

september 2025

letnik 74

Gradbeni vestnik

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



124

**POTRESNO ODPORNO
PROJEKTIRANJE AB-STEN,
POVEZANIH S PLOŠČAMI Z UPORABO
NELINEARNE POTISNE ANALIZE**

136

**OCENA POTRESNE OGROŽENOSTI
STAVB SODIŠČ V SLOVENIJI**

150

**NAPREDNO UPRAVLJANJE
BETONARN S PODPORO
DIGITALNIH DVOJČKOV**

163

**VPLIV TEŽKIH KOVIN IZ
RECIKLIRANEGA AGREGATA NA
LASTNOSTI BETONA**

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 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: **Jan Grabnar**

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 izide 12 števil. Letna naročnina
za individualne naročnike znaša 25,50 EUR;
za študente in upokojene 10,50 EUR;
za družbe, ustanove in samostojne podjetnike
188,50 EUR za en izvod revije; za
naročnike iz tujine 88,00 EUR.

V ceni je všteti DDV.
Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:
SI56 0201 7001 5398 955

Slika na naslovnici:
Montaža kolesarskega
mostu preko Mure v Ceršaku
Foto: Andrej Sopotnik

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, september 2025, letnik 74, str. 121-192

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

izr. prof. dr. Albin Rakar
(1946–2025)

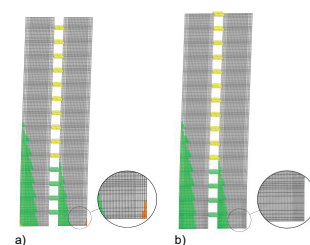
123



asist. dr. Antonio Janevski, mag. inž. grad.
prof. dr. Tatjana Isaković, univ. dipl. inž. grad.

POTRESNO ODPORNO PROJEKTIRANJE AB-STEN, POVEZANIH S PLOŠČAMI Z UPORABO NELINEARNE POTISNE ANALIZE *SEISMIC DESIGN OF RC WALLS COUPLED BY SLABS USING NONLINEAR PUSHOVER ANALYSIS*

124



mag. Marjana Lutman, univ. dipl. inž. grad.
Ilma Kulović, mag. inž. grad.
dr. Meta Kržan, univ. dipl. inž. grad.

OCENA POTRESNE OGROŽENOSTI STAVB SODIŠČ V SLOVENIJI *SEISMIC RISK ASSESSMENT OF COURTHOUSE BUILDINGS IN SLOVENIA*

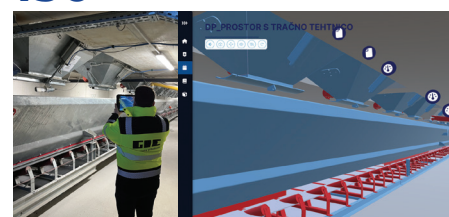
136

D0: ni poškodb	D1: zanemarljiva do majhna	D2: zmerna	D3: znatna do velika	D4: zelo velika	D5: uničenje
ni poškodb konstrukcije, lahke rekonstrukcijske popravila	lahke rekonstrukcijske popravila	zmerno rekonstrukcijske popravila	hude rekonstrukcijske popravila	hude rekonstrukcijske popravila	zelo hude rekonstrukcijske popravila
Zidano					
Armirano- betonske					
UPORABNE	UPORABNE	UPORABNE	UPORABNE	UPORABNE	NEUPORABNE

asist. dr. Mateja Držečnik, univ. dipl. inž. grad.
red. prof. dr. Uroš Klanšek, univ. dipl. gosp. inž.
dr. Tjaša Zupančič Hartner, prof. biol. in kem.
dr. Rok Cajzek, mag. gosp. inž.

NAPREDNO UPRAVLJANJE BETONARN S PODPORO DIGITALNIH DVOJČKOV *ADVANCED CONCRETE PLANT MANAGEMENT WITH THE SUPPORT OF DIGITAL TWINS*

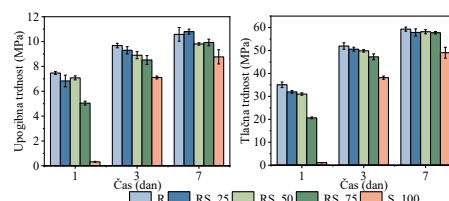
150



asist. dr. Tilen Turk, mag. inž. kem. inž.
doc. dr. Petra Štukovnik, univ. dipl. inž. geol.
prof. dr. Marjan Marinšek, univ. dipl. inž. kem. tehnol.
prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.

VPLIV TEŽKIH KOVIN IZ RECIKLIRANEGA AGREGATA NA LASTNOSTI BETONA *IMPACT OF HEAVY METALS FROM RECYCLED AGGREGATE ON CONCRETE PROPERTIES*

163



VSEBINA CONTENTS

POROČILO S STROKOVNEGA SREČANJA

32. SLOVENSKI KOLOKVIJ O BETONIH

Jakob Šušteršič

171



FOTOREPORTAŽE Z GRADBIŠČ

BRV HOTAVLJE

Dominik Klemenčič

176



CENTER KROŽNEGA GOSPODARSTVA ZARICA

Martin Baumgartner, Naida Zalokar, Katarina Sirk

181



BAZEN KRŠKO

Mateja Držečnik

185



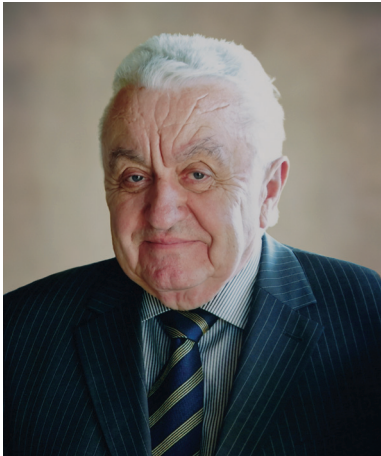
NOVI DIPLOMANTI

Eva Okorn

KOLEDAR PRIREDITEV

Eva Okorn

izr. prof. dr. Albin Rakar (1946–2025)



V začetku poletja smo se na kranjskem pokopališču tiho poslovili od spoštovanega profesorja dr. Albina Rakarja, dolgoletnega člana Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani in predstojnika Inštituta za komunalno gospodarstvo.

Profesor je bil rojen leta 1946 v Breginju v občini Kobarid. Osnovno šolo je obiskoval v Breginju in Kobaridu, Gradbeno tehniško šolo pa v Ljubljani. Na UL FGG je diplomiral leta 1971, magistriral leta 1976 in doktoriral 1980. Na UL FGG je služboval od leta 1971, najprej kot asistent, od leta 1980 kot docent in od leta 1986 kot izredni profesor. V tem nazivu se je 1. oktobra 2012 tudi upokojil.

V času svoje akademske kariere je profesor Rakar poudarjal pedagoško poslanstvo univerze. Verjel je, da univerza ni le prostor znanja, temveč tudi vzgoje v intelektualno poštenost in odgovornost do družbe.

Kot pedagog je izvajal pouk na dodiplomskem in podiplomskem študiju pri predmetih s področja komunalnega gospodarstva na UL FGG ter na Oddelku za krajinsko arhitekturo na UL BF. Kot gost je predaval tudi na Ekonomski fakulteti in Fakulteti za arhitekturo v Beogradu, na Univerzi Karla Marxa v Leipzigu ter na Tehniški fakulteti v Berlinu. Bil je mentor 90 diplomantom, štirim magistrantom in dvema doktorantom. Izdal je univerzitetni učbenik za predmet Komunalno gospodarstvo ter 15 enot študijskih gradiv za predmete s področja stanovanjskega gospodarstva, gradbene zakonodaje, urejanja prostora in komunalne infrastrukture.

Njegova predavanja so bila jasna in premišljena. V nekaj besedah je znal strniti zapletene misli, odpreti nove horizonte razumevanja ter študente voditi k samostojnemu razmišljanju. Z njimi je znal študente ne le poučiti, temveč tudi spodbuditi k odgovornemu in kritičnemu razmišljanju. Strogo je terjal doslednost, a prav v tej strogosti so generacije študentov prepoznale njegovo predanost pedagoškemu poslanstvu in stroki. Tudi zaradi njegovih odličnih predavanj so številni diplomanti UL FGG gradili svojo kariero na področjih komunalnega gospodarstva in urejanja prostora.

Raziskovalno in strokovno delo je profesor Rakar usmerjal predvsem v preučevanje urbanskih stroškov, ekonomskih in organizacijskih vidikov izgradnje in obratovanja komunalnih oskrbovalnih sistemov, instrumentov zemljiške politike ter privatizacije komunalnih dejavnosti. S tega področja ima po klasifikaciji COBISS objavljenih 90 enot, od tega 27 z znanstvenim atributom, 37 opravljenih raziskav in 21 elaboratov študij in predštudij.

Profesor Rakar je bil mož načelnosti. Svojega prepričanja in svojih tez v 40 letih svojega delovanja ni spreminjal in prilagajal potrebam dnevne politike na državni in lokalni ravni. V svojem raziskovalnem delu se ni nikoli zadovoljil s površinskimi razlagami, temveč je vedno segal v globino in iskal bistvo.

Pomembna je bila tudi njegova vloga predstojnika Inštituta za komunalno gospodarstvo in komunalne študijske smeri v obdobju 1976–2001 ter predstojnika podiplomskega študija komunalne smeri. Svojo vlogo je z veseljem in uspešno opravljal kot oseba, ki je poudarjala kakovost poučevanja, učinkovito koordinirala projekte ter motivirala in usmerjala sodelavce.

Za svoje delo je dobil fakultetno priznanje ter priznanje Evropskega združenja za prometne znanosti, Zveza geodetov Slovenije ga je imenovala za zaslužnega člana.

Generacije študentov in sodelavcev ga bomo ohranile v spominu kot odličnega znanstvenika in predanega pedagoga. Njegovi načelnost in jasna beseda bosta ostali trajen zgled vsem, ki smo ga poznali in imeli čast delati z njim.

izr. prof. dr. Maruška Šubic Kovač

asist. dr. Antonio Janevski, mag. inž. grad.
antonio.janevski@fgg.uni-lj.si



prof. dr. Tatjana Isaković, univ. dipl. inž. grad.
tatjana.isakovic@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK/UDC: 699.841.517.9

POTRESNO ODPORNO PROJEKTIRANJE AB-STEN, POVEZANIH S PLOŠČAMI Z UPORABO NELINEARNE POTISNE ANALIZE SEISMIC DESIGN OF RC WALLS COUPLED BY SLABS USING NONLINEAR PUSHOVER ANALYSIS

Povzetek

Protipotresno projektiranje armiranobetonskih (AB) konstrukcij kljub določenim omejitvam še vedno temelji večinoma na rezultatih linearne elastične analize. Pri oceni potresnega odziva se AB-stene, povezane zgolj s ploščami, običajno obravnavajo kot konzolne stene, pri čemer se plošče upoštevajo le kot horizontalne diafragme toge v svoji ravnini, njihov upogibni odziv pa se običajno zanemari. Pretekle raziskave so pokazale, da lahko upogibne lastnosti plošče pomembno vplivajo na odziv sten, še zlasti, če so te visoke in vitke. Plošče lahko povežejo stene v okvirom podoben sistem. V tako povezanih stenah lahko potresni vplivi bistveno vplivajo na njihove osne sile, kar lahko spremeni njihovo togost in nosilnost ter povzroči, da se v nelinearnem območju potresne zahteve med njimi močno prerazporedijo. Te učinke je z elastičnimi metodami težko zanesljivo upoštevati. Zato smo predlagali razmeroma preprost postopek projektiranja, ki temelji na nelinearni potisni analizi. Predlagana metoda združuje N2-metodo in principe načrtovanja nosilnosti. Njeno učinkovitost smo ovrednotili na širšem naboru stavb z AB-stenami, z uporabo nelinearne analize časovnega odziva. V primerjavi z običajnimi postopki projektiranja, ki temeljijo na elastični analizi, predlagana metoda omogoča zanesljivejšo oceno potresnih zahtev, učinkovitejše in varnejše protipotresno projektiranje AB-sten ter zmanjšanje njihovih poškodb.

