

marec 2026

letnik 75

Gradbeni vestnik

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



3

**VPLIVI VZGONA NA OBJEKTE:
ŠTUDIJA PRIMERA NADZOROVANEGA
SPUŠČANJA DVIGNJENE PODZEMNE
GARAŽE**

17

**ULTRAVISOKOZMOGLJIVI
BETON Z BAZALTNIMI VLAKNI
TER SAMOČISTILNIMI IN
LUMINISCENČNIMI POVRŠINAMI**

29

**NORMATIVI ZA GRADBENO-
OBRTNIŠKA DELA V SLOVENIJI
SKOZI ČAS**

38

**MOST CERŠAK, MOST ZA PEŠCE
IN KOLESARJE ČEZ MEJNO REKO
MURO PRI CERŠAKU**

Gradbeni vestnik

Izdajatelj:

**Zveza društev gradbenih inženirjev in
tehnikov Slovenije (ZDGITS),**
Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana,
telefon 01 52 40 200
v sodelovanju z **Matično sekcijo
gradbenih inženirjev Inženirske
zbornice Slovenije (IZS MSG),**
ob finančni podpori **Javne agencije za
znanstvenoraziskovalno in inovacijsko
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
dr. Miha Jukić
IZS MSG: **dr. Rok Cajzek**
mag. Jernej Nučič
Tina Bučić
UL FGG: **izr. prof. dr. Matija Gams**
UM FGPA: **prof. dr. Miroslav Premrov**
ZAG: **doc. dr. Aleš Žnidarič**

Uredniški odbor: **izr. prof. dr. Primož Može,**
glavni in odgovorni urednik
prof. dr. Uroš Klanšek
dr. Maja Kreslin

Lektor: **Davorin Kolarič**

Lektorica angleških povzetkov:
Romana Hudin

Tajnica: **Eva Okorn**

Oblikovalska zasnova: **Agencija GIG**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:
Kočevski tisk

Naklada: 400 tiskanih izvodov
3000 naročnikov elektronske verzije

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

Letno izidejo 4 številke. Letna naročnina
za individualne naročnike znaša 25,50 EUR;
za študente in upokojence 10,50 EUR;
za družbe, ustanove in
samostojne podjetnike 188,50;
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:

Železniški viadukt Vinjan
Foto: DRI upravljanje investicij, d. o. o.,
BeGR8-Medija

**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, marec 2026, letnik 75, str. 1-48

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: primoz.moze@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

Prispevki v Gradbenem vestniku so odprto dostopni v skladu z licenco CC BY-SA 4.0.



**Gradbeni
vestnik** 70^{let}

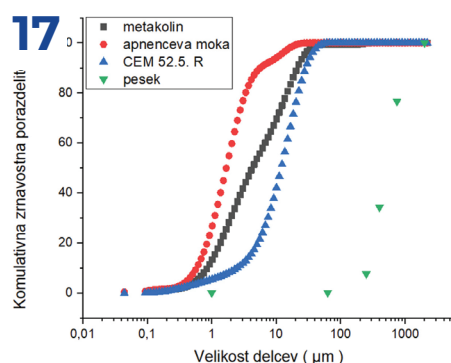
doc. dr. Bojan ČAS, univ. dipl. inž. grad.

VPLIVI VZGONA NA OBJEKTE: ŠTUDIJA PRIMERA NADZOROVANEGA SPUŠČANJA DVIGNJENE PODZEMNE GARAŽE *BUOYANCY EFFECTS ON STRUCTURES: A CASE STUDY ON THE CONTROLLED LOWERING OF A RAISED UNDERGROUND GARAGE*



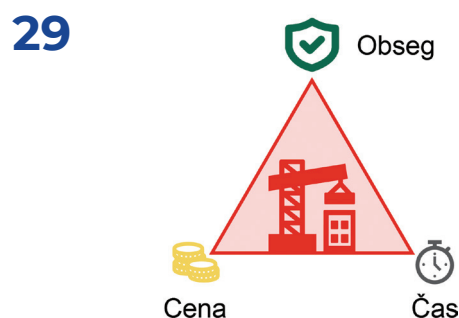
izr. prof. dr. Andrej Ivanič, univ. dipl. inž. grad.
dr. Ahmad Rizwan Mumtaz, mag. inž. grad.
izr. prof. dr. Natalija Bede Odorčič, univ. dipl. inž. grad.
doc. dr. Nùria Garro, univ. dipl. fiz.
izr. prof. dr. Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.
izr. prof. dr. Antonio Comite, univ. dipl. kem.
doc. dr. Marcello Pagliero, univ. dipl. kem.
Nikolina Škrilec, univ. dipl. inž. grad.
doc. dr. Gregor Kravanja, mag. inž. kem. tehn.

ULTRAVISOKOZMOGLJIVI BETON Z BAZALTNIMI VLAKNI TER SAMOČISTILNIMI IN LUMINISCENČNIMI POVRŠINAMI *ULTRA-HIGH-PERFORMANCE CONCRETE WITH BASALT FIBRES AND SELF-CLEANING, LUMINESCENT SURFACES*



Maks Alič, dipl. inž. grad. (UN)
doc. dr., Robert Klinc, univ. dipl. inž. grad.

NORMATIVI ZA GRADBENO-OBRTNIŠKA DELA V SLOVENIJI SKOZI ČAS *NORMS FOR CONSTRUCTION AND CRAFT WORKS IN SLOVENIA OVER TIME*



Rok Mlakar, univ. dipl. inž. grad.
Jernej Maher, univ. dipl. inž. grad.
dr. Viktor Markelj, univ. dipl. inž. grad.

MOST CERŠAK, MOST ZA PEŠCE IN KOLESARJE ČEZ MEJNO REKO MURO PRI CERŠAKU *BRIDGE CERŠAK, PEDESTRIAN AND CYCLISTS BRIDGE OVER THE BORDER RIVER MURA AT CERŠAK*



VSEBINA CONTENTS

POROČILA S STROKOVNIH SREČANJ

Boštjan ROZMAN

36. MIŠIČEV VODARSKI DAN – strokovni posvet slovenskih vodarjev

47



NOVI DIPLOMANTI

Eva Okorn

KOLEDAR PRIREDITEV

Eva Okorn



doc. dr. Bojan Čas, univ. dipl. inž. grad.

bojan.cas@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,

Katedra za operativno gradbeništvo,

Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek

UDK/UDC: 69.035.4:531.36:533.13

VPLIVI VZGONA NA OBJEKTE: ŠTUDIJA PRIMERA NADZOROVANEGA SPUŠČANJA DVIGNJENE PODZEMNE GARAŽE

BUOYANCY EFFECTS ON STRUCTURES: A CASE STUDY ON THE CONTROLLED LOWERING OF A RAISED UNDERGROUND GARAGE

Povzetek

V zadnjih desetletjih se znatno povečuje število nadzemnih kot tudi podzemnih etaž objektov, grajenih na pomembnejših lokacijah urbanih središč. Z razvojem mest se gradijo tudi obsežna podzemna komunalna infrastruktura, predori podzemnih železnic itd. Visoki ali nihajoči nivoji podzemnih vod lahko povzročijo, da se podzemne konstrukcije, ki tvorijo zaprt podzemni prostor, dvignejo zaradi delovanja vzgona. Prekomernemu vzgonu, ki nastopi, če se ne sprejmejo ustrezni projektni in izvedbeni varnostni ukrepi, se pogosto posveča premalo pozornosti. Konstrukcije objektov, poškodovanih zaradi vplivov vzgona, je treba temeljito preiskati, saj je mogoče le tako ugotoviti, ali je njihova sanacija sploh mogoča ali pa jih bo treba, zaradi tehnološke neizvedljivosti ali prevelikih sanacijskih stroškov, porušiti. V prispevku predstavimo metodologijo za obravnavo stanja objektov, ki jih je prizadel prekomerni vzgon, in to podpremo s študijo primera. Pokažemo, kako sta neustrezno načrtovanje in pomanjkljiva izvedba enega samega detajla podzemne garaže povzročila njen nenadni dvig. S temeljitim pregledom lokacije, poškodovanega objekta, projektne dokumentacije in dodatnimi izračuni je bil razvit tehnološki postopek za nadzorovano spuščanje podzemne garaže.

Ključne besede: vzgon, podzemna garaža, stabilnost proti vzgonu, dvig, nadzorovano spuščanje

Summary

In recent decades, both above-ground and underground storeys of buildings have increased substantially at high-value urban locations. With urban development, extensive underground utility infrastructure, subway tunnels, etc., are also being constructed. High or fluctuating groundwater levels can generate uplift forces on enclosed underground structures, yet engineers often overlook this excessive buoyancy hazard when precautions are insufficient. Structures damaged by buoyancy require a thorough investigation to assess rehabilitation feasibility or to determine whether removal is necessary due to technical or economic constraints. This article presents a methodology for evaluating buoyancy-affected structures and developing rehabilitation solutions, illustrated through a case study. An inadequate design and execution of a single detail of an underground garage caused its sudden uplift. Based on site examination, review of design documentation, and uplift stability verification, a controlled lowering and rehabilitation procedure was successfully developed and implemented.

Key words: buoyancy, underground garage, anti – floating stability, uplift, controlled lowering

1 UVOD

V zadnjih desetletjih se število kletnih etaž stavb, zlasti na pomembnejših lokacijah mestnih središč, izrazito povečuje. Z razvojem mest ter spremljajoče infrastrukture, ki je nujna za njihovo nemoteno delovanje, poteka tudi intenzivna gradnja podzemnih objektov, kot so npr. predori podzemnih železnic, komunalni vodi, galerije itd. Gradijo se tudi številni podzemni objekti za oskrbo mest z vodnimi viri in energijo ter objekti za zaščito mestnih območij pred škodljivimi vplivi visokih voda. Med načrtovanjem, gradnjo in obratovanjem teh objektov je ključnega pomena, da se zadostna pozornost nameni tudi vplivu delovanja podzemnih vod oziroma vplivu vzgona na navedene objekte. Vzgon predstavlja enega ključnih dejavnikov, ki vplivajo na stabilnost deloma ali v celoti vkopanih objektov, saj lahko povzroči njihove dvige in zasuke ter jih tako tudi poškoduje. V angleški terminologiji se pogosto uporablja izraz »anti-floating stability«, ki jasno nakazuje na potrebo po stabilnosti vkopanih objektov proti njihovem »plavanju« oziroma proti njihovem dvigu zaradi delovanja vzgona. Na območjih z visokimi ali nihajočimi podzemnimi vodami predstavlja tako odpornost podzemnih objektov na delovanje vzgona enega ključnih vidikov njihovega načrtovanja. Objekti, grajeni na teh območjih, kot so npr. objekti z globoko vkopanimi kletnimi etažami brez zadostne lastne teže ali predori podzemnih železnic z nizkim nadkritjem, so lahko izpostavljeni prekomernim dvignjenim silam, ki nastopijo kot posledica vzgona. Ustrezna ocena vzgona, ki na podzemne objekte deluje v zapletenih geoloških in hidroloških razmerah, je tako izjemno pomembna za zagotavljanje stabilnosti in nemotene obratovanja tovrstnih objektov.

Prekomerni vplivi vzgona na vkopane dele objektov se lahko razvijejo že med gradnjo, ko še niso doseženi končni nivoji lastne in stalnih obtežb, ki se upirajo delovanju vzgona. Kot bomo pokazali, pa ni nujno, da se škodljivi vplivi vzgona na podzemne objekte pokažejo takoj po dokončanju njihove gradnje. Zato je v primerih nihajočih ali postopno naraščajočih nivojev podzemnih vod priporočljiva vzpostavitev monitoringa v tovrstnih hidroloških razmerah grajenih objektov, ki ga je treba sistematično in kontinuirno izvajati.

Inženirje in raziskovalce vsekakor zanima, kako ustrezno upoštevati vplive vzgona na podzemne objekte že v fazi njihovega projektiranja, zanima pa jih tudi, kako ravnati, ko vzgon tovrstne objekte tudi poškoduje. V prispevku tako predstavimo metodologijo za obravnavo objektov, ki so bili očitno izpostavljeni prekomernemu vzgonu. Njeno uporabnost prikažemo na konkretnem primeru trietažne podzemne garaže, ki se je, po skoraj desetletju nemotene obratovanja, dvignila zaradi delovanja vzgona.

Vsebina pričujočega dela je bila predstavljena tudi v reviji Structures [Čas, 2025].

2 OZADJE

V strokovni in znanstveni literaturi je mogoče zaslediti številne objave avtorjev, ki obravnavajo vplive vzgona na podzemne objekte. Veliki podzemni objekti, kot so npr. podzemne garaže visokih stavb, podzemne galerije in predori podzemnih železnic, so na območjih visokih, nihajočih ali postopno narašča-

jočih podzemnih vod izpostavljeni velikim vzgonskim obtežbam, ki lahko te objekte tudi dvignejo ([Li, 2007], [Lu, 2020], [Sun, 2024], [Wong, 2001]). Za zagotavljanje ustrezne varnosti delovnega okolja so bočne površine izkopov gradbenih jam pogosto zaščitene z »vodotesnimi« geotehničnimi konstrukcijami, kot so npr. pilotne stene ali diafragme. Z njihovo izvedbo se ustvari bazenu podoben gradbiščni delovni prostor. Akumulacija vode v tem prostoru, ki je lahko posledica več dejavnikov, lahko povzroči dvige delno dokončanih ([Bikçe, 2018a], [Fu, 2015]) ali že zgrajenih podzemnih objektov ([Bikçe, 2018b], [Drdacky, 2010]). Prekomerno izkoriščanje podzemnih vod, ki vodi v znižanje njihovih nivojev, ali projekti, ki namerno zvišujejo nivoje podzemnih vod, predstavljajo zahtevne inženirske izzive in lahko pomembno vplivajo na stanje že zgrajenih nadzemnih in podzemnih objektov. Lu s soavtorji [Lu, 2020] je predstavil napredno numerično metodo za analizo vplivov naraščajočih nivojev podzemnih vod na obstoječi predor podzemne železnice. Sun s sodelavci [Sun, 2024] je opravil obsežne študije in podal analitično rešitev za določitev najmanjše višine nadkritja, ki je potrebna za zagotavljanje stabilnosti predorov proti delovanju vzgona v mehkih hribinah.

Ekstremni naravni pojavi, kot so cunamiji, plimovanje, poplavljanje rek, hiter vodni ali blatni tok kot posledica intenzivnih padavin, nepričakovano zvišanje nivojev podzemnih vod, lahko preplavijo območja z grajenimi objekti in posledično povzročijo njihove dvige, posedke in zasuke. Obvladovanje vplivov navedenih naravnih pojavov na grajene objekte predstavlja zahtevne inženirske in raziskovalne izzive ([Bikçe, 2018a], [Drdacky, 2010], [Fu, 2015]). Bikçe s sodelavci [Bikçe, 2018a] je na primeru poslovne stavbe z vkopanimi kletnimi etažami, ki so bile med gradnjo poplavljenе, raziskoval vplive vzgona na nastanek obsežnih poškodb konstrukcij obravnavane stavbe. Avtorji nazorno prikažejo posledice prekomernega vpliva vzgona na objekte med njihovo gradnjo in poudarjajo pomen ustreznega upoštevanja vzgona že pri načrtovanju objektov. Drdacky [Drdacky, 2010] je analiziral karakteristične primere poškodb objektov kulturne dediščine ob poplavih. V študiji navaja, da lahko obtežbe, kot so horizontalni tlaki visokih vod, vzgon, dinamični vplivi valov in plavajočih predmetov, spremenjeni pogoji temeljenja, nastanek poplavnih pregrad, ledene ujme in poplavljalni učinki, povzročijo resne poškodbe objektov. Vsi navedeni vplivi lahko nastopijo tudi sočasno, v teh primerih pa so njihovi škodljivi vplivi še izrazitejši.

Monitoring objektov, grajenih v tleh s prisotnimi podzemnimi vodami, vključno z monitoringom podzemnih voda, omogoča pravočasno odkrivanje morebitnih negativnih vplivov vzgona, zgodnje prepoznavanje poškodb in podpira informirano odločanje o vzdrževanju teh objektov. Prepozno sprejemanje odločitev lahko povzroči nastanek in napredovanje poškodb podzemnih objektov do takšne mere, da njihova sanacija ni več mogoča in jih je treba porušiti [Song, 2017].

V računskih analizah deloma ali v celoti vkopanih podzemnih konstrukcij se njihova stabilnost praviloma preveri tudi z izračunom varnostnega faktorja proti delovanju vzgona, pri čemer se upošteva ravnovesje navpičnih sil [Fu, 2015]. Čeprav postopki za določitev varnosti proti delovanju vzgona v predpisih in standardih nekaterih držav niso podrobneje določeni, je zahteva po preverjanju vplivov vzgona vključena v nekatere mednarodne standarde, kot je npr. Evrokod 7 [SIST EN 1997-1:2004, 2005]. V tem standardu, poglavje 2.4.7.1 (1), je navedeno:

"Kjer je to smiselno, je treba preveriti, da niso presežena naslednja mejna stanja: izguba ravnovesja konstrukcije ali tal zaradi dvigov, ki jih povzroči tlak vode (vzgon) ali drugih vertikalnih vplivov."

Projektanti pristaniških in obalnih konstrukcij običajno ne podcenjujejo tveganj, povezanih z vzgomom [Bikçe, 2018a], vendar navedenega ne moremo trditi tudi za projektante konstrukcij, grajenih na območjih brez stalnih površinskih ali podzemnih vod. Glede na specifičnosti območja gradnje je smiselno pričakovati, da bodo projektanti upoštevali vplive vzgona v vseh bistvenih fazah gradnje kot tudi v obdobju obratovanja objektov [Fu, 2015]. Čeprav standardi, kot npr. omenjeni Evrokod 7 [SIST EN 1997-1:2004, 2005], tej problematiki namenijo ustrezno pozornost, se pomanjkljiva implementacija v standardih podanih navodil in nerazumevanje temeljnih konceptov vzgona še vedno odraža v primerih resnih poškodb objektov, ki so bili izpostavljeni njegovemu prekomernemu delovanju.

Upoštevanje navedeno, bi morala, na območjih z visokimi, naraščajočimi ali nihajočimi nivoji podzemnih vod, odpornost podzemnih konstrukcij na delovanje vzgona predstavljati enega ključnih vidikov njihovega načrtovanja.

3 VZGON, POSEBNOSTI IN UKREPI PRI NAČRTOVANJU OBJEKTOV

Kot že omenjeno, je ob načrtovanju objektov na območjih s prisotnimi podzemnimi vodami treba ustrezno pozornost nameniti delovanju vzgona na te objekte. Preveritev odpornosti deloma ali v celoti potopljenih objektov je nujno izvesti za vse faze njihove gradnje kot tudi za fazo njihovega rednega obratovanja. Kljub dejstvu, da standardi, kot je npr. Evrokod 7 [SIST EN 1997-1:2004, 2005], podajajo ustrezna navodila, se v vsakdanji inženirski praksi še vedno pojavljajo težave.

Stabilnost proti delovanju vzgona se dokaže z izračunom varnostnega faktorja, ki predstavlja razmerje med lastno težo ter stalnimi obtežbami objekta in vzgomom, ki mu je izpostavljena konstrukcija objekta. Vrednost tega varnostnega faktorja mora vsekakor presegati 1,0. V nadaljevanju predstavimo osnovna načela preverjanja podzemnih konstrukcij na delovanje vzgona, ki so predstavljena v znanstveni literaturi ([Bikçe, 2018a], [Fu, 2015]) in usmeritve ter navodila, kot jih podaja standard Evrokod 7 [SIST EN 1997-1:2004, 2005].

Na trdno telo, potopljeno v mirujočo tekočino, deluje sila vzgona. Sila vzgona deluje v nasprotni smeri sile teže in je, skladno z Arhimedovim zakonom, enaka teži izpodrinjene tekočine. Sila vzgona F_b je enaka produktu prostornine izpodrinjene tekočine V , gostote izpodrinjene tekočine ρ_f in gravitacijskega pospeška g :

$$F_b = V \cdot \rho_f \cdot g. \quad (1)$$

V skladu s pravilnikom GB 50007-2011, Code for design of building foundation, ki ga v prispevku omenja Fu s sodelavci [Fu, 2015], je izračun stabilnosti proti delovanju vzgona obvezen in mora biti natančno izveden v primeru, ko bi se podzemni objekt zaradi vzgona lahko dvignil. V [Fu, 2015] je predstavljen tudi pogoj, s katerim naj bi bila zagotovljena stabilnost objekta proti delovanju vzgona:

$$G_k/N_{w,k} \geq K_w, \quad (2)$$

kjer G_k predstavlja lastno težo in stalno obtežbo objekta, $N_{w,k}$ je vrednost vzgona, K_w pa varnostni faktor proti delovanju vzgona z najnižjo predpisano vrednostjo 1,05. Avtorji prispevka [Fu, 2015] predlagajo tudi višjo vrednost varnostnega faktorja K_w , upoštevaje stopnjo zahtevnosti različnih inženirskih objektov.

Skladno s standardom Evrokod 7 [SIST EN 1997-1:2004, 2005] je treba varnost delno ali v celoti vkopanih objektov pred negativnim delovanjem vzgona preveriti na naslednji način:

$$\frac{E_{stb,d}}{E_{dst,d}} = \frac{\gamma_{G,stb} \cdot G}{\gamma_{Q,dst} \cdot B} \geq 1, \quad (3)$$

kjer sta $E_{stb,d}$ in $E_{dst,d}$ računski vrednosti ugodno delujočih oziroma neugodno delujočih vplivov. G predstavlja lastno težo in stalne obtežbe objekta, B silo vzgona, $\gamma_{G,stb}$ predstavlja delni varnostni faktor ugodno delujočih stalnih vplivov, $\gamma_{Q,dst}$ pa delni varnostni faktor neugodno delujočih spremenljivih vplivov. Priporočeni vrednosti omenjenih delnih varnostnih faktorjev skladno s standardom Evrokod 7 [SIST EN 1997-1:2004, 2005] sta $\gamma_{G,stb}=0,9$ in $\gamma_{Q,dst}=1,5$.

Toda skladno z [Bond, 2008], kjer so podana dodatna pojasnila načel standarda Evrokod 7 [SIST EN 1997-1:2004, 2005], so vrednosti upoštevanih delnih varnostnih faktorjev pri obtežbi vode predmet obsežnih diskusij v geotehniški stroki. Ta naj bi predstavljala relativno dobro poznano obtežbo, še posebej, če je njen najvišji možni nivo blizu površja. Tako je predlagan inženirski pristop, kjer se, za nivoje podzemnih vod do najvišjega normalnega nivoja, ki je potrjen z večletnimi meritvami, obtežba vode poveča z delnim varnostnim faktorjem $\gamma_{Q,dst}=1,35$. Če pa bi nivo podzemnih vod dosegel najvišji možni nivo, pa naj bi se obtežba vode množila z delnim varnostnim faktorjem $\gamma_{Q,dst}=1,0$.

Če, ob predhodno navedenem, enačbo (3) pretvorimo v primerljivo obliko enačbe (2), bi, skladno s standardom Evrokod 7 [SIST EN 1997-1:2004, 2005] in [Bond, 2008], varnostni faktor proti delovanju vzgona lahko zavzel naslednje vrednosti:

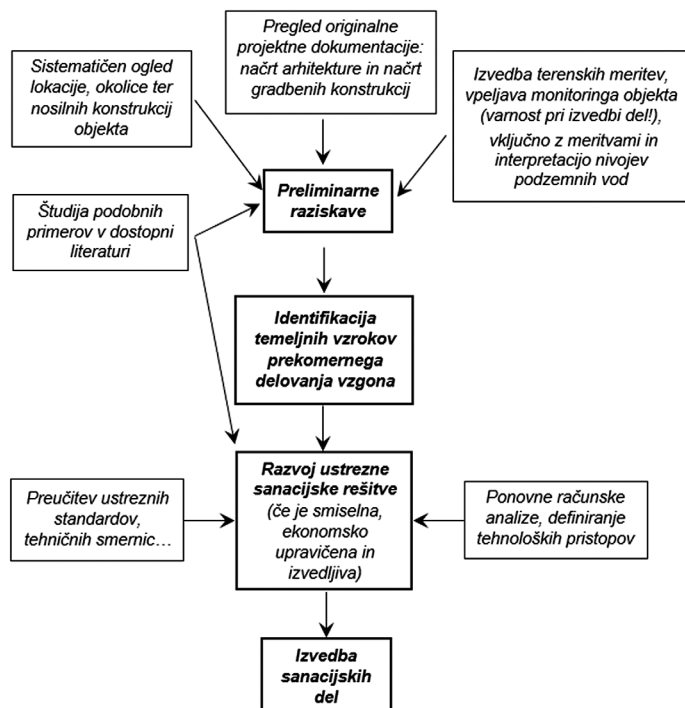
$$F_s = \frac{G}{B} \geq \frac{\gamma_{Q,dst}}{\gamma_{G,stb}} = \text{od } \frac{1,0}{0,9} \text{ do } \frac{1,35}{0,9} = \text{od } 1,11 \text{ do } 1,50. \quad (4)$$

V primerih, ko lastna teža ter stalne obtežbe objekta same ne zagotavljajo zadostne varnosti pred negativnim delovanjem vzgona, je mogoče uporabiti več različnih ukrepov. Podzemni objekt lahko s posebnimi strižnimi čepi ali sidri povežemo z obodno zaščitno masivno armiranobetonsko konstrukcijo gradbene jame, uporabiti pa je mogoče tudi geotehnična sidra [Bhaud, 2014]. Kadar bi delovanje vzgona lahko povzročilo težave že med gradnjo, ko končni nivoji lastne teže in stalnih obtežb konstrukcije še niso zagotovljeni, je mogoče objekt v gradnji tudi začasno dodatno obtežiti, npr. z uporabo vreč, napolnjenih s peskom, ki se vgradijo nad sistem temeljenja objekta [Fu, 2015]. Pri nedokončanem objektu je mogoče sprejeti tudi inženirski ukrep, s katerim dopustimo, da voda ob ekstremnih dogodkih poplavi notranjost objekta.

4 METODOLOGIJA

Ko prekomerni vplivi vzgona na že zgrajene objekte ali objekte med gradnjo postanejo očitni in se praviloma kažejo v obliki dvigov, zasukov objektov, razpok itd., je nastalo stanje nujno obravnavati sistematično.

Na sliki 1 prikazujemo diagram poteka dela, z uporabo katerega je mogoče ugotoviti temeljne vzroke, ki so pripeljali do škodljivega vpliva vzgona na objekt. Če je to tehnološko izvedljivo, smiselno ter ekonomsko upravičeno, je mogoče izvesti postopek sanacije, s katerimi te prekomerne vplive omejimo ali tudi v celoti odpravimo.



Slika 1. Diagram poteka dela za ugotavljanje vzrokov prekomernega delovanja vzgona in razvoj sanacijskih ukrepov

Če se dela lahko izvajajo varno, se najprej izvede sistematičen ogled lokacije objekta, njegove okolice ter pregled nosilnih konstrukcij. Izdelata se t. i. kataster poškodb objekta z meritvami premikov, zasukov, razpok itd., ki so nastali kot posledica delovanja vzgona. Poleg navedenega je treba temeljito preučiti vso razpoložljivo projektno in drugo dokumentacijo objekta, kot so poročila o preiskavah temeljnih tal in arhivske meritve nivojev podzemnih vod. Vsekakor se pregledajo tudi načrti s področja arhitekture vključno z detajli in načrti s področja gradbeništva z izračuni, ki dokazujejo stabilnost obstoječe konstrukcije proti delovanju vzgona.

Že v fazi preliminarne raziskave je smiselno v razpoložljivi literaturi poiskati podobne primere objektov, poškodovanih zaradi delovanja vzgona. Če je le mogoče, se vzpostavijo meritve nivojev podzemnih vod neposredno na lokaciji objekta s piezometri in monitoring oziroma spremljanje stanja nosilnih konstrukcij objekta. To lahko vključuje preproste meritve, kot so npr. opazovanje delovanja razpok z namenskim merilom in meritve dviga ali posedenja objekta z uporabo standardnega merilnega traku. Priporočljivo je, da se čim prej vpelje tudi geodetska spremljava stanja poškodovanega objekta. Pred nadaljevanjem del je treba monitoring izvajati toliko časa, da se prepoznajo zakonitosti spreminjanja nivojev podzemnih vod kot tudi zakonitosti obnašanja objekta. Na podlagi navedenih aktivnosti bo mogoče vsaj okvirno prepoznati temeljne vzroke prekomernega delovanja vzgona na poškodovani objekt.

Da bi bilo mogoče omejiti ali v celoti odpraviti vzroke prekomernega vzgona, je v fazi razvoja ustrezne sanacijske rešitve smiselno podrobno preučiti literaturo, ki se navezuje na podobna stanja objektov. V tej fazi se preučijo tudi standardi, tehnične smernice in predpisi, ki podajajo strokovna navodila, kako obravnavati vplive vzgona na objekte, ki so deloma ali v celoti potopljivi. Za omejitev ali odpravo škodljivih vplivov vzgona je treba izdelati projektno dokumentacijo, katere sestavni del morajo biti tudi verodostojne računske analize stabilnosti proti delovanju vzgona. Praviloma se razvije tudi posebna tehnološka rešitev, ki predstavlja osnovo za izvedbo sanacijskih del.

