ciljem, da bi znižali izdelavne stroške jeklenih cevovodov, smo tudi mi izvedli optimizacijo, in sicer optimizacijo mase jeklene stene cevovoda in krožnih ojačitev. Optimizacijo smo vršili z nelinearnim programiranjem, NLP. Razvili/sprogramirali smo optimizacijski model jeklenega cevovoda z ojačitvami PIPEOPT-SR. V ta namen smo definirali namensko funkcijo mase jeklenega cevovoda, ki je podvržena (ne)linearnim pogojem nosilnosti in napetosti cevi. V model je treba podati vhodne podatke, kot so premer cevi, obtežba (notranji in zunanji vodni tlak), materialne karakteristike jekla (napetost tečenja) in dolžina cevnega odseka. V optimizaciji so potem izračunani optimalna masa cevi, debelina stene cevi, prerez krožnih ojačitev in njihovi medsebojni razmaki.



Slika 1 • **Jekleni cevovod s krožnimi ojačitvami.**

2 • MODELNA FORMULACIJA N L P

Ker so enačbe nosilnosti in napetosti jeklene konstrukcije visokotlačnega cevovoda nelinearne in nelinearna je tudi namenska funkcija mase cevovoda, smo optimiranje izvedli z nelinearnim programiranjem, NLP. Problem nelinearnega programiranja zapišemo v naslednji obliki:

$$\begin{aligned} &\min \quad z = f(\mathbf{x}) \\ &\text{p.p.:} \\ &\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ &\mathbf{g}(\mathbf{x}) \le \mathbf{0} \\ &\mathbf{A}\mathbf{x} \le \mathbf{a} \\ &\mathbf{x} \in \mathbf{X} = \{\mathbf{x} \mid \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n,\ \mathbf{x}^{LO} \le \mathbf{x} \le \mathbf{x}^{UP}\} \end{aligned} \qquad \text{(NLP)}$$

V zgornji formulaciji pomeni **x** vektor zveznih spremenljivk, definiranih znotraj svojih spodnjih mej in zgornjih mej $\mathbf{x}^{LO}$ in $\mathbf{x}^{UP}$. Nelinearna namenska funkcija je določena z izrazom $f(\mathbf{x})$. Le-ta je podvržena sistemu pogojnih (ne) enačb. Izraz $\mathbf{h}(\mathbf{x})=\mathbf{0}$ predstavlja sistem nelinearnih pogojnih enačb, izraz $\mathbf{g}(\mathbf{x})\le\mathbf{0}$ pa sistem nelinearnih pogojnih neenačb. Matrična neenačba $\mathbf{A}\mathbf{x}\le\mathbf{a}$ določa sistem linearnih enačb in neenačb. Vse funkcije $f(\mathbf{x})$, $\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})$ in $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})$ morajo biti nelinearne, zvezne in zvezno odvedljive.

Učinkovitejše metode rešujejo NLP problem z neposredno zadostitvijo Karush-Kuhn-Tuckerjevega pogoja, glej vire ((Karush, 1939), (John, 1948), (Kuhn, 1951)). Najpomembnejše metode, s katerimi rešujemo problem nelinearnega programiranja, so:

- metoda reduciranega gradienta (Reduced Gradient Method, RG), glej (Wolfe, 1967),
- posplošena metoda reduciranega gradienta (Generalized Reduced Gradient Method, GRG), glej (Abadie, 1969),
- razširjeni Lagrangian (Augmented Lagrangian, AL), glej ((Powell, 1969), (Hestenes, 1969)),
- zaporedno kvadratno programiranje (Successive Quadratic Programming, SQP), glej (Powell, 1978).

Komercialni računalniški programi za izračun problemov nelinearnega programiranja so NPSOL za SQP, MINOS za RG, programi GRG2, LSGRG, CONOPT za GRG in LANCELOT za AL itd.

3 • OPTIMIZACIJSKI MODEL PIPEOPT-SR

V skladu z opisano NLP modelno formulacijo smo za optimizacijo jeklenega cevovoda z ojačitvami zmodelirali optimizacijski model PIPEOPT-SR (PIPE OPTimization with Stiffener Rings). Model smo zapisali v višjem algebrajskem modelnem jeziku GAMS (General Algebraic Modelling System), glej (Brooke, 1988). Model sestavljajo vhodni podatki (skalarji), spremenljivke in namenska funkcija, ki je podvržena sistemu linearnih in nelinearnih pogojnih enačb ter neenačb.

Faktor varnosti za notranji tlak. Standard »SIST EN 1993-4-3:2007, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 4.-3. del: Cevovodi« predpisuje tri različne delne faktorje za obtežbo:

$\gamma_F = \gamma_{F1} = 1{,}39$ naravno (ruralno) okolje,

$\gamma_F = \gamma_{F2} = 1{,}50$ polurbano okolje brez protipoplavne obrambe,

$\gamma_F = \gamma_{F3} = 1{,}80$ polurbano okolje s protipoplavno obrambo.

Delni faktor varnosti odpornosti materiala je v SIST EN 1993-4-3:2007 določen kot $\gamma_M = 1{,}0$. Odločimo se za srednji delni faktor varnosti obtežbe $\gamma_F = 1{,}50$. Skupni faktor varnosti za notranji tlak potem znaša: $C_{ip} = \gamma_F \cdot \gamma_M = 1{,}50$, ki ga enakega določajo tudi C.E.C.T.-priporočila.

Faktor varnosti za zunanji tlak. Delna faktorja varnosti pri izračunu stabilnosti cevi na zunanji tlak sta definirana v standardu »SIST EN 1993-1-6:2007, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1.-6.del: Trdnost in stabilnost lupinastih konstrukcij«: $\gamma_F = 1{,}50$ in $\gamma_{M1} = 1{,}1$. Skupni faktor varnosti za zunanji tlak po Evrokodu tako znaša: $C_{ep} = \gamma_F \cdot \gamma_{M1} = 1{,}65$ (C_{ep} v C.E.C.T.-priporočilih znaša 1,60). Omeniti velja, da smo na konkretnem primeru visokotlačnega cevovoda Kozjak z investitorjem, Dravskimi elektrarnami Maribor, predvsem zaradi velikih premerov cevi, ki znašajo tudi več kot 4,0 m, in zaradi problematike varjenja jekel visokih trdnosti faktor varnosti za zunanji tlak definirali višje: $C_{ep} = 1{,}80$. Enačbe optimizacijskega modela so zapisane enako, kot jih definirajo C.E.C.T.-priporočila. Ker je faktor varnosti odpornosti materiala γ_M že zajet v skupnih faktorjih varnosti C_{ip} in C_{ep}, v enačbah modela ne nastopa projektna napetost tečenja $f_{y,d}$, pač pa samo napetost tečenja jekla f_y. Ostale napetosti in vsi drugi izrazi v modelu imajo enake nazive kot v C.E.C.T.-priporočilih.

Nepopolnosti. Pri dimenzioniranju jeklene cevne lupine na zunanji tlak moramo upoštevati nepopolnosti, tj. odstopanje dejanske krožnice izdelane cevi od idealne krožnice ter prazen razmak med jekleno cevjo in betonom. Visokotlačni cevovod je treba izdelati in vgraditi v skladu s predpostavljenimi nepopolnostmi, saj bi vsaka prekoračitev imela za posledico manjšo nosilnost. Po C.E.C.T.-priporočilih moramo pri dimenzioniranju cevi na zunanji tlak upoštevati naslednje tri nepopolnosti:

$\eta = 0.01R$ koeficient ovalnosti cevi ($\eta \le 0.01R$), kjer je R notranji radij cevi,

$U = 0.2e$ koeficient lokalnega radialnega odstopanja od idealne krožnice cevi ($U \le 0.2e$), kjer e predstavlja debelino stene cevi, zmanjšano za korozijski dodatek, in

$j/R = 1.0$ ‰ prazna vrzel med jekleno cevjo in okoliškim betonom ($j = 0.001R$).