Ključne besede: AB-stene, AB-plošče, stopnja povezanosti, nelinearna analiza, zasnova na osnovi potisne analize, potresni odziv

Summary

Linear elastic analysis remains a cornerstone of seismic design, despite its limitations in capturing the nonlinear behaviour of reinforced concrete (RC) structures. RC walls connected only by slabs are typically modelled as assemblies of cantilever walls, where slabs are considered to act solely as rigid diaphragms. However, recent studies have shown that in configurations such as elevator shafts with closely spaced slender walls, slabs can provide significant coupling between the walls. In such cases, considerable axial forces can be induced in the wall piers, altering their stiffness and strength and causing notable redistributions of seismic demand in the nonlinear range—effects that cannot be accurately captured using elastic methods. To address this issue, a simple and efficient pushover-based design method for RC walls coupled only by slabs, without coupling beams, is proposed. The method integrates the N2 method and the capacity design principles. Its effectiveness was verified on various RC wall buildings using nonlinear response history analyses. Comparisons with structures designed using traditional force-based methods demonstrate that the proposed approach predicts seismic response more accurately, improves overall performance, and reduces structural damage.

Key words: RC walls, RC slabs, coupling level, nonlinear analysis, pushover-based design, seismic response

1 UVOD

Potresnoodporno projektiranje armiranobetonskih (AB) sten, povezanih s ploščami, običajno temelji na elastičnih metodah analize. Pri takšnih analizah togost konstrukcijskih elementov ocenimo približno in tako ocenjene vrednosti ne spreminjamo. To lahko vpliva na natančnost ocene potresnega odziva, saj se lahko togost AB-konstrukcijskih elementov, izpostavljenih močnim potresnim vplivom, pomembno spreminja, še zlasti v nelinearnem območju. V takšnih primerih je lahko ocena potresnega odziva z elastičnimi metodami analize zelo pomanjkljiva.

Običajno AB-stene, ki so povezane le s ploščami brez gred, obravnavamo kot sistem konzolnih sten, pri čemer plošče učinkujejo kot toge šipe v svoji ravnini. Njihovo upogibno in strižno togost prečno na to ravnino običajno zanemarimo pod predpostavko, da je ta majhna v primerjavi s togostjo sten. Čeprav to poenostavi analizo, lahko spregleda kompleksno interakcijo med ploščami in stenami, zaradi katere je lahko odziv bistveno drugačen od odziva konzolnih sten.

To so pokazale tudi zadnje raziskave na UL FGG [Janevski, 2025a, 2025b]. Na upogibno togost plošč med drugim pomembno vpliva širina odprtin med stenami, na togost sten pa njihova višina. Togost plošče je obratno sorazmerna s tretjo potenco širine odprtine, togost sten pa je obratno sorazmerna s tretjo potenco njihove višine. Ko so stene vitke in razmeroma blizu druga drugi, je širina odprtin med njimi bistveno manjša od njihove višine. Zato je lahko upogibna togost plošč v primerjavi s togostjo sten mnogo večja, kot to običajno predpostavimo pri projektiranju, in je ne moremo zanemariti. Upogibno togost plošč dodatno povečuje tudi njihova sodelujoča širina, za katero najnovejše raziskave kažejo, da je pri nelinearnem potresnem odzivu lahko bistveno večja, kot to običajno predpostavljamo na osnovi opazovanj odziva pri navpičnih vplivih.

Če upogibni odziv plošč pomembno vpliva na povezavo med stenami, se potresni odziv teh sten bistveno razlikuje od odziva konzolnih sten, saj so stene medsebojno povezane v sistem, podoben okvirom. Zato lahko potresni vpliv bistveno vpliva na osne sile v stenah, kar lahko pomembno spremeni njihovo togost in nosilnost. Zaradi spremenjene nosilnosti in togosti se lahko vplivi med stenami močno prerazporedijo. Odziv lahko postane bistveno drugačen, kot je načrtovano. Zato se lahko pri močnih potresih stene močno in nenadzorovano krhko poškodujejo zaradi nepričakovano velikih strižnih ali tlačnih obremenitev. V takšnih primerih z elastičnimi metodami analize težko dovolj natančno ocenimo potresni odziv, tudi če stene modeliramo s kompleksnimi ploskovnimi ali 3D-elementi. Rešitev predstavlja projektiranje na osnovi nelinearne analize.

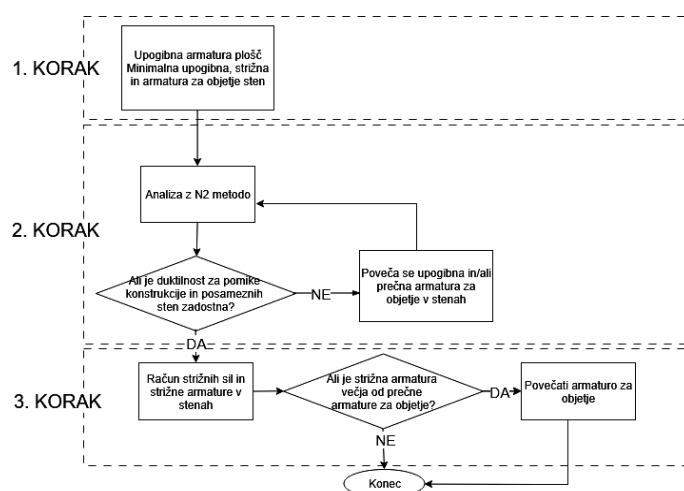
Tudi sodobni predpisi to prepoznajo. Tako npr. druga generacija Evrokoda 8 [CEN/TC 250/SC 8, 2021] omogoča projektiranje na osnovi poenostavljenih nelinearnih potisnih analiz (N2 metoda – [Fajfar, 2000]).

V članku predstavljamo razmeroma preprosto in učinkovito metodologijo za projektiranje povezanih sten na osnovi N2-metode z upoštevanjem principov načrtovanja nosilnosti. Metoda je predstavljena v drugem poglavju. Tretje poglavje prikazuje njeno uporabo na reprezentativnem primeru stavbe, četrto poglavje pa njeno verifikacijo na širšem naboru stavb

z AB-stenami, povezanimi zgolj s ploščami. Vse ključne ugotovitve in zaključke študije smo povzeli v petem, zaključnem poglavju.

2 PREDLAGANA METODA ZA PROJEKTIRANJE NA OSNOVI POTISNE ANALIZE

Predstavljena je razmeroma preprosta metoda za potresno odporno projektiranje AB-sten, povezanih le s ploščami brez gred. Predlagana metoda temelji na analizi z N2-metodo [Fajfar, 2000] in principih načrtovanja nosilnosti. Zasnovali smo jo, upoštevajoč določila standarda Evrokod 8 [CEN, 2004], vendar jo je možno preprosto prilagoditi zahtevam drugih standardov. Metoda je sestavljena iz treh glavnih korakov, ki so prikazani na sliki 1 in podrobneje predstavljeni v nadaljevanju.



Slika 1. Koraki predlagane metode za projektiranje na osnovi potisne analize.

2.1 1. korak: Upogibna armatura v plošči in začetna vzdolžna in prečna armatura sten

V prvem koraku najprej določimo armaturo plošč in sten. Upogibno armaturo v ploščah določimo na osnovi merodajnih kombinacij navpičnih vplivov. V stenah najprej predpostavimo, da zadošča minimalna upogibna, strižna in prečna armatura za objetje betonskih prereзов. V analizah, prikazanih v nadaljevanju, smo minimalno armaturo določili, upoštevajoč določila standarda Evrokod 8 [CEN, 2004].

2.2 2. korak: Nelinearna statična potisna analiza in korekcija upogibne armature v stenah

V drugem koraku konstrukcijo analiziramo z N2-metodo in ugotovimo, ali je upogibna armatura v stenah ustrezna. Pri potisni analizi model konstrukcije obremenimo z vztrajnostnimi silami, proporcionalnimi najbolj pomembni nihajni obliki. Rezultat potisne analize je potisna krivulja, ki predsta-

vlja razmerje med skupno prečno silo ob vpetju konstrukcije in opazovanim pomikom (običajno spremljamo pomik na vrhu konstrukcije).

Na osnovi potisne krivulje določimo efektivno togost konstrukcije in druge lastnosti (nihajni čas, efektivno maso) ustreznega ekvivalentnega modela konstrukcije z eno prostostno stopnjo SDOF (angl. single degree of freedom), s pomočjo katerega na osnovi ustreznega nelinearnega spektra pospeškov ocenimo ciljni maksimalni pomik konstrukcije v skladu z N2-metodo [Fajfar, 2000].

Potem ocenimo potrebno duktilnost za pomike (razmerje med ciljnimi in pomikom na meji elastičnosti) za celotno konstrukcijo in zahtevano duktilnost za pomike v posameznih stenah, ter jih primerjamo s kapaciteto. Pri tem kontroliramo mejno stanje velikih poškodb SD (angl. significant damage). Največje možne pomike, ki jih konstrukcija ali posamezne stene lahko prenesejo v tem stanju določimo z enačbo:

$$\delta_{SD} = \frac{1}{\gamma_{RD}} (\delta_y + 0,5\delta_u^{pl})$$

kjer je δ_{SD} maksimalni pomik, ki ga konstrukcija ali stena lahko prenese v SD mejnem stanju, $\gamma_{RD} = 1,35$ je varnostni faktor, δ_y je pomik na meji elastičnosti $\delta_u^{pl} = d_u - \delta_y$, in d_u je maksimalni pomik, ki ga lahko konstrukcija ali stena prenese preden se poruši NC (angl. near collapse).

Če je zahtevana duktilnost manjša od kapacitete, nadaljujemo s tretjim korakom in dimenzioniranjem strižne armature. V nasprotnem primeru, ko je zahtevana duktilnost za pomike le nekoliko večja od razpoložljive kapacitete, je smiselno povečati le prečno armaturo za objetje sten, saj ta ugodno vpliva na razpoložljivo duktilnost. Če so razlike večje, pa je treba povečati upogibno armaturo sten. Potem ko spremenimo armaturo, ponovimo analizo z N2-metodo.

2.3 3. korak: Ocena maksimalnih strižnih sil in določitev strižne armature

V zadnjem koraku strižne sile, dobljene s potisno analizo, korigiramo, tako da upoštevamo vpliv višjih nihajnih oblik, in nato izračunamo potrebno strižno armaturo. Tak postopek zagotavlja skladnost z načeli metode načrtovanja nosilnosti.

