

januar 2023

letnik 72

Gradbeni vestnik

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



2

POTRESNO UTRJEVANJE ZIDANIH
STAVB: PREDSTAVITEV RAZISKAV
S KOMPOZITI ARMIRANIH
MALTNIH OBLOG



ANALIZA VPLIVA RAZLIČNIH
PARAMETROV NA STIK MED
REBRASTO ARMATURO IN
BETONOM

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 geodezijo 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: **mag. Gregor Ficko**
mag. Jernej Nučič
mag. Mojca Ravnikar Turk
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:
Kočeviski tisk

Naklada: 450 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:
**gradnja viadukta Gabrovica pod
avtocestnim viaduktom Črni Kal,**
foto: Andraž Gregorič za 2TDK

**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, januar 2023, letnik 72, str. 1-32

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

ČLANKI PAPERS

dr. Ingrid Boem, univ. dipl. inž. grad.
prof. dr. Natalino Gattesco, univ. dipl. inž. grad.
Allen Dudine, mag. inž. grad.
doc. dr. Matija Gams, univ. dipl. inž. grad.

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



doc. dr. Gregor Trtnik, univ. dipl. inž. grad.
dr. Jakob Šušteršič, univ. dipl. inž. grad.
prof. dr. Tomaž Hozjan, univ. dipl. inž. grad.

ANALIZA VPLIVA RAZLIČNIH PARAMETROV NA STIK MED REBRASTO ARMATURO IN BETONOM INFLUENCE OF DIFFERENT PARAMETERS ON THE BOND BETWEEN REINFORCEMENT STEEL BARS AND CONCRETE



JUBILEJ

mag. Gregor Ficko, univ. dipl. inž. grad.

50-LETNICA ODPRTJA PRVE SLOVENSKE AVTOCESTE MED VRHNIKO IN POSTOJNO



OBVESTILA ZDGITS

PRIPRAVLJALNI SEMINARJI IN IZPITNI ROKI ZA STROKOVNE IZPITE ZA GRADBENO STROKO V LETU 2023

27

FOTOREPORTAŽA Z GRADBIŠČ

2TDK, Družba za razvoj projekta, d. o. o.

GRADBIŠČA DRUGEGA TIRA ŽELEZNIŠKE POVEZAVE DIVAČA-KOPER



NOVI DIPLOMANTI

Eva Okorn

KOLENDAR PRIREDITEV

Eva Okorn

dr. Ingrid Boem, univ. dipl. inž. grad.

ingrid.boem@fsv.cvut.cz

Department of Concrete and Masonry Structures,
Faculty of Civil Engineering,
Czech Technical University in Prague, Thákurova 7, 166 29 Praha 6,
Czech Republic



prof. Natalino Gattesco, univ. dipl. inž. grad.

gattesco@units.it

Department of Engineering and Architecture,
University of Trieste, p.le Europa 1, 34127 Trieste (Ts),
Italy



Allen Dudine, mag. inž. grad.

allen.dudine@fibrenet.it

Fibre Net S.p.A., Via Jacopo Stellini, 3 - Z.I.U.,
33050 Pavia di Udine (Ud),
Italy



doc. dr. Matija Gams, univ. dipl. inž. grad.

mgams@fgg.uni-lj.si

Katedra za konstrukcije in potresno inženirstvo,
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek

UDK 692:699.841

POTRESNO UTRJEVANJE ZIDANIH STAVB: PREDSTAVITEV RAZISKAV S KOMPOZITI ARMIRANIH MALJNIH OBLOG SEISMIC PROTECTION OF EXISTING MASONRY BUILDINGS: A ROUTE OF RESEARCH ON COMPOSITE REINFORCED MORTAR

Povzetek

Na področju utrjevanja obstoječih zidanih stavb se je v zadnjih dvajsetih letih uporaba maltnih oblog, ki so armirane s kompozitnimi materiali (angl. Composite Reinforced Mortar oz. CRM), močno razširila. Tipično za take obloge je, da je plast malte razmeroma tanka in nanosena na celi površini zidu ter da je armirana z mrežico iz kompozitnih vlaken. Običajno imajo kompozitna vlakna visoko natezno trdnost in niso občutljiva na korozijo. V članku predstavimo ključne korake na dolgi raziskovalni poti, na kateri smo eksperimentalno in računsko analizirali obnašanje takih oblog na več nivojih, od posameznih materialov do stavbe v naravnem merilu. Prikazane so izkušnje in spoznanja glede njihovega odziva in učinkovitosti, s katerimi smo prispevali k razumevanju njihovega obnašanja v raziskovalni sferi in na področju projektiranja. Med razvojem smo sistematično preučevali tudi zahtevne in večplastne vidike, s katerimi se srečujejo projektanti, ko izbirajo ustrezno metodo za potresno utrditev zidanih stavb.

Ključne besede: potresna odpornost, utrjevanje zidanih stavb, kompoziti, eksperimenti, numerično modeliranje

Summary

Over the last 20 years, Composite Reinforced Mortars (CRM) have gradually become widespread as innovative strengthening techniques for the seismic protection of existing masonry buildings. They combine an inorganic mortar layer, applied to the masonry surface, with a high tensile resistant, non-corrosive, fiber-based reinforcement. The paper traces the main steps of an in-depth research route on a specific CRM technique, providing an overview on the experimental testing and numerical modeling experiences aimed at achieving an in-depth knowledge on its behavior and on its effectiveness in improving masonry performance. It is an example of a systematic approach to research, which deals with the complexity and multiplicity of aspects that need to be considered by professional designer when choosing among the solutions available on the market.

Key words: seismic vulnerability, masonry strengthening, composites, experimental tests, numerical modelling

1 UVOD

Velik del stavbne kulturne dediščine v Evropi in po svetu so zidane stavbe, ki potrebujejo konstrukcijska popravila zaradi razlogov, kot so dotrajanost, pretekli posegi, posedki tal, čezmerna razpokanost, izpostavljenost neugodnim obtežbam in drugo. Izkušnje kažejo, da so to običajno masivne stavbe, ki dobro prenašajo navpične obtežbe, a so razmeroma občutljive na potresno obtežbo. Glavni razlog za to občutljivost so nezadostna povezanost konstrukcijskih elementov (med zidovi in stropnimi konstrukcijami ter tudi med zidovi v eni in drugi smeri), neustrezna porazdelitev zidov v tlorisu in po višini ter preslabe materialne karakteristike zidovja. Zidovje je najšibkejše v nategu, v katerem praktično nima nosilnosti, razmeroma šibko v strigu in razmeroma dobro za prenašanje tlačnih obremenitev. Zato lahko z dodajanjem materialov, ki dobro prenašajo natezne obremenitve, bistveno izboljšamo natezno in tudi strižno trdnost zidovja.

V tem kontekstu so se zadnjih 20 let razvijali in uveljavljali inovativni sistemi utrjevanja, ki temeljijo na oblaganju zidov z maltnimi oblogami, ki so armirane s kompozitnimi vlakni. Ta kombinacija materialov je zelo učinkovita, saj kompozitna vlakna nudijo visoko odpornost na natege in korozijo, malta pa se razmeroma enostavno nanaša na neravno površino zidovja in je z zidom mehansko in kemično kompatibilna. Malta tudi ščiti vlakna pred UV-sevanjem in požarom. Možno je kombinirati različne materiale za armiranje (npr. steklena, karbonska, bazaltna) in izdelke iz njih (tkanine ali mreže), različne pa so lahko vrste in debeline maltne obloge.

Razvoj teh sodobnih tehnik je zahteval preučitev problema na več nivojih: od preiskav mehanskega in kemičnega obnašanja materialov, preizkušanja konstrukcijskih elementov in celih konstrukcij do razvoja in kalibracije numeričnih in analitičnih metod.

V tem članku je predstavljena raziskovalna pot oz. pregled raziskav skupine raziskovalcev, ki je dalj časa sistematično raziskovala možnost tovrstnega utrjevanja.

2 MALTNE OBLOGE, ARMIRANE S KOMPOZITNIMI VLAKNI

V članku predstavljamo raziskave na specifični vrsti maltnih oblog, ki so debele 25–30 mm ali več in armirane z alkalno odpornimi mrežami iz steklenih vlaken (slika 1). Za ustrezno mehansko povezavo med oblogo in zidom so obloge sidrane v zid s sidri iz steklenih vlaken. Pod sidri so dodatne mrežice za boljši rznos napetosti (slika 1). Obloge se lahko na zid nanesle z ene strani, a je v tem primeru treba uporabiti dodatna povezovalna sidra, ki so bistveno močnejša in v primeru večslojnih zidov tudi povežejo posamezne sloje v monoliten zid.

Mreža iz steklenih vlaken za armiranje oblog ima vlakna (oz. niti) v obeh smereh. V postopku proizvodnje se vlakna impregnirajo s polimerom (vinylester-epoxy) in spletejo v mrežo. Ko se polimer na povišani temperaturi strdi, se mreže zvijejo v rolo, ki je pripravljena za uporabo.



Slika 1. Mreža iz steklenih vlaken in sidra pred nanosom maltne obloge.

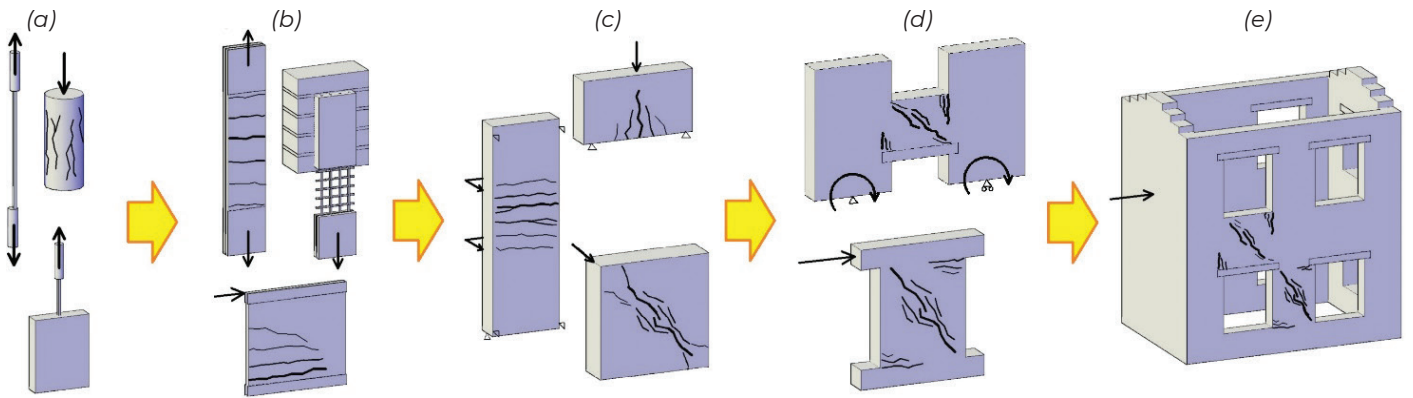
3 EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE

Eksperimentalne raziskave so bile ključne za določitev obnašanja posameznih materialov, maltnih oblog in njihovega učinka na potresni odziv konstrukcijskih elementov in konstrukcij. Da bi jih optimizirali, smo sistematično obravnavali vedno bolj zahtevne preizkušance, kot je prikazano na sliki 2. Seveda se je število preizkušancev zmanjševalo s kompleksnostjo preiskave zaradi sorazmerno večjih finančnih stroškov in porabe časa.

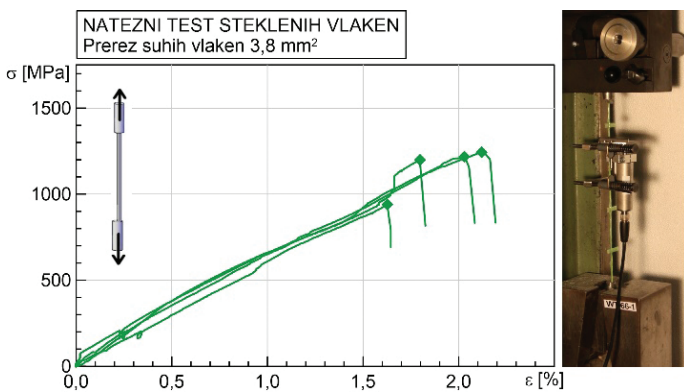
Na nivoju posameznih materialov (slika 2a) smo izvedli natezne teste na vrveh iz vlaken (primer je prikazan na sliki 3), teste za določitev tlačne in natezne trdnosti malte, strižne teste vozlišč mreže in izvlečne (angl. pull-out) teste vlaken iz malte [Gattesco, 2017a]. Ti testi so bili pomembni za določitev mehanskega obnašanja različnih materialov in njihove interakcije.

Omeniti je pomembno, da so bili za niti mreže oz. za steklena vlakna izvedeni testi trajnosti pri različnih temperaturah in vlažnostih ter testi utrujanja pri dolgotrajni obtežbi. Za steklena vlakna je namreč zelo pomembno preveriti odpornost v alkalnem okolju, ki se nahaja v malti ([Micelli, 2017], [Micelli, 2019]).

Na nivoju obloge smo preizkušali vzorce, ki jih imenujemo kuponi (slika 2b). Preizkusili smo jih v čistem nategu in strižno. S strižnimi testi smo preizkusili moč vezi med oblogo in zidom ter strižno trdnost v ravnini obloge. Na podlagi teh preizkusov smo določili ekvivalentne karakteristike CRM-oblog kot kompozitnega materiala ([Gattesco, 2017a], [Sisti, 2019]). Primer čistega nateznega preizkusa kupona je prikazan na sliki 4a. Rezultati teh testov so pokazali, da se CRM-obloge v nategu



Slika 2. Prikaz sistematičnega pristopa eksperimentalnih raziskav maltnih oblog (CRM) oz. njihovega učinka na: (a) posameznih materialih, (b) CRM-oblogi, (c) preprostih vzorcih z monotono obtežbo, (d) konstrukcijskih elementih s potresno obtežbo in (e) stavbi v naravnem merilu.



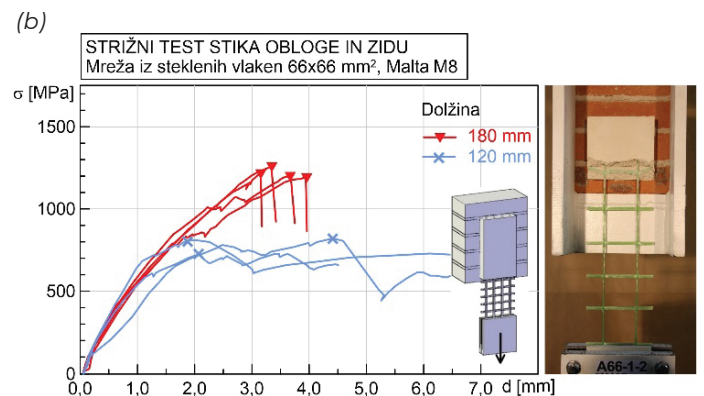
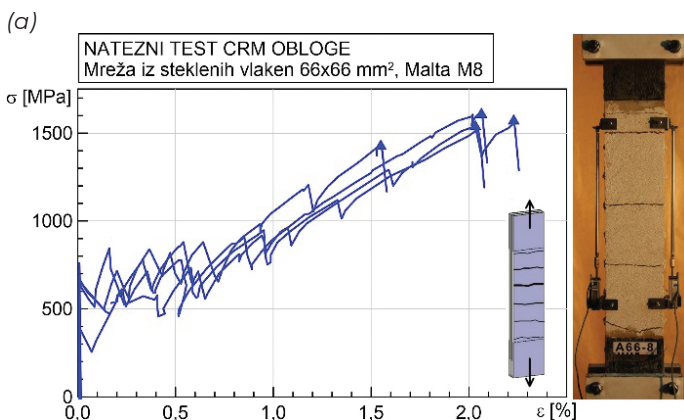
Slika 3. Natezni preizkus na vrvi iz kompozitnih vlaken: levo je graf napetost-deformacija (napetost se nanaša na prerez suhih vlaken), desno pa preizkuševališče.

obnašajo kot dvofazni material. V prvi fazi nudi odpornost malta. Ko malta razpoka, drastično pade togost, a še ne pride do porušitve, saj se obtežba prenese na vlakna v razpokah, ki se pod obtežbo odpirajo. V optimalnem primeru pride do končne porušitve zaradi pretrganja vlaken. Če sidrna dolžina ni za-

dostna ali če je vlaken preveč, lahko pride do zdrsa vlaken iz obloge ali pa do tega, da popusti stik z osnovnim zidom. To je razvidno iz grafa na sliki 4b, ki prikazuje rezultate strižnega testa povezave z dvema sidrnima dolžinama (180 in 120 mm). V primeru dovolj velike sidrne dolžine je prišlo do porušitve v vlaknih. V drugem primeru s prekratko sidrno dolžino pa je prišlo do zdrsa vlaken v malti, zaradi česar nosilnosti vlaken nismo uspeli v celoti izkoristiti. Posledično je bila manjša tudi nosilnost obloge.

Z eksperimentalnimi raziskavami na preprostih zidovih na sliki 2c smo izvedli preliminarne raziskave učinkovitosti tovrstnih oblog pri tipičnih porušnih mehanizmih obstoječega zidovja. Preučevali smo strižno porušitev z diagonalnimi razpokami, upogibno porušitev v ravnini in upogibno porušitev izven ravnine ([Gattesco, 2015], [Gattesco, 2017b]).

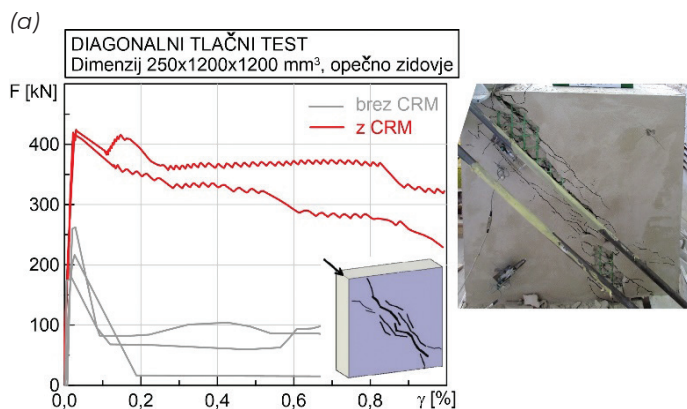
Primer na sliki 5a prikazuje diagonalne tlačne teste na vzorcih iz polne opeke. Diagonalni tlačni testi so bili izvedeni na preizkušanjih dimenzij debelina x dolžina x višina = 250 x 1200 x 1200 mm³, graf sila-strižna deformacija pa prikazuje velik vpliv obloge oz. povečanje nosilnosti. Ko je malta popustila, je mreža učinkovito prevzela obremenitve in jih celo uspela razporediti na širše območje.