Skalarji (vhodni podatki) v modelu so:

C_{ip}	faktor varnosti za notranji vodni tlak (-),
C_{ep}	faktor varnosti za zunanji vodni tlak (-),
cor	korozijski dodatek na jekleno pločevino (cm),
E	modul elastičnosti jekla (kN/cm^2),
$j_R = j/R$	razmerje med prazno vrzeljo med cevjo in okoliškim betonom j ter notranjim polmerom cevi R (-),
f_y	napetost tečenja jekla (kN/cm^2),
L_{sect}	dolžina odseka cevovoda (cm),
p_{in}	notranji vodni tlak (kN/cm^2),
p_{ex}	zunanji vodni tlak (kN/cm^2),
R	notranji polmer cevi (cm),
$u_e = U/e$	razmerje med največjo notranjo deviacijo cevi U in teoretično debelino stene cevi e (-),
$\varepsilon = \eta/R$	razmerje med največjim koeficientom ovalnosti cevi η (deviacija med idealno krožnico polmera cevi in radialno navzven deformirano ovalno cevjo) in notranjim polmerom cevi R (-)
φ	koeficient, ki definira najvišjo možno elastično napetost v jek-

lu (kjer še velja Hookov zakon) (-),

ν Poissonov koeficient (-),

ρ prostorninska masa jekla (kg/cm^3).

Spremenljivke optimizacijskega modela:

a_0 svetli razmak med stojinama ojačitve (cm),

A_0 površina prečnega prereza ojačitve (s sodelujočim delom stene cevi) (cm^2),

e teoretična debelina stene cevi *e=t-cor* (cm),

e_0 teoretična debelina stojine ojačitve (cm),

h_0 višina stojine ojačitve (cm),

I_0 vztrajnostni moment prereza ojačitve (cm^4),

L razmak med ojačitvami cevi (cm),

L_0 širina spodnje pasnice ojačitve – tj. sodelujoča širina stene cevi (cm),

$mass$ masa jeklenega cevovoda (stena cevi in ojačitve) (kg),

$p_{cr}^{L,min}$ manjši zunanji kritični tlak (kN/cm^2),

$p_{cr}^{L,pipe}$ zunanji kritični tlak v ovalni cevi med dvema ojačitvama (kN/cm^2),

$p_{cr}^{L,ring}$ zunanji kritični tlak v ojačitvi (kN/cm^2),

R_0 polmer do horizontalne težiščne osi ojačitve (cm),

t debelina stene cevi (cm),

te debelina stojine ojačitve (cm),

Y_0 razdalja med krajnim vrhom ojačitve in horizontalno težiščno osjo (cm),

α stabilizacijski faktor (-),

β faktor oslabitve gladke cevi zaradi splošne ovalnosti (izražen z η=0.01R) (-),

γ faktor oslabitve gladke cevi zaradi navzven radialno deformirane ovalne cevi (izražen z U>0,1e) (-),

σ_N normalna obodna napetost v steni cevi (kN/cm^2),

σ_{N0} normalna obodna napetost v ojačitvi (kN/cm^2),

$\sigma_{N0,min}$ manjša normalna obodna napetost (ki ustreza manjšemu zunanjemu kritičnemu tlaku $p_{cr}^{L,min}$) (kN/cm^2).

Namenska funkcija, enačba (1), predstavlja v optimizacijskem modelu maso odseka ojačanega cevovoda dolžine L_{sect}. Prvi izraz enačbe definira maso stene cevi, medtem ko drugi in tretji izraz predstavljata maso ojačitev, glej sliki 1 in 2.

$$mass = \pi \cdot t \cdot (2 \cdot R + t) \cdot \rho \cdot L_{sect} + 2\pi \cdot h_0 \cdot [2 \cdot (R + t) + h_0] \cdot e_0 \cdot \rho \cdot L_{sect} / L + \pi \cdot t \cdot [2 \cdot (R + t + h_0) + t] \cdot (a_0 + 2 \cdot e_0) \cdot \rho \cdot L_{sect} \quad (1)$$

Pogojne (ne)enačbe. V primeru, ko je cevovod obremenjen z notranjim vodnim tlakom, se jeklena cevna lupina radialno raztegne in nasloni na okoliški beton in kamenino. Prosta cev bi se v tem primeru vzdolžno skrčila. To krčenje preprečita okoliški beton in kamenina. Zato se poleg obodnih nateznih napetosti v steni lupine σ_θ pojavijo še vzdolžne natezne napetosti σ_x zaradi preprečene deformacije (kontrakcije). Zaradi nastalega dvodimenzionalnega napetostnega stanja so primerjalne napetosti v cevi σ_{eq} zmanjšane za 11 %. Projektna napetost v cevi ($C_{ip} \cdot \sigma_{eq}$) mora biti manjša od napetosti tečenja jekla f_y, kar je v modelu definirano s pogojno enačbo (2). Zmanjšana napetost v cevi σ_{eq}, Poissonov koeficient za jeklo ν in obodna napetost v steni lupine σ_θ so podani z enačbami (3) do (5).

$$C_{ip} \cdot \sigma_{eq} \le f_y \quad (2)$$

Kjer je:

$$\sigma_{ea} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_x \cdot \sigma_\theta} = \sqrt{(\nu \cdot \sigma_\theta)^2 + \sigma_\theta^2 - (\nu \cdot \sigma_\theta) \cdot \sigma_\theta} = 0{,}89\sigma_\theta \quad (3)$$

$$\nu = 0{,}3 \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = p_{in} \cdot R / e \quad (5)$$

Jekleni cevovod mora prenesti obtežbo zunanjega vodnega tlaka p_{ex}. Enačba (6), s katero preverimo stabilnost stene cevi med dvema krožnima ojačitvama, predstavlja izračun zunanjega kritičnega tlaka p_{cr} v ovalni cevi v skladu s priporočili C.E.C.T.

$$p_{cr}^{L,pipe} = \alpha \cdot \beta \cdot p_{cr}^{-i} \quad (6)$$

Pri tem je zunanji kritični tlak idealne (brez napak oblike) cevi brez ojačitev p_{cr}^{-i} definiran z enačbo (7).

$$p_{cr}^{-i} = \frac{E^*}{4}\left(\frac{e}{R+e}\right)^3 \quad (7)$$

Kjer je:

$$E^* = E / (1 - \nu^2) \quad (8)$$

Faktor oslabitve gladke cevi zaradi ovalnosti β je v skladu s (Kollbrunner, 1956) določen z enačbo (9) za največji možni koeficient ovalnosti cevi η=0,01·R.

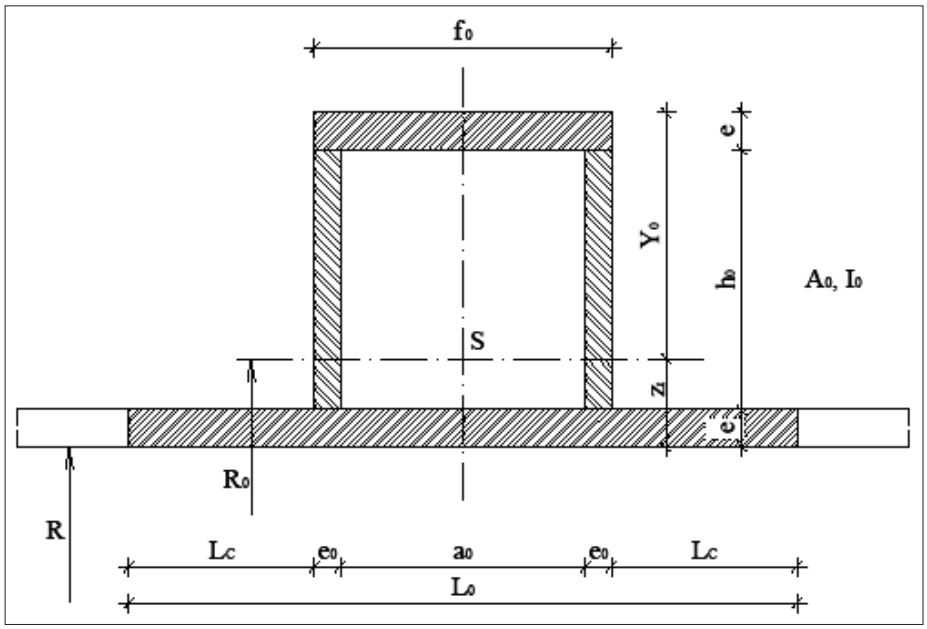
$$\beta = \frac{\gamma_{KM}}{2} \pm \sqrt{\frac{\gamma_{KM}^2}{4} - \upsilon} \quad (9)$$