V specifičnih primerih so lahko okoliščine izvedbe sanacijskih del tehnološko zelo zahtevne ali pa so poškodbe konstrukcij objekta zaradi prekomernega vzgona tako obsežne, da izvedba sanacijskih del ni ekonomsko upravičena in je treba objekt porušiti [Bikçe, 2018a].

5 ŠTUDIJA PRIMERA

5.1 Splošno

V tem poglavju bomo predstavili trietažni objekt podzemnih garaž, ki ga je poškodoval prekomerni vzgon. Po okvirno osmih letih obratovanja se je objekt v obdobju le treh dni neenakomerno dvignil. Nerazumljivo je bilo, zakaj se je objekt dvignil šele po tako dolgem obdobju po dokončanju gradnje, tudi ob dejstvu, da pred dvigom na širši lokaciji ni bilo ekstremnih padavinskih dogodkov, poplav, potresov ali drugih izrednih dogodkov, ki bi lahko povzročili nenaden in nepredviden dvig nivojev podzemnih vod ali npr. likvifikacijo temeljnih tal.

Poškodbe objekta in okolice, ki so prikazane na sliki 2, so se odražale v obliki dvigov in zasukov objekta, poškodb na stikih s sosednjimi objekti, deformiranja bližnjih vozniških površin in razpok v armiranobetonski konstrukciji objekta, skozi katere je podzemna voda vtekala v notranjost garaž. Podzemne vode so vtekale tudi v notranjost kletne etaže sosednjega objekta 1 (glej tudi sliko 6) tik ob obravnavani podzemni garaži. Ob preliminarne ogledu objekta smo ugotavljali tudi, da so bili v preteklosti že izvedeni poskusi tesnjenja teh razpok, vzrokom za vtekanje podzemnih vod skozi »vodotesno« izvedene obodne stene garaž pa očitno ni bila namenjena primerna in zadostna pozornost.

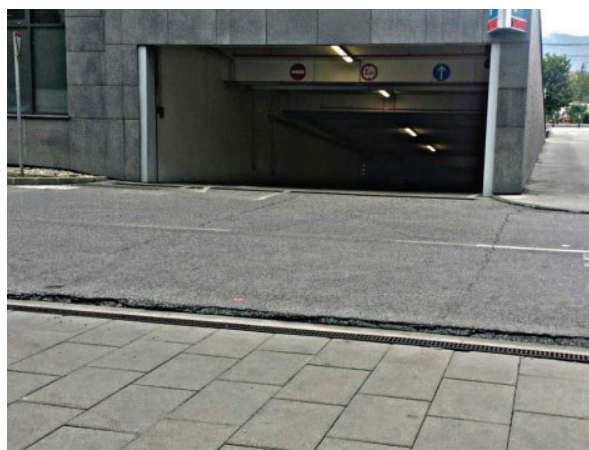
Začetne geodetske meritve so pokazale, da se je podzemna garaža, na nivoju temeljenja v tretji podzemni etaži, v primerjavi s projektnimi nivoji, dvignila neenakomerno. Na jugozahodnem vogalu so dvigi znašali okvirno 1,7 cm, vzdolž vzdolžne obodne stene garaž pa kar do 14,5 cm. V več mesecih izvajanja geodetskih meritev, od poletja do pozne jeseni 2018, se je objekt postopoma posedel, s posedki vse do 3,2 cm. Očitno je bilo, da podzemna garaža še vedno ni stabilna.

Kot bomo pokazali v nadaljevanju, je bilo že v fazi projektiranja predvideno, da bo podzemna garaža grajena v območju s prisotno podtalnico.

Po pregledu obsežne literature s podobno tematiko smo ugotovili, da ta obravnava predvsem podzemne objekte z izvedenim t. i. nadkritjem, ki praviloma deluje ugodno in pomaga stabilizirati konstrukcije, izpostavljene obtežbam vzgona ([Lu, 2020],



Slika 2. Dvigi obravnavane podzemne garaže in poškodbe, ki so se pojavile na stikih z okoliškimi objekti



Slika 3. Poškodbe bližnjih vozni površin, ki se kažejo v obliki razpok in diferenčnih dvigov



Slika 4. Neuspeli poskusi tesnjenja razpok v vkopanih obodnih stenah in vtekanje podzemnih vod v notranjost garaž

[Sun, 2024]), objekte, ki so bili med gradnjo izpostavljeni prevelikemu vzgonu in jih je bilo treba porušiti [Bikçe, 2018a], ali objekte med gradnjo, ki so jim zagotovili stabilnost proti vzgonu z dodajanjem mas [Fu, 2015]. Analiz objekta z enakim ali podobnim stanjem in poškodbami v preučeni literaturi žal nismo odkrili.

Nad obravnavano trietažno podzemno garažo namreč niso bile zgrajene nadzemne etaže ali nadkritje, ki bi dodatno stabiliziralo objekt proti delovanju vzgona, predvsem pa je podzemna garaža praktično brez večjih posebnosti, razen prikazanih razpok in zamakanj, delovala skoraj desetletje po dokončanju gradnje.

Na konkretni študiji objekta, poškodovanega zaradi delovanja vzgona, želimo prikazati dopolnjevanje akademskega in praktičnega, inženirskega področja. Prikazati želimo, kako ravnati v situaciji, ko stanje objekta zahteva ukrepanje za omejitev napredovanja njegovih poškodb. Sistematično bo analiziran nastanek vzrokov za dvige podzemne garaže, ki so, kot bo pokazano, očitno nastali kot posledica prekomernega vzgona. Prikazan bo tudi razvoj tehnološke rešitve, s katero smo dvignjeno podzemno garažo nadzorovano spuščali in se po dokončanju posegov približali njenim projektnim nivojem. Aktivnosti, ki smo jih opravili, sledijo osnovnim korakom metodologije, predstavljene v predhodnem poglavju.

5.2 Sistematičen ogled lokacije, okolice in stanja privzdignjene konstrukcije

Trietažna podzemna garaža s tlorisnimi dimenzijami 70,2 m × 43,2 m je bila zgrajena na območju s praktično ravnim terenom, približno 1900 m od večjega vodotoka in na območju, kjer je prisotna podtalnica. Urejene parkirne površine nad vkopanim objektom nivojsko okvirno sovpadajo z nivojem okoliškega terena in so povezane z voznimi površinami ob sosednjih objektih. Objekt nima nadzemnih etaž, ki so sicer značilne za številne podzemne objekte v urbanih središčih.

Na zahodni strani so tik ob obravnavani podzemni garaži kletne etaže sosednje stavbe, klet sosednje stavbe na njeni južni strani pa je oddaljena približno 3,5 metra.

Izvedene so bile predhodne, enostavne meritve dvigov podzemne garaže z uporabo tračnega metra, ki jih prikazujemo tudi na sliki 2. Na mestih, kjer se garaža navezuje na okoliške objekte, so se pojavile poškodbe v obliki deformacij voznih površin, ki so predstavljene na sliki 3. Kot prikažemo na sliki 4, so se v armiranobetonskih obodnih stenah podzemne garaže pojavile številne razpoke, skozi katere je podzemna voda vtekala v notranjost garažnih prostorov.

5.3 Pregled poročila o preiskavah temeljnih tal

Na območju gradnje z okvirno površino 5000 m² je bilo izvedenih deset raziskovalnih vrtin globine do 25 m. V preglednici 1 je predstavljena karakteristična sestava temeljnih tal na območju obravnavane garaže z rezultati SPT-testov. Ta je grafično predstavljena tudi na sliki 5.

Globina (m)	Profil tal	SPT - N (št. udarcev)
0,00–1,30	umetno nasutje	/
1,30–2,30	melj srednje in nizke plastičnosti (MI/ML)	10–14
2,30–3,90	dobro zrnat pesek (SW)	8–22
3,90–7,60	dobro zrnat gramoz (GW)	> 50
7,60–25,00	melj/glina (MI/CI)	> 50

Preglednica 1. Karakteristična sestava temeljnih tal in rezultati SPT-testov, pridobljeni iz raziskovalnih vrtin

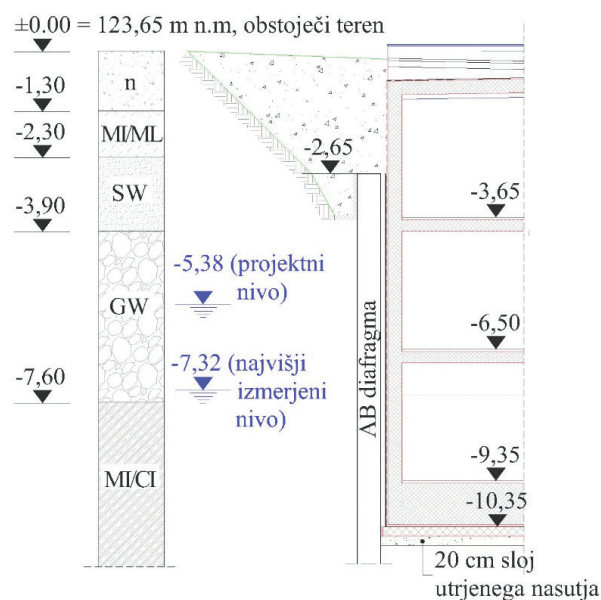
5.4 Preiskave nivojev podzemne vode

Po temeljitem pregledu originalne projektne dokumentacije smo ugotovili, da je bila podzemna garaža projektirana na arhivske meritve nivojev podtalnice v piezometru, ki se je nahajal 300 m od območja gradnje. Projektni nivo podtalnice je znašal 118,27 m n. m. oziroma 5,38 m pod površino tal. Tako je bilo predvideno, da ob najvišjem nivoju podtalnice nad dnom temeljne plošče nastopi potopitev garaže za okvirno 4,9 m.

Po zaznanem dvigu garaže je bil ob njenem jugovzhodnem vogalu vgrajen dodatni piezometer za spremljanje nivojev podtalnice neposredno ob objektu. Meritve nivojev podtalnice v tem piezometru so predstavljene v preglednici 2. Iz njih je

meritev št.	datum	nivo podzemne vode, merjeno od terena [m]	absolutni nivo podzemne vode [m n. m.]	ocenjena potopitev garaže [m]
1	22. 8. 2018	7,32	116,325	3,025
2	24. 10. 2018	7,56	116,085	2,785
3	2. 11. 2018	7,54	116,105	2,805
4	6. 11. 2018	7,59	116,055	2,755
5	29. 11. 2018	7,45	116,205	2,905
6	3. 1. 2019	7,40	116,255	2,955
7	5. 2. 2019	7,67	115,985	2,685

Preglednica 2. Meritve nivojev podtalnice v dodatno vgrajenem piezometru ob jugovzhodnem vogalu garaže



Slika 5. Prerez robnega območja podzemnih garaž z varovalno konstrukcijo gradbene jame, sestava temeljnih tal s projektnim in najvišjim izmerjenim nivojem podzemnih vod

razvidno, da so nivoji podtalnice v obdobju okvirno pol leta, v neposredni bližini garaže, nekoliko nihali (115,985 m n. m.–116,325 m n. m.), vendar so bili ti skoraj 2 m in več pod nivojem podtalnice, ki je bil upoštevan v originalnem statičnem izračunu.

Na sliki 5 je na prikazanem prerezu robnega območja podzemnih garaž grafično ponazorjen tudi nivo podtalnice, ki je bil upoštevan pri izdelavi projektne dokumentacije in njen najvišji izmerjen nivo skladno z rezultati meritev, podanimi v preglednici 2.

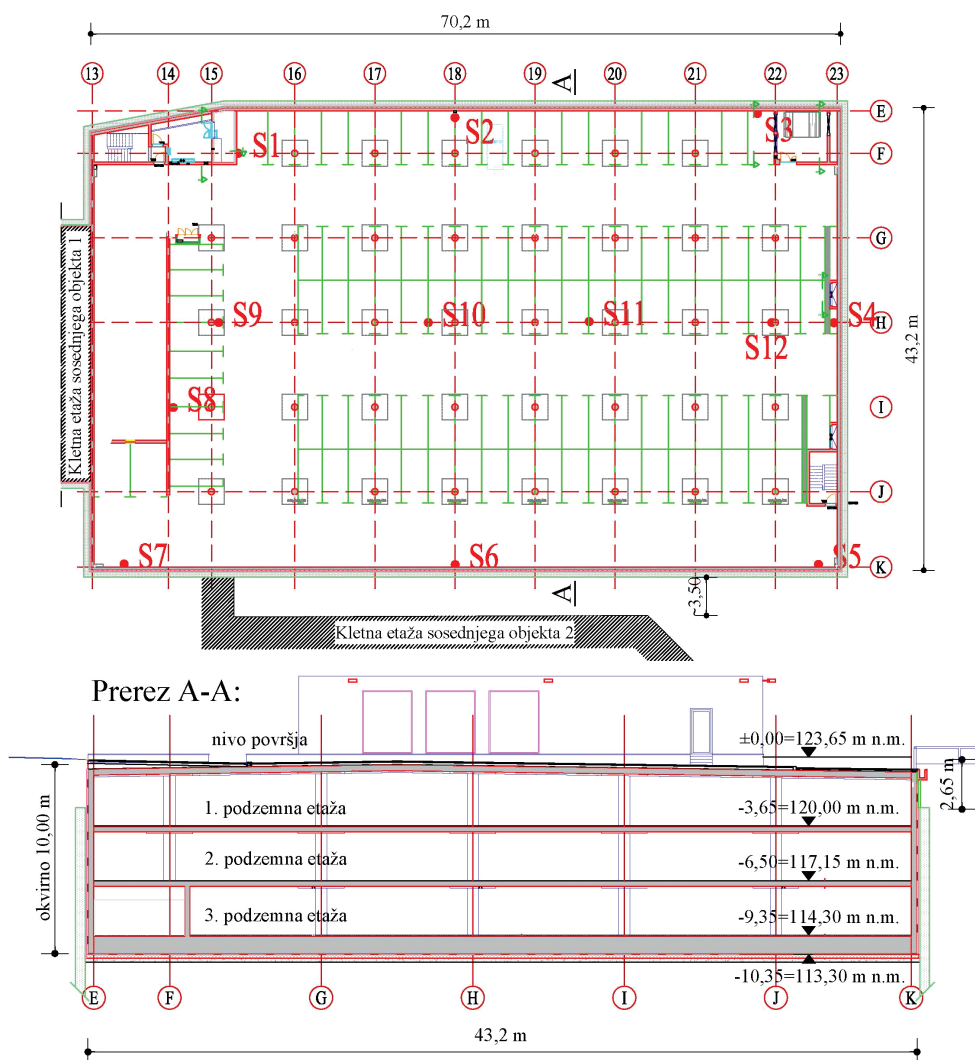
5.5 Pregled načrta arhitekture z detajli, varovalna konstrukcija gradbene jame in tehnološki postopki gradnje

Kot prikazujemo na sliki 6, je bila trietažna podzemna garaža, s tlorsnimi dimenzijami 70,2 m × 43,2 m zgrajena v gradbeni jami, z dnem temeljne plošče na nivoju okvirno 10,35 m pod urejenim okolnim terenom. Bruto površina vsake podzemne etaže je okvirno 3020 m², skupna lastna teža in stalna obtežba konstrukcije pa znaša skoraj 190 MN (mase 19.000 ton).

Nosilna konstrukcija podzemne garaže je v celoti armirano-betonska. Navpične konstrukcijske elemente tvorijo obodni zidovi debeline 30 cm in okrogli notranji stebri premera 60 cm. Vodoravne nosilne elemente predstavljajo 95 cm debela temeljna plošča, medetažne plošče debeline 25 cm in vrhnja, stropna plošča debeline 30 cm. Medetažne in stropna plošča so nad vsemi notranjimi stebri lokalno ojačane z vutami. Po preverjanju bistvenih dimenzij obravnavane stavbe smo ugotovili, da je bila dimenzijsko zgrajena v skladu z arhitekturno zasnovo.

Varovalno konstrukcijo gradbene jame, ki je prikazana tudi na sliki 7, je predstavljala 50 cm debela armiranobetonska diafragma, ki je bila nivojsko sidrana z vgradnjo začasnih geotehničnih sider. Zgornji rob diafragme je bil izveden okvirno 2,65 m pod končno urejenim nivojem okolnega terena.

Izkopu gradbene jame znotraj oboda izvedene varovalne diafragme je sledila izvedba temeljenja garaž. Na 20-centimetrski sloj utrjenega nasutja se je izvedla armiranobetonska plošča debeline 20 cm. Na njeno površino so bili vgrajeni



Slika 6. Tloris (vključno z razporeditvijo geodetskih reperjev v 3. podzemni etaži) in karakteristični prečni prerezi obravnavane garaže

hidroizolacijski sloji z dodatnim vrhnjim zaščitnim slojem betona (5 cm). Navedeno je predstavljalo podlago za izdelavo armiranobetonske temeljne plošče debeline 95 cm.

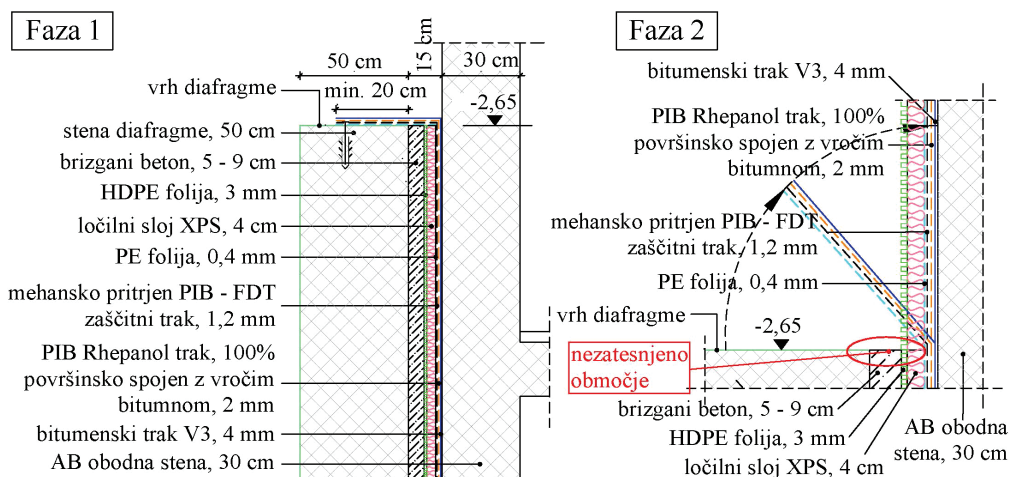
diafragme, z vodoravnim zaključkom, pritrjeni PE-folija, zaščitni trak PIB-FDT, PIB Rhepanol in bitumenski trakovi. V drugi fazi, po dokončanju obodnih zidov garaže nad nivojem vrha



Slika 7. Armiranobetonska diafragma, izkopna dela v gradbeni jami in izravnava površin diafragme s slojem brizganega betona

Kot je prikazano na sliki 7, so bile površine odkopane armiranobetonske diafragme izravnane z nanosom okvirno 5–9 cm sloja brizganega betona. Na tako pripravljeno površino sta se vgradila 3 mm HDPE-folija in ločilni sloj iz 4 cm debelih plošč iz ekstrudiranega polistirena. Na ta sloj se je namestil dodatni vodotesni sloj v obliki PE-folije in mehansko sidranega PIB-FDT zaščitnega traku. Sledila je vgradnja hidroizolacijskih trakov PIB Rhepanol z uporabo vročega bitumna in končno še vgradnja površinsko zlepljenih bitumenskih trakov. Po dokončani

diafragme, so se vodoravni zaključki hidroizolacijskih slojev premestili na zunanjo vertikalno površino obodnih zidov in se tudi podaljšali vse do vrha objekta. Slika 8 jasno prikazuje, da je v skladu z arhitekturno zasnovo vrh armiranobetonske diafragme, skupaj s HDPE-folijo in ločilnim slojem ekstrudiranega polistirena, po drugi fazi namestitve hidroizolacijskih slojev ostal nezatesnjen, torej brez ustreznih vodoravnih hidroizolacijskih zaključkov.



Slika 8. Prva in druga faza vgradnje hidroizolacijskih slojev ob vrhu armiranobetonske diafragme

izvedbi vseh hidroizolacijskih slojev se je pristopilo k izvedbi obodnih armiranobetonskih sten debeline 30 cm, ki so se gradile z uporabo enostranskih opažev.

Na sliki 8 je predstavljen arhitekturni detajl – izvedba hidroizolacijskih slojev ob vrhu armiranobetonske diafragme. Ti so se vgradili v dveh zaporednih fazah. V prvi fazi so bili na vrh

5.6 Pregled načrtov s področja gradbeništva z računskimi analizami

Po pregledu načrtov s področja gradbeništva smo ugotovili, da je bila opravljena precej preprosta analiza stabilnosti objekta proti delovanju vzgona, ki pa ni skladna z načeli standarda

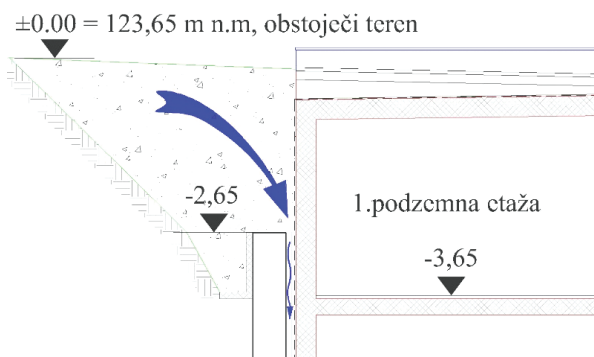
Evrokod 7 [SIST EN 1997-1:2004, 2005] in Bond [2008]. V izračunih je bilo upoštevano, da znašata lastna in stalna obtežba podzemne garaže 59 kN/m^2 . Kot že omenjeno, je bilo predvideno, da lahko, merjeno od dna temeljne plošče, največja globina potopitve objekta doseže okvirno $4,9 \text{ m}$. Tako je bil izračunan naslednji varnostni faktor F_s proti delovanju vzgona:

$$F_s = \frac{G}{B} = \frac{59 \text{ kN/m}^2}{4,9 \text{ m} \cdot 10 \text{ kN/m}^3} = 1,2 > 1. \quad (5)$$

Kljub navedenemu pa še vedno ni bilo razumljivo, zakaj je podzemna garaža skoraj desetletje od dokončanju njene gradnje obratovala brez težav, povezanih z vzgonom.

5.7 Najverjetnejši razlog dviga podzemne garaže

Kot smo predhodno predstavili v preglednici 2, so meritve nivojev podtalnice tik ob objektu izkazovale nivoje, ki so bili za 2 m in več pod nivojem podtalnice, ki je bil upoštevan v originalnih računskih analizah. Na podlagi ugotovitev, da je znašala največja potopitev podzemne garaže $3,025 \text{ m}$ (v originalnih izračunih upoštevana potopitev $4,9 \text{ m}$), smo zaključili, da le podtalnica ni mogla povzročiti prekomernega vzgona in dviga objekta. Ob potopitvi garaže za $3,025 \text{ m}$ znaša namreč, skladno s standardom Evrokod 7 [SIST EN 1997-1:2004, 2005] in ob inženirsko celo prekomerno konservativnem upoštevanju $\gamma_{Q,dst}=1,5$, varnostni faktor proti delovanju vzgona $F_s=1,17>1$.



Slika 9. Območje netesnosti in vtekanja podzemne vode v prostor med zunanjo in notranjo steno "dvojne kadi" (levo) in vtekanje podtalnice v sloj utrjenega nasutja pod temeljno ploščo (desno)

Tako se nam je zastavilo naslednje vprašanje: "Ali je mogoče, da se neposredno ob objektu nahaja nivo podzemne vode (npr. ujeta voda), zaradi katerega bi lahko bila garaža izpostavljena prekomernemu vzgonu, ki bi povzročil njene dvige?"

Po podrobni preučitvi načrtov arhitekture smo ugotovili, da je bila podzemna obodna konstrukcija garaže zgrajena po sistemu "dvojne kadi". Zaščita gradbene jame v obliki armiranobetonske diafragme predstavlja njeno zunanjo steno, 30 cm debele obodne armiranobetonske stene garaže pa notranjo steno "dvojne kadi". Med zunanjo in notranjo steno "dvojne kadi" so nameščeni ločilni sloj v obliki plošč iz ekstrudiranega polistirena in hidroizolacijski sloji.

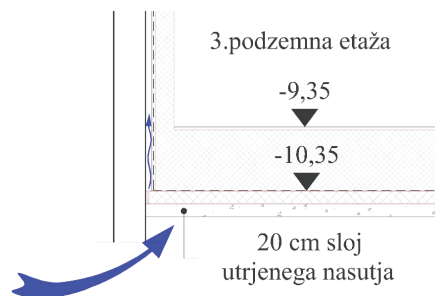
Na podlagi vseh zbranih podatkov smo ugotovili, da najverjetnejši vzrok za dvig garaže predstavlja neustrezno izveden detajl hidroizolacijskih slojev na vrhu diafragme v kombinaciji z dolgotrajnim vtekanjem in akumulacijo podzemne vode v

medprostoru "dvojne kadi". Navedeno nazorno prikazujemo na sliki 8 (druga faza vgradnje hidroizolacijskih slojev) in na sliki 9. Ker vrh vkopane armiranobetonske diafragme v času terenskih ogledov ni bil dostopen, smo našo hipotezo potrdili z dodatnimi raziskavami pred izvedbo sanacijskih del, ki so predstavljene v nadaljevanju prispevka.

Razumljivo je seveda tudi, da je podtalnica, po dokončanju gradnje, vtekala tudi pod objekt v območje sloja 20 cm utrjenega nasutja pod temeljno ploščo in se, kot je prikazano na sliki 9, v medprostoru "dvojne kadi" dvigovala do vzpostavitve njenega nivoja v okolni hribini.

Kot smo že omenili, se je podzemna garaža, tlorisno gledano, dvignila neenakomerno. Razlogov za navedeno je najverjetneje več, vendar menimo, da so bistveni naslednji:

1. trietažna podzemna garaža je zgrajena tik ob kletni etaži sosednje stavbe vzdolž njene zahodne stranice (kjer je bil izmerjen tudi najmanjši dvig), druge stranice garaže pa so omejene z armiranobetonsko diafragmo,
2. napetosti, ki so se med dvigovanjem razvile kot posledica trenja na površinah vkopanih obodnih sten garaže niso bile enake po vsem obodu podzemne garaže in
3. lastna teža in stalne obtežbe garaže niso enakomerno porazdeljene po njenem tlorisu.



5.8 Nadzorovano spuščanje dvignjene podzemne garaže

5.8.1 Uvod

Po preučitvi rezultatov večmesečnih geodetskih meritev in izvedbi terenskih pregledov je bilo mogoče zaključiti, da se konstrukcija podzemne garaže še vedno dviguje in na določenih delih celo poseda, torej ni stabilna. Da bi v največji možni meri omejili nastale posledice ter obseg nadaljnjih poškodb, je bilo nujno čim prej izvesti ustrezne sanacijske posege. Zaradi časovnih omejitev žal ni bilo mogoče izvesti podrobnejših numeričnih simulacij, dodati pa je treba, da bi bile dodatne računske analize objekta vsekakor koristne.

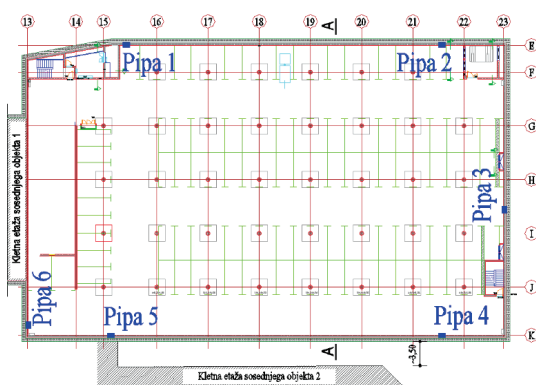
Cilj upravljavca objekta je bil, da se podzemna garaža po izvedenih sanacijskih ukrepih povrne v lego, kot jo je zavzemala

po končani gradnji. Tako je bil pripravljen projekt sanacije, ki je vključeval tudi razvoj tehnološke rešitve za nadzorovano odvajanje podzemne vode, ujete v medprostoru "dvojne kadi", in posledično nadzorovano spuščanje trietažne podzemne garaže.

5.8.2 Program nadzorovanega spuščanja

Program nadzorovanega spuščanja podzemne garaže so sestavljali naslednji bistveni koraki:

1. izdelava izpustnih mest v tretji kleti garaže, vključno z namestitvijo opreme za spremljanje tlaka in pretoka ujete podzemne vode iz prostora med zunanjo in notranjo steno "dvojne kadi",
2. izboljšanje in nadgradnja obstoječega geodetskega monitoringa garaže in njene okolice,
3. namestitev merilcev delovanja karakterističnih razpok v vseh etažah podzemne garaže.