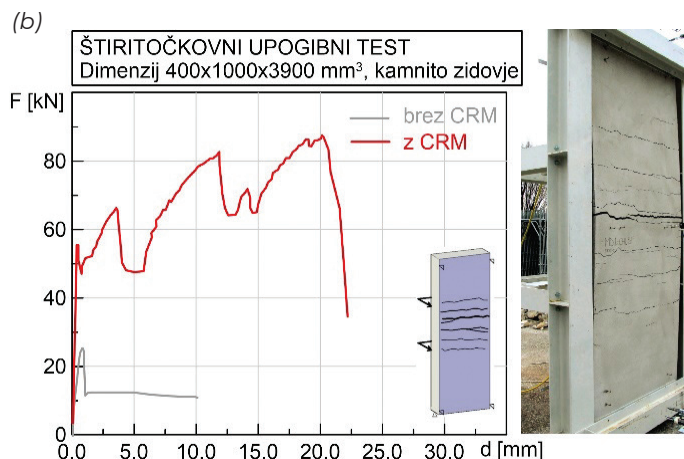
Slika 4. Preiskave CRM-oblog v (a) nategu in (b) na strižno nosilnost stika z zidom: graf ekvivalentnih napetosti v odvisnosti od deformacije ali zdrsa in tipične poškodbe vzorcev.

Upogibni testi kamnitega zidovja izven ravnine s štiritočkovnim upogibom so prikazani na sliki 5b. Izvedeni so bili na vzorcih velikosti debelina x dolžina x višina = 400 x 1000 x 3000 mm³ in so prav tako pokazali veliko povečanje nosilnosti zaradi obloge. Kot smo omenili že prej, ključno spremembo v obnašanju dosežemo zaradi natezne nosilnosti vlaken v oblogi. Vendar pa je za delovanje obloge pomembno, da uspemo vlakna ustrezno aktivirati. Če npr. pride do zdrsa vlaken v oblogi ali pa če se obloga delaminira od zidu, utrjevanje ni učinkovito.

Z vidika potresnega obnašanja je pomembno in ugodno še, da se je količina disipirane energije (ploščina pod krivuljo) v obeh primerih znatno povečala.



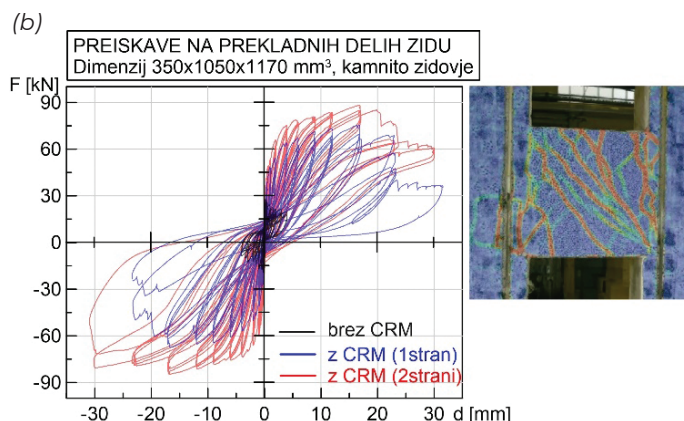
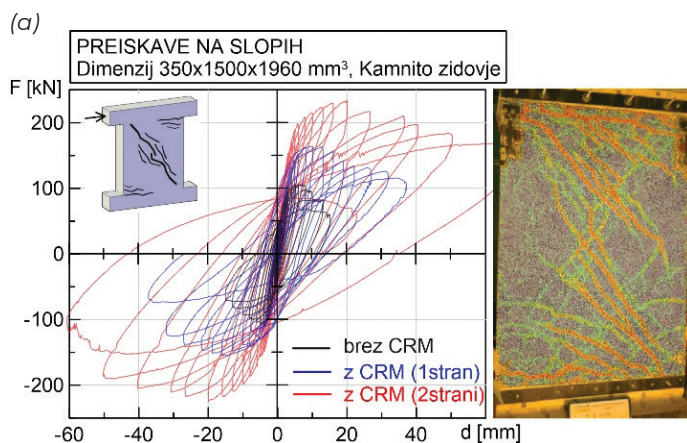
Zidni slop, prikazan na sliki 6a, je bil dolg 1500 mm in visok 1960 mm. Potresno obtežbo na zid smo simulirali z vsiljevanjem pomikov na zgornjem robu. Pomike smo nanašali izmenično v eni in drugi smeri ter amplitudo postopoma povečevali. Med preiskavo je bila v zidu konstantna tlačna napetost 0,5 MPa, poleg tega pa je imel zid na zgornjem robu preprečene zasuke. Rezultat preiskave je prikazan na grafu v obliki vodoravna sila v odvisnosti od vodoravnega pomika (histerezna krivulja). Slika zidu ob grafu prikazuje poškodbe utrjenega zidu – črte rdeče oz. toplih barv prikazujejo razpoke. Kombinacija poševnih in vodoravnih razpok pa nakazuje tako strižne kot tudi upogibne poškodbe.



Slika 5. Krivulje odpornosti in vzorci poškodovanosti pri preiskavah osnovnih mehanizmov za (a) diagonalni tlačni test in (b) za upogibni test izven ravnine.

Z eksperimentalnimi raziskavami zidnih slopov in prekladnih delov v naravni velikosti pri simulirani potresni obtežbi (slika 2d) smo opazovali dejansko obnašanje konstrukcijskih elementov, s katerimi običajno modeliramo zidane stavbe po metodi nadomestnih okvirjev [Gattesco, 2022]. Vzorci na sliki 6 so bili zgrajeni kot dvoslojni kamniti zidovi debeline 350 mm, maltne obloge CRM pa so bile na eni ali obeh straneh zidu.

Preizkušane prekladnega dela zidu na sliki 6b je v obliki »H«, pri čemer je dolžina prekladnega dela 1050 mm, višina pa 1170 mm. Prekladni del je sezidan na leseni prekladi, levo in desno od preklade pa sta slopa dolžine 1420 mm in višine 2190 mm. Zidna slopa na straneh sta potrebna za zagotavljanje ustreznih robnih pogojev in za vnos obtežbe. Obtežba se vnaša tako, da se slopa ob vpetju zasukata v isti smeri, kar povzroči strižne in upogibne obremenitve v prekladnem delu.



Slika 6. Preiskave (a) zidnih slopov in (b) prekladnih delov: histerezne krivulje in vzorci poškodb utrjenih zidov.

Rezultati v obliki histreznе krivulje za prekladni del so prikazani poleg sheme poškodb utrjenega zidu, na kateri ponovno vidimo kombinacijo strižnega in upogibnega odziva. Upogibne razpoke so tokrat navpične, na levem in desnem robu prekladnega zidu [Gams, 2021].

Primerjava odziva neutrjenega zidovja z zidovjem, ki je utrjeno z oblogami na eni ali obeh straneh, kaže na veliko povečanje nosilnosti, kapacitete pomikov in disipacije energije. Do povečanja disipacije energije pride zaradi armiranja, ki povzroči, da se poškodbe porazdelijo po veliki površini in niso skoncentrirane le v posamezni razpoki. Pri zidnih slopih je izboljšanje odziva zaradi oblaganja z obeh strani večje kot v primeru oblaganja le z ene strani. V primeru prekladnih delov pa oblaganje z obeh strani ne prinese veliko več kot utrjevanje z ene strani.

Učinkovitost utrjevanja smo preizkusili tudi na stavbi v naravnem merilu. Stavba, prikazana na sliki 7a, je bila zgrajena iz 350 mm debelega dvoslojnega kamnitega zidovja in je imela tlorisne dimenzije 5750 mm x 4350 mm, visoka pa je bila 6000 mm [Gattesco, 2022]. Imela je lesene stropne konstruk-

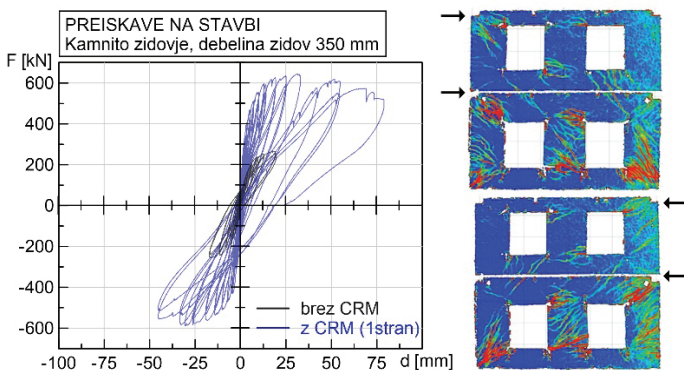
cije in dvokapno streho z opečno kritino. Manjkajočo koristno in stalno obtežbo smo simulirali z betonskimi utežmi. Vodoravno obtežbo smo vnašali v vzdolžni smeri na nivoju etažne konstrukcije in strehe. Oblika vodoravne obtežbe po višini je sledila obliki prve nihajne oblike. Stavbo smo najprej preizkusili v neutrjenem stanju do večjih, a še popravljivih poškodb. Poškodbe smo zatem popravili z injektiranjem razpok in stavbo utrdili s CRM-oblogami z ene strani. Obloge so bile sidrane v temelje po celotnem obodu konstrukcije z jeklenimi navojnimi palicami. Utrjeno stavbo smo ponovno preizkusili. Tokrat do stanja blizu porušitve.

Učinkovitost utrjevanja na nivoju stavbe je razvidna iz grafa na sliki 7b, na katerem sta prikazani histreznа odziva neutrjene in utrjene stavbe v obliki strižne sile ob vpetju v odvisnosti od pomika na vrhu stavbe. Na sliki 7b so prikazane tudi poškodbe stavbe pri obtežbi z ene in druge smeri. Poškodbe so, podobno kot pri posameznih konstrukcijskih elementih, razporejene po veliki površini stavbe. Ravno ta razpršenost razpok predstavlja veliko izboljšanje v primerjavi z osnovnim stanjem, saj omogoča veliko disipacijo energije.

(a)



(b)



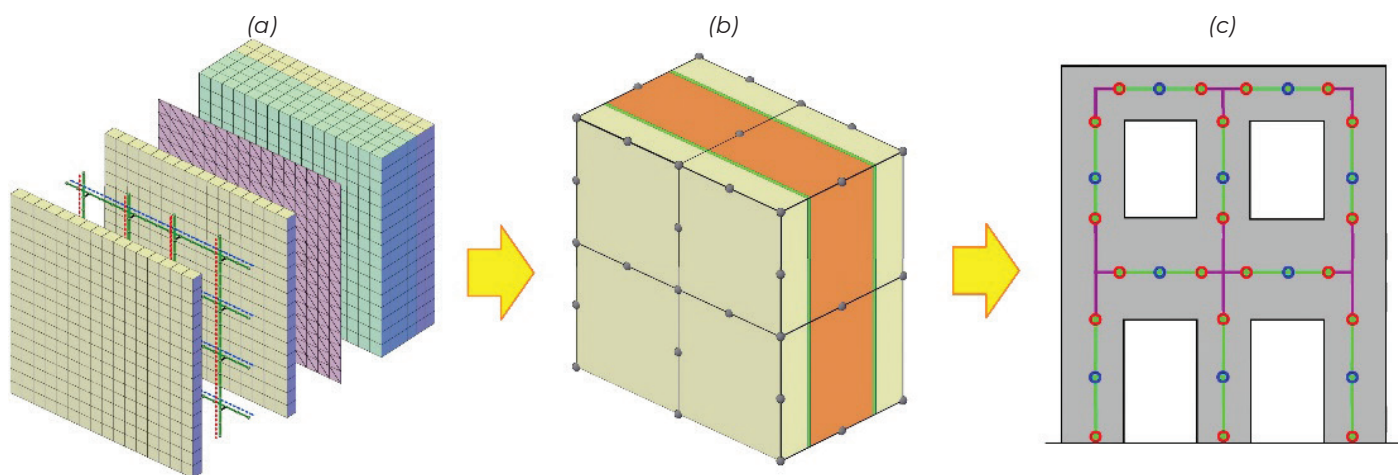
Slika 7. Preiskave na stavbi v naravnem merilu: (a) stavba na preizkuševališču in (b) rezultati preiskave v obliki histreznе krivulje in vzorca poškodb utrjene stavbe.

4 NUMERIČNO MODELIRANJE

Zaradi časovnih in finančnih omejitev ni mogoče eksperimentalno preizkusiti vseh različnih kombinacij materialov in oblik preizkušancev, prav tako ni mogoče izvesti preizkusov pri veliko različnih napetostnih stanjih in robnih pogojih, saj je kombinacij preveč. Da bi preverili kombinacije parametrov, ki jih ne preverimo z eksperimenti, si moramo pomagati z numeričnimi modeli. Z njimi lahko upoštevamo poljubno geometrijo in kombinacije vhodnih podatkov, uporabimo pa jih lahko tudi za optimizacijo CRM-oblog in občutljivostne analize.

Razvoj računskih modelov v razvoju obravnavanih maltnih oblog CRM je temeljil na nelinearnih analizah z večnivojskim pristopom (angl. Multi-Level Approach). V skladu s tem pristopom smo uporabili modele na različnih velikostnih nivojih, kot je prikazano na sliki 8. Prve so bile analize na najmanjših preizkušancih (slika 8a). Za te analize so bili uporabljene najbolj detajlni modeli, ki jih imenujemo Detailed-Level Modelling (DLM). Na teh modelih je bila narejena kalibracija z eksperimenti in optimizacija, s katero smo dobili enako natančen in zanesljiv računski model, ki pa je bil veliko bolj numerično učinkovit in smo z njim lahko modelirali bistveno večje preizkušance. Ta model je t. i. model z več plastmi oz. angl. Multi-Layer Model (MLM) in je prikazan na sliki 8b. S tem modelom smo uspešno modelirali teste konstrukcijskih elementov (slopih in prekladnih delov) pri ciklični obtežbi. Na nivoju računskih modelov celih stavb, kot je tisti, prikazan na sliki 8c, smo uporabili modele nadomestnih okvirjev s koncentrirano plastičnostjo v členkih (Lumped Plasticity Model, LPM).

V najbolj podrobnem modelu DLM na sliki 8a smo uporabili zelo fino mrežo končnih elementov (stranica končnega elementa je bila dolga približno 15 mm). Z osemvozišnimi prostorninskimi elementi smo modelirali zidovje, maltno oblogo in steklena vlakna. Med posameznimi materiali smo uporabili



Slika 8. Večnivojski pristop pri modeliranju zidov s CRM-oblogami: (a) podrobni model DLM, (b) model z več plastmi MLM in (c) model s koncentrirano plastičnostjo LPM.

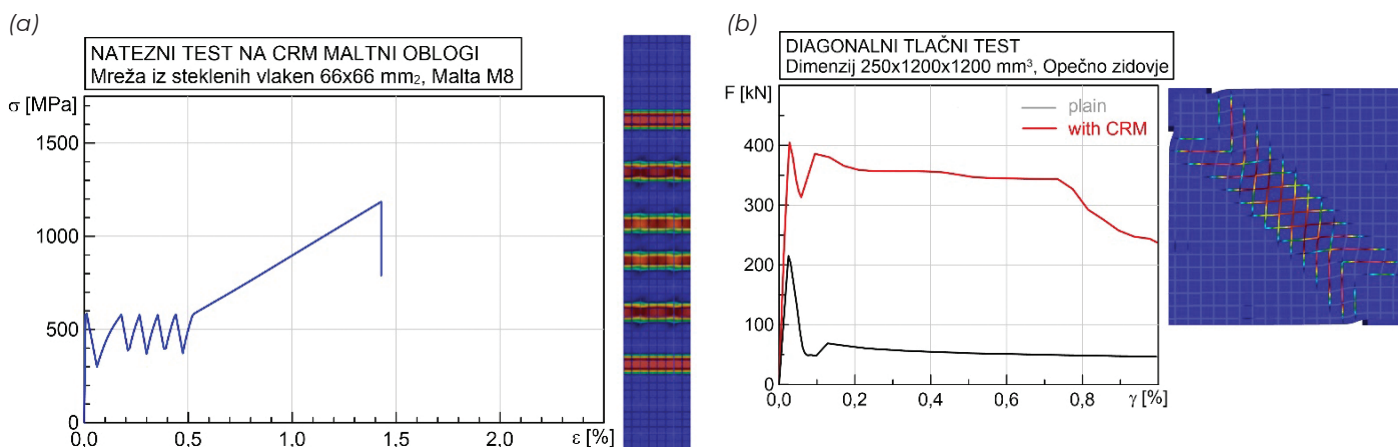
posebna pravila za obnašanje stika. V primeru pravokotnih vlaken smo določili stike v posameznih vozliščih, lastnosti stika med vlakni in malto smo definirali z linijskimi elementi, stike med malto in zidovjem pa s ploskovnimi elementi. Model je upošteval možnost porušitve v kateremkoli od materialov (npr. pretrg vlaken, razpokanje in drobljenje malte itd.) kot tudi v stikih (porušitev stika med vlakni in malto in med malto in zidovjem).

Model smo kalibrirali na podlagi eksperimentalnih testov posameznih komponent in stikov, ki so prikazani na sliki 2a. Validirali pa smo jih tako, da smo z njimi modelirali teste na maltne obloge CRM (slika 2b) [Boem, 2022a] in teste obnašanja osnovnih mehanizmov odziva (slika 2c) [Boem, 2022b]. Rezultata nateznega testa CRM-obloge in diagonalnega tlačnega testa sta prikazana na sliki 9, iz katere je razvidno, da je podrobni model sposoben modelirati razpršenost razpok in napetostno stanje v steklenih vlaknih.

