

december 2023
letnik 72

Gradbeni vestnik

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



283

O SODOBNIH GEOPOLIMERNIH
BETONIH IN PROJEKTIRANJU
IZ NJIH GRAJENIH GRADBENIH
KONSTRUKCIJ

295

VIADUKT PESNICA – INOVACIJE V
ŽELEZNIŠKI INFRASTRUKTURI

Gradbeni vestnik

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

Izdajateljski svet:
ZDGITS: **prof. dr. Matjaž Mikoš, predsednik**
izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski
Dušan Jukič
IZS MSG: **dr. Rok Cajzek**
mag. Jernej Nučič
Tina Bučič
UL FGG: **doc. dr. Matija Gams**
UM FGPA: **prof. dr. Miroslav Premrov**
ZAG: **doc. dr. Aleš Žnidarič**

Uredniški odbor: **izr. prof. dr. Sebastjan
Bratina, glavni in odgovorni urednik**
doc. dr. Milan Kuhta

Lektor: **Jan Grabnar**

Lektorica angleških povzetkov:
Romana Hudin

Tajnica: **Eva Okorn**

Oblikovalska zasnova: **Agencija GIG**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:
Kočeovski tisk

Naklada: 400 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
www.zveza-dgits.si

Letno izide 12 številčk. Letna naročnina
za individualne naročnike znaša 25,50 EUR;
za študente in upokojene 10,50 EUR;
za družbe, ustanove in samostojne podjetnike
188,50 EUR za en izvod revije; za
naročnike iz tujine 88,00 EUR.
V ceni je všteti DDV.
Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:
SI56 0201 7001 5398 955

Slika na naslovnici:
**Slika na naslovnici: Industrijsko poslovni
kompleks Ledinek,**
foto: Matjaž Pongrac

**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, december 2023, letnik 72, str. 281-316

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 dvojnimi 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: sebastjan.bratina@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

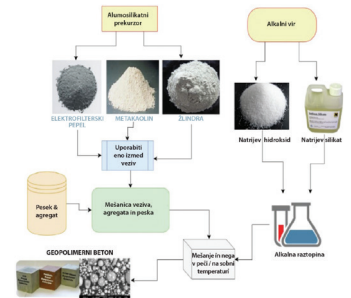
VSEBINA CONTENTS

VOŠČILO

izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski, univ. dipl. inž. grad. **282**
VOŠČILO PREDSEDNIKA ZDGITS

ČLANKI PAPERS

doc. dr. Peter Češarek, univ. dipl. inž. grad. **283**
Katja Hrobat, dipl. inž. grad.
doc. dr. Jerneja Češarek Kolšek, univ. dipl. inž. grad.
**O SODOBNIH GEOPOLIMERNIH
BETONIH IN PROJEKTIRANJU IZ NJIH
GRAJENIH GRADBENIH KONSTRUKCIJ
ON MODERN GEOPOLIMER
CONCRETES AND THEIR APPLICATION
TO LOAD-BEARING STRUCTURES**



dr. Viktor Markelj, univ. dipl. inž. grad. **295**
Jernej Maher, univ. dipl. inž. grad.
**VIADUKT PESNICA – INOVACIJE V
ŽELEZNIŠKI INFRASTRUKTURI
PESNICA VIADUCT – INNOVATIONS IN
RAILWAY INFRASTRUCTURE**



POROČILO S STROKOVNEGA SREČANJA

dr. Jakob Šušteršič, univ. dipl. inž. grad. **307**
30. SLOVENSKI KOLOKVIJ O BETONIH



FOTOREPORTAŽA Z GRADBIŠČA

Matjaž Beltram, Tina Vatić (Elea iC, d. o. o.) in **311**
Mirzet Šabić, Tihomir Pilić (Makro 5 gradnje, d. o. o.)
PRENOVA OBJEKTA STARE TOVARNE ROG



VSEBINA LETNIKA 72/2023

Eva Okorn **315**

NOVI DIPLOMANTI

Eva Okorn

KOLENDAR PRIREDITEV

Eva Okorn

izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski, univ. dipl. inž. grad.



VOŠČILO PREDSEDNIKA ZDGITS

Ob zaključku letošnjega leta se obračam k vam z globokim zavedanjem o izzivih, s katerimi se spoprijemamo zaradi poplav na Slovenskem in njihovega povezovanja s podnebnimi spremembami. Letošnje poplave so nas vse prizadele, hkrati pa so postale opomin, kako pomembno je obravnavati podnebne spremembe in graditi trajnostno prihodnost. Poplave so poudarile potrebo po boljšem načrtovanju in gradnji vodne in ostale javne infrastrukture, ki bo odporna proti vremenskim ekstremom. Zavedamo se, da gradbeništvo igra ključno vlogo pri soočanju s posledicami podnebnih sprememb. Zaradi poplav na Slovenskem in podnebnih sprememb se želimo dotakniti tudi vloge Zveze društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS) ter Inženirske zbornice Slovenije (IZS) pri zagovarjanju strokovnosti pri uvajanju ukrepov odprave posledic poplav. S povezovanjem s Slovensko inženirsko zvezo (SIZ) kot koordinacijskim organom in povezovalnim členom med inženirji različnih strok in Inženirsko akademijo Slovenije (IAS), ki združuje najboljše strokovnjake z različnih inženirskih področij, smo se aktivno povezovali z organizacijo različnih forumov, razpravljali o trajnostni gradnji, uporabi naprednih tehnologij ter se posvetili izobraževanju strokovnjakov za obravnavanje novih izzivov na področju gradnje in načrtovanja odporne vodne infrastrukture v spreminjajočih se razmerah zaradi posledic podnebnih sprememb.

Podnebne spremembe so realnost, s katero se moramo spopasti. Spremembe v padavinah, dvigovanje morske gladine in pogostejše ekstremne vremenske razmere postavljajo pred nas izzive, ki zahtevajo takojšnje ukrepanje. V prihodnjem letu v marcu načrtujemo s hrvaškimi kolegi organizacijo problemske konference problematike pitne vode v istrski regiji in konec leta problem dvigovanja morske gladine z vplivi na nizko ležeča obalna območja na Jadranu. V Gradbenem vestniku smo predani ozaveščanju o teh izzivih in spodbujanju rešitev, ki bodo gradila našo odpornost. Ob tej priložnosti vas vabim k soustvarjanju vsebin, ki se dotikajo trajnostne gradnje, prilagajanja na podnebne spremembe ter inovacij v gradbeništvu, ki bodo obogatile našo revijo z raznolikimi in inovativnimi vsebinami. Vaše izkušnje in znanje so neprecenljivi viri, ki lahko pomagajo oblikovati boljšo prihodnost gradbeništva zaradi podnebnih izzivov. Skupaj lahko gradimo odpornejše in trajnostne skupnosti.

Hvala za vašo predanost in sodelovanje pri oblikovanju prihodnosti, ki bo trajnostna, varna in odzivna na podnebne spremembe. Naj bo novo leto polno navdihujočih projektov, osebnih uspehov. Veliko zdravja, sreče in nepozabnih trenutkov.

doc. dr. Peter Češarek, univ. dipl. inž. grad.
peter.cesarek@fgg.uni-lj.si



Katja Hrobat, dipl. inž. grad.
kh90020@student.uni-lj.si



doc. dr. Jerneja Češarek Kolšek, univ. dipl. inž. grad.
jerneja.kolsek@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek

UDK/UDC: 691.3:624.012:624.04

O SODOBNIH GEOPOLIMERNIH BETONIH IN PROJEKTIRANJU IZ NJIH GRAJENIH GRADBENIH KONSTRUKCIJ

ON MODERN GEOPOLIMER CONCRETES AND THEIR APPLICATION TO LOAD-BEARING STRUCTURES

Povzetek

Sodobni geopolimerni betoni so v splošnem kompoziti peska, agregata in geopolimernega veziva, pri čemer je slednje produkt naravne polimerizacije, pri kateri material v obliki aluminosilikata (prekurzor) polimerizira pri interakciji z alkalnim medijem (aktivator). Pri tem se kot prekurzor uporabijo različni stranski produkti industrije, npr. žindra, elektrofiltrski pepel in metakaolin, zato izkazujejo ti betoni v primerjavi s konvencionalnim betonom iz portland cementa ugodne lastnosti v smislu okoljskega od-tisa. Sočasno, kot opiše prvi del članka, pa lahko imajo še druge, boljše lastnosti, pri čemer velja med karakteristikami otrdelega betona posebej omeniti boljšo odpornost proti nekaterim agresivnim vplivom okolja, boljšo odpornost proti visokim tempe-raturam in določene prednosti v smislu mehanskega (σ - ϵ) odziva. Splošna oblika σ - ϵ krivulj je v primerjavi s konvencionalnimi betoni po eni strani podobna, kar nas napelje k zaključku, da bi se tudi pri projektiranju konstrukcij iz geopolimernih betonov lahko zatekli k postopkom s področja konvencionalnih betonov. Vendarle pa obstaja tudi nekaj očitnih razlik, zaradi katerih bo te postopke pred tem verjetno treba vsaj ustrezno modificirati. Članek ponuja del odgovora na vprašanje, kako nujna bo takšna modifikacija.

Ključne besede: geopolimerni beton, mehanski odziv, σ - ϵ krivulja, analiza plastičnih členkov, postkritična nosilnost konstrukcije

Summary

Modern geopolymer concrete is a composite of sand, aggregate and geopolymer binder, the latter being the product of natural polymerization, in which an aluminosilicatic material (precursor) polymerizes through interaction with an alkaline medium (activator). Various industrial by-products are used as precursors, e.g. slag, fly ash and metakaolin. Thus, geopolymeric concrete exhibits favourable properties in terms of its environmental footprint compared to conventional Portland cement concrete. At the same time, as explained in the first part of the paper, geopolymeric concrete also exhibits other favourable properties, the most important among characteristics of hardened concrete being better resistance to various aggressive environmental influences, better resistance to high temperatures, and some advantages in terms of mechanical (σ - ϵ) response. The general shape of the σ - ϵ curves is similar to conventional concretes, which leads us to the conclusion that in the design of a geopolymer concrete structure one could resort to procedures from the field of conventional concretes. However, there are also some obvious differences, due to which these procedures will need to be modified to some extent in advance. The second part of the paper offers a brief insight into the need for such a modification.

Key words: geopolymer concrete, mechanical response, σ - ϵ curve, plastic hinge analysis, post-critical load-bearing structural capacity

1 UVOD

Ena izmed danes možnih alternativ tradicionalnim betonom so sodobni geopolimerni betoni, kjer se portland cement nadomešča z različnimi stranskimi produkti industrije. Tovrstni betoni lahko izkazujejo določeno prednost v smislu okoljskega odtisa, sočasno pa izkazujejo tudi nekatere boljše materialne lastnosti v primerjavi s konvencionalnim betonom. Pri tem prednjačita boljša odpornost proti nekaterim agresivnim vplivom okolja ter boljša odpornost proti visokim temperaturam, pomembne razlike pa se kažejo tudi v smislu mehanskega (σ - ϵ) odziva. A če bomo v prihodnosti rabo geopolimernih betonov v gradbeništvu želeli resnično pospešiti, bo treba razviti tudi ustrezna tehnična priporočila in standarde, podlaga zanje pa bodo ustrezne in dovolj številčne znanstvene raziskave. Pri zadevanja raziskovalcev v zvezi s slednjim, kot lahko opazimo s pregledom najnovejše znanstvene literature, postajajo v zadnjih letih bolj množična. K temu želi svoj delež prispevati tudi ta članek.

Članek gradita poleg uvoda še dva bistvena dela. V prvem delu (poglavje 2) najprej povzamemo, kaj o lastnostih geopolimernih betonov danes navaja dostopna znanstvena in strokovna literatura. Tu se osredotočimo predvsem na lastnosti otardelega betona, ki so sicer tudi tiste, ki kot vhodni parameter vstopajo v računske postopke za projektiranje nosilnosti konstrukcij, ki jih naslavlja ta članek. V drugem delu (poglavji 3 in 4) pa se podrobneje omejimo le na mehanske lastnosti tovrstnih betonov, kot jih kažejo σ - ϵ materialni diagrami. Materialni diagrami geopolimernih betonov, kot jih je danes moč najti v dostopni literaturi, so predstavljeni v poglavju 3. Pri teh lahko v primerjavi z diagrami konvencionalnih betonov opazimo precej podobnosti, kar nas napeljuje k zaključku, da bi se tudi pri projektiranju konstrukcij iz geopolimernih betonov lahko zatekli k postopkom s področja konvencionalnih betonov. Vendarle pa obstaja tudi nekaj očitnih razlik, zaradi katerih bo te postopke pred tem verjetno treba vsaj ustrezno modificirati. Del odgovora na to, kako nujna je takšna modifikacija, ponuja poglavje 4. V njem predstavimo rezultate analize mehanskega odziva izbrane betonske konstrukcije, ki jo obremenjujemo postopno do in v območje njene postkritične nosilnosti. Analizo opravimo s pomočjo σ - ϵ diagrama, kot ga za opis mehanskega odziva konvencionalnih betonov danes predlaga [SIST, 2005a], in s pomočjo izbranih σ - ϵ diagramov geopolimernih betonov iz poglavja 3.

Omeniti velja, da se primerjalne analize, kot jih predstavimo v poglavju 4, pojavljajo tudi v dostopni literaturi, vendar pa so tam običajno predstavljeni le primeri statično določenih nosilcev (npr. [Sumajouw, 2006], [Sofi, 2007], [Prachasaree, 2014], [Hutagi, 2016]) in stebrov (npr. [Sumajouw, 2006], [Sarker, 2009], [Albitar, 2017]). Pri tem v zvezi z nosilci avtorji običajno poročajo o primerljivi (npr. [Sumajouw, 2006]) ali do približno 1,8-krat večji upogibni nosilnosti nosilcev iz geopolimernih betonov ([Sofi, 2007], [Prachasaree, 2014]). Pri tem so razlike med zaključki različnih raziskovalcev (npr. zaključki [Sumajouw, 2006] in [Prachasaree, 2014]) zelo verjetno predvsem posledica razlik v σ - ϵ diagramu uporabljenega geopolimernega betona.

Za razliko od zgoraj omenjenih primerjalnih analiz iz dostopne literature vpliv lastnosti obeh betonov v tem članku primerjamo na statično nedoločeni konstrukciji. Ena od najpomemb-

nejših razlik med konvencionalnim in geopolimernim betonom je namreč velikokrat v njuni duktilnosti. Zato pričakujemo, da bodo pri statično nedoločeni konstrukciji razlike v odzivu, če bomo za opis obnašanja betona uporabili predlog [SIST, 2005a] ali pa enega izmed modelov, ki so v literaturi predlagani za geopolimernne betone, opaznejše. Vpliv boljše duktilnosti materiala prihaja namreč do izraza zlasti v območjih »plastičnih členkov«, ki pa jih je več pri statično nedoločenih konstrukcijah. Novost v primerjavi z analizami iz dostopne literature pa je tudi ta, da razlike med opazovanimi betoni komentiramo tudi v smislu rotacijske kapacitete prečnih prerezov.

2 SPLOŠNO O GEOPOLIMERNIH BETONIH

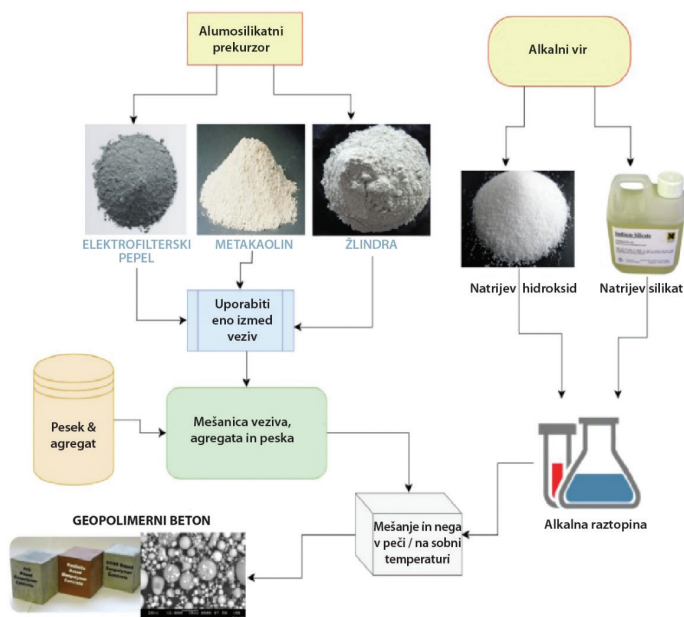
V poglavjih, ki sledijo, se z izrazom »konvencionalni betoni« sklicujemo na betone, ki so kompoziti agregata, vode in portland cementa kot tradicionalnega veziva. Z izrazom »geopolimerni betoni« pa mislimo na kompozite peska, agregata in geopolimernega veziva. Kot navaja dostopna literatura (npr. [Abdullah, 2011], [Hassan, 2020]), dobimo slednjega s procesom naravne polimerizacije (slika 1), pri kateri izvorni material (prekurzor) v obliki aluminosilikata (npr. žindra, elektrofiltrski pepel, metakaolin ...) polimerizira pri interakciji z alkalnim medijem (aktivatorjem). Pogost primer aktivatorja je mešanica raztopine natrijevega silikata (Na_2SiO_3), raztopine natrijevega hidroksida (NaOH) in vode.

Kot poroča vir [Hassan, 2019], je izraz »geopolimer« v sedemdesetih letih 20. stoletja izumil prof. Joseph Davidovits, ki se je pri tem skliceval na material, sintetiziran z reakcijo alkalne raztopine z aluminosilikatnim prahom [Davidovits, 1991]. Do danes pa se je zaradi široke palete formulacij v literaturi pojavilo več različnih imen za takšen material, npr. »anorganski polimer« in »alkalno aktiviran material (AAM)«. Nekateri raziskovalci so predlagali, da bi geopolimer poimenovali »alkalno aktivirano vezivo s prekursorji z nizko vsebnostjo kalcija«. Vendar pa različna poimenovanja povzročajo zmedo, zato v tem članku uporabimo le izraz »geopolimer«.

2.1 Okoljski vidik

Kot poroča [Hassan, 2020], se proizvodnja portland cementa v svetu vsako leto poveča za 5 %. Pri tem je najhitrejšo rast opaziti v razvijajočih se gospodarstvih Azije, kjer se pospešeno gradijo stavbe, ceste in druga infrastruktura. Skladno s statistiko iz vira [GCCA, 2022] je konvencionalni beton drugi najpogosteje uporabljen material na svetu, in sicer takoj za vodo. S proizvodnjo zanj potrebnega portland cementa pa naj bi se trenutno ustvarilo kar 12 % vseh emisij CO_2 na svetu [Hassan, 2020]. Geopolimerni betoni naj bi predstavljali eno izmed okolju prijaznejših alternativ.

Po podatkih, ki so na voljo v delu [Hassan, 2020], se pri proizvodnji geopolimernih betonov količina toplogrednih plinov v primerjavi s proizvodnjo konvencionalnih betonov zmanjša za 65–90 %. Poleg manjšega onesnaževanja z izpusti pa ima proizvodnja geopolimernih betonov še drugo prednost. V mešanicah se namreč uporabljajo materiali, ki so v drugih industrijah klasificirani kot odpadki tehnoloških procesov, njihova ponovna uporaba v geopolimernih betonih pa prispeva k reševanju problema odlaganja teh snovi v okolje in njihovi trajnostni rabi. Tako se kot ugodno vezivo za geopolimerni beton v literaturi



Slika 1. Proces priprave mešanice geopolimernega betona ([Hrobat, 2022], [Hassan, 2019]).

zelo pogosto omenja elektrofiltrski pepel (najpogosteje tipa F), ki je v osnovi odpadke iz termoelektrarne, kjer se uporablja izgorevanje trdih goriv, npr. iz termoelektrarne. Omenjajo pa se tudi žlindra, ki je odpadke iz proizvodnje jekla, metakaolin in drugi.

Opozoriti velja, da odpadni materiali, ki se uporabljajo za izdelavo mešanic geopolimernih betonov in smo jih omenili zgoraj, vsebujejo snovi (npr. težke kovine), ki bi ob morebitnem sproščanju v okolje lahko neugodno vplivale na zdravje ljudi. Vendar pa raziskovalci predvidevajo, da se pri geopolimernih betonih zaradi njihove nizke prepustnosti škodljivi elementi fizično ujamejo v porah betonske matrice ali pa se v betonski mešanici kemijsko povežejo [Hassan, 2019]. Luna in sodelavci [Luna, 2007] so z eksperimentalnimi preiskavami nekaj mešanic geopolimernih betonov npr. dokazali odlične sposobnosti enkapsulacije izbranih kovin (Pb, Cd, Cr, Zn), pri čemer so bili izjema le vzorci betonov, ki so vsebovali kaolin in metakaolin, kjer so opazili visoko raven stopnje izluženja. V prihodnosti bodo v zvezi s tem potrebne obsežnejše dodatne raziskave.

2.2 Lastnosti otrdelega betona

2.2.1 Mehanska odpornost

Če sklepamo zgolj po obliki materialne krivulje σ - ϵ iz enosnih tlačnih preizkusov, ki jih najdemo v dostopni literaturi, ugotovimo, da so mešanice geopolimernih betonov, ki so jih predstavili nekateri avtorji (npr. [Hardjito, 2004], [Hardjito, 2005]), precej primerljivih mehanskih lastnosti v primerjavi s konvencionalnimi betoni (lahko bi rekli, da so si σ - ϵ krivulje skoraj »na las« podobne). Pri drugih pa so opazne večje razlike. Pri slednjih se nekaj odstopanja kaže v elastičnem modulu, ki je pri sicer približno enaki tlačni trdnosti pri geopolimernih betonih lahko nekoliko nižji ([Sofi, 2007], [Pracharsaree, 2014]) ali pa nekoliko višji [Chitralla, 2018]. Zelo očitna odstopanja pa se kažejo v odzivu materiala v območju postkritične nosilnosti

(tj. od trenutka dosežene tlačne trdnosti pa do porušitve vzorca). V tem območju so geopolimerni betoni večinoma (lahko tudi precej) bolj duktilni ([Sofi, 2007], [Pracharsaree, 2014], [Chitralla, 2018]). Omenjene razlike med mešanicami geopolimernih betonov so lahko posledica različnega tipa prekurzorja (elektrofiltrski pepel tipa F, elektrofiltrski pepel tipa C, žlindra ...), glede na raziskave iz vira [Noushini, 2016] pa je jasno, da je izrednega pomena tudi nega svežega betona.

Natezna trdnost geopolimernih betonov je ob izkazani enaki tlačni trdnosti običajno nekoliko višja v primerjavi z natezno trdnostjo konvencionalnih betonov.

2.2.2 Odpornost proti vplivom okolja

Pri projektiranju betonskih konstrukcij je nujno poznavanje okolja, v katerem se bo konstrukcija nahajala. Skozi pore in razpoke v betonu lahko vanjo namreč s časom prodirajo škodljive snovi, ki konstrukcijo tako ali drugače poškodujejo. Najbolj pogosta poškodba je korozija armaturnih palic v armiranem prerezu kot posledica t. i. karbonatizacije [Hren, 2019]. Ker se jeklu po oksidaciji volumen poveča, se v betonu ustvari dodatne napetosti, te pa vodijo v razpoke. Odpornost proti karbonatizaciji se za geopolimerne betone zaradi njihove drugačne kemijske strukture (nižja vsebnost kalcijevih komponent v otrdeli betonski matrici) v literaturi pogosto navaja kot boljša v primerjavi s konvencionalnimi betoni, čeprav to ne velja nujno za vse mešanice ([Hassan, 2019], [Lingyu, 2021]).

Poškodbe betona so lahko tudi posledica kloridov, ki so lahko prisotni že v komponentah za izdelavo betonskih mešanic ali pa vstopajo v beton ob (neposrednem ali posrednem) stiku z morsko vodo ali ob stiku s talinimi solmi (v zimskem obdobju). Posledica izpostavitve betona kloridom je prav tako lahko korozija armature in posledična formacija razpok ([Hočevar, 2007], [Hren, 2019]). V zvezi s tem rezultati nekaterih raziskav [Hassan, 2019] nakazujejo, da so tovrstnim poškodbam geopolimerni betoni v nekaterih primerih zaradi manjše vsebnosti kalcijevih spojin lahko podvrženi manj.