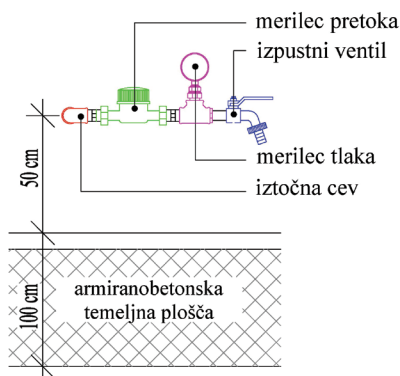


Ker je debelina obodne armiranobetonske stene znašala 30 cm, se je na predvidenih izpustnih mestih najprej, s tehnologijo kronskega vrtanja, izvedla izvrtina premera 50 mm in globine 25 cm. V tako pripravljene izvrtine so se namestili standardni injekcijski nastavki zunanjega premera 50 mm. Kot je prikazano na sliki 10, se je na zunanji navoj injekcijskega nastavka namestil standardni vodovodni ventil. Končna faza prevrtanja obodne stene, s katero smo dosegli vmesni prostor med notranjo in zunanjo steno »dvojne kadi«, v kateri naj bi bila ujeta podzemna voda, se je izvedla preko odprtega vodovodnega ventila in vzdolž notranjosti vgrajenega injekcijskega nastavka.

Slika 11 prikazuje, da so bila vsa izpustna mesta opremljena tudi z merilnikom vodnega tlaka (manometrom) z območjem meritev do 0,6 bara, z občutljivostjo 0,01 bara ter z merilnikom pretoka vode.



Slika 10. Tlorisna razporeditev izpustnih mest za odvajanje ujete vode, injekcijski nastavki z nameščenim in odprtim ventilom ter iztekanje ujete vode po prevrtanju notranje stene "dvojne kadi"



Slika 11. Merilna oprema izpustnega mesta za nadzorovano odvajanje ujete podzemne vode

5.8.3 Izpustna mesta ujete vode

V obodnih stenah tretje kleti podzemne garaže je bilo, 50 cm nad vrhom temeljne plošče, vzpostavljenih šest izpustnih mest za odvajanje ujete podzemne vode. Tlorisna razporeditev izpustnih mest, označenih kot Pipa 1–6, je prikazana na sliki 10. Ujeta voda se je nadzorovano odvajala v notranjost garažnih prostorov, od tam pa preko zbirnega jaška z vgrajeno črpalko v črpalni sistem odvajanja površinskih voda s parkirnih mest.

5.8.4 Geodetski monitoring

Za spremljanje vertikalnih premikov podzemne garaže in njene okolice je bila vzpostavljena geodetska mreža 27 geodetskih reperjev. Poleg navedenega so bile izvajane tudi meritve vertikalnosti vseh štirih notranjih vogalov podzemne garaže. Vzpostavljena je bila mreža naslednjih geodetskih reperjev:

1. 4 geodetski reperji, označeni z G1–G4, na parkirnih površinah vrhnje etaže,

- 2.12 geodetskih reperjev z oznakami S1-S12 na površinah tretje podzemne etaže (njihova tlorsna razporeditev je prikazana tudi na sliki 6),
- 3.11 geodetskih reperjev z oznakami K1, R1-R10, nameščenih na okoliških stavbah.

Za določitev višine izhodišnega geodetskega reperja P1, ki je bil okvirno 50 m severozahodno od stranice podzemne garaže, na kateri so bili izmerjeni manjši dvigi, je bila uporabljena oprema TRIMBLE R8s (GNSS). Okvirno 200 m od reperja P1 je bil, za spremljavo njegove stabilnosti, vzpostavljen dodatni geodetski kontrolni reper. Meritve višin vzpostavljenih geodetskih reperjev so bile izvedene z uporabo visokonatančnega digitalnega nivelirja Stonex D1 s podatkom, da je standardna deviacija 1,5 mm na kilometer dvojnega nivelmana.

5.8.5 Monitoring razpok v armiranobetonskih konstrukcijah garaže

Z namenom spremljanja morebitnega napredovanja obstoječih razpok v armiranobetonskih obodnih stenah in medetažnih ploščah garaže se je vzpostavil tudi njihov monitoring. Rezultati tega monitoringa so bili namenjeni takojšnjemu ukrepanju oziroma prekinitvi postopka izpuščanja ujetih vod, če bi se izkazalo, da se v armiranobetonskih konstrukcijah pojavljajo nove, nepredvidene razpoke ali se obstoječe razpoke nenadzorovano širijo.

Sistem spremljanja razpok je vključeval 22 razpok v najnižji, tretji podzemni etaži, 24 razpok v drugi etaži in deset razpok v najvišji, prvi etaži garaže. Meritve širin razpok so bile izvajane na obstoječih, najširših razpokah, ki so bile bodisi opremljene s kovinskimi čepi, na katerih so se izvajale meritve poligona, bodisi so bile preprosto opremljene s tankimi stekelci, ki so bila nameščena nad razpokami. Poligonske meritve širin razpok, z natančnostjo 0,01 mm, so se izvajale na desetih razpokah v tretji in na dveh razpokah v drugi podzemni etaži, spremljanje preostalih razpok pa je imelo kontrolni značaj.

5.8.6 Izvedba nadzorovanega spuščanja garaže in rezultati

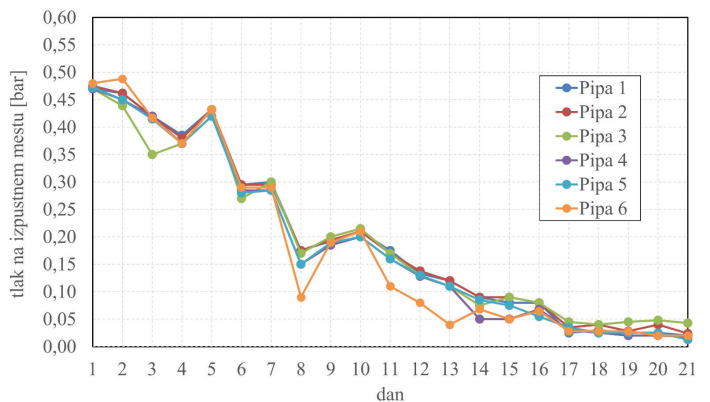
V obdobju obilnih padavin v jeseni 2019, ko se je glede na pretekle izkušnje pričakovalo nadaljnje dvigovanje podzemne garaže, se je pristopilo k nadzorovanemu izpustu ujete podzemne vode iz medprostora "dvojne kadi". Cilj spuščanja je bil podzemno garažo povrniti v lego, kot jo je zavzemala pred dvigom oziroma v njeno osnovno, projektirano lego.

Nadzorovan izpust ujete podzemne vode je trajal 21 dni, z nekaj prekinitvami, ki so skupaj trajale 35 ur. Te so bile potrebne za čiščenje merilne opreme na izpustnih mestih, saj je ujeta voda vsebovala tudi nekaj nečistoč. Izpust ujete podzemne vode je bil končan, ko se je tlak vode na manometrih izpustnih mest ustalil pod 0,03 bara, kar je pomenilo, da se nivo ujete vode v medprostoru "dvojne kadi" nahaja približno 80 cm nad vrhom armiranobetonske temeljne plošče.

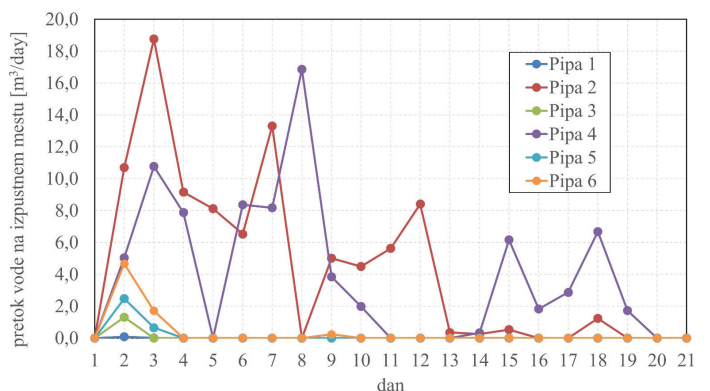
Na sliki 12 je prikazan časovni razvoj tlakov ujete podzemne vode na izpustnih mestih.

Na sliki 13 so prikazani izmerjeni dnevni pretoki, na sliki 14 pa skupni pretoki ujete podzemne vode na posameznih izpustnih mestih.

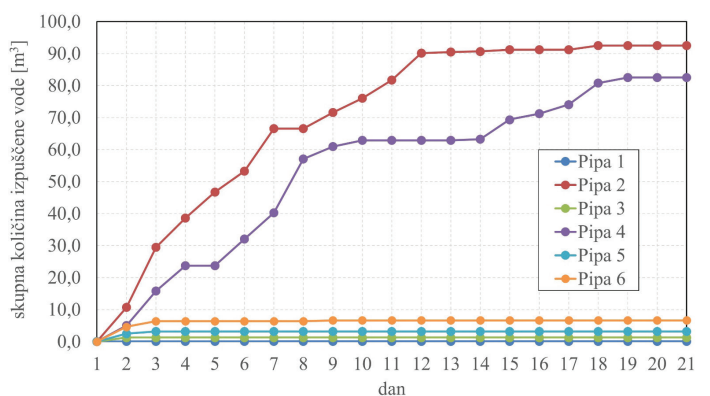
Monitoring karakterističnih razpok, preko katerih so bila nameščena kontrolna stekelca, je pokazal, da se ta, med nadzorovanim spuščanjem, niso poškodovale. V preglednici 3 so predstavljeni rezultati poligonskih meritev širin razpok v drugi in tretji podzemni etaži. Pozitivne vrednosti predstavljajo širjenje, negativne pa zapiranje razpok.



Slika 12. Časovni razvoj tlaka ujete podzemne vode na izpustnih mestih



Slika 13. Dnevni pretoki ujete podzemne vode na posameznih izpustnih mestih



Slika 14. Skupni pretoki ujete podzemne vode na posameznih izpustnih mestih

3. etaža	začetna meritev [mm]	končna meritev [mm]	razlika [mm]
R1	46,85	46,86	+0,01
R2	78,17	78,14	-0,03
R7	42,69	42,66	-0,03
R12	42,89	42,87	-0,02
NR3	44,84	44,81	-0,03
R17	43,25	43,25	±0,00
R23	40,32	40,32	±0,00
R28	38,56	38,58	+0,02
NR23	42,80	42,79	-0,01
NR27	39,14	39,14	±0,00
2. etaža			
NR9	47,78	47,77	-0,01
NR23	42,47	42,48	+0,01

Preglednica 3. Rezultati poligonskih meritev širin karakterističnih razpok v drugi in tretji etaži podzemne garaže (R – monitoring vzpostavljen ob prvem pregledu, NR – ob dodatnem pregledu)

Na podlagi meritev razlik, ki so prikazane v zadnjem stolpcu preglednice 3, smo zaključili, da je večina razpok med spuščanjem objekta praktično mirovala.

Med postopkom spuščanja podzemne garaže je bilo opravljenih več geodetskih meritev višin vzpostavljene mreže re-

perjev, dodatne geodetske meritve pa so bile opravljene tudi po končanem postopku nadzorovanega spuščanja. V drugem in tretjem stolpcu preglednice 4 so prikazane projektne kote na mestih vgrajenih reperjev in prve meritve njihovih višin. Na podlagi teh podatkov so bili ocenjeni tudi dvigi podzemne garaže, ki so navedeni v četrtem stolpcu preglednice 4. V petem in šestem stolpcu te preglednice so prikazane meritve višin vzpostavljenih reperjev pred nadzorovanim spuščanjem in po njem. Na osnovi teh meritev so v zadnjem stolpcu preglednice 4 izračunani posedki garaže v postopku njenega nadzorovanega spuščanja.

Monitoring geodetskih točk, vzpostavljenih na okoliških objektih, je pokazal, da so rezultati meritev v območju natančnosti uporabljene geodetske opreme, kar pomeni, da na teh točkah, posledično pa tudi okoliških objektih, med postopkom nadzorovanega spuščanja garaže, ni bilo opaženih premikov.

5.8.7 Analiza rezultatov nadzorovanega spuščanja podzemne garaže

Na podlagi vseh preliminarno zbranih podatkov smo bili mnenja, da najverjetnejši vzrok za dvig obravnavane podzemne garaže predstavlja prekomerni vzgon, ki je nastopil kot posledica nenadzorovanega in dolgotrajnega vtekanja podzemnih vod v vmesni prostor »dvojne kadi« (glej tudi sliki 8 in 9). Ta hipoteza se je potrdila nemudoma po vzpostavitvi izpustnih mest, saj je ujeta voda začela iztekati iz prostora med diafragmo in obodnimi stenami garaže. Kot je razvidno s slike 12, so meritve tlaka ujetih vod na izpustnih mestih znašale 0,47 do 0,48 bar. Navedeno, upoštevaje dejstvo, da so bila izpustna mesta izvedena 1,50 m nad dnom temeljne plošče, ustreza potopitvi podzemne garaže za 6,20–6,30 m. Ugotovili smo, da nivo podzemne vode ob zunanjih površinah obodnih zidov garaže znatno presega najvišje arhivske meritve nivojev

reper	projektna kota [m n. m.]	višina (prva geodetska meritev) [m n. m.]	ocena dviga [cm]	višina (ob pričetku izpusta vode) [m n. m.]	višina (ob zaključku izpusta vode) [m n. m.]	posedek [cm]
1	2	3	3 - 2	4	5	5 - 4
S1	114,33	114,3921	6,21	114,3726	114,3726	0,00
S2	114,37	114,4309	6,09	114,4011	114,3761	-2,50
S3	114,37	114,4755	10,55	114,4432	114,3739	-6,93
S4	114,37	114,5146	14,46	114,4813	114,3865	-9,48
S5	114,37	114,4946	12,46	114,4610	114,3563	-10,47
S6	114,37	114,4538	8,38	114,4263	114,3667	-5,96
S7	114,4	114,4168	1,68	114,4035	114,3910	-1,25
S8	114,37	114,4038	3,38	114,3851	114,3790	-0,61
S9				114,3796	114,3734	-0,62
S10				114,4061	114,3773	-2,88
S11				114,4003	114,3637	-3,66
S12				114,3936	114,3649	-2,87

Preglednica 4. Reperji, meritve njihovih višin ter izračunani dvigi in posedki podzemne garaže

podtalnice tik ob objektu (potopitev garaže za 3,025 m, glej poglavje 5.4) kot tudi nivoje potopitve garaže, predvidene v originalnih računskih analizah (potopitev garaže za 4,9 m, glej poglavje 5.6). Nekontrolirano vtekanje, akumulacija in posledično dvigovanje nivojev ujetih podzemnih vod ob obodu objekta pri zasnovi objekta niso bili predvideni, posledično tudi projektantske računske analize objekta proti delovanju vzgona navedenega niso upoštevale.

Če na podlagi izmerjenih nivojev ujetih podzemnih vod ob objektu ponovno izračunamo varnostni faktor proti delovanju vzgona, na način, kot je to naredil projektant, torej skladno z enačbo (5), ki sicer ni skladna z veljavno zakonodajo, ugotovimo naslednje:

$$F_s = \frac{G}{B} = \frac{59 \text{ kNm}^{-2}}{6,20 \text{ m} \cdot 10 \text{ kNm}^{-2}} = 0,95 < 1. \quad (6)$$

Varnostni faktor proti delovanju vzgona, izračunan skladno z [Bond, 2008], ob upoštevanju $\gamma_{Q,dst}=1,35$, bi izkazoval vrednost 0,63, skladno z navodili standarda Evrokod 7 [SIST EN 1997-1:2004, 2005] pa še nižjo vrednost 0,57.

Na podlagi predstavljenega je razumljivo, zakaj se je obravnavana podzemna garaža dvignila, saj varnost pred neugodnim delovanjem vzgona očitno ni bila zagotovljena.

Upošteva se potopljene površine obodnih sten garaže, ocenjeno debelino sloja ujete vode v medprostoru »dvojne kadi« ter ocenjeno količino vode v gramozni blazini pod temeljno ploščo, smo domnevali, da bo količina ujete vode, ki jo bo treba odvesti med nadzorovanim spuščanjem podzemne garaže, znašala okvirno 150–200 m³. Vsota vseh skupnih pretokov na vseh izpustnih mestih je pokazala, da je iz medprostora »dvojne kadi« izteklo 186,12 m³ ujete vode, kar se dobro sklada z našo preliminarno oceno. Ob tem pa naj izpostavimo tudi pogosto laično in napačno prepričanje, da velika masa/teža popolnoma ali delno potopljenega podzemnega objekta, že sama po sebi, zagotavlja zadostno varnost pred negativnim delovanjem vzgona. Kot je bilo predhodno omenjeno, je lastna teža, vključno s stalnimi obtežbami obravnavane garaže, znašala skoraj 190 MN (mase 19.000 ton). Na podlagi skupne količine izpuščene vode je razvidno, da je teža vode, zajete v vmesnih slojih »dvojne kadi« in pod temeljno ploščo, ki je povzročila dvig garaže, znašala približno le 1 % lastne teže in stalnih obtežb garaže. Mogoče je sklepati celo o nižji vrednosti, če upoštevamo verjetnost, da je med 21-dnevnim nadzorovanim spuščanjem podzemna voda, ob občasnih intenzivnih padavinah, še naprej vtekala med armiranobetonsko membrano in obodne stene garaže.

Monitoring obstoječih razpok se je izvajal tudi zaradi zavedanja nevarnosti, da bi se med spuščanjem podzemna garaža lahko »zataknila« med stene obodne armiranobetonске diafragme. Navedeno bi lahko povzročilo resne dodatne poškodbe, najverjetneje v obliki novih ali širjenja obstoječih razpok. Postopek nadzorovanega spuščanja je bil zasnovan tako, da bi ga v tovrstnem primeru lahko takoj prekinili s preprostim zaprtjem ventilov na izpustnih mestih. Ker se preko kontrolnih razpok nameščena tanka stekelca niso poškodovale, lahko sklepamo, da se je podzemna garaža med nadzorovanim spuščanjem premikala praktično kot togo telo.

Primerjava prvih geodetskih meritev višin in meritev višin ob začetku izpustov ujetih podzemnih vod (glej tudi preglednico 4) je pokazala, da se je garaža že pred začetkom sanacijskih del nekoliko posedla. Ti posedki so znašali do 3,4 cm. Natančnega vzroka teh posedkov sicer ni bilo mogoče določiti, ocenjujemo pa, da jih je deloma mogoče pripisati vtekanju podzemne vode skozi razpoke v obodnih stenah v notranjost garaže in posledičnemu zniževanju nivoja ujete podzemne vode v medprostoru »dvojne kadi«. Poleg navedenega pa je mogoče tudi, da se je nivo ujete vode zniževal zaradi tendence izenačitve z nivojem okolne podtalnice. Med postopkom nadzorovanega spuščanja se je vzhodna stran garaže, ki se je tudi najbolj dvignila, posedla tudi do 10,47 cm. Če primerjamo projektne nivoje površin vozišča v tretji podzemni etaži z doseženimi nivoji po njenem spuščanju, je očitno, da se garaža ni popolnoma povrnila v njeno projektirano lego, se je pa tej zelo približala. O razlogih, zakaj se podzemna garaža ni povsem povrnila v prvotno lego, bi bilo mogoče obširno razpravljati. Kot morebitne razloge lahko zgolj izpostavimo npr. trenje oziroma neenakomerne strižne napetosti na površinah vkopanih obodnih sten garaže, ki so se razvile ob spuščanju ali morebitne lokalne spremembe nivoja in/ali strukture nasutja pod temeljno ploščo zaradi strujanja ujete vode med njenim izpustom.

6 SKLEP

Vplivom vzgona na podzemne objekte v območjih z visokimi ali nihajočimi nivoji podzemnih vod se pogosto namenja premalo pozornosti. V specifičnih okoliščinah lahko vzgon predstavlja resno tveganje za varnost podzemnih objektov že med njihovo gradnjo kot tudi v obdobju njihovega predvidenega obratovanja. Škodljivo delovanje vzgona na objekte se kaže v obliki njihovih značilnih poškodb, kot so dvigi, posedki, zasuki in npr. razpoke, preko katerih podzemne vode vtekajo v notranjost podzemnih objektov. Vendar ni nujno, da se bodo prekomerni vplivi vzgona pokazali že takoj po zaključku gradnje.

V prispevku smo predstavili trietažno podzemno garažo, ki je skoraj desetletje po njeni izgradnji obratovala brez bistvenih težav. Zaradi prekomernega vpliva vzgona pa se je v obdobju le treh dni dvignila. Temeljit pregled lokacije, okolice, stanja dvignjenega objekta ter originalne projektne dokumentacije je nakazoval, da se je garaža dvignila zaradi vzgona, ki je nastopil kot posledica dolgotrajnega in nadzorovanega vtekanja podzemnih vod v vmesni prostor »dvojne kadi«, ki sta jo sestavljali armiranobetonska varovalna konstrukcija gradbene jame in obodne stene garaže. Sanacijska dela so sledila osnovnim korakom v prispevku predstavljene metodologije, ki je omogočila tudi razvoj tehnološke rešitve za uspešno in nadzorovano spuščanje podzemne garaže.

Na podlagi temeljite obravnave konkretne, zaradi vzgona dvignjene podzemne garaže ugotavljamo, da je nujno že v fazi predhodnih terenskih preiskav zadostno strokovno pozornost nameniti meritvam nivojev podtalnice na lokaciji gradnje. Vsekakor se podzemni objekti naj ne bi načrtovali na podlagi arhivskih meritev nivojev podtalnice v piezometrih, ki so več 100 m oddaljeni od območja gradnje, razen če se ustrezno strokovno utemelji primerljivost hidroloških razmer.

Veljavna zakonodaja nalaga projektantom podzemnih objektov, da že v fazi izdelave projektne dokumentacije izvedejo računske analize z dokazom varnosti proti delovanju vzgona, ki so skladne z veljavnimi standardi s področja gradbenih konstrukcij. Vsakršno poenostavljanje lahko namreč vodi do resnih poškodb objektov že med njihovo gradnjo kot tudi po njihovem dokončanju. V fazi načrtovanja pa je nujno zadostno pozornost nameniti tudi načrtovanju detajlov. Navedeno je še posebno pomembno v primerih, ko se detajli izvedejo v več zaporednih fazah in so po končani gradnji nedostopni za redne preglede in morebiti potrebno vzdrževanje. Nenatančna ali celo nepravilna izvedba detajlov, ki posledično omogoča nenadzorovan dotok podzemnih vod v prostor ob podzemnem objektu, lahko privede do njegovih resnih poškodb.

Pomanjkljivosti, ki bi nastopile v fazi izdelave projektne dokumentacije, je mogoče odpraviti s strokovno verodostojno recenzijo ali revizijo projektne dokumentacije, nadzor nad gradnjo tovrstnih zahtevnih objektov pa mora biti zaupan izkušenim nadzornim inženirjem kot tudi institucijam, ki med gradnjo temeljito nadzirajo kakovost izvedenih del.

Poudariti pa je treba tudi nujnost izvajanja dolgoročnega sistematičnega monitoringa podzemnih objektov, še posebno, če so ti grajeni v območjih z nihajočimi ali celo postopno naraščajočimi podzemnimi vodami. Tovrsten monitoring naj bi vključeval geodetsko spremljanje kot tudi meritve nivojev podtalnice v neposredni bližini vkopanih objektov. Ob pojavu razpok v armiranobetonskih elementih vkopanih objektov je nujno sistematično spremljati tudi njihovo morebitno napredovanje. Če okolne podzemne vode skozi nastale razpoke celo vtekajo v objekt, je to resno opozorilo glede stanja objekta, saj se bo obseg poškodb najverjetneje le še povečeval. V tovrstnih primerih je nujno izvesti izredni pregled stanja podzemnega objekta, vključno s pregledom njegove dokumentacije in ponovno računsko analizo stabilnosti objekta proti delovanju vzgona.

7 ZAHVALA

Predstavljeni rezultati so pridobljeni v sklopu dela programske skupine Mehanika konstrukcij (P2-0260), ki ju financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije. Za finančno pomoč se jih iskreno zahvaljujemo.

8 LITERATURA

Bhaud, D.P., Chore, H.S., Effect of buoyancy on stitched raft of building having three basements in presence of ground anchors. *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*, 2(4), 67–6, 2014.

Bikçe, M., Örnek, M., Cansiz, Ö.F., The effect of buoyancy force on structural damage: A case study. *Engineering Failure Analysis*, 92, 553–12, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.06.014>, 2018a.

Bikçe, M., Examining the risk of flotation in structures, *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 2(2), 80 – 5, 522655(dergipark.org.tr), 2018b.

Bond, A., Harris, A., *Decoding Eurocode 7*, Taylor & Francis, 2008.

Čas B., Šporin J., Buoyancy effects on structures: a case study on the controlled lowering of a raised underground garage, *Structures*, 71, 1–13, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012424022756>, 2025.

Drdacky M., Flood damage to historic buildings and structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24(5), 439–6, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000065](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000065), 2010.

Fu, Z., Bai, Q., Discussion on anti-floating stability of tall building basement, *Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Energy and Environmental Science*, Atlantis Press, 81 – 3, <https://doi.org/10.2991/icaees-15.2015.15>, 2015.

Li, J., Sun, W., Study on design of uplift piles and calculation of float in underground structures, *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, 23(2), 80–4, 2007.

Lu, D., Li, X., Du, X., Lin, Q., Gong, Q., Numerical simulation and analysis on the mechanical responses of the urban existing subway tunnel during the rising groundwater. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 98, 1–12, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103297>, 2020.

SIST EN 1997-1:2004, *Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila*, 2005.

Song, G., Wang, C., Wang, B., Structural Health Monitoring of Civil Structures, *Applied Sciences*, 7, 789–3, <https://doi.org/10.3390/app7080789>, 2017.

Sun, W., Liu, H., Zhang, W., Liu, S., Han, L., Analytical solution of the shallowest overburden thickness of special shaped shield tunnel in layered soil. *Acta Geotechnica*, 19, 4621–4636, <https://doi.org/10.1007/s11440-023-02154-2>, 2024.

Wong, I.H., Methods of resisting hydrostatic uplift in substructures, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(2), 77–9, [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(01\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(01)00037-2), 2001.



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

andrej.ivanic@um.si
Univerza v Mariboru,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor,
Slovenija



dr. Ahmad Rizwan Mumtaz, mag. inž. grad.

ahmadrizwan.mumtaz@student.um.si
Univerza v Mariboru,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor,
Slovenija



izr. prof. dr. Natalija Bede Odorčič, univ. dipl. inž. grad.

natalija.bede@uniri.hr
Univerza na Reki,
Radmile Matejčić 2, 51000 Rijeka,
Hrvaška



doc. dr. Núria Garro, univ. dipl. fiz.

nuria.garro@uv.es
Univerza v Valencii, Inštitut za znanost o materialih,
Poligon »La Coma« s/n, 46980 Paterna,
Španija



izr. prof. dr. Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.

samo.lubej@um.si
Univerza v Mariboru,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor,
Slovenija



izr. prof. dr. Antonio Comite, univ. dipl. kem.

antonio.comite@unige.it
Univerza v Genovi, Oddelek za kemijo in industrijsko kemijo,
Via Dodecaneso 31, 16146 Genova,
Italija



doc. dr. Marcello Pagliero, univ. dipl. kem.

marcello.pagliero@unige.it
Univerza v Genovi, Oddelek za kemijo in industrijsko kemijo,
Genova,
Italija



Nikolina Škrilec, univ. dipl. inž. grad.

nikolina.skrilec@imo-real.si
IMO-REAL, d. o. o.,
Ulica Štefana Kovača 10, 9000 Murska Sobota
Slovenija



doc. dr. Gregor Kravanja, mag. inž. kem. tehn.

gregor.kravanja@um.si
Univerza v Mariboru,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor,
Slovenija



Znanstveni članek

UDK/UDC: 691.32:620.1:539.51

ULTRAVISOKOZMOGLJIVI BETON Z BAZALTNIMI VLAKNI TER SAMOČISTILNIMI IN LUMINISCENČNIMI POVRŠINAMI ULTRA-HIGH-PERFORMANCE CONCRETE WITH BASALT FIBRES AND SELF-CLEANING, LUMINESCENT SURFACES

Povzetek

Raziskava obravnava razvoj ultravisokozmogljivega betona (UHPC), zasnovanega na optimizirani cementni matriki z nizkim vodovezivnim razmerjem, doseženim z metodo mokrega zgoščanja delcev. V mešanico je bil dodan 1 vol.% bazaltnih vlaken, ki so bistveno izboljšala duktilnost materiala, zmanjšala njegovo krhkost ter učinkovito premoščala nastale razpoke. Analiza SEM-EDS je potrdila homogeno razporeditev vlaken in njihovo dobro vez s hidratacijsko matrico. Razvita mešanica je dosegla tlačno trdnost 138,5 MPa in upogibno trdnost 12,5 MPa, kar kljub delni nadomestitvi cementa z metakaolinom potrjuje zelo visoko mehansko zmogljivost UHPC.