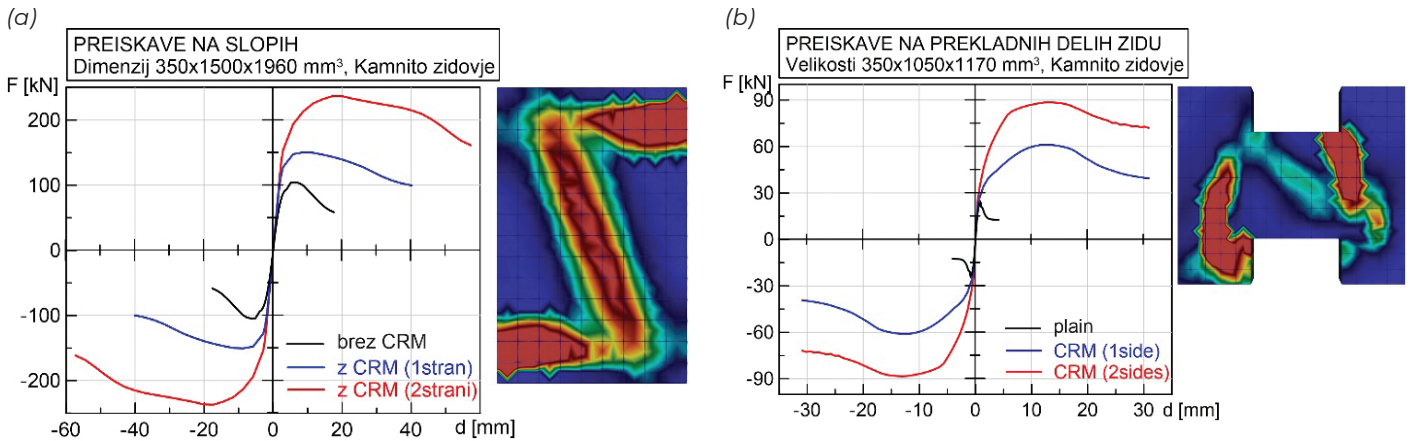
Podrobni model se je izkazal za zelo uporabnega pri občutljivostnih analizah, s katerimi smo raziskovali vpliv posameznih

parametrov na učinkovitost CRM-oblog. Preučili smo vplive stopnje armiranja, orientacijo mreže, kakovost stika med vrvmi, kvaliteto malte, povezanost med mrežo in malto ter povezanost med malto in zidovjem.

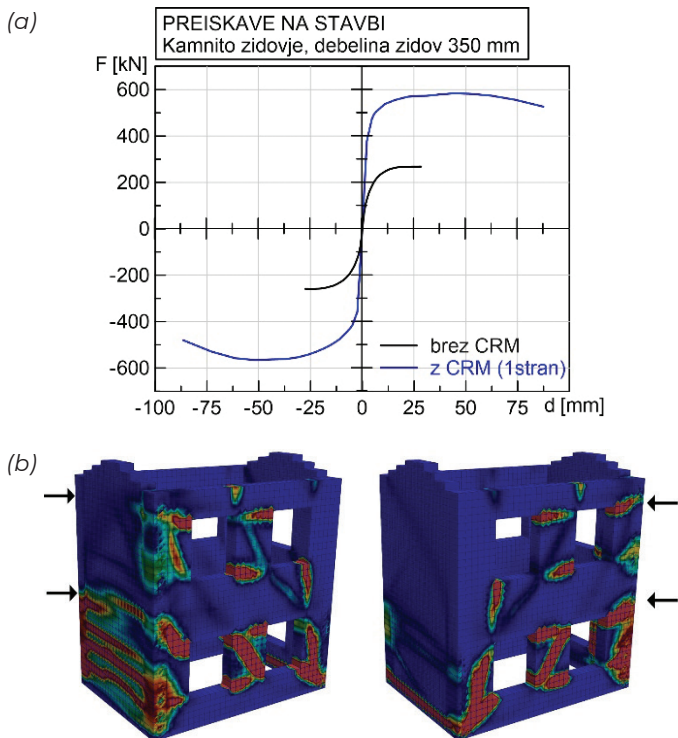
Na naslednjem nivoju modeliranja smo uporabili model z več plastmi MLM (slika 8b), pri katerem je mreža končnih elementov bistveno redkejša (dolžina stranice je približno 150 mm). Tudi v tem modelu so uporabljeni prostorninski elementi, ki pa imajo tokrat 20 vozlišč na element. Kot je razvidno že iz imena, gre za model iz več plasti, ki predstavljajo malto, mrežo iz steklenih vlaken in zidovje. Med posameznimi sloji je predpostavljen popoln stik. Lastnosti vsake od plasti smo kalibrirali z eksperimenti in z numeričnimi analizami podrobnega modela (DLM). Z MLM-modelom smo modelirali odziv konstrukcijskih elementov (slopi in prekladni deli) kot tudi cele stavbe (slika 2e in 11b) [Boem, 2022c]. Rezultati analiz na sliki 11 in primerjava z eksperimentalnim odzivom dokazujejo, da je pristop MLM dovolj natančen in zanesljiv.



Slika 9. Rezultati analiz s podrobnim računskim modelom DLM: (a) natezni test na CRM-oblogi – kuponu in (b) diagonalni tlačni test zidu.



Slika 10. Numerične simulacije odziva konstrukcijskih elementov z MLM: krivulje odziva in vzorci poškodb zidov s CRM-oblogami za (a) slope in (b) prekladne dele zidov.



Slika 11. Numerične simulacije odziva stavbe v naravnem merilu z MLM: (a) krivulje odziva in (b) vzorec poškodb stavbe utrjene s CRM-oblogami.

Zaradi razmeroma redke mreže in predpostavljene razmazane plastičnosti (angl. smeared plasticity) MLM ni primeren za simuliranje posameznih razpok. Če želimo bolj natančno simulirati razpokanje, moramo uporabiti DLM. Če pa smo zadovoljni s tem, da vidimo območja poškodb približno, model MLM zadostuje. MLM je torej kompromis med analizo cele konstrukcije in podrobno analizo razvoja poškodb in porušnih mehanizmov. Da pa bi pristop MLM deloval, mora biti zagotovljena predpostavka o popolni povezavi med plastmi. To dosežemo z zagotavljanjem zadostnih preklonih in sidrnih dolžin mrež in z omejevanjem stopnje armiranja. V primeru, da ni

popolnega stika, lahko v MLM-modelu omejimo mejno deformacijo v mreži iz steklenih vlaken (s tem npr. upoštevamo zdrs vlaken v oblogi) ali pa omejimo tlačno trdnost malte (s čimer upoštevamo izklon obloge na najbolj obremenjenih delih). Kot omenjeno, pa je podlaga za take ukrepe eksperiment in modeliranje z bolj natančnimi modeli.

Za račun odpornosti obstoječih zidanih stavb se v praksi uporabljajo modeli iz nadomestnih okvirjev s koncentrirano plastičnostjo LPM, kot je prikazano na sliki 8c. Stavbo se v tem pristopu modelira z enodimenzionalnimi elastičnimi nosilci, ki predstavljajo t. i. makroelemente oz. slope in prekladne dele. Makroelementi so povezani s togimi deli. Nelinearno obnašanje slopov in prekladnih delov se lokalizira v plastične členke, ki lahko upoštevajo različne porušne mehanizme (strižni ali upogibni).

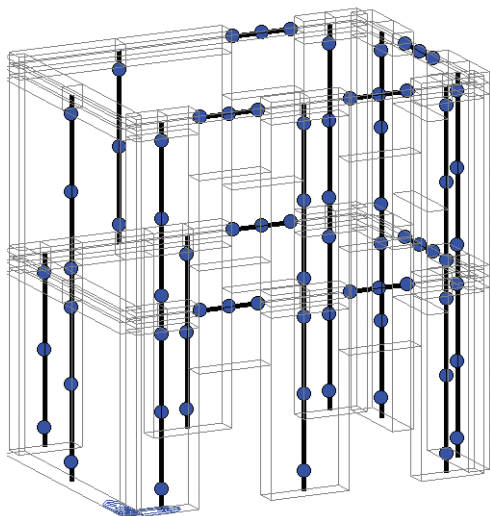
S pomočjo občutljivostnih analiz konstrukcijskih elementov na nivoju MLM smo umerili karakteristike plastičnih členkov v obliki krivulje odziva posameznega elementa. Te karakteristike smo zatem upoštevali v makromodelu (LPM) cele stavbe, kot je prikazano na sliki 12. Primerjava rezultatov modelov LPM in MLM na nivoju stavbe je validirala LPM-model. Taki modeli pa se, kot smo že omenili, uporabljajo v praksi za načrtovanje utrditve obstoječih stavb [Gattesco, 2022].

5 SKLEP

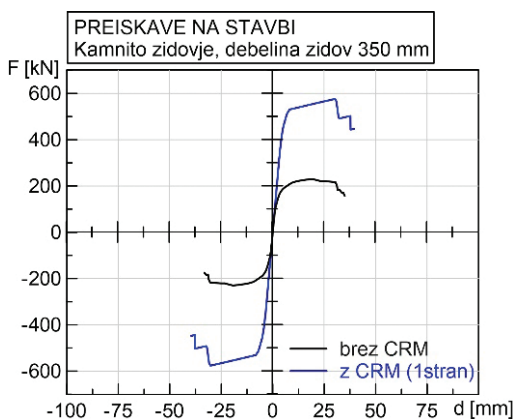
Predstavili smo kratek povzetek lastnih obsežnih, skoraj dvajset let trajajočih eksperimentalnih in numeričnih raziskav maltnih oblog za utrjevanje zidanih konstrukcij. Z eksperimentalnimi raziskavami smo sistematično preizkušali vedno večje vzorce, od posameznih materialov vse do stavbe v naravnem merilu. Sistematično smo izvajali tudi numerične raziskave z večnivojskim pristopom. To nam je dalo nov vpogled v problematiko in mehanizme odziva.

Z laboratorijskimi preiskavami materialov in obloge smo določili materialni odziv, ki je pokazal zmožnost prenašanja obtežbe po razpokanju in omogočil določiti npr. potrebne sidrne dolžine. Eksperimenti na konstrukcijskih elementih (slopi in prekladni deli zidov) in celo na celi stavbi so pokazali učinkovi-

(a)



(b)



Slika 12. Numerična simulacija stavbe z modelom s koncentrirano plastičnostjo LPM: (a) pogled na model in (b) krivulje odziva.

tost utrjevanja z maltnimi oblogami, ki so armirane s kompozitnimi vlakni. Obnašanje se občutno izboljša tako za obremenitve, ki delujejo v ravnini zidov, kot tudi izven ravnine zidov. Rezultati eksperimentov so bili ključni za validacijo računskih modelov, s katerimi se modelira nelinearni odziv. Odziv smo modelirali z modeli različnih natančnosti, od detajlnih analiz interakcije med komponentami do razmeroma enostavnih modelov s koncentrirano plastičnostjo za modeliranje odziva stavb.

Seveda raziskave niso končane in mnogo vprašanj ostaja odprtih. Jasno pa je, da je odziv zidanih konstrukcij, utrjenih z maltnimi oblogami, zahteven inženirski in raziskovalni problem. Opravljene raziskave in ugotovitve predstavljajo osnovo za razvoj postopkov projektiranja in izbiro ustreznih metod utrjevanja v praksi.

6 ZAHVALA

Del raziskav je bil financiran iz evropskega projekta Horizon 2020 s pogodbo Marie Skłodowska-Curie No 101003410 (projekt conFIRMa).

Del raziskav je bil financiran iz evropskega fonda za regijski razvoj v sklopu programa Italija-Slovenija po pogodbi No FIN-CON-2020-0000009-P-P (project Constrain).

Za strokovne nasvete in pomoč se zahvaljujemo prof. B. Patzáku in prof. A. Kohoutkovi (ČVUT, CZ), prof. M. Tomaževiču in M. Lutman (ZAG, SI) ter podjetju Fibre Net S.p.A. (I).

7 LITERATURA

Boem, I., Characterization of textile-reinforced mortar: state of the art and detailed level modelling with a free open-source finite element code. *Journal of Composites for Construction*, 26, 04022060, 2022a.

Boem, I., Masonry elements strengthened through Textile-Reinforced Mortar: application of detailed level modelling with a free open-source Finite-Element code. *Construction and Building Materials*, 357, 129333, 2022b.

Boem, I., Multi-layer modelling of masonry structures strengthened through Textile-Reinforced Mortar, *Open Research Europe*, 2, 132, 2022c.

Gams, M., Farič, M., Pučnik, V., Eksperimentalne raziskave utrjenih prekladnih delov kamnitih zidov (Experimental research of strengthened stone masonry spandrels), V: Zbornik : 42. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Rogaška Slatina, 2021.

Gattesco, N., Boem I., Experimental and analytical study to evaluate the effectiveness of an in-plane reinforcement for masonry walls using GFRP meshes, *Construction and Building Materials*, 88, 94-104, 2015.

Gattesco, N., Boem I., Characterization tests of GFRM coating as a strengthening technique for masonry buildings, *Composite Structures*, 165, 209-222, 2017a.

Gattesco, N., Boem I., Out-of-plane behavior of reinforced masonry walls: Experimental and numerical study, *Composites Part B: Engineering*, 128, 39-52, 2017b.

Gattesco, N., Boem, I., Rizzi, E., Bez, A., Gams, M., Marič, M., Pučnik, V., Dudine, A., The Experimental campaign and numerical simulations of the Constrain project, Interreg Italia-Slovenija standard project co-funded with European Regional Development Fundaion, Technical Report, 2022.

Micelli, F., Aiello, M. A., Residual tensile strength of dry and impregnated reinforcement fibres after exposure to alkaline environments, *Composites Part B: Engineering*, 159, 490-501, 2019.

Micelli, F., Corradi, M., Aiello, M. A., Borri, A., Properties of Aged GFRP Reinforcement Grids Related to Fatigue Life and Alkaline Environment, *Applied Sciences*, 7(9), 897, 2017.

Sisti, R., Castori, G., Dudine, A., Borri, A., In-plane response of mortar plates strengthened by traditional or innovative reinforcement materials (Comportamento a taglio di lastre di CRM, FRM o intonaco armato tradizionale - in Italian), In: Proceedings of XVIII Conference "ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia", Pisa University Press, Ascoli Piceno, I, 2019.

doc. dr. Gregor Trtnik, univ. dipl. inž. grad.

grega.trtnik@igmat.eu
I gmat, d. d.,

Zadobrovska cesta 4, 1000 Ljubljana

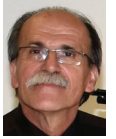


dr. Jakob Šušteršič, univ. dipl. inž. grad.

jakob.sustersic@irma.si

Irma, d. o. o.,

Špruha 18, 1236 Trzin



prof. dr. Tomaž Hozjan, univ. dipl. inž. grad.

tomaz.hozjan@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,

Jamova 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek

UDK 620.17:691.328

ANALIZA VPLIVA RAZLIČNIH PARAMETROV NA STIK MED REBRAS TO ARMATURO IN BETONOM

INFLUENCE OF DIFFERENT PARAMETERS ON THE BOND BETWEEN REINFORCEMENT STEEL BARS AND CONCRETE

Povzetek

Prispevek prikazuje rezultate obsežne eksperimentalne študije vpliva različnih parametrov betona in armature na velikost izvlečne sile oziroma sprijemne napetosti med rebrasto armaturno palico in okoliškim betonom. Analiziran je vpliv premera armaturnih palic, starosti betona oziroma njegove tlačne trdnosti ter vsebnosti jeklenih vlaken v betonu. Poleg omenjenih parametrov je podrobno analiziran tudi vpliv predhodnega bentonitnega premaza armaturnih palic na sprijemnost med betonom in armaturo. Preiskave so izvedene skladno z veljavnimi standardi pri laboratorijskih pogojih, pri čemer smo za merjenje pomikov pri preiskavi izvlečne sile uporabili najnovjši laserski sistem. Vse preiskave smo izvedli na večjem številu vzorcev, kar nam je poleg analize z osnovnimi statističnimi parametri omogočilo tudi izvedbo analize z naprednejšo statistično tehniko analize variance (AnoVa). Rezultati kažejo, da predhodni bentonitni premaz armaturnih palic v večini primerov ni statistično značilno vplival na zmanjšanje sprijemne napetosti med vgrajeno armaturo in okoliškim betonom. Podobne ugotovitve veljajo tudi v primeru analize vpliva premera armaturnih palic ter vsebnosti jeklenih vlaken v betonu, medtem ko je višja starost betona statistično značilno vplivala na povečanje sprijemne napetosti med vgrajeno armaturno palico in okoliškim betonom.

Ključne besede: beton, rebrasta armatura, sprejemna napetost, izvlečna sila

Summary

The paper presents the results of a comprehensive experimental study aimed at analyzing the influence of various parameters of concrete and reinforcement on the pull-out force (bond strength) between rebar reinforcement and the surrounding concrete. The influence of reinforcement diameter, concrete age (and thus compressive strength), and amount of steel microfibers on pull-out force (bond strength) is discussed. Moreover, the influence of bentonite suspension on reinforcement bars is also studied. The experiments were performed according to valid standards under standard laboratory conditions. In order to determine slip, i.e. displacements between concrete and reinforced bar, a sophisticated optical laser device was used. All the tests were performed on a large number of specimens, which allowed us to analyze the results using the Anova statistical technique. The results show that bentonite suspension has generally no statistically significant influence on the bond strength between concrete and reinforcement. Similar results were determined when the influence of reinforcement diameter and the amount of microfibers in concrete were analyzed. On the other hand, the influence of concrete age (and thus concrete compressive strength) on bond strength between concrete and reinforcement was statistically significant.

Key words: concrete, reinforcement, bond strength, pull-out force

1 UVOD

Armiranobetonske konstrukcije so projektirane tako, da beton (po večini) prevzema tlačne, jeklena armatura v betonu pa natezne napetosti. Vzajemno delovanje betona in vgrajene armature je možno predvsem zaradi podobnega temperaturnega raztezka betona in jeklene armature, alkalnega okolja, ki ga okoliški beton nudi vgrajeni armaturi in jo s tem štiti pred korozijskimi procesi, ter dobrega stika oziroma sprijemnosti med vgrajeno (rebrasto) armaturo in okoliškim betonom.