Eden glavnih ciljev metode načrtovanja nosilnosti je preprečitev neželenih krhkih poškodb. Da bi preprečili krhko strižno porušitev, moramo najprej dovolj natančno oceniti največje možne vrednosti strižnih sil. Te so lahko bistveno večje od računskih. Odvisne so od upogibne nosilnosti sten, v nelinearnem področju pa se lahko občutno povečajo zaradi vpliva višjih nihajnih oblik. Po trenutno veljavnem standardu Evrokod 8 [CEN, 2004] v primeru DCM-stopnje duktilnosti določimo maksimalne možne vrednosti prečnih sil tako, da računske sile pomnožimo s korekcijskim faktorjem 1,5.

Vendar rezultati iz literature (npr. [Rejec, 2012]) kažejo na to, da so lahko tako določene sile občutno premajhne. To je prepoznano tudi v novem Evrokodu 8 [CEN/TC 250/SC 8, 2021], kjer so definirani različni korekcijski faktorji vzdolž sten, njihove vrednosti pa so lahko tudi več kot podvojene v primerjavi s trenutnim korekcijskim faktorjem. Na novo predpisani korekcijski faktorji se lahko uporabijo le pri elastični analizi.

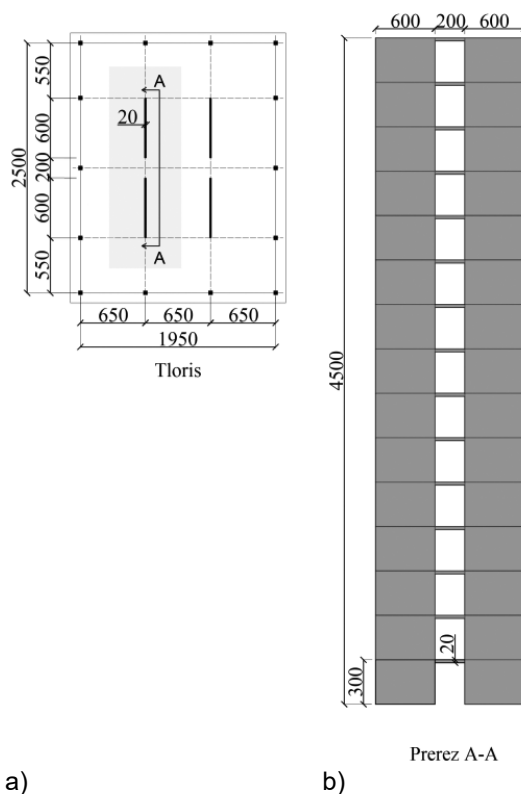
Če projektiranje temelji na nelinearnih metodah analize (kot to predlagamo v tem članku), ne moremo upoštevati enakih korekcijskih faktorjev kot pri elastični analizi, pač pa takšne, ki ustrezajo nelinearni analizi. Te smo nedavno določili na UL FGG [Janevski, 2025a, 2025b]. Ko so strižne zahteve v stenah ustrezno popravljene, izračunamo še potrebno strižno armaturo.

3 PRIMER UPORABE PREDLAGANE METODE

Kot primer uporabe predlagane metode smo projektirali 15-etažno stavbo, prikazano na sliki 2. Upoštevali smo enostavno pravokotno tlorisno zasnovo s štirimi AB-stenami, stebri in obodnimi nosilci. Analizirali smo dve steni in pri tem upoštevali pripadajočo maso (osenčeno območje na sliki 2).

Analiza je bila osredotočena na stavbo s stenami višine, dolžine in debeline 45 m, 6 m, 20 cm, deležem sten 1,5 % glede na tlorisno površino in pospeškom temeljnih tal 0,29 g. Razdalje med stenami so znašale 2 m. Predpostavili smo, da znaša sodelujoča širina plošče 6,5, debelina 20 cm. Upoštevali smo enako količino spodnje in zgornje armature v ploščah, in sicer 3,85 cm²/m.

Upoštevali smo beton razreda C 30/37 in jeklo za armiranje B 500, razreda duktilnosti B. Projektna vertikalna obtežba je znašala 7 kN/m², kar vključuje lastno težo plošče in 2 kN/m² stalne obremenitve. Upoštevali smo, da znaša koristna obtežba 3 kN/m², kolikor je značilno za poslovne prostore.



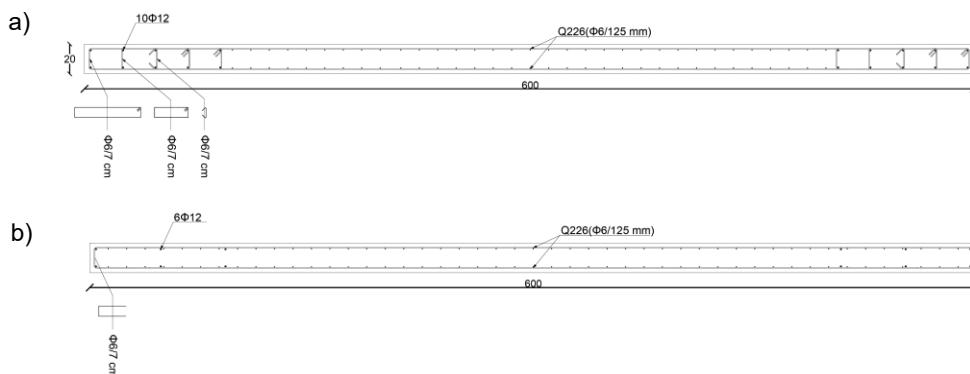
Slika 2. Stavba študije primera: a) značilen tloris etaže in b) prerez obravnavanih sten.

3.1 Minimalna upogibna, strižna in prečna armatura za objetje betonskega jedra v stenah

Najprej smo določili minimalno upogibno, strižno in prečno armaturo za objetje sten. Pri tem smo upoštevali zahteve standarda Evrokod 8 [CEN, 2004]. Povzetek armature v stenah je podan v preglednici 1 in na sliki 3.

Vse stene smo armirali z dvema mrežama, in sicer po eno mrežo vzdolž vsake stranice (slika 3). Delež vzdolžne armature se je spreminjal od 0,33 % v zgornjih etažah do 0,35 % ob vpetju sten. Delež strižne armature je znašal 0,23 % in je bil konstanten po celotni višini sten.

Za zagotovitev duktilnosti smo predvideli ustrezno prečno armaturo v kritičnem območju ob vpetju sten, do višine 6 m (kritična višina). Robni elementi so bili dolžine 90 cm. V kri-



Slika 3. Minimalna armatura v stenah: a) kritično območje in b) izven kritičnega območja.

Nad-strop-je	Minimalna armatura			Armatura, korigirana v 2. koraku			Končna armatura		
	ρ_l (%)	ω_{wd}	ρ_w (%)	ρ_l (%)	ω_{wd}	ρ_w (%)	ρ_l (%)	ω_{wd}	ρ_w (%)
15	0.33	0.04	0.23	0.33	0.04	0.23	0.33	0.10	0.63
14	0.33	0.04	0.23	0.33	0.04	0.23	0.33	0.10	0.63
13	0.33	0.04	0.23	0.33	0.04	0.23	0.33	0.10	0.63
12	0.33	0.04	0.23	0.33	0.04	0.23	0.33	0.10	0.63
11	0.33	0.04	0.23	0.33	0.04	0.23	0.33	0.10	0.63
10	0.33	0.04	0.23	0.33	0.04	0.23	0.33	0.10	0.63
9	0.33	0.04	0.23	0.33	0.04	0.23	0.33	0.10	0.63
8	0.33	0.04	0.23	0.33	0.04	0.23	0.33	0.10	0.63
7	0.33	0.04	0.23	0.33	0.04	0.23	0.33	0.10	0.63
6	0.33	0.04	0.23	0.33	0.04	0.23	0.33	0.10	0.63
5	0.33	0.04	0.23	0.33	0.04	0.23	0.33	0.10	0.63
4	0.33	0.04	0.23	0.38	0.05	0.23	0.38	0.13	0.63
3	0.33	0.04	0.23	0.49	0.08	0.23	0.49	0.22	0.63
2	0.35	0.10	0.23	0.50	0.18	0.23	0.50	0.82	0.75
1	0.35	0.10	0.23	0.54	0.18	0.23	0.54	0.82	0.75

Legenda: ρ_l –delež vzdolžne armature, ω_{wd} –volumski delež prečne armature za objetje sten, ρ_w –delež prečne armature.

Preglednica 1. Povzetek načrtovanja stavbe študije primera.

tičnem območju smo uporabili zaprta stremena, izven tega območja pa U-zanke (glej sliko 3b). Volumski delež prečne armature v robnih elementih se je spreminjal od 0,04 do 0,10.

3.2 Nelinearna potisna analiza in korekcija upogibne armature v stenah

3.2.1 Numerični model stavbe in povzetek analize z N2-metodo

Stavbo smo modelirali z dvodimenzionalnim makromodelom, prikazanim na sliki 4a. Nelinearno obnašanje sten smo modelirali z dvodimenzionalno verzijo makroelementa z več navpičnimi vzmeti – MVLEM (angl. multiple-vertical-line-element model), razvitega na UL FGC ([Fischinger, 2004; Kante, 2005]). Stene smo modelirali z več MVLEM-elementi različnih dolžin, kot to prikazuje slika 4b. Krajše elemente smo uporabili za modeliranje potencialnih plastičnih členkov ob vpetju sten in na stikih med stenami in ploščami, medtem ko smo preostale dele sten modelirali z daljšimi elementi (slika 4b).

Prečni presek sten smo razdelili na lamele, kot je to prikazano na sliki 4b. Vsaki lameli ustreza ena navpična vzmet, ki simulira osno-upogibno obnašanje ob upoštevanju Bernoullijeve predpostavke o ravnih prerezihih. Nelinearni odziv navpičnih vzmeti smo opisali z zvezo sila–raztezek, ki smo jo opisali z ustreznimi histereznimi pravili VertSpringType1 (slika 4c). Za parametre, ki opredeljujejo obliko histerezne zanke, smo upoštevali priporočene vrednosti [Fischinger, 2004; Kante, 2005].

Strižni odziv v dvodimenzionalnem MVLEM-elementu je predstavljen z vodoravno vzmetjo, nameščeno v težišču prečnega prereza elementa. Pri modeliranju smo predpostavili, da je strižni odziv elastičen.