$$\beta \le 1{,}0 \quad (10)$$

Kjer je:

$$\gamma_{KM} = \upsilon + 6\frac{\varepsilon}{\varphi_{KM}} + 1 \quad (11)$$

$$\upsilon = f_y \cdot \varphi_{KM} / p_0 \quad (12)$$



Slika 2 • **Prečni prerez krožne ojačitve.**

$$\varphi_{KM} = e / R \tag{13}$$

$$p_0 = \frac{E}{4\left(1-\nu^2\right)} \cdot \varphi_{KM}^3 \tag{14}$$

$$\varepsilon = \eta / R = 0{,}01 \tag{15}$$

Stabilizacijski faktor α je podan z enačbo (16). Ker so krožne ojačitve cevi v izvrtani hribini zalite z okoliškim betonom, so v betonu v svoji bočni smeri vpete in se ne morejo bočno zvrniti, lahko v skladu z določilom 8.4.2.1.a C.E.C.T.-priporočil računsko zmanjšamo razmake med krožnimi ojačitvami L. Ta zmanjšani razmak L_f izračunamo po enačbi (18).

$$\alpha = \frac{3{,}34}{\psi\sqrt{\varphi_{KM}}} + \frac{4}{9}\left(\frac{\pi^2}{\psi^2} - \frac{1}{2}\right) \tag{16}$$

Kjer je:

$$\psi = L_f / R \tag{17}$$

$$L_f = 0{,}8 \cdot (L\text{-}a_0) \tag{18}$$

Visokotlačni cevovodi, vgrajeni v izvrtane tunele v hribini, se zaradi večje varnosti obravnavajo brez sodelovanja okoliškega betona in hribine. Skladno s C.E.C.T.-priporočili se računajo kot samostojna jeklena konstrukcija. Zato je treba preveriti stabilnost krožnih ojačitev z enačbama (19) in (20), tj. z neenačbo C poglavja 8.4.2.2. priporočil C.E.C.T., kjer je σ_{N0} normalna obodna napetost v ojačitvi, $p_{cr}^{L,ring}$ pa je zunanji kritični tlak v ojačitvi.

$$0{,}58 \cdot \frac{Y_0}{R} \cdot \left(\sigma_{N0} + E\frac{j}{R_0}\right) \cdot \left[1 + \frac{\sigma_{N0}}{E} \cdot \frac{L}{L_0} \cdot \frac{A_0 \cdot R_0^2}{I_0 + \frac{L-L_0}{12} \cdot e^3}\right]^{3/2} \le \left(f_y - \sigma_{N0}\right) \cdot \left(1 - 0{,}23 \cdot \frac{R_0}{Y_0} \cdot \frac{f_y - \sigma_{N0}}{E}\right) \tag{19}$$

$$p_{cr}^{L,ring} = \sigma_{N0} \cdot \frac{A_0}{L_0 \cdot R_0} \cdot \left(1 + 0{,}175 \cdot \frac{R_0}{Y_0} \cdot \frac{f_y - \sigma_{N0}}{E}\right)^{-1} \tag{20}$$

Karakteristike prečnega prereza krožne ojačitve izračunamo z enačbami (21)-(29). Krožna ojačitev (slika 2) je v bistvu votli pravokotni jekleni prerez, pri čemer sta dve stojini in zgornja pasnica navarjene na jekleno steno cevi, ki s svojo sodelujočo širino L_0 računsko predstavlja spodnjo pasnico ojačitve.

$$e_0 = t_e - cor \tag{21}$$

$$L_c = 0{,}78\sqrt{R \cdot e} \tag{22}$$

$$L_0 = 2\left(L_c + e_0\right) + a_0 \tag{23}$$

$$f_0 = a_0 + 2e_0 \tag{24}$$

$$A_0 = L_0 \cdot e + 2h_0 \cdot e_0 + f_0 \cdot e \tag{25}$$

$$z_t = \left[L_0 \cdot e \cdot \frac{e}{2} + 2h_0 \cdot e_0 \cdot \left(e + \frac{h_0}{2}\right) + f_0 \cdot e \cdot \left(\frac{3e}{2} + h_0\right)\right] / A_0 \tag{26}$$

$$R_0 = R + z_t \tag{27}$$

$$Y_0 = 2e + h_0 - z_t \tag{28}$$

$$I_0 = \frac{L_0 \cdot e^3}{12} + L_0 \cdot e \cdot \left(\frac{e}{2} - z_t\right)^2 + 2 \cdot \frac{e_0 \cdot h_0^3}{12} + 2 \cdot h_0 \cdot e_0 \cdot \left(e + \frac{h_0}{2} - z_t\right)^2 + \frac{f_0 \cdot e^3}{12} + f_0 \cdot e \cdot \left(\frac{3e}{2} + h_0 - z_t\right)^2 \tag{29}$$

Normalna obodna napetost v ojačitvi σ_{N0} mora biti manjša od najvišje elastične napetosti v jeklu, zato v cevovodu velja Hookov zakon, kar izračunamo z enačbo (30).

$$\sigma_{N0} \le \varphi \cdot f_y \tag{30}$$

Največji projektni zunanji vodni tlak na cev ($C_{ep} \cdot p_{ex}$) mora biti manjši od zunanjega kritičnega tlaka v cevi $p_{cr}^{L,pipe}$ kakor tudi od zunanjega kritičnega tlaka v ojačitvi $p_{cr}^{L,ring}$. Pri tem izračunamo zunanji kritični tlak p_{cr}^{L}, pri katerem jeklena cev z ojačitvami še izkazuje svojo odpornost/stabilnost. Le-ta je po enačbi (31) določen kot manjša vrednost izmed obeh zunanjih kritičnih tlakov v cevi $p_{cr}^{L,pipe}$ in ojačitvi $p_{cr}^{L,ring}$. Zatem preverimo enačbo (32).

$$p_{cr}^{L} = min\left\{\begin{matrix} p_{cr}^{L,pipe} \\ p_{cr}^{L,ring} \end{matrix}\right\} \tag{31}$$

$$C_{ep} \cdot p_{ex} \le p_{cr}^{L} \tag{32}$$

Elastično obnašanje jeklenega materiala pri obtežbi zunanjega tlaka preverimo z enačbami (33)-(37), pri čemer je normalna obodna napetost v steni cevi σ_N definirana z enačbo (34), manjša normalna obodna napetost $\sigma_{N0,min}$, ki ustreza najmanjšemu zunanjemu kritičnemu tlaku $p_{cr}^{L,min}$, pa z enačbo (35).

$$\sigma_N \le \varphi \cdot \gamma \cdot f_y \tag{33}$$

$$\sigma_N = \frac{p_{cr}^{L} \cdot L \cdot R - \sigma_{N0,min} \cdot A_0}{\left(L - L_0\right) \cdot e} \tag{34}$$

$$\sigma_{N0,min} = \frac{p_{cr}^{L} \cdot L_0 \cdot R_0}{A_0} \tag{35}$$

$$\sigma_{N0,\min} \le \varphi \cdot f_y \tag{36}$$

$$\gamma = 1 - 3 \cdot p_{cr}^{L} \cdot \frac{R}{f_y \cdot e}\left(\frac{U}{e} - 0{,}1\right) \tag{37}$$

4 • OPTIMIZACIJA VISOKOTLAČNEGA CEVOVODA KOZJAK

Optimizacijski model PIPEOPT-SR smo uporabili pri optimizaciji visokotlačnega cevovoda črpalne hidroelektrarne Kozjak pri Mariboru. Bodoča elektrarna ima že izgrajeno akumulacijsko jezero velikosti 3 milijone m^3 vode, kjer je načrtovana elektrarna z dvema Francisovima reverzibilnima turbinama moči 2x220 MW. Strokovnjaki IBE Ljubljana so leta 2011 izdelali idejni projekt elektrarne in izvedli osnovno dimenzioniranje poševnega cevovoda (Močnik, 2011). Načrtovanih je bilo več variant jeklenega visokotlačnega cevovoda, obremenjenega z vodnim tlakom več kot 100 barov, dolžine do 2400 m in več. Za varianto 1 so npr. načrtovali porabo 12751,98 ton jekla kvalitete S 460. Varianto vertikalnega visokotlačnega cevovoda so načrtovali leta 2012 (Močnik, 2012).