Za pridobitev dodatnih multifunkcionalnih lastnosti, kot sta izrazita vodoodbojnost in luminiscenčno emitiranje svetlobe, je bila uporabljena dvoslojna biomimetična površinska obdelava na osnovi nanodelcev SiO_2 in luminiscenčnega prahu. Preizkusi omogočajo pokazali stabilno superhidrofobnost s kontaktnimi koti do $154,9^\circ$, luminiscenčni sloj pa je omogočil oddajanje vidne zelene svetlobe pri približno 520 nm. Rezultati potrjujejo, da sinergija optimizirane UHPC-matrice, bazaltnih vlaken in funkcionalnih površinskih slojev pomembno razširja uporabnost betona, zlasti pri trajnostno zasnovanih elementih, kjer sta nadzor razpok in zaščita pred vodo ključnega pomena, hkrati pa je zagotovljena pasivna nočna vidljivost brez zunanega vira energije.

Ključne besede: ultravisokozmogljivi beton (UHPC); bazaltne vlakna; metakaolin; metoda mokrega zgoščanja delcev; superhidrofobnost; luminiscenca

Summary

The study addresses the development of ultra-high-performance concrete (UHPC) based on an optimized cementitious matrix with a low water-to-binder ratio, achieved using the wet particle packing method. A volume fraction of 1 vol. % basalt fibres was incorporated into the mixture, which significantly improved material ductility, reduced brittleness, and effectively bridged the generated cracks. SEM-EDS analysis confirmed the homogeneous distribution of fibers and their strong bonding with the hydration matrix. The developed mixture achieved a compressive strength of 138.5 MPa and a flexural strength of 12.5 MPa, which, despite the partial replacement of cement with metakaolin, confirms the very high mechanical performance of UHPC.

To obtain additional multifunctional properties, such as pronounced water repellency and luminescent light emission, a double-layer biomimetic surface treatment based on SiO_2 nanoparticles and luminescent powder was applied. Wettability tests demonstrated stable superhydrophobic behaviour with contact angles of up to 154.9° , while the luminescent layer enabled emission of visible green light at approximately 520 nm. The results confirm that the synergy of the optimized UHPC matrix, basalt fibres, and functional surface layers significantly expands the applicability of concrete, particularly in sustainably designed elements where crack control and water protection are crucial, while also providing passive nighttime visibility without an external energy source.

Key words: ultra-high-performance concrete; basalt fibres; metakaolin; wet particle packing method; superhydrophobic; luminescence

1 UVOD

Ultravisokozmogljivi beton (ang. Ultra-High-Performance Concrete – UHPC) je eden najnaprednejših sodobnih cementnih kompozitov, ki združuje izjemne mehanske lastnosti z visoko obstojnostjo in odpornostjo proti vplivom okolja. Zaradi svoje goste mikrostrukture, nizke poroznosti in optimizirane granulometrične zrnastostne sestave dosega tlačne trdnosti, ki pogosto presegajo 120 MPa. Nizko razmerje voda/vezivo (W/B < 0,25) in preiščena uporaba finih praškastih dodatkov zagotavlja izredno kompaktno matrico, medtem ko vključitev jeklenih vlaken bistveno poveča žilavost ter odpornost proti nastanku in širjenju razpok. Zaradi teh lastnosti UHPC postaja osrednji material v razvoju trajnostnih in tehnološko naprednih gradbenih rešitev ter predmet intenzivnih raziskav v zadnjem desetletju [Mumtaz, 2024].

Kombinacija navedenih lastnosti omogoča boljše razumevanje njegovega vedenja v konstrukcijah in hkrati omogoča širok spekter uporabe UHPC, ki se uveljavlja pri gradnji mostov, stolpov vetrnih turbin, morskih in pristaniških konstrukcij ter pri proizvodnji prefabriciranih betonskih elementov, vojaških objektov in predorov. Poleg konstrukcijskih aplikacij se UHPC čedalje pogosteje uporablja tudi v arhitekturnih sistemih, zlasti za fasadne panele, kjer zagotavlja hkrati visoko nosilnost in estetsko kakovost [Kravanja, 2024].

Kljub odličnim mehanskim lastnostim pa uporaba jeklenih vlaken prinaša tudi določene omejitve, predvsem njihovo občutljivost za kemijsko korozijo v prisotnosti kloridnih ionov, kar lahko negativno vpliva na mikrostrukturo in s tem zmanjša trajnost materiala [Dong, 2024].

Kot alternativa jeklenim vlaknom se v zadnjem času vse pogosteje uporabljajo bazaltne vlakna, saj so naravnega izvora, odporna proti koroziji ter prispevajo k večji trajnosti in izboljšanim mehanskim lastnostim UHPC [Chen, 2023]. V slovenskem raziskovalnem prostoru so bili na področju uporabe bazaltnih vlaken in kompozitnih ojačitev v betonu posebej dejavni Saje idr., ki so preučevali vpliv peskane površinske obdelave bazaltnih kompozitnih palic (BFRP) na sprijem z betonom. Pokazalo se je, da je količina nanesenega peska zelo neenakomerna, kar poudarja potrebo po poenotenju postopkov obdelave, medtem ko sama intenzivnost peskanja ni bistveno vplivala na povprečno sprijemno trdnost [Saje, 2024].

Kljub svoji izjemni trdnosti in obstojnosti UHPC še vedno ne izpolnjuje vseh funkcionalnih in trajnostnih zahtev sodobnega gradbeništva, poleg tega pa je njegova proizvodnja z vidika stroškov manj ugodna od klasičnih betonskih mešanic [Dong, 2024]. Cenovna razlika je predvsem posledica visoke vsebnosti cementa, značilne za proizvodnjo UHPC, ki močno vpliva na skupne stroške materiala. Zaradi zelo nizkega vodovezivnega razmerja, visoke vsebnosti veziva, velikega deleža finih delcev ter majhne največje velikosti agregata je pri UHPC izraziteje prisotno zgodnje avtogeno krčenje, kar je pomemben pojav, ki ga je treba upoštevati pri načrtovanju materiala in konstrukcij.

V zadnjem desetletju se zato intenzivno iščejo pristopi za zmanjšanje okoljskega odtisa UHPC, pri čemer se del cementa nadomešča z alternativnimi cementnimi materiali, kot so pepel, mleta granulirana plavžna žindra in metakaolin [Amran, 2022]. Med njimi se metakaolin izkazuje kot izjemno reakti-

ven pucolanski material, ki pomembno prispeva k izboljšanju mehanskih lastnosti, gostoti mikrostrukture ter povečani obstojnosti betona [Tasiopoulou, 2023].

Takšni trajnostno usmerjeni pristopi niso omejeni zgolj na laboratorijske raziskave, temveč se UHPC vse pogosteje uveljavlja tudi v inženirski praksi. Z vlakni ojačani ultravisokozmogljivi beton (UHPFRC) se v Sloveniji že uspešno uporablja pri sanacijah obstoječih konstrukcij, zlasti mostov. Pomemben primer predstavlja sanacija mostu Log Čezsoški pri Bovcu, kjer je bila zgornja površina mostne plošče zaščiten z neprekinjenim slojem UHPFRC debeline 2,5 do 3 cm. Uporabljena je bila takrat patentirana tehnologija CEMTECMultiscale®, ki temelji na večnivojski ojačitvi z mikro- in makrovlakni ter zagotavlja visoko nosilnost, izjemno nizko prepustnost in učinkovito odpornost proti nastanku ter širjenju razpok. Tehnologija je bila predhodno preverjena v raziskovalnih projektih in številnih praktičnih aplikacijah v Švici in drugih evropskih državah.

Posebnost sanacije mostu Log Čezsoški, pri kateri je sodeloval Zavod za gradbeništvo Slovenije, je bila uporaba okolju prilagojene mešanice ECO-UHPFRC z zmanjšano vsebnostjo cementa in večjim deležem mineralnih dodatkov lokalnega izvora. Kljub zahtevnim vremenskim razmeram je bila sanacija izvedena v dveh dneh, most pa ponovno odprt za promet že po enem mesecu, kar pomeni pomembno časovno prednost v primerjavi s klasičnimi sanacijskimi postopki. Analize življenjskega cikla so pokazale tudi manjši okoljski vpliv takšne rešitve [Habert, 2013].

Poleg izjemnih mehanskih lastnosti ima UHPC velik potencial za integracijo naprednih oziroma pametnih funkcionalnosti, ki omogočajo razvoj tako imenovanega multifunkcionalnega betona. Med najpomembnejše spadajo superhidrofobnost (odboj vode in povečana odpornost proti zmrzovanju), samo-senzibilnost (zaznavanje deformacij in razpok), samoceljenje (aktivacija nehidriranih delcev), samočistilnost (fotokatalitični razkroj nečistoč), električna prevodnost (uporaba kovinskih vlaken za senzorske in ogrevalne aplikacije), toplotna regulacija (vgradnja fazno spremenljivih materialov) ter luminiscenca, ki omogoča oddajanje svetlobe in prispeva k učinkovitosti. Takšne lastnosti omogočajo razvoj naprednih, učinkovitih in trajnostnih betonskih kompozitov, ki presegajo vlogo pasivnega gradbenega materiala ter postajajo aktiven element inteligentnih konstrukcij [Han, 2017].

Superhidrofobnost betona predstavlja eno najučinkovitejših strategij za zmanjšanje prodiranja vode ter povečanje odpornosti proti zmrzovanju in tajanju ter koroziji [Kravanja, 2022a]. Temelji na povečanju kontaktnega kota vode ($WCA > 150^\circ$), kar zmanjša kapilarno absorpcijo in omogoča, da kapljice zlahka zdrsnejo s površine. Hidrofobne snovi se lahko vnašajo bodisi na površino bodisi v notranjost betona, kjer tvorijo zaščitno plast, ki bistveno podaljšuje življenjsko dobo in zmanjšuje potrebo po vzdrževanju konstrukcij [Wu, 2022].

Drugi pomemben vidik nove generacije multifunkcionalnih betonov je luminiscenca, tj. sposobnost oddajanja svetlobe brez zunanjih virov energije. To je inovativen koncept v gradbeništvu, ki v zadnjem času postaja vse bolj aktualen. Uporaba luminiscenčnih agregatov ali pigmentov omogoča razvoj samoosvetljujočih površin, ki prispevajo k večji prometni varnosti, zmanjšani porabi energije in manjšemu svetlobnemu

onesnaževanju, hkrati pa odpravljajo težave z neenakomerno osvetlitvijo in bleščanjem, značilnim za klasično ulično razsvetljavo [Wang, 2021].

Predstavljena raziskava obravnava razvoj in karakterizacijo z bazaltom ojačanega ultravisokozmogljivega betona (UHPC), ki združuje superhidrofobnost in luminiscenco ter s tem uresničuje koncept multifunkcionalnega betona nove generacije. Takšen material ne le izboljšuje mehanske in trajnostne lastnosti, temveč predstavlja pomemben korak v smeri pametne in trajnostne gradnje prihodnosti.

UHPC z integriranimi multifunkcionalnimi lastnostmi v slovenskem znanstvenem in strokovnem prostoru doslej še ni bil sistematično obravnavan, zato je ta prispevek pomemben korak k razvoju pametnih in trajnostnih gradbenih materialov v Sloveniji.

V prvem delu članka je predstavljen razvoj optimizirane sestave UHPC z uporabo metakaolina kot dodatnega cementnega materiala ter bazaltnih vlaken kot ojačitvene komponente, s ciljem izboljšanja mehanskih lastnosti in trajnosti betona. Poseben poudarek je namenjen optimizaciji razmerja voda/vezivo z metodo mokrega zgoščanja delcev ter ovrednotenju vpliva metakaolina in bazaltnih vlaken na tlačno in upogibno trdnost ter reološko obnašanje mešanice.

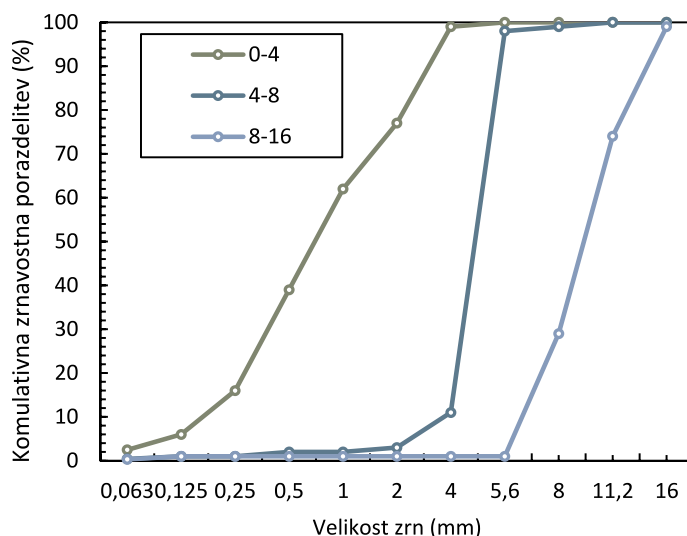
Drugi del članka je usmerjen v razvoj multifunkcionalnega UHPC z integracijo superhidrofobnih in luminiscenčnih lastnosti. Cilj je bil oblikovati trajno samočistilno površino z nizkim kotom zdrsa vode ter dolgotrajnim svetlobnim oddajanjem, pri čemer so bile analizirane močljivost, morfologija in hrpa-vost površine ter svetlobna emisija v temi brez zunanjih virov energije.

2 EKSPERIMENTALNI DEL

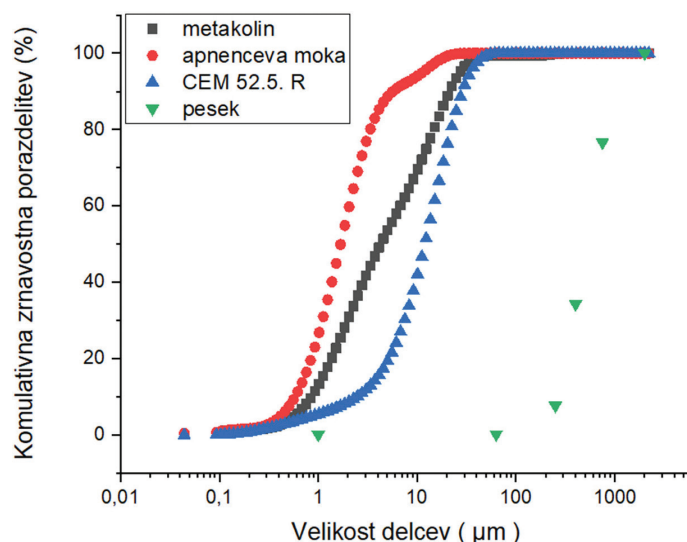
2.1 Materiali in metode

Kot glavno vezivo je bil uporabljen portlandski cement CEM I 52.5 R (Alpacem cementi, d. o. o., Deskle, Slovenija) s specifično gostoto 3,1. Metakaolin (MK; Melamin, d. o. o., Kočevje, Slovenija) s specifično gostoto 2,1 je bil uporabljen kot dodatni cementni material. Fina agregatna frakcija sta bili kremenčev pesek z modulom zrnivosti 2,81 in apnenčeva moka (LP, ang. limestone filler) s specifično gostoto 2,6, oba je dobavilo podjetje Murexin, d. o. o., Buzin, Slovenija (slika 1). Za referenčni beton smo uporabili fine in grobe frakcije naravnega mineralnega agregata rečnega izvora iz reke Drave, ki ga pridobivajo v separaciji Podlesnik v Mariboru (slika 2).

Za ojačitev so bila uporabljena 12 mm dolga bazalna vlakna s specifično gostoto 2,6. Hidrofobni aditiv je bil polimetilhidrogensiloksan (PMHS, $\rho = 1,1$), luminiscenčne lastnosti pa so bile dosežene z dodatkom stroncijevega aluminata ($\rho = 3,73$; Samson Kamnik, d. o. o., Kamnik, Slovenija). Za izdelavo superhidrofobne površine smo uporabili nanos nanodelcev silicijevega dioksida (SiO_2 ; 10–20 nm; 99,5 % čistost; Sigma Aldrich, ZDA) in poliestrsko mrežico z odprtiniami velikosti 200 μm (Konus Konex, d. o. o., Slovenske Konjice, Slovenija). Uporabljena sta bila vodovodna voda ter zelo učinkovit hiperplastifikator na osnovi polikarboksilatnih etrov Sika® ViscoCrete®-5075 RS (Sika, d. o. o., Slovenija), ki omogoča dobro obdelovalnost



Slika 1. Zrnavostna sestava materialov za referenčni beton z uporabo naravnega mineralnega agregata



Slika 2. Zrnavostna sestava materialov za UHPC-beton

Komponenta	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
CEM 52.5 R	64,80	22,20	5,40	3,30	3,20	0,50	0,50	0,10	0,20
MK	0,20	54,00	42,00	0,90	0,50	0,20	0,10	0,10	1,20
LP	83,20	6,40	1,50	1,00	0,20	0,10	0,10	0,10	0,00

Preglednica 1. Kemijska sestava komponent UHPC in njihova vsebnost oksidov (v mas. %)

mešanice pri nizkem razmerju voda/vezivo. Preglednica 1 prikazuje kemijsko sestavo komponent UHPC, izraženo kot masni delež glavnih oksidov, določenih z rentgensko fluorescenčno spektroskopijo (XRF).

2.2 Priprava betonskih mešanic

Za primerjalno analizo mehanskih lastnosti sta bila pripravljena tako finozrnati UHPC kot referenčni običajni beton. UHPC je bil zasnovan skladno s priporočili standarda [ASTM C1856/C1856M-17], ki določa postopke za izdelavo, ravnanje in preskušanje vzorcev ultravisokozmogljivega betona. Za UHPC so bili izdelani manjše kocke dimenzij 70 × 70 × 70 mm in prizmatični vzorci dimenzij 40 × 40 × 160 mm. Dodatno so bile za določitev tlačne trdnosti izdelane kocke dimenzij 150 × 150 × 150 mm, in sicer za materiala UHPC in referenčni beton. Sestava referenčnega betona in UHPC je prikazana v Tabeli 2. UHPC-mešanice so bile pripravljene z optimiziranim vodno-vezivnim razmerjem za doseg želene zgoščenosti delcev.

	w/b	CEM 52.5	MK	Voda	≤ 2 mm	0/4 mm	4/8 mm	8/16 mm	Apn. moka	SP (%)	Vlakna (%)
REF	0,50	360,0	/	180	/	859	171	682	/	/	/
UHPC-0.20	0,20	746,0	74,6	188,7	954,0	/	/	/	199,0	31,2	0
UHPC-0.22	0,22	746,0	74,6	197,8	954,0	/	/	/	199,0	31,2	0
UHPC-0.24	0,24	746,0	74,6	205,2	954,0	/	/	/	199,0	31,2	0
UHPC-0.27	0,27	746,0	74,6	221,6	954,0	/	/	/	199,0	31,2	0
UHPC-0.28	0,28	746,0	74,6	229,8	954,0	/	/	/	199,0	31,2	0
UHPC-0.22-1 % BF	0,22	746,0	74,6	197,8	954,0	/	/	/	199,0	31,2	26

Preglednica 2. Sestava referenčnega betona in mešanic ultravisokozmogljivega betona (UHPC) z dodatkom metakaolina (v kg/m³)

2.3 Izdelava biomimetične luminiscenčne površine UHPC

Za izdelavo luminiscenčne in superhidrofobne (biomimetične) površine UHPC je bila razvita nova metoda. Pred ulivanjem betona so bile notranje stene kalupov obložene s poliestrsko mrežico kvadratne oblike (200 μm), kar je omogočilo oblikovanje mikroteksturirane površine. Po 24 urah smo vzorce razkalupili in odstranili mrežice. Sledila je nega vzorcev v vodi do starosti 28 dni skladno s standardoma [SIST EN 12390-1:2021] in [SIST EN 12390-2:2019]. Na površino je bil nato nanosen prosojni premaz z dodatkom submikronskega luminiscenčnega prahu, ki omogoča trajno luminescenco. Za doseg superhidrofobnosti je bila površina dodatno obdelana z razpršilno suspenzijo nanodelcev SiO₂, modificiranih s PMHS. Suspenzija je bila pripravljena iz 0,6 g nanodelcev SiO₂, dispergiranih v 100 mL etanola z 20-minutno ultrazvočno obdelavo, nato pa dodatno homogenizirana 10 minut pri 10.000 vrt/min. Zatem je bilo postopno dodanih 25 mL PMHS ob magnetnem mešanju v trajanju 30 minut. Pripravljena suspenzija je bila nanesena na površino betona z brizganjem pri hitrosti približno 5 cm/s in razdalji šobe vsaj 10 cm, s čimer je nastala mikro- in nanostrukturirana superhidrofobna plast.

Nastala površina z dvojno mikro- in nanohrapavostjo vzpostavlja Cassie-Baxterjevo stanje omočenja, pri katerem je voda v stiku le z vrhovi površinske strukture, medtem ko zrak ostaja ujet v vdolbinah, kar vodi do izrazite superhidrofobnosti [Spori, 2010].

Metode karakterizacije

2.3.1 Metoda mokrega zgoščanja delcev

Lastnosti ultravisokozmogljivega betona (UHPC) so v veliki meri odvisne od pakiranja delcev v vezivnem sistemu, saj to določa gostoto matrice, poroznost in posledično mehanske ter trajnostne lastnosti [Shi, 2015]. Zmanjšanje vodno-vezivnega razmerja (v/v) vodi do večje trdnosti, vendar zahteva skrbno optimizacijo razporeditve delcev različnih velikosti, da se doseže največja zapolnitev trdne faze pri minimalni vsebnosti vode.

Zgoščenost delcev v mešanici je definirana kot razmerje med prostornino trdne faze in celotno prostornino zmesi [Chu, 2022]:

$$\varphi = \varphi_{max} = \frac{V_c}{V} \quad (1)$$

kjer je φ_{max} – največja volumenska koncentracija trdnih delcev (brezdimenzijska), V_c – prostornina trdne faze v kalupu (cm³ ali m³), V – celotna prostornina zmesi v kalupu (cm³ ali m³). Prostornina trdne faze V_c se izračuna glede na maso in gostoto posameznih komponent po enačbi (2):

$$V_c = \frac{M_\alpha}{\rho_\alpha} + \frac{M_\beta}{\rho_\beta} + \frac{M_\gamma}{\rho_\gamma} \quad (2)$$

kjer so M_α , M_β , M_γ – mase posameznih trdnih komponent (cement, metakaolin, apnenčeva moka) (kg), ρ_α , ρ_β , ρ_γ – njihove specifične gostote (kg/m³).

2.3.2 Preizkus z razlezom betona

Obdelovalnost UHPC je bila v fazi optimizacije zgoščenosti delcev v mešanici ocenjena s preskusom razlivnosti malte po standardu [SIST EN 1015-3:2019]. Ta preskus je primeren za finozrnate cementne sisteme, kot je UHPC.

Za primerjavo UHPC z referenčnim betonom je bil dodatno izveden preskus z razlezom svežega betona skladno s standardom [SIST EN 12350-8:2019], s katerim je bila ovrednotena razlivnost obeh mešanic.

2.3.3 Določitev tlačne in upogibne trdnosti

Tlačna trdnost UHPC je bila določena na kockah dimenzij $70 \times 70 \times 70$ mm, medtem ko je bila tlačna trdnost referenčnega betona določena na kockah dimenzij $150 \times 150 \times 150$ mm skladno s standardoma [SIST EN 12390-1:2021] in [SIST EN 12390-2:2019]. Preizkusi so bili izvedeni na hidravlični stiskalnici Toni Technik z nazivno nosilnostjo 3000 kN.

Upogibna trdnost UHPC je bila določena s tritočkovnim upogibnim preizkusom na prizmatičnih vzorcih dimenzij $40 \times 40 \times 160$ mm v skladu s standardom [SIST EN 196-1:2016, Metode pres.], pri čemer je bila hitrost obremenjevanja 50 ± 10 N/s. Obremenitev in pomik pa sta bila spremljana z 2D-optično korelacijo slike (DIC) ter LVDT-senzorji. Za vsako mešanico so bili preizkušeni trije vzorci. Preizkusi so bili izvedeni na univerzalnem preizkuševalnem stroju Zwick Roell Z600 z nosilnostjo 600 kN. Upogibna trdnost referenčnega betona je bila določena na večjih prizmatičnih vzorcih skladno s standardom [SIST EN 12390-5:2019].

2.3.4 Opazovanje mikrostrukture

Mikrostruktura cementnih kompozitov je bila analizirana z mikroskopom (FE-SEM, Supra 40 VP, Carl Zeiss, Nemčija), opremljenim z energijsko disperzijsko rentgensko spektroskopijo (EDS). Vzorci so bili najprej odlomljeni, izbrani deli pa mehansko polirani za analizo notranje mikrostrukture. Pred mikroskopsko analizo so bili vzorci prevlečeni s tanko plastjo ogljika.

2.3.5 Preizkusi omočenja

Kontaktne kot (CA) in kot zdrsa (RA) obdelanih vzorcev sta bila izmerjena pri temperaturi 293 K z uporabo goniometra po metodi sedeče kapljice. Kapljice ultračiste vode (upornost $18,2 \mu\Omega$) $10 \mu\text{L}$ so bile nanese na površino betona z mikropipeto. Slike kapljic so bile zajete z digitalno kamero Basler acA 300-200um z objektivom Basler Premium Lens, preračun kontaktnega kota pa je bil izveden z algoritmom OpenDrop [Huang, 2021]. Podrobnejši opis postopka je naveden v literaturi [Kravanja, 2021].

2.3.6 Spektroskopske analize in preizkus luminiscence

Spektralne značilnosti in intenziteta svetlobne emisije vzorcev, prevlečenih z luminiscenčnim prahom, so bile analizirane z napravo Acton SP-300i (Princeton Instruments, ZDA) z dolgoprepustnim filtrom.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

3.1 Optimalna zgoščenost delcev v mešanici UHPC

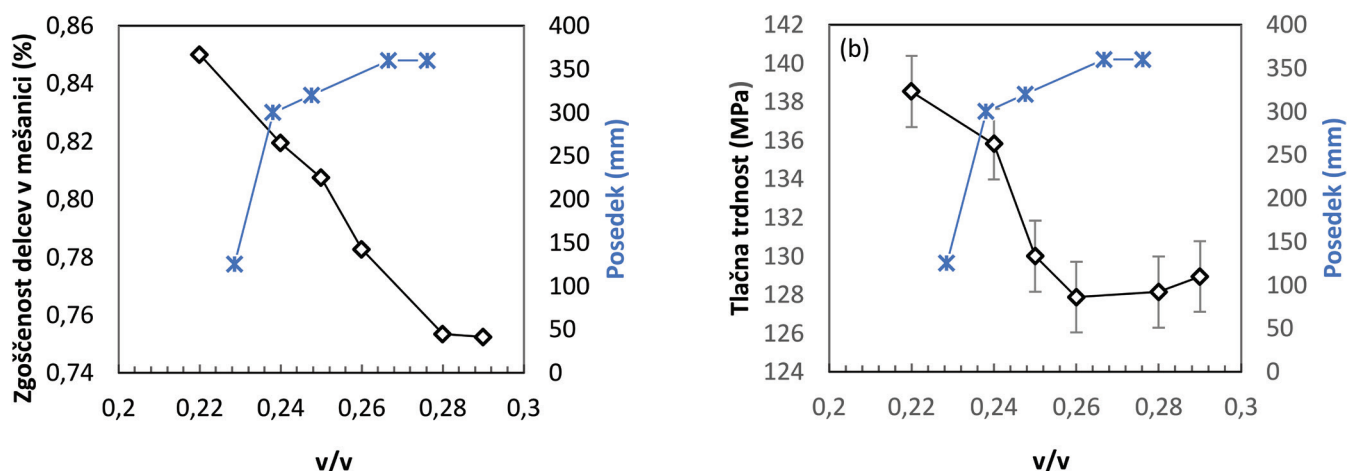
Pri zasnovi mešanice z metakaolinom (MK) je bila skladno z metodo mokrega zgoščanja delcev izvedena serija preizkusov za optimizacijo vodno-vezivnega razmerja (w/b). Rezultati so pokazali, da je bila največja zgoščenost delcev dosežena pri optimalnem razmerju w/b = 0,24, kar je ustrezalo razlivnosti malte približno 265 mm.

Pri tem razmerju je UHPC na kockah dimenzij $70 \times 70 \times 70$ mm dosegel tlačno trdnost 136,3 MPa, medtem ko je bila pri mešanici z dodatkom MK izmerjena 138,5 MPa. Optimalno razmerje w/b = 0,24 je bilo zato izbrano za nadaljnje raziskave (slika 3).

3.2 Reološke in mehanske lastnosti

UHPC v primerjavi z referenčno mešanico izkazuje gostejšo mikrostrukturo, kar je posledica nizkega vodovezivnega razmerja, visoke vsebnosti veziva in optimirane granulometrije finih delcev. Vloga metakaolina pri tem ni polnilna, temveč predvsem reaktivna.

V primerjavi s sorodnimi raziskavami UHPC z metakaolinom se v tej študiji dosežene tlačne trdnosti uvrščajo v pričakovani razpon, saj literatura poroča o vrednostih približno med 120 in 160 MPa pri delni nadomestitvi cementa z metakaolinom, pri čemer se kot optimalen delež nadomestitve najpogosteje navaja 10–15 % [Mohamed, 2024].