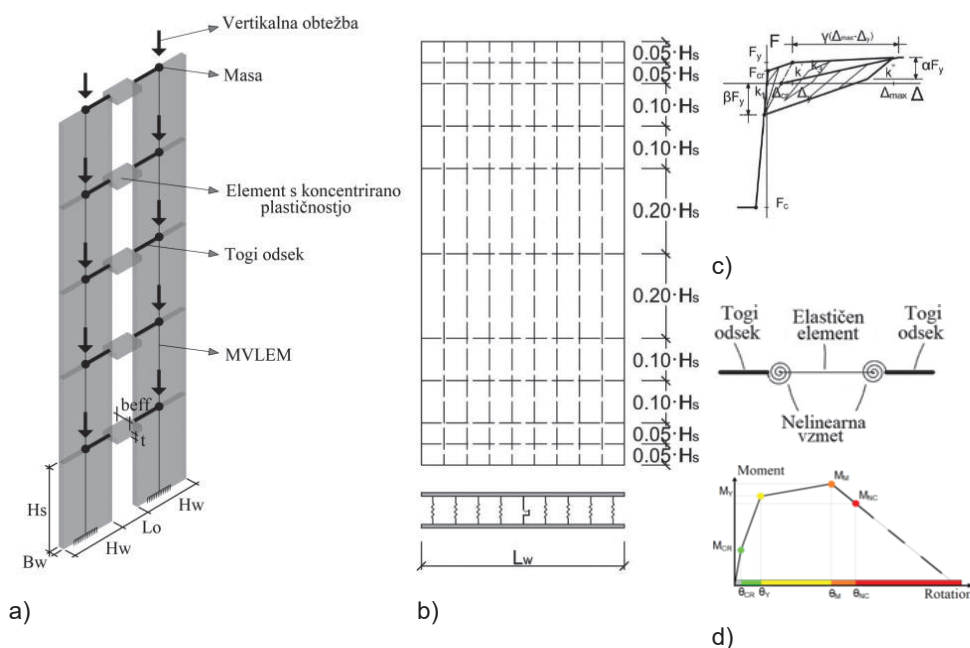
Plošče smo modelirali z Gibersonovim modelom s koncentrirano plastičnostjo [Giberson, 1967], ki je sestavljen iz dveh nelinearnih rotacijskih vzmeti, nameščenih v vozliščih elementa, povezanih z neskončno togim elastičnim elementom (slika 4d). Odziv nelinearnih vzmeti smo opisali s prilagojenimi Takedovimi histereznimi pravili [Takeda, 1970], dopolnjenimi s pravili za območje mehčanja. Zvezo med upogibnimi momenti in zasuki smo določili na podlagi analize moment-ukrivljenost prečnega prereza v OpenSees [McKenna, 2000]. Analizo moment-ukrivljenost smo naredili ob upoštevanju geometrije prečnega prereza in vzdolžne armature. Upoštevali smo pravokotni prečni prerez, določen na podlagi debeline plošče in predpostavljene sodelujoče širine plošče. Beton smo obravnavali kot neobjeti.

V ravnini posameznih etaž smo upoštevali toge diafragme, pripadajoče mase pa smo modelirali kot koncentrirane mase v težiščih etaž. Vertikalno obtežbo smo modelirali v vsaki etaži s koncentriranimi silami v težiščih sten.

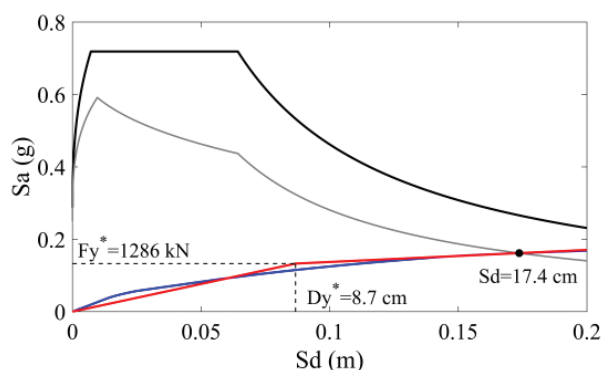
Izvedli smo nelinearno statično potisno analizo, pri čemer smo upoštevali razpored vztrajnostnih sil, ki ustreza prvi nihajni obliki. Ker v analizi uporabljamo spektre odziva, ki so definirani za sisteme z eno prostostno stopnjo, smo sistem z več prostostnih stopenj (MDOF, angl. multiple degree of freedom) prevedli na ekvivalentni sistem z eno prostostno stopnjo (SDOF). Ekvivalentna masa znaša $m^* = 987$ ton, faktor za transformacijo pa je $\Gamma = 1,46$.

Določili smo idealiziran odnos med celotno prečno silo in pomikom na vrhu konstrukcije. Nosilnost in pomik na meji elastičnosti znašata $F_y^* = 1286$ kN in $D_y^* = 8,7$ cm. Nihajni čas idealiziranega sistema znaša $T^* = 1,62$ s.

Krivuljo kapacitete smo določili tako, da smo silo F^* delili z ekvivalentno maso m^* . Ocenili smo, da konstrukcija doseže mejo elastičnosti pri pospešku $S_{ay} = 0,13$ g. Potresne obremenitve SDOF modela smo določili ob upoštevanju pospeška temeljnih tal PGA (angl. peak ground acceleration) $0,29$ g za tip



Slika 4. Numerični model AB-sten in plošč: a) konstrukcijski elementi, mase in shema navpične obtežbe, b) etažni segmenti sten, c) ciklični odziv sila-raztezek vertikalnih vzmeti, d) numerični model plošče.



Slika 5. Elastični in neelastični spekter in diagram kapacitete za testni primer stavbe.

tal C. Na podlagi izračunanega nihajnega časa idealiziranega sistema smo določili elastični pospešek in pomik, ki znašata $S_{ae} = 0,27$ g in $S_{de} = 17,0$ cm.

Ker je konstrukcija v področju srednjih nihajnih časov, velja, da je pomik neelastičnega sistema približno enak elastičnemu oziroma. $S_d = S_{de} = 17,4$ cm. Ob upoštevanju faktorja transformacije smo pomik SDOF-sistema pretvorili v pomik na vrhu MDOF-sistema, ki znaša $D_t = 24,8$ cm. Primerjava med krivuljo kapacitete in spektri je podana na sliki 5.

3.2.2 Rezultati analize in korekcija armature v stenah

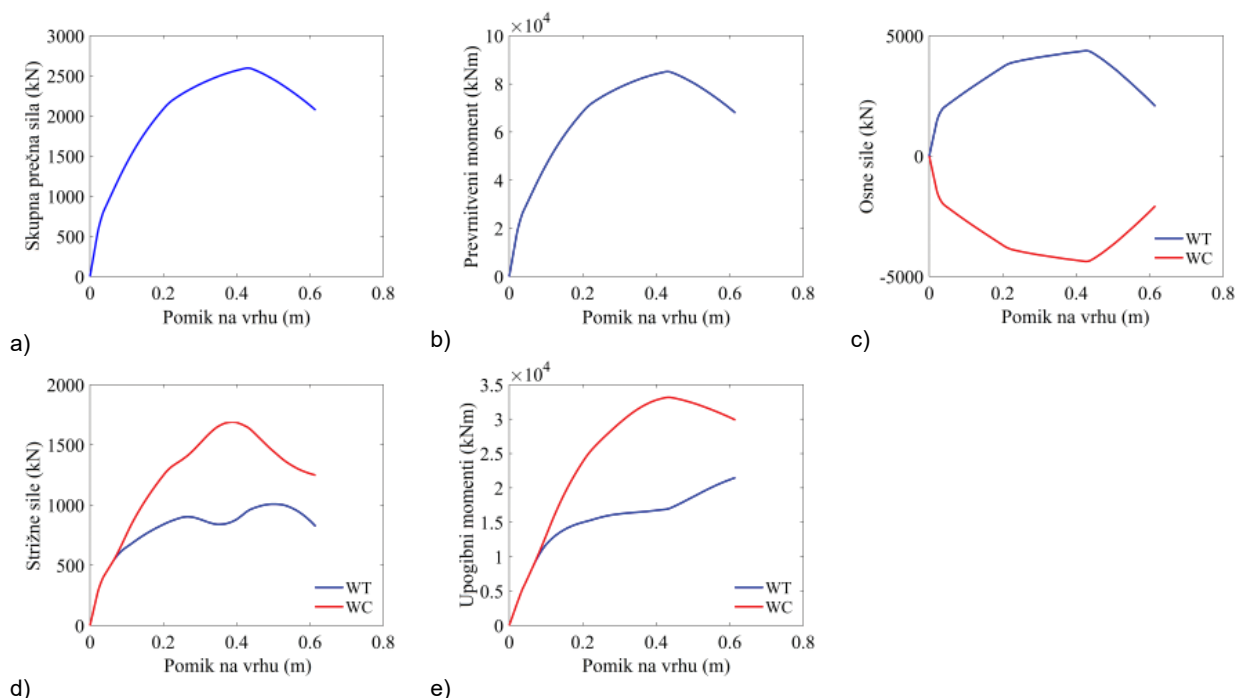
Potresni odziv konstrukcije, ki smo ga ocenili z N2-metodo je prikazan na sliki 6. Zvezi med celotno prečno silo ob vpe-

tju oziroma prevrtnim momentom (vsota momentov, ki jih ob vpetju povzročajo etažne prečne sile) ter pomikom na vrhu konstrukcije sta prikazani na slikah 6a in 6b. Slika 6c prikazuje zvezo med osnimi silami v stenah, ki so posledica potresne obtežbe, in pomikom na vrhu konstrukcije, medtem ko sliki 6d in 6e prikazujeta zvezi med prečnimi silami oziroma upogibnimi momenti v stenah ter pomikom na vrhu konstrukcije.

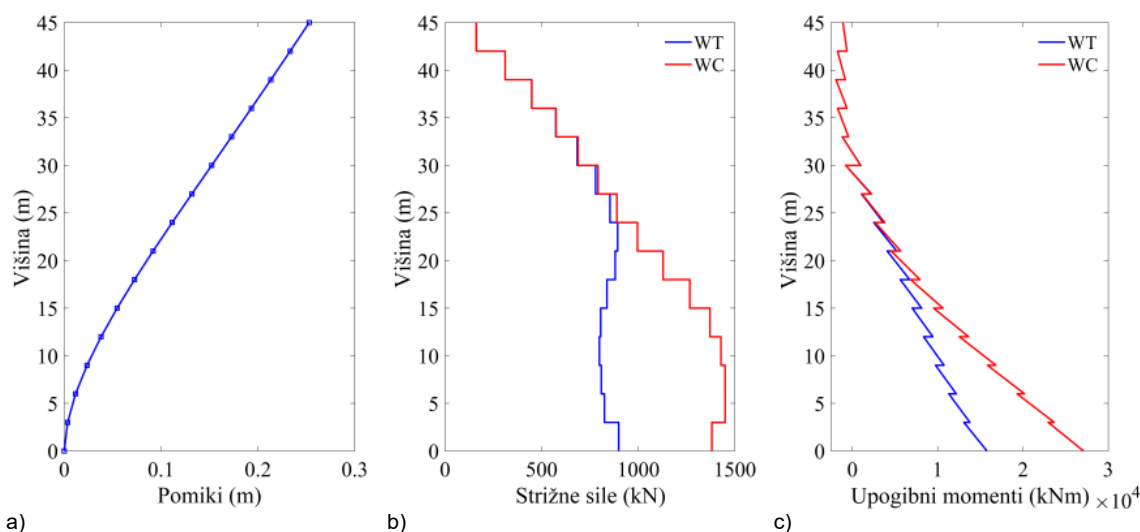
Skupna prečna sila ob vpetju obeh sten je znašala 2600 kN, kar predstavlja približno 15 % lastne teže konstrukcije. Prevrtni moment ob vpetju je znašal 85 000 kNm. Potresni vpliv je v stenah povzročil razmeroma velike osne sile $N_E = 4400$

kN, kar je približno 50 % osnih sil zaradi vertikalne obtežbe N_G . Posledično je bil delež prevrtnega momenta, ki ga stene prevzamejo z okvirnim učinkom (35 000 kNm), pomemben in je znašal 40 % celotnega prevrtnega momenta.