V nadaljevanju omenimo tudi odpornost betonov proti prisotnosti sulfatov. Sulfati lahko v beton prodirajo ob stiku s kontaminirano zemljo ali vodo, posledica tega pa je tvorba sadre, ki se v reakciji z aluminati pretvori v etringit. Zaradi večjega volumna produktov reakcije v primerjavi z reaktanti beton nabreka, kar vodi do razpok in porušitve stika med cementno pasto in agregatom [Hočevar, 2007]. V zvezi s tem omenimo raziskavo, ki so jo leta 2012 izvedli Parshwanath in sodelavci [Parshwanath, 2012]. Ti so opazovali odpornost mešanic geopolimernega in konvencionalnega betona proti delovanju natrijevega in magnezijevega sulfata. Ugotovili so, da se je konvencionalnim betonom trdnost po izpostavitvi sulfatom zmanjšala do največ 39 %, geopolimernim betonom pa le do 21,3 %. Zmanjšanje trdnosti je bilo sicer odvisno od vrste sulfata in časa, v katerem je bila temu izpostavljena opazovana betonska mešanica.

Ne nazadnje pa je pri betonih zagotovo pomembna tudi odpornost proti zmrzovanju in tajanju. Podatki v zvezi s tem so za geopolimerne betone v dostopni literaturi za zdaj še skopi, prve raziskave pa dajejo prednost geopolimernim betonom iz mešanice elektrofiltrskega pepela in žlindre v primerjavi z betoni iz čistega elektrofiltrskega pepela. Zhao in sodelavci [Zhao, 2019] so na primer dokazali, da so lastnosti geopolimer-

nega betona, pri katerem je delež žlindre vsaj enakovreden deležu elektrofiltrskega pepela, v zvezi s problemom zmrzovanja in tajanja primerljive z lastnostmi konvencionalnih betonov. Žal pa je odziv geopolimernih betonov bistveno slabši pri tretmajih z aeranti, na katere se ti, kot kažejo prve raziskave (npr. [Sun, 2013]), opazneje sploh ne odzivajo.

2.2.3 Odpornost proti visokim temperaturam

Izrazita prednost geopolimernih betonov v primerjavi z običajnimi betoni je tudi njihovo obnašanje pod vplivom visokih temperatur ([Aslani, 2016], [Hassan, 2019], [Hassan, 2020]). Geopolimerni betoni imajo namreč nižjo toplotno prevodnost, zaradi česar se počasneje segrevajo, ugodno pa je tudi dejstvo, da ohranijo svoje mehanske karakteristike vse do temperature 600 °C. Za primerjavo omenimo, da se trdnost konvencionalnih betonov pri takšni temperaturi zniža že za približno 50 % [SIST, 2005b]. Zanimiva pa je tudi primerjava tlačne trdnosti obeh vrst betonov po izpostavljenosti visokim temperaturam in ohladi tvri nazaj na sobno temperaturo. Medtem ko bi pri konvencionalnih betonih v takih primerih ugotovili nižjo tlačno trdnost v primerjavi z začetno (tj. pred segrevanjem), bi bila ta pri geopolimernih betonih celo višja.

2.3 Lastnosti svežega betona

V dostopni literaturi je mogoče najti tudi podatke o lastnostih svežega geopolimernega betona. Ker so te z vidika ciljev tega prispevka manj zanimive, jih v nadaljevanju opišemo le na kratko, zainteresirani bralec pa lahko podrobnosti najde v literaturi, kot jo na primer povzema poglavje 2 dela [Hassan, 2019].

- Konsistenca svežega betona: Dostopna literatura navaja primerljive vrednosti konsistence svežega geopolimernega betona v primerjavi s konvencionalnimi betoni, pri čemer pa so te odvisne predvsem od razmerja aktivatorja in prekursorja, finosti zrn elektrofiltrskega pepela, razmerja Na_2SiO_3 in NaOH v raztopini aktivatorja ter razmerja vode in trdne snovi betona. Konsistenco lahko zvišamo z uporabo agregata z nizko absorptivnostjo in z uporabo superplastifikatorja, npr. superplastifikatorja na osnovi tekočega naf-talena.
- Čas vezanja: Časi vezanja mešanic geopolimernih betonov, kot jih navaja npr. vir [Hassan, 2019], so v mejah 35–70 min. (začetni čas) in 45–220 min. (končni čas). Na čas vezanja vpliva predvsem koncentracija NaOH, pri čemer višja molar-nost NaOH čas učinkovito zvišuje. Dodatek žlindre nasprotno čas vezanja znižuje.
- Hidracijska toplota: Površinska temperatura, ki se pri testiranjih svežih betonskih mešanic uporablja za merilo sproščene hidratijske toplote, je v literaturi pogosto omenjena kot nekoliko višja v primerjavi s konvencionalnimi betoni. Pri tem višje razmerje med Na_2SiO_3 oz. NaOH in elektrofiltrskim pepelom temperaturo zvišuje, višje razmerje med peskom in elektrofiltrskim pepelom pa jo znižuje. Najvišje temperature so običajno opažene med samim mešanjem betona, kasneje po vlitju betona v opaž pa se temperature znižajo. Geopolimerni betoni iz elektrofiltrskega pepela eksotermnih procesov po vlitju ne izka-zujejo.

2.4 Raba geopolimernih betonov danes

Geopolimerni betoni imajo zaradi svojih ugodnih lastnosti, ki smo jih omenili v poglavju 2.2, velik potencial za implementacijo na različna področja gradbeništva. Žal pa je zaradi pomanjkanja ustreznih tehničnih priporočil in standardov danes njihova raba v praksi še zelo omejena ([DBMR, 2022], [MI, 2022]).

Kot navaja vir [Hassan, 2019], bi se zaradi njihove dobre odpor-nosti proti vplivom okolja raba geopolimernih betonov kma-lu utegnila povečati v kanalizacijskih sistemih, kjer se zaradi počasnega toka tekočin in pomanjkljivega prezračevanja ob razkranju organskih snovi tvori vodikov sulfid. Ta se ob ne-nemnem stiku z vlago ali vodo, ki je zaradi majhnih naklonov cevi v sistemu prisotna ves čas, zlahka pretvori v žvepleno ki-slino. Ta pa naj bi bila po nekaterih ocenah odgovorna za kar 45 % vseh poškodb, ki jih na kanalizacijskih ceveh iz konvenci-onalnega betona opažamo danes [Hassan, 2019]. Prav tako se žveplove kisline lahko tvori ob stiku betonske cevi in kislih sul-fatnih tal, ki vsebujejo pirit. Pirit ob stiku z zrakom, do katerega pride med izkopavanjem ali izsuševanjem zemljine, oksidira in prav tako tvori žveplove kisline.

Zaradi njihove boljše odpornosti proti sulfatom iz morske vode bi se raba geopolimernih betonov v prihodnosti utegnila uve-ljaviti tudi v morski in obmorski gradnji [Hassan, 2020]. Tako v svetu že razvijajo sisteme vetrnih elektrarn na morju, katerih nosilna konstrukcija bi bila zgrajena iz visokotrdnih geopoly-mernih betonov z bazaltno armaturo. Po nekaterih ocenah naj bi življenjska doba takšne konstrukcije dosegala 100 let in več [Filak, 2022].

Ne nazadnje pa bi se, kot je sicer podrobneje argumentirano v delu [Hassan, 2020], zaradi njihove dobre odpornosti proti raz-ličnim vplivom okolja aplikacija geopolimernih betonov lahko pospešila tudi na področju drugih, bolj izpostavljenih kon-strukcij (tako pri sanacijah obstoječih kot gradnji novih), npr. mostov, zaradi njihove dobre odpornosti proti visokim tempe-raturam pa tudi na področju protipožarnih zaščit.

3 MATERIALNI DIAGRAMI GEOPOLIMERNIH BETONOV

V poglavju 3 predstavimo materialne diagrame geopolimer-nih betonov pri kratkotrajni enoosni tlačni obremenitvi, ki so bili do danes predlagani v dostopni znanstveni literaturi. Za predstavitev več materialnih diagramov se odločimo, ker so mehanske lastnosti geopolimernega betona v veliki meri od-visne od kemijske sestave surovin in razmerij v mešanici, pri čemer imata največji vpliv vezivo in alkalni aktivator. V bolj koncentriranem aktivatorju lahko raztopimo več delcev veziva, s čimer dosežemo večjo stopnjo geopolimerizacije in posledično gostejšo strukturo betonske matrice (torej beton boljših mehanskih lastnosti). Prav tako je pomembna struktura veziva, npr. razmerje silicijevih in aluminijevih mineralov v elektrofiltr-skem pepelu. Modeli so predstavljeni v obliki sovisnosti med normalno napetostjo in pripadajočo deformacijo.

Ker gre pri večini predstavljenih materialnih modelov geopo-limernega betona za modifikacijo materialnega modela, ki so ga za primere konvencionalnih betonov višjih trdnosti že leta

1987 razvili Thorentfeldt in sodelavci [Thorentfeldt, 1987], nekaj let kasneje pa so ga dopolnili še Collins in Mitchell [Collins, 1991] in Collins in sodelavci [Collins, 1993], je v začetku poglavja predstavljen tudi slednji.

Oznake, ki so uporabljene v modelih, so skladne z oznakami, ki jih v svojem delu uporabijo avtorji posameznega modela, in niso nujno enake oznakam, ki jih uporabljajo drugi avtorji oz. oznakam, ki jih uporablja standard Evrokod [SIST, 2005a].

Pri vsakem modelu so navedene tudi eksperimentalne raziskave, na podlagi katerih so bili modeli razviti, saj te vplivajo na meje aplikativnosti modela. Eksplicitno so navedeni: (i) osnovni tip betona, za katerega je model veljaven, v smislu vrste prekurzorja, (ii) pogoji, pri katerih so bili betonski vzorci negovani pred enoosnim testiranjem, ter (iii) razpon tlačnih trdnosti, ki so jih vzorci pri testiranjih dosegali. Dodani pa so tudi sklici na drugo literaturo, kjer so na voljo podrobnejši podatki o eksperimentih.

3.1 6-ε model za konvencionalne betone višjih trdnosti skladno s predlogi Thorentfeldta in sodelavcev [Thorentfeldt, 1987], Collinsa in Mitchella [Collins, 1991] in Collinsa in sodelavcev [Collins, 1993]

Že leta 1987 so Thorentfeldt in sodelavci [Thorentfeldt, 1987] izpeljali analitični izraz za izračun materialnega diagrama betonov s tlačnimi trdnostmi nad (in vključno) 40 MPa. Izraz je temeljil na izrazu Popovicsa [Popovics, 1973], ki je sicer veljaven za betone normalnih trdnosti, le da je bil ustrezno modificiran. Kasneje, leta 1991, sta izraz, ki je do takrat zvezo med napekostjo in deformacijo betona podajal le v naraščajočem delu krivulje, dopolnila še Collins in Mitchell [Collins, 1991]. Ta je s tem prešel v obliko:

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \cdot \frac{n}{n-1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c}\right)^{nk}} \quad (1)$$

V enačbi (1) predstavlja f_c napetost v poljubni točki sigma-epsilon krivulje, ε_c pa deformacijo betona, ki pripada f_c . f'_c je nadalje maksimalna vrednost napetosti v diagramu oz. t. i. tlačna trdnost betona, ε'_c pa njej pripadajoča deformacija. k in n sta parametra, ki ju izračunamo s pomočjo izrazov:

$$k = \begin{cases} 1; & \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \leq 1 \\ 0,67 + \frac{f'_c [\text{MPa}]}{62}; & \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$n = 0,8 + \frac{f'_c [\text{MPa}]}{17} \quad (3)$$

Leta 1993 sta Collins in Mitchell skupaj z MacGregorjem [Collins, 1993] zgoraj zapisanim izrazom dodala še izraz za izračun deformacije ε'_c , ki so jo avtorji zapisali v odvisnosti od tlačne trdnosti betona f'_c in elastičnega modula betona E_c :

$$\varepsilon'_c = \frac{f'_c}{E_c} \cdot \frac{n}{n-1} \quad (4)$$

V kolikor lahko za določen konvencionalni beton izmerimo vrednost njegove tlačne trdnosti in elastičnega modula (v praksi se ti dve količini največkrat določita laboratorijsko po

protokolih standardov [SIST, 2019] in [SIST, 2021]), lahko torej s pomočjo izrazov (1)–(4) enolično določimo tudi pripadajočo materialno σ - ε krivuljo.

3.2 6-ε model za geopolimerne betone iz elektrofilitrskega pepela tipa F visokih trdnosti po predlogu Sarkerja [Sarker, 2009]

Eden izmed prvih, ki je izraze (1)–(4) iz poglavja 3.1, prilagodil še za geopolimerne betone, je bil Sarker [Sarker, 2009], ki se je pri tem oprl na podatke iz eksperimentalnih raziskav Hardjita in Rangana [Hardjito, 2004] in Hardjita in sodelavcev [Hardjito, 2005]. Mešanice, ki so jih za pripravo preskušancev za določitev σ - ε krivulj uporabili slednji, so bile treh različnih trdnosti (41, 61 in 64 MPa), pri vseh pa je bil kot prekurzor uporabljen elektrofilitrski pepel tipa F. Pred testiranjem so se preskušanci 24 ur sušili v peči pri 90 °C ali pa so bili 24 ur negovani s parjenjem pri 90 °C. Za tem so bili sušeni na zraku pri normalni sobni temperaturi do dneva testiranja. Več podrobnosti o omenjenih testiranjih je na voljo tudi v dodatku E iz diplomske naloge K. Hrobat [Hrobat, 2022].

V zvezi z izrazi (1)–(4) je Sarker [Sarker, 2009] predlagal nov izraz za izračun parametra n , in sicer:

$$n = 0,8 + \frac{f'_c [\text{MPa}]}{12} \quad (5)$$

Pri tem je f'_c tlačna trdnost betona.

Kot dodatek izrazom (1)–(2) ter (4)–(5) pa je predlagal tudi izraz za izračun elastičnega modula E_c , in sicer skladno z analitično predlogo Hardjita in sodelavcev [Hardjito, 2005]:

$$E_c [\text{MPa}] = 2707 \sqrt{f'_c [\text{MPa}]} + 5300 \quad (6)$$

Primernost izraza (6) je preveril s primerjavo izračunanih in izmerjenih vrednosti modula elastičnosti, ki so jih za geopolimerne betone predstavili drugi raziskovalci (več o omenjeni validaciji je na voljo tudi v dodatku B iz diplomske naloge K. Hrobat [Hrobat, 2022]). Ujemanje rezultatov je opisal kot zadovoljivo.

3.3 6-ε model za geopolimerne betone iz elektrofilitrskega pepela tipa F normalnih trdnosti po predlogu Anuradhe in sodelavcev [Anuradha, 2012]

Kot dopolnitev modela Sarkerja [Sarker, 2009], ki je bil torej razvit za geopolimerne betone iz elektrofilitrskega pepela tipa F višjih trdnosti, so Anuradha in sodelavci [Anuradha, 2012] kasneje izpeljali še izraze za istovrstne betone normalnih trdnosti. Tudi ti raziskovalci so za osnovo privzeli izraze (1)–(4) iz poglavja 3.1 in modificirali le izraz za izračun parametra n , ki so ga zapisali kot:

$$n = 0,7 + \frac{f'_c [\text{MPa}]}{14} \quad (7)$$

Elastični modul E_c so po vzoru Sarkerja [Sarker, 2009] tudi sami povzeli po predlogu [Hardjito, 2005] (enačba 6).

Glede na eksperimentalne rezultate, ki so prikazani v delu [Anuradha, 2012], sklepamo, da so raziskovalci izraz (7) razvili

s pomočjo prilagajanja rezultatov numeričnega modela rezultatom lastnih eksperimentalnih raziskav, čeprav avtorji v svojem članku slednjih posebej žal ne opišejo. Pri tem so testirali betone tlačnih trdnosti 25 MPa in 35 MPa, priprava vzorcev in testiranje pa sta potekala v skladu z indijskimi standardi. Tudi določil omenjenih standardov avtorji ne navedejo, prav tako pa ne navedejo točnih naslovov standardov.

3.4 σ - ϵ model za geopolimerne betone iz elektrofiltrege pepela in/ali žindre normalne ali visoke trdnosti po predlogu Prachasareja in sodelavcev [Prachasaree, 2014]

Model Prachasareja in sodelavcev [Prachasaree, 2014] predstavlja nov mejnik v razvoju materialnih modelov geolimer-nih betonov, saj so avtorji pri njegovem razvoju v primerjavi z avtorji del [Sarker, 2009] in [Anuradha, 2012] uporabili širšo bazo eksperimentalnih podatkov iz dostopne literature. Tako so poleg podatkov iz vira [Hardjito, 2004] in [Hardjito, 2005] uporabili tudi podatke lastnih meritev (podrobnosti o teh so na voljo tudi v dodatku C vira [Hrobat, 2022]) ter množico meritev drugih raziskovalcev (za povzetek teh in pripadajoče sklice na drugo literaturo glej [Hrobat, 2022], dodatek D). Podatki, ki so jih uporabili, so tako predstavljali podatke raziskav geopolimernih betonov najrazličnejših trdnosti (med 12 in 80 MPa) ter z različnimi vrstami prekursorja (elektrofiltreški pepel tipa F ali tipa C, žindra, mešanice slednjih ...), ki so bili pred testiranjem negovani pri različnih pogojih (sušenje na zraku pri sobni temperaturi, sušenje v peči 24 ur pri 60 °C, sušenje v peči 24 ur pri 90 °C, parjenje 24 ur pri 90 °C ...). Razviti model lahko torej razumemo kot prvi poskus »povprečenja« odziva preizkušancev iz različnih mešanic geopolimernih betonov pri enosnem tlačnem preizkusu, ki so bile razvite približno do časa nastanka članka [Prachasaree, 2014] in do tega časa tudi predstavljene v dostopni literaturi. O smiselnosti poskusa opisovanja toliko različnih mešanic, ki so bile tudi negovane pri zelo različnih pogojih, z enim samim modelom pa bodo sodile prihodnje raziskave.

Izraz za elastični modul, ki ga Prachasaree in sodelavci v svojem članku [Prachasaree, 2014] označijo z E , je sledeč:

$$E \text{ [GPa]} = 0,840 - 0,886f'_c + 0,647(f'_c)^2. \quad (8)$$

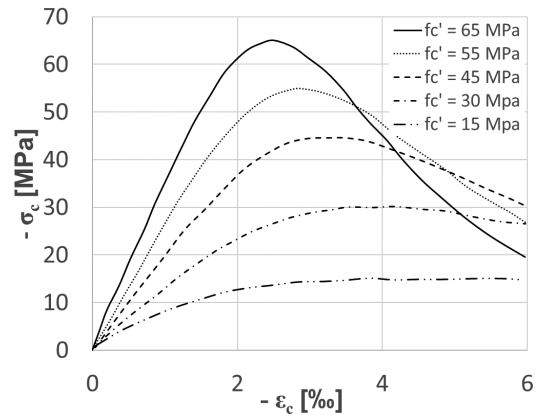
Pri tem je f'_c tlačna trdnost betona v MPa. Skupino izrazov modela pa sicer predstavljata še izraza (1) in (2) iz poglavja 3.1, v katerih so v viru [Prachasaree, 2014] uporabljene le nekoliko drugačne oznake, in sicer: f_c za napetost v betonu, ϵ za pripadajočo deformacijo, f'_c za tlačno trdnost betona in ϵ_0 za deformacijo pri doseženi tlačni trdnosti. Prav tako pa skupino izrazov modela predstavljata še nekoliko spremenjena izraza (3) in (4), ki preideta v obliko:

$$\epsilon_0 = 0,0051 - \frac{4(f'_c)^2}{10^5}, \quad (9)$$

$$n = 0,5 + \left(\frac{f'_c}{14,3}\right) - \left(\frac{3(f'_c)^2}{10^4}\right). \quad (10)$$

Problem izrazov (8)–(10), ki smo jih predstavili zgoraj, je žal v tem, da je v njih zelo očitno tudi vsaj ena tipkarska napaka. Že hiter preračun namreč razkrije, da ti izrazi ne opisujejo krivulj, ki jih avtorji v svojem članku [Prachasaree, 2014] predstavijo na

sliki 4, poračunali pa naj bi jih s predlaganimi izrazi (v tem prispevku so omenjene krivulje iz slike 4 vira [Prachasaree, 2014] povzete na sliki 2). V zvezi z omenjenimi težavami smo navedeli stik z avtorji modela in jih prosili za ustrezne popravke, a se ti žal na prošnjo v času nastajanja tega članka še niso odzvali. Namesto izrazov (8)–(10) zato v nadaljevanju tega prispevka uporabljamo σ - ϵ krivulje s slike 2 v diskretni obliki.



Slika 2. Sigma-epsilon krivulje geopolimernih betonov različnih trdnosti, kot so jih s svojim modelom določili Prachasaree in sodelavci [Prachasaree, 2014].

3.5 σ - ϵ model za geopolimerne betone iz elektrofiltregega pepela tipa F in žindre po predlogu Chitrале in sodelavcev [Chitrала, 2018]

Model Chitrале in sodelavcev [Chitrала, 2018] je namenjen geopolimernim betonom, kjer je za vezivo uporabljena kombinacija elektrofiltregega pepela tipa F in žindre, del peska kot finega agregata pa je lahko nadomeščen z granitnimi delci. Pri tem so razmerja deležev finega agregata (pesek:granitni delci) lahko različna. Model je bil razvit na podlagi lastnih eksperimentalnih raziskav avtorjev, ki so testirali vzorce s tlačnimi trdnostmi v razponu 18–50 MPa. Vzorci so bili pred testiranjem sušeni na zraku pri normalni sobni temperaturi. Podrobnosti testiranja so predstavljene tudi v delu [Hrobat, 2022] (dodatek F).

Sovisnost med napetostjo in deformacijo je v modelu opisana z izrazom:

$$\sigma_c = \frac{\epsilon_c + a}{b_0 + b_1(\epsilon_c + a) + b_2(\epsilon_c + a)^2}. \quad (11)$$

Tu je σ_c tlačna napetost v poljubni točki materialnega diagrama, ϵ_c pa pripadajoča tlačna deformacija. a , b_0 , b_1 , in b_2 so konstante, ki so odvisne od razmerja peska in granitnih delcev v betonski mešanici in starosti betona (7, 28 ali 90 dni). Pri razmerju 100 : 0 in starosti 28 dni so vrednosti sledeče: $a = -7,12 \cdot 10^{-5}$, $b_0 = 2,19 \cdot 10^{-5}$, $b_1 = 0,006$ in $b_2 = 5,49$. Za ostale mešanice so vrednosti koeficientov na voljo tudi v delu [Hrobat, 2022].

Mejno tlačno deformacijo ϵ_{cr} , ki jo beton doseže pred nastopom porušitve, izračunamo po izrazu:

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_p} = 2,8 - 0,05 \ln(f_{cm}[\text{MPa}]) \quad (12)$$

Pri tem sta f_{cm} in ε_p tlačna trdnost in njej pripadajoča deformacija betona.

3.6 Drugi σ - ε modeli geopolimernih betonov iz dostopne literature

V literaturi lahko zasledimo tudi druge predloge za materialne modele geopolimernih betonov pri kratkotrajni enoosni tlačni obremenitvi, ki obravnavajo specialne tipe tovrstnih betonov, npr. geopolimerne betone z dodatkom sintetičnih vlaken [Noushini, 2018], geopolimerne betone z recikliranim agregatom [Tang, 2019] itd. Nekateri raziskovalci se lotevajo raziskav vpliva objetja betona zaradi jeklene strižne armature prereza (npr. [Ganesan, 2014]) ali pa objetja s plaščem iz ojačanih polimerov ([Alrshoudi, 2021], [Tang, 2020]). Pojavljajo se tudi predlogi modelov pri kompleksnejšem triosnem napetostnem stanju (npr. [Haider, 2014]). Vendarle pa ti modeli za ta članek niso relevantni, zato jih v nadaljevanju posebej ne omenjamo.

Prav tako lahko v literaturi zasledimo tudi modele, ki podobno kot modela [Sarker, 2009] in [Anuradha, 2012], ki smo ju predstavili v poglavjih 3.2 in 3.3, predstavljajo geopolimerne betone, katerih lastnosti σ - ε krivulje niti v padajočem delu krivulje niso bistveno drugačne kot pri konvencionalnih betonih (npr. [Cong, 2020]) ali pa se v tem območju odzivajo slabše (npr. [Thomas, 2015]). Ti modeli za nadaljnje analize tega članka niso zanimivi, zato jih ne opišemo posebej.