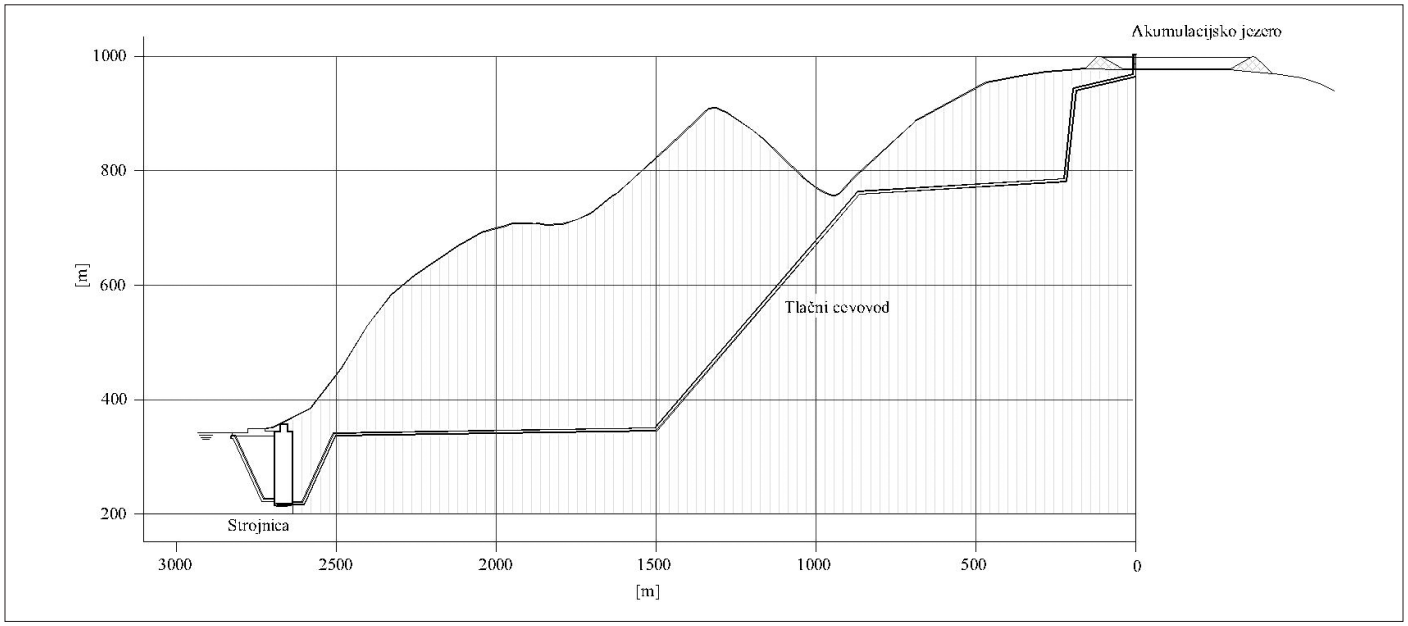
Na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru (danes je to Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo, FGPA UM) smo v letih 2011–2012 izvedli optimizacijo vseh predvidenih variant poševnega visokotlačnega cevovoda (Kravanja, 2011). Na koncu smo optimirali še vertikalne variante cevovoda (Kravanja, 2012). Poleg optimizacije cevovoda smo izdelali navodila za projektante. Za reševanje optimizacijskega problema smo uporabili nelinearno programiranje (NLP). Optimirali smo variante z gladko jekleno cevjo brez ojačitev, glej (Kravanja, 2015), kakor tudi variante cevovodov s krožnimi ojačitvami. Namen optimizacije je bil izračunati optimalno maso variant cevovoda, pri čemer bi dobili tudi vse potrebne dimenzije cevi in ojačitev. Podobno kot v viru (Kravanja, 2015) tudi v tem članku predstavljamo optimizacijo dveh variant:

- poševni cevovod - varianta 1, tj. cevovod z najdaljšo dolžino (optimalna masa gladke cevi brez ojačitev znaša 9967,41 tone jekla S 690 (Kravanja, 2015)) in
- vertikalni cevovod, tj. cevovod z najvišjim zunanjim tlakom (optimalna masa gladke cevi brez ojačitev je 3165,34 tone jekla S 690 (Kravanja, 2015)).

4.1 Optimizacija variante poševnega visokotlačnega cevovoda z ojačitvami – varianta 1

Varianta 1 (z asinhronim generatorjem) ima predvideno dolžino visokotlačnega cevovoda 2471,03 m, glej sliko 3. Ker se bosta na vrhu dva vertikalna odseka dolžin po 67,97 m izdelala iz stene cevi z najmanjšo možno debelino, smo optimirali samo preostalo dolžino cevovoda L=2335,09 m.

V izračunu smo upoštevali jeklo visoke trdnosti, drobnozrnate strukture in dobre varivosti, poboljšano jeklo kvalitete S 690Q. Za omenjeno varianto smo optimirali 6 dolžinskih odsekov cevi dolžin od 144,10 m do 619,78 m z notranjimi radiji R=1,95 m (D=3,90 m) do R=2,15 m (D=4,30 m), z največjim notranjim vodnim tlakom 102,830 bara in največjim zunanjim vodnim tlakom 46,388 bara, glej preglednico 1. Nadaljnji vhodni podatki, ki smo jih vstavili v optimizacijski model PIPEOPT-SR, vsebujejo vrednosti naslednjih konstant: C_{ip}=1,5, C_{ep}=1,8, cor=0,2 cm, f_y=69,0 kN/cm^2 (S 690Q, t ≤ 50 mm), f_y=65,0 kN/cm^2 (S 690Q, t > 50 mm), E=21000 kN/cm^2, ν=0,3, φ=0,7, j_R=j/R=0,001, $\varepsilon=\eta/R$=0,01, $u_e=U/e$=0,2 in ρ=0,00785 kg/cm^3.