Ovojnice etažnih pomikov, prečnih sil in upogibnih momentov, dobljene pri doseženem ciljnem pomiku, so prikazane na sliki 7. Potek pomikov po višini konstrukcije jasno kaže na izrazito povezanost sten s ploščami. Pretežno linearna deformacijska linija po višini konstrukcije je po obliki med deformacijsko linijo upogibne konzole in strižnega nosilca (okvira). Zaradi močne povezanosti se na eni strani močno zmanjša, na drugi pa močno poveča osna sila (slika 6c).



Slika 6. Zveza med a) celotno prečno silo, b) prevrtnim momentom, c) osnimi silami v stenah, ki so posledica potresne obtežbe, d) prečnimi silami v stenah, e) upogibnimi momenti v stenah in pomikom na vrhu testne stavbe.

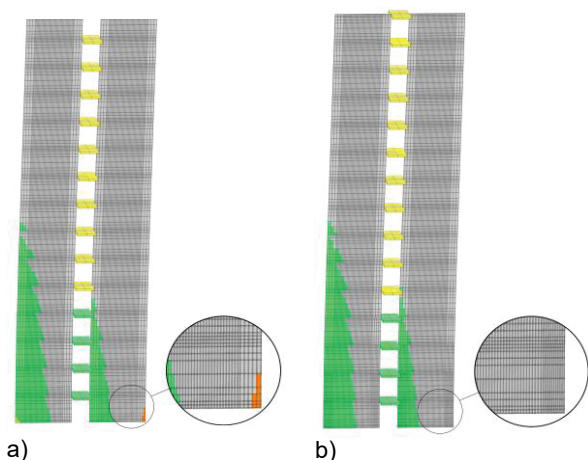


Slika 7. Ovojnice a) pomikov, b) prečnih sil in c) upogibnih momentov za testni primer stavbe.

Ker so osne sile v posameznih slopih sten različne, sta različni tudi njihova nosilnost in togost. V steni, kjer potresni vpliv povzroča tlačne sile, se celotna osna sila zaradi potresa in navpične obtežbe poveča. Posledično se povečata njeni nosilnost in togost. V steni, kjer potresni vpliv povzroča natezne osne sile, se nosilnost in togost zmanjšata. Posledično se med stenama vplivi prerazporedijo (glej potek strižnih sil in upogibnih momentov v posameznih stenah na sliki 7b in 7c). Do prerazporeditve notranjih sil prihaja predvsem v spodnjem delu konstrukcije, kjer so ti učinki najbolj izraziti.

Slika 8a prikazuje vzorec poškodb sten pri doseženem ciljnim pomiku ob upoštevanju minimalne upogibne, strižne in prečne armature za objetje prereza. Barvni prikaz označuje stopnjo poškodovanosti posameznih elementov: zelena barva označuje razpoke v betonu, rumena označuje plastifikacijo armature, oranžna označuje mejno stanje velikih poškodb. V steni, kjer potres povzroča tlačne sile (desna stena), so poškodbe znatne (glej označena področja na sliki 8a). Doseženo je bilo mejno stanje velikih poškodb. Zahtevana duktilnost za pomik tlačno obremenjene stene je presegla razpoložljivo kapaciteto. Ugotovili smo, da minimalna količina armature ne zadošča. Upogibno armaturo smo nato povečali.

Povzetek zahtevane upogibne armature in prečne armature za objetje v stenah je podan v preglednici 1. Delež vzdolžne armature se je v spodnjih etažah povečal na 0,54 %, volumski delež prečne armature v robnih elementih pa na 0,18 %. Potrebno strižno armaturo smo določili v zadnjem koraku projektiranja (glej shemo na sliki 1). Za konstrukcijo s spremenjeno armaturo smo ponovili analizo z N2-metodo. Pripadajoči vzorec poškodb je prikazan na sliki 8b. Razvidno je, da neželenih krhkih poškodb pri velikih osnih silah v tlačno obremenjeni steni ni več.



Slika 8. Vzorec poškodb pri ciljnem pomiku, ki ustreza povratni dobi 475 let, za testni primer stavbe pri a) minimalni upogibni in prečni armaturi ter b) pri korigirani upogibni in prečni armaturi. Legenda: zelena barva označuje razpoke v betonu, rumena označuje plastifikacijo armature, oranžna označuje mejno stanje velikih poškodb.

3.3 Ocena maksimalnih strižnih sil in določitev strižne armature

V zadnjem koraku smo strižne sile, izračunane z metodo N2, korigirali, saj so te bistveno večje od računskih zaradi vpliva višjih nihajnih oblik. Pri tem smo upoštevali korekcijske faktorje, ki smo jih nedavno določili na UL FGG [Janevski, 2025a, 2025b]. Najprej smo določili faktor za povečanje skupne prečne sile ob vpetju. Ta je znašal 1,9. Nato smo določili ustrezne etažne strižne sile oziroma strižne sile v posameznih stenah. Povzetek zahtevane strižne armature v stenah je podan v preglednici 1. Delež prečne armature se je v zgornjih etažah povečal na 0,63 %, v spodnjih pa na 0,75 %.

3.4 Verifikacija predlagane metode

Potresni odziv stavbe, ki smo jo projektirali s predlagano metodo, smo ocenili tudi z nelinearno analizo časovnega odziva in ga primerjali z odzivom stavbe, ki je bila projektirana na tradicionalni način, upoštevajoč, da so stene konzolne, in na osnovi elastičnih metod analize. Pri tem smo upoštevali določila standarda Evrokod 8 [CEN, 2004] za DCM-razred duktilnosti. Ustrezno temu smo pri projektiranju upoštevali faktor obnašanja $q = 3$. Akceleroگرامe, s katerimi smo modelirali potresni vpliv, smo izbrali v skladu s potresnimi zahtevami, ki smo jih upoštevali pri projektiranju (slika 9).

Nelinearne dinamične analize smo naredili ob upoštevanju dveh intenzitet gibanja tal, ki ustrezata povratnim dobam 475 (ustreza SD-mejnemu stanju) in 2475 let (ustreza NC-mejnemu stanju). Pri vseh analizah smo upoštevali 5-odstotno viskozno dušenje. Upoštevali smo tudi vpliv teorije drugega reda (t. i. P-delta efekt).

Najpomembnejši rezultati nelinearnih dinamičnih analiz časovnega odziva so prikazani na slikah 10 do 13, kjer smo primerjali strižne sile in upogibne momente, upoštevane pri projektiranju, z vrednostmi, dobljenimi iz nelinearne dinamične analize. Svetlo modra barva prikazuje ovojnice prečnih sil oziroma upogibnih momentov iz nelinearne analize časovnega odziva za posamezen akceleroگرام. Povprečna vrednost, izračunana iz odziva vseh 15 akceleroگرامov, je prikazana s temno modro barvo. Projektne vrednosti pa prikazujemo z rdečo barvo.

Slika 10 prikazuje primerjavo strižnih sil iz nelinearne dinamične analize za intenziteto gibanja tal, ki ustreza povratni dobi 475 let (stanje SD) in projektnih strižnih sil. Na sliki 10a so prikazani rezultati za stavbo, projektirano na osnovi tradicionalnega pristopa, ki temelji na elastični analizi. Povprečne strižne sile, dobljene iz nelinearne analize, so bile v tem primeru do 1,65-krat večje od pripadajočih projektnih vrednosti. Na sliki 10b so prikazani rezultati za stavbo, projektirano na osnovi predlagane metode. V tem primeru so bile povprečne strižne sile iz nelinearne analize manjše od projektnih vrednosti, pri čemer je bilo največje razmerje med izračunano in projektno vrednostjo enako 0,85.

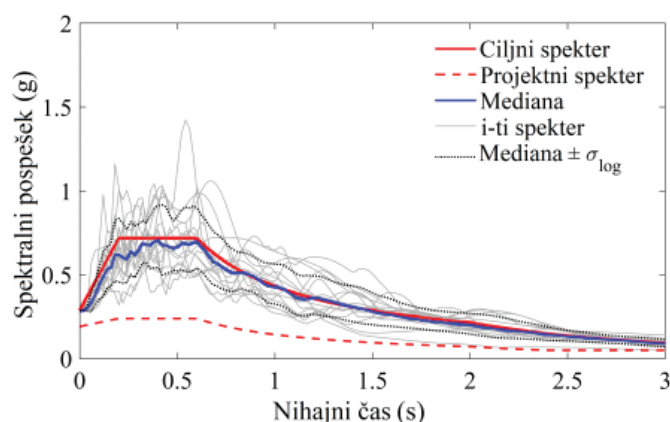
Slika 11 prikazuje primerjavo strižnih sil iz nelinearne dinamične analize za intenziteto gibanja tal, ki ustreza povratni dobi 2475 let (stanje NC), in projektnih strižnih sil, upoštevanih pri projektiranju na osnovi elastične analize (slika 11a) oziroma predlagane metode (slika 11b). Povprečne strižne sile iz neli-

nearne analize so bile do 2,5-krat večje od strižnih sil v stenah, projektiranih na osnovi elastične analize. Razlika je bila bistveno manjša v stenah, projektiranih na osnovi predlagane metode. Največje razmerje med izračunano in projektno vrednostjo je znašalo 1,30.

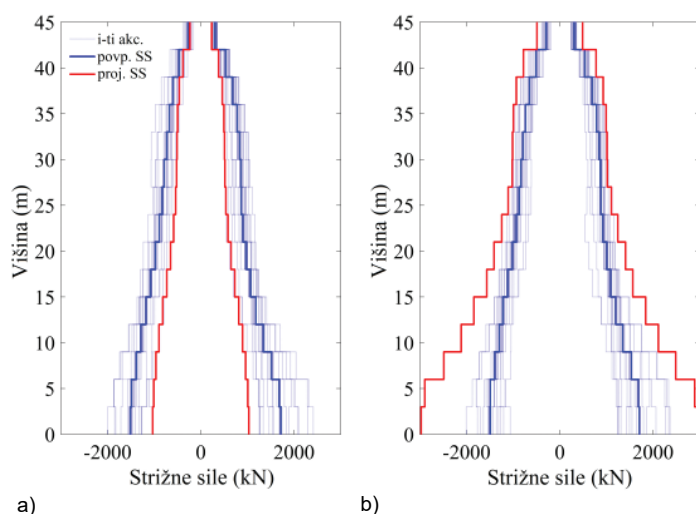
Slika 12 prikazuje primerjavo upogibnih momentov iz nelinearne dinamične analize za stanje SD in projektnih upogibnih momentov. Na sliki 12a so prikazani rezultati za stavbo, projektirano na osnovi tradicionalnega pristopa, ki temelji na elastični analizi. Največje razmerje med upogibnimi momenti iz nelinearne dinamične analize in projektnimi momenti, določenimi z elastično analizo, je znašalo 1,45. Na sliki 12b so prikazani rezultati za stavbo, projektirano na osnovi predlagane metode. V tem primeru so bila razmerja manjša od 1, z največjim razmerjem 0,93.