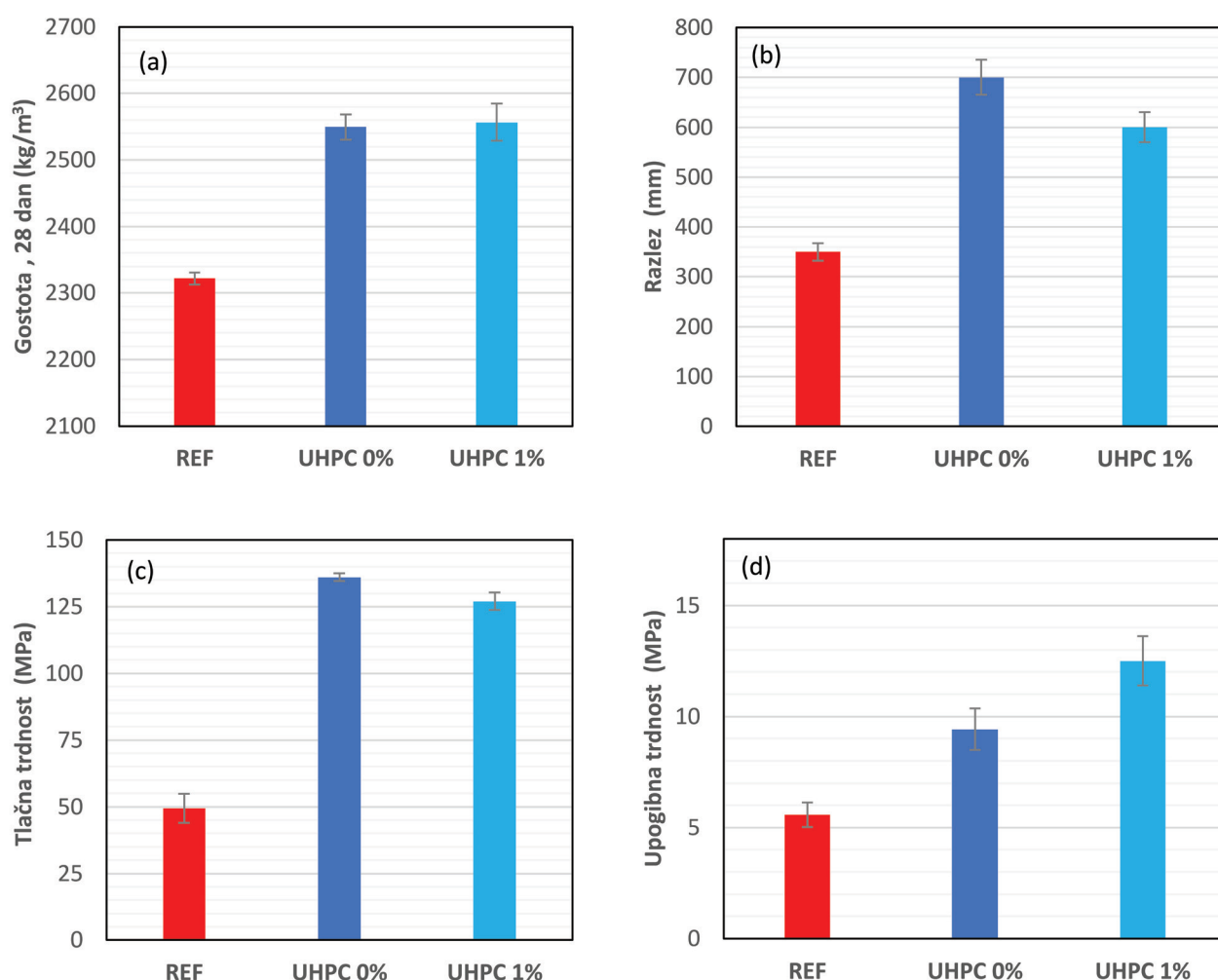


Slika 3. Vpliv vodo-vezivnega razmerja (v/v) na (a) zgoščenost delcev v mešanici in (b) tlačno trdnost ter posedek ultravisokozmogljivega betona (UHPC)

Dodatek bazaltnih vlaken na gostoto kompozita vpliva minimalno (slika 4 a). Referenčni beton, pripravljen brez dodatka superplastifikatorja, je dosegel razlez približno 350 mm, kar ustreza plastični konsistenci, primerni za vgradnjo z vibriranjem. Ker pričakovano ni dosegel razlivnosti, značilne za samozgoščevalni beton, je bil uporabljen zgolj kot referenčna primerjalna mešanica. Ultravisokozmogljivi beton (UHPC) brez vlaken je zaradi visoke vsebnosti superplastifikatorja dosegel razlez okoli 700 mm, kar ustreza značilnemu območju samozgoščevalnih betonov SF2 ter potrjuje njegovo samorazlivno obnašanje. Pri mešanici UHPC z 1 % bazaltnih vlaken se je razlez zmanjšal na približno 600 mm (slika 4b). Zmanjšanje razlivnosti je posledica povečanega notranjega trenja in mehanskega prepletanja vlaken v matrici, vendar beton kljub temu ohranja lastnosti samorazlivnega in dobro kohezivnega materiala brez znakov ločevanja.

neposredno primerljiva zaradi različnih dimenzij preizkušancev ($70 \times 70 \times 70$ mm in $150 \times 150 \times 150$ mm) ter velikostnega učinka. Pri mešanici z bazaltnimi vlakni je bilo vodovezivno razmerje dodatno znižano z 0,24 na 0,22, kar je prispevalo k zelo visoki osnovni trdnosti matrice. Dodatek 1 vol. % bazaltnih vlaken je nekoliko zmanjšal tlačno trdnost (na približno 127 MPa), hkrati pa izrazito povečal upogibno trdnost z 9,4 MPa na 12,5 MPa, kar potrjuje učinkovitost vlaken pri prenosu nateznih napetosti in omejevanju razpok.

Primerjava z nedavnimi raziskavami kaže, da bazaltne vlakna predvsem prispevajo k izboljšanju nateznega obnašanja in duktilnosti UHPC, medtem ko je njihov vpliv na tlačno trdnost izrazitejši šele pri višjih volumskih deležih vlaken [Chen, 2024].



Slika 4. Reološke in mehanske lastnosti betonskih mešanic: (a) gostota, (b) razlez, (c) tlačna trdnost (opomba: UHPC: kocke $70 \times 70 \times 70$ mm; referenčni beton: kocke $150 \times 150 \times 150$ mm.) in (d) upogibna trdnost

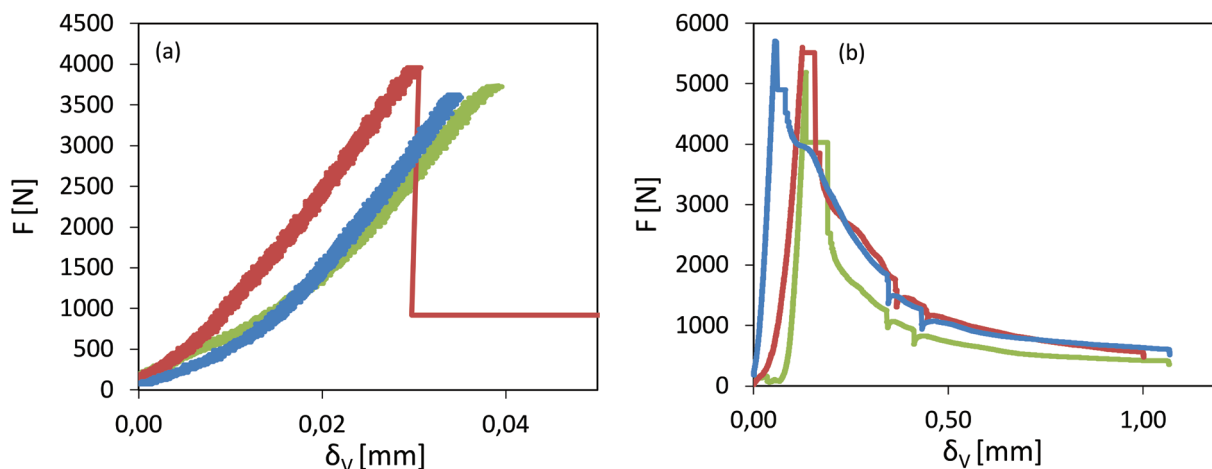
Pri mehanskih lastnostih (sliki 4c in 4d) UHPC brez vlaken dosega bistveno višjo tlačno trdnost (136 MPa) v primerjavi z referenčnim betonom (49 MPa), kar je predvsem posledica izrazito nižjega vodovezivnega razmerja in visoke vsebnosti veziva. Treba pa je poudariti, da primerjava tlačnih trdnosti ni

3.2.1 Vpliv bazaltnih vlaken na lom pri tritočkovnem upogibu

Za oceno upogibnega obnašanja betonskih kompozitov, ojačanih z vlakni, je ključna analiza diagrama sila-pomik, ki

prikazuje vpliv vlaken po doseženi največji obremenitvi (slika 5), zlasti na žilavost in širjenje razpok. Rezultati kažejo, da UHPC brez vlaken po doseženi največji obremenitvi izgubi nosilnost zelo hitro, kar je značilno za krhek lom.

Biomimetična površina UHPC (Slika 6b) pa kaže izrazito hierarhično hrapavost, ki jo tvorijo kvadratno oblikovane mikroizbokline velikosti približno 200 μm , nastale z odtisom mrežice, ter dodatna nanohrapavost zaradi nanodelcev SiO_2 . Kombinacija



Slika 5. Diagram sila–pomik pri upogibu: (a) UHPC brez vlaken, (b) UHPC z 1 vol. % bazaltnih vlaken

Pri mešanici UHPC z 1 vol. % bazaltnih vlaken pa je opazen počasnejši upad nosilnosti in daljši odziv po največji obremenitvi. Vlakna prevzemajo natezne napetosti, upočasnjujejo širjenje razpok ter povečajo energijo loma in duktilnost materiala. Dodatek bazaltnih vlaken tako izboljša mehanski odziv UHPC, kar prispeva k večji varnosti.

3.3 Mikrostruktura betona

V začetni fazi je bil opravljen pregled površinske morfologije in hrapavosti vzorcev, čemur je sledila nadaljnja analiza njihove notranje mikrostrukture.

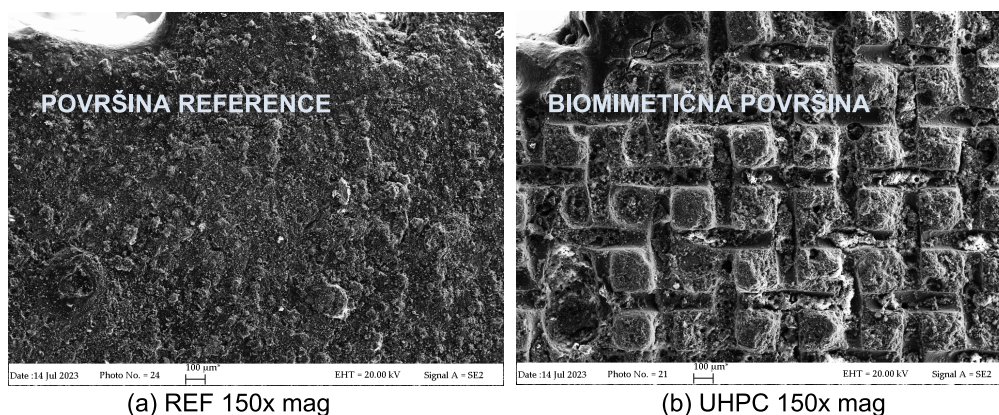
3.3.1 Analiza SEM-EDS površine betona

Na sliki 4 sta prikazani SEM-mikromorfologiji referenčnega betona (REF) in biomimetične površine UHPC. Površina REF (Slika 6a) je razmeroma gladka, brez izrazite mikrostrukture, zato omogoča neovirano omočenje in je izrazito hidrofilna.

mikro- in nanostruktur omogoča ujetje zraka med površino in vodnimi kapljicami, kar bistveno zmanjša dejansko kontaktno površino. Takšna konfiguracija je skladna s Cassie-Baxterjevim modelom, značilnim za superhidrofobne in samočistilne površine, kar potrjuje uspešno izvedbo biomimetične obdelave [Erbil, 2009].

SEM-EDS-analiza potrjuje izrazite razlike v kemični sestavi površine referenčnega betona (REF) in obdelanega UHPC. Površina REF kaže pričakovano prevlado elementov Ca, O in Si, ki izvirajo iz hidratacijskih produktov cementne paste (C–S–H, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Aft in AFm). Višji delež kalcija in razmeroma nizek delež silicija nakazuje tipično višje razmerje Ca/Si, značilno za klasične cementne matrice.

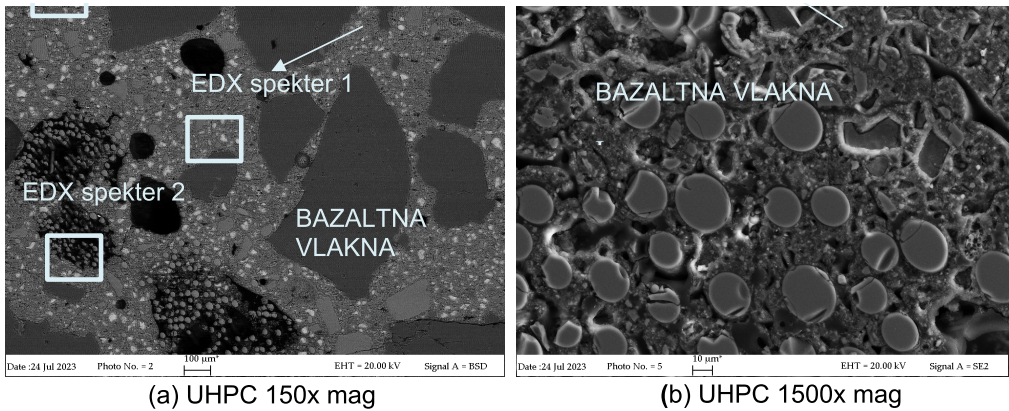
Pri UHPC-vzorcih je zaznan višji delež Si in nižji delež Ca v površinski coni, kar se odraža v znižanem razmerju Ca/Si. Ta sprememba je delno posledica sestave vezivne matrice z dodatkom metakaolina, delno pa vpliva nanosa nanodelcev SiO_2 ,



Slika 6. SEM-mikromorfologija (a) referenčnega betona in (b) biomimetične UHPC-površine z izrazito mikrogeometrijo pri 150 $\times$ povečavi

	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Sr
REF	55,95	0,23	0,28	0,91	7,93	0,07	0,10	2,76	31,23	0,05	0,23	0,26
UHPC	52,83	0,22	0,09	2,78	35,69	0,23	0,13	0,58	3,35	0,00	0,02	4,09

Preglednica 3. SEM-EDS-analiza površinske kemične sestave betonov. Prikazane so masne vsebnosti elementov v površinskem sloju (% mas.)



Slika 7. SEM-EDS-analiza preseka UHPC z bazaltnimi vlakni. (a) Mikrostruktura preseka z vidno porazdelitvijo bazaltnih vlaken in analiznimi območji EDS. (b) Povečava z jasno razločnimi okroglimi prerezi vlaken ter dobro povezavo med vlakni in cementno matrico

Spekter	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
1	29,84	0,88	0,39	2,11	14,01	0,51	1,01	24,72	0,05	0,08
2	45,27	2,38	3,55	8,22	25,66	0,23	1,00	6,01	1,06	7,69

Preglednica 4. SEM-EDS-elementalna sestava cementne matrice (Spekter 1) in bazalnega vlakna

ki obogatijo površinski sloj s silicijem. Površinska obdelava tako pomembno vpliva predvsem na kemijsko sestavo in mikrostrukturo zgornje plasti materiala, medtem ko osnovna matrica UHPC določa večino mehanskih lastnosti. Prisotnost sledovnih elementov, kot sta Al in Sr, je povezana predvsem z vezivnimi dodatki ter ne s površinskim premazom.

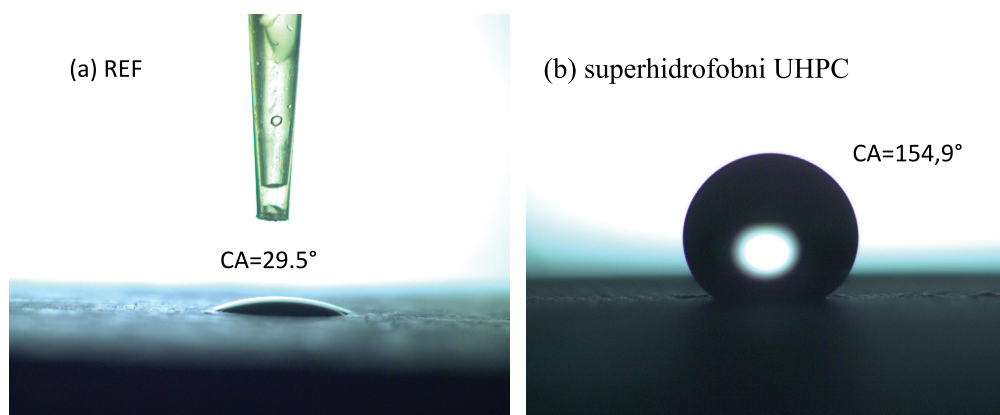
Slika 7 prikazuje SEM-EDS-analizo prereza UHPC z bazaltnimi vlakni, pri čemer je pri 150x povečavi razvidna porazdelitev vlaken v cementni matrici ter izbrani območji za elementno analizo, pri večji povečavi pa so jasno vidni okrogli prerezi vlaken z dobro adhezijo na matrico brez opaznih razpok ali ločitev. EDS-analiza potrjuje razliko v kemijski sestavi med cementno matrico in bazaltnimi vlakni, kar kaže na dobro mikrostrukturno povezavo in učinkovito vgradnjo vlaken v UHPC.

3.4 Kontaktni kot na referenčnem in superhidrofobnem betonu

Slika 8 prikazuje primerjavo omočenja v eni merilni točki med referenčno betonsko površino in biomimetično ob-

delanim UHPC. Kontaktni koti so bili na vsaki površini izmerjeni vsaj trikrat na medsebojni razdalji najmanj 10 mm za zagotovitev ponovljivosti meritev. Na referenčni površini (slika 8 a) se kapljica takoj razlije in tvori nizek kontaktni kot ($CA = 29,5^{\circ} \pm 8^{\circ}$), kar potrjuje izrazito hidrofilnost. Po nekaj minutah voda zaradi odprte poroznosti popolnoma prodre v pore betona, kontaktni kot pri vseh meritvah pade na 0° , kar kaže na neovirano vpijanje in popolno omočenje materiala.

Superhidrofobni UHPC (slika 8 b) izkazuje povsem nasprotno obnašanje: kapljice ohranijo skoraj popolnoma sferično obliko, kontaktni kot znaša $CA = 154,9^{\circ} \pm 3,5^{\circ}$, voda pa ne prodre v površino. Mikro- in nanostrukturiranje povzroči ujetje zraka pod kapljico in s tem močno zmanjšanje dejanske kontaktne površine. Takšna površina izkazuje stabilno superhidrofobnost, skladno s Cassie-Baxterjevim modelom, kar omogoča hitro zdrsnost kapljic in izrazit samočistilni učinek, kar je posebej uporabno pri fasadnih elementih, mostnih ograjah, betonskih cestnih pregradah, tunelskih oblogah ter vseh izpostavljenih betonskih površinah, kjer je zaželeno zmanjšanje vpijanja vode, umazanje in posledične korozije.



Slika 8. Primerjava kontaktnega kota (CA) vodne kapljice na površini (a) REF in (b) biomimetičnega superhidrofobnega UHPC

3.5 Luminiscenčni odziv superhidrofobnega UHPC

Nasliki 9 (a) je prikazan padec intenzitete luminiscence superhidrofobnega in luminiscenčnega UHPC v časovnem obdobju 0–240 min po predosvetlitvi vzorcev z naravno UV-svetlobo sonca v trajanju približno 30 minut. Razvidno je, da je začetna intenziteta najvišja, nato pa se v prvih 30 minutah najhitreje zmanjša in se kasneje stabilizira. Spekter doseže vrh pri približno 520 nm, kar ustreza značilni zeleno fluorescenčni emisiji.

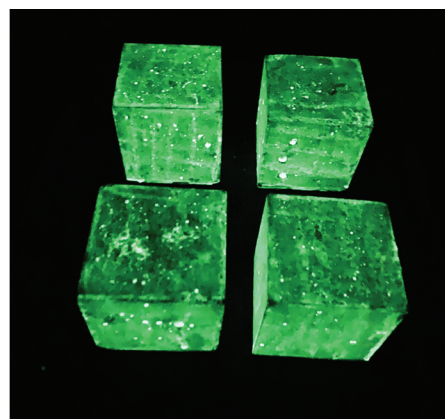
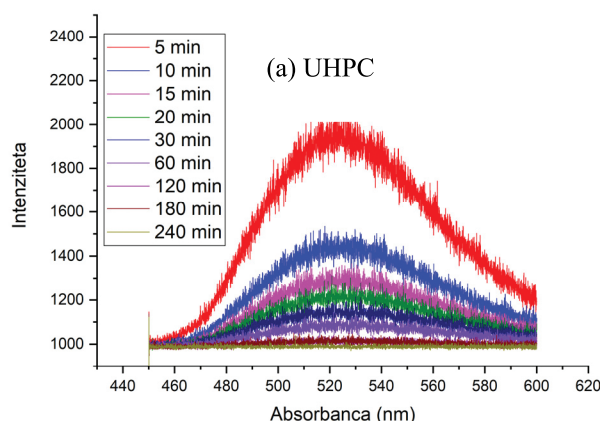
Slika 9 (b) prikazuje vidno emisijo zelene svetlobe na standardnih betonskih kockah iz UHPC (150 × 150 × 150 mm) v popolni temi, kar potrjuje učinkovito delovanje luminiscenčne prevleke in dolgotrajen pojemajoč sij.

Pri obravnavi trajnosti multifunkcionalne površine je treba omeniti tudi njene omejitve. Prejšnje raziskave so pokazale, da mehanska obraba oziroma abrazija ne vpliva bistveno na superhidrofobnost betonske površine, saj kontaktni koti ostajajo zelo visoki tudi po intenzivni mehanski obremenitvi [Kravanja, 2022b]. Nasprotno pa lahko dolgotrajna izpostavljenost UV-sevanju vpliva na stabilnost hidrofobnega premaza, kar predstavlja pomembno področje nadaljnjih raziskav.

Prav tako je treba upoštevati, da luminiscenčni prah v obravnavanem sistemu ni kovalentno vezan v betonsko matrico, temveč tvori površinski sloj, zato je lahko njegova svetlobna učinkovitost sčasoma zmanjšana zaradi mehanske obrabe ali okoljskih vplivov. Nadaljnji razvoj bo zato usmerjen v izboljšanje trajnosti luminiscenčnih prevlek za dolgoročno uporabo v realnih razmerah.

4 SKLEP

Raziskava potrjuje, da je mogoče ultravisokozmogljivi beton (UHPC) nadgraditi z lastnostmi, ki so za sodobno gradbeništvo strateškega pomena: povečano duktilnostjo, izboljšano površinsko odpornostjo na obrus ter funkcionalnostmi, ki zmanjšujejo potrebe po vzdrževanju in znižujejo energijsko porabo skozi celoten življenjski cikel konstrukcije. Vključitev bazaltnih vlaken se je izkazala kot posebno učinkovita, saj prispeva k stabilnejšemu mehanizmu porušitve pri upogibu ter omogoča boljši nadzor nad nastajanjem in širjenjem razpok. Poleg tega bazalna vlakna predstavljajo nekorozivno alternativo jeklenim vlaknom, kar je pomembna prednost pri tankostenskih, arhitekturno izpostavljenih in prefabriciranih betonskih elementih.



Slika 9. (a) Absorbanca luminiscence UHPC v času. (b) Vidna emisija zelene svetlobe UHPC v temi

Biomimetično strukturirana površina je zagotovila superhidrofobnost ($CA > 150^\circ$), kar vodi v zmanjšano omočenje, manjšo kapilarno vpojnost ter nižje tveganje za poškodbe zaradi zmrzovanja, soli in površinske kontaminacije. Za gradbeno prakso to pomeni večjo trajnost in nižje stroške vzdrževanja, zlasti pri fasadnih ploščah, robnih elementih, betonskih pregradah in konstrukcijah, izpostavljenih agresivnim okoljskim vplivom.

Dodana luminiscenčna prevleka na biomimetični površini je omogočila dolgotrajno emisijo zelene svetlobe, kar predstavlja pomembno dodatno funkcionalnost. Takšni betonski sistemi zagotavljajo osnovno nočno vidnost brez zunanjih virov energije, s čimer povečujejo varnost ter hkrati znižujejo obratovalne in vzdrževalne stroške javnih in zasebnih infrastrukturnih objektov.

Skupno ugotovitve potrjujejo, da je multifunkcionalni UHPC pomemben korak k razvoju trajnostne, visoko odporne in tehnološko napredne gradbene prakse, saj združuje mehansko učinkovitost z dodatnimi funkcionalnostmi, ki presegajo klasične lastnosti betonskih materialov.

5 ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujejo Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARIS) za delno financiranje raziskave v okviru raziskovalnega programa P2-0046 ter programu Erasmus+. Del mehanskih preizkusov je bil izveden z opremo, nabavljeno v okviru projekta »Research Infrastructure for Campus-based Laboratories« Univerze na Reki (št. RC.2.2.06-0001), sofinanciranega s strani Evropskega sklada za regionalni razvoj (ESRR)

Prispevek temelji na članku: Novel Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Enhanced by Superhydrophobic and Self-Luminescent Features, Sustainability, MDPI. Objavljen je pod licenco CC BY 4.0 in prirejen za slovensko strokovno javnost [Mumtaz, 2024].

7 LITERTURA

Amran, M., Huang, S.-S., Onaizi, A. M., Makul, N., Abdelgader, H. S., Ozbakkaloglu, T., Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects, *Construction and Building Materials*, 352, 129029, 2022.

ASTM C1856/C1856M-17, Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete, (n.d.). West Conshohocken, PA,

Chen, Z., Wang, X., Ding, L., Jiang, K., Huang, H., Liu, J., Wu, Z., Synergistic effects of hybrid macro basalt fibers and micro fibers on the mechanical properties of UHPC, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 23(4), 264, <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00807-3>, 2023.

Chen, Z., Wang, X., Ding, L., Jiang, K., Su, C., Ben, Q., Wu, Z., Effects of macro basalt fibers on the tensile behavior of ultra-high performance concrete, *Journal of Building Engineering*, 89, 109277, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109277>, 2024.

Chu, S. H., Lam, W. L., Li, L., Poon, C. S., Packing density of ternary cementitious particles based on wet packing method, *Powder Technology*, 405, 117493, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117493>, 2022.

Dong, L., Yang, Y., Liu, Z., Yang, T., Xue, C., Shao, R., Wu, C., Effect of chloride ion migration behaviour on the microstructure and mechanical properties of ultra-high performance concrete: A review, *Journal of Building Engineering*, 82, 108233, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108233>, 2024.

Erbil, H. Y., Cansoy, C. E., Range of applicability of the Wenzel and Cassie-Baxter equations for superhydrophobic surfaces, *Langmuir*, 25(24), 14135-14145, 2009.

Habert, G., Denarié, E., Šajna, A., Rossi, P., Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes, *Cement and Concrete Composites*, 38, 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.11.008>, 2013.

Han, B., Zhang, L., Ou, J., Smart and multifunctional concrete toward sustainable infrastructures (Vol. 399). Springer, 2017.

Huang, E., Skoufis, A., Denning, T., Qi, J., Dagastine, R. R., Tabor, R. F., Berry, J. D., OpenDrop: Open-source software for pendant drop tensiometry & contact angle measurements, *Journal of Open Source Software*, 6(58), 2604, 2021.

Kravanja, G., Godec, R. F., Rozman, M., Rudolf, R., Ivanič, A., (a), Biomimetic superhydrophobic concrete with enhanced anticorrosive, freeze thaw, and deicing resistance, *Advanced Engineering Materials*, 24(7), 2101445, 2022.

Kravanja, G., Godec, R. F., Rozman, M., Rudolf, R., Ivanič, A., (b), Biomimetic Superhydrophobic Concrete with Enhanced Anticorrosive, Freeze Thaw, and Deicing Resistance, *Advanced Engineering Materials*, 24(7), <https://doi.org/10.1002/adem.202101445>, 2022.

Kravanja, G., Ivanič, A., Lubej, S., Degradation of plasticized poly (1-chloroethylene) waterproofing membranes used as a building material, *Acta Chim. Slov*, 68, 494-504, 2021.

Kravanja, G., Mumtaz, A. R., Kravanja, S., A comprehensive review of the advances, manufacturing, properties, innovations, environmental impact and applications of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC), *Buildings*, 14(2), 382, 2024.

Mohamed, A. M., Tayeh, B. A., Metakaolin in ultra-high-performance concrete: A critical review of its effectiveness as a green and sustainable admixture, *Case Studies in*

Construction Materials, 21, e03967, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03967>, 2024.

Mumtaz, A. R., Bede Odorčić, N., Garro, N., Lubej, S., Ivanič, A., Comite, A., ... Kravanja, G., Novel Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) enhanced by superhydrophobic and self-luminescent features, Sustainability, 16(3), 1068, 2024.