Ustrezna kvaliteta stika med betonom in vgrajeno rebrasto armaturo tako poleg lastnosti betona samega in armature pomembno vpliva na nosilnost armiranobetonskega elementa oziroma konstrukcije kot celote, še posebej pri konstrukcijah, ki so med fazo uporabe dinamično obremenjene. Temu primerno današnji standardi (predvsem standardi potresno varnega projektiranja) določajo, da se kot armatura v betonu uporablja izključno rebrasta armatura. V tem primeru je ustrezen stik med armaturo in okoliškim betonom zagotovljen preko treh mehanizmov, in sicer z adhezijo, trenjem med armaturno palico in okoliškim betonom ter zaklinjanjem reber armaturne palice v okoliški beton ([Bilek, 2017], [Saje, 2021], [Yoo, 2018]). Adhezija, ki nastane v zgodnji fazi hidratacije betona s sprijemanjem hidratizirajočih se cementnih delcev na površino jeklene armature predstavlja prevladujoč mehanizem v prvi fazi, tj. pri nizkih obremenitvah armiranobetonskega elementa. Pri višjih obremenitvah mehanizem adhezije odpove, stik med betonom in vgrajeno armaturo pa od tod dalje zagotavlja predvsem mehanizem trenja in zaklinjanja [Saje, 2021]. Naaman [Naaman, 2003] je ugotovil, da predvsem zaklinjanje reber armaturnih palic v okoliški beton predstavlja prevladujoč mehanizem pri zagotavljanju sprijemne trdnosti med vgrajeno armaturno palico in okoliškim betonom v primeru večjih obremenitev.

Zaradi pomembnosti kvalitetnega stika med okoliškim betonom in vgrajeno armaturo z vidika nosilnosti, stabilnosti in trajnosti armiranobetonskih konstrukcij številni raziskovalci pogosto preučujejo vpliv različnih parametrov betona in armature na velikost izvlečne (angl. »pull out«) sile F_{izvl} oziroma sprijemne napetosti τ med vgrajeno armaturo in okoliškim betonom. Sprijemno napetost τ med okoliškim betonom in armaturno palico določimo po enačbi (1), kjer je ϕ nazivni premer armaturne palice, l_e pa sidrna dolžina, tj. dolžina, na kateri je armaturna palica v neposrednem stiku z okoliškim betonom. Sprijemna napetost τ_{max} označuje največjo sprijemno napetost, ki se pojavi pri izvlečni sili F_{max} skladno z enačbo (2).

$$\tau = \frac{F_{izvl}}{\pi \phi l_e} \quad (1)$$

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{\pi \phi l_e} \quad (2)$$

Saje in Lopatič [Saje, 2021] sta analizirala vpliv običajne rebraste jeklene armature in različne bazaltne armature na sprijemno trdnost τ_{max} med vgrajeno armaturo ter betonom običajne in visoke trdnosti. Ugotovila sta, da ima tako pri preizkušancih z jekleno kakor tudi pri preizkušancih z bazaltno armaturo premera 12 mm tlačna trdnost betona pomemben vpliv na sprijemno trdnost med betonom in armaturo. V obeh primerih so bile vrednosti τ_{max} v primeru uporabe betona visoke trdnosti za približno 70–80% višje kot v primeru betona običajne trdnosti. Preizkušanci z vgrajeno bazaltno armaturo so sicer dosegali za

približno 30% nižje vrednosti τ_{max} v primerjavi s preizkušanci z rebrastimi jeklenimi armaturnimi palicami. Gangolu s sodelavci [Gangolu, 2007] je analiziral vpliv različne vrste reber na sprijemno trdnost τ_{max} v primeru betonov visoke trdnosti in ugotovil, da je bila vrednost τ_{max} v primeru gladkih armaturnih palic (brez reber) za približno 40–50% nižja od vrednosti τ_{max} v primeru armaturnih palic s spiralno orientiranimi rebri. Prav tako je bila vrednost τ_{max} v primeru spiralno orientiranih reber višja kot vrednost τ_{max} v primeru reber, ki so bila orientirana horizontalno oziroma pravokotno na os armaturne palice. Vpliv premera armaturnih palic na velikost τ_{max} je bil majhen, z večanjem sidrne dolžine le pa se je vrednost τ_{max} zmanjševala. Do podobnih ugotovitev je prišel Bashir s sodelavci [Bashir, 2019], ki je analiziral vpliv premera ϕ in sidrne dolžine l_e armaturnih palic z različnimi oblikami reber na vrednost τ_{max} . Ugotovil je, da se je velikost izvlečne sile F_{max} z večanjem premera in sidrne dolžine sicer povečevala, medtem ko se je velikost τ_{max} z večanjem premera in sidrne dolžine v splošnem zmanjševala ne glede na vrsto in orientacijo reber.

Kljub številnim študijam in rezultatom, prikazanim v literaturi, je vpliv posameznih parametrov vgrajenih armaturnih palic in okoliškega betona na stik med vgrajenimi armaturnimi palicami in okoliškim betonom še vedno dokaj neraziskan oziroma so si rezultati različnih študij med seboj nasprotujoči. To je deloma posledica dejstva, da obstoječi rezultati ne zajemajo dovolj velikega števila posameznih preskušancev za korektno oziroma naprednejšo statistično analizo dobljenih rezultatov. V tem prispevku z napredno statistično tehniko analize variance (AnoVa) analiziramo rezultate obsežnega eksperimentalnega dela, s ciljem ugotoviti vpliv različnih parametrov armature in okoliškega betona na sprijemnost med vgrajeno armaturo in okoliškim betonom. Tako analiziramo vpliv premera vgrajenih armaturnih palic, starosti (in s tem tlačne trdnosti) betona ter vsebnosti jeklenih vlaken v strukturi betona na stik med vgrajeno armaturo in okoliškim betonom. Dodatno v vseh primerih analiziramo tudi vpliv predhodnega bentonitnega premaza na armaturnih palicah na stik med vgrajeno armaturo in okoliškim betonom. Eksperimentalno delo je potekalo v laboratorijih za beton inštitutov Igmat, d. d., in Irma, d. o. o.

2 MATERIALI IN METODE

2.1 Uporabljeni materiali

2.1.1 Beton

Za izdelavo vzorcev smo uporabili kontraktorski beton, pri katerem sta vezivno komponento predstavljala dva cementa, in sicer CEM I 42,5 N SRO (20% skupnega deleža cementa) ter CEM III/B 32,5 N – LH/SR (80%) v skupni količini 470 kg/m³. Dodana je bila mikrosilika v suspenziji v količini 3,2% skupne mase cementa in sveži betonski mešanici. Efektivno vodo/vezivno razmerje $(v/v)_{ef}$ smo določili po naslednji enačbi:

$$(v/v)_{ef} = (\text{dodana voda} + \text{voda v suspenziji} + \text{voda v kemijskih dodatkih}) / (\text{skupna količina cementa} + \text{suhi delež mikrosilike v suspenziji}) \quad (3)$$

Za agregat smo uporabili drobljeni apnenčev agregat iz separacije Calcit Kamnik nazivnih frakcij 0/2 (30% celotne vsebnosti agregata v betonu), 0/4 (29%), 4/8 (16,5%), 8/16 in 16/32 mm (skupaj 24,5%) ter kameno moko v količini 15% mase cementa. Betonu smo dodali tri kemijske dodatke, in sicer hiperpla-

stifikator, zavlačevalec vezanja in stabilizator. Delež posameznih dodatkov smo določili eksperimentalno na način, da je konsistenca sveže betonske mešanice, določena z metodo razleza, s posedom znašala 550 ± 100 mm, vsebnost zraka v sveži betonski mešanici pa $< 3,0\%$. V primeru mikroarmiranega betona smo uporabili kratka jeklena vlakna s sidri, ki nimajo pomembnega vpliva na obdelovalnost svežega betona. Dolžina vlaken je znašala 16 mm, njihov premer pa 0,5 mm. Uporabljena vlakna so prikazana na sliki 1d v nadaljevanju.

Svežemu betonu smo pred vgradnjo v kalupne preizkušance določili nekatere osnovne lastnosti skladno z veljavnimi standardi. Rezultati izmerjenih lastnosti svežega betona so prikazani v preglednici 1, pri čemer so bile vse lastnosti določene pri standardnih laboratorijskih pogojih. Rezultati, prikazani v preglednici 1, predstavljajo povprečne rezultate treh preizkušancev.

Pri starosti betona 28 oziroma 90 dni smo pri običajnih laboratorijskih pogojih skladno z veljavnimi standardi določili nekatere osnovne lastnosti strjenega betona, rezultate teh preiskav pa prikazujemo v preglednici 2. V vseh primerih so prikazani povprečni rezultati treh preizkušancev. Tlačna trdnost betona je bila določena na preizkušancih v obliki kocke s stranico 15 cm.

Lastnost	Oznaka	Rezultat	Standard
Temperatura betona	T_b	25,5°C	SIST EN 12350-1:2019 [SIST, 2019a]
Razlez s posedom		600/620 mm	SIST EN 12350-8:2019 [SIST, 2019d]
Tečenje	H2; $t_{končni}$	61 mm; 1,16 sek	SIST EN 12350-10:2010 [SIST, 2010]
Vsebnost zraka	Ac	1,4 % v/v	SIST EN 12350-7:2019 [SIST, 2019c]
Prostorninska masa	r	2368 kg/m ³	SIST EN 12350-6:2019 [SIST, 2019b]
vodo/vezivno razmerje	$(v/v)_{eff}$	0,417	SIST 1026:2016, NC [SIST, 2016]

Preglednica 1. Rezultati preiskav svežega betona.

Lastnost	Oznaka	Rezultat 28 dni	Rezultat 90 dni	Standard
tlačna trdnost	f_{cm}	68,4 MPa	79,3 MPa	SIST EN 12390-3:2019 [SIST, 2019f]
statični modul elastičnosti	E	42,6 Gpa	42,5 GPa	DIN 1048 [DIN, 1991]
odpornost proti prodoru vode	e	9,7 mm	8,0 mm	SIST EN 12390-8:2019 [SIST, 2019g]

Preglednica 2. Rezultati preiskav strjenega betona pri starosti 28 in 90 dni.

2.1.2 Armatura

Uporabljena je bila jeklena armatura v obliki rebrastih armaturnih palic dveh različnih premerov, in sicer $\emptyset 12$ mm in $\emptyset 22$ mm. Osnovne lastnosti uporabljenih armaturnih palic, določene s standardnim nateznim preskusom skladno s SIST EN 6892-1:2020 [SIST, 2020], ter delež reber, določen skladno s standardom SIST EN ISO 15630-1:2019 [SIST, 2019h], so prikazani v preglednici 3. Pri tem $R_{p0,2}$, R_m , $R_m/R_{p0,2}$, d_{fmax} in A_{gt} označujejo napetost na meji tečenja, natezno trdnost, razmerje med natezno trdnostjo in napetostjo na meji tečenja ter raztezek pri največji doseženi natezni sili F_{max} . Delež reber označuje oznaka f_R in predstavlja delež reber glede na prečni prerez armaturne palice.

Φ (mm)	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A_{gt} (%)	f_R
12	596,5	716,1	9,04	0,067
22	566,0	699,5	10,12	0,088

Preglednica 3. Osnovne lastnosti uporabljenih armaturnih palic.

2.1.3 Bentonitni premaz

Bentonitni premaz se uporablja pri izdelavi diafragem. Pri tem se izkopani segment najprej zapolni z bentonitno izplako, nato pa se vgrajuje beton po kontraktorski metodi. Kontraktorski beton izpodriva bentonitno izplako, pri čemer mora biti zagotovljen ustrezen stik med betonom in vgrajeno armaturo. Za pripravo bentonitnega premaza smo uporabljali bentonit, sestavljen iz visokokonzentrirane bentonitne gline, natrija in dodatka suhega polimera. V 1 m³ vode smo dodali 60 kg bentonita.

2.2 Priprava preizkušancev

Pred izvedbo preizkusa smo skladno z dodatkom D standarda SIST EN 10080:2005 [SIST, 2005] pripravili testne preizkušance v obliki betonske kocke s stranico 20 cm z vgrajeno armaturno palico v središčni osi betonskega preizkušanca, za kar smo uporabili posebne kalupe z izvedeno odprtino za vgradnjo jeklene armaturne palice (slika 1a). Omenjeni standard predpisuje velikost stranice kocke betonskega preizkušanca najmanj 20 cm oziroma najmanj 10x premer palice, kar v primeru armaturnih palic premera 22 mm pomeni najmanjšo velikost stranice betonskega preizkušanca 22 cm. Na podlagi dejstva, da v nobenem primeru med izvedbo preizkusa ni prišlo do nobenih poškodb betonskega preizkušanca, ocenjujemo, da nekoliko manjša dimenzija betonskega preizkušanca v primeru palic premera 22 mm ni vplivala na rezultate preizkusa. Dolžina armaturne palice je znašala približno 1,0 m, pri čemer je bil na spodnji strani betonskega preizkušanca prosti del armaturne palice dolžine 50 mm, na zgornji strani pa dolžine 750 mm. Skladno s standardom je bil stik med betonom in armaturno palico zagotovljen le na dolžini 5Φ (slika 1b), torej na dolžini, ki v primeru palic premera $\emptyset=12$ mm pomeni sidrno dolžino $l_e=60$ mm, v primeru palic premera $\emptyset=22$ mm pa sidrno dolžino $l_e=110$ mm. Na preostali dolžini (tj. 140 mm v primeru palic premera $\emptyset=12$ mm oziroma 90 mm v primeru palic premera



Slika 1. Prikaz izdelave preizkušancev za izvedbo preiskave izvlečne sile F_{izvl} in fotografija uporabljenih vlaken v mikroarmiranih betonskih mešanich.

($\phi=22$ mm) je bil stik med betonom in armaturo v celoti preprečen z namestitvijo plastične cevke (slika 1b) na ustrezen del armaturne palice. Po ustreznih namestitvi jeklene armaturne palice v posamezne kalupe smo le-te zapolnili z betonom (slika 1c). Vgradnjo kontraktorskega betona, kakršnega smo uporabili pri predmetnih preiskavah je potrebno izvesti brez vibriranja, kar smo upoštevali pri vgradnji betona v preizkušance. Ustrezno vgradnjo brez segregacije in naknadnega izločanja vode ter ustrezno zgoščenost betona smo dosegli s predhodno opisanim ustreznim projektiranjem sveže betonske mešanice in posledičnim doseganjem lastnosti betona v svežem stanju. Po izdelavi smo preizkušance pred razkalupljanjem 24 ur negovali v laboratorijskih pogojih pri relativni vlagi RH $60\pm 5\%$ ter temperaturi okolice $20\pm 2^\circ\text{C}$. Po razkalupljanju smo preizkušance do preiskave (tj. 28 dni oziroma 90 dni) negovali skladno s standardom SIST EN 12390-2:2019 [SIST, 2019e].

2.3 Uporabljene metode

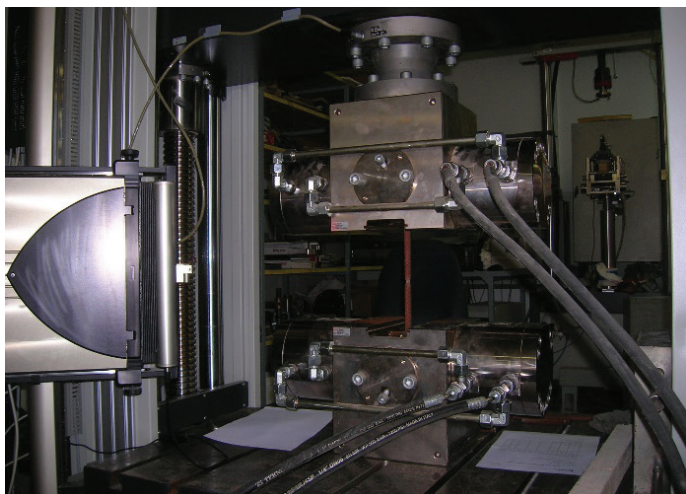
2.3.1 Določitev osnovnih lastnosti armaturnih palic

Osnovne lastnosti uporabljenih armaturnih palic, prikazane v preglednici 3, so bile določene s standardnim nateznim

preskusom po SIST EN 6892-1:2020 [SIST, 2020]. Za izvedbo preskusa smo uporabili univerzalni preskuševalni stroj Zwick Z400 s posebnimi čeljustmi, ki omogočajo ustrezen oprijem armaturnih palic v smislu popolne preprečitve morebitnega zdrsa armaturne palice na mestu vpenjanja med izvajanjem preiskave. Vzorec armaturne palice smo obremenjevali do porušitve skladno z metodo A224 standarda SIST EN 6892-1:2020 [SIST, 2020], ki določa obremenjevanje s kontroliranim pomikom oziroma kontrolirano deformacijo vzorca. Izvajanje nateznega preskusa armaturne palice skladno s standardom SIST EN 6892-1:2020 [SIST, 2020] prikazuje slika 2. Za merjenje deformacij med izvajanjem preskusa smo uporabili napredne optične senzorje proizvajalca Zwick, model laserXtens Array HP z resolucijo $0,11\ \mu\text{m}$. Rezultati nateznega preskusa kažejo, da uporabljene armaturne palice ustrezajo armaturnemu jeklu kvalitete B500B.

2.3.2 Določitev deleža reber na armaturnih palicah

Količino oziroma delež reber glede na obseg palice f_r smo določali s posebnim merilnim sistemom RIB3D turškega proizvajalca PSARON HTI s pripadajočo programsko opremo, pri



Slika 2. Izvajanje nateznega preskusa armaturne palice skladno s standardom SIST EN 6892-1:2020 [SIST, 2020].

čemer so bile te meritve opravljene na Zavodu za gradbeništvo ZAG v Ljubljani. Rezultati kažejo, da je količina reber ustrezna glede na zahteve relevantnega standarda.