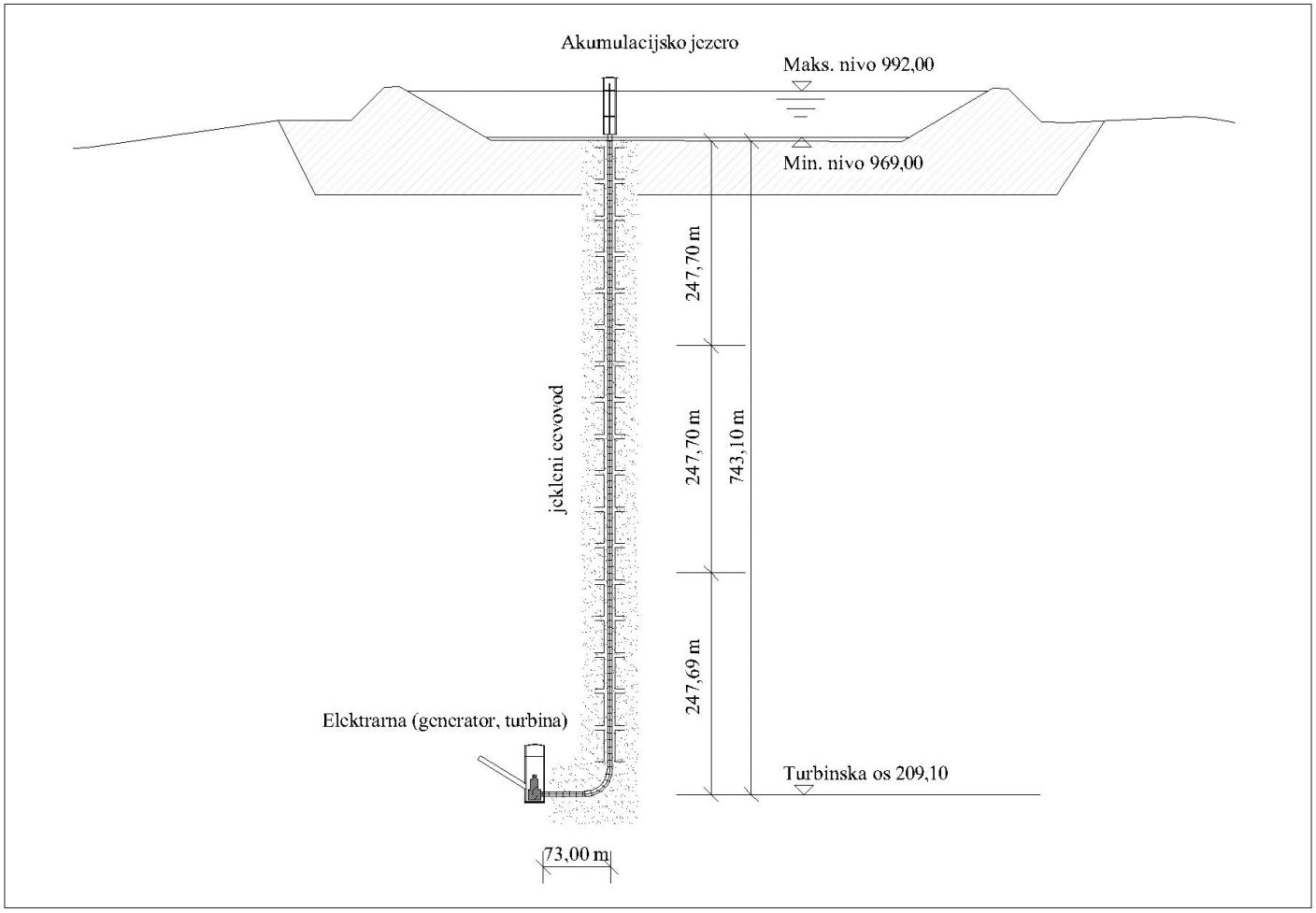


Slika 3 • **Prerez skozi poševni visokotlačni cevovod Kozjak.**

Optimizacijski model PIPEOPT-SR smo za 6 različnih cevnih odsekov variante 1 uporabili 6-krat in izvedli 6 izračunov, glej preglednico 1.

x (m)	p_{in} (m)	p_{ex} (m)	D (m)	t (mm)	ΔL (m)	ΣG (kg)
0,00	1028,30	150,00	3,9	41	144,10	cev: **574 214**
108,15	926,19	200,00	3,9	37	356,87	cev: **1 282 025**
465,00	885,62	348,53	3,9	36	465,02	cev: 1 624 983 rebra: 147 007 skupaj: **1 771 990**
930,00	832,76	463,88	4,1	45	363,66	cev: 1 672 831 rebra: 160 086 skupaj: **1 832 917**
1205,00	589,65	369,28	4,1	36	385,66	cev: 1 416 143 rebra: 161 487 skupaj: **1 577 630**
1480,00	293,91	42,06	4,3	15	619,78	cev: 989 302 rebra: 83 941 skupaj: **1 073 243**
Jekleni cevovod skupaj:					**2335,09**	**8 112 019**

Preglednica 1 • **Optimalna masa poševnega cevovoda z ojačitvami Kozjak – varianta 1.**



Slika 4 • **Prerez skozi vertikalni visokotlačni cevovod Kozjak.**

Za vsak odsek smo v model v modelnem jeziku GAMS vstavili vse potrebne vhodne podatke in definirali začetne vrednosti spremenljivk ter njihove spodnje in zgornje meje. Zatem smo izvedli optimizacijo, ki smo jo vršili z optimizacijskim podprogramom GAMS/CONOPT2 (Drudd, 1994), ki NLP računa po metodi reduciranih gradientov. Model PIPEOPT-SR vsebuje 809 vrstic, 16 skalarjev, 23 spremenljivk, 28 osnovnih pogojnih (ne)enačb, 23 dodatnih neenačb mej spremenljivk in 2 ukazna stavka. Ker optimizacijski model ni obsežen, je znašal računski čas optimizacije odseka cevi manj kot 1 sekundo. Delovni čas, ki še vključuje vnos podatkov in interpretacijo rezultatov, je znašal 10 minut. Skupni delovni čas izračuna celotnega cevovoda z vsemi odseki je tako znašal samo 1 uro.

Optimalni rezultat predstavlja najmanjšo izračunano možno maso 8112,02 tone jekla visokotlačnega cevovoda z ojačitvami. Dobljene so tudi bile potrebne debeline t jeklene stene 15 mm do 45 mm in dimenzije krožnih ojačitev (reber), glej preglednico 1. Ugotovili smo, da prvima dvema cevnima odsekoma (x=0,00 m in x=108,15 m) ni bilo treba dodajati ojačitev, saj je potrebna debelina cevi z ojačitvami znašala enako kot v primeru gladke cevi (brez ojačitev). To se je zgodilo zato, ker se na teh dveh odsekih pojavi največji notranji vodni tlak in relativno majhen zunanji tlak, ki ni bil merodajen. Pripomniti velja, da smo cevovodu s privaritvijo krožnih ojačitev zmanjšali maso jekla za 18,6 %, saj optimirana masa gladke cevi (brez ojačitev), glej vir (Kravanja, 2015), znaša 9967,41 tone jekla.

4.2 Optimizacija variante vertikalnega visokotlačnega cevovoda z ojačitvami

Dolžina vertikalnega visokotlačnega cevovoda znaša 784,06 m, glej sliko 4. Optimizacijo te variante smo prikazali v tudi viru (Kravanja, 2018), kjer pa nismo izvedli primerjave dobljene mase z maso gladkega cevovoda brez ojačitev. Tudi pri tej varianti smo predvideli jeklo visoke trdnosti S 690Q. Za omenjeno varianto smo optimirali 16 dolžinskih odsekov cevi (5 v spodnjem delu, 5 v srednjem delu in 6 v zgornjem delu cevi) dolžin od 9,00 m do 81,00 m z notranjimi radiji R=1,60 m (D=3,20 m) do R=2,00 m (D=4,00 m), z največjim notranjim vodnim tlakom 94,920 bara in največjim zunanjim vodnim tlakom 78,290 bara, glej preglednico 2. V optimizacijski model PIPEOPT-SR smo vstavili še naslednje konstante: C_{ip}=1,5, C_{ep}=1,8, cor=0,2 cm, f_y=69,0 kN/cm^2 (S 690Q, t ≤ 50 mm), f_y=65,0 kN/cm^2 (S 690Q, t > 50 mm), E=21000 kN/cm^2, ν=0,3, φ=0,7, j_R=j/R=0,001, ε=η/R=0,01, u_e=U/e=0,2 in ρ=0,00785 kg/cm^3.