Saje, D., Turk, G., Lopatič, J., Influence of sand coating intensity on bond properties between basalt fibre-reinforced polymer bars and concrete, Case Studies in Construction Materials, 21, e04072, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04072>, 2024.

Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., Fang, Z., A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design, Construction and Building Materials, 101, 741-751, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>, 2015.

SIST EN 196-1:2016, Metode preskušanja cementa – 1. del: Določanje trdnosti, (n.d.). Ljubljana.,

SIST EN 1015-3:2019, Metode preskušanja zidarske malte – 3. del: Določevanje konsistence sveže malte (s stresalno mizo), (n.d.). Ljubljana.,

SIST EN 12350-8:2019, Preskušanje svežega betona – 8. del: Samozgoščevalni beton – Preskus razleza s posedom, (n.d.). Ljubljana.,

SIST EN 12390-1:2021, Preskušanje strjenega betona – 1. del: Oblika, mere in druge zahteve za vzorce in kalupe, (n.d.). Ljubljana.,

SIST EN 12390-2:2019, Preskušanje strjenega betona – 2. del: Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti, (n.d.). Ljubljana.,

SIST EN 12390-5:2019, Preskušanje strjenega betona – 5. del: Upogibna trdnost preskušancev, (n.d.). Ljubljana.,

Spori, D. M., Drobek, T., Zürcher, S., Spencer, N. D., Cassie-State Wetting Investigated by Means of a Hole-to-Pillar Density Gradient, Langmuir, 26(12), 9465–9473, <https://doi.org/10.1021/la904714c>, 2010.

Tasiopoulou, T., Katsourinis, D., Giannopoulos, D., Founti, M., Production-process simulation and life-cycle assessment of metakaolin as supplementary cementitious material, Eng, 4(1), 761-779, 2023.

Wang, W., Sha, A., Lu, Z., Jia, M., Jiang, W., Liu, Z., Yuan, D., Self-luminescent cement-based composite materials: properties and mechanisms, Construction and Building Materials, 269, 121267, 2021.

Wu, Y., Dong, L., Shu, X., Yang, Y., She, W., Ran, Q., A review on recent advances in the fabrication and evaluation of superhydrophobic concrete, Composites Part B: Engineering, 237, 109867, 2022.



Maks Alič, dipl. inž. grad. (UN)
Maks.Alic@fgg.uni-lj.si



doc. dr., Robert Klinc, univ. dipl. inž. grad.
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK/UDC 332.812:69(497.4)

NORMATIVI ZA GRADBENO-OBRTNIŠKA DELA V SLOVENIJI SKOZI ČAS

NORMS FOR CONSTRUCTION AND CRAFT WORKS IN SLOVENIA OVER TIME

Povzetek

Gradbeni projekti so kompleksni in od udeležencev zahtevajo usklajevanje med ceno, časom trajanja in obsegom gradbenih del. Da bi zadostili vsem pogojem, se je treba na projekte ustrezno pripraviti. Časovno in finančno pripravo omogočajo normativi za gradbeno-obrtniška dela, ki določajo potrebno količino vhodnih surovin ali časa za izvedbo tehnološkega postopka. S pomočjo kakovostnih in ažurnih normativov je mogoče natančneje oceniti tako trajanje kot stroške projekta. Ker pa se je v zadnjih 20 letih v Sloveniji na tem področju naredilo premalo, trenutno izdani normativi ne odražajo nujno več realnega stanja. Z namenom, da bi se področje ponovno začelo razvijati, je bil pripravljen pregled zbirk normativov in njihovega razvoja na področju Slovenije od leta 1947 dalje. Zbirke so izdajale štiri različne organizacije, vsaka v svojem obdobju. Med seboj se razlikujejo po vsebovanih gradbeno-obrtniških delih in njihovi razdelitvi. Predstavljeni sta oblika zbirk normativov in njihova vsebina.

Ključne besede: gradbeno-obrtniška dela, normativi, operativno planiranje, produktivnost

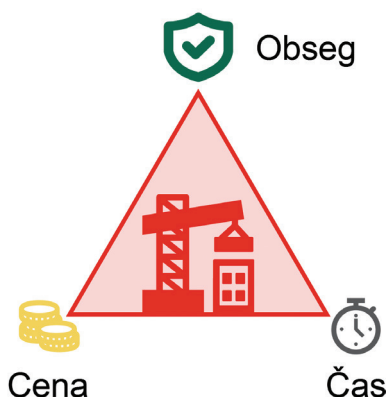
Summary

Effective construction management is essential for a successful construction project. This is facilitated by norms for construction and craft works, which specify the required input to achieve a technological output. Delays and cost increases are often highlighted in the media; therefore, it is important to select an appropriate basis for the planned project. High-quality and up-to-date norms make it easier to assess both project duration and cost. Unfortunately, insufficient progress has been made in this field over the past 20 years. This article presents the norms and their development in Slovenia since 1947. Four different organisations have issued collections of norms, each during its own period. The collections of norms differ in the construction and craft works included, as well as in their classification. The article presents the structure and content of the various collections of norms in Slovenia.

Key words: construction and craft works, construction management, norms, productivity

1 UVOD

Gradbeni sektor se razlikuje od drugih sektorjev, saj je vsak projekt unikaten. To pomeni, da je optimizacija proizvodnje težje dosegljiva. Za uspešno izvedbo gradbenega projekta je treba doseči ravnotežje med tremi vogali projektnega trikotnika – ceno, časom in obsegom [El-Maaty et al., 2018]. To lahko zagotovimo le s premišljenim operativnim planiranjem in pripravo na izvedbo. Kakovostni normativi gradbeno-obrtniških del omogočajo cenovno in časovno pripravo. Čeprav je vsak projekt prototip, se določeni tehnološki postopki pojavljajo pri več gradbenih projektih. Za takšne procese je mogoče izdelati normative, s katerimi lahko predvidimo potrebno količino časa, materiala in energije za njihovo izvedbo.



Slika 1. Projektni trikotnik

Izdelava normativov je proces, ki je bil v zadnjih 80 letih na območju Slovenije večkrat prepoznan kot nujen za dvig kakovosti priprave in izvedbe del. Zbirke so izdajali različni akterji, zadnja obsežnejša izdaja pa je bila med letoma 2005 in 2009. V prispevku je predstavljen razvoj oblike in vsebine normativov skozi čas.

2 NORMATIVI

Normativ je količina delovnega časa ali surovine, potrebne za izdelavo nekega izdelka oziroma uresničitev časa [SSKJ, 2014]. Določimo ga s pomočjo normiranja dela, pri čemer ob spremljanju dela beležimo povprečno porabo časa, materiala ali energije za enoto delovne operacije ali izdelka. Tako dobimo standardno oziroma normirano porabo.

Normativi običajno vsebujejo podatke o [Pšunder et al., 2008, p. 89]:

- izvedbi in variantah izvedbe tehnološkega postopka,
- vrsti in zahtevani kvalifikaciji delovne sile,
- porabi materiala, izražene v smiselni merski enoti na enoto izdelka,
- porabi časa, izražene v urah enega delavca na enoto izdelka,
- porabi časa, izražene v urah stroja na enoto izdelka,
- porabi električne energije ali tekočih goriv v smiselni merski enoti na enoto izdelka.

Dodatno lahko normativi vsebujejo:

- pogoje za uporabo,
- navodila za izvedbo,

- pribitke za delo v posebnih pogojih,
- navodila za obračun.

Normativi so neločljivo povezani s popisom del, vendar se od popisa razlikujejo. Tam je opisano samo delo ali rezultat dela, medtem ko so v normativih opisani posamezni tehnološki procesi. Delo je lahko sestavljeno iz več tehnoloških procesov.

2.1 Delitev normativov

Normativ je možno izdelati za vsak delovni proces. V gradbeništvu jih izdelujemo za gradbeno-obrtniška dela, pa tudi za montažo in izdelavo strojnih ter elektro inštalacij. Pri izdelavi zbirk normativov se je treba odločiti, katera dela bodo zajeta in kako bodo predstavljena oziroma združena.

Skozi zgodovino se je pogosto pojavljala delitev normativov za nizko in visoko gradnjo. Pogostejše so se izdelovali normativi za visoko gradnjo. Delitev del je bila pri vsakem izdajatelju normativov drugačna, skozi čas se je oblikovala osnovna delitev, ki jo običajno uporabljamo za dela v visoki gradnji [Pšunder et al., 2008, p. 37]:

- gradbena dela,
 - rušitvena dela,
 - zemeljska dela,
 - tesarska dela,
 - betonska dela,
 - zidarska dela,
 - druga gradbena dela,
- obrtniška dela,
- inštalacijska dela.

Normativi za gradbena dela poleg osnovne delitve pogosto zajamejo še pripravljalna dela ter notranje in zunanje Transporte. Pri obrtniških delih se normativi delijo na posamezne stroke. Pri inštalacijskih pa pri obstoječih normativih obstaja zgolj delitev na normative za elektro inštalacije in normative za strojne inštalacije.

Pri členitvi gradbeno-obrtniških del se lahko od maja 2024 uporabljajo Standardizirani opisi del, materialov in opreme za stavbe (SODMOS). Ta dokument združi gradbena in obrtniška dela v skupno stroko, loči pa strojne in elektro inštalacije [SODMOS, 2024]. Ker je bil SODMOS izdelan za namen priprave popisov, določeni tehnološki procesi v popis niso vključeni – npr. krivljenje armature.

Normativi so v zbirkah običajno razdeljeni na vrste del, podskupine, postavke in podpostavke. V različni literaturi je različno število nivojev. Običajno avtorji izberejo 4–5 nivojev med osnovno delitvijo in opisom tehnološkega procesa.

2.2 Delitev delovnega časa

Pri izdelavi normativov je treba upoštevati zgolj produktivni del delovnega časa, zato moramo poznati njegovo delitev. Delovni čas je sestavljen iz produktivnega dela in izgub, delitev je prikazana v preglednici 1.

2.3 Izdelava normativov

Priprava normativov je časovno potratna, saj je za vsak tehnološki proces treba pridobiti njegov standardni oziroma

Produktivno delo	Izgube delovnega časa
• Koristno delo • Odmor • Tehnološka prekinitev	• Slučajno delo • Odvečno delo • Porušena delovna disciplina • Zastoj

Preglednica 1. Delitev dela [Pšunder et al., 2008, pp. 80–82]

normirani čas. Normativi, izdani na našem področju, imajo redko opisano metodologijo priprave. Izjema so normativi ZGIGM, ki naj bi bili pripravljeni po metodi REFA [ZGIGM, 1985]. V gradbeništvu se sicer uporabljajo metode merjenja porabe delovnega časa, in sicer [Pšunder et al., 2008, p. 89]:

- metoda kronometraže,
- metoda fotopregledov,
- metoda posnetkov delovnega dne,
- metoda naključnih posnetkov.

V tujini so poleg teh metod testirali tudi uporabo senzorjev, nameščenih na telo uporabnika Khazen et al., 2024], in uporabo računalniškega vida za analizo videoposnetkov [Alsakka et al., 2023]. V preteklosti so izvajali tudi raziskave gibov, kjer so ročne operacije razčlenili na gibe [Gilberth, 1921].

Normative za delo s stroji lahko določimo tudi z uporabo merilnih naprav, ki beležijo efektivno delo, zastoje, porabo energije, obremenitev strojev in opravljeno pot. Normativi za porabo materiala so enostavni za izračun, saj potrebujemo le vhodne podatke o zahtevani kakovosti izdelkov, vhodnih materialih, tehničnih lastnostih, odpornosti in dopustnem odpadku.

Osnovna enačba za izračun normativa je:

$$N = \frac{T}{Q} \quad (1)$$

N ... normativ

T ... čas

Q ... količina izdelka

2.4 Vrsta delovne sile

V normativih se pogosto pojavlja delitev delovne sile glede na njihovo kvalificiranost. Kvalificiranost delavca je odvisna od njegove izobrazbe oziroma usposobljenosti za določeno delo. Bolj kvalificirana delovna sila lahko opravlja kompleksnejše in odgovornejše naloge.

NK	nekvalificirana delovna sila
PK	polkvalificirana delovna sila
KV	kvalificirana delovna sila
VKV ali VK	visokokvalificirana delovna sila

Preglednica 2. Delitev delovne sile glede na kvalificiranost

3 NORMATIVI V SLOVENIJI

Na območju Slovenije so bile v preteklosti izdelane različne javno dostopne zbirke normativov. Nekatere je izdala država, druge pa podjetja in so jih dala v širšo uporabo. Prva zbirka normativov pri nas je bila izdana leta 1947, ko je Ministrstvo za gradnje FLRJ izdalo Začasne norme v graditeljstvu. Ta zbirka je redno izhajala in se posodabljala do leta 1979. Ker so bile Začasne norme izdane za celotno območje Jugoslavije in zato premalo specifične za območje Slovenije, so leta 1969 v Združenju gradbenih podjetij GIPOSS izdali svoje gradbene norme. V kasnejših letih so se povezali z drugimi podjetji in izdajali posodobljene izdaje do leta 1984, ko je izšla zadnja, četrta izdaja. Med letoma 1985 in 1997 je delne normative za gradbena dela izdajalo Splošno združenje gradbeništva in industrije gradbenega materiala (SZGIGM). Nato so na našem območju izšle le še tri zbirke normativov za gradbena in obrtniška dela pod okriljem Obrtne in Gospodarske zbornice Slovenije (OZS in GZS), od tega leta 1999 in 2009 za keramičarska dela. Zadnja kompletna zbirka normativov za gradbena dela je izšla leta 2005 pod okriljem OZS. V kasnejših letih je Obrtniška zbornica Slovenije posodabljala normative za obrtniška dela, dodala normative za strojne inštalacije, normativov za gradbena dela pa ni več izdajala.

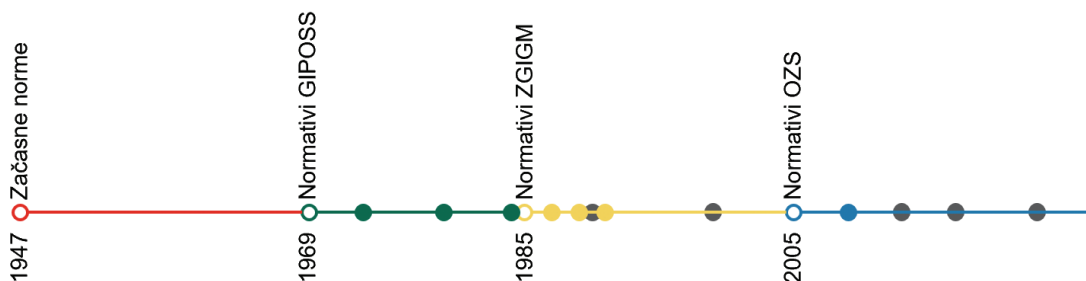
Kronološki pregled izdaj zbirk normativov je narejen na sliki 2. Seznam izdanih normativov v Sloveniji:

- Začasni normativi v graditeljstvu (1947) [Začasne norme v graditeljstvu – Betonska dela, dela iz armiranega betona in strojna vdelava betona, 1947].
- Gradbene norme GIPOSS (1969) [Gradbene norme GIPOSS: GNG, 1969].
- Gradbene norme GIPOSS (1973) [Gradbene norme GIPOSS: GNG, 1973].
- Gradbene norme GIPOSS (1979) [Gradbene norme GIPOSS: GNG, 1979].
- Gradbene norme GIPOSS (1984) [Gradbene norme GIPOSS: GNG, 1984].
- Standardizirani opisi in normativi v gradbeništvu – visoka gradnja SZGIGM (1985) [Standardizirani opisi in normativi v gradbeništvu – Visoka gradnja, 1987].
- Standardizirani opisi v gradbeništvu – visoke gradnje, SZGIGM (1987) [Standardizirani opisi in normativi v gradbeništvu – Visoka gradnja, 1987].
- Standardizirani opisi in normativi za vodnogospodarska dela – Skupnost VGP in SZGIGM (1989) [Standardizirani opisi in normativi za vodnogospodarska dela, 1989].
- Kamnoseška dela, standardizirani opisi in normativi (1990) [Kamnoseška dela: standardizirani opisi in normativi, 1990].
- Standardizirani opisi in normativi v gradbeništvu, ZGIGM (1991) [Gradbeni normativi in popisi del, n.d.].
- Keramičarska dela, Standardizirani opisi in normativi GZS, OZS (1999) [Keramičarska dela: standardizirani opisi in normativi, 1999].
- Normativi za gradbena dela OZS (2005) [Normativi za betonska in armiranobetonska dela, 2005].
- Keramičarska dela, Določila za izvedbo in kontrolo, Pravila merjenja z opisi del in normativi potrebnega materiala in časa za izdelavo, OZS – Sekcija gradbincev, Odbor polagalcev keramičnih oblog in GZS ZGIGM (2009) [Bukovec et al., 2009].

- Posamezna dela so razdeljena na pozicije, označene s trimestnimi številkami. Vendar se te številke začnejo znova v vsakem poglavju. Normativi so podani v obliki preglednic. Primer je prikazan v preglednici 2.

Seznam zvezkov v slovenščini [Začasne norme v graditeljstvu – Betonska dela, dela iz armiranega betona in strojna vdelava betona, 1947]:

- Zemeljna dela (GN 200, GnU 200, GR 200),
- Naprava temeljev s piloti in zagatnimi stenami (GN 110, GnU 110),



Slika 2. Kronološki pregled izdaj normativov

3.1 Začasne norme v graditeljstvu

Začasne norme v graditeljstvu so bile izdane 15. aprila 1947. Izdalo jih je Ministrstvo za gradnje FLRJ z namenom določiti in povečati produktivnost gradbenega sektorja na območju Federativne ljudske republike Jugoslavije. Normativi so bili enotni in obvezni za celotno takratno državo, dovoljena so bila odstopanja do 15 % med posameznimi območji. Za večja odstopanja je moral izdati dovoljenje minister za gradnje [Začasne norme v graditeljstvu – Betonska dela, dela iz armiranega betona in strojna vdelava betona, 1947].

Normativi so bili izdani na podlagi Uredbe o začasnih normah in začasnih tehničnih predpisih v graditeljstvu. Podatki o normah so bili pridobljeni na podlagi približnih opazovanj in ne z metodami merjenja porabe delovnega časa [Pajk, 1976]. Zbirke normativov za različna gradbeno-obrtniška dela so bile izdane v 20 zvezkih, 13 v slovenskem jeziku in 7 v hrvaškem. V zvezkih je bila zajeta vsaj ena kategorija od: norme učinka (GN), norme porabe (GnU) in tehnični predpisi (GR) [Začasne norme v graditeljstvu – Betonska dela, dela iz armiranega betona in strojna vdelava betona, 1947].

Norme učinka zdaj enačimo s produktivnostjo, to pomeni, koliko je količinsko narejenega v časovni enoti, običajno v osmih urah. Normo porabe danes imenujemo normativ, torej koliko časa je potrebnega za eno enoto količine. Tehnični predpisi opisujejo način in kakovost izvedbe.

Vsak zvezek normativov je zapisan v kronološkem zaporedju, kot potekajo dela. Pred vsako vrsto del so navedena splošna določila, ki določajo spremljajoče normative, posebne pogoje pri izvedbi, pomožna dela in uporabljene oznake. Pred normami učinka posameznih del so navedeni še splošni pogoji uporabe.

- Zidarska dela na zgradbah (CN 301, GnU 301),
- Betonska dela (CN 400, GnU 400), Dela iz armiranega betona (CN 410, GnU 410), Strojna vdelava betona (GnU 440),

POZICIJA xxx	opis postavke			
MATERIAL	opis materiala	enota	količina/ normativ materiala	dodaten opis/naved- ba pozicije norm porabe
	opis materiala	enota	količina/ normativ materiala	dodaten opis/naved- ba pozicije norm porabe
IZDELAVA	opis normativa	vrsta delovne sile	normativ	dodaten opis/naved- ba pozicije norm porabe
	opis nor- mativa/ pomožne delovne operacije	vrsta delovne sile	normativ	dodaten opis/naved- ba pozicije norm porabe
opombe				

Preglednica 3. Primer oblike normativa v Začasnih normah v graditeljstvu

- Tesarska dela na zgradbah (GN 601, GnU 601),
- Odri na zgradbah (GN 611, GnU 611),
- Odri za nosilce in oboke (GN 615, GnU 615).

Seznam zvezkov v hrvaščini [Začasne norme v graditeljstvu – Betonska dela, dela iz armiranega betona in strojna vdelava betona, 1947]:

- Krovna dela na zgradbah (GN 361, GnU 361),
- Fasaderska dela in dela iz umetnega kamna (GN 421, GnU 421),
- Kamnoseška dela na zgradbah (GN 261, GnU 261),
- Izdelava lesenih mostov in prepustov (GN 625, GnU 625),
- Izdelava konstrukcij iz kamna (GN 260, GnU 260), Zidarska dela na cestah (GR 260),
- Dela pri makadamskih cestah (GN 222, GnU 222), Nabava kamnitega gradiva za makadamske ceste (GR 222/1), Izdelava makadamskih cestišč (GR 222/2),
- Dela pri tlakovanju kamnitih cestišč (GN 242, GnU 242), Izdelava kamnitega tlaku (GR 242),
- Dela pri betonskih cestiščih (GnU 482), Dela pri bitumen- skih cestiščih (GnU 902),
- Dela pri regulaciji vodotokov (GN 254, GnU 254, GR 254),
- Drenažna in regulacijska dela (GN 274, GnU 274),
- Kanalizacijska dela (GN 804, GnU 804),
- Vodovodna dela (GN 814, GnU 814),
- Dela v predorih (tunelih) (GN 206, GnU 206).

3.2 Gradbene norme GIPOSS

V letih po drugi svetovni vojni je bil razvoj tehnologije izvedbe in organizacije dela zelo hiter. Kot navajajo Gradbene norme GIPOSS, Začasne norme v graditeljstvu razvoju niso sledile dovolj dosledno, zato so večja gradbena podjetja normative

Tako kot v Začnih normah v graditeljstvu [Začasne norme v graditeljstvu – Betonska dela, dela iz armiranega betona in strojna vdelava betona, 1947] so tudi v GNG [Gradbene norme GIPOSS: GNG, 1979] normativi navedeni v kronološkem vrstnem redu. Na začetku posameznih pozicij vrst del so navedeni splošni pogoji za to delo, pod posameznimi pozicijami pa so podane opombe, navodila za obračun, izdelavo in morebitni dodatki (pribitki) k normativom glede na pogoje. Normativi so podani v obliki preglednic. Primer je prikazan v preglednici 3.

Seznam vrst del v Gradbenih normah GIPOSS [Gradbene norme GIPOSS: GNG, 1979]:

- GNG-1: Zemeljska dela,
- GNG-2: Betonska, armiranobetonska in železokrivska dela,
- GNG-3: Zidarska dela
- GNG-4: Tesarska dela,
- GNG-5: Fasaderska dela
- GNG-6: Kanalizacija,
- GNG-7: Prenosi in prevozi.

3.3 Normativi ZGIGM

V gradbenem sektorju so si ob uvedbi računalniških tehnologij in razvoju tehnologije izvedbe želeli poenotenja sistema šifriranja, standardov in normativov za vse vrste gradbenih del na območju celotne Slovenije. Zato so se v Splošnem združenju gradbeništva in industrije gradbenega materiala Slovenije (ZGIGM) odločili odkupiti normative za visoke gradnje od SGP Gorica, Nova Gorica [ZGIGM, 1985]. Do leta 1997 je ZGIGM izdal več prenovljenih izdaj in izdaj, specifičnih za posamezne vrste del, na primer za vodnogospodarska dela (1989) [Gradbeni normativi in popisi del, n.d.].

Postavka	Opis	Moč motorja	Učinek stroja	Material	Material	Delo		
		KS	m3/uro	pogonski material	Tip materiala	VKV	KV	PK
					kg/kWh/m3	ur	ur	ur
2.xxx								

Preglednica 4. Primer oblike normativa v GNG

dopolnjevala in popravljala. Dopolnjene normative so nato uporabljala za interno poslovanje. V Združenju podjetij GIPOSS so leta 1967 ustanovili komisijo, ki je na podlagi lastnih izkušenj sestavila nove normative – Gradbene norme GIPOSS (GNG). Prva izdaja GNG je izšla leta 1969 in je na presenečenje izdajateljev vzbudila veliko zanimanje tako v gradbeni praksi kot v izobraževalnih institucijah. Sledile so še tri izdaje v letih 1973, 1979 in 1984, ki so jih sproti dopolnjevali z novimi tehnologijami in popravki na podlagi anket, poslanih vsem gradbenim podjetjem v Sloveniji [Gradbene norme GIPOSS: GNG, 1979].

Gradbene norme GIPOSS so razdeljene na sedem vrst gradbenih del, nato še na dodatne pozicije pri posameznih delih. Pozicije so tako kot pri Začnih normah označene s trimestnimi številkami. V GNG so navedeni le normativi, kot jih trenutno poznamo, ne pa tudi produktivnost ali tehnične smernice.

xx xx xx x (oznaka)		opis vrste del		
xx xx xx x xx (oznaka)				
opis postavke	yyyyyyyyy (oznaka)	Opis norma- tiva (material- ni/vrsta dela)	normativ	enota

Preglednica 5. Primer oblike normativa ZGIGM

Zbirka je bila po navedbah izdajateljev izdelana na podlagi metode REFA. Normativi ZGIGM so razdeljeni na enajst poglavij, vsako za svojo vrsto del. Vrste del so nato dodatno razdeljene na podpostavke in naprej na pozicije. Uveden je bil devetmestni številčni šifrant.

Normativi so razporejeni kronološko, po zaporedju izvedbe del. Delitev pozicij je zelo podrobna. Nekatere pozicije so v opisu različne, njihovi normativi pa enaki – na primer pri mešanju betonov različnih kakovosti (oziroma mark). Nekatere podpostavke imajo v opombah zapisana navodila za enoto obračuna, večina pa teh opomb nima. Normativi so podani v obliki preglednic. Primer je prikazan v preglednici 4.

Seznam vrst del v normativih ZGIGM:

- Pripravljalna dela,
- Zemeljska dela,
- Betonska dela,
- Zidarska dela,
- Tesarska dela,
- Krovsko dela,
- Fasaderska dela,
- Kanalizacija,
- Zunanja dela,
- Pomoč obrtnikom,
- Notranji prenosi

3.4 Normativi za gradbena dela OZS

Zadnji normativi, izdani na našem območju in dostopni širši javnosti, so normativi Obrtne zbornice Slovenije. Pripravljeni so bili na pobudo članov zbornice in manjših podjetij, ki so v procesu gradnje običajno podizvajalci. Z izdelavo normativov za gradbena dela je OZS želela zagotoviti podlago in boljše pogajalsko izhodišče pri določanju cen ter s tem izboljšati njihov položaj na trgu. OZS je začela pripravljati normative leta 2004, kot osnovo pa so uporabili Gradbene norme GIPOSS. Med letoma 2005 in 2008 je izdala prvo izdajo normativov za različna gradbena in obrtniška dela. Leta 2009 je izdala Dopolnitve gradbenih normativov [Dopolnitve gradbenih normativov, 2009; Normativi za betonska in armiranobetonska dela, 2005]. V kasnejših letih so bile novejšje izdaje normativov izdane le za nekatera obrtniška dela.

Normativi OZS so razdeljeni na enajst knjig, vsaka za svojo vrsto del. Dela so nato podrobneje razdeljena na podstavke in pozicije. OZS je uvedla dvanajstmestni številčni šifrant v upanju, da ga bo mogoče enostavneje kombinirati z drugimi sistemi.

Tudi v tej zbirki so normativi razporejeni kronološko. Podobno kot v normativih ZGIGM so pri nekaterih betonskih delih navedeni enaki normativi (glede porabe materiala in časa) za različne pozicije. Edina razlika je v marki betona, ki je označena v opisu pozicije. Vsaka knjiga ima na začetku navodila za obračunavanje del, sicer pa so normativi OZS zelo skopi. Razen številčnih vrednosti normativov ne vsebujejo nobenih pogojev uporabe ali dodatkov za povečanje normativa v zahtevnejših pogojih dela. Normativi so podani v obliki preglednic. Primer je prikazan v preglednici 5.

Oznaka	Opis	Vrsta delavca	Material/Materiali	Energija	Stroj
		Ura	kg ali m ³ ali kos ali m	kWh	ura

Preglednica 6. Primer oblike normativa OZS

Seznam knjig Normativov OZS:

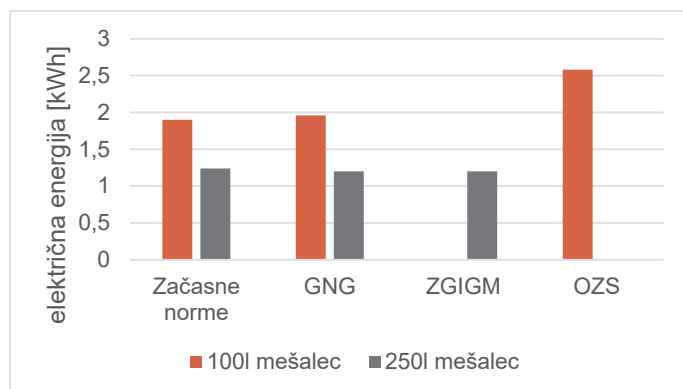
- Normativi za zemeljska in kanalizacijska dela,
- Normativi za betonska in armiranobetonska dela,
- Normativi za zidarska dela,
- Normativi za tesarska dela,
- Normativi za zunanje prevoze in notranje prenose,
- Dopolnitve gradbenih normativov,
- Normativi za keramičarska dela,
- Normativi za suhomontažno gradnjo,
- Krovsko-kleparski priročnik,
- Normativi za slikopleskarska dela,
- Normativi za strojne inštalacije.