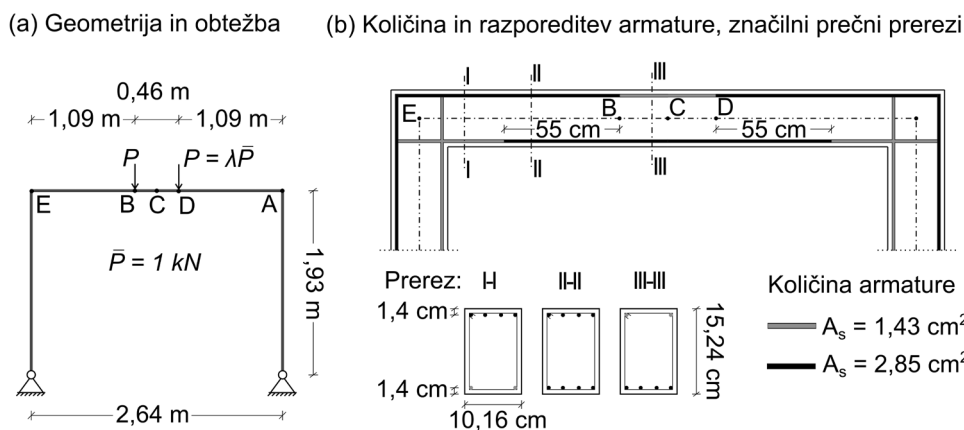
4 PRIMERJAVA MEHANSKEGA ODZIVA KONSTRUKCIJE IZ KONVENCIONALNEGA IN GEOPOLIMERNEGA BETONA NA PODLAGI NUMERIČNIH SIMULACIJ

V tem poglavju preverimo, kako se razlike med σ - ε zakoni geopolimernih in konvencionalnih betonov odražajo pri mehanskem odzivu izbrane konstrukcije na delovanje kratkotrajne statične obtežbe. Med modeli, ki smo jih predstavili v poglavju 3, izberemo za primerjavo modele geopolimernih betonov, kjer so razlike v mehanskem odzivu bolj očitne, tj. modele po virih [Prachasree, 2014] in [Chitrana, 2018].

Obravnavamo ravninski armiranobetonski okvir, podprt z dvema vrtljivima podporama, ki ga je eksperimentalno analiziral Cranston [Cranston, 1965]. Primer je dobro znan iz literature, saj je bil predmet številnih numeričnih raziskav (npr. [Bažant, 1987], [Bratina, 2004]). Skico okvirja z osnovnimi geometrijskimi podatki prikazujemo na sliki 3. Obtežba okvirja je simetrična. Dimenzije prečnega prereza stebra in prečke so enake, različna je le razporeditev vzdolžne armature. V stebrih ter na obeh koncih prečke je količina zgornje (v stebrih zunanje) armature večja od spodnje (v stebrih notranje), v sredini razpetine prečke v območju B-D (med prijemališčema sil) pa je količina spodnje armature večja od zgornje. V vmesnem območju prečke na dolžini 55 cm sta količini spodnje in zgornje armature enaki. V analizah upoštevamo geometrijsko nepopolnost stebrov, o kateri poroča [Cranston, 1965], zaradi katere sta stebra na vrhu od navpične osi izmaknjena v vodoravni smeri za 3,2 mm.

Numerične analize okvirja opravimo v programu SAP2000 [CSI, 2021]. Program omogoča geometrijsko in materialno nelinearno analizo konstrukcij, pri čemer je materialna nelinearnost skoncentrirana v vnaprej določenih plastičnih členkih. Uporabimo plastične členke tipa »P-M2-M3, fiber hinge«. Plastične členke program izračuna sam s pomočjo vnaprej definiranih integracijskih točk prečnega prereza, pri čemer v vsaki točki s pomočjo podatkov o vzdolžnih in upogibnih deformacijah (ukrivljenosti) referenčne osi nosilca najprej določi vzdolžno deformacijo materialnega vlakna, nato pa še pripadajočo vzdolžno normalno napetost. Slednja je z vzdolžno deformacijo povezana prek nelinearnega σ - ε zakona betona oziroma armature. Nadalje program izračunane napetosti integrira po prerezu in izračuna pripadajoče vrednosti osne sile in upogibnih momentov. V vseh prerezih okvira izberemo mrežo 20 x 30 zgoraj omenjenih integracijskih točk.

Okvir diskretiziramo z mrežo linijskih končnih elementov, ki niso večji od 20 cm, plastične členke pa postavimo v vozlišča teh elementov. Nastanek plastičnih členkov pričakujemo na mestih največjih momentov, tj. v točkah A do E (točke so označene na sliki 3). Okvir je enkrat statično nedoločen in postane kinematično labilen po nastanku drugega plastičnega členka. V kolikor bi deformiranje konstrukcije do porušitve v analizi poskušali voditi s povečevanjem obtežbe na okvir (oz. s povečevanjem obtežnega faktorja λ , kot ga definira slika 3), bi v računu

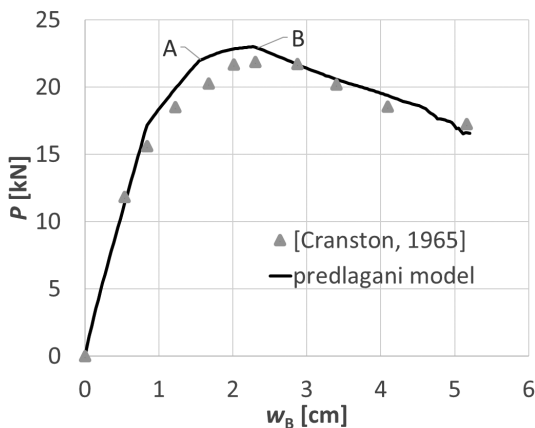


Slika 3. Cranstonov portalni okvir.

naleteli na numerične težave približno v času nastanka prvega plastičnega členka. Analizo zato izvedemo tako, da predpisujemo navpični pomik pod točkovnima silama, ki predstavljata obtežbo okvira (slika 3). To nam omogoči, da obtežno deformacijski poti sledimo tudi v postkritičnem območju.

4.1 Validacija modela

Prepričajmo se najprej, da je zgoraj opisani numerični model zares ustrezen. Za ta namen primerjamo naše numerične rezultate z eksperimentalnimi rezultati, kot jih navaja vir [Cranston, 1965]. V modelu pri tem za materialne parametre betona in armature uporabimo vrednosti, kot jih podajajo Bažant in sodelavci [Bažant, 1987]. Za trdnost betona tako upoštevamo vrednost 29 MPa, za elastični modul betona vrednost 25,5 GPa, napetost na meji elastičnosti armature privzamemo v vrednosti 40 MPa, elastični modul armature pa v vrednosti 200 GPa. Materialno krivuljo za beton v tlaku privzamemo po modelu [Desayi, 1964], pri čemer za deformacijo pri tlačni trdnosti betona in mejno deformacijo ob porušitvi betona privzamemo vrednosti, kot jih predlaga [Bratina, 2004], tj. 2,3 ‰ in 50 ‰. Nosilnost betona v nategu zanemarimo. Za armaturo izberemo bilinearni diagram z modulom utrjevanja 200 MPa, z deformacijo pri največji napetosti 10 ‰ in z mejno deformacijo, pri kateri je napetost v armaturi zaradi odpovedi materiala ponovno enaka 0, 300 ‰. Pomemben parameter za analizo, pri kateri želimo dosledno upoštevati tudi padajoči del σ - ε krivulj betona (mehčanje betona), je dolžina cone mehčanja, ki jo definiramo kot dolžino plastičnega členka. Dolžina cone mehčanja je odvisna od oblike materialnega diagrama v območju mehčanja in od energije loma betona, na katero vpliva tudi objetje betonskega jedra s stremensko armaturo, ki je za obravnavani primer ne poznamo in bi jo kvečjemu lahko samo predpostavili skladno z relevantno dostopno literaturo za konvencionalne betone. Zaradi vsega naštetega dolžine cone mehčanja ne izračunamo, ampak jo izberemo tako, da se rezultati numeričnega modela dovolj dobro ujamejo z eksperimentalnimi. Izberemo vrednost $h = 8$ cm. Primerjava eksperimentalno in numerično dobljenih krivulj obtežne sile P v odvisnosti od vertikalnega pomika v točki B je prikazana na sliki 4.



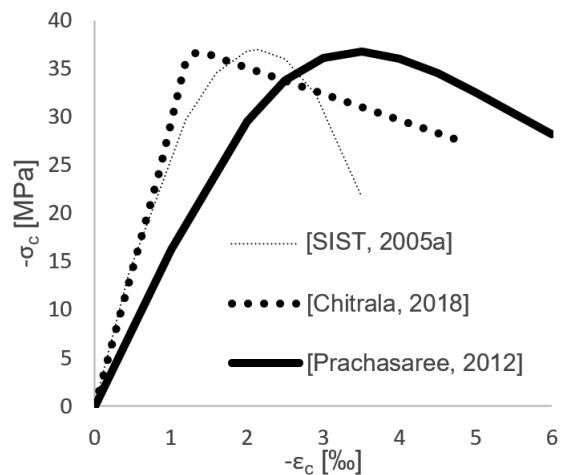
Slika 4. Primerjava eksperimentalno določene in izračunane obtežne sile P v odvisnosti od vertikalnih pomikov v točki B za Cranstonov okvir. Točki A in B, ki sta na sliki označeni z modro barvo, označujeta nastanek plastičnih členkov v pre-rezih A in B.

Ujemanje rezultatov numeričnega modela z eksperimentalnimi je zadovoljivo, zato numerični model uporabimo za nadaljnje analize odziva konstrukcije pri uporabi drugih σ - ε modelov betona.

4.2 Primerjava rezultatov pri različnih σ - ε modelih betona

Že na tem mestu omenimo, da implementacija drugih materialnih krivulj v analizo našega okvira v splošnem pomeni tudi spremembo v dolžinah plastičnih členkov, ki pa jih zaradi že prej omenjenih razlogov ne moremo natančno določiti. Za ta namen bi bili namreč potrebni tudi določeni dodatni eksperimentalni podatki primerjanih betonov, ki v literaturi danes po vedenju avtorjev članka žal še niso na voljo. Zato pri vseh analizah predpostavimo enako vrednost, kot smo jo določili v poglavju 4.1, tj. $h = 8$ cm. Ker so si krivulje materialnih modelov betonov, ki jih uporabimo v nadaljevanju, vendarle medsebojno v splošnem podobne, ocenjujemo, da je pri vseh analizah napaka zaradi tega majhna in pri vseh približno enaka. Pripadajoče rezultate lahko zato kljub vsemu tretiramo kot ustrezne vsaj v primerjalnem smislu.

Med materialnimi modeli, ki smo jih za geopolimerne betone predstavili v poglavju 3, izberemo za analize tega poglavja tiste, kjer so razlike v mehanskem odzivu v primerjavi s konvencionalnimi betoni bolj očitne, tj. modele po virih [Prachasaree, 2014] in [Chitrala, 2018]. Rezultate analize okvira pri izbranih modelih primerjamo z rezultati analize, kjer upoštevamo model konvencionalnega betona po predlogu Evrokoda [SIST, 2005a]. Pri vseh analizah za trdnost betona izberemo vrednost $f_{cm} = 37$ MPa. Po modelu Chitrala in sodelavcev [Chitrala, 2018] takšna trdnost približno odgovarja σ - ε krivulji za beton, kjer je kot fini agregat uporabljen le pesek, ne pa tudi granitna zrna, starost betona pa je enaka 28 dni (oznaka takšnega betona v delu [Chitrala, 2018] je »100:0_28«). Ker tudi pri konvencionalnih betonih kot fini agregat običajno uporabimo le pesek, sigma-epsilon modeli, ki jih za konvencionalne betone predlaga dostopna literatura, pa običajno pripadajo starosti 28 dni, je med modeli, kot jih predlaga [Chitrala, 2018], izbira modela za beton »100:0_28« najbolj smiselna.

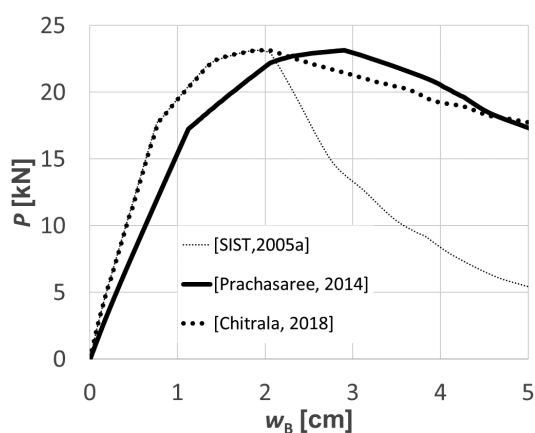


Slika 5. Krivulje σ - ε , ki so bile uporabljene kot materialni modeli betona v analizah poglavja 4.2.

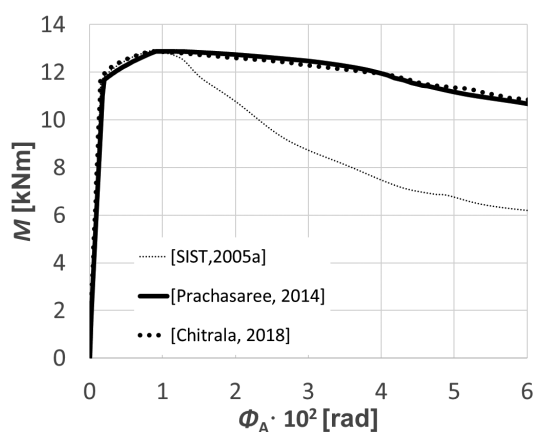
V zvezi z modelom [Prachasaree, 2014], kot smo pojasnili že v poglavju 3.4, σ - ε krivulj sami žal ne moremo točno izračunati. Lahko pa kot približek uporabimo katero od krivulj, ki so jih za različne možne vrednosti f_{cm} izračunali avtorji modela, če te krivulje povzamemo iz njihovega članka v diskretni obliki (krivulje so prikazane tudi na sliki 2 tega članka). Za zajem točk krivulj v tem članku uporabimo program Dagra [BLS, 2019]. Izberemo krivulji za vrednosti $f_{cm} = 30$ MPa in $f_{cm} = 45$ MPa, njune točke pa medsebojno smiselno interpoliramo, tako da dobimo oceno krivulje za trdnost $f_{cm} = 37$ MPa.

Primerjavo vseh materialnih krivulj, ki jih implementiramo v analizah tega poglavja, povzema slika 5, rezultati analiz pa so prikazani na slikah 6 in 7.

Primerjava rezultatov na slikah 6 in 7 pokaže, da daje model geopolimernega betona Chitrala in sodelavcev [Chitrala, 2018] v primerjavi z modelom [SIST, 2005a] zelo podoben rezultat v naraščajočem delu krivulj, tj. zagotovo tudi pri obtežbah, ki skladno z Evrokodom [SIST, 2004] odgovarjajo stalnim projektnim stanjem iz skupine MSN in projektnim stanjem iz skupine MSU. Za projektiranje konstrukcij iz takšnih betonov gle-



Slika 6. Obtežna sila P v odvisnosti od navpičnega pomika v točki B Cranstonovega okvira ob implementaciji izbranih σ - ε modelov betona. Pozicija točke B je razvidna s slike 3.



Slika 7. Graf moment-rotacija za prečni prerez okvira v točki A ob implementaciji izbranih σ - ε modelov betona. Pozicija točke A je razvidna s slike 3.

de na omenjena stanja bi torej verjetno lahko uporabili kar določila, kot jih za konvencionalne betone podaja [SIST, 2005a]. Večje razlike v tem delu krivulj pa so pri betonih po modelu [Prachasaree, 2014], ki se kažejo kot bolj podajni.

V postkritičnem območju krivulj na slikah 6 in 7 se večje razlike kažejo pri obeh modelih geopolimernih betonov ([Chitrala, 2018] in [Prachasaree, 2014]). Zaključimo lahko, da so lahko konstrukcije iz geopolimernih betonov v primerjavi s konstrukcijami iz konvencionalnih betonov veliko ugodnejša alternativa tam, kjer so pomembne višje ravni rotacijske kapacitete prečnih prerezov, npr. na potresnih območjih.

5 SKLEP

Izčrpen pregled danes dostopne znanstvene in strokovne literature s področja sodobnih geopolimernih betonov, ki smo ga predstavili v prvem delu članka, kaže na nekatere pomembne prednosti tovrstnih betonov v primerjavi s konvencionalnimi betoni. V prvi vrsti velja izpostaviti njihov boljši okoljski odtis, ki ga pripisujemo dejstvu, da se pri proizvodnji tega materiala namesto portland cementa uporabljajo odpadki tehnoloških procesov iz drugih industrij, kot sta elektrofiltirski pepel in žlindra. K boljšemu vplivu na okolje pa prispeva tudi bistveno zmanjšana količina toplogrednih plinov, ki nastajajo pri proizvodnji in ki naj bi bila po ocenah nekaterih raziskovalcev nižja za kar 65–90 %. Nadalje velja omeniti tudi druge očitne prednosti geopolimernih betonov, kot so boljša odpornost proti nekaterim agresivnim vplivom okolja, boljša odpornost proti zelo visokim temperaturam (npr. pri požaru) in prednosti v smislu mehanskega (σ - ε) odziva. Slednjemu smo se posvetili v drugem delu članka. Tu smo analizirali primer armiranobetonkega okvira, ki smo ga obremenjevali do porušitve. Analizo smo najprej izvedli ob predpostavki, da je konstrukcija grajena iz konvencionalnega betona, ki ga lahko opišemo z materialnim modelom iz SIST EN 1992-1-1, dobljene rezultate pa validirali s pomočjo eksperimentalnih rezultatov, ki so za tak okvir na voljo v dostopni literaturi. Nato smo numerično analizo izvedli še ob predpostavki, da je okvir grajen iz geopolimernih betonov, ki jih lahko opišemo z izbranimi modeli, predstavljenimi v predhodnih poglavjih članka. Primerjava rezultatov vseh analiz je pokazala, da dajejo pri obravnavanem okviru nekateri modeli geopolimernih betonov v primerjavi z modelom konvencionalnega betona iz SIST EN 1992-1-1 zelo podoben rezultat pri obtežbah, ki skladno s SIST EN 1990 odgovarjajo stalnim projektnim stanjem iz skupine MSN in projektnim stanjem iz skupine MSU. Za projektiranje konstrukcij iz takšnih geopolimernih betonov glede na omenjena projektna stanja bi bila določila in računске metode SIST EN 1992-1-1 zato uporabna kar v svoji izvorni (nemodificirani) obliki. Pri drugih modelih geopolimernih betonov, ki smo jih implementirali v analizo opazovanega okvira, pa so bili zaključki podobni, a z opozorilom, da bi bilo treba nekoliko prilagoditi kontrole MSU. Pri teh bi bilo v primerjavi s konstrukcijami iz konvencionalnih betonov treba računati vsaj z nekoliko nižjim elastičnim modulom betona, podajnost konstrukcije pa bi bila zato večja. Pri vseh uporabljenih modelih geopolimernih betonov pa so se zelo očitne razlike pokazale v območju postkritične nosilnosti okvira.

Ugotovitev napeljuje k zaključku, da so lahko konstrukcije iz geopolimernih betonov veliko ugodnejša alternativa tam, kjer so pomembne višje ravni rotacijske kapacitete prečnih prerezov, npr. na potresnih območjih. Za trdnejšo potrditev sklepa pa bodo seveda potrebne nadaljnje obsežnejše eksperimentalne in podporne numerične raziskave.

Opozoriti velja, da odpadni materiali, ki se uporabljajo za izdelavo mešanic geopolimernih betonov, vsebujejo tudi snovi (npr. težke kovine), ki bi ob morebitnem sproščanju v okolje lahko neugodno vplivale na zdravje ljudi. Vendar pa raziskovalci predvidevajo, da se zaradi nizke prepustnosti materiala škodljivi elementi fizično ujamejo v porah betonske matrice ali pa se v betonski mešanici kemijsko povežejo. Prve raziskave s tega področja, ki smo jih omenili v članku, temu pritrjujejo, v kolikor se v betonski mešanici uporabi elektrofiltrski pepel in/ali žilindra, ne pa metakaolin in kaolin. Zagotovo pa bodo v prihodnosti v zvezi s tem potrebne obsežnejše dodatne raziskave.

6 ZAHVALA

Delo P. Češarka in J. Č. Kolšek je bilo opravljeno v okviru raziskovalnih programov P2-0158 in P2-0260, ki ju financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).

7 PRISPEVKI AVTORJEV

P. Češarek: pregled literature, pisanje članka, numerične analize, metodologija, konceptualizacija

K. Hrobat: pregled literature, pisanje članka

J. Č. Kolšek: pregled literature, pisanje članka, numerične analize, metodologija, konceptualizacija

8 LITERATURA

Abdullah, M. M. A. B., Kamarudin, H., Binhussain, M., Nizar, K., Ibrahim, W. M. W., Mechanism and Chemical Reaction of Fly Ash Geopolymer Cement-A Review. *Asian Journal of Scientific Research*, 1(5), 247-253, 2011.

Albitar, M., Mohamed Ali, M.S., Visintin, P., Experimental study on fly ash and lead smelter slag-based geopolymer concrete columns. *Construction and Building Materials*, 141, 104-112, 2017.

Alrshoudi, F., Abbas, H., Abadel, A., Albidah, A., Altheeb, A., Al-Salloum, Y., Compression behavior and modeling of FRP-confined high strength geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 283, 1-11, 2021.

Aslani, F., Thermal Performance Modeling of Geopolymer Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1), 2016.

BLS, Dagra: the data digitizer, Version 2.0.19152. 601, Blue Leaf Software, 2019.

Bažant, Z., Pan, J., Pijaudier-Cabot, G., Softening in reinforced concrete beams or frames,

Journal of Structural Engineering, 113, 2333-2347, 1987.

Bratina, S., Saje, M., Planinc, I., On materially and geometrically non-linear analysis of reinforced concrete planar beams. *International journal of solids and structures*, 41 (24-25), 7181-7207, 2004.

Chitralla, S., Jadaprolu, G. J., Chundupalli, S., Study and predicting the stress-strain characteristics of geopolymer concrete under compression. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 172-192, 2018.

Collins, M. P., Mitchell, D., *Prestressed concrete structures*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1991.

Collins, M. P., Mitchell, D., MacGregor, J. G., Structural design considerations for high-strength concrete. *Concrete International*, 5(5), 27-34, 1993.

Cong, X., Zhou, W., Elchalakani, M., Experimental study on the engineering properties of alkali-activated GGBFS/FA concrete and constitutive models for performance prediction. *Construction and Building Materials*, 240, 1-21, 2020.

Cranston, W. B., Tests on reinforced concrete frames, 1: Pinned portal frames. Technical report TRA/392, Cement and Concrete Association, London, 1965.

CSI, SAP2000, Structural analysis and design, Version 21.0.2, Computers & Structures, Inc., 2021.

Davidovits, J., Geopolymers - inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633-1656, 1991.

DBMR, Global Geopolymer Market - Industry Trends and Forecast to 2028, <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-geopolymer-market>, Data Bridge Market Research, 2022.

Desayi, P., Krishnan, S., Equation for the stress-strain curve of concrete. *Journal of American Concrete Institute*, 61, 345-35, 1964.

Filak, A., A new concept for offshore turbine tower construction, <https://www.windsystemsmag.com/a-new-concept-for-offshore-turbine-tower-construction/>, *Wind Systems*, 2022.

Ganesan, N., Abraham, R., Deepa Raj, S., Sasi, D. Stress-strain behaviour of confined geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 73, 326-331, 2014.

GCCA, Cement and concrete around the world, <https://gccasociation.org/concretefuture/cement-concrete-around-the-world/>, Global Cement and Concrete Association, 2022.

Haider, G. M., Sanjayan, J. G., Ranjith, P. G., Complete triaxial stress-strain curves for geopolymer. *Construction and Building Materials*, 69, 196-202, 2014.

Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, M. J., Rangan, B.V., The stress-strain behaviour of fly ash-based geopolymer concrete. *Developments in Mechanics of Structures & Materials, Proceedings of the 18th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*, Perth, Australia, 2004.