Zgornje vhodne podatke smo v model PIPEOPT-SR vstavili 16-krat za 16 različnih cevnih odsekov. Zatem smo s podprogramom GAMS/CONOPT2 izvedli 16 NLP-optimizacij. Celotni delovni čas izračuna cevovoda vseh 16 odsekov je znašal okoli 3 ure. Izračunali smo maso jekla vertikalnega cevovoda z ojačitvami v višini 2592,55 tone. Izračunali smo tudi optimalne debeline stene cevi t od 8 mm do 61 mm in prereze ojačitev (reber), glej preglednico 2. Visokotlačnemu cevovodu smo s privaritvijo krožnih ojačitev zmanjšali maso jekla za 18,1 %, saj optimirana masa gladke cevi (brez ojačitev), glej vir (Kravanja, 2015), znaša 3165,34 tone jekla.

x (m)	prerez	p_{in} (m)	p_{ex} (m)	D (m)	t (mm)	ΔL (m)		jeklo ΣG (kg)	
0,00	1	949,20	782,90	3,20	62	81,00	S 690	cev: rebra: skupaj:	403 998 23 944 **427 942**
81,00	4	883,00	733,90		58	54,00		cev: rebra: skupaj:	251 647 15 501 **267 148**
135,00	6	817,60	679,90		54	54,00		cev: rebra: skupaj:	234 005 15 168 **249 173**
189,00	8	752,10	625,90		47	54,00		cev: rebra: skupaj:	203 233 15 105 **218 338**
243,00	10	686,70	571,90		43	36,66		cev: rebra: skupaj:	126 074 10 348 **136 422**
Spodnji del:									**1 299 023**
279,66	11	642,20	535,20	3,40	43	54,00	S 690	cev: rebra: skupaj:	197 160 16 687 **213 847**
333,66	13	576,70	481,20		39	54,00		cev: rebra: skupaj:	178 612 15 827 **194 439**
387,66	15	511,30	427,20		35	54,00		cev: rebra: skupaj:	160 106 15 635 **175 741**
441,66	17	445,80	373,20		31	54,00		cev: rebra: skupaj:	141 643 15 477 **157 120**
495,66	19	380,40	319,20		27	31,70		cev: rebra: skupaj:	72 336 8 144 **80 480**
Srednji del:									**821 627**
527,36	20	341,90	287,50	3,60	25	54,00	S 690	cev: rebra: skupaj:	120 687 22 210 **142 897**
581,36	22	276,50	233,50		21	54,00		cev: rebra: skupaj:	101 265 14 925 **116 190**
635,36	24	211,00	179,50		17	54,00		cev: rebra: skupaj:	81 886 15 282 **97 168**
689,36	26	145,60	125,50		12	54,00		cev: rebra: skupaj:	57 722 16 349 **74 071**
743,36	28	78,10	69,50		8	31,70		cev: rebra: skupaj:	22 565 10 020 **32 585**
775,06	29	39,80	37,80	4,00	8	9,00		cev: rebra: skupaj:	7 116 1 869 **8 985**
Zgornji del:									**471 896**
Jekleni cevovod skupaj:									**2 592 546**

Preglednica 2 • **Optimalna masa vertikalnega cevovoda z ojačitvami Kozjak.**

5 • ZAKLJUČEK

V prispevku smo predstavili optimizacijo jeklenega cevovoda s krožnimi ojačitvami, kakršne se uporabljajo pri gradnji visokotlačnih cevovodov. Omenjene ojačitve navarimo na jekleno cev povsod tam, kjer je cev obremenjena z znatnim zunanjim vodnim tlakom. Optimizacijo smo opravili z nelinearnim programiranjem, NLP. V ta namen smo razvili optimizacijski model, kjer je namenska funkcija mase jeklene konstrukcije cevovoda podvržena pogojnim (ne)enačbam nosilnosti in napetosti. Upoštevana sta dva obtežna primera: notranji vodni tlak z upoštevanjem vodnega udara padajoče vode iz akumulacijskega jezera v prazno cev in zunanji vodni tlak, ki je enak višini podtalnice – terena nad cevjo. Pogojne (ne)enačbe so definirane v skladu s priporočili za visokotlačne cevovode C.E.C.T. V modelu smo definirali enačbe odpornosti cevi na notranji vodni tlak, kjer smo upoštevali zmanjšane napetosti v cevi pri nastopu dvoosnega napetostnega stanja zaradi preprečene kontrakcije. Nadalje smo definirali enačbe stabilnosti stene cevi med dvema krožnima ojačitvama in enačbe stabilnosti krožnih ojačitev na zunanji vodni tlak.

Na koncu članka smo prikazali optimizacijo jeklene cevi z ojačitvami visokotlačnega cevovoda črpalne hidroelektrarne Kozjak pri Mariboru. Optimirali smo dve varianti, in sicer poševni in vertikalni cevovod z ojačitvami. Prvi cevovod (varianta 1), to je poševni cevovod z ojačitvami, je dolg 2471,03 m, načrtovan z notranjimi premeri od 3,90 m do 4,30 m in obremenjen z največjim notranjim vodnim tlakom 102,830 bara ter največjim zunanjim vodnim tlakom 46,388 bara. Za ta cevovod smo izračunali optimalno maso 8112,02 tone jekla S 690Q. Za drugo varianto, to je vertikalni cevovod z ojačitvami, dolžine 784,06 m, premerov 3,20 m do 4,00 m, obremenjen z največjim notranjim vodnim tlakom 94,920 bara in največjim zunanjim vodnim tlakom 78,290 bara, smo izračunali optimalno maso 2592,55 tone jekla S 690Q. Rezultati optimizacije pokažejo, da če jekleni gladki cevi (brez ojačitev) visokotlačnega cevovoda Kozjak privarimo krožne ojačitve, bistveno povečamo stabilnost konstrukcije na zunanji tlak in zmanjšamo maso jekla za več kot 18 %.

6 • LITERATURA

Abadie, J., Carpenter, J., Generalization of the Wolfe reduced gradient method to the case of nonlinear constraints, Optimization, New York: Academic Press, 37–47, 1969.

Amstutz, E., Das Einbeulen von Schacht- und Stollenpanzerungen, Schweizerische Bauzeitung 68

(9), 102–105, 1950.

Amstutz, E., Das Einbeulen von vorgespannten Schachtund Stollenpanzerungen, Schweizerische Bauzeitung 71 (16), 229–231, 1953.

Anagnostopoulos, J. S., Papantonis, D. E., Simulation and size optimization of a pumped-storage power plant for the recovery of wind-farms rejected energy, Renewable energy 33 (7), 1685–1694, 2008.

Bai, X. L., Jia, Q. P., Su, H. L., Optimal Design of the Stiffener Penstock Structure in a Hydropower Station, Civil engineering, architecture and sustainable infrastructure II, pts 1 and 2, Applied Mechanics and Materials 438–439, 561–564, 2013.

Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., GAMS - A User's Guide, Scientific Press, Redwood City, CA, 1988.

C.E.C.T., Recommendations for the design, manufacture and erection of steel penstocks of welded construction for hydro electric installations, European Committee for boilermaking and kindred steel structures, Prepared by the »Penstock« Section, 1979.

Dong, W. S., Tang, K. D., Hou, X. M., Liu, X. M., Research on the stability problem of hydroelectric station penstock under external pressure, 2008 International symposium on intelligent information technology application, vol II, Proceedings, IEEE Computer Soc, Los Alamitos, CA, 508-+, 2008.

Drudd, A. S., CONOPT – A Large-Scale GRG Code, ORSA Journal on Computing 6 (2), 207–216, 1994.

Fathi-Moghadam, M., Haghighipour, S., Samani, H. M. V., Design-Variable Optimization of Hydropower Tunnels and Surge Tanks Using a Genetic Algorithm, Journal of water resources planning and management-ASCE 139 (2), 200-208, 2013.

Gu, H., Yan, G. H., Analysis on Dynamic Response and its optimized design of Penstock and Expansion Joint Structure in Hydropower Station, Advanced building materials, pts 1-4, Advanced Materials Research 250-253 (1-4), 2892–2896, 2011.

Haghighipour, S., Fathi-Moghadam, M., Optimization of hydropower conveyance systems, Journal of food agriculture & environment 8 (2), 1093–1096, 2010.

Hestenes, M. R., Multiplier and gradient methods, J. Optim. Theory Appl. 4, 303–320, 1969.

John, F., Extremum problems with inequalities as subsicliarv conditions, Studies and Essays presented to Richard Courant on his 60th birthay, New York: Interscience, 187–204, 1948.

Karush, W., Minima of functions of several variables with inequalities as side conditions, Department of Mathematics, University of Chicago, Chicago, 1939.

Kollbrunner, C. F., Milosavljević, S., Beitrag zur Berechnung von auf Ausendruck beanspruchten kreiszylindrischen Rohren, Verlag Leemann, Zürich, 1956.

Kramar, J., Računalniško podprto snovanje razdelilnih delov tlačnih cevovodov: odpravljanje ozkih grl v konstrukcijskem procesu, Strokovni bilten 2 (2), 31–35, 1985.