4 RAZPRAVA

V preteklosti so bili na območju Republike Slovenije izdelani različni normativi. Ob hitrem pregledu izdanih zbirk opazimo, da sta le dve unikatni: Začasne norme v graditeljstvu in Gradbene norme GIPOSS. V kasnejših obdobjih so zbirke sicer nekoliko posodabljali in dopolnjevali, vendar so z izjemo novih šifrantov, premešanega vrstnega reda, združevanja in razdruževanja postavk, poimenovanj ter nekaj tehnoloških procesov praktično identične.

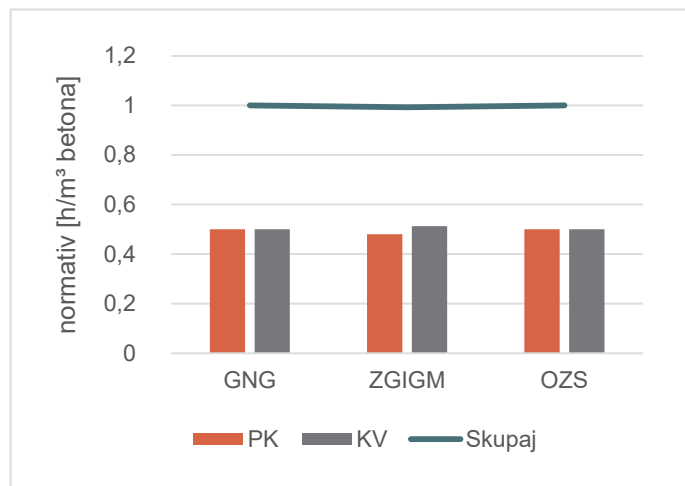
To je razvidno tudi iz vrednosti normativov. Smiselno je, da so normativi za porabo materiala pri enakih tehnoloških procesih skozi čas enaki. Vendar bi bilo pričakovati, da se poraba energije s časom zmanjšuje, še posebej glede na to, da proizvajalci opreme stalno stremijo k izboljšanju učinkovitosti [Whitfield et al., 2025]. Ker je gradbeno-obrtniških del v zbirkah normativov veliko, smo se v razpravi osredotočili na betonska dela.

Na sliki 3 je razvidno, da se poraba energije pri 250-litrskem mešalcu po normativih za pripravo betona v 38 letih med izdajami zbirk normativov ni spremenila, medtem ko je poraba energije za pripravo betona v 100-litrskem mešalcu v 58 letih celo narasla. Takšni podatki niso smiselni, saj je poraba energije pri pripravi betonske mešanice odvisna predvsem od učinkovitosti mešalca. Smiselno bi bilo, da bi se poraba skozi leta zmanjševala ali pa se vsaj spreminjala podobno pri različnih mešalcih. Možno je, da so različni izdelovalci upoštevali različne predpostavke, vendar te žal niso nikjer opisane. Pri normativih ZGIGM je opisan le 250-litrski mešalec, pri normativih OZS pa le 100-litrski mešalec.



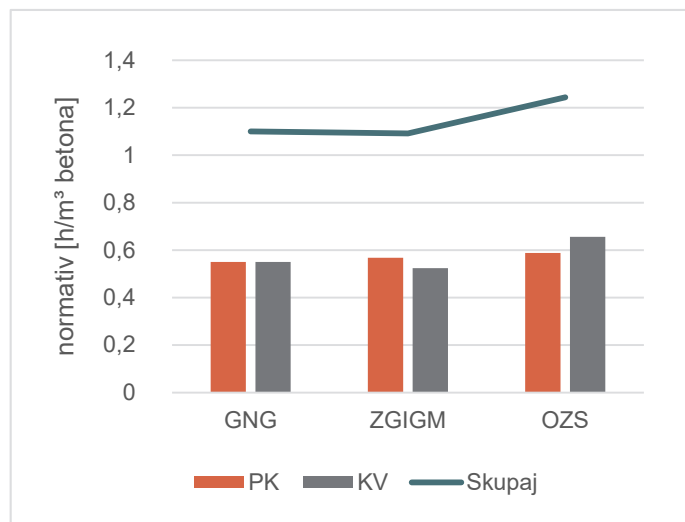
Slika 3. Poraba energije za kubični meter betona v kWh (višja številka pomeni večjo porabo)

Prav tako pri pregledu zbirk normativov v Sloveniji opazimo, da se pri nekaterih tehnoloških procesih produktivnost v več kot 30 letih glede na izdane zbirke ni bistveno spremenila. To sicer ne velja za vse vrste del, vendar se takšne postavke pojavljajo pre pogosto, da bi jih lahko označili za naključje. Na sliki 4 lahko opazimo, da se, sodeč po izdanih normativih, hitrost strojnega vgrajevanja betona v nearmirane konstrukcije med 0,3 in 0,5 m²/m³ v več kot 20 letih ni povečala.



Slika 4. Strojno vgrajevanje betona v nearmirane konstrukcije prereza 0,3-0,5 m²/m³ (višja številka pomeni nižjo produktivnost)

Na sliki 5 lahko opazimo primer, ko se je produktivnost nekoliko poslabšala. Medsebojna primerjava normativov različnih izdajateljev je zahtevna, saj poleg različnih šifrantov v opisih del uporabljajo tudi različne tehnološke procese. To pomeni, da dela med seboj niso vedno primerljiva. Na primer, pri delih armiračev so opisi precej različni. Pri GNG je en tehnološki proces rezanje, ravnanje in krivljenje, drugi pa polaganje in veza-



Slika 5. Strojno vgrajevanje betona v armiranobetonske konstrukcije prereza 0,3-0,5 m²/m³ (višja številka pomeni nižjo produktivnost)

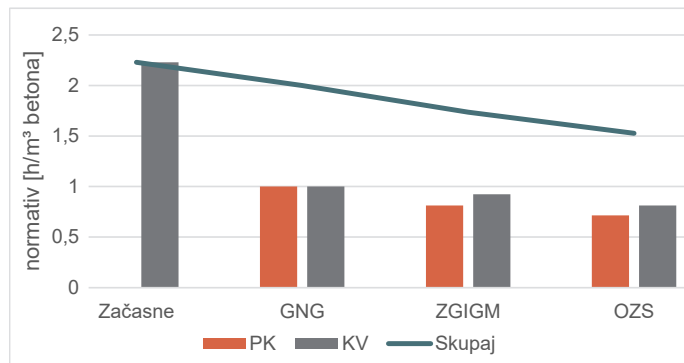
nje. Pri normativih OZS pa je tehnološki proces opredeljen kot izdelava in vgrajevanje, pri čemer ni pojasnjeno, kaj je zajeto v izdelavi.

Poleg različnih opisov podobnih tehnoloških procesov različne zbirke uporabljajo tudi različne enote v imenovalcih. Tako je na primer normativ za armaturo v Začnih normah izdelan na 50 kg armature, v GNG na 1000 kg, v normativih OZS pa na 1 kg. Razlike se pojavljajo tudi v normativih strojev, kjer normativi GNG določajo urno učinkovitost stroja.

Problem vseh normativov, izdanih na območju Slovenije, je pomanjkljivo opisana metodologija njihove izdelave. Normativi GIPOSS navajajo, da so bili izdelani na podlagi izkušenj vodilnih kalkulantom v združenju podjetij, normativi ZGIGM pa na podlagi metode REFA. Ta dva podatka sta premalo, da bi lahko z gotovostjo trdili, da so bili normativi ustrezno izdelani. Preostale zbirke podatkov o metodologiji izdelave sploh nimajo.

Poleg pomanjkljivih informacij o metodologiji izdelave se pri novejših zbirkah pojavlja vedno manj podatkov o pogojih veljavnosti normativov in morebitnih potrebnih korekcijah v posebnih okoliščinah. Tako normativi na prvi pogled delujejo bolj univerzalno, vendar to v resnici predstavlja večjo omejitev za vse uporabnike, saj nikoli ne morejo vedeti, ali so pri uporabi zbirke znotraj njenih veljavnih robnih pogojev.

Poleg zgoraj opisanih težav z izdajami normativov skozi čas najdemo tudi postavke, ki bolj sledijo pričakovanjem, vendar se med izdajami normativov spreminjajo. Na sliki 6 je prikazan dvig produktivnosti skozi čas pri strojnem vgrajevanju plastičnega betona v običajne prereze. Pri tem je treba opozoriti, da je pri Začnih normah več podobnih postavk; izbrana je bila postavka za dvojno armirane plošče brez reber s prerezom, večjim od 0,20 m³/m², pri normativih GNG pa je prerez med 0,12 in 0,30 m³/m².



Slika 6. Strojno vgrajevanje betona v konstrukcije preseka 0,2 – 0,3 m³/m² plastičen beton (višja številka pomeni nižjo produktivnost)

V anketi, ki je bila izvedena v sklopu diplomske naloge [Alič, 2024], je bilo ugotovljeno, da je uporaba gradbenih norm GIPOSS še vedno precej pogosta, uporabljajo pa se tudi normativi OZS, ki so vključeni v nekatere programe za operativno planiranje. Podjetja že izdelane normative pogosto prilagajajo lastnim izkušnjam s terena. Te prilagoditve običajno temeljijo na izkušnjah posameznikov in ne na meritvah. Normativi za gradbena dela so vključeni v nekatere programe, ki so dostop

ni na slovenskem trgu. Primera takšnih programov sta BLIST [BLIST, n.d.] in Softbase [Gradbeništvo, n.d.]. Glede na trenutno stanje zbirk normativov bi jih lahko začeli posodabljeni tako, da bi zbrali te izkušnje in izvedli potrebne prilagoditve. V naslednjem koraku pa bi morali začeti sistematično izvajati terenske meritve produktivnosti in izdelati novo zbirko normativov za gradbeno-obrtniška dela.

Normative za gradbeno-obrtniška dela bi lahko izdelali tudi na drugačen, bistveno enostavnejši način za izdelovalce. V zahodnem svetu so normativi pogosto predstavljeni kot cena na enoto izdelka. To bi sicer pomenilo ponovno spremembo sistema normativov, vendar bi lahko ohranili obstoječo razvrstitev in hkrati neposredno ocenili končni strošek projekta. Slabost takšnega načina izdelave normativov je, da bi bilo treba izvesti raziskavo za celotno zbirko, saj podatkov iz starejših zbirk ne bi bilo mogoče prepisati. Prav tako bi bilo treba zbirke bistveno pogostejše osveževati ali upoštevati rast cen glede na leto izdelave referenčnih normativov. Takšne zbirke bi lahko tudi lažje primerjali s tujimi, če bi jih redno posodabljali, pa bi lahko prek normativov spremljali tudi rast cen gradbenih del.

5 ZAKLJUČEK

Normativi za gradbeno-obrtniška dela omogočajo kakovostno tehnološko pripravo na gradbeni projekt, vendar le, če so tudi sami ustrezno izdelani. Skozi zgodovino so različni deležniki poskušali proces tehnološke priprave izboljšati z izdelavo različnih normativov, ki so jih sčasoma dopolnjevali z novimi tehnološkimi procesi, in tako sledili razvoju stroke. Žal so poleg dodajanja novih procesov spreminjali tudi način razvrstitve in vsebino normativov. Novejši normativi so zato bistveno manj obsežni od starejših in uporabniku ne ponudijo dovolj informacij za njihovo uporabo. To se kaže v manjkajočih pogojih za uporabo normativov in v manjkajočih modifikacijah normativov glede na pogoje okolja.

Poleg zmanjšanja informacij je pri zbirkah normativov skozi čas opaziti tudi veliko prepisovanja iz starejših zbirk. Takšno ravnanje je verjetno posledica dejstva, da je potreben obseg meritev za izdelavo takšnih zbirk zelo velik. V zadnjih 20 letih pa je razvoj normativov za večino gradbeno-obrtniških del popolnoma zastal.

V Sloveniji potrebujemo posodobljene in kakovostne normative za gradbeno-obrtniška dela, saj bomo le tako lahko učinkoviteje vodili projekte in povečali produktivnost našega sektorja. Trenutno uporabljeni normativi namreč ne upoštevajo spreminjenih okoliščin na trgu dela ter značilnosti sodobnih tehnoloških procesov, obenem pa so v veliki meri stihijsko prilagojeni vsakemu posameznemu podjetju, včasih pa celo projektu.

Izdelava kakovostnih normativov bi zahtevala sodelovanje številnih deležnikov, hkrati pa bi bilo treba vsaj delno uporabiti že uveljavljene sisteme, saj bi bila implementacija tako bistveno enostavnejša.

6 LITERATURA

Alič, M., Analiza normativov za betonska dela (Diplomska naloga). Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, Retrieved from <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=159668>, 2024.

Alsakka, F., El-Chami, I., Yu, H., Al-Hussein, M., Computer vision-based process time data acquisition for offsite construction, Automation in Construction, 149, 104803, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104803>, 2023.

BLIST, (n.d.), Retrieved February 20, 2026, from <https://www.best.si/blist/>

Bukovec, F., Horvat, D., Kocuvan, S., Rozman, J., Vučič, M., Žemva, Š., ... Verbovšek Judež, V., Keramičarska dela : določila za izvedbo in kontrolo, pravila merjenja z opisi del in normativi potrebnega materiala in časa za izdelavo. Obrtno-podjetniška zbornica Slovenije, Sekcija gradbincev, Odbor polagalcev keramičnih oblog : Gospodarska zbornica Slovenije, Zbornica gradbeništva in industrije gradbenega materiala, 2009.

Dopolnitve gradbenih normativov (1st ed.). Ljubljana: Obrtno-podjetniška zbornica Slovenije, 2009.

Dušak, S., Normativi za strojne inštalacije (1 izd.). Ljubljana: Obrtno-podjetniška zbornica Slovenije, Sekcija instalaterjev-energetikov, 2023.

El-Maaty, A. A., Akal, A. Y., El-Hamrawy, S. A., The Iron Triangle of Projects Management: Quality, Schedule and Cost of Road Infrastructure Projects in Egypt, In J. Calautit, F. Rodrigues, H. Chaudhry, & H. Altan (Eds.), Towards Sustainable Cities in Asia and the Middle East (pp. 1-14). Cham: Springer International Publishing, https://doi.org/10.1007/978-3-319-61645-2_1, 2018.

Gilberth, F. B., Motion Study: A method of increasing efficiency of the workman. New York: D. Van Nostrand Company, Retrieved from <http://www.archive.org/details/motionstudymetho-00gilbrich>, 1921.

Gradbene norme GIPOSS: GNG. Ljubljana: GIPOSS, 1969.

Gradbene norme GIPOSS: GNG. Ljubljana: GIPOSS, 1973.

Gradbene norme GIPOSS: GNG. Ljubljana: GIPOSS, 1979.

Gradbene norme GIPOSS: GNG. Ljubljana: GIPOSS, 1984.

Gradbeni normativi in popisi del, (n.d.), Retrieved September 17, 2025, from https://www.gzs.si/zbornica_gradbenistva_in_industrije_gradbenega_materiala/vsebina/Gradbeni-normativi-in-popisi-del

Gradbeništvo, (n.d.), Retrieved February 20, 2026, from <https://softbase.si/gradbenistvo/>

Kamnoseška dela: standardizirani opisi in normativi. Ljubljana: GZS, Sekcija za gradbeništvo : IGM, 1990.

Keramičarska dela : standardizirani opisi in normativi. Ljubljana: Obrtna zbornica Slovenije, Sekcija gradbincev, Odbor kera-

mičarjev in pečarjev : Gospodarska zbornica Slovenije, Združenje za gradbeništvo in IGM, 1999.

Markovič, F., Tome, M., Fornazarič, R., Pernaričič, J., Meža, F., Belehar, J., Suhomontažna gradnja (3rd ed.). Ljubljana: Obrtno-podjetniška zbornica Slovenije, Sekcija gradbincev, Odbor izvajalcev suhomontažnih del, 2013.

Mulalić, E., Kleparsko-krovski priročnik (1st ed.). Ljubljana: Obrtno-podjetniška zbornica Slovenije, Sekcija kleparjev in krovcev, 2017.

Normativ, Slovar slovenskega knjižnega jezika. Ljubljana: SAZU; Inštitut za slovenski jezik Frana Ramovša ZRC SAZU, Retrieved from <https://fran.si/iskanje?FilteredDictionaryIds=130&View=1&Query=normativ>, 2014.

Normativi za betonska in armiranobetonska dela (1st ed.). Ljubljana: Obrtna zbornica Slovenije, Sekcija gradbincev, 2005.

Pajk, M., Norme v gradbeništvu, In Kalkulacije gradbenih del (5th ed., Vol. 1976). Ljubljana: Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, 1976.

Pšunder, M., Klanšek, U., Šuman, N., Organizacija grajenja (1. izd.). Maribor: Fakulteta za gradbeništvo, Univerza v Mariboru, 2008.

Slikopleskarska dela. Ljubljana: Obrtno-podjetniška zbornica Slovenije, Sekcija slikopleskarjev, fasaderjev in črkoslikarjev, Retrieved from <https://plus.cobiss.net/cobiss/si/sl/bib/155647747>, 2023.

Standardizirani opisi del, materialov in opreme za stavbe, (, May). Inženirska zbornica Slovenije, Retrieved from https://www.izs.si/assets/media/izsnovo/2024/SODMOS_00_Kazalo_Uvodna%20pojasnila%20in%20dolo%C4%8Dila%20-%20dopolnjeno%20maj%202024.pdf, 2024.

Standardizirani opisi in normativi v gradbeništvu - Visoka gradnja. Ljubljana: Splošno združenje gradbeništva in IGM Slovenije, 1987.

Standardizirani opisi in normativi v gradbeništvu Visoka gradnja. Ljubljana: Splošno združenje gradbeništva in IGM Slovenije, 1985.

Standardizirani opisi in normativi za vodnogospodarska dela. Ljubljana: Skupnost VGP in Splošno združenje gradbeništva in IGM Slovenije, 1989.

Whitfield, M., McLean, M., (, September 15), How Construction Technologies Are Changing the Game, Retrieved September 22, 2025, from <https://www.volvoce.com/united-states/en-us/resources/blog/2025/how-construction-technologies-are-changing-the-game/>, 2025.

Začasne norme v graditeljstvu - Betonska dela, dela iz armiranega betona in strojna vdelava betona (1st ed.). Ljubljana: Ministrstvo za gradnje FLRJ, 1947.



Rok Mlakar, univ. dipl. inž. grad.¹

rok.mlakar@ponting.si
Ponting inženirski biro, d. o. o., Strossmayerjeva 28,
2000 Maribor, Slovenija



Jernej Maher, univ. dipl. inž. grad.^{1,2}

jernej.maher@ponting.si



dr. Viktor Markelj, univ. dipl. inž. grad.^{1,2}

viktor.markelj@ponting.si

¹ Ponting inženirski biro, d. o. o.,

Strossmayerjeva 28, 2000 Maribor, Slovenija

² Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno
inženirstvo in arhitekturo,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor



Znanstveni članek
UDK/UDC 625.745.11

MOST CERŠAK, MOST ZA PEŠCE IN KOLESARJE ČEZ MEJNO REKO MURO PRI CERŠAKU

BRIDGE CERŠAK, PEDESTRIAN AND CYCLISTS BRIDGE OVER THE BORDER RIVER MURA AT CERŠAK

Povzetek

V prispevku sta predstavljena projekt in gradnja mostu za pešce in kolesarje čez mejno reko Muro pri Ceršaku, ki je bil zgrajen v okviru mednarodne kolesarske povezave Ceršak–Oberschwarza med občinama Šentilj (SLO) in Straß in Steiermark (AUT). Vsled turističnega razvoja v regiji je občina Šentilj pristopila k trajnostnemu razvoju kolesarske in pohodniške infrastrukture na območju občine, v okviru katere je kot eno večjih investicij zgradila tudi novi most čez reko Muro v Ceršaku. V zaključni fazi investicije se je občina Šentilj povezala z občino Straß in Steiermark v sosednji Avstriji, skupaj sta most zgradili s pomočjo evropskih sredstev, ki sta jih črpali iz evropskega programa čezmejnega sodelovanja Interreg. Most povezuje levo nabrežje reke Mure (avstrijska stran) in otok na Muri, med naravno strugo in dovodnim kanalom Male hidroelektrarne Ceršak (MHE Ceršak).

Ključne besede: most, pešci, kolesarji, Mura, Interreg, les

Summary

The paper article presents the design and construction of a pedestrian and cyclist bridge over the border River Mura near Ceršak. The bridge was constructed as part of the international cycling link Ceršak–Oberschwarza, connecting the municipalities of Šentilj (Slovenia) and Straß in der Steiermark (Austria). In response to regional tourism development and increasing growing demand for non-motorized transport infrastructure, the Municipality of Šentilj initiated launched a programme for sustainable development of cycling and pedestrian infrastructure. As one of the key infrastructure investments within this programme, a new bridge, crossing the River Mura at Ceršak, was realized. In the final phase of the project, the Municipality of Šentilj partnered with the Municipality of Straß in der Steiermark in neighbouring Austria, and the bridge was jointly financed through European Union funds obtained under the Interreg cross-border cooperation programme. The bridge connects the left bank of the River Mura (Austrian side) with an island in the river, located between the natural riverbed and the intake channel of the Ceršak Small Hydropower Plant (SHP Ceršak).

Key words: bridge, pedestrians, cyclists, Mura River, Interreg, timber

1 UVOD

Ideja o gradnji novega mostu za pešce in kolesarje preko Mure pri Ceršaku je plod čezmejnega sodelovanja in povezovanja občin Šentilj (SLO) in Straß in Steiermark (AUT). Razvejenost in urejenost kolesarskih povezav vzdolž reke Mure sta na območju avstrijskih obmejnih občin zelo dobri, medtem ko so na slovenski strani te le delno urejene, večinoma speljane po obstoječih prometnicah, v fazi načrtovanja, deloma tudi že v gradnji. Pomanjkanje kolesarske infrastrukture je najbolj izrazito na območju med Ceršakom (Šentilj) in Sladkim Vrhom, edina možnost prečkanja reke Mure na tem območju pa je doslej bil brod na Muri v Sladkem Vrh.

Predvsem želje in ambicije šentiljske občine o širjenju obstoječe turistične infrastrukture in gradnji novih kolesarskih in pohodniških poti na slovenski strani so privedle do zagona projekta, ki sega v konec leta 2016, ko smo v podjetju Ponting, d. o. o., izdelali idejno zasnovo mostu [Ponting, 2016].

Idejni zasnovi je sledila izdelava projektne dokumentacije za pridobitev gradbenega dovoljenja [Ponting, 2018], ki smo jo izdelali v dveh izvodih, v dveh jezikih, saj je bilo treba pridobiti dve ločeni gradbeni dovoljenja, slovensko in avstrijsko. To projektno fazo sta zaznamovala predvsem izredno tog, okoren in dolgotrajen upravni postopek pridobivanja projektnih pogojev, mnenj in soglasij na slovenski strani ter izredno učinkovit postopek na avstrijski strani. Če so pri nas komunikacija, usklajevanje in odločanje državnih organov in soglasjedajalcev, od prvih vlog do izdaje gradbenega dovoljenja, trajali skoraj tri leta, je v Avstriji vse skupaj trajalo manj kot pol leta.

Projekt za izvedbo [Ponting, 2021] smo po uspešni kandidaturi naročnikov za pridobitev razvojnih evropskih sredstev za potrebe razpisa novelirali novembra 2023. Mednarodni izvajalski razpis sta občini investitorki uspešno izpeljali v prvi polovici leta 2024, gradbena dela pa je kot generalni izvajalec prevzelo podjetje Pomgrad, d. d., iz Murske Sobote. Gradnja mostu se je začela junija 2024, končala septembra 2025, slavnostna otvoritev mostu pa je bila 27. septembra 2025.



Slika 1. Most Ceršak na dan otvoritve (27. september 2025)

2 LOKACIJA IN ZASNOVA MOSTU

Novi most Ceršak stoji ca. 885 m dolvodno od avtocestnega mostu preko Mure, za mejnim prehodom Šentilj/Spielfeld, tik pod prelivom nekdanjega, danes porušenega jezua. Most povezuje levo nabrežje reke Mure (avstrijska stran) in otok na Muri, med naravno strugo in dovodnim kanalom Male hidroelektrarne Ceršak (MHE Ceršak) na slovenski strani. Približno po sredini reke Mure poteka tudi državna meja med Republiko Slovenijo in Republiko Avstrijo.

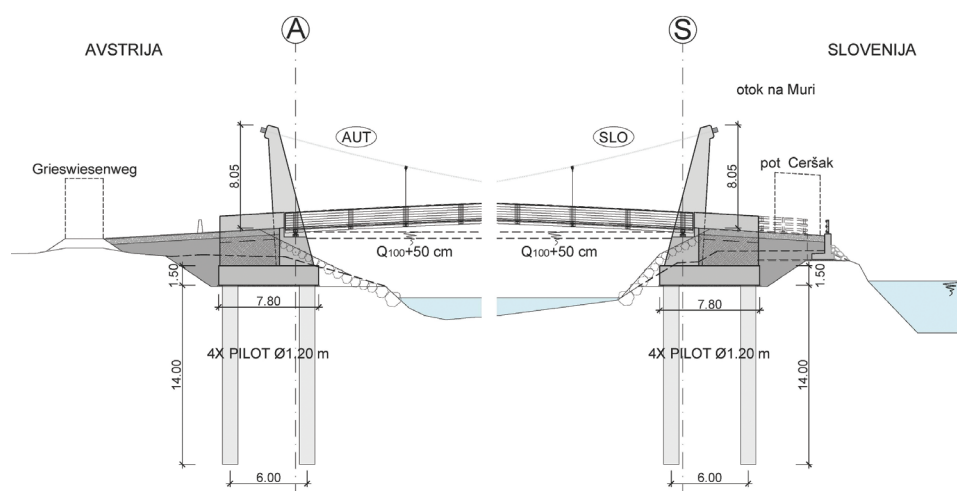
Morfologija terena na lokaciji je značilna za srednji tok reke Mure na tem območju, nizek levi breg na avstrijski strani in visok in strm desni breg gričevnate pokrajine na slovenski strani. Most je lociran v izrazito naravnem in občutljivem okolju, v območju naravne struge reke Mure. Na avstrijski strani se most navezuje na obstoječo kolesarsko pot med Wildonom in Radgono (Bad Radkesburg), na slovenski strani pa se navezuje na novo kolesarsko pot na otoku na Muri v smeri proti Sladkemu Vrh.

Glede na lokacijske danosti zaščitenega naravnega okolja, skladno s sodobnimi trendi v mostogradnji pa tudi na željo naročnika smo za prevladujoči material mostu izbrali les. Pri oblikovanju mostu smo sledili načelom optimizacije porabe materialov in inženirske estetike, kjer oblika konstrukcije izhaja iz razumevanja predvidenih obremenitev (vplivov) v času gradnje in uporabe, pa tudi iz same funkcionalnosti objekta. Svetla uporabna širina na mostu znaša 3,50 m, višina ograj je 1,20 m.

Most je zasnovan kot elastično podprta lesena gredna konstrukcija, obešena na jeklene vrvi, ki so sidrane v betonske pilone krajnih podpor – leseni viseči most. V svoji nedvoumni konstrukcijski logiki, z jasno členjenimi nosilnimi sklopi, most deluje zadržano in suvereno, njegova oblikovna čistost pa mu daje občutek lebdeče lahкости.



Slika 2. 3D simulacija idejne zasnove mostu [Ponting, 2018]



Slika 5. Vzdolžni prerez simetrično zasnovanih opornikov

nimi ležišči na opornikih ter preko jeklenih vešalk in jeklenih distančnikov, postavljenih na medsebojnem razmaku 8,60 m, obešena na nosilne jeklene vrvi, ki so sidrane na vrhu obojestranskih pilonov na opornikih. Razpon nosilnih vrvi med sidrišči znaša 90,6 m, vertikalna puščica $f_v = 6,55$ m ($\approx L/13,8$), horizontalna puščica $f_H = 1,82$ m.

Nosilne jeklene vrvi so polno zaprte (zatesnjene) vrvi s polnilom in dvojno cinkovo antikorozijsko zaščito (galfan). Premer nosilne vrvi je 62 mm (FLC062), s karakteristikami ($F_{R,k} = 3990$ kN ter $F_{R,d} = 2660$ kN). Vešalke so klasične jeklene zatege (natezne palice) s premerom 23 mm (M24) in geometriji prilagojenimi dolžinami ter obojestranskimi priključnimi vrtljivimi vilicami. Povezave med nosilno vrvjo, vešalko in prekladno konstrukcijo so sistemsko rešene z litoželeznimi oziroma vijachenimi vezmi. Nosilna vrv je prav tako s sistemskim sidriščem, ki omogoča napenjanje in naknadno korekcijo napetosti, sidrana v masivne betonske pilote na opornikih.