Hardjito, D., Rangan, B. V., Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, Research Report

- GC 1, Curtin University of Technology, Faculty of Engineering, Perth, Australia, 2005.
- Hassan, A., Mohammed, A., Shariq, M., Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of Cleaner Production*, 223, 704-728, 2019.
- Hassan, A., Mohammed, A., Shariq, M., A review of properties and behaviour of reinforced geopolymer concrete structural elements – A clean technology option for sustainable development. *Journal of Cleaner Production* 245, 1-15, 2020.
- Hočevar, A., Vpliv vrste cementa na sulfatno odpornost betona, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2007.
- Hren, M., Karakterizacija korozijskih procesov jekla v mešanih cementih v prisotnosti kloridov, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2019.
- Hrobat, K., Materialni modeli sodobnih geopolimernih betonov za računske analize gradbenih konstrukcij, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2022.
- Hutagi, A., Khadiranaikar, R. B., Flexural behavior of reinforced geopolymer concrete beams, *International Conference on Electrical, Electronics and Optimization Techniques, ICEEOT 2016*, Chennai, India, 2016.
- Lingyu, T., He, D., Zhao, J., Wang, H., Durability of geopolymers and geopolymer concretes: A review, *Reviews on advanced materials science*, 60 (1), 1-14, 2021.
- Luna, Y., Querol, X., Antenucci, D., Jdid, E.-A., Fernandez, C., Vale, J., Immobilization of a Metallurgical Waste Using Fly Ash-Based Geopolymers, V: *World of Coal Ash, WOCA 07*, Northern Kentucky, USA, 2007.
- MI, Geopolymer Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2023 - 2028), <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/geopolymer-market>, Mordor Intelligence, 2022.
- Noushini, A., Aslani, F., Castel, A., Gilbert, R. I., Uy, B., Foster, S., Compressive stress-strain model for low-calcium fly ash-based geopolymer and heat-cured Portland cement concrete, *Cement and Concrete Composites*, 73, 136-146, 2016.
- Noushini, A., Hastings, M., Castel, A., Aslani, F., Mechanical and flexural performance of synthetic fibre reinforced geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 186, 454-475, 2018.
- Parshwanath, R. N., Nataraja, M. C., Lakshmanan, N., Dattatreya, J. K., Sabitha, D., Sulphuric acid resistant ecofriendly concrete from geopolymerisation of blast furnace slag, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 19(5), 357-367, 2012.
- Popovics, S., A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, *Cement and concrete research*, 3, 583-599, 1973.
- Prachasaree, W., Limkatanyu, S., Hawa, A., Samakrattakit, A., Development of equivalent stress block parameters for fly-ash-based geopolymer concrete, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 8549-8558, 2014.
- Sarker, P. K., Analysis of geopolymer concrete columns, *Materials and Structures*, 42, 715-724, 2009.
- SIST, SIST EN 1990, Evrokod – Osnove projektiranja konstrukcij, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2004.
- SIST, SIST EN 1992-1-1, Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2005a.
- SIST, SIST EN 1992-1-2, Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-2. del: Splošna pravila - Projektiranje požarnovarnih konstrukcij, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2005b.
- SIST, SIST EN 12390-3:2019, Evrokod 2: Preskušanje strjenega betona - 3. del: Tlačna trdnost preskušancev, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2019.
- SIST, SIST EN 12390-13:2021, Evrokod 2: Preskušanje strjenega betona - 13. del: Določanje sekantnega modula elastičnosti pri tlačni obremenitvi, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2021.
- Sofi, M., van Deventer, J. S. V., Mendis, P. A., Lukey, G. C., Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs), *Cement and Concrete Research*, 37, 251-257, 2007.
- Sumajouw, M. D. J., Rangan, B. V., Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Reinforced beams and columns, *Research Report GC 3*, Curtin University of Technology, Faculty of Engineering, Perth, Australia, 2006.
- Sun, P. J., Wu, H. C., Chemical and freeze-thaw resistance of fly-ash-based inorganic mortars, *Fuel*, 111, 740-745, 2013.
- Tang, Z., Hua, Y., Tam, V. W. C., Li, W., Uniaxial compressive behaviors of fly ash/slag-based geopolymeric concrete with recycled aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 104, 1-16, 2019.
- Tang, Z., Li, W., Tam, V. W. Y., Yan, L., Mechanical performance of CFRP-confined sustainable geopolymeric recycled concrete under axial compression, *Engineering Structures*, 224, 1-17, 2020.
- Thomas, R. J., Peethamparan, S., Alkali-activated concrete: Engineering properties and stress-strain behavior, *Construction and Building Materials*, 93, 49-56, 2015.
- Thorenfeldt, E., Tomaszewicz, A., Jensen, J. J., Mechanical properties of high strength concrete and application in design, *Proceedings of the symposium on utilization of high strength concrete*, Tapir, Trondheim, 149-159, 1987.
- Zhao, R. D., Yuan, Y., Cheng, Z. Q., Wen, T., Li, J., Li, F. H., Ma, Z. J., Freeze-thaw resistance of Class F fly ash-based geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 222, 474-483, 2019.

dr. Viktor Markelj, univ. dipl. inž. grad.
viktor.markelj@ponting.si



Jernej Maher, univ. dipl. inž. grad.
jernej.maher@ponting.si
Ponting, d. o. o., Strossmayerjeva 28, 2000 Maribor
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor



Strokovni članek
UDK/UDC: 624.21.037:656.2(497.4Pesnica)

VIADUKT PESNICA – INOVACIJE V ŽELEZNIŠKI INFRASTRUKTURI

PESNICA VIADUCT – INNOVATIONS IN RAILWAY INFRASTRUCTURE

Povzetek

Prispevek opisuje železniški viadukt Pesnica – od koncepta, analize, izgradnje do uporabe. Dvotirni viadukt je z dolžino 912,60 m najdaljši železniški viadukt v Sloveniji. Preko viadukta poteka tir na togi podlagi z neprekinjenim zvarjenim tirom brez tirnih dilatacij. Viadukt je zasnovan kot armiranobetonska prednapeta integralna konstrukcija, ki sestoji iz 32 polj povprečne dolžine po 28 m. Ob zanimivi zgodovini ima nov viadukt tudi inovativno tehnično zasnovo, saj je koncipiran kot integralna konstrukcija brez ležišč. Posamezni, 112 m dolgi okvirni segmenti so med seboj povezani preko razcepljenih stebrov, ki omogočajo medsebojno dilatiranje okvirjev. V prispevku sta opisani tudi analiza viadukta s posebnostmi in obremenilna preizkušnja viadukta v zaključku.

Ključne besede: železniški viadukt, prednapeti beton, integralna konstrukcija, analiza, tir na togi podlagi

Summary

The article describes the Pesnica railway viaduct – from concept, analysis, construction to service. The 912.60-metre-long double-track viaduct is the longest railway viaduct in Slovenia. A slab track, featuring a continuous welded rail without track expansion joints, is laid over it. The viaduct is designed as a reinforced concrete prestressed integral structure, consisting of 32 spans, each with an average length of 28 m. In addition to its interesting history, the new viaduct also boasts with an innovative technical design conceived as an integral structure without structural bearings. Each of the 112 m long frame segments is connected by split columns, facilitating mutual dilatation of the frames. The article also describes the analysis of the viaduct with specific features and the load test at the end.

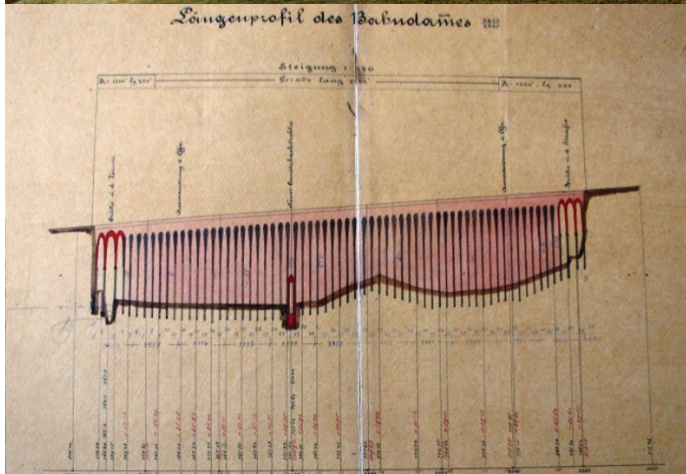
Key words: railway viaduct, pre-stressed concrete, integral structure, analysis, slab track

1 UVOD

V Sloveniji še nismo gradili večjih železniških premostitvenih objektov, ampak le manjše, v okviru izvedbe izvenrijskih križanj, ali pa kot obnova obstoječih železniških objektov. V zadnjem času pa so bili zgrajeni ali so v gradnji kar štirje večji železniški objekti, in sicer trije enotirni viadukti na drugem tiru Divača-Koper (viadukti Glinščica, Gabrovica in Vinjan) ter dvotirni viadukt Pesnica na železniški progi Maribor-Šentilj, ki bo predstavljen v prispevku in je tudi najdaljši med vsemi.

Novi odsek poteka poleg obstoječe proge Dunaj-Trst, ki ima na tej lokaciji še posebej zanimivo zgodovino. Obstoječa enotirna proga je potekala po nasipu, kjer je bil prvotno leta 1864 zgrajen viadukt dolžine 649 m, s čimer je bil takrat najdaljši viadukt na t. i. južni železnici (slika 1). Viadukt, zgrajen pod vodstvom avstrijskega inženirja Carla von Ghega, je imel 64 obokov iz kamna in opeke, temeljen pa je bil na lesenih kolih. Domnevno zaradi posedanja in slabe kvalitete opeke je viadukt začel propadati. Po letu 1860 so ga začeli zasipavati in ga, razen nujnih razponov, v celoti zasipali [Wikipedia, 2022].

Nasip, po katerem poteka obstoječa enotirna proga, je visok do 15 m in ima težave s stabilnostjo, saj so se že pojavljali zdrsi in potrebne sanacije nasipa. Težave so tudi s starim predorom, zato je naročnik na tem odseku izbral v celoti novo traso za progo.



Slika 1. Nekdanji železniški viadukt čez dolino Pesnice iz leta 1846 (akvarel in vzdolžni profil) [Wikipedia, 2022].

Celoten projekt obsega 3,73 km dvotirne železniške proge, od tega 1530 m v železniškem predoru, dobrih 900 m pa na viaduktu. Pogodbena vrednost za odsek je na izvajalskem razpisu leta 2019, vključno z gornjim ustrojem proge (tir na togi podlagi, vozna mreža, signalno varnostne naprave), znašala 101 mio. EUR z DDV. Od tega so gradbena dela za viadukt, brez tirnih naprav in vozne mreže, znašala približno 12 mio. EUR. Končna cena viadukta s podražitvami in DDV je znašala 14,8 mio. EUR.

Osnovni podatki projekta so razvidni iz preglednice 1.

| | |
|----------------------|---|
| Investitor, Naročnik | Republika Slovenija, Direkcija RS za infrastrukturo - DRSI |
| Projekt | »Gradnja odseka železniške proge Maribor-Šentilj-d.m. od km 595+870 do km 599+600 glavne ŽP št. 30 Zidani Most-Šentilj-d.m.« |
| Skupina izvajalcev | JV Pomgrad, d. d., Kolektor Koling, d. o. o., SŽ-ŽGP Ljubljana, d. d., GH-Holding, d. o. o., Gorenjska gradbena družba, d. d. |
| Naziv objekta | Železniški viadukt PESNICA |
| Izvajalec viadukta | POMGRAD, d. d., Murska Sobota Podporni odri Pomgrad in PERI izvajalec prednapenjanja Freyssinet Adria SI, d. o. o. |
| Projektant | Inženirski biro PONTING, d. o. o., Maribor, vse faze načrtovanja [Ponting, 2015-2022] |
| Inženir | DRI upravljanje investicij, d. o. o., Ljubljana |

Preglednica 1. Osnovni podatki o projektu.

2 PROBLEMATIKA PREMOŠČANJA

2.1 Namen viadukta in opis lokacije

Železniška proga na višini 18 m z viaduktom premošča ravno, občasno poplavno dolino, ki jo je nasula in izoblikovala reka Pesnica (slika 2). Celotna dolina širine okoli 1 km je kmetijsko območje, urejeno v njive, in leži na nadmorski višini med 250 m in 260 m. Tla so slabo nosilna, sestavljena iz glinasto meljnih zemljin različne gnetnosti, od židke in lahke konsistence do zemljin trdne konsistence. Vmes se pojavljajo še drobni peski različne sestave, od zelo rahle do rahle gostotne sestave. Podtalna voda se pojavlja praktično do vrha. Nosilni sloj laporovca se nahaja na globini 16 m, ob robovih doline pa se nosilna osnova dvigne do 4 m pod površje.

Viadukt je namenjen elektrificirani dvotirni železniški progi, ki pa bo v prvi fazi izvedena kot enotirna. Računska hitrost vožnje je 120 km/h, kategorija nosilnosti proge pa znaša D4. Objekt poleg kmetijske doline premošča še avtocesto A1 Ljubljana-Šentilj, glavno cesto Pesnica-Lenart, reko Pesnico, pritok Cirknica ter lokalne ceste.



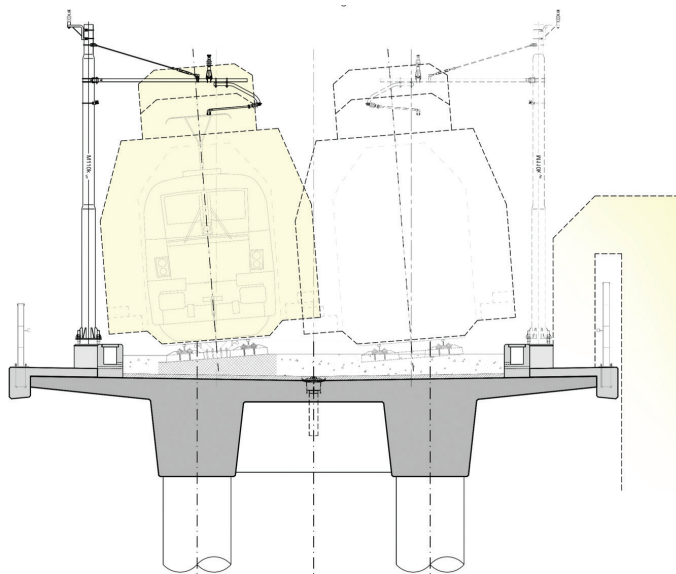
Slika 2. Obstoječa proga na nasipu in novi potek proge jugo-vzhodno od obstoječe.

2.2 Geometrijski elementi proge in objekta

Viadukt je dolžine dobrih 900 m, od česar se 380 m osi nahaja v premi, v prehodnici $L=145$ m ter v radiju $R = 850$ m (v dolžini 380 m), nadvišanje zunanjega tira v radiju znaša 120 mm. Niveleta proge je v konstantnem vzdolžnem padcu $i = 9,125$ ‰. Zaradi bližine postaje Pesnica se razmak med tiri na viaduktu spreminja, in sicer od 4,20 m na začetku do 4,60 m na koncu viadukta. Zaradi tehnoloških razlogov gradnje je viadukt konstantne širine.

| | | |
|--|--------------------|---------|
| 2 x prostor za pritrditev ograje PHO | 2 x 0,35 | 0,70 m |
| 2 x hodnik (vključno s temeljem vozne mreže) | 2 x 1,73 | 3,46 m |
| 2 x kanaleta (svetla odprtina 30/40cm) | 2 x 0,60 | 1,20 m |
| Prostor za dva tira | 2,20 + 4,60 + 2,20 | 9,00 m |
| Skupna širina viadukta | 2,68 + 9,00 + 2,68 | 14,36 m |

Preglednica 2. Sestava prometnega profila na objektu.



Slika 3. Karakteristični prečni prerez viadukta.

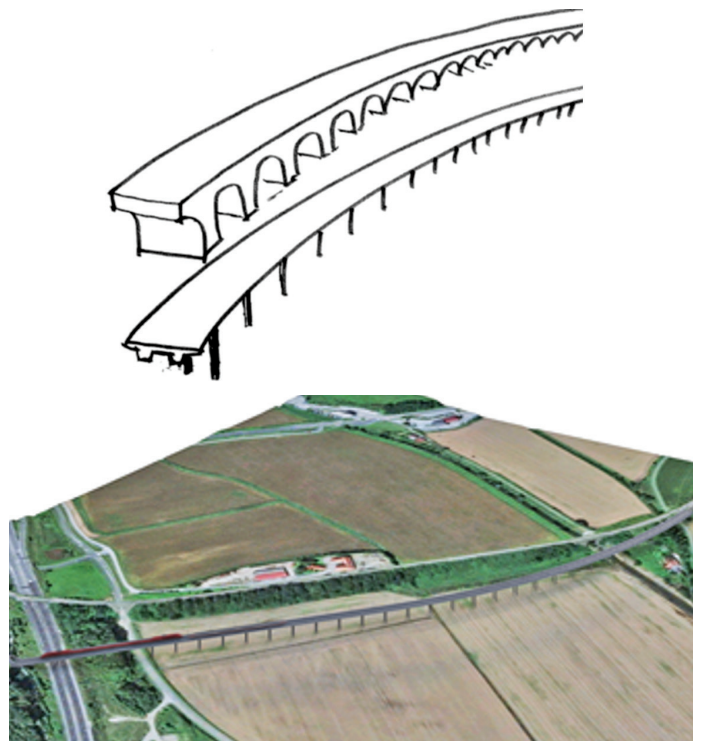
Viadukt ima na obeh straneh hodnik, ki služi morebitni evakuaciji potnikov ter revizijskim namenom. Hodnik je širine 1,73 m, na mestih vpetja (temelja) vozne mreže pa ima lokalno širino 1,18 m, kar omogoča pregled objekta s posebnim vozičkom. Skupna širina viadukta znaša 14,36 m (preglednica 2 in slika 3).

3 KONCEPT

V zadnjem desetletju je bilo izvedenih nekaj zanimivih realizacij na novih železniških povezavah v Nemčiji. Omeniti je treba zelo zanimivi izvedbi viadukta Gänsebachthalbrücke [Schenkel, 2010] in Stöbnitztalbrücke [Jung, 2010], ki oba potekata preko nizkih dolin in sta zasnovana kot integralna viadukta brez ležišč. Osnovni cilj take zasnove je narediti varen in trajen objekt, ki je hkrati zelo gospodaren, kar pomeni z nizko začetno investicijo ter majhnimi stroški za vzdrževanje. Pri integralnem konceptu nosilne konstrukcije odpadeta vgradnja in vzdrževanje ležišč, kar je lahko precej velik strošek.

Posebnost navedenih dolgih železniških objektov je členjenost na krajše integralne segmente, kar omogoča izvedbo tirov brez posebnih tirnih dilatacij, torej uporabo neprekinjenega zavarjenega tira. Tir brez tirnih dilatacij je cenejši za izgradnjo in vzdrževanje, je bolj trajen, povzroča manjše emisije hrupa, z manjšim rizikom iztirjanja vlaka pa je tudi bolj varna rešitev ([Marx, 2011], [Freystein, 2011]).

Zaradi relativno nizke lege nad dolino smo lahko sledili oblikovanju nekdanjega zasipane viadukta iz 19. stoletja, to je z enakovmernimi krajšimi razponi, vendar v moderni transparentni maniri (slika 4).

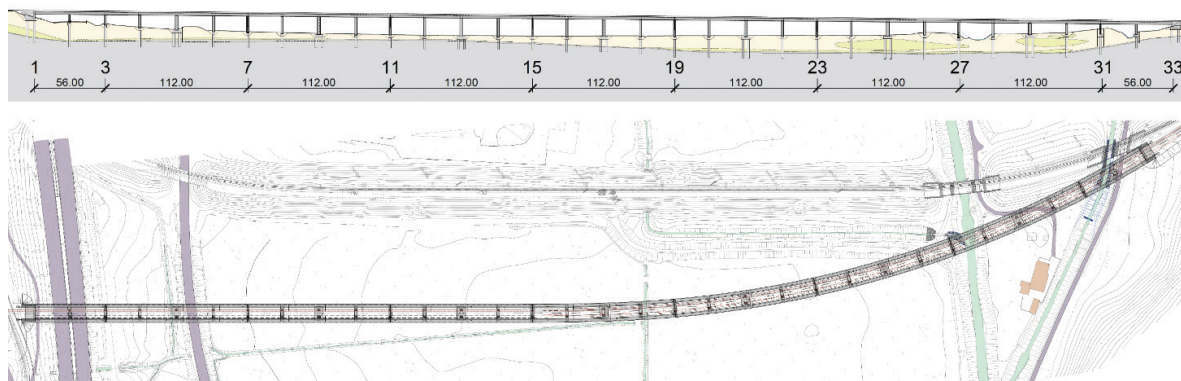


Slika 4. Koncept oblikovanja sledi inženirskemu minimalizmu (skica in 3D-render).

3.1 Konstrukcija

Viadukt je skupne dolžine 912,60 m ter konstantne širine 14,36 m ter ima 32 razponov povprečne dolžine 28 m. Statična dolžina 896 m med krajnimi osmi je razdeljena na devet delov, na 7 vmesnih okvirjev dolžine po 112 m ter dva krajna polovična okvirja dolžine 56 m (slika 5). To daje naslednje statične razpore:

56 m (2 x 28 m) + 7 x 112 m (27 m + 29 m + 29 m + 27 m) + 56 m (2 x 28 m) = 896 m



Slika 5. Vzдолžni prerez in tloris – objekt je členjen na 9 delov.

Prva in zadnja dva razpona (2 x 28 m = 56 m) sta monolitno povezana z obema krajnima opornikoma, ki predstavljata fiksno nepomično točko s preходом na teren. Z nepomično točko na oporniku se izognemo kombinaciji potencialnih rizikov, v tem primeru vzdolžnemu dilatiranju (horizontalne deformacije) in posedanju terena izza opornika (vertikalne deformacije).

Členjenje viadukta je prikazano na sliki 6. Vsak tipični vmesni okvir dolžine 112 m ima svoj center pomikov (fiksno točko) v sredini pod centralno, bolj togo podporo (A). Ostale podpore tipa B in C so zasnovane tako, da lahko prevzemajo deformacije zaradi temperature in reologije (slika 7).

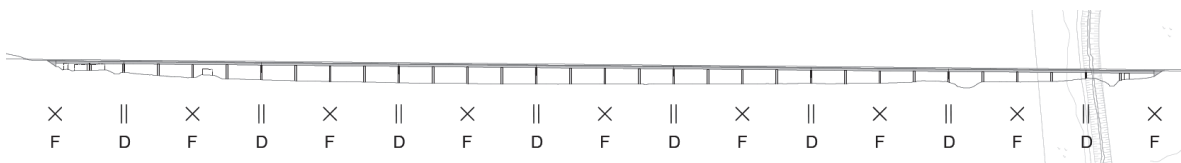
ki sta spodaj vpeta v pilotno blazino in temeljena z dvema vrstama pilotov 2 x 3 = 6 pilotov ϕ 150 cm. Ta tip podpore prenaša večji del vzdolžne zavorne sile.

- Tip B: vmesna podpora 2 x ϕ 160 cm, ki je podajno temeljena na eni vrsti 4 pilotov ϕ 150 cm.
- Tip C: podpora na konstrukcijski dilataciji je v bistvu prezan okrogli steber ϕ 160 cm, ki ima manjšo togost ter na vrhu omogoča toplotne dilatacije v obe smeri. Na videz je podpora tipa C podobna podpori tipa B.

Celotno temeljenje je predvideno kot globoko na pilotih premera 150 cm. Podpore tipa A so temeljene na skupini pilotov v dveh vrstah (2x3 piloti), s čimer dobimo togo vpeto podporo. Ostale podpore tipa B in C pa so temeljene na eni vrsti pilotov (1 x 4 piloti), da dobimo vzdolžno bolj podajno podporo, ki se lahko prilagaja temperaturnim spremembam. Podpore in temeljenje so zasnovani tako, da so povprečne togosti ene zavorne v razmerju $C + B + A + B + C = 9\% + 18\% + 46\% + 18\% + 9\% = 100\%$. To pomeni, da srednja toga podpora tipa A prevzame skoraj polovico horizontalne sile (Z ali S).