Slika 13 prikazuje primerjavo upogibnih momentov iz nelinearne dinamične analize za stanje NC in upogibnih momentov, upoštevanih pri projektiranju na osnovi elastične analize (slika 13a) oziroma predlagane metode (slika 13b). Pri stavbi, projektirani na osnovi elastične analize, so bili upogibni momenti iz nelinearne analize do 2,0-krat večji od projektnih upogibnih momentov. Pri stavbi, projektirani na osnovi predlagane metode, pa je bilo največje razmerje med izračunanimi in projektnimi vrednostmi 1,34.

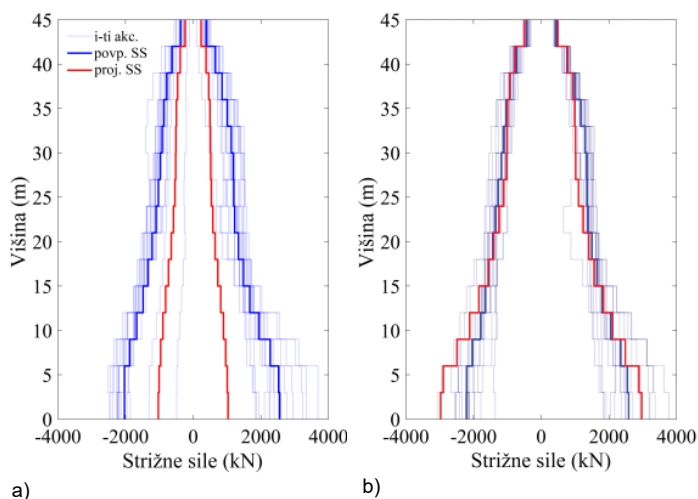
Posledično so tradicionalno zasnovane stavbe utrpeli več škode. Globalni mejni stanji SD in NC sta bili doseženi v primeru



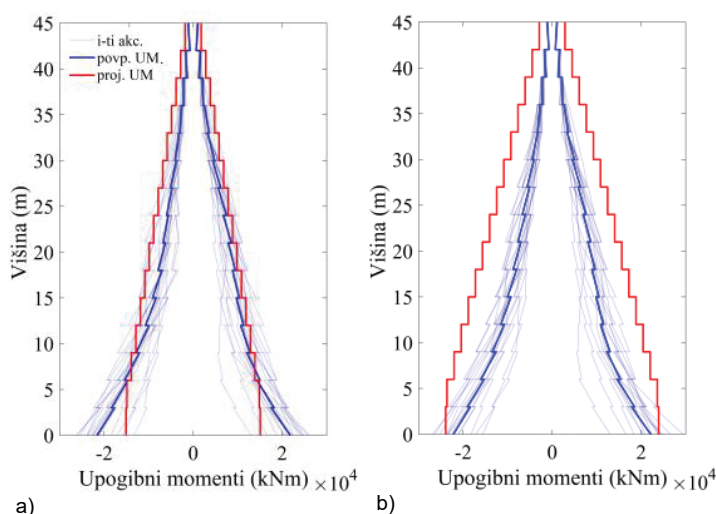
Slika 9. Spektri pospeškov izbranih akcelorogramov, vključno z medianami spektrov in standardnim odklonom, so predstavljeni skupaj s ciljnim (elastičnim) in zmanjšanim (projektnim) spektrom po EC8 za PGA 0,29 g.



Slika 10. Ovojnice prečnih sil, upoštevanih pri zasnovi, ter pripadajoče vrednosti iz nelinearne analize časovnega odziva za intenziteto gibanja tal, ki ustreza povratni dobi 475 let, za testni primer stavbe, projektirane na osnovi a) elastičnih metod analize in b) predlagane metode, ki temelji na potisni analizi.

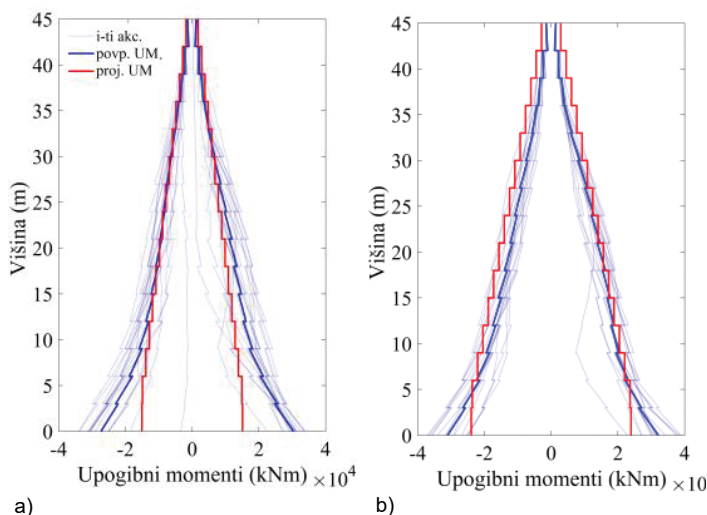


Slika 11. Ovojnice prečnih sil, upoštevanih pri zasnovi, ter pripadajoče vrednosti iz nelinearne analize časovnega odziva za intenziteto gibanja tal, ki ustreza povratni dobi 2475 let, za testni primer stavbe, projektirane na osnovi a) elastičnih metod analize in b) predlagane metode, ki temelji na potisni analizi.



Slika 12. Ovojnice upogibnih momentov, upoštevanih pri zasnovi, ter pripadajoče vrednosti iz nelinearne analize časovnega odziva za intenziteto gibanja tal, ki ustreza povratni dobi 475 let, za testni primer stavbe, projektirane na osnovi a) elastičnih metod analize in b) predlagane metode, ki temelji na potisni analizi.

štirih oziroma dvanajstih akceleroگرامov od petnajstih. Vendar nobeno od mejnih stanj SD ali NC ni bilo doseženo, ko je bila stavba projektirana na osnovi predlagane metode. Zato lahko sklepamo, da je bil odziv konstrukcije, projektirane na osnovi predlagane metode, izboljššan v primerjavi s konstrukcijo, projektirano na osnovi elastične analize.



Slika 13. Ovojnice upogibnih momentov, upoštevanih pri zasnovi, ter pripadajoče vrednosti iz nelinearne analize časovnega odziva za intenziteto gibanja tal, ki ustreza povratni dobi 2475 let, za testni primer stavbe, projektirane na osnovi a) elastičnih metod analize in b) predlagane metode, ki temelji na potisni analizi.

4 VERIFIKACIJA PREDLAGANE METODE NA ŠIRŠEM NABORU STAVB Z AB-STENAMI, POVEZANIMI ZGOLJ S PLOŠČAMI

4.1 Opis nabora stavb

Predlagano metodo smo ovrednotili na širokem naboru stavb z armiranobetonskimi stenami, ki so bile povezane zgolj s ploščami. Tlorisna zasnova stavb je bila enaka kot pri testnem

primeru, prikazanem na sliki 2, spreminjali pa smo posamezne lastnosti stavb, ki so povzete v preglednici 2. Stavbe smo projektirali tako s predlagano metodo, ki temelji na potisni analizi, kot na tradicionalen način kot konzolne stene na podlagi elastičnih analiz.

Za oceno njihovega odziva smo naredili obsežne nelinearne analize časovnega odziva. Obravnavane stavbe smo analizirali pri dveh intenzitetah potresnega vpliva, ki ustrezata povratnim dobam 475 (SD-mejno stanje) in 2475 let (NC-mejno stanje). V analizah smo upoštevali akceleroگرامe, predstavljene v poglavju 3.4.

4.2 Primerjalna analiza

Povprečne strižne sile v stenah iz nelinearne dinamične analize smo za različne stopnje povezanosti sten CL (angl. coupling level) primerjali s projektnimi strižnimi silami. CL predstavlja kvantitativno mero medsebojne povezanosti sten in je definiran kot razmerje med upogibnim momentom, ki se razvije v okvirnem sistemu sten in plošč, ter celotnim prevrnitvenim momentom v konstrukciji zaradi potresne obtežbe.

Na slikah 14 in 15 prikazujemo največja razmerja med strižnimi silami iz nelinearne dinamične analize za SD- oziroma NC-stanje in pripadajočimi projektnimi vrednostmi, pri čemer je upoštevano največje razmerje vzdolž celotne višine sten.

Strižne sile, upoštevane pri projektiranju, ki temelji na elastični analizi, so bile presežene tako za SD- kot za NC-mejno stanje (glej sliki 14a in 15a). Pri SD-stanju so bile strižne sile iz nelinearne dinamične analize do 2-krat večje, pri NC-stanju pa do 2,5-krat večje od strižnih sil, upoštevanih pri projektiranju.

Ko so bile analizirane stavbe projektirane na osnovi predlagane metode, so bile strižne sile iz nelinearne dinamične analize v SD-stanju v večini primerov manjše od strižnih sil, upoštevanih pri projektiranju (glej sliki 14b). V SD-stanju je bilo to razmerje največ 1,2, vendar smo vrednosti, večje od 1,0, opazili le v štirih stavbah. V NC-stanju je bila maksimalna vrednost tega razmerja 1,6 (slika 15b).

Podobne rezultate smo dobili, tudi ko smo primerjali povprečne upogibne momente iz nelinearne dinamične analize

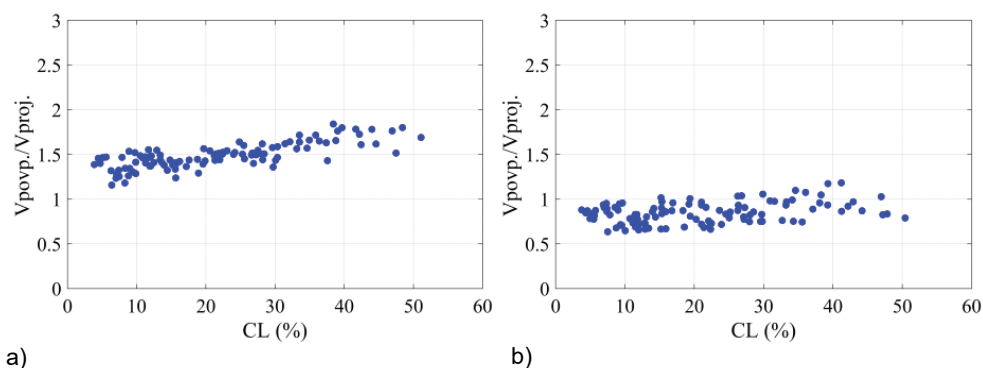
A_w/A_f (%)	N (m)	H_s (m)	H_w (m)	B_w (m)	a_g (g)	L_o (m)	b_{eff} (m)	t (m)	A_{slab} (cm ² /m)
1.5	5, 10 in 15	3	4 6	0.2	0.29	2	1.0, 2.75 in 5.5 1.0, 3.25 in 6.5	0.2	2.57 in 3.85
2	5, 10 in 15	3	4 6	0.2	0.29	2	1.0, 2.25 in 4.5 1.0, 2.5 in 5.0	0.2	2.57 in 3.85
2.5	5, 10 in 15	3	4 6	0.2	0.29	2	1.0, 2.0 in 4.0 1.0, 2.25 in 4.5	0.2	2.57 in 3.85

Legenda: a_g – pospešek temeljnih tal, N – število etaž, H_s – etažna višina, H_w – višina prečnega prereza sten, B_w – širina prečnega prereza sten, A_w/A_f – razmerje med površino sten in pripadajočo površino tlorisa etaže, L_o – razdalja odprtine med stenami, b_{eff} – sodelujoča širina plošče, t – debelina plošče, A_{slab} – armatura plošče