Kramar, J., Raztresen, J., Bradač, J., Ocepek, M., The design and construction of the Chiew Larn penstock system, International water power & dam construction 42 (7), 32–35, 1990.

Kravanja, S., Faith, Š., Raztresen, J., Zelenko, B., Bedenik, B., Visokotlačni cevovod, jeklena obloga in razdelilnik za hidroelektrarno Chiew Larn na Tajskem, Gradbeni vestnik 37 (4/5/6), 86–90, 1988.

Kravanja, S., The optimization of penstock with the recommendations for the design of steel liner and the collaboration of the rock, The recommendations for the dimensioning and optimization of steel penstock, (Optimizacija cevovoda z izhodišči za načrtovanje jeklene obloge in sodelovanja hribine, Izhodišča za dimenzioniranje in optimizacijo jeklenega cevovoda), Kozjak PSP, Faculty of Civil Engineering, University of Maribor, 2011.

Kravanja, S., The optimization of penstock with the recommendations for the design of steel liner and the collaboration of the rock, Variant the Verical penstock, The recommendations for the dimensioning and optimization of steel penstock, (Optimizacija cevovoda z izhodišči za načrtovanje jeklene obloge in sodelovanja hribine, Varianta vertikalni cevovod – kaverna, Izhodišča za dimenzioniranje in optimizacijo jeklenega cevovoda), Kozjak PSP, Faculty of Civil Engineering, University of Maribor, 2012.

Kravanja, S., Optimization of steel penstock in a bored tunnel, High performance and optimum design of structures and materials, International Conference on High performance and optimum design of structures and materials, HPSM/OPTI 2014, WIT transactions on the built environment 137, WIT Press, Southampton, 337-345, 2014.

Kravanja, S., Optimizacija jeklene gladke stenske obloge visokotlačnega cevovoda, Gradbeni vestnik 64, 280–286, 2015.

Kravanja, S., Optimization of a steel penstock with stiffener rings, E-GFOS 9 (17), 64-73, 2018.

Kuhn, H. W., Tucker, A. W., Nonlinear programming, Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley: University of California Press, 481–492, 1951.

Li, H. W., Ning, H. M., Yang, Z. S., The Optimal Design Model of Steel-lined Reinforced Concrete Penstock Based on ANSYS, Proceedings of first international conference of modelling and simulation, vol VI: Modelling and simulation in architecture, civil engineering and materials, 31–35, 2008.

Močnik, I., Kimovec, J., Penstock dimensioning, 3. civil construction design, Penstock, Kozjak PSP, IBE Ljubljana, 2011.

Močnik, I., Technical Report, 3. civil construction design, 3/18 Penstock – cavern type, Kozjak PSP, IBE Ljubljana, 2012.

Powell, M. J. D., A method for nonlinear constraints in minimization problems, Optimization, New York: Academic Press, 238–298, 1969.

Powell, M. J. D., A fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculations, Proceedings 1977 Dundee Conference on Numerical Analysis, Lecture Notes in Mathematics, Belin: Springer-Verlag, 1978.

SIST EN 1993-1-6:2007, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij -1-6.del: Trdnost in stabilnost lupinastih konstrukcij, 2007a.

SIST EN 1993-4-3:2007, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij -4-3.del: Cevovodi, 2007b.

Tapia, A., Millan, P., Gomez-Estern, E., Integer programming to optimize Micro-Hydro Power Plants for generic river profiles, Renewable energy 126, 905–914, 2018.

Timoshenko, S., Theory of plates and shells, 1st edition, McGraw-Hill Book Company, New York and London, 1940.

Wolfe, P., Methods of nonlinear programming, Nonlinear Programming, Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 97–131, 1967.

Wu, H. L., Du, X. F., Qin, S. H., Li, Y., Li, Q., Influence of Concrete Tension Softening Properties on the Steel-liner Reinforced Concrete Penstock, Applied mechanics and materials I, pts 1-3, Applied Mechanics and Materials 275–277, 1544-+, 2012.

NOVI DIPLOMANTI

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Klemen Penca, Vpliv parametrov na ceno parametriziranih standardnih postavk za gradbeno obrtniška dela, mentor doc. dr. Aleksander Srdić; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=111321

Nina Brgant, Tehnologija gradnje proizvodno-skladiščnega objekta v Novem mestu, mentor doc. dr. Andrej Kryžanowski; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=111008

Jernej Koretič, Analiza pogodbenega terminskega plana, njegova korekcija in prikaz dejanskega poteka izvedbe, mentorica prof. dr. Jana Šelih, somentor doc. dr. Aleksander Srdić; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=111016

Aljaž Frank, Primerjava natezne trdnosti in sprijemnosti z betonom med jekleno in bazaltno armaturo, mentor doc. dr. Drago Saje; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=111010

Tilen Kuzman, Izvedba protipoplavnih ukrepov v Savinjski dolini, mentor doc. dr. Andrej Kryžanowski, somentorja izr. prof. dr. Dušan Žagar in Nina Humar; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=111012

Luka Končan, Vpliv gradnje cevovodov pod prometno infrastrukturo na promet in okolje, mentor viš. pred. mag. Robert Rijavec; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=111325

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Tajda Božič, Učinkovitost parcialnih energijskih ukrepov prenove starejše meščanske stavbe in njihovi vplivi na notranje okolje, mentor doc. dr. Mitja Košir, somentor asist. Luka Pajek; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110711

Lenart Hostnik, Variante priključka lokalne ceste v Črnem Potoku na državno cesto v občini Šmartno pri Litiji, mentor doc. dr. Peter Lipar; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110085

Urška Ošep, Prometna ureditev Ljubnega ob Savinji po načelu skupnega prometnega prostora, mentor doc. dr. Peter Lipar; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110094

Katja Arh, Dimenzioniranje sestavljenih lesenih stebrov, mentor doc. dr. Jože Lopatič; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110725

Maruša Strmec, Nova prometna ureditev Črnomlja, mentor doc. dr. Peter Lipar; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110726

Veronika Pučnik, Posebnosti projektiranja konstrukcijskih elementov iz nerjavnih jekel, mentor doc. dr. Primož Može; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110721

Lea Tori, Analiza cestnega odseka R1 - 215/1162 Slovenska vas – Puščava, mentor doc. dr. Tomaž Maher, somentorica asist. dr. Irena Strnad; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110713

Gjorgjija Pandev, Potencial uporabe koruznega stržena kot toplotno izolacijskega materiala, mentor prof. dr. Vlatko Bosiljkov, somentor asist. dr. David Antolinc; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110963

Luka Naumovski, Vlažnost v času gradnje večetažnih lesenih konstrukcij z uporabo križno lepljenih plošč, mentor doc. dr. Jože Lopatič; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=111329

Luka Braz, Toplotna izolacija iz netkanega odpadnega tekstila, mentor prof. dr. Vlatko Bosiljkov, somentor asist. dr. David Antolinc; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=111101

Neža Gošte, Vpliv vira dolomitnega agregata na lastnosti samozgoščevalnega betona, mentorica prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, somentorica asist. dr. Petra Štukovnik; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110959

Gregor Klobčar, Prometna analiza območja Novi trg v Kamniku, mentor doc. dr. Tomaž Maher, somentor asist. dr. Rok Marsetič; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110712

Denis Pirnat, Prenova ovoja enodružinske hiše v Podgorju pri Slovenj Gradcu, mentorica doc. dr. Mateja Dovjak, somentor asist. dr. David Antolinc; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=111007

Jani Partikov, Primerjava metod za dimenzioniranje tlačno in upogibno obremenjenih jeklenih elementov, mentor doc. dr. Primož Može; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=111015

Eva Filipčič, Analiza strižne nosilnosti sodobne zidovine ob upoštevanju predlaganih sprememb za Evrokod 6, mentor prof. dr. Vlatko Bosiljkov, somentor asist. Martin Klun; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110456

Miha Remec, Analiza nosilnosti stavbe Stare tehnike, mentor prof. dr. Vlatko Bosiljkov, somentor asist. dr. David Antolinc; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110962

Tara Subotić, Strokovne podlage za izvajanje zemljiške politike v občini Sežana, mentorica izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110706