Krovna konstrukcija in pohodna površina sta prav tako leseni, sestavljeni iz vzdolžnikov B/H = 160/160 mm (GL24h), postavljenih na prečnem rastru 40 cm, in prečno postavljenih pohodnih profiliranih desk (accoya) debeline 40 mm, z vmesno fugo širine 1 cm.

3.2 Podporna konstrukcija in temeljenje

Jeklena ležišča, ki imajo v eni osi sproščene vzdolžne pomike, so sidrana v beton opornikov in preko jeklenih "čevljev" strižno povezana z lesenima nosilcema.

Oporniki so masivni armiranobetonski. Dimenzije temeljne plošče so 7,80 m × 6,20 m × 1,50 m, stene so konstrukcijsko debeline 50 cm, vzporedna krila pa v gabaritih prekritih vzdolžnih lesenih nosilcev 48–72 cm. Piloni, prav tako armiranobetonski, so višine 11,1 m nad temeljno ploščo oziroma ca. 8,1 m nad terenom. V prerezu se dimenzije nazaj in navzven nagnjenih pilonov spreminjajo od 250/113 cm ob vpetju v temeljno ploščo do 85/50 cm na vrhu (sidrišče nosilne vrvi).

Oporniki so globoko temeljeni na štirih pilotih premera 120 cm in dolžine 14 m. Piloti so postavljeni na medsebojnih razmakih 6,00 m oziroma 4,00 m, dolžina vpetja v lapornato osnovo pa, skladno s priporočili iz geološko-geotehničnega elaborata, znaša min. 6,00 m.

Brežine, razen dostopnih nasipov, se niso spreminjale in so se po končani gradnji povrile v prvotno stanje, v območju opornikov (± 10 m) so brežine dodatno utrjene s kamnometom iz naravnega kamna velikosti 70–100 cm.

Na slovenski strani se kolesarska pot v zavoju v smeri toka reke Mure dodatno varuje z manjšim podpornim zidom in ograjo.

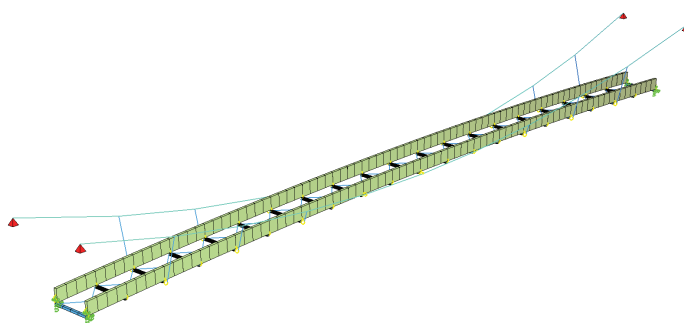
4 ANALIZA KONSTRUKCIJE

Pri statični in dinamični analizi je bil uporabljen programski paket Sofistik. Model konstrukcije za analizo je prikazan na spodnji sliki. Analiza opornikov je bila izvedena s programom Tower 3d Model Builder 7.0 in programskim paketom Cubus (Fagus 6.0). V sklopu analize sta bila za analizo uporabljena dva modela, in sicer:

- 2D-model, kjer so bile upoštevane dvojne togosti elementov in
- 3D-model, kjer je bila zmodelirana dejanska konstrukcija v prostoru.

Ravninski model je služil za kontrolo prostorske konstrukcije, opravljena je bila tudi analiza lepljenih nosilcev v fazi gradnje.

Nelinearna analiza konstrukcije je bila, skladno z evropskimi standardi Evrokod, izvedena po teoriji 3. reda, ki upošteva vpliv velikih deformacij.



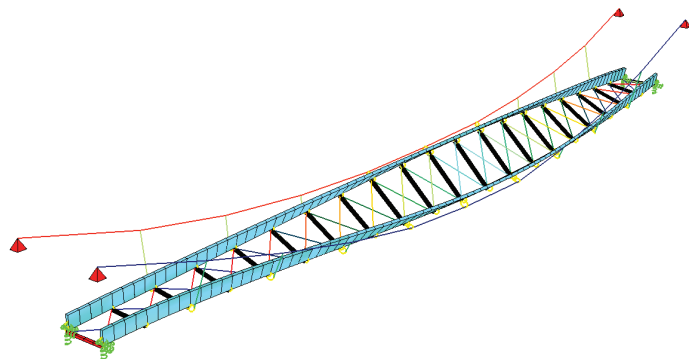
Slika 6. 3D računski model konstrukcije

4.1 Dinamična analiza – kontrola vibracij

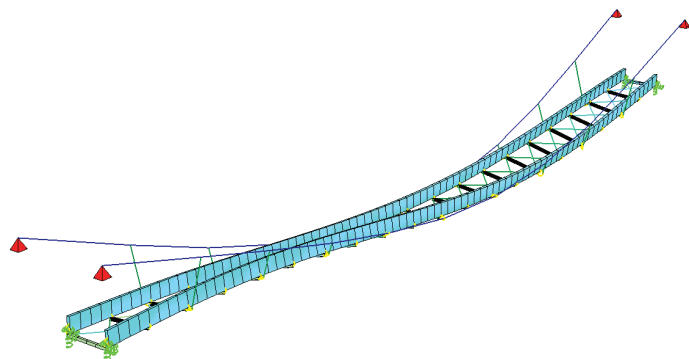
Mostovi za pešce in kolesarje so zaradi svoje zasnove mnogokrat podvrženi vibracijam, ki jih s hojo ali tekom povzročajo pešci. Za analizo vibracij smo upoštevali smernice, podane v SIST EN 1990; Annex A2 (točka A2.4.3), ter smernice, podane v tehničnem poročilu JRC, ki je bilo izdano v okviru raziskovalnega programa JRC-ECCS za razvoj Evrokoda 3.

Za most je bila opravljena analiza vibracij, v okviru katere sta bili v mejnem stanju uporabnosti uporabljeni dve različni metodologiji za izračun maksimalnih pospeškov; metoda s spektrom odziva in metoda s časovnim odzivom (»time history« analiza). Metodo s spektri odziva smo uporabili le za oceno pospeškov, medtem ko se je glavna analiza naredila s pomočjo THA-analize, pri čemer smo maksimalne pospeške za obtežni primer hoje preverili v skladu z enačbami, podanimi v SIST EN 1995-2. Narejena je bila analiza za obtežna primera hoje in teka, in sicer štirih pešcev oziroma treh tekačev ter skupine maksimalno 16 pešcev (4x4) oziroma 12 tekačev (4x3), ki sinhrono hodijo oz. tečejo preko mostu.

Obešeni mostovi so zaradi svoje narave podvrženi večjim vibracijam, ki jih povzročajo pešci. Kljub temu pa je iz rezultatov razvidno, da so pospeški v okviru priporočenih vrednosti (redna projektna situacija) oziroma so v posameznih redkih situacijah minimalno preseženi glede na priporočene dopustne vrednosti.



Slika 7. 2. nihajna oblika (prečna); $f = 0,944 \text{ Hz}$, aktiviranje mase 56,4 %



Slika 8. 3. nihajna oblika (vertikalna); $f = 1.425 \text{ Hz}$, aktiviranje mase 74,2 %

REDNA PROJEKTNA SITUACIJA			
Simultana hoja 4 oseb / tek 3 oseb			
Pospešek - smer	Merodajni obtežni primer	Hoja [m/s^2]	Tek [m/s^2]
Vertikalen pospešek - a_z	1 vrsta pešcev	0,31	0,63
Prečni pospešek - a_y	1 vrsta pešcev	0,09	0,22
IZREDNA PROJEKTNA SITUACIJA			
Simultana hoja 16 oseb/tek 12 oseb			
Pospešek - smer	Merodajni obtežni primer	Hoja [m/s^2]	Tek [m/s^2]
Vertikalen pospešek - a_z	4 vrste pešcev	1,13	2,18
Prečni pospešek - a_y	4 vrste pešcev	0,23	0,70

Preglednica 1. Izvleček rezultatov dinamične analize – kontrole vibracij

EN 1990:

- $a_{\text{max,vertikalni}} \leq 0.7 \text{ m/s}^2$
- $a_{\text{max,horizontalni}} \leq 0.2 \text{ m/s}^2$ (v primeru gneče 0.4 m/s^2)

Smernice v okviru raziskovalnega programa JRC-ECCS:

Razred udobja	Stopnja udobja	Vertikalni pospešek $a_{\text{limit,v}}$	Prečni pospešek $a_{\text{limit,h}}$
CL 1	Maksimalni razred udobja	$< 0.50 \text{ m/s}^2$	$< 0.10 \text{ m/s}^2$
CL 2	Srednji razred udobja	$0.50 - 1.00 \text{ m/s}^2$	$0.10 - 0.30 \text{ m/s}^2$
CL 3	Minimalni razred udobja	$1.00 - 2.50 \text{ m/s}^2$	$0.30 - 0.80 \text{ m/s}^2$
CL 4	Nesprejemljiva udobnost	$> 2.50 \text{ m/s}^2$	$> 0.80 \text{ m/s}^2$

Preglednica 2. Izvleček vrednosti maksimalnih dopustnih pospeškov

5 GRADNJA

Dostop na slovenski strani je zaradi ozkosti in slabega stanja obstoječega mostu čez kanal MHE Ceršak omogočal le omejeno dostopnost za gradbene stroje in drugo tehnološko opremo, zato se je večji del gradbišča, predvsem za potrebe montaže mostne konstrukcije, organiziral na avstrijski strani, kjer pa dostopi niso bili problematični, praktično brez omejitev.



Slika 9. Priprave na izvedbo temeljne plošče



Slika 10. Opornik na avstrijski strani, v ozadju delovni plato

Na gradbišču so se izdelali betonski temelji (piloti), oporniki, piloni in manjši podporni zidovi v zaledju desnoobrežnega opornika na slovenski strani.

Na avstrijski strani se je gorvodno od opornika uredil širši delovni plato iz utrjenega gramoznega materiala. Za lažjo montažo dvigala in dostavo materiala in druge tehnološke opreme je izvajalec pred delovnim platojem izvedel tudi začasno obračališče za tovornjake.

Lepljeni leseni nosilci so bili izdelani v lesni delavnici pod kontroliranimi pogoji, vsak nosilec v treh segmentih, primernih za transport na gradbišče. Dolžine posameznih segmentov ca. 29 m je določil proizvajalec glede na razpoložljivo tehnologijo, način montaže in možnosti transporta. V delavnici bili izdelani tudi vsi jekleni vezni in kabelski elementi. Pred montažo prekladne konstrukcije (dvigom) so bili leseni vzdolžni nosilci z jeklenimi preč-



Slika 11. Montaža nosilnih vrvi

Izvajalec se je, vsled zahtevnosti gradnje začasnih podpor v rečni strugi in zgoraj omenjenih omejitev na slovenski strani, pa tudi v smislu optimizacije stroškov, varnosti ter skrajšanja časa gradnje, odločil za poseben način montaže prekladne konstrukcije. Celotna mostna konstrukcija v dolžini 87,6 m je bila na predhodno izdelane opornike in prednapete nosilne vrvi montirana v enem kosu, brez začasnih podpor v rečni strugi.



niki in horizontalnim zavetrovanjem povezani v glavni mostni nosilec. Na most so bili predhodno nameščeni leseni vzdolžniki za pohodno konstrukcijo, zunanji zaščitni opaži in protimrčesna zaščita. Skupna teža konstrukcije za dvig je znašala slabih 67 ton. Montaža je potekala s pomočjo velikega žerjava Terrex Demag CC 3800 z nosilnostjo 650 t, ki ga je izvajalec sestavil s pomočjo teleskopskega avtodvigala z nosilnostjo 250 t.



Slika 12. Prekladna konstrukcija je pripravljena na dvig in montažo





Slika 13. Vpenjanje prekladne konstrukcije, začetek montaže mostu



Slika 14. Montaža prekladne konstrukcije



Slika 15. Prvo prečkanje Mure preko novega mostu in povezava nosilnih vrvi z mostno konstrukcijo

Izvajalec se je svojotehnični službi in vsem podizvajalcem zelo dobro pripravil na zahtevno montažo prekladne konstrukcije in je skupaj s projektantom detajlno preučil vse gradbene faze. Način montaže tako velike prekladne konstrukcije mostu, z odlaganjem neposredno na nosilne vrvi, v slovenskem gradbenem prostoru in morda celo širše ocenjujemo kot zelo inovativen in unikaten.

Po končani montaži nosilne konstrukcije je sledila montaža prečnih desk pohodne površine, notranjih in preo-

stalih zunanjih zaščitnih opažev. Na koncu se je izvedlo še pločevinasto prekritje lesenih nosilcev, zaključki protimrčesne zaščite in fina nastavitve nosilnih vrvi. Konstrukcija je zavzela svojo končno nulto pozicijo, kar je potrdila tudi sprotne geodetske spremljave. Geometrijska odstopanja končnega položaja mostne konstrukcije so bila glede na računske predpostavke manjša od 4 mm, sile v nosilnih vrveh pa so od računskih predpostavk odstopale za ca. 4 %.



Slika 16. Popuščanje žerjava, montaža je končana



Slika 17. Montaža krovne konstrukcije in mostne opreme

6 SKLEP



Slika 18. Novi most Ceršak; pogled iz Avstrije v Slovenijo

Novi most za pešce in kolesarje preko reke Mure pri Ceršaku je vsekakor nekaj posebnega. Že sama funkcija nove povezave je

Posebnost novega mostu pri Ceršaku pa se ne kaže le v njegovi arhitekturni podobi in simboliki, temveč tudi v premišljeni in napredni tehnologiji gradnje. Izvajalci in projektanti smo skupaj iskali rešitve, ki so bile hkrati tehnično dovršene in prilagojene zahtevnim razmeram na terenu.

Skupaj nam je uspelo zasnovati ter natančno izpeljati vrsto izjemno zahtevnih tehnoloških postopkov, ki so omogočili izvedbo mostu na inovativen in v našem ter širšem prostoru tudi edinstven način. Prekladno konstrukcijo smo namreč montirali neposredno na nosilne vrvi, brez začasnih podpor v rečni strugi. Takšen pristop ni pomenil le tehničnega izziva, temveč tudi odgovoren odnos do okolja, saj smo z njim zmanjšali posege v vodni prostor reke Mure.

Most Ceršak tako predstavlja primer uspešnega sodelovanja projektantske in izvajalske stroke, kjer se znanje, izkušnje in premišljena organizacija gradnje združijo v sodobno, trajno in okoljsko občutljivo infrastrukturno rešitev.

Novi most preko reke Mure pri Ceršaku je plod mednarodnega povezovanja in sodelovanja pa tudi zrcalo ideje, ambicij in vizije naročnika ter spretnosti, znanja in potrpežljivosti inženirjev, zavedanja pomembnosti napredka in skupnega ustvarjanja prihodnosti.



Slika 19. Novi most Ceršak v zimski preobleki

izredno simbolična, saj preko naravne kot tudi pravne cezure povezuje ljudi dveh občin, dveh regij in dveh držav. Na približno 35 km mejnega toka reke Mure med Slovenijo in Avstrijo, je novi most pri Ceršaku tudi prva stalna povezava na nivoju reke in nedvomno dostojen iniciator razvoja kolesarske in druge turistične infrastrukture v regiji.

S svojo arhitektonsko in tehnično zasnovo ter pojavnostjo v prostoru most nazorno predstavlja možnosti stvaritve in umestitve tehnično in tehnološko dovršenih inženirskih objektov v občutljivo naravno okolje, kot so struga in nabrežja reke Mure, v senci ostankov preminulega jezua iz nekega predhodnega časa.

7 LITERATURA

Ponting inženirski biro, d. o. o., Most Ceršak, Most za pešce in kolesarje čez mejno reko Muro pri Ceršaku, Projektna dokumentacija PONTING 516/2016, IDZ, 2016.

Ponting inženirski biro, d. o. o., Most Ceršak, Most za pešce in kolesarje čez mejno reko Muro pri Ceršaku, Projektna dokumentacija PONTING 530/2018, PGD, 2018.

Ponting inženirski biro, d. o. o., MOST CERŠAK/BRÜCKE CERŠAK, Projektna dokumentacija PONTING 573/2020, PZI, 2021

Ponting inženirski biro, d. o. o., MOST CERŠAK/BRÜCKE CERŠAK, Projektna dokumentacija PONTING 573/2025, PID, 2025

36. MIŠIČEV VODARSKI DAN – strokovni posvet slovenskih vodarjev

V Narodnem domu v Mariboru se je 3. decembra 2025 odvijal 36. Mišičev vodarski dan, strokovni posvet slovenskih vodarjev, ki ga organizirata VGB Maribor, d. o. o., in VGP Drava Ptuj, d. o. o., v sodelovanju z Ministrstvom za naravne vire in prostor in Direkcijo RS za vode.

Posvet je namenjen predstavitvi strokovnih spoznanj, aktualnih problemov in praktičnih projektov na področju urejanja in upravljanja voda.

Po uničujočih poplavlach leta 2023 smo dobili pomemben finančni okvir – več kot milijardo evrov v naslednjih petih letih za poplavalno obnovo. Hkrati pa potekajo druge velike investicije, kot so gradnje suhih zadrževalnikov in drugi projekti za obvladovanje poplavalne ogroženosti, ki jih financiramo iz Vodnega sklada ali jih sofinancira Evropska unija. Kljub temu se soočamo s številnimi ovirami: od umeščanja objektov v prostor, zapletenih soglasij in naravovarstvenih pogojev do pomanjkanja projektantov, prezapletenih javnih naročil ter zelo različnih pričakovanj države, občin, civilne družbe in lokalnih skupnosti.

Posveta se je udeležilo 443 strokovnjakov, ki se ukvarjajo z upravljanjem, urejanjem in varovanjem voda oziroma jih ta dejavnost zanima.



Slika 1. Avditorij posveta v dvorani Narodnega doma Maribor

Zbrane udeležence je nagovoril tudi minister za naravne vire in prostor Jože Novak.



Slika 2. Pozdravni govor ministra Jožeta Novaka

V razpisu za posvet so bila postavljena naslednja vprašanja:

1. Izvajanje interventnih del po neurju avgusta 2023

Po katastrofalni ujmi avgusta 2023 so bila izvedena interventna dela na vodni infrastrukturi. Očistile so se rečne struge, sanirale so se večje erozijske poškodbe. Izvedeni so bili nujni gradbeni sanacijski ukrepi za popravilo nastalih poškodb.

- Kako ocenjujemo izvedena sanacijska dela?
- Kakšna je bila vloga koncesionarjev pri izvedbi del?
- Kakšen je bil nadzor nad izvedbo del?

2. Načrtovanje in izvedba sanacijskih del in protipoplavnih ukrepov

Po zaključku izvedbe interventnih del je načrtovan pristop k urejanju posameznih vodotokov na osnovi izdelanih celostnih načrtov urejanja voda na posameznih porečjih.

- Kako poteka izdelava celostnih načrtov?
- Kako potekajo dela po že predhodno načrtovanih projektih?
- Kakšna je časovnica priprave načrtov in izvedbe ukrepov?
- Kako potekata financiranje in črpanje evropskih sredstev?

3. Poplavna območja in kmetijstvo

Pri izvajanju protipoplavnih ukrepov za zmanjšanje poplavne ogroženosti naselij in infrastrukturnih objektov se izločijo poplavne površine, ki jih je treba nadomestiti. Kmetijskih površin se ne varuje pred ekstremnimi poplavami. Zmanjšanje poplavnih škod na urbanih površinah je v mnogih primerih na račun kmetijstva.

- Kakšne so posledice poplav na kmetijskih površinah?
- Kako so urejene odškodnine zaradi zmanjšane kmetijske pridelave?
- Kakšne so subvencije zaradi oteženih pogojev kmetovanja na poplavnih površinah (podobnost s hribovskimi kmetijami, kmetovanjem na vodovarstvenih območjih)?

4. Modro-zelena infrastruktura

- Kakšne učinke prinaša in v katerih projektih jo je smiselno vpeljati?
- Kdo jo zahteva? Kdo jo prevzame v upravljanje in vzdrževanje?
- Kakšno je doseganje ciljev modro-zelene infrastrukture? Ali gre za ukrepe na papirju? Kaj kaže praksa?

5. Aktualni projekti s področja upravljanja in urejanja voda

Pregled projektov, izvedbe, raziskav s področja vodarstva je stalnica MVD. Izmenjava informacij o aktivnostih, izkušnjah in znanju je bistvo priprave prispevkov v zadnjem sklopu posveta.

Na razpisane teme je bilo pripravljenih 28 strokovnih referatov. Ustno je bilo predstavljenih 13 referatov, o katerih je tekla razprava na posvetu.

Na predvečer posveta je bila v Vodnem stolpu v Mariboru organizirana okrogla miza z naslovom Izzivi pri umeščanju vodarских objektov v prostor in okolje. Sodelujoči so iskali odgovore na naslednja vprašanja:

- Kako uskladiti pričakovanja ogroženih prebivalcev in javnosti po večji poplavni varnosti in povečanju ter rednem vzdrževanju pretočnosti rečnih strug, z zavedanjem, da vsak poseg v vodno okolje nosi ekološka tveganja?
- Kako zagotoviti prostorsko uresničljivost protipoplavnih ukrepov (zadrževalniki, širše struge, razlivna območja)? Prostorski načrti, lastništvo zemljišč ...
- Kako lahko postopki izdajanja soglasij (ZRSVN, ZzR RS) postanejo učinkovitejši, hitrejši in predvidljivi?
- Kako lahko javno naročanje postane bolj prilagodljivo, hitrejše in manj birokratsko?

Na panelu okrogle mize so razpravljali minister za naravne vire in prostor Jože Novak, direktorica direktorata za okolje dr. Lidija Globevnik, v. d. direktorja Direkcije RS za vode dr. Lidija Kegljevič Zagorc, direktor Zavoda RS za varstvo narave dr. Damijan Denac in Branko Skutnik iz projektantskega biroja Hidrosvet, d. o. o. Razpravo je povezoval predstavnik organizatorja mag. Smiljan Juvan.



Slika 3. Sodelujoči na panelu okrogle mize

V razpravi je sodelovalo več kot 30 vabljenih vodarских strokovnjakov, med njimi tudi župan občine Braslovče Tomaž Žohar, ki je predstavil izkušnje svoje občine pri umeščanju protipoplavnih objektov v prostor in omogočanje ohranjanja poplavnih površin tudi s preselitvijo prebivalcev z ogroženih območij.



Slika 4. Udeleženci okrogle mize

V zaključku je bilo dogovorjeno, da bo Društvo vodarjev Slovenije organiziralo poseben posvet o načrtovani reorganizaciji vodarstva.

Predsednik organizacijskega odbora MVD
Boštjan ROZMAN, univ. dipl. gosp. inž.

NOVI DIPLOMANTI GRADBENIŠTVA

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Aleksandar Krstić, Avtomatizacija priprave gradbene dokumentacije z velikimi jezikovnimi modeli, mentor doc. dr. Robert Klinc, somentorica asist. Anja Breljih; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=179418>

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

Maša Pavlič, Projekt jeklenega grednega prostoležečega mostu, mentor izr. prof. dr. Primož Može, somentorica doc. dr. Sara Zoubek; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=177416>

Matija Brezavšček, Določitev parametrov v mikrosimulacijskem orodju za simulacijo prometnega toka skozi delovno zaporo na avtocesti, mentor doc. dr. Rok Marsetič, somentor asist. Luka Trček; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=177316>

Kristjan Škerjanc, Projektiranje desetetažne stenaste armiranobetonske stavbe s programom Sap2000 in ETABS, mentor izr. prof. dr. Matija Gams, somentor izr. prof. dr. Sebastjan Bratina; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=177419>

Žiga Hrovatin, Izvedljivost prenove mestne vpadnice ob upoštevanju prometnotehničnih zahtev in načel trajnostne mobilnosti, mentor doc. dr. Rok Marsetič, somentor asist. Luka Trček; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=177321>

Sabina Rožac, Analiza ustreznosti odsevnosti vertikalnih prometnih označb na prehodih za pešce, mentor doc. dr. Peter Lipar, somentor asist. Luka Trček; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=177320>

Miha Majnik, Analiza učinkovitosti potisnih ventilatorjev za odvod dima in toplote iz garaže, mentor prof. dr. Tomaž Hozjan; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=178192>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM STAVBARSTVO

Urška Hvala, Koncept mesta za vse generacije po načelih univerzalnega načrtovanja, mentorica izr. prof. dr. Mateja Dovjak, somentorja doc. dr. Robert Klinc in pred. mag. Alenka Plemelj Mohorič; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=177417>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Peter Dragović, Doinstalacija HE Medvode v sklopu verige hidroelektrarn na srednji Savi, mentor izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski, somentorja asist. dr. Mateja Klun in Iztok Močnik; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=180112>

III. STOPNJA – DOKTORSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRAJENO OKOLJE

Peter Kočman, Naknadno prednapeti prostorski betonski nosilec pri požarni obtežbi, mentorica doc. dr. Jerneja Češarek Kolšek, somentor izr. prof. dr. Sebastjan Bratina; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=177319>

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

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Tilen Štuhec, Predlog izboljšane postopka odstranjevanja azbestnih gradbenih materialov, mentor prof. dr. Andrej Štrukelj; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=96072>

Bogdan Nikšić, Mehanske lastnosti tankostenskih betonskih elementov armiranih s kontinuiranimi konopljinimi vlakni, mentor izr. prof. dr. Andrej Ivanič; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=96184>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Eva Munda, Analiza različnih metod dimenzioniranja meteorne kanalizacije na praktičnem primeru, mentorica izr. prof. dr. Janja Kramer Stajnko, delovna somentorica Živa Hanžič, M. Sc. REAP; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=95719>

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

INTERDISCIPLINARNI ŠTUDIJ GOSPODARSKEGA INŽENIRSTVA – SMER GRADBENIŠTVO

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM

Doroteja Trifunović, zaključek študija brez zaključnega dela.

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

KOLEDAR PRIREDITEV

18.3.2026

Strokovni posvet Vodni dnevi 2026: Odpornost
Ljubljana, Slovenija
<https://sdzv-drustvo.si/vodni-dnevi/>

25.-26.3.2026

9. konferenca Biznis in trendi v gradbeništvu
Portorož, Slovenija
<https://gradbena-konferenca.si>

25.-27.3.2026

MEGRA – 35. mednarodni sejem graditeljstva
Corna Radgona, Slovenija
www.megra.pomurski-sejem.si/

27.3.2026

Strokovni seminar DGIT Novo mesto 2026
Novo mesto, Slovenija
www.dgitnm.si/category/posveti/

16.4.2026

42. Goljevščkov spominski dan
Ljubljana, Slovenija
www.fgg.uni-lj.si

21.-24.4.2026

SEEBBE – International Building Trade Fair
Beograd, Srbija
<https://sajamgradjevine.rs/en/home/>

22.-24.4.2026

NASCC: The Steel Conference
Hibridna konferenca
Atlanta, Georgija, Združene države Amerike
www.nascc.aisc.org/

4.-7.5.2026

**IFAT 2026 - The World's Leading
Environmental Technology Trade Fair**
München, Nemčija
<https://ifat.de/en/trade-fair/>

21.-29.5.2026

ICOLD 2026 Annual Meeting
Guadalajara, Mehika
<https://www.icoldmexico2026.com/>

28.5.2026

**33. slovenski kolokvij o betonih:
Samozgoščevalni beton**
Lizbona, Portugalska
<https://fiblisbon2026>



4.-5.6.2026

**International Conference on Contemporary
Theory and Practice in Construction XVII**
Banja Luka, Bosna in Hercegovina
<https://stepgrad.aggf.unibl.org>

15.-19.6.2026

7th fib Congress 2026
Lizbona, Portugalska
<https://fiblisbon2026.pt/>

22.-24.6.2026

**12th BCRRRA 2026 Slovenia - 12th International Conference
on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields**
Ljubljana, Slovenija
<https://bcrra.si/>

16.-18.9.2026

IABSE Congress Incheon 2026
Incheon, Južna Koreja
<https://iabse.org/Incheon2026>

16.-18.9.2026

**EUROSTEEL2026 - 11th European Scientific
Conference on Steel and Composite Structures**
Krakov, Poljska
<https://eurosteel2026.org/>

16.-20.9.2026

MOS Sejem
Celje, Slovenija
<https://ce-sejem.si/sejmi/mos/>

23.-25.9.2026

17. kongres Društva gradbenih konstruktorjev Srbije
Zlatibor, Srbija
<https://dgks.grf.bg.ac.rs/>

5.-7.10.2026

15th Central European Congress on Concrete Engineering
Vodice, Hrvaška
<https://sites.google.com/arhitekt.hr/cc-2026-vodice/home>

20.-23.10.2026

INTERPRAEVENT 2026
Sapporo, Hokkaido, Japonska
[www.kokusaisabo.or.jp/interpraevent2026/
english/home-e.htm](http://www.kokusaisabo.or.jp/interpraevent2026/english/home-e.htm)

23.-27.11.2026

WLF7 - 7th World Landslide Forum
Faridabad, Indija
<https://wlf7.org>

KOLEDAR IZOBRAŽEVANJ IZS ZA MSG

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