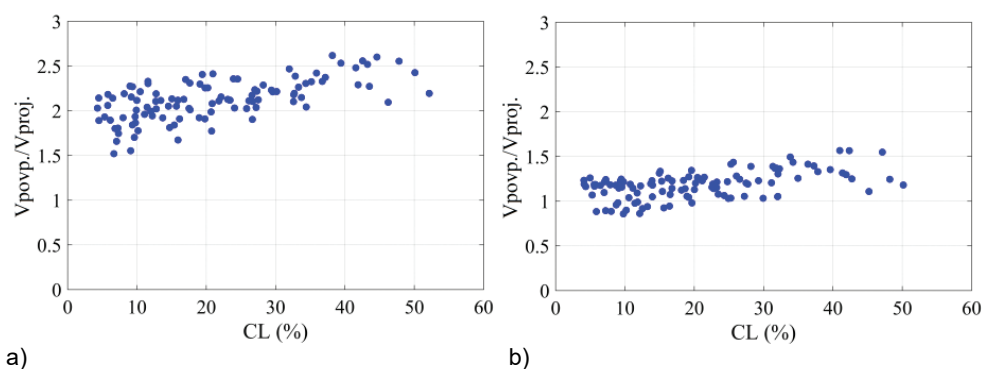
Preglednica 2. Lastnosti izbranih stavb.

in upogibne momente, upoštevane pri projektiranju (glej sliki 16 in 17). Upogibni momenti, upoštevani pri projektiranju, ki temelji na elastični analizi, so bile preseženi za največ 1,8 oziroma 2,7 za mejni stanji SD in NC (glej sliki 16a in 17a). Za stavbe, zasnovane ob upoštevanju predlagane metode, so bila ta razmerja nižja, in sicer do 1,2 oziroma 1,5 za mejni stanji SD in NC

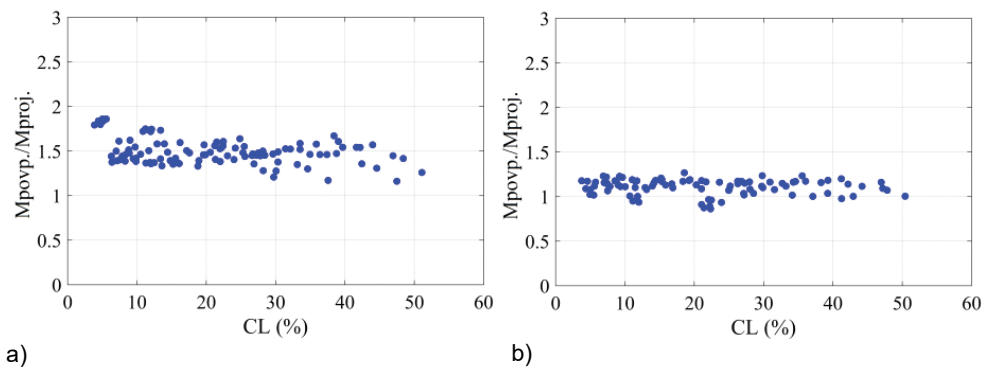
(glej sliki 16b in 17b). Na slikah so prikazana največja razmerja vzdolž celotne višine sten. Pri tem opažamo, da razmerja ob vpetju sten niso bila tako izrazita; največja odstopanja so se pojavila v višjih etažah, kar je pomembno upoštevati pri interpretaciji rezultatov.



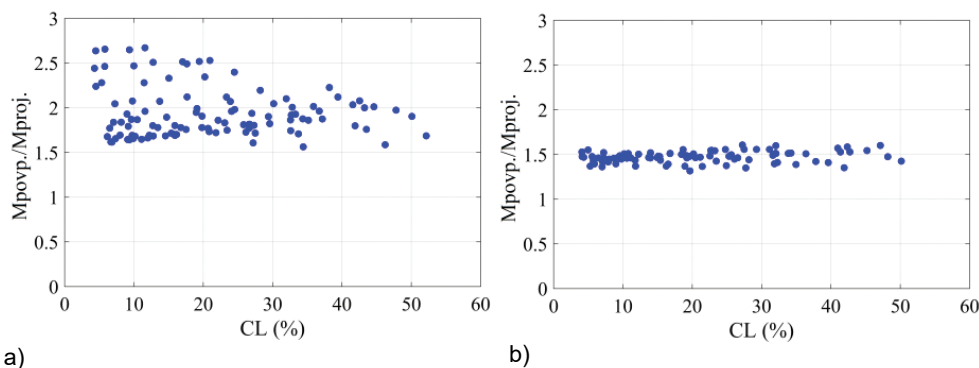
Slika 14. Razmerje med povprečnimi prečnimi silami $V_{povp.}$ iz nelinearne analize časovnega odziva za intenziteto gibanja tal, ki ustreza mejnemu stanju SD, in projektnimi prečnimi silami $V_{proj.}$ za izbran nabor stavb, projektiranih na osnovi a) elastičnih metod analize in b) predlagane metode, ki temelji na potisni analizi.



Slika 15. Razmerje med povprečnimi prečnimi silami $V_{povp.}$ iz nelinearne analize časovnega odziva za intenziteto gibanja tal, ki ustreza mejnemu stanju NC, in projektnimi prečnimi silami $V_{proj.}$ za izbran nabor stavb, projektiranih na osnovi a) elastičnih metod analize in b) predlagane metode, ki temelji na potisni analizi.



Slika 16. Razmerje med povprečnimi upogibnimi momenti $M_{povp.}$ iz nelinearne analize časovnega odziva za intenziteto gibanja tal, ki ustreza mejnemu stanju SD, in projektnimi upogibnimi momenti $M_{proj.}$ za izbran nabor stavb, projektiranih na osnovi a) elastičnih metod analize in b) predlagane metode, ki temelji na potisni analizi.



Slika 17. Razmerje med povprečnimi upogibnimi momenti $M_{povp.}$ iz nelinearne analize časovnega odziva za intenziteto gibanja tal, ki ustreza mejnemu stanju NC, in projektnimi upogibnimi momenti $M_{proj.}$ za izbran nabor stavb, projektiranih na osnovi a) elastičnih metod analize in b) predlagane metode, ki temelji na potisni analizi.

Rezultati analiz so pokazali, da je mogoče odziv AB-sten, povezanih s ploščami brez gred, ustrezno oceniti z uporabo potisne analize. Potresne zahteve je mogoče natančno napovedati, odziv stavb pa znatno izboljšati. Poleg tega smo z uporabo predlagane metode znatno zmanjšali poškodbe konstrukcije, kar je še posebno pomembno, saj številne stavbe sicer preživijo potres, vendar utrpijo poškodbe, zaradi katerih popravila niso ekonomsko upravičena.

5 ZAKLJUČKI

V članku je predstavljena razmeroma preprosta in učinkovita metoda za potresno odporno projektiranje AB-sten, povezanih s ploščami brez povezovalnih gred. Metoda temelji na nelinearni N2-metodi in principih načrtovanja nosilnosti.

Metoda je sestavljena iz treh glavnih korakov. V prvem koraku določimo minimalno upogibno in prečno armaturo sten. V drugem koraku z N2-metodo ocenimo potresni odziv stavbe z minimalno armaturo. Če duktilnost konstrukcije in posameznih sten ne ustreza potresnim zahtevam, popravimo armaturo. V nasprotnem nadaljujemo s tretjim korakom, kjer določimo maksimalne strižne sile v stenah in določimo potrebno armaturo. Pri tem upoštevamo principe načrtovanja nosilnosti in vplive zaradi višjih nihajnih oblik.

Učinkovitost predlagane metode smo ovrednotili na širšem naboru stavb z AB-stenami, z uporabo nelinearne dinamične analize časovnega odziva. Odziv sten, projektiranih po predlaganem postopku, smo tudi primerjali z odzivom sten, ki smo jih projektirali na tradicionalen način kot konzolne stene na podlagi elastičnih analiz.

Pokazali smo, da je mogoče odziv AB-sten, povezanih s ploščami brez gred, zanesljivo oceniti z uporabo potisne analize. Predvsem je novi postopek bolj učinkovit pri ocenitvi strižnih sil v stenah. Za razliko od tradicionalno projektiranih sten, v katerih so bile projektne strižne sile v stanju SD tudi do 2,5-krat manjše od tistih, določenih z

nelinearno dinamično analizo, je bilo to razmerje v stenah, projektiranih po predlaganem postopku, največ 1,2. Vrednosti, večje od 1, smo opazili v le štirih od 108 analiziranih stavb. V NC-stanju je razmerje med strižnimi silami iz nelinearne dinamične analize in projektnimi strižnimi silami pri tradicionalno projektiranih stenah doseglo 2,7, medtem ko je bilo pri stenah, projektiranih po predlaganem postopku, največ 1,6. Takšna zmanjšanja potrjujejo, da metoda omogoča učinkovitejše in zanesljivejše dimenzioniranje sten, kar neposredno prispeva k zmanjšanju poškodovanosti konstrukcije in izboljššanemu odzivu stavb.

Učinkovitost predlagane metode smo dokazali na primerih stavb s simetrično postavljenimi stenami. V nadaljnjih raziskavah načrtujemo njeno evalvacijo za bolj splošne primere z nesimetrično zasnovo in nesimetričnimi stenami.

Predlagano metodo smo razvili predvsem za projektiranje stavb, v katerih so stene povezane le s ploščami. Bilo bi pa jo smiselno nadgraditi tudi za bolj kompleksne sisteme sten, ki vključujejo tudi povezovalne grede.

6 ZAHVALA

Predstavljeno raziskavo je podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije.

7 LITERATURA

CEN, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, Pub. L. No. 1998-1:2004, EN (2004). CEN, Brussels: European Committee for Standardisation, 2004.

CEN/TC 250/SC 8, Eurocode 8: Earthquake resistance design of structures (2021). CEN, 2021.

Fajfar, P., A nonlinear analysis method for performance based seismic design, *Earthquake Spectra*, 16(3), 573–592, 2000.

Fischinger, M., Isakovic, T., Kante, P., Implementation of a macro model to predict seismic response of RC structural walls, *Computers and Concrete*, 1(2), <https://doi.org/10.12989/cac.2004.1.2.211>, 2004.

Giberson, M., The response of nonlinear multi-story structures subjected to earthquake excitation. Dissertation (Ph.D.). California Institute of Technology., 1967.

Janevski, A., Isaković, T., (a), Potresni odziv armiranobetonskih sten povezanih s ploščami brez povezovalnih gred, *Gradbeni Vestnik*, 29–44, 2025.

Janevski, A., Isaković, T., (b), Seismic response of RC walls coupled by slabs without coupling beams, *Engineering Structures*, 329, 119861, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119861>, 2025.

Kante, P., Seismic Vulnerability of RC Walls. Dissertation (Ph.D.) (Dissertation). University of Ljubljana, Ljubljana, 2005.

McKenna, F., Fenves, G. L., Scott, M. H., Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees), Retrieved April 8, 2024, from, 2000.

Rejec, K., Isaković, T., Fischinger, M., Seismic shear force magnification in RC cantilever structural walls, designed according to Eurocode 8, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(2), 567–586, <https://doi.org/10.1007/s10518-011-9294-y>, 2012.