3.3 Prednapenjanje

Pri dolgih viadukih je običajna tehnologija segmentna gradnja po poljih, pri čemer se opaži in zabetonira eno polje s previ-



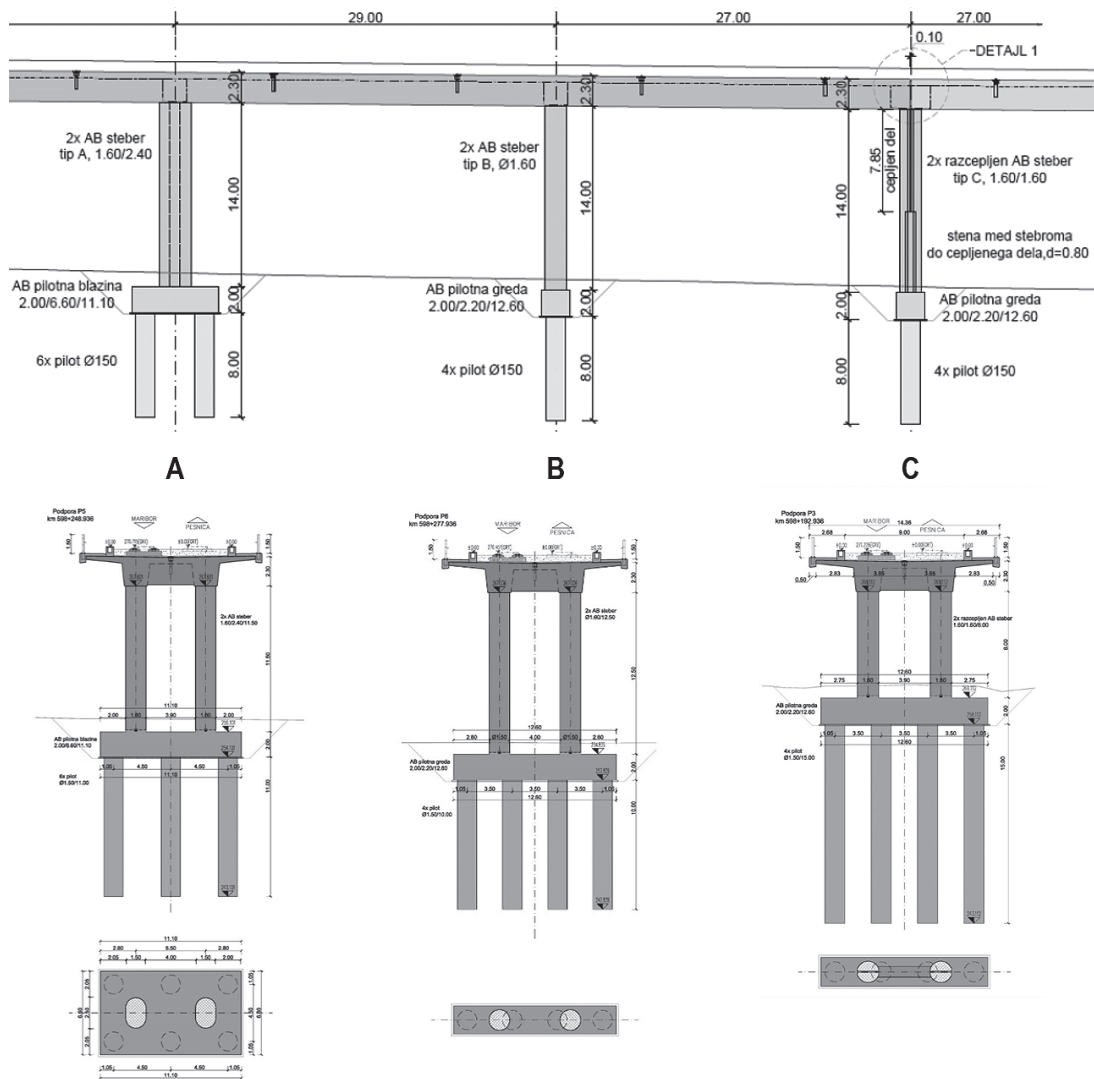
Slika 6. Členjenje viadukta (F = fiksna točka, D = dilatiranje – sproščanje okvirjev).

3.2 Podporna konstrukcija in temeljenje

Elementi podporne konstrukcije, vse vmesne podpore in oba opornika so integralno povezani z zgornjo konstrukcijo. Vmesne podpore so sestavljene iz stebrov okroglega prereza ali ovalnega prereza in jih lahko razdelimo na 3 tipe (slika 7):

- Tip A: centralna podpora okvirja (center pomikov) je sestavljena iz dveh ovalnih stebrov dimenzij 160 cm / 240 cm,

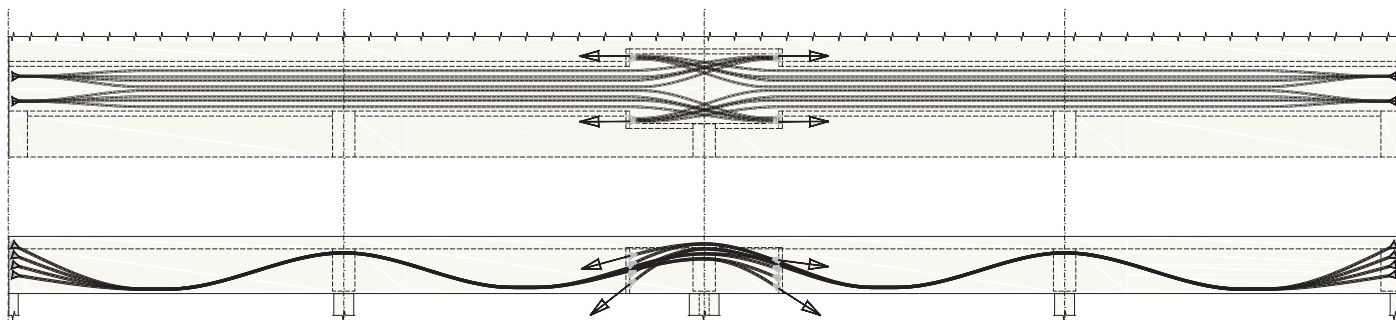
som, sledi prednapenjanje tega segmenta in nato ponavljanje postopka. Pri zasnovi z integralnimi okvirji nastopi problem kvalitetne izvedbe vogala končnega okvirja, saj prednapenjanje zahteva svoj prostor in slabi sam vogal. Zato smo vpeljali nov način napenjanja okvirjev, in sicer iz sredine okvirja. V vogalih okvirja so vgrajene potopljene pasivne glave, ki ne motijo poteka armature v vogalih. Aktivne napenjalne glave pa se nahajajo na območju sredinske podpore (slika 8), kjer se kabli



Slika 7. Trije različni tipi podpor: tip A daje togost okvirju, tip B vmesna podpora in tip C razcepljena podpora, ki podpira dva sosednja okvirja.

preklopijo, kar ustreza tudi obliki diagrama upogibnih momentov. To je inovacija v primerjavi izvedenim referenčnim železniškim viaduktom ([Schenkel, 2010], [Jung, 2010]) ter pomeni povečanje kvalitete gradnje in s tem povečanje predvidene trajnosti objekta.

V vsakem od obeh reber zgornje konstrukcije je vgrajenih po 8 kablov 19 x 15,7 mm, dolžine 62 m, ki smo jih napenjali s silo 3800 kN. Vsi kabli so bili sistema Freyssinet in vgrajeni v plastične PEHD-cevi ter elektroizolirani.



Slika 8. Inovativna shema prednapenjanja okvirjev omogoča kvalitetno izvedbo členjenih stebrov.

4 ANALIZA

4.1 Računske metode za železniške objekte

Osnovne predpostavke, ki jih je bilo treba upoštevati pri določitvi obtežb in vrsti analize, so bile, da bo na viaduktu potekala elektrificirana dvotirna železniška proga (v prvi fazi enotirna), da znaša računsko hitrost vožnje 120 km/h ter kategorija nosilnosti proge D4.

Za potrebe izvedbe računskih analiz objektov, namenjenih železniškemu prometu, se lahko uporabljajo za izračune obremenitev konstrukcije, deformacij (pomiki, zasuki) ter pospeškov različni postopki, in sicer:

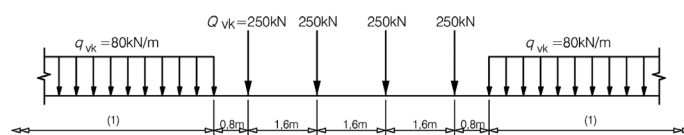
- izvedba statične analize konstrukcije ob upoštevanju obtežnih shem iz SIST EN 1991-2 [SIST, 2004], kjer se izračunane količine povečajo z dinamičnim faktorjem,
- izvedba dinamične analize v skladu s SIST EN 1991-2, poglavje 6.4.6 [SIST, 2004].

Obstaja tudi možnost pretvorbe dinamičnega problema v statičnega. To je možno narediti s pomočjo uporabe dinamičnih faktorjev, pri čemer analiza temelji na osnovi dejanskih kompozicij vlakov. Na podlagi tega je mogoče določiti spremembo notranjih statičnih količin v časovnem zaporedju.

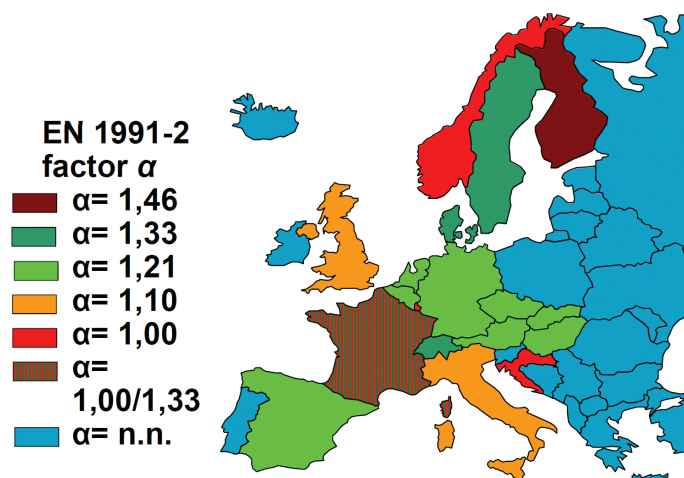
Za analizo je najenostavnejša statična analiza z uporabo dinamičnih faktorjev, ki pa je možna le v primeru, da ni nevarnosti za pojav resonančnega nihanja. Kot pomoč za določitev, ali je potrebna dinamična analiza, se lahko uporablja diagram 6.9 iz SIST EN 1991-2 [SIST, 2004]. Pri izračunu dinamičnih faktorjev Φ , s katerimi se povečajo statični učinki vplivov zaradi obtežnih shem LM71, SW/O in SW/2, je treba upoštevati nivo vzdrževanja ter dolžino L_{ϕ} , na katero vplivajo tip konstrukcijskega elementa, material elementa ter statični sistem.

4.2 Obtežba

Analiza železniških objektov je zaradi kompleksnosti definirana in podajanja obtežb mnogo zahtevnejša kot analiza preostalih objektov. Za analizo viadukta Pesnica so bile upoštevane vse merodajne obtežne sheme v skladu z veljavnimi standardi (LM71, SW/O in SW/2).



Slika 9. Obtežni model LM 71 [SIST, 2004].



Slika 10. Upoštevanje faktorja razreda obtežbe α v Evropi [Tschumi, 2012].

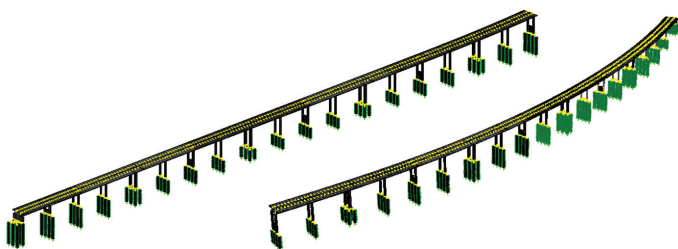
| number of tracks on structure | | | Groups of loads | | | Vertical forces | | | Horizontal forces | | | Comment |
|-------------------------------|---|----------|-------------------------|---------------------------|----------------------------------|---|------------------------|----------------|--|--|--|---|
| 1 | 2 | ≥ 3 | Reference EN 1991-2 | 6.3.2/6.3.3 | 6.3.3 | 6.3.4 | 6.5.3 | 6.5.1 | 6.5.2 | | | |
| | | | number of tracks loaded | Load Group ⁽⁶⁾ | Loaded track | LM 71 ⁽¹⁾ SW/O ^{(1),(2)} HSLM ⁽⁶⁾⁽⁷⁾ | SW/2 ⁽¹⁾⁽³⁾ | Unloaded train | Traction, Braking ⁽¹⁾ | Centrifugal force ⁽¹⁾ | Nosing force ⁽¹⁾ | |
| | | | 1 | gr 11 | T ₁ | 1 | | | 1 ⁽⁵⁾ | 0,5 ⁽⁵⁾ | 0,5 ⁽⁵⁾ | Max. vertical 1 with max. longitudinal |
| | | | 1 | gr 12 | T ₁ | 1 | | | 0,5 ⁽⁵⁾ | 1 ⁽⁵⁾ | 1 ⁽⁵⁾ | Max. vertical 2 with max. transverse |
| | | | 1 | gr 13 | T ₁ | 1 ⁽⁴⁾ | | | 1 | 0,5 ⁽⁵⁾ | 0,5 ⁽⁵⁾ | Max. longitudinal |
| | | | 1 | gr 14 | T ₁ | 1 ⁽⁴⁾ | | | 0,5 ⁽⁵⁾ | 1 | 1 | Max. lateral |
| | | | 1 | gr 15 | T ₁ | | | 1 | | 1 ⁽⁵⁾ | 1 ⁽⁵⁾ | Lateral stability with "unloaded train" |
| | | | 1 | gr 16 | T ₁ | | 1 | | 1 ⁽⁵⁾ | 0,5 ⁽⁵⁾ | 0,5 ⁽⁵⁾ | SW/2 with max. longitudinal |
| | | | 1 | gr 17 | T ₁ | | 1 | | 0,5 ⁽⁵⁾ | 1 ⁽⁵⁾ | 1 ⁽⁵⁾ | SW/2 with max. transverse |
| | | | 2 | gr 21 | T ₁ T ₂ | 1 1 | | | 1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾ | 0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾ | 0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾ | Max. vertical 1 with max longitudinal |
| | | | 2 | gr 22 | T ₁ T ₂ | 1 1 | | | 0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾ | 1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾ | 1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾ | Max. vertical 2 with max. transverse |
| | | | 2 | gr 23 | T ₁ T ₂ | 1 ⁽⁴⁾ 1 ⁽⁴⁾ | | | 1 1 | 0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾ | 0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾ | Max. longitudinal |
| | | | 2 | gr 24 | T ₁ T ₂ | 1 ⁽⁴⁾ 1 ⁽⁴⁾ | | | 0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾ | 1 1 | 1 1 | Max. lateral |
| | | | 2 | gr 26 | T ₁ T ₂ | | 1 | | 1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾ | 0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾ | 0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾ | SW/2 with max. longitudinal |
| | | | 2 | gr 27 | T ₁ T ₂ | | 1 | | 0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾ | 1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾ | 1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾ | SW/2 with max. transverse |
| | | | ≥ 3 | gr 31 | T ₁ | | 0.75 | | 0.75 ⁽⁵⁾ | 0.75 ⁽⁵⁾ | 0.75 ⁽⁵⁾ | Additional load case |

Preglednica 3. Skupine obtežb železniškega prometa [SIST, 2004].

Seveda se je ob vertikalnih vplivih upošteval tudi vpliv pripadajočih horizontalnih sil (pospeševanje in zaviranje, centrifugalna sila in bočni udar). Dodatno težavo za analizo konstrukcije je predstavljala dvotirnost proge, ki znatno poveča možne obtežne situacije, ki so podane v tabeli v nadaljevanju. Ob tem je treba v programu ustrezno upoštevati možno ekscentričnost obtežb ter raznos le-teh v prečni in vzdolžni smeri. Dodatno je bil ob dinamičnemu faktorju Φ v analizi upoštevan tudi faktor razreda obtežbe $\alpha=1,21$, s katerim je treba povečati karakteristične vplive. Faktor razreda obtežbe α je namenjen obvladovanju dolgoročnega rizika povečanja obtežb pri tovoru na mednarodnih progah.

4.3 Opis globalnega modela

Pri modeliranju smo naredili primerjavo med dvema modeloma [SOFiSTiK, 2018], in sicer smo konstrukcijo zmodelirali samo z enim nosilcem ter kot »branasto« konstrukcijo, kjer smo vzdolžna nosilca povezali s prečniki na ustreznem rastru. Ta model smo kasneje uporabili za končno analizo. Zaradi težav pri analizi (uporaba modula namenjenega prometni obtežbi) smo konstrukcijo za potrebe statične analize razdelili na dva dela, in sicer ravni segmenti 1 do 5 in zakrivljeni segmenti 5 do 9.



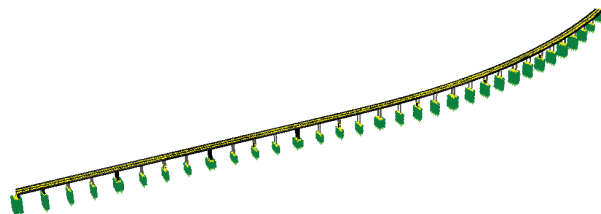
Slika 11. Ravni in zakrivljeni model konstrukcije za statično analizo.

V nadaljevanju so opisane tudi nekatere posebnosti pri analizi, do katerih je prišlo po izbiri izvajalca objekta. V fazi projektiranja je prišlo do nekaterih sprememb glede faznosti gradnje objekta. Za takšne viadukte je običajna gradnja po segmentih. Prvotna rešitev je predvidevala gradnjo posameznega tipičnega 112 m odseka prekladne konstrukcije v 4 delih. Na podlagi razvoja rešitve med projektantom in izvajalcem pa je prišlo do spremembe, ki je predvidevala betonažo celotnega segmenta v eni fazi ter prednapenjanje kablov iz sredine. S tem smo se izognili delovnim stikom pri gradnji posameznih segmentov, ne prihaja do oslabitev vogalov okvirjev, hkrati pa omogoča poljuben vrstni red betoniranja in pospešitev izdelave segmentov. Ob pričetku gradnje pa se je preverila tudi možnost, da se prvotno prednapne samo del kablov, ki so potrebni zaradi lastne teže konstrukcije, kasneje po razopazovanju pa še preostali del. Tako da so se prvotno napeli 3 kabli na sidrišče, kasneje pa preostanek, kar je poenostavilo in pospešilo gradnjo.

Eden od posebnosti gradnje ter analize objekta je bil prvi segment viadukta, ki poteka nad avtocesto. Prvotna rešitev je predvidevala celotno betonažo v eni fazi, vendar je kasneje prišlo do delitve tega segmenta na dva dela. Pozornost je bila namenjena temu, da smo določili maksimalno možno število kablov, ki se lahko napnejo v prvi fazi (4 kabli). Želja je bila, da

je število kablov, ki jih je treba zaščititi in varovati pred končno betonažo, čim manjše. Analiza je pokazala tudi, da je pri prednapenjanju krajnih segmentov, ki so monolitno povezani z opornikom, smiselno prednapeti kable, preden se izvedejo bočne stene opornika. Na ta način je bila togost podpore manjša ter smo znižali parazitni vpliv napenjanja kablov, ki je negativno vplival na konstrukcijo.

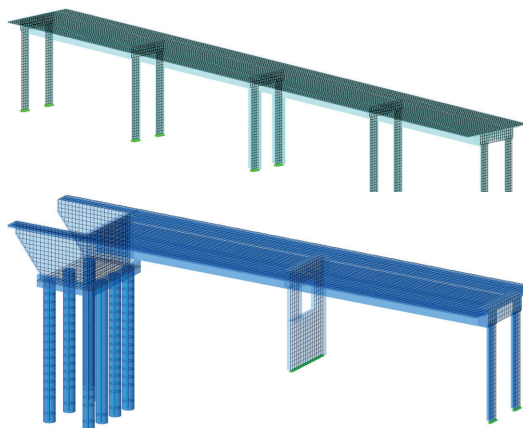
Za potrebe potresne analize se je uporabil model, kjer je bila zmodelirana konstrukcija v celotni dolžini objekta (slika 12).



Slika 12. Model za dinamično (potresno) analizo konstrukcije.

4.4 Opravljene analize za viadukt Pesnica

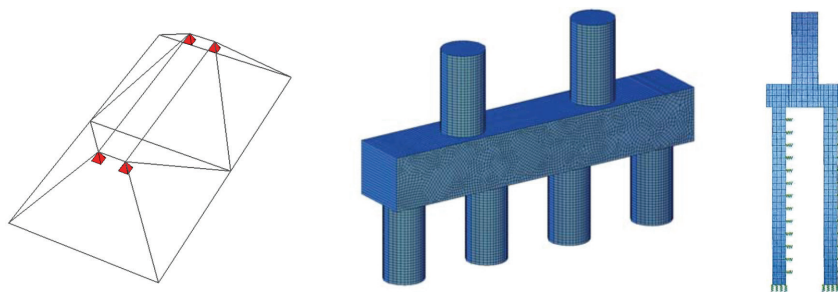
Ob analizi konstrukcije na globalnem modelu smo opravili še številne druge kontrole, ki so navedene v nadaljevanju. Na sliki 13 sta prikazana modela za analizo prečne smeri in opornikov. Tukaj velja izpostaviti merodajna obtežna primera iztirjanja vlaka ter obtežni primer, ki predvideva redne vzdrževalne preglede s pomočjo vozička.



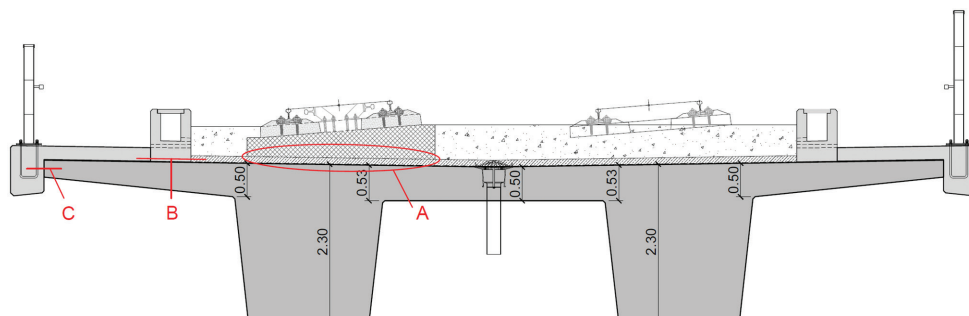
Slika 13. Modela za analizo prečne smeri in opornikov.

Za potrebe analize so se uporabili tudi številni lokalni modeli. Na slikah v nadaljevanju so prikazani različni modeli za analizo pilotnih blazin. Uporabili so se modeli iz ploskovnih elementov, hkrati pa se je kontrola naredila s pomočjo paličnih elementov v skladu z modeli "strut- and-tie" (slika 14).

Izvedena je bila tudi kontrola strižnih povezav ter sidranj v skladu s shemo v nadaljevanju, pri čemer se je opravila analiza strižne povezave in tira na togi podlagi (območje A), analiza povezave podložnega betona s preklado preko hodnika konstrukcije (območje B) ter kontrola sidranja preko robnega venca v prekladno konstrukcijo (območje C) (slika 15).



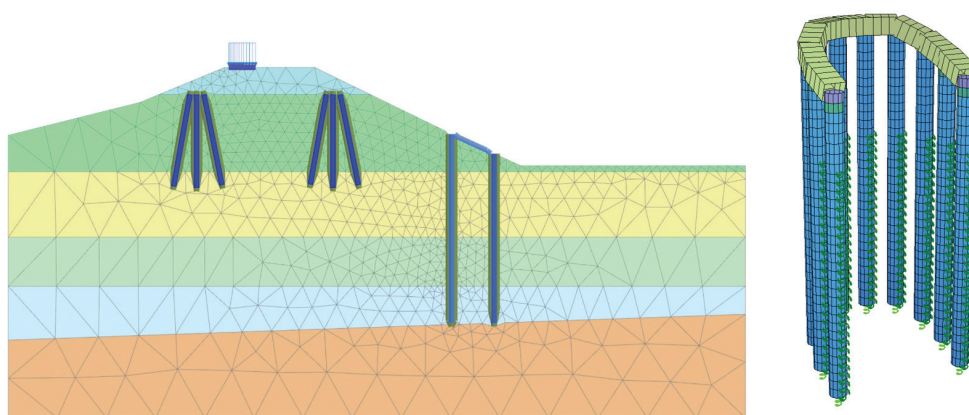
Slika 14. Različni modeli za analizo pilotnih blazin.