Slika 3. Določanje deleža reber na armaturnih palicah.

Optični merilni sistem omogoča zajem 3D-slike armaturne palice s premerom do 50 mm z avtomatsko izmero njenih osnovnih lastnosti (nominalni premer, orientacija, razporeditev in višina reber, površina reber) ter natančno merjenje korozijskih poškodb po izpostavi v agresivnih okoljih. Z natančnimi izmerami globin lokalnih korozijskih poškodb, obsegom poškodovane površine, njeno topografijo, zmanjšanjem preseka palice in volumnom korodiranega materiala oprema omogoča zanesljivo analizo korozijskih poškodb in izračun lokalnih in generalnih korozijskih hitrosti. Izvajanje preiskave količine reber na rebrasti armaturni palici prikazuje slika 3.

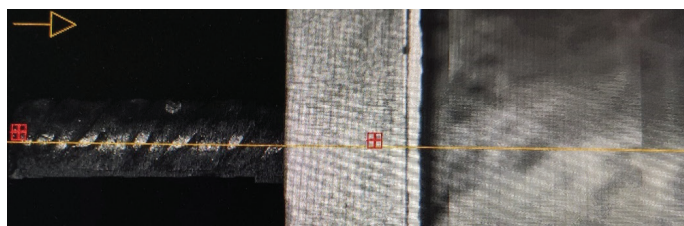
2.3.3 Določanje izvlečne sile med betonom in vgrajeno armaturo

Izvlačni preizkus je bil izveden skladno z dodatkom D-standarda SIST EN 10080:2005 [SIST, 2005]. Za izvedo preiskave smo vzorec namestili v ustrezen adapter tako, da smo obre-

menitev nanašali na zgornjem, daljšem koncu palice v smeri navzgor (slika 4). Temu primerno smo z ustreznim podpor-nim sistemom popolnoma preprečili morebitni premik betonskega vzorca navzgor med izvajanjem preskusa. Pomike oziroma zdrs med armaturno palico in betonom smo merili s posebnim optičnim laserskim sistemom, kar predstavlja pomembno izboljšavo glede na standard SIST EN 10080:2005 [SIST, 2005], ki navaja spremljanje pomikov z mehansko merilno urico. Medsebojni zdrs med betonom in armaturno palico smo spremljali tako, da smo merili spremembo razdalje med dvema referenčnima točkama (slika 5). Pomična referenčna točka ja bila določena na armaturni palici (leva točka na sliki 5), fiksna referenčna točka pa na posebni kovinski ploščici dimenzije 50/50 mm, ki je bila fiksno pritrjena na spodnjo stranico betonske kocke (desna točka na sliki 5). S tem so bili doseženi boljša resolucija in posledično natančnejše meritve pomikov armaturne palice med izvedbo preiskave.



Slika 4. Prikaz preizkuševalne opreme in izvedbe preizkusa izvlečne sile F_{izvl}



Slika 5. Prikaz referenčnih točk za merjenje zdrsa med betonskim preizkušancem in armaturno palico med izvedbo preizkusa.

2.3.4 Analiza variance in preskušanje hipotez

Poleg osnovnih statistik smo za analizo vpliva posameznih parametrov na velikost F_{\max} oziroma τ_{\max} ter ovrednotenje rezultatov izvedenih preiskav uporabili naprednejšo statistično tehniko analize variance (AnoVa). Detajlnejši opis teoretičnega ozadja metode AnoVa je dostopen v številnih publikacijah, npr. [Turk, 2011]. Izračunali smo statistiko F in kritično vrednost statistike F (oznaka F_{crit}) ter postavili naslednjo ničelno (H_0) in alternativno (H_1) hipotezo:

H_0 - Vpliv analiziranega parametra (tj. starost betona, premer armaturne palice, vsebnost vlaken v betonu ter predhodni bentonitni premaz) na vrednost F_{\max} (oziroma τ_{\max}) je statistično značilen.

H_1 - Vpliv analiziranega parametra (tj. starost betona, premer armaturne palice, vsebnost vlaken v betonu ter predhodni bentonitni premaz) na vrednost F_{\max} (oziroma τ_{\max}) ni statistično značilen.

V primeru $F \geq F_{\text{crit}}$ ničelno hipotezo sprejmemo in trdimo, da je vpliv analiziranega parametra na vrednost F_{\max} (oziroma τ_{\max}) statistično značilen, v primeru $F < F_{\text{crit}}$ pa ničelno hipotezo zavrnejo in ugotovimo, da vpliv parametra na vrednost F_{\max} (oziroma τ_{\max}) ni statistično značilen. Za stopnjo zaupanja smo izbrali faktor $\alpha=0,05$, ki se običajno uporablja pri podobnih študijah.

3 REZULTATI PREISKAV

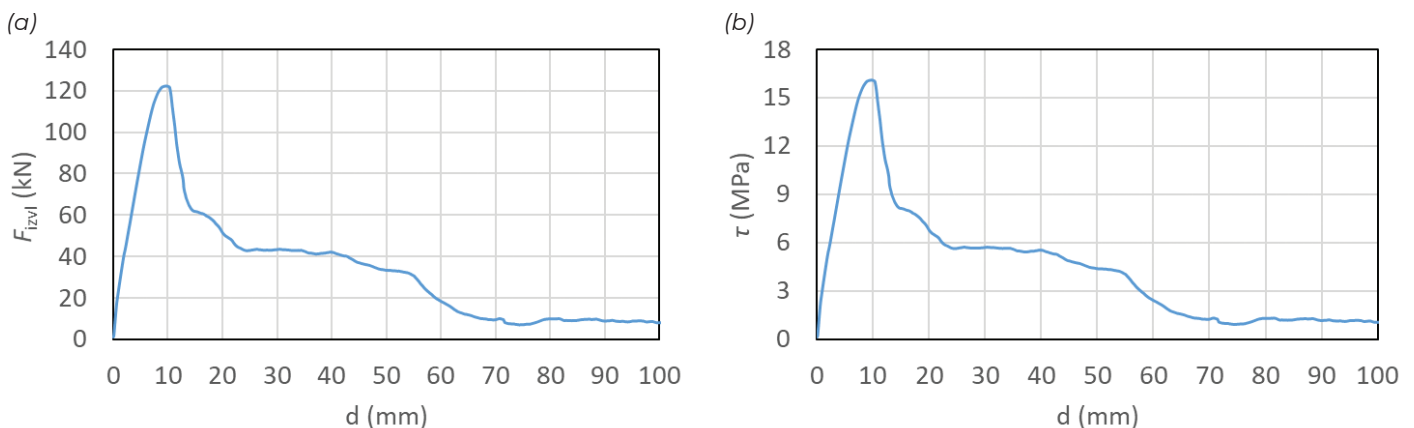
3.1 Splošen potek diagrama $d - F_{\text{izvl}}$ in $d - \tau$

Slika 6 prikazuje splošen potek diagrama naraščanja izvlečne sile F_{izvl} oziroma sprijemne napetosti τ v odvisnosti od pomika oziroma zdrsa med vgrajeno armaturno palico in okoliškim betonom d . Največja izvlečna sila F_{\max} in največja sprijemna napetost τ_{\max} predstavljata najvišjo točko na diagramih, prikazanih na sliki 6. S slike 6 vidimo, da diagrama $d - F_{\max}$ oziroma $d - \tau_{\max}$ lahko razdelimo na štiri karakteristične faze. Prva faza predstavlja naraščanje izvlečne sile F_{izvl} (oziroma sprijemne

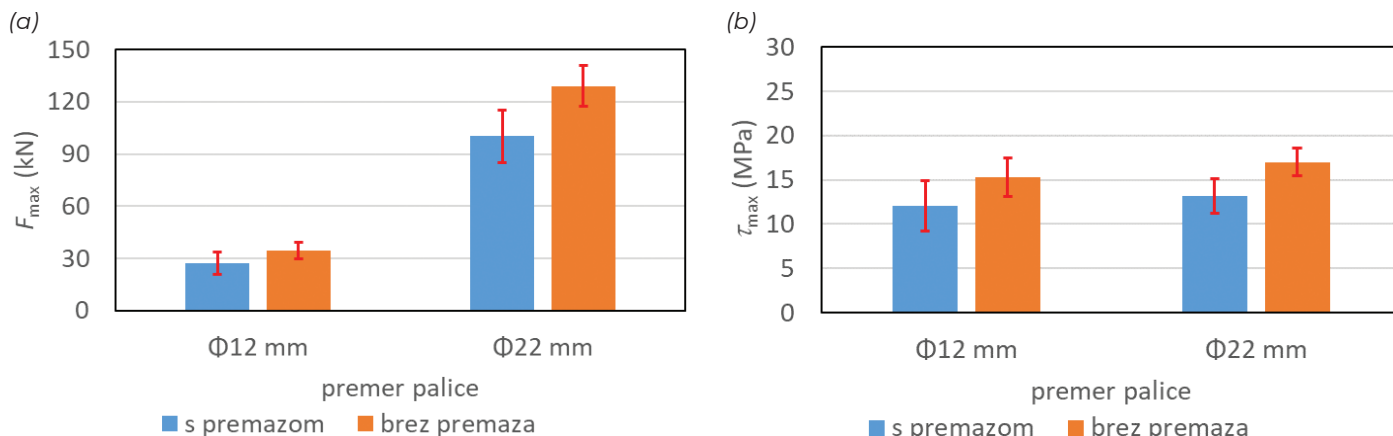
napetosti τ), pri čemer je stik med betonom in armaturno palico še v celoti zagotovljen (tj., znaša vrednost medsebojnega zdrsa $d = 0$). Sledi druga faza, v kateri pomik d narašča linearno z izvlečno silo F_{izvl} do dosežene največje izvlečne sile F_{\max} oziroma sprijemne napetosti τ_{\max} . Za tretjo fazo je značilen praktično linearen padec vrednosti F_{izvl} (oziroma vrednosti τ) z nadaljnjim naraščanjem vrednosti d , v zadnji (4.) fazi pa se vrednost d izrazito povečuje ob manjši intenzivnosti padanja vrednosti F_{izvl} (oziroma vrednosti τ). Ocenjujemo, da je v fazi 1 stik med vgrajeno armaturo in okoliškim betonom v glavnem posledica adhezije, v fazah 2 in 3 trenja med armaturno palico in okoliškim betonom ter zaklinjanjem reber palice v okoliški beton, v fazi 4 pa po večini le še z zaklinjanjem reber palice v okoliški beton.

3.2 Vpliv premera armature na vrednosti F_{\max} in τ_{\max}

Slika 7 prikazuje vpliv premera armature na vrednosti F_{\max} (slika 7a) in τ_{\max} (slika 7b). Prikazane so povprečne vrednosti štirih (v primeru brez predhodnega premaza) oziroma petih (v primeru s predhodnim premazom) rezultatov ter standardni odkloni rezultatov od povprečnih vrednosti. Pričakovano je povečanje premera armaturne palice rezultiralo v občutno večji izvlečni sili F_{\max} tako v primeru, ko palice niso bile predhodno premazane z bentonitnim premazom, kot tudi v primeru prehodnega premaza palic z bentonitnim premazom. V primeru brez predhodnega premaza se je s povečanjem premera armaturnih palic z 12 mm na 22 mm izvlečna sila F_{\max} povečala povprečno za 273%, v primeru predhodnega bentonitnega premaza pa v povprečju za 268%. Nasprotno je v primeru sprijemne napetosti τ_{\max} povečanje le-te s povečanjem premera praktično zanemarljivo in znaša brez predhodnega premaza armaturnih palic v povprečju 11%, s predhodnim premazom armaturnih palic pa v povprečju 9%. Opazno je, da je pri obeh premerih armaturnih palic predhodni bentonitni premaz rezultiral v nekoliko nižjih vrednostih F_{\max} in τ_{\max} . Pri palicah premera 12 mm sta v primeru predhodnega bentonitnega premaza izvlečna sila F_{\max} in sprijemna napetost τ_{\max} v povprečju nižji za 21%, pri palicah premera 22 mm pa za 22%.



Slika 6. Splošen potek diagrama spreminjanja: a) izvlečne sile F_{izvl} oziroma b) sprijemne napetosti τ v odvisnosti od pomika oziroma zdrsa med vgrajeno armaturno palico in okoliškim betonom d .

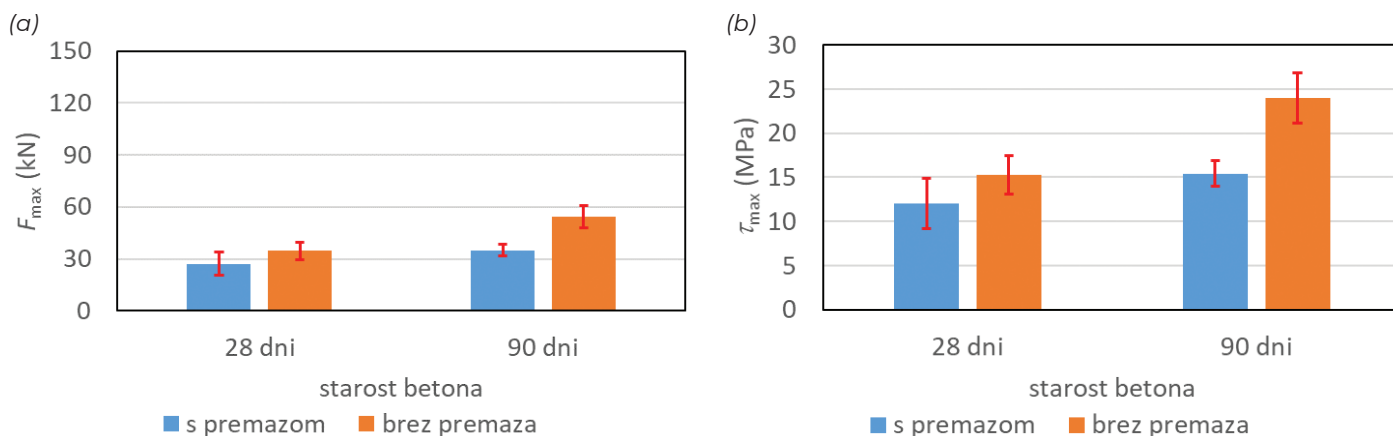


Slika 7. Vpliv premera armature na vrednosti: a) F_{\max} in b) τ_{\max} .

3.3 Vpliv starosti betona na vrednosti F_{\max} in τ_{\max}

Slika 8 prikazuje vpliv starosti in s tem tlačne trdnosti betona na vrednosti F_{\max} (slika 8a) in τ_{\max} (slika 8b). Premer armaturnih palic je v tem primeru znašal 12 mm. Prikazane so povprečne vrednosti štirih (v primeru brez predhodnega premaza) oziroma petih (v primeru s predhodnim premazom) rezultatov ter standardni odkloni rezultatov od povprečnih vrednosti.

Iz preglednice 2 je razvidno, da je povprečna vrednost tlačne trdnosti betona pri starosti 28 dni znašala 68,4 MPa, pri starosti 90 dni pa 79,3 MPa. Slika 8 kaže, da so se s povečanjem starosti betona iz 28 na 90 dni povečale vrednosti F_{\max} in τ_{\max} tako v primeru predhodnega premaza kot v primeru brez predhodnega premaza. V primeru predhodnega premaza je povečanje vrednosti F_{\max} oziroma τ_{\max} s povečanjem starosti betona v povprečju znašalo 28%, v primeru brez predhodnega premaza pa 57%. Pri obeh starostih betona je predhodni bentonitni premaz armaturnih palic rezultiral v nekoliko nižjih vrednostih F_{\max} in τ_{\max} . Pri starosti betona 28 dni sta v primeru predhodnega bentonitnega premaza izvlečna sila F_{\max} in sprjemna napetost τ_{\max} v povprečju nižji za 27%, pri starosti betona 90 dni pa za 56%.

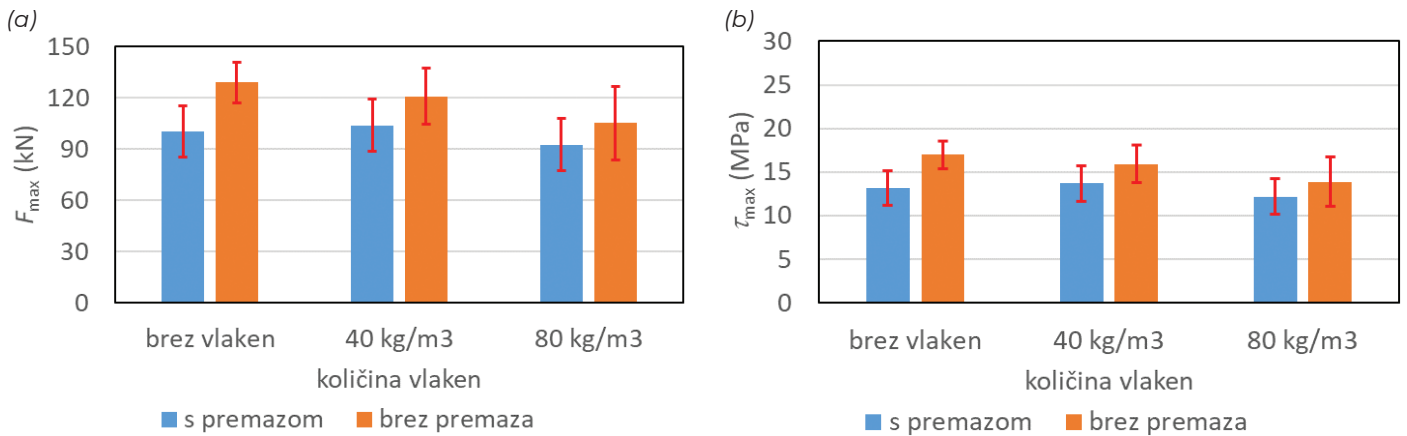


Slika 8. Vpliv starosti betona na vrednosti: a) F_{\max} in b) τ_{\max} .