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Agata Pivk, Strižne obremenitve poplavnih območij ob Selški Sori pri visokovodnih dogodkih, mentor prof. dr. Franc Steinman, somentor doc. dr. Gašper Rak; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110229

Matej Lahne, Primerjava popisnih količin večstanovanjske stavbe s pomočjo informacijskega modela, mentor doc. dr. Matevž Dolenc, somentor asist. dr. Robert Klinc; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110707

Ivo Ušaj, Vpliv valov zaradi plovbe na obremenitve in stabilnost brežin, mentor izr. prof. dr. Dušan Žagar; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110109

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Doron Hekič, Eksperimentalna analiza koeficienta sunka pri prometni obremenitvi, mentor prof. dr. Goran Turk, somentor doc. dr. Aleš Žnidarič; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110965

Rok Morgan, Pregled požarov v Sloveniji v obdobju od 2005 do 2018, mentor izr. prof. dr. Tomaž Hozjan, somentor prof. dr. Goran Turk; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110966

Antonio Janevski, Potresni odziv armiranobetonskih mostov s pomanjkljivo prečno armaturo stebrov, mentor doc. dr. Matija Gams, somentorica prof. dr. Tatjana Isaković; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=109753

Luka Gradišar, Priložnosti generativnega pristopa k načrtovanju stavb, mentor prof. dr. Žiga Turk, somentor asist. dr. Robert Klinc; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110265

Andrej Veškovo, Potresna analiza in projektiranje izbranih konstrukcijskih elementov armiranobetonske stavbe s povezanimi stenami, mentor prof. dr. Matjaž Dolšek, somentor asist. dr. Anže Babič; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110258

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM STAVBARSTVO

Valentina Lesjak, Določitev vpliva nekontaktne fasadne ozelenitve na toplotni odziv stavbe s pomočjo eksperimentalnih meritev, mentor doc. dr. Mitja Košir, somentor asist. Luka Pajek; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110964

Urša Mrhar, Analiza in predlog prenove obstoječe stavbe s stališča potresne odpornosti in energijske učinkovitosti, mentor prof. dr. Matjaž Dolšek, somentorja asist. dr. Anže Babič in doc. dr. Mitja Košir; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110960

Martin Boncelj, Analiza integracij 5D BIM: primer Osnovne šole Litija, mentor doc. dr. Tomo Cerovšek; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=109751

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO GRADBENIŠTVO

Urban Repič, Meritve temperatur v betonih z uporabo optičnih kablov, mentor doc. dr. Andrej Kryžanowski, somentor doc. dr. Gregor Trtnik; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110715

Dean Melihen, Lastnosti mlekarskih odpadnih voda za pridobivanje bioplina, mentorica doc. dr. Sabina Kolbl Repinc, somentor izr. prof. dr. Blaž Stres; https://repozitorij.uni-lj.si/Iskanje.php?lang=slv

Klemen Zimic, Analiza dinamike premeščanja plavin na odseku akumulacije HE Doblar, mentor doc. dr. Simon Rusjan, somentor prof. dr. Matjaž Mikoš; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110391

Maja Jelen, Hidrološka analiza kraških izvirov v Sloveniji, mentor doc. dr. Nejc Bezak, somentor prof. dr. Matjaž Mikoš; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110377

Katarina Lavtar, Vrednotenje ustreznosti enovitih hidroloških modelov za primer porečja Save, mentorica izr. prof. dr. Mojca Šraj, somentor doc. dr. Nejc Bezak; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110413

Maja Matič, Primerjava dveh metod za analizo slik za določitev zrnavosti grobih agregatov in sedimentov, mentor prof. dr. Matjaž Mikoš, somentor doc. dr. Nejc Bezak; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110383

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN ARHITEKTURO

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Študij so z diplomskim izpitom zaključili:
Jan Antolič
Urška Červan
Lara Fažon
Gjani Hadji Mustafa
Aljaž Levstik
Jana Perša

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Domagoj Cipurić, Prometno varnostna analiza s predlogom rekonstrukcije štirikrakega križišča v mestu Karlovac, mentor red. prof. dr. Tomaž Tollazzi, somentor doc. dr. Marko Šoštarić; https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=74932&lang=slv

Jan Jelenc, Ukrepi za prometno varno načrtovanje cest in opremljanje obcestja s poudarkom na motoristih, mentor red. prof. dr. Tomaž Tollazzi; https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=74571&lang=slv

Sebastijan Kelc, Raziskava BuildingSMART IFC Bridge in evalvacija Allplan Bridge na primeru informacijskega modela mostu Marija Gradec, mentor izr. prof. dr. Andrej Tibaut, somentor Gregor Kokot; https://dk.um.si/info/index.php/slo/

Adriana Novak, Analiza možnih rešitev rekonstrukcije maloprometne ceste - primer ceste v Šenkovcu, mentor izr. prof. dr. Marko Renčelj; https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=74839

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN ARHITEKTURO – EKONOMSKO POSLOVNA FAKULTETA

INTERDISCIPLINARNI ŠTUDIJ GOSPODARSKEGA INŽENIRSTVA

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM - SMER GRADBENIŠTVO

Študij sta z diplomskim izpitom zaključila:
Elvis Zadravec
Gašper Žvanut

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM- SMER GRADBENIŠTVO

Andreja Kebler, Toplotne izgube, analiza stroškov in finančna upravičenost prenove stanovanjske hiše, mentorici doc. dr. Anita Praprotnik Brdnik - FGPA in red. prof. dr. Karin Širec - EPF; https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=74671

Rubriko ureja • Eva Okorn, gradb.zveza@siol.net

KOLEDAR PRIREDITEV

20.11.2019

5. strokovna konferenca siBIM 2019 - BIM v praksi
Brdo pri Kranju, Slovenija
http://sibim.si/dogodki/

21.-22.11.2019

12. mednarodna konferenca o predorih in podzemnih objektih – 12th International Tunneling and Underground Structures Conference
Ljubljana, Slovenija
www.ita-slovenia.si/12-konferenca/

28.-29.11.2019

17. kolokvij - Asfalti, bitumni in vozišča
Bled, Slovenija
www.zdruzenje-zas.si/kolokvij/

29.11.2019

30. Mišičev vodarski dan
Maribor, Slovenija
http://www.vgp-drava.si/30-jubilejni-misicev-vodarski-dan-2019/

17.-19.12.2019

JIC Smart Cities – 1st Joint International Conference on Design and Construction of Smart City Components
Kairo, Egipt
www.jicsmartcities.com/

7.-9.4.2020

S.ARCH 2020 — the 7th International Conference on Architecture and Built Environment with AWARDs
Tokio, Japonska
www.s-arch.net/

28.-29.4.2020

AMCONF 2020 - Advanced Materials for Construction
Manchester, Anglija
www.amconf.com/

11.-14.5.2020

14th Congress INTERPRAEVENT 2020
Bergen, Norveška
www.interpraevent.at/?tpl=termine.php&kategorie=1&id=187

12.-14.5.2020

2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering
Perth, Avstralija
www.slopestability2020.com/

9.-11.6.2020

BEYOND 2020 — World Sustainable Built Environment Conference
Göteborg, Švedska
https://beyond2020.se/

15.-18.6.2020

Deep Mixing Conference 2020
Gdansk, Poljska
www.dfi.org/dfieventlp.asp?13330

16.-18.6.2020

"Structural Faults + Repair-2020" & "European Bridge Conference-2020"
Edinburg, Škotska
www.structuralfaultsandrepair.com/

22.-27.6.2020

EURO-MED-SEC-3 – 3rd European and Mediterranean Structural Engineering and Construction Conference
Limassol, Ciper
www.isec-society.org/EURO_MED_SEC_03/

7.-11.9.2020

6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation
Budimpešta, Madžarska
www.isc6-budapest.com/

2.-6.11.2020

5th World Landslide Forum
Kjoto, Japonska
http://wlf5.iplhq.org/

Rubriko ureja • **Eva Okorn,** ki sprejema predloge za objavo na e-naslov: **gradb.zveza@siol.net**