Slika 15. Shema s prikazom območij za izračun strižnih povezav in sidranj.

Dodatno se je izvedlo dimenzioniranje AB-konstrukcij opreme objekta. Narejena je bila analiza temeljev vozne mreže. Za temelje tipa M68kvp in M110kvp je bila izračunana armatura, ki je potrebna za sidranje drogov vozne mreže. Ob tem so bile izvedene še kontrole hodnikov na območju sidrnih plošč (enojna in dvojna sidrna plošča) ter dodatne analize konzol za morebitne vplive pozitivnih momentov na območju sidranja temeljev vozne mreže.

do ponovne kontrole varovanja gradbenih jam. Pridobljeni so bili natančnejši podatki o sestavi tal obstoječega železniškega nasipa ter karakteristike posameznih slojev le-tega in podatki o izvedeni sanaciji brežine iz leta 1994 na območju podpor 30 in 31, ki je bila izvedena s pomočjo metode JET grouting. Na osnovi novih podlog so se lahko pripravile optimizirane projektantske rešitve varovanja gradbenih jam (slika 16).



Slika 16. Modela iz programov Plaxis [Plaxis 2D Ultimate, 2021] in Sofistik [SOFiStiK, 2018] za analizo varovanja gradbenih jam v osi 30.

Za potrebe nemotene izvedbe podpor viadukta je bila narejena tudi analiza varovanja gradbenih jam ter železniškega nasipa, saj se viadukt z vzhodne strani približa obstoječemu železniškemu nasipu v oseh 30 do 33. V fazi izgradnje objekta je prišlo na podlagi dodatno pridobljenih podatkov glede geotehničnih razmer na lokaciji podpor v oseh 30–33

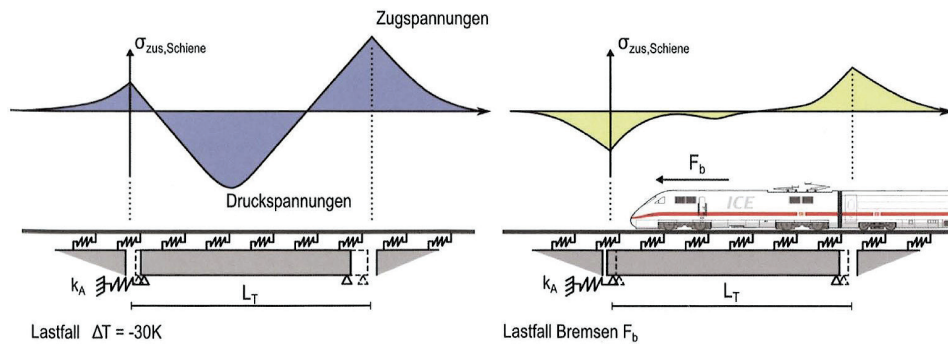
4.5 Interakcija tirov s konstrukcijo

V sklopu analize viadukta Pesnica je bila opravljena tudi analiza interakcije tirov s konstrukcijo. Posebnost dolgega viadukta je v členjenosti na krajše integralne segmente, zaradi česar je bila možna uporaba tirov brez posebnih tirnih dilatacij (ne-

prekinjen zavarjen tir). Interakcija je posledica povezave med tirom in konstrukcijo, zaradi česar pride do sovpliva enega elementa na drugega. Na območju podajnih stebrov pride do spremembe napetosti v tirih zaradi obtežnih primerov zaviranja ali pospeševanja ter temperaturnih vplivov in reologije, ki delujejo na konstrukciji (slika 17). Pri analizi je pomembno, ali gre za progo s tirno gredo na tolčencu ali za tir na togi podlagi (betonski plošči). V prvem primeru je tako dovoljena sprememba napetosti v tirih višja, saj je merodajna stabilnost proge in ne napetosti v tirih ([DB, 2018], [UIC, 2001]).

Glavni element sistema tira na togi podlagi je prefabricirana betonska plošča dolžine 5,16 m z elastično podlago. Plošče so položene na trdno podlago (v našem primeru zgornjo konstrukcijo viadukta) na petih mestih, kjer je možno plošče uravnati v zelen položaj ter jih naknadno podliti s samozgoščevalnim betonom. Na plošči je vgrajenih osem pritrilnih točk za tirnice na medsebojnem razmiku 65 cm.

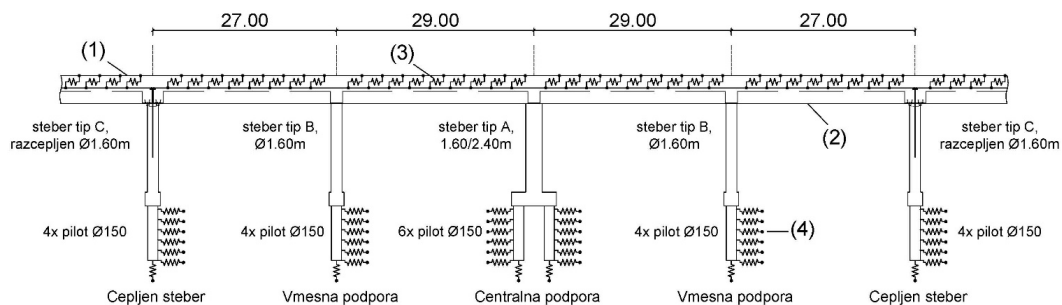
V skladu z omejitvami so bili izbrani tudi delovni diagrami oziroma togosti horizontalnih vzmeti, ki povezujejo tir s konstrukcijo. Tiri so na betonske plošče pritrjeni s spojkami,



Slika 17. Napetosti v neprekinjenem tiru kot posledica interakcije tirov in konstrukcije zaradi vpliva spremembe temperature in zavorne sile, povzeto po [Krontal, 2014].

Model za analizo je bil narejen v skladu s shemo, podano v standardu EN 1991-2, poglavje 6.5.4.4 [SIST, 2004], pri čemer je shema, aplicirana na naš viadukt, prikazana na sliki 18. Izračun je bil izveden z metodo končnih elementov, kjer so se globalnemu računskemu modelu mostne konstrukcije dodali še tiri, ki so na zgornjo konstrukcijo povezani preko nelinearnih vzmeti ter preko togih povezav (slika 18, detajl, prikazan na sliki 19).

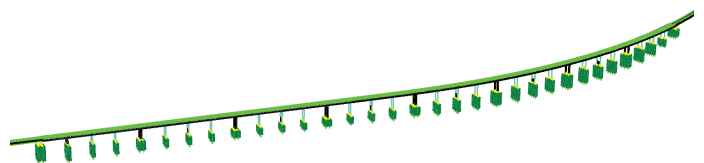
kjer lahko izbiramo osnovno ali zmanjšano togost in odpornost proti zdrsu. V primeru obteženega tira sta osnovna in zmanjšana togost enaki, in sicer 60,0 kN/m', medtem ko v primeru neobteženega tira znaša osnovna togost vzmeti 33,8 kN/m' ter reducirana togost 20,0 kN/m'. Vzmeti z zmanjšano togostjo so se upoštevale v analizi na celotnem območju viadukta.



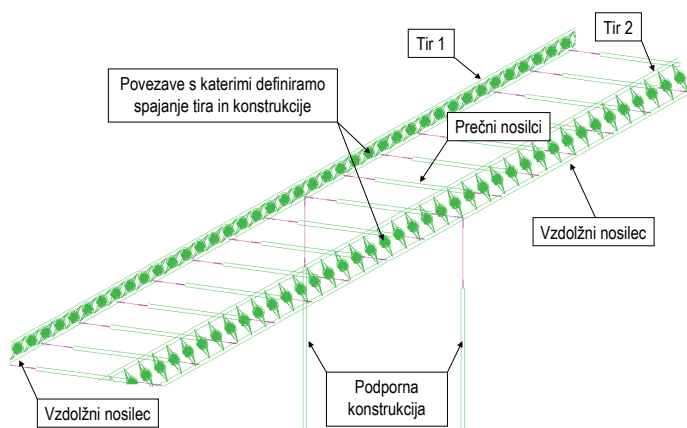
Slika 18. Shema modela za analizo interakcije tirov s konstrukcijo, pri čemer pomeni: (1) tir, (2) prekladna konstrukcija, (3) nelinearne vzmeti, ki simulirajo spoj tirov in konstrukcije, ter (4) vzmeti, ki simulirajo togost podporne konstrukcije.

Za izračun interakcije tirov in konstrukcije viadukta je bil izdelan celoten model z dovolj velikim vplivnim območjem tudi zunaj objekta. Pri tem je treba upoštevati ustrezen prehod med objektom in nasipom ter hkrati med tirom na togi podlagi in klasičnim tirom. Načrt tirov in tirnih naprav je izdelal SŽ – projektivno podjetje Ljubljana v sodelovanju s FCP Dunaj.

Spodnja konstrukcija je bila modelirana na enak način kot pri osnovni statični analizi, z upoštevanjem dejanske geometrije konstrukcije in dejanskimi karakteristikami uporabljenih materialov. Pri modeliranju zemljine so bili podatki povzeti po geološko-geomehanskem poročilu.



Slika 19. Model konstrukcije za analizo interakcije.



Slika 20. Detajl računskega modela za interakcijo.

Pri kontroli interakcije konstrukcije in tirov je treba dokazati, da so maksimalne napetosti v tirih zaradi spremenljivih vplivov pod mejo dopustnih in znašajo za TTP $\pm 92,0$ MPa. Nekatere smerne dovoljujejo mejo ± 112 MPa (v primeru neupoštevanja vertikalne železniške obtežbe ± 92 MPa). Ob že navedenih deformacijskih omejitvah je treba omejiti tudi deformacije, in sicer če izhajajo iz rotacij zaradi vertikalne obtežbe na 8 mm. Omejene so tudi horizontalne deformacije, in sicer na 5,0 mm v primeru tira brez dilatacije. V primeru, da so dokazane mejne napetosti, teh deformacij ni treba dokazovati. Relativne vertikalne deformacije v analizi niso bile merodajne zaradi integralnosti objekta.

Za analizo interakcije smo upoštevali temperaturno spremembo mostne konstrukcije, kjer se upošteva maksimalna razlika med mostno konstrukcijo in tiri. Hkrati se je upoštevala tudi neenakomerna temperaturna obtežba. Ob temperaturni obtežbi sta bili merodajni še sili zaviranja ter pospeševanja s pripadajočo vertikalno prometno obtežbo. Vpliv reologije je bil v analizi zanemarljiv, saj se je večina reologije izvršila že pred izvedbo zgornjega ustroja in tako deformacije zaradi reologije ne vplivajo na napetosti v tirih. Upoštevana so bila vsa možna projektna stanja, in sicer eno- in dvotirno progo ter glede na dolžino aplicirane obtežbe, ki je bila omejena glede na dopustne vrednosti sile zaviranja oziroma pospeševanja. Za merodajno kombinacijo pri analizi se je izkazala kombinacija segrevanje mostne konstrukcije in zaviranje na območju segmentov 5, 6 in 7, in to v primeru, ko je na objektu le en tir ($\sigma_{max} = 90,7$ MPa $<$ 92,0 MPa).

5 IZVEDBENI PROJEKT IN GRADNJA

Izvajalec Pomgrad je podpisal pogodbo za izvedbene projekte in gradnjo leta 2020. Gradnja konstrukcije je potekala od konca leta 2020 do konca 2022. Izvedba zgornjega ustroja železnižne in odprtje proge sta bila v letu 2023.

V nadaljevanju so navedene nekatere posebnosti pri izvedbi viadukta Pesnica.

- Zaščita gradbenih jam s podkvasto oblikovano pilotno steno za podpore viadukta, ki so posegale v nasip ob obstoječi železniški progi.
- Izvedba razcepljenih stebrov, ki omogočajo dilatiranje viadukta pod progo. Ti stebri imajo zelo kompleksno obliko in vsebujejo zelo velike količine armature, predvsem na zgornjem

vogalu. Na tem mestu se sidrajo tudi kabli z nedostopnimi sidrišči. Zato smo napravili testni steber v naravni velikosti, kjer se je preverila izvedljivost tega zahtevnega detajla (slika 21).

- Betoniranje tipičnih, 112 m dolgih odsekov prekladne konstrukcije je bilo zahtevno predvsem zaradi velike količine vgrajenega betona 1560 m³ v eni fazi. Za vgradnjo betona na prvem segmentu je izvajalec s skupino 50 ljudi, 21 avtomobilov (hruške za beton) s 193 dostavami betona in s 3 črpalkami za beton potreboval 14 ur. Še posebej zahtevno je bilo zagotavljati zahtevano kvaliteto C45/55 v vročem obdobju leta. Priprava odra, opaža, armature in kablov za segment 8 je prikazana na sliki 22, betonaža pa na sliki 23. Zaradi hitrosti izvajanja se je polovica viadukta izvedla z odrom v lasti podjetja Pomgrad, druga polovica pa z najetim odrom podjetja Peri.
- Napenjanje tipičnih, 112 m dolgih segmentov iz sredine. V prečnem prerezu viadukta je vgrajenih 2 x 8 = 16 kablov K19 z napenjalno silo 3800 kN. Zaradi preklapov kablov nad srednjo podporo je bilo treba enostransko napeti 32 kablov. To se je izvajalo v dveh fazah. Najprej po 2 x 6 kablov po enem tednu, kar je omogočilo hitro razopaženje konstrukcije, kasneje pa še preostalih 2 x 10 kablov v starosti treh tednov.
- Izvedba viadukta preko avtoceste je terjala izmenično zaporo zelo prometne AC. Vsako polje preko avtoceste se je zabetoniralo posebej, kar je zahtevalo posebne postopke pri napenjanju kablov. Posebne rešitve so bile tudi zaradi posebnega križanja AC in železnice.
- Integralni koncept tako dolgih železniških viaduktov je novost, zato preiskav o dolgoročnem obnašanju takih objektov ni prav veliko. Zato smo med členjene dele okvirjev dodali hidravlične udarne blažilce (shock transmitter unit - STU), po 2 kosa STU nosilnosti 2500 kN med vsako zavorno enoto (slika 24). Hidravlične naprave STU prenašajo hitre potresne in zavorne sile na več enot, medtem ko počasne temperaturne in reološke deformacije potekajo neovirano. Na ta način smo zmanjšali dinamične vplive utrujanja na močno armirane vogale okvirja in ostale integralne povezave ter s tem povečali odpornost in trajnost konstrukcije, kar je bistvena lastnost infrastrukturnih objektov.



Slika 21. Testni steber in izveden steber z razcepljenim delom višine 8 m.



Slika 22. Priprava na betoniranje segmenta 1560 m³ v enem taktu.



Slika 23. Zaključek betoniranja predzadnjega takta.



Slika 24. Hidravlični udarni blažilec (STU).

6 ZAKLJUČEN OBJEKT IN IZVEDBA OBREMENILNE PREIZKUŠNJE

Konstrukcija viadukta je bila zaključena konec leta 2022. Po predvidenem časovnem načrtu celotnega odseka proge je bil zgornji ustroj zaključen v avgustu 2023. Pred dokončno predajo objekta v uporabo je bila v soboto, 12. 8. 2023, opravljena obremenilna preizkušnja, v sklopu katere so poskušali simulirati obremenitev železniškega prometa in izmeriti odziv konstrukcije. Za statično in dinamično breme sta se uporabili dve povezani lokomotivi, vsaka mase po 110 ton (slika 25).

V skladu s pričakovanji je prekladna konstrukcija dovolj toga, da se bile amplitude odziva zelo majhne, in sicer so maksimalne deformacije v razponu konstrukcije znašale 1,4 mm, kar je nekoliko manj od predvidevanj na podlagi analiz.



Slika 25. Obremenilna preizkušnja viadukta z dvema lokomotivama, vsaka po 110 ton mase.

7 SKLEP

Najpomembnejša faza nastanka vsakega premostitvenega objekta je zasnova, ki bistveno vpliva na kvaliteto objekta, ki jo določajo varnost, uporabnost, estetika, vključitev v okolje, trajnost in gospodarnost (slike 26, 27 in 28).

Tudi pri dolgih železniških objektih je mogoče uporabiti koncepte integralnih konstrukcij brez ležišč, kar lahko pomeni veliko prednost pri gospodarni gradnji. Pri ustreznem konceptu členjenja viadukta se lahko izvede neprekinjen zavarjeni tir brez tirnih dilatacij, kar je velik prispevek k varnosti prometa in varovanju okolja pred hrupom. Sam koncept objekta je treba tudi računsko dokazati, pri čemer se je treba zavedati, da se analiza železniških objektov znatno razlikuje od analize objektov, ki so namenjeni cestnemu prometu ali pa pešcem in kolesarjem tako glede računskih metod, obtežb kot tudi dodatnih dokazov glede uporabnosti. Posebej velike razlike so pri velikosti horizontalnih obtežb ter pri omejevanju pomikov in rotacij konstrukcije.

Za odporno in trajno konstrukcijo je potrebna kvalitetna gradnja z zagotovljeno skladnostjo z izvedbenimi načrti kakor tudi kvalitetni vgrajeni materiali in certificirani produkti. Le tako bo ob kvalitetnem vzdrževanju objekt dočakal tudi predvideno življenjsko dobo.

Dvotirni železniški viadukt Pesnica se ponaša s kar nekaj presežki, inovacijami ter vpeljanimi izboljšavami:

- z dolžino 912,6 m je najdaljši železniški objekt v Sloveniji,
- je prvi integralni členjeni objekt v celoti brez konstrukcijskih ležišč,
- je prvi železniški premostitveni objekt pri nas z neprekinjenim tirom na togi podlagi,
- je prvi železniški objekt z vgrajenimi hidravličnimi udarnimi blažilci in
- je najbolj gospodarna gradnja železniškega premostitvenega objekta, ocenjeno na površino ali dolžino objekta, še posebej pa na dolžino proge, ki jo nosi.



Slika 26. Končana konstrukcija od spodaj (levo) in pogled na del objekta v krivini (desno).



Slika 27. Vključevanje objekta v okolje – pogled od zgoraj.



Slika 28. Vključevanje objekta v okolje – pogled z glavne ceste Maribor–Lenart.

8 LITERATURA

DB, smernica DB - Bemessungsgrundlagen für die Feste Fahrbahn auf Brücken, 804.5402, Deutsche Bahn Services Technische Dienste GmbH, 2018.

Freystein, H., Entwicklungen und Tendenzen im Eisenbahnbrückenbau, Der Prüfenieur 38, 23-40, 2011.

Jung, R., Marx S., Schenjel M., Stockmann R., Entwurf und Ausführungsplanung der Stöbnitztalbrücke Eine lagerlose Eisenbahnbrücke im Zuge der Neubaustrecke Erfurt–Leipzig/Halle, Beton- und Stahlbetonbau 105(9), strani 81-88, 2010.

Krontal, L., Zum Entwurf von Eisenbahnbrücken, Structurae Eisenbahnbrücken, ISBN:978-3-433-03097-4, 1-10, Ernst&Sohn, 2014.

Marx, S., Seidl G., Integral Railway Bridges in Germany, Structural Engineering International, 2011/3, 332-336, 2011.

Plaxis 2D Ultimate, Plaxis bv P.O. Box 572, 2600 AN Delft, 2021.

Ponting, d. o. o., projektna dokumentacija IDZ, IDP, PGD in PZI Viadukta Pesnica, 2015-2022.

Schenkel, M., Goldack, A., Schlaich, J., Kraft, S., Die Gänsebachthalbrücke, eine integrale Talbrücke der DB AG auf der Neubaustrecke Erfurt–Leipzig/Halle, Beton- und Stahlbetonbau 105(9), 590-598, DOI: 10.1002/best.201000034, 2010.

SOFISTIK, SOFISTIK AG, Flataustr. 14, 90411 Nurnberg, 2018.

UIC, UIC Code 774-3, Track/Bridge Interaction, Recommendations for calculations, International Union of Railways, strani 1-76, 2001.

SIST, SIST EN 1991-2:2004, Evrokod 1: Osnove projektiranja in vplivi na konstrukcije – 2. del: Prometna obtežba mostov, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2004.

Tschumi, M., Railway Bridges, Seminar 'Bridge Design with Eurocodes', JRC-Ispra, 2012.

Wikipedia, spletna stran portala Wikipedija - https://sl.wikipedia.org/wiki/Pesniški_viadukt, Wikimedia Foundation Inc., 2022.

30. SLOVENSKI KOLOKVIJ O BETONIH

IRMA Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije je v sodelovanju z IZS organiziral 30. slovenski kolokvij o betonih z naslovom Večkompnentni drobnnozrnatni betoni in malte. Kolokvij je potekal 7. 11. 2023 v dvorani Plečnik 1, Four Points by Sheraton Ljubljana Mons, s 155 udeleženci.

Razvoj novih materialov, raziskovalne opreme, metod preiskav in tehnologij grajenja nam omogoča razvoj novih betonov in malt ter modifikacijo tradicionalnih sestav teh kompozitov za gradnjo novih in sanacijo starih objektov. Vezivo in polnilo sestavljamo iz večjega števila komponent, s čimer dobijo betoni in malte lastnosti, ki nam omogočijo gradnjo bolj zmogljivih in trajnih objektov ter bolj učinkovito sanacijo posameznih konstrukcijskih elementov. Pri tem lahko uporabljamo tudi reciklirane materiale, s čimer prispevamo k trajnostnim rešitvam grajenja objektov. Z uporabo drobnnozrnatih agregatov in polnil povečujemo homogenost strukture betonov in malt. Lahko

rečemo, da smo s tem spremenili betone v malte, ki imajo lastnosti betonov. S tem pa smo zelo povečali stične površine med različnimi komponentami, katerih mehanizme moramo dobro poznati, ker imajo zelo velik vpliv na lastnosti celotnega kompozita. Podrobnejši potek kolokvija je razviden iz programa (slika 1).

V uvodu kolokvija je v imenu predsednika IZS mag. Črtomirja Remca podal pozdravni govor Andrej Pogačnik (slika 2), predsednik Matične sekcije gradbenih inženirjev pri IZS. Poudaril je pomen pravilne uporabe betona v naši gradbeni praksi, za kar je nujno potrebno stalno izobraževanje vseh udeležencev pri gradnji. To je še toliko bolj pomembno v današnjem času, ko mora celotna gradbena stroka poskrbeti poleg izvedbe zahtevnih infrastrukturnih, energetskih in visokogradbenih objektov tudi in predvsem za obnovo porušenih objektov zaradi katastrofalnih poplav in plazov po celotni Sloveniji.



The image shows a program poster for the 30th Slovenian Colloquium on Concrete. It features a vertical title 'PROGRAM' on the left and a list of sessions on the right. The sessions include welcome speeches, presentations on fine-grained mortars, aluminum-reinforced concrete, recycling of construction waste, repair mortars, ultra-high-performance concrete with steel fibers, sustainable mortars with wood biomass, stone dust mortars, and thin-layer elements. The event is organized by IRMA and IZS on November 7, 2023.