3.4 Vpliv vsebnosti vlaken v betonu na vrednosti F_{\max} in τ_{\max}

Slika 9 prikazuje vpliv količine jeklenih vlaken v betonu na vrednosti F_{\max} (slika 9a) in τ_{\max} (slika 9b). Premer armaturnih palic je v tem primeru znašal 22 mm. Prikazane so povprečne vrednosti štirih (v primeru brez predhodnega premaza) oziroma petih (v primeru s predhodnim premazom) rezultatov ter standardni odkloni rezultatov od povprečnih vrednosti. Razvidno je, da je s povečanjem količine vlaken v splošnem opaziti malenkostno zmanjšanje izvlečne sile F_{\max} in sprjemne napetosti τ_{\max} . Z dodatkom 40 kg/m³ vlaken sta se izvlečna sila F_{\max} in sprjemna napetost τ_{\max} v primeru predhodnega premaza armaturnih palic sicer povečali za približno 4% glede na preskušance brez vlaken, v primeru brez predhodnega premaza pa je opazno zmanjšanje vrednosti F_{\max} in τ_{\max} za približno 6%.

Z nadaljnjim povečanjem vlaken s 40 kg/m³ na 80 kg/m³ je v primeru predhodnega premaza armaturnih palic prišlo do zmanjšanja vrednosti F_{\max} in τ_{\max} za približno 11%, v primeru brez predhodnega premaza pa za približno 13%. V vseh primerih je opaziti, da je predhodni premaz armaturnih palic s premazom rezultiral v zmanjšanju vrednosti F_{\max} in τ_{\max} . V primeru, ko v betonu ni bilo prisotnih vlaken, je to zmanjšanje znašalo v povprečju 29%, v primeru mikroarmiranega betona pa za približno 15%.



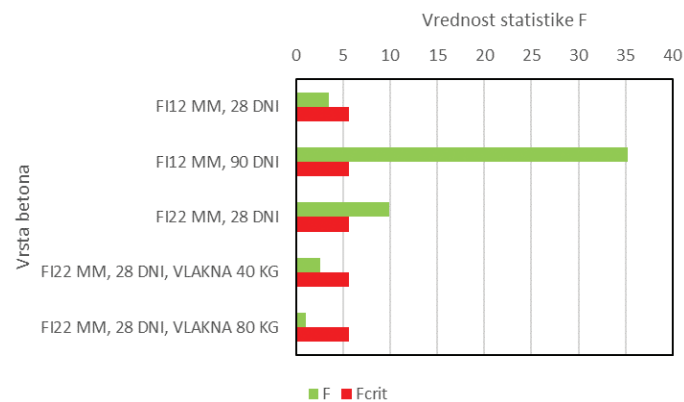
Slika 9. Vpliv vsebnosti vlaken v betonu na vrednosti: a) F_{max} in b) τ_{max} .

3.5 Statistična analiza vpliva posameznih parametrov na vrednosti F_{max} oziroma τ_{max}

F_{max} oziroma τ_{max}

V nadaljevanju prikazujemo rezultate statistične analize vpliva predhodnega premaza armaturnih palic na vrednosti F_{max} oziroma τ_{max} , dobljene z metodo analize variance (Anova). V primeru, ko je vrednost F_{crit} večja od vrednosti statistike F , velja, da je vpliv predhodnega premaza na dosežene vrednosti F_{max} oziroma τ_{max} statistično značilen.

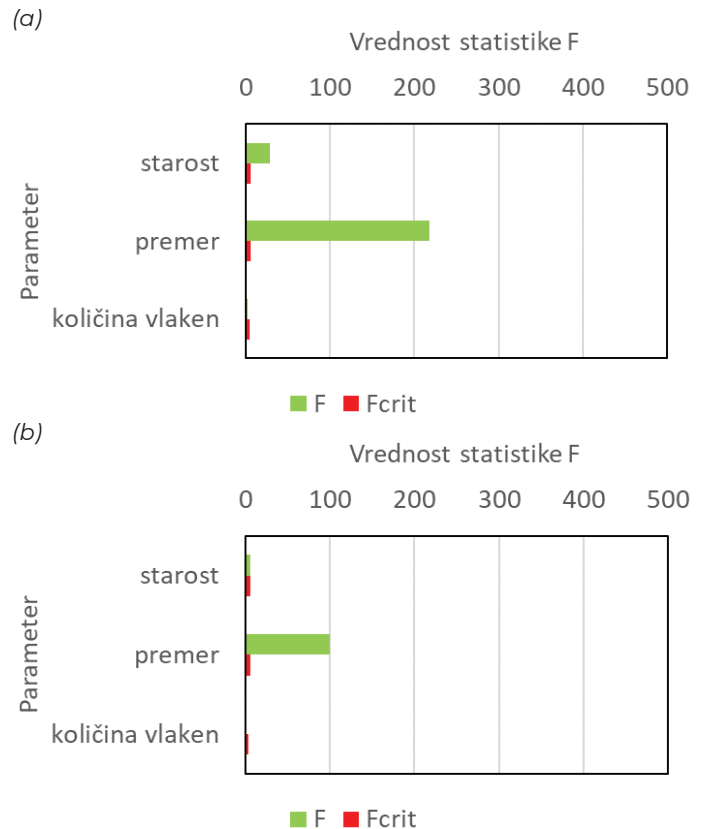
S slike 10 vidimo, da je predhodni premaz armaturnih palic statistično značilno vplival na zmanjšanje vrednosti F_{max} oziroma τ_{max} le v primeru 90 dni starih vzorcev, v katerih je bila nameščena armaturna palica premera 12 mm, ter v primeru 28 dni starih vzorcev z armaturno palico premera 22 mm. V ostalih primerih predhodni premaz armaturnih palic ni povzročil statistično značilnega znižanja vrednosti F_{max} oziroma τ_{max} .



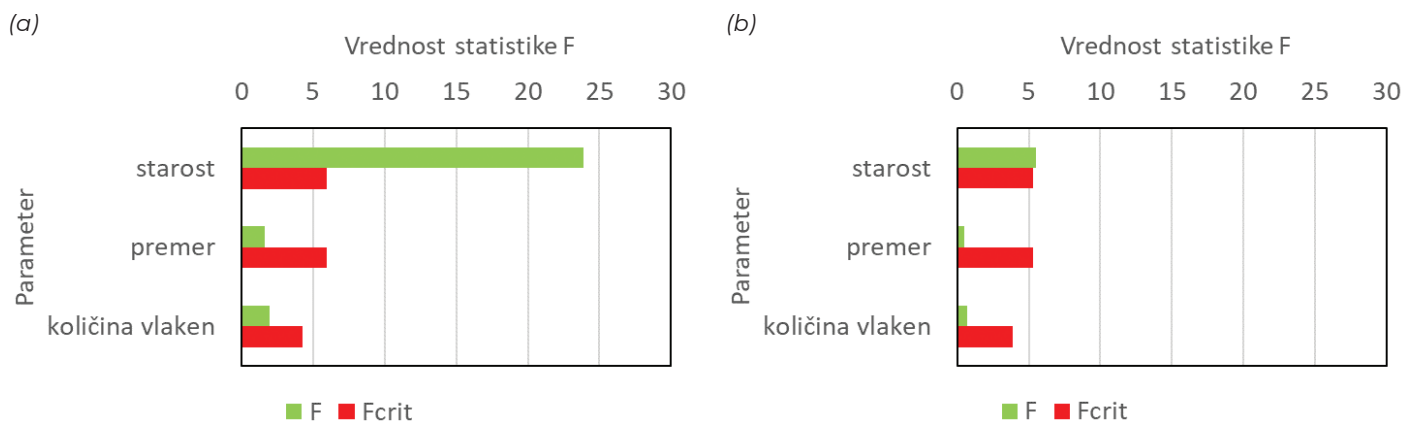
Slika 10. Statistična značilnost vpliva premaza na dosežene vrednosti F_{max} oziroma τ_{max} .

S slike 11 vidimo, da je tako v primeru brez predhodnega premaza armaturnih palic (slika 11a) kot v primeru, ko so bile armaturne palice predhodno premazane z bentonitnim premazom (slika 11b), povečanje starosti betona iz 28 na 90 dni ter povečanje premera armaturnih palic iz 12 mm na 22 mm statistič-

no značilno vplivalo na povečanje vrednosti izvlečne sile F_{max} . Povečanje starosti betona z 28 na 90 dni je v obeh primerih (torej brez predhodnega premaza in s predhodnim premazom armaturnih palic) statistično značilno vplivalo na povečanje vrednosti sprijemne napetosti τ_{max} , za razliko od vpliva na vrednost F_{max} pa vpliv premera armaturnih palic na vrednosti τ_{max} ni statistično značilen ne glede na predhodni premaz armaturnih palic (slika 12). Dodajanje vlaken v beton v nobenem primeru ni statistično značilno vplivalo ne na vrednosti izvlečne sile F_{max} (slika 11) ne na vrednosti sprijemne napetosti τ_{max} (slika 12).



Slika 11. Statistična značilnost vpliva posameznih parametrov na dosežene vrednosti F_{max} : a) brez premaza; b) s premazom.



Slika 12. Statistična značilnost vpliva posameznih parametrov na dosežene vrednosti τ_{\max} : a) brez premaza; b) s premazom.

4 DISKUSIJA

Iz rezultatov preiskav, prikazanih v predhodnih poglavjih, je razvidno, da se vrednosti sprijemnih napetosti med vgrajeno rebrasto armaturo in okoliškim betonom v povprečju gibljejo v območju med 10–17 MPa, kar je primerljivo z rezultati sprijemnih napetosti, prikazanimi v literaturi ([Bashir, 2019], [Saje, 2021]).

Uporabljen predhodni premaz armaturnih palic je v vseh analiziranih primerih vplival na zmanjšanje izvlečne sile F_{\max} oziroma sprijemne napetosti τ_{\max} , pri čemer je to zmanjšanje v povprečju znašalo med 15–56%. Kljub navedenemu dejstvu je bilo statistično značilno zmanjšanje vrednosti F_{\max} oziroma τ_{\max} ob predhodnem premazu armaturnih palic ugotovljeno le v primeru 90 dni starih vzorcev z armaturno palico premera 12 mm ter v primeru 28 dni starih vzorcev z armaturno palico premera 22 mm. V ostalih primerih vpliv predhodnega premaza armaturnih palic ni statistično značilno vplival na vrednosti izvlečne sile F_{\max} oziroma sprijemne napetosti τ_{\max} , kar je posledica relativno velikega raztrosa (variance) med posameznimi rezultati znotraj posameznega sklopa preiskav. To dejstvo kaže, da bentonitna izplaka v splošnem ne vpliva pomembneje na sprijemnost med v beton vgrajeno armaturo in okoliškim betonom.

Medtem ko je povečanje premera armaturnih palic z 12 mm na 22 mm tako v primeru predhodnega bentonitnega premaza kot v primeru brez predhodnega premaza (pričakovano) visoko statistično značilno vplivalo na povečanje izvlečne sile F_{\max} (slika 10), pa vpliv omenjene spremembe na doseženo sprijemno napetost τ_{\max} ni statistično značilen (slika 11). Te ugotovitve sovpadajo z ugotovitvami, ki jih je predstavil Gangolu s sodelavci [Gangolu, 2007], medtem ko sta Bashir s sodelavci [Bashir, 2019] in Eligehausen ter Tayeh s sodelavci ([Eligehausen, 1988], [Tayeh, 2019]) ugotovila malenkostno zmanjšanje sprijemne napetosti τ_{\max} s povečanjem premera armaturnih palic. Količina vlaken v betonu v nobenem primeru ni imela statistično značilnega vpliva na vrednost izvlečne sile F_{\max} (slika 10) oziroma sprijemne napetosti τ_{\max} (slika 11). To kaže na dejstvo, da prisotnost vlaken v betonu ne vpliva na sprijemnost med betonom in armaturo. Rezultat je pričakovan, saj vsebnost vla-

ken v betonu ne vpliva bistveno na lastnosti oziroma kvaliteto stičnega območja med armaturno palico in cementnim vezivom, ki pri kvaliteti stika med armaturno palico in okoliškim betonom igra ključno vlogo. Nasprotno se seveda s starostjo betona njegove mehanske lastnosti in s tem stično območje med betonom in armaturo ter posledično jakost stika med armaturno palico in cementnim vezivom povečujejo. To se odraža v statistično značilnem povečanju vrednosti tako izvlečne sile F_{\max} kot tudi sprijemne napetosti τ_{\max} s povečanjem starosti betona z 28 na 90 dni.

5 ZAKLJUČKI

V predmetnem prispevku analiziramo vpliv različnih parametrov betona in vgrajene rebraste armature na velikost izvlečne sile F_{\max} oziroma sprijemne napetosti τ_{\max} med vgrajeno armaturo in okoliškim betonom. Preiskavo izvedla armaturne palice iz betona smo izvedli skladno z dodatkom D-standarda SIST EN 10080:2005 [SIST, 2005], pri čemer je najpomembnejšo modifikacijo glede na standard predstavljala uporaba naprednega optičnega merilca deformacij oziroma pomikov med izvedbo preiskave. Na podlagi prikazanih rezultatov lahko podamo predvsem naslednje pomembne zaključke in ugotovitve:

- Predhodni bentonitni premaz armaturnih palic je statistično značilno vplival na zmanjšanje vrednosti F_{\max} oziroma τ_{\max} , le v primeru 90 dni starih vzorcev, v katerih je bila nameščena armaturna palica premera 12 mm, ter v primeru 28 dni starih vzorcev z armaturno palico premera 22 mm. V ostalih primerih predhodni premaz armaturnih palic ni povzročil statistično značilnega znižanja vrednosti F_{\max} oziroma τ_{\max} .
- V primeru brez predhodnega premaza se je s povečanjem premera armaturnih palic z 12 mm na 22 mm izvlečna sila F_{\max} povečala povprečno za 273%, sprijemna napetost τ_{\max} pa za povprečno 11%. V primeru predhodnega bentonitnega premaza se je s povečanjem premera armaturnih palic z 12 mm na 22 mm izvlečna sila F_{\max} povečala v povprečju za 268%, sprijemna napetost τ_{\max} pa za povprečno 9%. Medtem ko je tako v primeru predhodnega premaza kot v primeru brez premaza armaturnih palic povečanje premera

armaturnih palic statistično značilno vplivalo na povečanje izvlečne sile F_{max} , pa ta sprememba na vrednosti sprijemne napetosti τ_{max} ni imela statistično značilnega vpliva.

- V primeru brez predhodnega premaza se je s povečanjem starosti betona z 28 dni na 90 dni izvlečna sila F_{max} oziroma sprijemna napetost τ_{max} povečala za 57%, v primeru predhodnega premaza pa za 28%. V obeh primerih je povečanje starosti betona statistično značilno vplivalo na povečanje izvlečna sila F_{max} oziroma sprijemne napetosti τ_{max} .
- Z dodajanjem vlaken v beton je v splošnem sicer prišlo do malenkostnega zmanjšanja izvlečne sile F_{max} oziroma sprijemne napetosti τ_{max} , pri čemer pa ta vpliv tako v primeru brez prehodnega premaza kot v primeru predhodnega premaza ni statistično značilen.

6 LITERATURA

Bashir, M. T., Ansar, M., Muhammad, S., Farid F., Abbas, M. I., Pull-out Behavior of Conventional Steel Reinforcement in Normal and High Strength Concrete, International Journal of Scientific Engineering and Science, 3 (4), 18-25, 2019.

Bilek, V., Bonczkova, S., Hurta, J., Pytlík, D., Mrovec, M., Bond Strength Between Reinforcing Steel and Different Types of Concrete, Procedia Engineering, 190, 243-247, 2017.

DIN, DIN 1048-1, Testing concrete; testing of fresh concrete, DIN, 1991.

Eligehausen, R., Popov, E. G., Bertera, V. V., Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations, R.No.UCB/EERC-83/23,EERC, Berkeley, 1988.

Naaman, A. E., Engineered steel fibers with optim I properties for reinforcement of cement composites, Journal of advanced concrete technology, 1 (4), 241-252, 2003.

Gangolu, A. R., Pandurangan, K., Sultana, F., Eligehausen, R., Studies on the pull-out strength of ribbed bars in high-strength concrete, Research Gate, https://www.researchgate.net/publication/288403054_Studies_on_the_pull-out_strength_of_ribbed_bars_in_high-strength_concrete, 1-6, 2007.

Saje, D., Lopatič, J., Obnašanje stika med betonom in armaturnimi palicami iz bazaltnih vlaken, Gradbeni Vestnik, 70, 186-196, 2021.

SIST, SIST EN 10080:2005, Jeklo za armiranje betona - Varivo armaturno jeklo - Splošno, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2005.

SIST, SIST EN 12350-10:2010, Preskušanje svežega betona - 8. del: Samozgoščevalni beton - Preskus z L-zabojem, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2010.

SIST, SIST 1026:2016 Beton - Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost - Pravila za uporabo SIST EN 206, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2016.

SIST, SIST EN 12350-1:2019, Preskušanje svežega betona - 1. del: Vzorčenje in naprave za preskušanje, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019a.

SIST, SIST EN 12350-6:2019, Preskušanje svežega betona - 6. del: Gostota, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019b.

SIST, SIST EN 12350-7:2019, Preskušanje svežega betona - 7. del: Vsebnost zraka - Metode s pritiskom, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019c.

SIST, SIST EN 12350-8:2019, Preskušanje svežega betona - 8. del: Samozgoščevalni beton - Preskus razleza s posedom, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019d.

SIST, SIST EN 12390-2:2019, Preskušanje strjenega betona - 2. del: Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019e.

SIST, SIST EN 12390-3:2019, Preskušanje strjenega betona - 3. del: Tlačna trdnost preskušancev, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019f.

SIST, SIST EN 12390-8:2019, Preskušanje strjenega betona - 8. del: Globina vpijanja vode pod pritiskom, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019g.

SIST, SIST EN ISO 15630-1:2019, Jeklo za armiranje in prednapenjanje betona - Metode preskušanja - 1. del: Armaturne palice, drogovi in žica, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019h.

SIST, SIST EN 6892-1:2020, Kovinski materiali - Natezni preskus - 1. del: Metoda preskušanja pri sobni temperaturi, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2020.