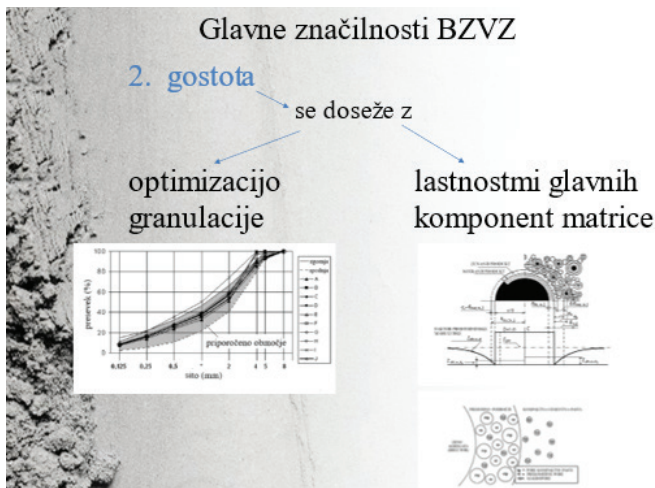
| Time | Topic / Speaker |
|-------|---|
| 9.00 | Pozdravni govor / Welcome speech: mag. Črtomir Remca, Predsednik Inženirske zbornice Slovenije |
| 9.20 | Dr. Jakob Šušteršič, Franci Ceklin, David Polanec, Tomaž Škoberne, IRMA Drobnnozrnatni betoni – malte s posebnimi lastnostmi / Fine-grained concretes - mortars with special properties |
| 9.50 | Dr. Harald Justnes, SINTEF Community, Trondheim, Norway Aluminum reinforced concrete / Beton, ojačan z aluminijem |
| 10.20 | Prof. Dr. Luc Courard, Julian Hubert, University of Liege, Belgium New developments in the recycling of Construction and Demolition Wastes for the concrete industry / Novi razvoji na področju recikliranja gradbenih odpadkov in odpadkov iz rušenja objektov za betonsko industrijo |
| 10.50 | Prof. Dr. Andrzej Garbacz, Ewa Sobczyńska, Dr Wojciech Terlikowski, Warsaw University of Technology, Poland Repair earth-based mortars - requirements and a selection algorithm / Sanacijske malte na zemeljski osnovi - zahteve in izbirni algoritem |
| 11.20 | Prof. Dr. Violeta Bokan Bosiljkov, Asist. Dr. Andreja Padovnik, UL FGG Posebnosti apnenno-cementnih kompozitov in metod njihovega preskušanja / Specific characteristics of lime-cement composites and their test methods |
| 11.50 | Odmor / Break time |
| 12.20 | Dr. Aljoša Šajna, ZAG Trije praktični primeri uporabe MABZV in kaj smo se iz njih naučili / Three practical examples of the use of UHPFRC and what we have learned from them |
| 12.50 | Prof. Dr. Dimitrije Zakić, Prof. Dr. Dragica Jevtić, Prof. Ass. Dr. Aleksandar Radević, Milica Vidović, Stefan Mitrović, Građevinski fakultet Beograd Research, testing and application potential of steel fiber reinforced ultra high-performance concrete / Raziskave, preskušanje in možnosti uporabe zelo visoko zmogljivega mikroarmiranega betona z jeklenimi vlakni |
| 13.20 | Prof. Dr. Nina Štirnec, Sonja Cerković, Dr. Ivana Carević, Prof. Dr. Ivana Banjanec Pečur, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu Održivi mortovi s pepelom iz energana na drvno biomaso / Sustainable mortars with ash from wood biomass power plants |
| 13.50 | Prof. Dr. Naser Kubashi, Msc. Enes Krasniqi, PhD cand., Prof. Ass. Dr. Milot Muhaxher, FCE University of Prishtina, Kosovo Properties of stone dust and partially replaced of cement in cementitious mortar for repairing / Lastnosti kamnitnega prahu in delno nadomeščenega cementa v cementni malti za sanacijo |
| 14.20 | Rok Ercegović, Aleš Brodnik, Sandi Drolo, Dr. Jakob Šušteršič, IRMA Tankoslojni elementi in preplastive / Thin-layer elements and overlays |
| 14.50 | Zaključek kolokvija / Conclusion of the colloquium; Delovno kosilo / Working lunch |

Slika 1. Program predavanj v okviru 30. slovenskega kolokvija o betonih.



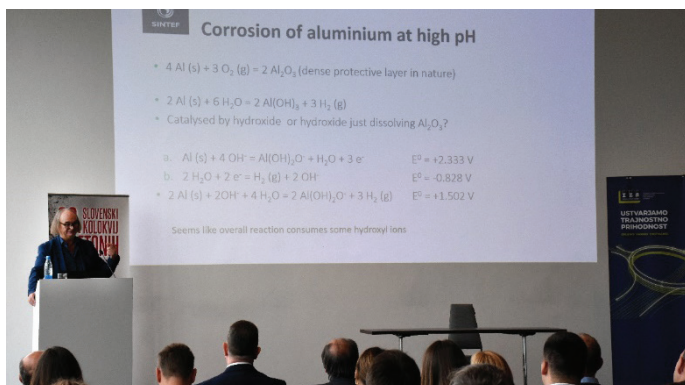
Slika 2. Pozdravni govor Andreja Pogačnika, predsednika Matične sekcije gradbenih inženirjev pri IZS.

Prvo predavanje z naslovom »Drobnnozrnatni betoni – malte s posebnimi lastnostmi« so pripravili sodelavci IRMA Franci Ceklin, David Polanec, Tomaž Škoberne in dr. Jakob Šušteršič, ki je predstavil ta referat. Obravnavala sta se dva primera večkompnentnih drobnnozrnatih betonov, ki sta po svoji sestavi malte, imata pa lastnosti betonov. Njune ključne lastnosti pa se razlikujejo od lastnosti normalnih betonov. Najprej so se na kratko obravnavali betoni zelo visokih zmogljivosti, ki so plod sodobne tehnologije betonov. Imajo zelo veliko trdnost, z dodano veliko količino vlaken pa postanejo duktilni. Zaradi tega in zaradi zelo goste strukture matrice dosežejo visoko obstojnost (slika 3). Povsem drugačne lastnosti od teh imajo visoko aerirani drobnnozrnatni betoni. Njihova struktura je bolj ali manj porozna, zato je prostorninska masa glavni parameter, ki vpliva na lastnosti strjenih visoko aeriranih drobnnozrnatih betonov. Zaradi sposobnosti doseganja različnih stopenj obdelovalnosti in različnih lastnosti v strjenem stanju je njihova uporabnost zelo široka. Uporabljajo se lahko tudi kot malte za ometavanje in zidanje.



Slika 3. Doseganje visoke gostote betonov zelo visokih zmogljivosti; iz referata z naslovom *Drobnozrnati betoni – malte s posebnimi lastnostmi*.

Prof. dr. Harald Justnes, ki prihaja iz največje neodvisne raziskovalne organizacije v Skandinaviji SINTEF iz Trondheima na Norveškem, je podal referat z naslovom *Beton, ojačan z aluminijem* (slika 4). Beton s 55-% zamenjavo cementa s kalcinirano glino je bil izdelan za namenom stabilizacije aluminijaste armature, zmanjšanja celotnega ogljičnega odtisa in omogočanja izjemno dolge življenjske dobe brez vzdrževanja. Dolga življenjska doba je zagotovljena, saj je aluminij stabilen v karboniziranem sistemu in v prisotnosti kloridov. Poleg tega hidratacijski produkti pucolanske reakcije kalcinirane gline kemično vežejo kloride kot Friedlova sol. Ker se ves kalcijev hidroksid sčasoma porabi, je odpornost proti sulfatom odlična, alkalno-agregatne reakcije pa zaradi nizkega pH in topega aluminijevega oksida niso trajne. Edini degradacijski mehanizem je luščenje zaradi zmrzovanja/trajanja, ki pa se lahko zmanjša s pravilno aeracijo.



Slika 4. Predstavitve referata prof. dr. Haraldja Justnesa z naslovom *Beton, ojačan z aluminijem*.

Referat z naslovom »Novi razvoji na področju recikliranja gradbenih odpadkov in odpadkov iz rušenja objektov za betonsko industrijo« so pripravili Sophie Grigoletto, Yeakleang Muy, Frédéric Michel, Arthur Fanara, Julien Hubert in prof. dr. Luc Courard, ki ga je tudi predstavil (slika 5). Vsi prihajajo z univerze iz Liegea, Belgija, Urban and Environmental Engineering,

GeMME Building Materials. Ravnanje z gradbenimi odpadki in odpadki pri rušenju objektov je zdaj del krožnega gospodarstva. Vedno več izdelkov, ki so prej veljali za odpadke, recikliramo za proizvodnjo novih malt in betonov: kakovost drobljenja, sortiranja in priprave v odobrenih centrih za recikliranje, kar pomeni, da se kakovost izdelkov in skladnost lastnosti recikliranih materialov nenehno izboljšujeta. Univerza v Liegeu (Belgija) sodeluje v številnih projektih, katerih cilj je izboljšati pogoje recikliranja in povečati deleže vgrajenih materialov v nove betone: za primere so predstavljeni zemeljsko vlažni betoni, betoni z opečnim drobirjem in reciklirani peski za 3D-tiskanje. Ukrepi za spodbujanje uporabe betona iz recikliranega agregata so v celoti v skladu s strateškimi cilji Evropske unije (EU), znanstvena skupnost pa vztrajno trdi, da je beton iz recikliranega agregata tehnično primeren konstrukcijski material.



Slika 5. Predavanje prof. dr. Luca Courarda z naslovom *Novi razvoji na področju recikliranja gradbenih odpadkov in odpadkov iz rušenja objektov za betonsko industrijo*.

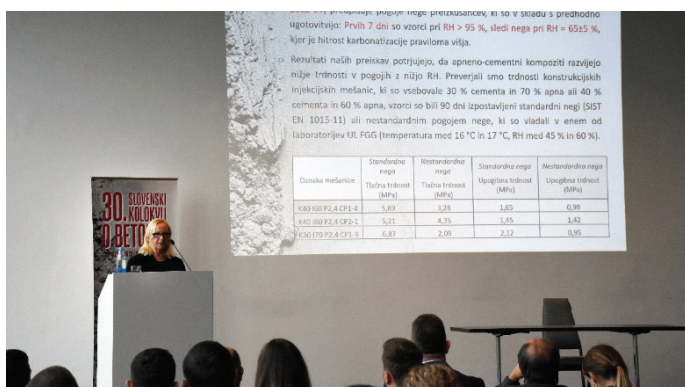
Ewa Sobczykńska in prof. dr. Andrzej Garbacz iz varšavske univerze sta pripravila referat z naslovom *Rekonstrukcijske malte na osnovi zemlje – zahteve in algoritem za izbiro*. Referat je predstavila Ewa Sobczykńska (slika 6), ki pripravlja doktorsko disertacijo, katere tema je delno predstavljena v tem referatu. Postopek ohranjanja zgodovinskih kamnitih konstrukcij je zapleteno vprašanje, ki zahteva veliko raziskav in analiz. Eden od izjemno pomembnih vidikov je tveganje uporabe nadomestnega materiala na že obstoječem. To tveganje večinoma zajema vprašanja na področju fizikalno-kemijske analize, pa tudi



Slika 6. Predavanje Ewe Sobczykńska z naslovom *Rekonstrukcijske malte na osnovi zemlje – zahteve in algoritem za izbiro*.

združljivost z okoljem ali izvajanjem. Govorimo torej o parametri nadomestnega materiala v primerjavi s kamnitim, kot so kemična sestava, mineraloška sestava, poroznost, trdnostni parametri itd., pa tudi o okoljskih pogojih, ki vplivajo na tveganje pri izvajanju ohranitvenih ukrepov, razpoložljivost materialov in opreme ali raven usposobljenosti ekipe lokalnih delavcev. Z laboratorijskim preskušanjem in določitvijo vrednosti za vsako merilo bo mogoče izračunati vrednost indeksa tveganja za uporabo rešitve za rekonstrukcijo. Na podlagi opravljenih raziskav in analiz je bil izdelan algoritem izbire sestave obnovitvene malte na osnovi zemlje, ki bo zagotavljal izpolnjevanje zahtev za tovrstne malte in najmanjše tveganje njene uporabe (z izračunom indeksa tveganja).

Prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, dekanka Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, je podala referat z naslovom Posebnosti apnenocementnih kompozitov in metod njihovega preskušanja (slika 7), ki ga je pripravila skupaj z asist. dr. Andrejo Padovnik. V prispevku so prikazane posebnosti apnenocementnih kompozitov v primerjavi s cementnimi kompoziti. Apno v sestavi veziva bistveno spremeni lastnosti kompozita že v svežem stanju, saj vpliva na potrebo po vodi za določeno konsistenco. Vežanje in strjevanje apnenocementnih kompozitov je praviloma počasnejše, zaradi kombiniranega procesa hidratacije in karbonatizacije. Tudi mehanske trdnosti, modul elastičnosti in struktura por ter obstojnost v različnih okoljih so pri kompozitih z apnenocementnim vezivom bistveno drugačni od tistih pri cementnih kompozitih. Določene standardne preskusne metode, razvite za cementne kompozite, niso primerne za ovrednotenje lastnosti apnenocementnih kompozitov. Zato je treba standardne metode modificirati ali pa uporabiti alternativne preskusne metode, ki so prilagojene lastnostim apnenocementnih kompozitov in/ali namenu njihove uporabe.



Slika 7. Prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov predstavlja referat z naslovom Posebnosti apnenocementnih kompozitov in metod njihovega preskušanja.

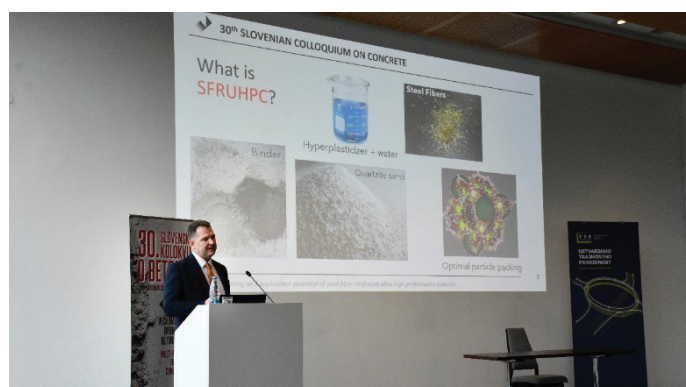
Prvi referat po odmoru je predstavil dr. Aljoša Šajna iz Zavoda za gradbeništvo Slovenije, katerega naslov je bil Trije praktični primeri uporabe MABZVZ in kaj smo se iz njih naučili (slika 8). MABZVZ (mikroarmirani beton zelo visokih zmogljivosti) je idealen material za preplastitve betonskih površin bodisi pri obnovah bodisi novogradnjah in je idealna zamenjava za običajno hidroizolacijo, saj skrajšuje čas sanacijskega posega, je trajen, ekonomsko upravičen in okolju prijazen. Ker sestavo MABZVZ lahko prilagajamo potrebam uporabnika, ga lahko uporabimo tudi kot material za umetniška dela. V

članku so predstavljene ključne prednosti MABZVZ ter trije praktični primeri uporabe MABZVZ v Sloveniji: obnova prekladne konstrukcije mostu Log Čezsoški, konstrukcijska ojačitev starega jeklenega železniškega mostu Buna in odlivanje kipa Angelsko slavje.



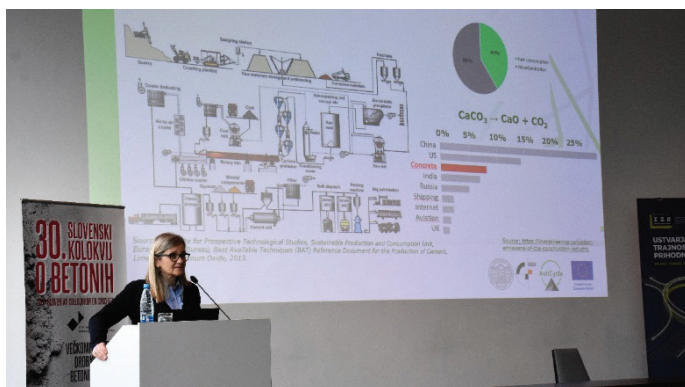
Slika 8. Predstavitev referata dr. Aljoše Šajna Trije praktični primeri uporabe MABZVZ in kaj smo se iz njih naučili.

Referat z naslovom »Raziskave, preskušanje in možnosti uporabe zelo visokozmogljivega mikroarmiranega betona z jeklenimi vlakni« so pripravili prof. dr. Dragica Jevtić, prof. asist. dr. Aleksandar Radević, Milica Vidović, Stefan Ž. Mitrović in prof. dr. Dimitrije Zakić, ki je predstavil referat (slika 9). Vsi prihajajo z Gradbene fakultete Univerze v Beogradu. Referat obravnava predvsem raziskave in preskušanje zelo visokozmogljivega betona (ZVZB), izdelanega z dodatkom jeklenih vlaken ali brez njega. Podrobno sta predstavljene in obravnavani dve stopnji raziskav: prva – ZVZB, ki temelji predvsem na lokalnih komponentnih materialih in se proizvaja v obliki predhodno pripravljene mešanice s komercialnim imenom ForteCrete150®, in druga – modificirani ZVZB, ki je narejen z delno zamenjavo cementsa s polnilom iz apnenca kot okolju prijaznejša in trajnostna rešitev. Dobljeni rezultati kažejo, da obstaja velik potencial za uporabo zelo visokozmogljivega betona, zlasti v obliki predhodno pripravljene mešanice, ki jo je mogoče pripraviti na kraju samem. Dodajanje apnenčevega polnila (in morebitnih drugih vrst mineralnih dodatkov) kot SCM bi lahko na splošno prispevalo k izboljšanju negativne obravnave cementnih kompozitov.



Slika 9. Prof. dr. Dimitrije Zakić predstavlja referat z naslovom Raziskave, preskušanje in možnosti uporabe zelo visokozmogljivega mikroarmiranega betona z jeklenimi vlakni.

Prof. dr. Nina Štirmer, Sonja Barišič, dr. Ivana Carević in prof. dr. Ivana Banjad Pečur iz Sveučilišta u Zagrebu, Građevinski fakultet, so pripravile referat z naslovom Trajnostne malte s pepelom iz elektrarn na lesno biomaso. Referat je predstavila prof. dr. Ivana Banjad Pečur (slika 10). Gradbene materiale je treba obravnavati z vidika njihovega ogljičnega odtisa v celotni življenjski dobi. Visoke emisije toplogrednih plinov pri proizvodnji cementa, pomanjkanje naravnih surovin, znatno povečanje količine odpadnega pepela iz različnih tehnologij in težave z odlaganjem so povzročili resne motnje v ekosistemu. Zato je treba spodbujati uporabo proizvodnih postopkov, ki porabijo manj materiala in energije ter zagotavljajo popolno recikliranje ob koncu življenjske dobe izdelka. Ena od možnih rešitev je uporaba pepela iz lokalno dostopne lesne biomase kot delnega nadomestka cementa v trajnostnih maltah. V ta namen so testirali ustrezne lastnosti svežih in strjenih malt z zamenjavo cementa z 20 % pepela iz lokalno dostopne lesne biomase.



Slika 10. Referat z naslovom Trajnostne malte s pepelom iz elektrarn na lesno biomaso podaja prof. dr. Ivana Banjad Pečur.

Prof. dr. Naser Kabashi je podal referat z naslovom Lastnosti kamnitega prahu in delno nadomeščenega cementa v cementni malti za sanacijo, ki ga je pripravil skupaj z doktorskim kandidatom Enesom Krasniqijem in izr. prof. dr. Milom Muhaxherijem z Univerze Priština, Oddelek za gradbeništvo (slika 11). Kamniti prah, ki pogosto nastaja med postopkom žaganja za zmanjšanje onesnaževanja in okoljske škode, ima ogromen potencial za uporabo kot nadomestek cementa v mešanicah malte. Ta strateška uporaba ne pomaga le pri okoljskem upravljanju, temveč tudi učinkovito zmanjšuje proizvodne stroške. Namen te raziskave je celovito analizirati lastnosti malte z vključitvijo kamnitega prahu kot delnega nadomestka cementa. Za nadomestilo kamnitega prahu so bili upoštevani različni nadomestni odstotki: 5 %, 7,5 % in 10 % mase cementa. Analitični poudarek vključuje podroben pregled kemičnih in fizikalnih lastnosti kamnitega prahu, vključno z analizo presejanja. Študija je usmerjena v ocenjevanje različnih zasnov mešanic s poudarkom na mehanskih lastnostih malte v skladu z uveljavljenimi evropskimi standardi (EN). Na koncu bo določen optimalni odstotek kamnitega prahu za zamenjavo cementa in primerjan s standardnimi sestavami malt, ki jih trenutno uporabljajo industrijski proizvajalci, kar bo spodbudilo nadaljnjo razpravo in morebitni napredek na tem področju.

Zadnji referat na kolokviyu z naslovom Tankoslojni elementi in preplastitve so pripravili Rok Ercegovič, Aleš Brodnik, Sandi



Slika 11. Prof. dr. Naser Kabashi podaja referat z naslovom Lastnosti kamnitega prahu in delno nadomeščenega cementa v cementni malti za sanacijo.

Drolc in dr. Jakob Šušteršič, ki je ta referat tudi predstavil. Vsi prihajajo iz IRMA Inštituta za raziskavo materialov in aplikacije. V tem referatu se obravnavata dva primera uporabe večkomponentnega drobnnozrnatega betona. Prvi primer je izdelava dvoslojnih tankih plošč iz drobnnozrnatega mikroarmiranega betona, ki so vgrajene v asfaltno prekritje parkirišča. Plošče so izdelane na mestu samem (slika 12). Spodnji sloj z debelino 4 cm je izdelan iz mikroarmiranega betona z jeklenimi vlakni (MAB-JV), zgornji sloj z debelino 1 cm pa iz mikroarmiranega betona s polipropilenskimi vlakni (MAB-PV). Podani in obravnavani so rezultati predhodnih laboratorijskih preiskav. Drugi primer je izdelava tankoslojne preplastitve iz drobnnozrnatega polimerno modificiranega betona (PMB). V članku so obravnavane sestave PMB za tankoslojne preplastitve s približno debelino od 15 do 25 mm. Takšne preplastitve se lahko uporabljajo za preplastitev novih betonskih plošč ali za sanacijo poškodovanih betonskih plošč. Za pripravo laboratorijskih mešanic PMB so bili uporabljeni stiren-butadienski kopolimerni (SBR) lateks, portlandski cement, mikrosilika in različne vrste drobnnozrnatih agregatov. Deleži komponent so bili kombinirani z namenom, da bi se našla optimalna sestava PMB glede na zahteve. Poskusno polje je v uporabi že 24 let.



Slika 12. Izdelava dvoslojnih tankih plošč iz drobnnozrnatega mikroarmiranega betona; iz referata z naslovom Tankoslojni elementi in preplastitve.

dr. Jakob Šušteršič, univ. dipl. inž. grad.

FOTOREPORTAŽA PRENOVA OBJEKTA STARE TOVARNE ROG



Slika 1. Objekt stare tovarne Rog po prenovi (foto: arhiv Makro 5 gradnje, d. o. o.).

Lokacija: Trubarjeva ulica 72, Ljubljana

Investitor: Mestna občina Ljubljana

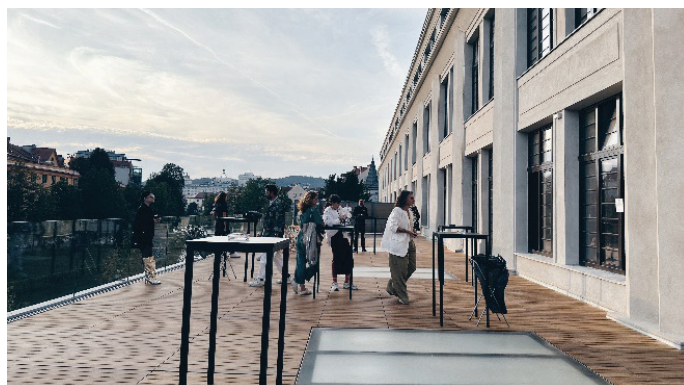
Projektant arhitekture: BAX studio, Barcelona

Projektant gradbenih konstrukcij: ELEA iC projektiranje in svetovanje, d. o. o.

Izvajalec: Makro 5 gradnje, d. o. o.

Vrednost del: 30 mio. EUR z DDV

Obstoječi objekt stare tovarne Rog se je zaradi zgodovinskoarhitekturne vrednosti deloma ohranil in hkrati celovito obnovil. Tako je središču Ljubljane zdaj vzpostavljeno novo mednarodno kreativno in družabno središče, tesno vpeto v lokalno dogajanje.



Sliki 2 in 3. Dokončana vhodna avla in terasa na južni strani objekta. (foto: arhiv Makro 5 gradnje, d. o. o.).

Prenova objekta stare tovarne Rog je obsegala rekonstrukcijo obstoječega dela tovarne Rog in prizidavo oz. novogradnjo objekta ob njem. Tlorisna velikost in višinski gabariti obstoječega objekta stare tovarne Rog so morali skladno s kulturnovarstvenimi zahtevami ostati nespremenjeni. Rekonstrukcija in sprememba namembnosti sta se zato izvajali le znotraj objekta. V celoti se je morala ohraniti tudi obstoječa armiranobetonska konstrukcija.



Slika 4. Pogled na objekt pred pričetkom prenove (foto: arhiv Elea iC, d. o. o.).



Slika 5. Notranjost objekta pred prenovo (foto: arhiv Elea iC, d. o. o.).