Tayeh, A. B., El Dada, Z. M., Shidada, S., Yusuf, M. O., Pull-out behavior of post installed rebar connections using chemical adhesives and cement based binders, Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 31, 332-339, 2019.

Turk, G., Verjetnostni račun in statistika, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2011.

Yoo, D. Y., Shin, H. O., Bond performance of steel rebar embedded in 80-180 MPa ultra-high-strength concrete, Cement and Concrete Composites, 93, 206-217, 2018.

50-LETNICA ODPRTJA PRVE SLOVENSKE AVTOCESTE MED VRHNIKO IN POSTOJNO



Slika 1. Slovesna kolona vozil na odprtju prve slovenske avtoceste med Vrhniko in Postojno 29. decembra 1972. (Vir: Fotoarhiv Gregorja Ficka).

Prvo slovensko avtocesto med Vrhniko in Postojno so začeli graditi leta 1970, dokončana je bila 29. decembra 1972, ko so jo svečano predali prometu. Leta 1973 so začeli graditi še odsek od Postojne do razcepa na Razdrtem, ki je bil dokončan in predan prometu leta 1974. Odsek avtoceste Vrhnika–Postojna je bil projektiran kot štiripasovna avtocesta z odstavnimi pasovi oziroma pasovi za počasni promet. Normalni prečni profil (NPP) je bil širok 26,40 metra, vzorčni primer, ki so ga slovenski projektanti uporabili pri načrtovanju prve slovenske avtoceste,

pa je bil avtocestni odsek med Valencio in Barcelono v Španiji. Projektant prve slovenske avtoceste je bil inž. Leo Avanzo iz podjetja Projekt nizke gradnje Ljubljana. Trasa avtoceste med Vrhniko in Postojno je v glavnem potekala po gričevnatem terenu, zato so bili izbrani naslednji projektni elementi:

- računska hitrost $V_f=120$ km/h,
- horizontalni radij $R_{hmin}=700$ m,
- maksimalni vzdolžni naklon 4%,
- širina normalnega prečnega prereza NPP=26,40 m.

Posebnost gradnje prve slovenske avtoceste je predstavljal potek trase preko kraškega območja. Na celotnem odseku avtoceste je bilo namreč odkritih več kot 400 kraških vrtač, ki so bile med gradnjo avtoceste zapolnjene ali kako drugače urejene, trasa avtoceste pa je potekala tudi preko kraških vodotokov. Pri izdelavi lokacijske in projektne dokumentacije pa tudi kasneje pri gradnji je bilo močno poudarjeno čim bolj neopazno vključevanje avtocestne trase v prostor, po katerem je potekala. Zato so posebno pozornost namenili oblikovanju vkopov in nasipov, ozelenitvi občestnega prostora ter zasaditvi poškodovanih gozdnih robov. Gradnja avtoceste Vrhnika-Postojna je bila razdeljena na tri odseke, ki so jih gradili od aprila 1970 do decembra 1972:

- 9,22 km dolg odsek Vrhnika-Logatec,
- 11,95 km dolg odsek Logatec-Unec,
- 10,82 km dolg odsek Unec-Postojna.

Da je bila prva slovenska avtocesta načrtovana na podlagi najvišjih standardov, ki so glede projektiranja in gradnje avtocest takrat veljali v razvitem svetu, dokazuje tudi dejstvo, da je vsa projektirana in izvedena oprema ceste z določenimi tehničnimi modifikacijami v uporabi še danes: od vertikalne prometne signalizacije, talnih oznak, varovalnih in odbojnih ograj, sistema za klic v sili, stranskih cestninskih postaj do avtocestnih baz z mehanizacijo in opremo za vzdrževanje.

Gradnja odseka Vrhnika-Logatec

Investitor odseka je bil Cestni sklad SRS, ki je skupaj z IBRD zagotovil tudi finančna sredstva za njegovo gradnjo. Trasa avtoceste se je pričela na območju čelne cestninske postaje Vrhnika (danes je že odstranjena) in priključka na obstoječo magistralno cesto Ljubljana-Vrhnika pred Vrhniko. V nadaljevanju je z mostom prečkala Ljubljanico, nato pa je po barjanskem robu potekala mimo opekarne do Verda, kjer se je s 630 m dolgim viaduktom Verd dvignila na kraški svet, posejan s številnimi kraškimi jamami in vrtačami. Barjanski del tega avtocestnega odseka je bil zgrajen z lahkimi nasipi, ki so bili uporabljeni tudi pri gradnji naslednjega avtocestnega odseka od Vrhnike proti Ljubljani, ki je ravno tako potekal po nenosilnih barjanskih tleh. Železniško progo Ljubljana-Koper je avtocesta prečkala



Slika 2. Gradnja voziščne konstrukcije na odseku med Vrhniko in Logatcem v smeri proti Ljubljani. (Vir: Fotoarhiv DARS).

pod znamenitim Štampetovim mostom – železniškim viaduktom, kjer sta bila skozi krilne zidove viadukta izvrtana dva kratka predora.

Prav pri Štampetovem mostu so se zgodili nepredvideni zapleti, ki bi se lahko za graditelje končali tudi tragično, saj je prišlo do nepričakovane porušitve dobršnega dela železniškega nasipa na območju mostu. Prvotni načrt je bil tak, da se železniški nasip Štampetovega mostu, ki je bil narejen za potrebe južne železnice še v času avstrijskega cesarstva in obnovljen po drugi svetovni vojni, najprej prevrta in ojača z betonom, saj bi ga v naslednji fazi gradnje lažje prevrtali in speljali avtocesto pod njim. Sicer bi bilo izvajalcem lažje porušiti dva loka mostu, toda to bi pomenilo prekinitev mednarodnega železniškega prometa za najmanj dva tedna, kar pa ni bilo sprejemljivo. Dolžina preboja Štampetovega mostu je znašala 15 metrov. V začetku vrtanja ni bilo večjih tehničnih težav. Vrtalo se je po švicarskem sistemu »bernold« s potiskanjem jeklenih opažnih plošč po obodu izkopa in sprotnim izkopavanjem čela. Predhodno so nasip zainjektirali s posebno injekcijsko maso, ki bi morala zagotoviti dobro vezavo gruščnatega materiala v nasipu, vendar je ni. Na polovici izkopa je prišlo do porušitve čela izkopa in pragovi dvotirne železniške proge so zabingljali v zraku. Sreča v nesreči je bila, da so bili delavci ravno na malici, drugače bi jih zasulo. Zaradi nepričakovane nesreče je nastala panika, saj bi moral prvi vlak pripeljati iz postojnske smeri čez 10 ali 15 minut, a so ga k sreči ustavili. Bila je velika sreča v nesreči, da se ni zgodila katastrofa. Za začasno konstrukcijo so nato pod progo položili jeklene nosilce, da so lahko vlaki zelo počasi vozili čez. Ob otvoritvi avtoceste Štampetov most ni bil dokončan, urejen je bil začasni obvoz, ki so ga odstranili šele spomladi leta 1973.



Slika 3. Začasni obvoz pod Štampetovim mostom na odseku med Vrhniko in Logatcem. (Vir: Fotoarhiv Gregorja Ficka).

Viadukt Verd, ki je najdaljši premostitveni objekt na tem avtocestnem odseku, je bil od prvotno projektirane dolžine 462,20 m naknadno podaljšan še za 5 polj na severni polovici in za 4 polja na južni polovici v smeri proti Verdu. Objekt je bil grajen po tedaj najsodobnejši metodi kot monolitna konstrukcija s pomičnim opažem, ki ga je izvajalec objekta GIP Gradis Ljubljana uvozil iz ZR Nemčije. Objekt je bil razdeljen na 19 polj z razponom 34 m, pri čemer sta bili krajni polji dolgi 26,50 m

oziroma 25,50 m. V prečnem prerezu je bil viadukt zgrajen z dvema ločenima objektoma s prečnim prerezom v obliki dvojnega T-nosilca. Objekt je bil temeljen v nosilna tla pod barjanskimi zemljinami s piloti Benotto. Stebri viadukta so armiranobetonski in povezani s horizontalno armiranobetonsko prečko. Prekladna konstrukcija mostu je prednapeta v vzdolžni smeri.



Slika 4. Gradnja viadukta Verd na odseku med Vrhniko in Logatcem. Izdelava pomičnega opaža prednapete monolitne prekladne konstrukcije. (Vir: Fotoarhiv DARS).

Glavni izvajalec del na tem odseku je bilo eno največjih jugoslovanskih gradbenih podjetij tedanjega obdobja Jugoslavija-put Beograd, ki je traso avtoceste, obvoze, priključke in premostitvene objekte, dolge do 50 m, zgradil skupaj s še dvema velikima gradbenima podjetjema iz Srbije: Planum Beograd in Partizanski put Beograd. Gradbena dela so si med seboj razdelili glede na uporabljeno tehnologijo gradnje, ki je bila odvisna od geološke sestave tal (barje oziroma kraški teren). Poseben tehnični problem je predstavljala gradnja avtoceste po barjanskem delu trase, kjer je na začetku gradnje v aprilu 1970 prišlo do zamud zaradi nedorečenih projektnih rešitev. Ta del je bil zgrajen na lahkem nasipu iz elektrofiltrskega pepela.



Slika 5. Obrisi štiripasovne avtoceste so že vidni. Spust proti viaduktu Verd v smeri proti Ljubljani. (Vir: Fotoarhiv DARS).

Del trase, ki je potekal po kraškem apnencu, je bil zgrajen brez večjih tehničnih težav. Neposredno ob trasi avtoceste so postavili bazo za pridobivanje kamnitih materialov ter proizvodno asfaltnih in betonskih mešanic. Nadvoz in most na priključku Vrhnika je zgradila beograjska Mostogradnja, sistem za klic in sili pa Iskra iz Kranja.



Slika 6. Nadvoz na odseku avtoceste med Vrhniko in Logatcem v smeri proti Postojni. (Vir: Fotoarhiv DARS).

Odgovorna projektantska podjetja so bila Projekt Nizke gradnje Ljubljana za traso avtoceste, obvoze lokalnih in magistralnih cest, vodnogospodarske ureditve ter za premostitvene objekte, dolge do 50 m, IBT Trbovlje za priključne klančine in cestninske postaje, Mostogradnja Beograd za nadvoz in most na priključku Vrhnika ter združenje Joint-Venture, ki so ga sestavljali GIPOSS Ljubljana, GIP Gradis Ljubljana, Biro za projektiranje Maribor ter Ing. Bung Heidelberg GmbH (ZR Nemčija) za viadukt Verd.

V sklopu gradnje odseka med Vrhniko in Logatcem je bilo ob 9,2 km štiripasovne avtoceste zgrajenih še 12,9 km obvozov lokalnih in magistralnih cest, priključek Vrhnika, pet nadvozov, štiri podvozi in cestninska postaja Vrhnika. Izkopanih je bilo 944.000 m³ kamnitih materialov, izvedenih 1.043.000 m³ nasipov in 185.000 m³ lahkih nasipov iz elektrofiltrskega pepela.

Gradnja odseka Logatec–Unec

Investitor odseka je bil Cestni sklad SRS, ki je skupaj z IBRD zagotovil tudi finančna sredstva. Odsek so začeli graditi aprila 1970. Trasa odseka med Logatcem in Uncem se je pričela s priključkom za Logatec, ki ga je z avtocesto povezovala 4,4 km dolga navezovalna cesta; ta je s podvozom prečkala železniško progo Ljubljana–Trst. Trasa avtoceste je železniško progo prečkala z nadvozom Derviše, nato pa se je vzpenjala proti Suhemu vrhu, kjer je dosegla tudi najvišjo višinsko koto 542 m. Od tod naprej je trasa potekala vzporedno z železnico vse do Ivanjega sela, kjer je z viaduktom Ivanje selo prečkala regionalno cesto in kraške vrtače. V območju prečkanja regionalne ceste Planina–Rakek je bil lociran drugi avtocestni priključek Unec. Na obeh avtocestnih priključkih sta bili zgrajeni tudi stranski cestninski postaji Logatec in Unec, ki sta v uporabi še danes. Trasa avtoceste se je nato vzpenjala ter z viaduktom Unec

prečkala dolino, nato pa pod železniško progo Ljubljana-Koper, ki jo je križala v 10 m globokem vkopu, prešla v zadnji, tretji avtocestni odsek med Uncem in Postojno. V geološkem profilu je avtocesta med Logatcem in Uncem potekala po trdem kraškem terenu, predvsem po apnencu in po dolomitu.



Slika 7. Odsek avtoceste med Logatcem in Uncem ob železniški progi Ljubljana-Trst. (Vir: Fotoarhiv DARS).

Na odseku med Logatcem in Uncem so bili zgrajeni trije večji premostitveni objekti, ki so bili daljši kot 50 m:

- viadukt Derviše pod kotom 37° prečka železniško progo Ljubljana-Trst in gozdno cesto. Dolg je 68,50 m in širok 28,30 m. Konstrukcija objekta je sestavljena iz dveh ločenih armiranobetonskih plošč, spojenih v plitvo temeljeno okvirno konstrukcijo,
- viadukt Ivanje selo je plitvo temeljen na dolomitni podlagi. Premostitvena konstrukcija je podprta z enim stebrom s prečnikom, na katerega je položenih sedem vzdolžno prednapetih nosilcev. Voziščna plošča je armiranobetonska in monolitna. Objekt je dolg 225 m in širok 28,30 m. Sestavljen je iz dveh ločenih konstrukcij, vmesni prostor pa je zaprt z montažnimi ploščami,
- viadukt Unec je sestavljen iz sedmih 25-metrskih razponov. Skupna dolžina objekta je 200 m. Ker ima desno vozišče še pas za počasni promet, je zgornja konstrukcija, ki ima enako statično zasnovo kot viadukt Ivanje selo, sestavljena iz sedmih nosilcev na levem in osmih na desnem vozišču.

Vsa gradbena dela na trasi avtoceste in premostitvenih objektih do 50 m, razen podvoza pod železnico na priključni cesti za Logatec, je izvajalo GP Mavrovo iz Skopja, ki je bilo sicer dobro tehnološko opremljeno, vendar pa je zaradi ostrih tehničnih zahtev, povezanih s kvaliteto gradnje, dela opravljalo z določenimi težavami. V Uncu je podjetje postavilo svojo betonarno, asfaltno bazo in drobilnico kamnitih materialov. Dela so v glavnem potekala v skladu s časovnimi načrti, saj so bile kapacitete uporabljene gradbene mehanizacije zadostne. Gradnja viaduktov Unec in Ivanje selo je potekala brez problemov po tehnologiji, ki jo je razvil GIP Gradis Ljubljana in ki je bila v praksi že preizkušena. Večji problem je predstavljala gradnja viadukta Derviše čez elektrificirano dvotirno železniško progo Ljubljana-Trst. Izvajalec Giposs Ljubljana je vložil veliko naporov v realizacijo tega kratkega, vendar tehnološko in tehnično

zelo zahtevnega objekta. Kot podizvajalca sta pri gradnji odseka sodelovala še Železniško gradbeno podjetje Ljubljana, ki je izvajalo dela na železniški infrastrukturi, ter Iskra Kranj, ki je izvajala sistem za klic v sili. Naknadno je bila v Lomu določena lokacija za avtocestno počivališče, na katerem je Petrol zgradil obojestranski bencinski servis ter motel z restavracijo. Investitor gradnje obeh ploščadi počivališča je bil Cestni sklad SRS, investitor objektov ter komunalne in energetske opreme pa Petrol.



Slika 8. Gradnja viadukta Ivanje selo. (Vir: Fotoarhiv DARS).

Odgovorna projektantska podjetja so bila Projekt nizke gradnje Ljubljana za traso avtoceste, obvoze lokalnih in magistralnih cest, vodnogospodarske ureditve, premostitvene objekte, dolge do 50 m, ter viadukt Derviše, IBT Trbovlje za priključne klančine in cestninske postaje, GP Mavrovo Skopje – projektivni biro za premostitvene objekte, dolge do 50 m, ter GIP Gradis Ljubljana, Biro za projektiranje Ljubljana za viadukta Ivanje selo in Unec.

V sklopu gradnje odseka med Logatcem in Uncem so bili ob skoraj 12 km štiripasovne avtoceste zgrajeni še obvozi lokalnih in magistralnih cest, priključek Logatec s 4,4 km dolgo navezovalno cesto ter železniškim podvozom, priključek Unec, sedem nadvozov, pet podvozov in počivališče Lom. Izkopanih je bilo 1.010.000 m³ kamnitih materialov in izvedenih 901.000 m³ nasipov.

Gradnja odseka Unec–Postojna

Zadnji odsek med Uncem in Postojno je bil tehnično najtežavnejši. Investitor odseka je bil prav tako Cestni sklad SRS, ki je skupaj z IBRD zagotovil tudi finančna sredstva za njegovo gradnjo. Odsek se je pričel s križanjem avtoceste in železniške proge Ljubljana-Trst ter je potekal ob železniški progi vse do Ravbarkomande, kjer je s 591,40 m dolgim viaduktom Ravbarkomanda prečkal železniško progo, magistralno cesto in lokalno cesto Postojna-Unec. Na viaduktu Ravbarkomanda je avtocesta dosegla tudi najvišjo višinsko koto 610,75 m. Trasa avtoceste se je nato mimo železniške postaje Postojna v ostrem zavoju spustila v ravnino do priključka Postojna, ki je bil zgrajen na križanju avtoceste z magistralno cesto Postojna-Reka. Na priključku je bila zgrajena stranska cestninska postaja Postojna, ki

za potrebe cestninjenja tovornega prometa obratuje še danes. Na območju Postojne je bil zgrajeno tudi počivališče Ravbarkomanda z obojestranskim bencinskim servisom ter parkirišči. V geološkem profilu je avtocesta med Uncem in Postojno na več kot 80 % svoje dolžine potekala po apnencu, na zadnjih dveh kilometrih na območju Postojne pa je prešla v konglomerate in fliš. Dno doline je bilo zamočvirjeno, zato so bila potrebna obsežna izkopavanja nenasilnih materialov.