V celotnem obstoječem objektu so se odstranili stara okna in ostalo stavbno pohištvo ter se zamenjali z novimi. Prav tako so se odstranili stari tlaki in se zamenjali z novimi. Izjema je bil tlak iz macesnovih kock v prvem nadstropju, ki se je rekonstruiral z enakimi kockami. Na severni fasadi tovarniškega poslopja so se porušili nekateri parapeti obstoječih okenskih odprtin in se spremenili v prehode. Razširili so se nekateri obstoječi prehodi, odstranili so se vsi notranji predelni zidovi. Za izboljšanje potresne varnosti so se ob vzhodno in zahodno fasado v notranjosti objekta dodale armiranobetonske stene, v osrednjem delu pa prostorski jekleni diagonali. Konstrukcija se je v notranjosti ojačala s karbonskimi trakovi, ki so se lepili na obstoječo konstrukcijo. Plošča nad obstoječim prizidkom vzdolž južne fasade se je zaradi dotrajanosti odstranila in zamenjala z novo, pri tem pa se lega in oblika nosilcev ni spreminjala.



Slika 6. Čiščenje medetažne obokane konstrukcije (foto: arhiv Elea iC, d. o. o.).



Slika 7. Obstoječi nosilni elementi medetažne konstrukcije (foto: arhiv Elea iC, d. o. o.).



Slika 8. Jeklena natezna vez oboka (foto: arhiv Elea iC, d. o. o.).



Slika 9. Utrjevanje slopov z lepljenjem karbonskih trakov (foto: arhiv Elea iC, d. o. o.).



Slika 10. Vgradnja prostorskih jeklenih diagonal za izboljšanje potresne varnosti objekta (foto: arhiv Makro 5 gradnje, d. o. o.).



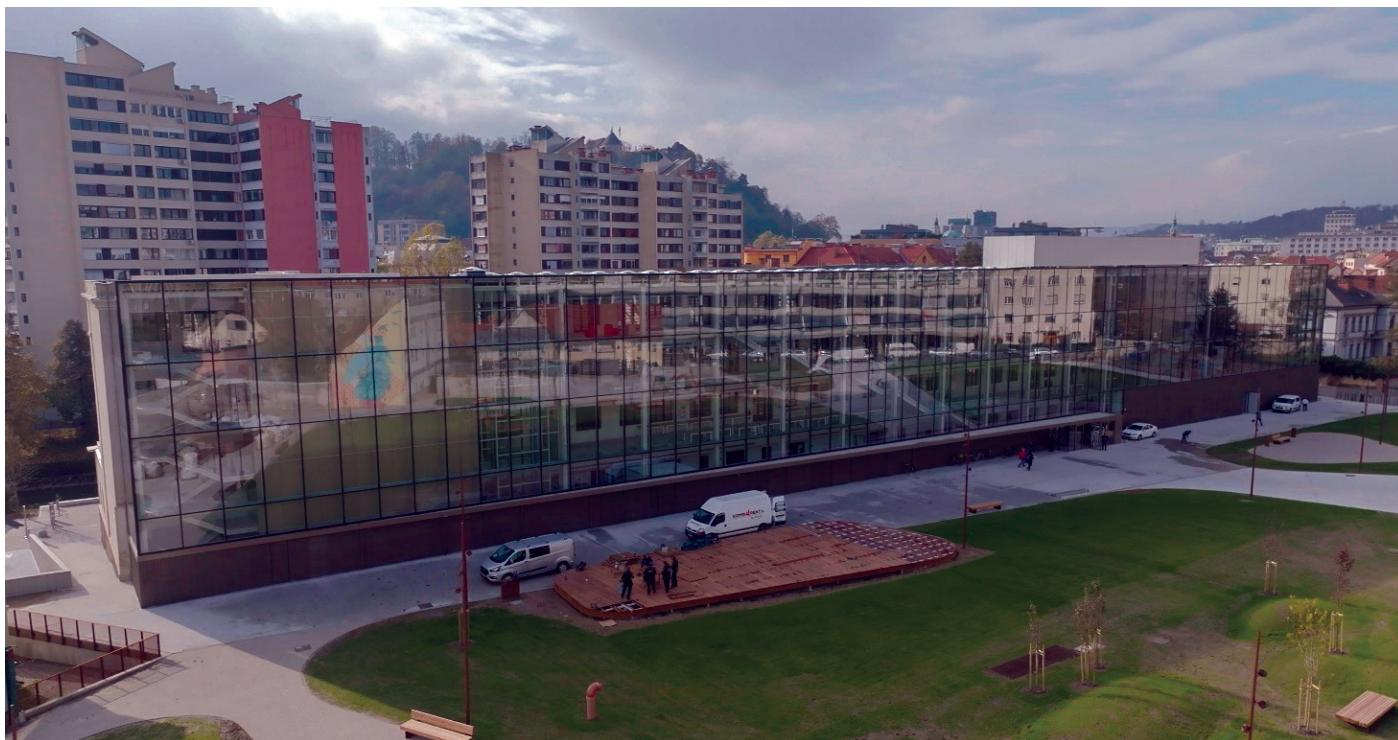
Slika 11. Ojačenje zunanjih sten z armiranim torkretom (foto: arhiv Elea iC, d. o. o.).

Ob severni fasadi obstoječega objekta se je porušilo staro stopniščno jedro. Nadomestil ga je nov objekt tlorisnih in višinskih gabaritov 124,10 x 23,22 x 18,70 m. Spomeniško zaščitena armiranobetonska konstrukcija objekta pri tem ni bila okrnjena ali prekinjena. V novem objektu sta poleg dveh požarnih stopnic, postavljenih na skrajna konca, nahajata še panoramsko dvigalo in osrednje stopnišče. Nove AB-plošče prizidka povezujejo obstoječo stavbo z armiranobetonskimi jedri, ki zagotavljajo dodatno vertikalno in prečno horizontalno togost. Posebna pozornost se je namenila transparentnosti novega severnega prizidka z namenom ohranitve vidnosti severne fasade stare tovarne s Trubarjeve ulice. Nov prizidek tako poleg vertikalnih omogoča tudi horizontalno komunikacijo ter obenem ponuja prostor druženja in prireditev.

Med prenovo je bila zgrajena tudi kletna etaža, v katero so umeščeni tehnični prostori ter parkirna hiša, namenjena uporabnikom Roga in okoliškim prebivalcem. Na mestu nekdanjega tovarniškega dvorišča pa je zrasel nov, 8000 m² velik park, ki je namenjen dnevnim rabi meščanov in javnim prireditvam.



Sliki 12 in 13. Nov prizidek ob obstoječem objektu (foto: arhiv Elea iC, d. o. o., in Makro 5 gradnje, d. o. o.).



Slika 14. Novi park, ki je zrasel na nekdanjem tovarniškem dvorišču (foto: arhiv Makro 5 gradnje, d. o. o.).

V pritličje osrednjega dela stare tovarniške stavbe je umeščena glavna vhodna avla. Obnjo so postavljene delavnice s stroji za 3D-printanje. Pritličje obstoječega prizidka ob nabrežju Ljublanice je namenjeno specifičnim trgovinam, spremljajoči restavraciji in lokalom. Prostori prvega nadstropja tovarne Rog so namenjeni spremljevalnemu javnemu delu programa, kot so večnamenska dvorana, razstavna dvorana, knjižnica in kavarna. Pri tem se prostori povezujejo s teraso nad starim južnim prizidkom. Prostori drugega in tretjega nadstropja so namenjeni različnim ateljejem. V tretjem nadstropju je še pet bivalnih ateljejev in administracija Centra Rog.



Sliki 15 in 16. Dokončani stekleni prizidek vzdolž severne fasade Centra Rog in detajl restavrirane historične južne fasade na Petkovškovem nabrežju (foto: arhiv Makro 5 gradnje, d. o. o.).

Objekt je bil predan v uporabo oktobra 2023. Center Rog bo s sodobno infrastrukturo organizacijam, posameznikom in obiskovalcem ponujal ustvarjalno okolje na področju uporabnih umetnosti, oblikovanja in arhitekture.

Avtorji fotoreportaže: Matjaž Beltram, Tina Vatić (Elea iC, d. o. o.) in Mirzet Šabić, Tihomir Pilić (Makro 5 gradnje, d. o. o.)

VSEBINA LETNIKA 72/2023

Članki – Papers

Boem, I., Gattesco, N., Dudine, A., Gams, M., POTRESNO UTRJEVANJE ZIDANIH STAVB: PREDSTAVITEV RAZISKAV S KOMPOZITI ARMIRANIH MALTNIH OBLOG, SEISMIC PROTECTION OF EXISTING MASONRY BUILDINGS: A ROUTE OF RESEARCH ON COMPOSITE REINFORCED MORTAR, januar, stran 2.

Češarek Kolšek, J., Planinc, I., Bratina, S., ANALIZA VPLIVA RAZPOK V BETONU NA TOGOST ARMIRANOBETONSKIH NOSILCEV, ANALYSIS OF THE EFFECT OF CRACKS IN CONCRETE ON THE STIFFNESS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS, april, stran 91.

Češarek, P., Hrobat, K., Češarek Kolšek, J., O SODOBNIH GEOPOLIMERNIH BETONIH IN PROJEKTIRANJU IZ NJIH GRAJENIH GRADBENIH KONSTRUKCIJ, ON MODERN GEOPOLIMER CONCRETES AND THEIR APPLICATION TO LOAD-BEARING STRUCTURES, december, stran 283.

Drev, D., Krzyk, M., RAZISKAVA MOŽNOSTI UPORABE USTREZNO ČIŠČENE ODPADNE VODE IZ CENTRALNE ČISTILNE NAPRAVE KOPER IN CENTRALNE KOMUNALNE ČISTILNE NAPRAVE PIRAN, STUDY ON THE POSSIBILITY OF USING PROPERLY TREATED WASTEWATER FROM WWTP KOPER AND WWTP PIRAN, maj, stran 121.

Fortuna, B., Schnabl, S., Turk, G., NOSILNOST LAMELIRANIH LEPLJENIH NOSILCEV IZ BUKOVEGA LESA, LOAD BEARING CAPACITY OF GLUED LAMINATED BEECH BEAMS, februar, stran 42.

Gradišar, L., Dolenc, M., INTEGRIRANA METODOLOGIJA STROJNEGA UČENJA ZA ANALIZO SLIK BETONSKIH RAZPOK, INTEGRATED MACHINE LEARNING METHODOLOGY FOR CONCRETE CRACK IMAGE ANALYSIS, avgust, stran 186.

Humar, G., MOST VINTGAR – EDINI MED VELIKIMI KAMNITIMI MOSTOVI NA BOHINJSKI PROGI, KI ŠE STOJI V IZVORNI OBLIKI, THE VINTGAR BRIDGE – THE ONLY BIG STONE BRIDGE ON THE BOHINJ RAILROAD STILL STANDING IN ORIGINAL SHAPE, junij, stran 134.

Kosič, M., Hekič, D., Anžlin, A., NAPOVED PREOSTALE ŽIVLJENSKE DOBE JEKLENEGA ŽELEZNIŠKEGA MOSTU NA UTRUJANJE NA PODLAGI IZMERJENEGA ODZIVA, REMAINING FATIGUE-LIFE PREDICTION OF A STEEL RAILWAY BRIDGE BASED ON MEASURED RESPONSE, april, stran 78.

Krajnc, U., STAREJŠI HIDROTEHNIKI, KI SO DELOVALI NA ŠIRŠEM SLOVENSLEM PROSTORU, HYDRAULIC ENGINEERS WHO USED TO WORK IN SLOVENIA, november, stran 254.

Lešnik Nedelko, M., Žigart Verlič, M., MODULARNA LESENA GRADNJA: TRENDI IN RAZVOJ, MODULAR TIMBER CONSTRUCTION: TRENDS AND DEVELOPMENT, september, stran 217.

Marinič, D., POTENCIAL ZELENEGA VODIKA V STAVBNEM SEKTORJU, THE POTENTIAL OF GREEN HYDROGEN IN THE BUILDING SECTOR, maj, stran 110.

Markelj, V., Maher, J., VIADUKT PESNICA – INOVACIJE V ŽELEZNIŠKI INFRASTRUKTURI, PESNICA VIADUCT – INNOVATIONS IN RAILWAY INFRASTRUCTURE, december, stran 295.

Mavri, D., Šraj, M., Bezak, N., RAZVOJ ENAČBE ZA OCENO ČASA ZAKASNITVE ZA SLOVENSKA POREČJA, LAG TIME EQUATION DEVELOPMENT FOR SLOVENIAN CATCHMENTS, februar, stran 34.

Ramšak, M., TRADICIONALNI KAZALCI ZVOČNE IZOLATIVNOSTI NE ODRAŽAJO V CELOTI ZVOČNOIZOLACIJSKE UČINKOVITOSTI PREGRAD, TRADITIONAL SOUND INSULATION DESCRIPTORS DO NOT FULLY REFLECT THE EFFICIENCY OF THE SOUND INSULATION PERFORMANCE OF BARRIERS, marec, stran 58.

Snoj, J., Jamšek, A., Babič, A., Žižmond, J., Zevnik, J., Dolšek, M., VPLIV REKONSTRUKCIJE OBSTOJEČE ZIDANE STAVBE NA POTRESNO TVEGANJE, THE EFFECT OF SEISMIC RETROFITTING OF AN EXISTING MASONRY BUILDING ON SEISMIC RISK, julij, stran 158.

Šprah, N., SKLADNOST DNEVNE OSVETLJENOSTI PROSTOROV V VEČSTANOVANJSKIH ZAZIDAVAH V SLOVENIJI S PRIPOROČILI STANDARDA SIST EN 17037 – ŠTUDIJA PRIMERA, COMPLIANCE OF DAYLIGHT PROVISION OF INDOOR SPACES IN MULTI-DWELLING BUILDINGS IN SLOVENIA WITH THE RECOMMENDATIONS OF SIST EN 17037 – A CASE STUDY, junij, stran 141.

Trček, L., Lipar, P., PREPUSTNOST AVTOCESTNIH ODSEKOV PRI RAZLIČNIH TIPIH DELOVNIH ZAPOR, CAPACITY FOR DIFFERENT TYPES OF MOTORWAY WORK ZONES, oktober, stran 232.

Trtnik, G., Šušteršič, J., Hozjan, T., ANALIZA VPLIVA RAZLIČNIH PARAMETROV NA STIK MED REBRASTO ARMATURO IN BETONOM, INFLUENCE OF DIFFERENT PARAMETERS ON THE BOND BETWEEN REINFORCEMENT STEEL BARS AND CONCRETE, januar, stran 11.

Weingerl, T., Pipenbaher, M., Gotovčević, T., Filipič, A., PRVI MOST, GRAJEN PO TEHNOLOGIJI NATEZNEGA TRAKU V SLOVENIJI, FIRST STRESS RIBBON BRIDGE IN SLOVENIA, september, stran 206.

Zalar, A., PRIMERJAVA PRESKUSNIH METOD DOLOČANJA ZVOČNE IZOLATIVNOSTI PROTIHRUPNIH OGRAJ, COMPARISON OF TEST METHODS FOR DETERMINATION OF SOUND INSULATION PERFORMANCE OF NOISE BARRIERS, avgust, stran 194.

Zore, D., OBNOVA VOZIŠČ Z BSM-TEHNOLOGIJO, ROAD RENOVATION WITH BSM TECHNOLOGY, julij, stran 175.

Voščilo

Kryžanowski, A., Voščilo predsednika ZDGITS, december, stran 282.

Jubilej

Ficko, G., 50-letnica odprtja prve slovenske avtoceste med Vrhniko in Postojno, januar, stran 22.

In Memoriam

Stare, M., Anton Berce (1947–2023), oktober, stran 231.

Žnidarič, A., Mag. Mojca Ravnikar Turk (1964–2023), oktober, stran 230.

Poročila s strokovnih srečanj

Društvo vodarjev Slovenije, 3. slovenski kongres o vodah, november, stran 269.

GBC Slovenija, Koraki do trajnostne gradnje s toplotnim ovogem stavbe, marec, stran 68.

GBC Slovenija, 7. konferenca Trajnostne gradnje, oktober, stran 244.

Može, P., Klemenčič, D., 44. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, november, stran 275.

Oddelek za okoljsko gradbeništvo UL FGG in Hidroinštitut, 39. Goljevščkov spominski dan, maj, stran 126.

Preskar, J., Strokovni posvet »Mostovi povezujejo«, junij, stran 150.

Šušteršič, J., 29. slovenski kolokvij o betonih, marec, stran 64.

Šušteršič, J., 30. slovenski kolokvij o betonih, december, stran 307.

Fotoreportaža z gradbišča

Beltram, M., Vatič, T. (Elea iC, d. o. o.), Šabič, M., Pilič, T. (Makro 5 gradnje, d. o. o.), Prenova objekta stare tovarne Rog, december, stran 311.

Bizjak, L. (Kolektor CPG, d. o. o.), Gradnja viadukta Vinjan na trasi drugega tira Divača - Koper, oktober, stran 246.

Energetika Ljubljana, d. o. o., Izgradnja plinsko-parne enote, ki bo omogočila umikanje premoga iz Ljubljane, november, stran 277.

Kolar, M., Prestavitev kanalizacijskega kolektorja na območju Vilharjeve ceste v Ljubljani, junij, stran 152.

Makro 5 gradnje, d. o. o., Športni center Ilirija in Lattermanov podhod, julij, stran 180.

Markelj, V. (Ponting, d. o. o.), Gradnja železniškega viadukta Pesnica, avgust, stran 201.

Mlakar, R. (Ponting, d. o. o.), Gradnja razglednega stolpa Kristal v Rogaški Slatini, maj, stran 128.

Osolnik, M., Gomboši, B., Gradnja brvi za kolesarje čez reko Savo v Medvodah, april, stran 104.

Ponting, d. o. o., Pipenbaher inženirji, d. o. o., Malnar, D., CGP, d. d., Gradnja mostu za pešce in kolesarje v Irči vasi, marec, stran 72.

Strabag, d. o. o., Izgradnja logističnega centra TEDi Sežana, februar, stran 53.

Weingerl, T. (Ponting, d. o. o.), Sanacija pokritega vkopa Malečnik po požaru, september, stran 225.

2TDK, Družba za razvoj projekta, d. o. o., Gradbišča drugega tira železniške povezave Divača-Koper, januar, stran 28.

Obvestila ZDGITS in DGIT

DGIT Novo mesto, Program strokovnega posveta »Mostovi povezujejo«, marec, stran 71.

ZDGITS, Pripravljalni seminarji in izpitni roki za strokovne izpite za gradbeno stroko v letu 2023, januar, stran 27.

ZDGITS, Vabilo na skupščino Zveze društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije, april, stran 103.

Vsebina letnika 72/2023

December, stran 315.

Navodila avtorjem za pripravo prispevkov

V vsaki številki, stran 2 ovitka.

Novi diplomanti

Okorn, E., januar, stran 3 ovitka; februar, stran 3 ovitka; marec, stran 3 ovitka; april, stran 3 ovitka; maj, stran 3 ovitka; junij, stran 3 ovitka; julij, stran 3 ovitka; avgust, stran 3 ovitka; september, stran 3 ovitka; oktober strani 251 in 252 ter stran 3 ovitka; november, stran 3 ovitka; december, stran 3 ovitka.

Koledar prireditev

Okorn, E., januar, stran 4 ovitka; februar, stran 4 ovitka; marec, stran 4 ovitka; april, stran 4 ovitka; maj, stran 4 ovitka; junij, stran 4 ovitka; julij, stran 4 ovitka; avgust, stran 4 ovitka; september, stran 4 ovitka; oktober stran 4 ovitka; november, stran 4 ovitka; december, stran 4 ovitka.

Naslovnice

Arhiv Elea iC, Gradnja Lattermanovega podhoda s podrivno metodo, april.

Arhiv Kolektor CPG, d. o. o., Gradnja viadukta Vinjan po tehnologiji proste konzolne gradnje, oktober.

Arhiv Makro 5 gradnje, d. o. o., Prenovljen objekt stare tovarne Rog v Ljubljani, september.

Arhiv Pomgrad, d. d., Gradnja trgovskega objekta Eurospin v Murski Soboti, julij.

Arhiv Ponting, d. o. o., Gradnja razglednega stolpa Kristal v Rogaški Slatini, maj.

Bratina, S., Brv Irča vas, zasnovana po tehnologiji nateznih travkov, februar.

Gomboši, B., Pred mesecem dni odprta brv Medvoški lok je »preživela« katastrofalne poplave, avgust.

Gregorič, A., za 2TDK, d. o. o., Gradnja viadukta Gabrovica pod avtocestnim viaduktom Črni Kal, januar.

Kuhta, M., Obnova Dravske promenade v Mariboru, november.

Pongrac, M., Industrijsko poslovni kompleks Ledinek, december.

Prostovoljci ESC in Medvode, Dvig in premik kolesarske brvi čez reko Savo v Medvodah, marec.

Quaiat, C., Muzejski parni vlak na mostu Vintgar, posneto leta 1994, junij.

NOVI DIPLOMANTI GRADBENIŠTVA

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Nives Podobnik. Analiza razlik med prodajnimi cenami in posplošenimi tržnimi vrednostmi stanovanjskih nepremičnin v občinah Idrija, Cerkno in Logatec, mentorica
izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=152614&lang=eng>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO (smeri Gradbene konstrukcije, Geotehnika-hidrotehnika, Nizke gradnje)

Jan Špiler. Numerična optimizacija sorpcije v večfaznem Fickovem modelu prenosa vlage v lesu, mentor
prof. dr. Tomaž Hozjan, somentor doc. dr. Robert Pečenko;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=152616&lang=slv>

III. STOPNJA – DOKTORSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRAJENO OKOLJE

Ahmad Farhad Skandary. Uporaba diferencialne evolucije za kalibracijo integriranih modelov rabe tal in prometa,
mentor izr. prof. dr. Marijan Žura;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=152419>

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

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Peter Grujič. Reciklaža odpadnih gum in izdelava betona z gumo, mentor izr. prof. dr. Andrej Ivanič;
<https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=85958&lang=slv>

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

13.-14.1.2024

CEU 2024 - 7th International Conference on Civil Engineering and Urban Planning
Spletna konferenca
<https://ceu2024.org>

26.-29.2.2024

ICBMC 2024 — 9th International Conference on Building Materials and Construction
Tokio, Japonska
www.icbmc.org

18.-20.3.2024

Konferenca »Podnebne spremembe in vodooskrba Istre«
Pula, Hrvaška
<https://vode-istre.eu/>

4.-5.4.2024

CIGOS — 7th International Conference series on Geotechnics, Civil Engineering and Structures
Hošiminh, Vietnam
<https://cigos2024.sciencesconf.org/>

19.-25.4.2024

WTC 2024 - World Tunnel Congress 2024
Shenzhen, Kitajska
www.wtc2024.cn

24.-26.4.2024

ICSCER 2024 - 8th International Conference on Structure and Civil Engineering Research
Madrid, Španija
www.icscer.org

25.-27.4.2024

ICGE'24 — International Conference on Geotechnical Engineering
Hammamet, Tunizija
www.icge24.com/

28.-30.5.2024

2nd annual Conference on Foundation Decarbonization and Re-use
Amsterdam, Nizozemska
<https://foundationreuse.com/>

18.-21.6.2024

7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization
Barcelona, Španija
<https://isc7.cimne.com>

30.6.-5.7.2024

WCEE2024 - 18th World Conference on Earthquake Engineering
Milano, Italija
www.wcee2024.it

8.-12.7.2024

14th International Symposium on Landslides
Chambéry, Francija
www.isl2024.com/

26.-30.8.2024

ECSMGE 24 – XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
Lizbona, Portugalska
<https://www.ecsmge-2024.com>

23.-25.9.2024

CDA Conference 2024 - Canadian Dam Association 2024 Annual Conference & Exhibition
Niagara Falls, Ontario, Kanada
<https://cda.ca/events/2024/09/23/cda-conference-2024>

23.-27.9.2024

IS-Grenoble 2024 — International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro
Grenoble, Francija
<https://is-grenoble2024.sciencesconf.org/>

29.9.-3.10.2024

92nd ICOLD Annual Meeting and International Symposium
New Delhi, Indija
www.icold2024.org/#/home

20.-22.11.2024

5th International Conference on Transportation Geotechnics 2024
Sydney, Avstralija
www.ictg2024.com.au/

9.-15.5.2025

WTC 2025 — World Tunnel Congress
Stockholm, Švedska
www.wtc2025.se

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