Na tem avtocestnem odseku je bil zgrajen tudi največji premostitveni objekt med Vrhniko in Postojno, viadukt Ravbarkomanda. Objekt je bil plitvo temeljen v apnencu. Podporno konstrukcijo so sestavljali votli armiranobetonski stebri, visoki do 33 m s prečno podporo, na kateri so za vsako vozišče položeni štirje I-nosilci. Dolžina leve polovice objekta je 545,60 m, dolžina desne polovice pa 591,40 m. Objekt ima zaokrožitveni radij $R=2000$ m. Širina objekta med ograjami je znašala 26,40 m, med zunanijima robovoma objekta pa 28,52 m. Zgornja konstrukcija objekta je montažna, tako prednapeti vzdolžni nosilci razpona 37,70 m kot tudi prečni nosilci. Voziščna plošča je sestavljena iz montažnih plošč, ki so z armaturo in betonom

skupaj z nosilci povezane v celoto. Ta rešitev se je kasneje izkazala za slabo, saj je viadukt v 25-letni uporabi zaradi ekstremnih vremenskih razmer (sneg, veter, nizke temperature) ter obilnega soljenja popolnoma propadel. Obnovljen je bil najprej v 90. letih prejšnjega stoletja, potem pa še leta 2015, vendar je v strokovnih krogih potekala dolgotrajna polemika, povezana s predlogi, da bi namesto sanacije viadukt porušili ter zgradili novega.

Pogodbeni izvajalec za vsa dela na tem odseku je bilo združenje GAST Ljubljana, v katerem so bili Slovenija ceste Ljubljana, Primorje Ajdovščina, GIP Gradis Ljubljana in Tehnogradnje Maribor, ki so si pogodbeno dela medsebojno razdelili tako, da je pretežni del premostitvenih objektov, dolgih do 50 m, ter viadukt Ravbarkomanda zgradil GIP Gradis Ljubljana, medtem ko sta vsa druga gradbena dela na avtocesti izvedli podjetji Slovenija ceste Ljubljana in Primorje Ajdovščina. Pri gradnji so kot podizvajalci sodelovala še druga podjetja: kranjska Iskra je izvajala sistem za klic v sili, Železniško gradbeno podjetje Ljubljana dela na železniški infrastrukturi, Geološki zavod Ljubljana pa geotehnične objekte.



Slika 9. Gradnja podpornih stebrov viadukta Ravbarkomanda. (Vir: Fotoarhiv DARS).



Slika 11. Predsednik SFRJ Josip Broz - Tito z direktorjem Cestnega sklada SRS inž. Lojzeto Blenkušem in takratnim slovenskim političnim vrhom ob ogledu prve slovenske avtoceste med Vrhniko in Postojno decembra 1972. (Vir: Fotoarhiv Gregorja Ficka).



Slika 10. Gradnja viadukta Ravbarkomanda na odseku med Uncem in Postojno. (Vir: Fotoarhiv DARS).

Avtor: mag. Gregor Ficko, univ. dipl. inž. grad.

PRIPRAVLJALNI SEMINARJI IN IZPITNI ROKI ZA STROKOVNE IZPITE ZA GRADBENO STROKO V LETU 2023

SEMINAR	IZPIT
13. - 15. 02. 2023	21.03. do 28.03.2023
17. - 19. 04. 2023	23.05. do 30.05.2023
16. - 18. 10. 2023	21.11. do 28.11.2023

A. PRIPRAVLJALNI SEMINARJI:

Seminarje organizira **Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana**;

Telefon: (01) 52-40-200; e-naslov: gradb.zveza@siol.net; gradbeni.vestnik@siol.net.

Uradne ure: od ponedeljka do četrтка od 09.00 do 14.00 ure; v petek ni uradnih ur za stranke!

Pripravljalni seminar bo za:

1. Pooblašcene inženirje gradbene stroke
2. Vodje del za področje gradbene stroke

Predavanja bodo iz naslednjih predmetov izpitnega programa:

1. Predpisi s področja graditve objektov, urejanja prostora, arhitekturne in inženirske dejavnosti, zborničnega sistema ter osnov varstva okolja in splošnega upravnega postopka
2. Investicijski procesi in vodenje projektov
3. Varstvo zdravja in življenja ljudi ter varstvo okolja pri graditvi objektov
4. Področni predpisi in standardizacija s področja graditve objektov

Cena za udeležbo na seminarju in za literaturo znaša **685,54 EUR z DDV**.

Kandidati lahko poslušajo tudi zgolj posamezno predavanje v okviru rednih seminarjev, cena za obisk posameznega predavanja je **137,11 EUR z DDV**.

V cenah so všteti tudi odmori za kavo.

Kotizacijo za seminar je potrebno nakazati ob prijavi na poslovni račun ZDGITS: **SI56 0201 7001 5398 955**.

Prijavo je potrebno posredovati organizatorju (ZDGITS) na e-naslov gradb.zveza@siol.net najmanj **7 dni pred začetkom** seminarja!

Prijavni obrazec je objavljen na spletni strani ZDGITS (<http://www.zveza-dgits.si>).

Izvedba seminarja je odvisna od števila prijav (najmanj 20).

B. STROKOVNI IZPITI

potekajo pri **Inženirski zbornici Slovenije (IZS), Jarška 10-B, 1000 Ljubljana**. Informacije o strokovnih izpitih in izpitnih programih je mogoče dobiti na sedežu IZS (uradne ure: ponedeljek, sredo, četrtek in petek od 8.00 do 12.00 ure, torek od 12.00 do 16.00 ure), na spletni strani IZS (www.izs.si) ali po telefonu (01) 547-33-19 oziroma M: 069 910 182 (uradne ure: ponedeljek, sredo, četrtek, petek od 10.00 do 12.00 ure; v torek od 14.00 do 16.00 ure).

FOTOREPORTAŽA GRADBIŠČA DRUGEGA TIRA ŽELEZNIŠKE POVEZAVE DIVAČA-KOPER



Slika 1. Gradnja viadukta Gabrovica pod avtocestnim viaduktom Črni Kal.

Investitor: 2TDK, Družba za razvoj projekta, d. o. o.

Inženir: DRI, upravljanje investicij, d. o. o., SŽ - Infrastruktura, d. o. o., Projekt, d. d. Nova Gorica, DIS Consulting, družba za svetovanje, pripravo in izvajanje investicij, d. o. o.

Izvajalec del: CJV Kolektor CPG, d. o. o., Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi A.Ş. (Turčija) in Özaltın İnşaat Ticaret Ve Sanayi A.Ş. (Turčija)

Osnovni podatki o drugem tiru

Dolžina trase: 27,1 km

Dolžina predorov: 20,5 km

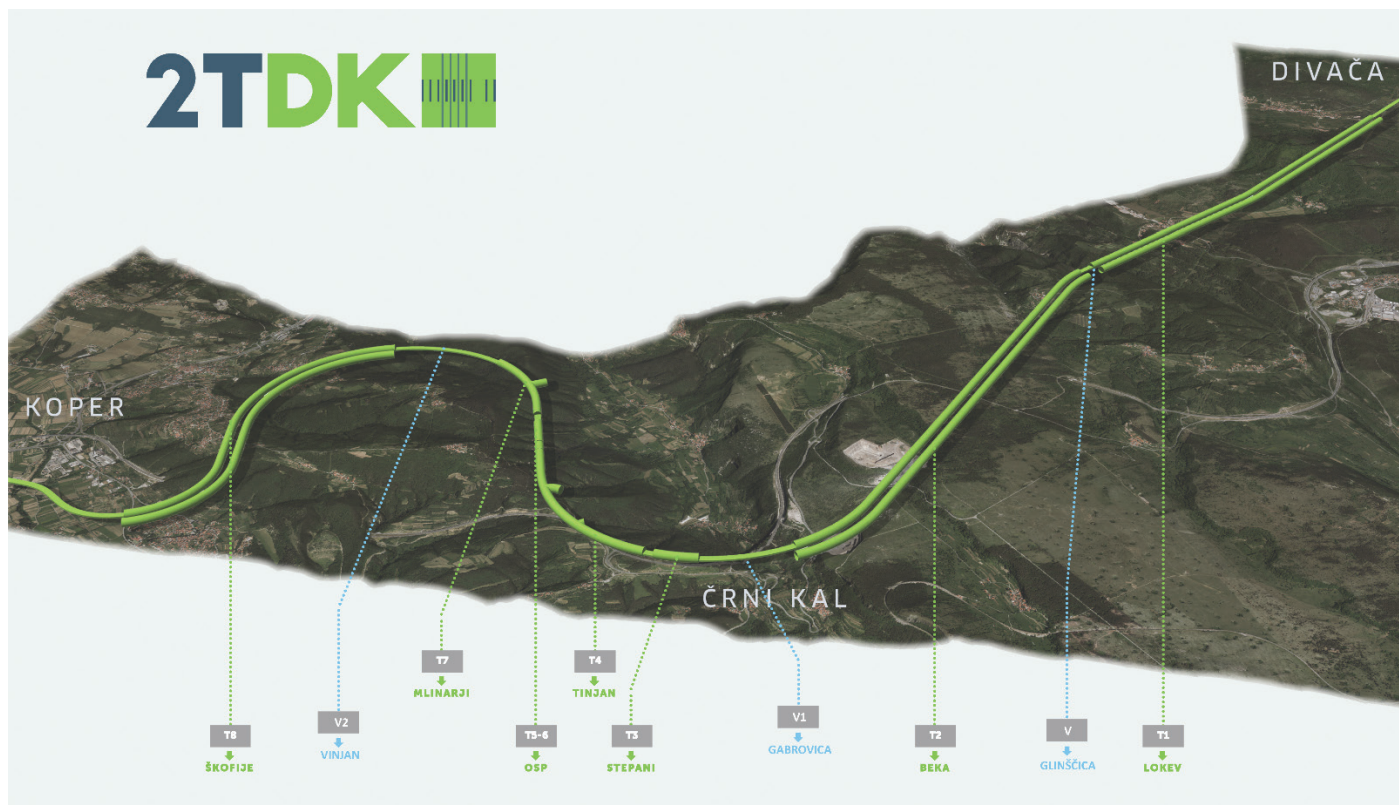
Skupna dolžina glavnih in servisnih predorskih cevi: 37 km

Število viaduktov: 3 (Gabrovica, Glinščica in Vinjan)

Dolžina viaduktov: 1,3 km

Začetek gradnje: 2019 - pripravljalna dela, 2021 - glavna gradbena dela

Zaključek gradnje: 2026



Slika 2. Prikaz trase drugega tira Divača–Koper. Traso sestavlja 7 predorov in trije viadukti.

Gradnja drugega tira je trenutno v najbolj intenzivni fazi. Približno 1000 delavcev dela na 14 predorskih deloviščih, dela se opravljajo tudi na dveh deloviščih obeh viaduktov, ki se še gradita.



Slika 3. Izkopna dela v predoru Beka (T2).



Slika 4. Izkop in podpiranje stopnice s talnim obokom v predoru Beka (T2).

Največji infrastrukturni projekt v državi se pospešeno gradi. Drugi tir je predorska proga, saj kar 75 % trase med Divačo in Koperom poteka v predorih. Proga sestoji iz sedmih predorov in treh viaduktov – viadukt Glinščica je že zgrajen, saj je bilo to nujno potrebno, da se je lahko pričel izkop dveh najdaljših predorov tudi z druge strani, iz doline reke Glinščice.

Dva predora na trasi – Mlinarji (T7) in Stepani (T3) – sta že izkopana. Izvajalci del (konzorcij treh podjetij: Kolektor CPG s turškima partnerjema, družbama Yapi Merkezi in Özaltin) ter podizvajalci morajo na celotni trasi izkopati 37 kilometrov glavnih in servisnih cevi, do sedaj so izkopali 15 kilometrov.



Slika 5. Preboj prvega predora na trasi – predora Mlinarji (T7), 13. junij 2022.



Slika 6. Opažanje centralnega kanala v talnem oboku iz litega betona v predoru Mlinarji (T7).

V treh predorih (T1, T7 in T8) že poteka izdelava sekundarne obloge predora, ki je razdeljena v več podfaz: izdelavo talnega oboka iz litega betona z oblikovanim centralnim kanalom za odvodnjavanje, izdelavo vzdolžnih temeljev, izvedbo sistema hidroizolacije in odvodnjavanja predora, izdelavo notranjega oboka, oblikovanja instalacijskih kinet in polnilnega betona. Ko bodo v vseh predorih dela končana, sledijo še izvedba tira na togi podlagi ter vsa ostala železniška in elektro-strojna dela na trasi drugega tira.



Slika 7. Portala glavne in servisne cevi najdaljšega predora na trasi drugega tira Lokev (T1) z divaške strani.



Slika 8. Opažni voz od znotraj.

Trije viadukti: Gabrovica, Glinščica in Vinjan

Viadukti na trasi bodo premostili tri večje doline, dolino reke Glinščice, Osapsko in Vinjansko dolino. Po konstrukcijski zasnovi in tehnologiji gradnje se med seboj precej razlikujejo. Vsak viadukt je namreč konstrukcijsko in arhitekturno prilagojen lokaciji, obliki terena in geologiji ter naravovarstvenim zahtevam. Viadukt Glinščica je že zgrajen, pri viaduktu Gabrovica se gradijo stebri, pripravljena je tudi že delavnica. V delavnici se naenkrat zabetonira 32 metrov prekladne konstrukcije, ki se potem potiska preko stebrov. Viadukt Vinjan se gradi s prostokonzolno tehniko, trenutno se gradijo stebri in kopljejo vodnjaki.



Slika 9. Viadukt Glinščica.



Slika 10. Delavnica pri viaduktu Gabrovica.



Slika 11. Gradnja stebrov pri viaduktu Gabrovica.

Spremljanje gradnje z modelom BIM

Pri projektu Drugi tir sledimo najnovejšemu tehnološkemu razvoju in trendom v gradbeništvu, zato je gradnja digitalizirana in podprta s tako imenovanim BIM-pristopom (BIM – Building Information Modeling). V BIM-pristopu so 3D-modeli nadgrajeni z dodatnimi informacijami o gradnikih in poteku gradnje. Projekt Drugi tir je med največjimi projekti v Evropi, kjer se BIM-pristop uporablja že v fazi načrtovanja in gradnje, uporabljen pa bo tudi v fazi obratovanja.

Pomembnost izgradnje drugega tira

Ključni cilj projekta je odstraniti ozko grlo na železniškem odseku Divača–Koper in posledično povečati konkurenčnost slovenskega gospodarstva. Slovensko gospodarstvo bi v 30 letih izgubilo po 145 milijonov evrov dodatne vrednosti na leto, če drugi tir ne bi bil zgrajen. Sosednje države bodo namreč v prihodnjih letih zgradile že svoje proge in bi se tovor selil tja.



Slika 12. Gradnja viadukta Vinjan.



Slika 13. in 14. Segmentna gradnja stebrov viadukta Vinjan.

Fotografije: Andraž Gregorič za 2TDK

NOVI DIPLOMANTI GRADBENIŠTVA

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

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

Ivana Bojchovska, Primerjalna analiza varovanja gradbene jame z jeklenimi zagatnicami in mikropiloti z uporabo tehnologije BIM, mentor doc. dr. Boštjan Pulko, somentor izr. prof. dr. Vojkan Jovičič;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=143495>

Gregor Klobčar, Primerjava optimizacije krmilnih parametrov križišč na Dunajski cesti v Ljubljani v programih Sidra in Vistro, mentor izr. prof. dr. Marijan Žura, somentor viš. pred. dr. Rok Marsetič;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=143494>

NOVI DIPLOMANTI GRADBENIŠTVA

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

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Tadej Zorec, Zagotavljanje varnosti na gradbišču Poslovno skladiščnega objekta Schrack - Hoče, mentor doc. dr. Zoran Pučko, univ. dipl. gosp. inž., somentorica mag. inž. grad. Kristina Paska;
<https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=83395>

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Aljaž Visinski, Triosne preiskave trdnosti na vzorcih zelenega betona, mentor izr. prof. dr. Samo Lubej, somentor doc. dr. Gregor Kravanja;
<https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=83441>

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

17.-20.3.2023

ICBMC 2023 - 8th International Conference on Building Materials and Construction
Kjoto, Japonska
www.icbmc.org

28.-29.3.2023

6. konferenca Biznis in trendi v gradbeništvu
Portorož, Slovenija
<https://akademija-finance.si/konference/gradbena-konferenca/>

4.-6.4.2023

S.ARCH BERLIN – 10th International Conference on Architecture and Built Environment
Berlin, Nemčija
www.s-arch.net/s-arch-berlin

22.-23.5.2023

SMARTINCS'23 - Conference on Self-Healing, Multifunctional and Advanced Repair Technologies in Cementitious Systems
Gent, Belgija
<https://smartincs.ugent.be/index.php/conference>

29.-31.5.2023

15th International Conference Underground Construction Prague 2023
Praga, Češka
www.ucprague.com/

7.-9.6.2023

17DECGE – 17th Danube - European Conference on Geotechnical Engineering
Bukarešta, Romunija
<https://17decge.ro/>

25.-28.6.2023

9ICEG - 9th International Congress on Environmental Geotechnics
Hania, Kreta, Grčija
www.iceg2022.org

26.-28.6.2023

NUMGE 2023 - 10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering
London, Anglija
www.issmge.org/events/numge-2023

20.-23.8.2023

INTER-NOISE 2023 — 52nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering
Čiba, Japonska
<https://internoise2023.org>

3.-6.9.2023

IS-PORTO 2023 - 8th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials
Porto, Portugalska
<https://web.fe.up.pt/~is-porto2023/>

17.-21.9.2023

12ICG - 12th International Conference on Geosynthetics
Rim, Italija
www.12icg-roma.org

18.-22.9.2023

ICCC 2023 — 16th International Congress on the Chemistry of Cement 2023
Bangkok, Tajska
www.iccc2023.org

28.-30.9.2023

11th International Conference on Auditorium Acoustics 2023
Atene, Grčija
<https://auditorium2023.org/>

14.-17.11.2023

WLF6 - 6th World Landslide Forum
Firence, Italija
<https://wlf6.org/>

20.-22.11.2023

CREST 2023 — 2nd International Conference on Construction Resources for Environmentally Sustainable Technologies
Fukuoka, Japonska
www.ic-crest.com

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