Takeda, T., Sozen, M. A., Nielsen, N. N., Reinforced concrete response to simulated earthquakes, *Journal of the Structural Division*, 96(12), 2557–2573, Retrieved from <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?17038>, 1970.

mag. Marjana Lutman, univ. dipl. inž. grad.
marjana.lutman@zag.si



Ilma Kulović, mag. inž. grad.
ilma.kulovic@zag.si



dr. Meta Kržan, univ. dipl. inž. grad.
meta.krzan@zag.si
Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva ulica 12, Ljubljana



Znanstveni članek
UDK/UDC: 699.841:624.131.55(497.4)

OCENA POTRESNE OGROŽENOSTI STAVB SODIŠČ V SLOVENIJI

SEISMIC RISK ASSESSMENT OF COURTHOUSE BUILDINGS IN SLOVENIA

Povzetek

V prispevku so predstavljeni namen in program raziskovalnega projekta Strateške podlage za zmanjšanje potresne ogroženosti stavb pravosodja v Sloveniji ter bistveni dosednji rezultati. Opisu značilnosti obravnavanih 76 stavb sodišč v Sloveniji in kratkemu povzetku uporabljenih metod sledi predstavitev rezultatov izdelanih ocen potresne ogroženosti obravnavanih stavb s komentarjem. Stavbe so raznolike glede na tip konstrukcije, število nadstropij, starost in potresno nevarnost lokacij, na katerih stojijo. Razvrstitev stavb je bila izvedena glede na dva kazalnika potresne ogroženosti. Prvi je razmerje med ocenjeno vrednostjo koeficienta potresne odpornosti SRCu-np in vrednostjo koeficienta projektne potresne obtežbe BSCd, ki upošteva zahteve standarda Evrokod 8 in Novo karto potresne nevarnosti iz leta 2021. Drugi kazalnik pa je z modelom POTROG ocenjena verjetnost, da bo stavba v primeru potresa po Karti intenzitete iz leta 2011 utrpela poškodovanost kategorij 3, 4 ali 5 (tj. najmanj kategorije 3) po Evropski potresni lestvici EMS-98. Istih pet stavb je prepoznanih kot potresno najbolj ogroženih po obeh parametrih. Vseh pet je zidanih in zgrajenih pred uveljavitvijo prvih potresnih predpisov. Dve najbolj ogroženi armiranobetonski stavbi sta na 11. in 23. mestu po prvem oziroma na 15. in 16. mestu po drugem parametru. Druga od njiju je bila zgrajena pred uvedbo prvih potresnih predpisov, prva pa po njej. V zadnjem delu prispevka so kot del predstavitve metodologije projekta na primeru stavbe konkretnega sodišča predstavljeni rezultati podrobnih potresnih analiz izbrane stavbe, to je potresnih analiz, izvedenih na podlagi podrobnega pregleda in preiskav stavbe, ki služijo za natančno oceno potresne odpornosti stavbe v obstoječem in različnih variantah utrjenega stanja.

Ključne besede: Potresna ogroženost, stavbe sodišč, model POTROG, in situ preiskave, potisna analiza, ocena stroškov utrditve.

Summary

The article presents the purpose and the program of the research project "Strategic basis for the reduction of seismic risk of courthouse buildings in Slovenia", together with main results. The description of the main characteristics of 76 courthouse buildings in Slovenia is followed by a summary of the methods used, as well as the presentation and discussion of the obtained results of the seismic risk assessments of the buildings under consideration. The buildings are diverse in terms of the structural type, the number of floors, the age and the seismic hazard of their locations. The classification of buildings was carried out using two seismic risk indicators. The first one is the ratio between the estimated value of the seismic resistance coefficient SRCu-np and the value of the design base shear coefficient BSCd, which takes into account the requirements of Eurocode 8 and the New Seismic Hazard Map from 2021. The second indicator is the probability, estimated using the POTROG model, that the building will suffer damage of grade 3, 4 or 5 (i.e. at least grade 3) according to the European Seismic Scale EMS-98 if hit by an earthquake according to the 2011 Intensity Map. The same five buildings are at the top of the list in terms of seismic risk according to both parameters. All five are masonry buildings and were constructed before the implementation of the first seismic codes. Two reinforced concrete buildings with the highest seismic risk are in 11th and 23rd place according to the first, or in 15th and 16th place according to the second parameter. The second of them was built before, and the first after the introduction of the first seismic regulations. The final part of the article outlines the methodological framework adopted within the project for conducting detailed seismic resistance assessments of selected reference buildings. This is exemplified by the case study of the courthouse building in Sevnica, comprising a description of the structural characteristics of the analysed building, the performed in-situ investigations and experimental tests, as well as the results of the global seismic performance evaluation in its existing condition and under various strengthening schemes.

Key words: Seismic risk, Courthouse buildings, POTROG model, In-situ investigations, Pushover analysis, Strengthening cost estimation.

1 UVOD

Visoka potresna ogroženost v Sloveniji je posledica visoke izpostavljenosti potresom in visoke potresne ranljivosti stavb in drugih gradbenih objektov. V večini delov naše države moramo namreč v povratni dobi 475 let pričakovati potrese z intenziteto VII EMS ali več. V širšem pasu, ki v smeri severozahod-jugovzhod prekriva osrednji del Slovenije, pa lahko pričakujemo najmočnejše potrese, z intenziteto VIII EMS [Šket Motnikar, 2011]. Delež potresno ranljivejših stavb, ki so bile zgrajene v obdobjih pred letom 1965, ko naj bi bili uveljavljeni prvi predpisi za projektiranje in gradnjo potresno odpornih konstrukcij, torej so bile grajene izkustveno ali z upoštevanjem zgolj navpične obtežbe, po podatkih iz Katastra nepremičnin znaša 36 % celotnega stavbnega fonda [MNVP, GURS, 2025]. Pri stavbah, zgrajenih po letu 1965, so se ob rušilnih potresih doma in v svetu postopoma uveljavljala znanja potresnoinženirske stroke, s pomočjo priporočil in zahtev prvih oziroma kasnejših in najsodobnejših predpisov.

Učinkovito in edino zanesljivo zaščito pred porušitvijo predstavlja dovolj velika potresna odpornost stavb in drugih gradbenih objektov, ki jo v fazi projektiranja in izvedbe zagotavlja upoštevanje ustreznih tehničnih predpisov. Z neustrezno odpornostjo stavb pa je povezana velika verjetnost za njihovo porušitev ali zelo veliko poškodovanost, za posledične človeške žrtve ter neposredno in posredno gospodarsko izgubo. Zato je za družbo kot celoto vitalnega pomena, da se stavbe s previsoko potresno ranljivostjo bodisi utrdijo bodisi nadomestijo z novimi. Stavb z neustrezno potresno odpornostjo je veliko, med njimi so tako stanovanjske stavbe kot stavbe vseh drugih namembnosti, dosega tega cilja pa je povezana z visokimi stroški. Zato je k reševanju te problematike treba pristopiti na državnem nivoju, strateško in postopoma, z upoštevanjem vnapij določenih prioritet.

Tako so tudi slovenski strokovnjaki za potresno inženirstvo že pred desetletji pristopili k sistematičnemu pregledovanju in poenostavljenemu ocenjevanju potresne ogroženosti večjega števila izbranih stavb. Na tedanjem Zavodu za raziskavo materiala in konstrukcij (ZRMK) so se leta 1986 pričele prve raziskave na tem področju, v ta namen so bile tudi razvite metodologije ocenjevanja, predvsem za zidane stavbe [Sheppard, 1986]. Nato je bila med drugim leta 1991 v sodelovanju tedanjih ZRMK in Seizmološkega zavoda Republike Slovenije za Mestni štab za civilno zaščito izdelana ocena potresne ogroženosti preko 113 stavb v Mestni občini Ljubljana [Tomažević, 1991]. Ocena ogroženosti je temeljila na razvrstitvi obravnavanih stavb v ranljivostne razrede po MSK 78 [Lapajne, 1984], številu stanovalcev obravnavanih stavb, v sklopu projekta razvitih modelov za oceno potresne nevarnosti v obliki poenostavljenih kart mikrorajonizacije ter za oceno smrtnih žrtev. Do danes je bilo izvedenih več študij potresne ogroženosti različnih stavbnih fondov po različnih metodologijah. Med večjimi je bilo v sklopu projektov POTROG [Lutman, 2013b, 2016, 2018, 2020b] iz predhodnih študij zbranih in dodatno izvedenih skupno več kot 1600 individualnih ocen stavb, na podlagi katerih je bil v sodelovanju s partnerji razvit in nadgrajen model POTROG za napovedovanje posledic potresa za Upravo za zaščito in reševanje RS za

namen načrtovanja odziva. Za pripravo strategije tedanjega Ministrstva za okolje in prostor RS za zmanjšanje potresnega tveganja v Sloveniji je bila leta 2021 v sklopu nacionalnega potresnega stresnega testa [Dolšek, 2020; Babič, 2022] z uporabo metodologije, ki temelji na verjetnostni analizi potresnega tveganja in vključuje vrednotenje vplivov negotovosti modelno ocenjenih okoli 500.000 stavb ali njihovih delov, kar predstavlja večino slovenskega stavbnega fonda. V posameznih študijah so bile za analizo potresne ogroženosti različnih skupin stavb izbranega fonda uporabljene tudi različne metode, npr. pri oceni potresne ogroženosti stavb mestnega jedra v Idriji [Gostič, 2013; Lutman, 2013a], ali pa so obravnavale arhitektonsko specifične stavbe, npr. cerkve [Bosiljkov, 2009]. Zaključki vseh študij so podobni; poudarjajo visoko potresno ranljivost starega stavbnega fonda, potrebo po sistematičnih prenovah, večinoma pa omogočajo tudi razvrstitev stavb po ogroženosti.

Po izvedbi manj zanesljivih ocen na nivoju izbranega fonda se za stavbe, ocenjene kot potresno najbolj ogrožene, prioriteto izvede podrobna analiza potresne odpornosti v obstoječem in navadno nekaj različicah utrjenega stanja, pri čemer se uporabijo metode iz veljavnih predpisov, in se na podlagi rezultatov izbere optimalna različica utrditve. Ta mora zasledovati dosego ustrezne potresne odpornosti in mehanske odpornosti na vse druge predpisane vplive. Glede na to, da je utrditev konstrukcije najobsežnejši poseg v stavbo, pa je smiselno, da se ta projektira in v primeru izvedljivosti in ekonomske upravičenosti tudi izvede v okviru celovite prenove stavbe, da se torej zanjo dosežejo tudi ustrezna požarna odpornost, energetska učinkovitost in izpolnijo druge bistvene zahteve veljavne gradbene regulative.

K sistemskemu pristopu k zmanjšanju potresne ogroženosti se je s sprejetjem Resolucije o krepitvi potresne varnosti do leta 2050, imenovane Prehitimo potres (ReKPV50) [MNVP, 2023], zavezala tudi država. Že pred tem je bilo zmanjšanje potresne ogroženosti poleg vidika porabe energije kot eden ključnih ciljev pri obnovi stavbnega fonda navedeno tudi v strateških ciljnih Dolgoročne strategije energetske prenove stavb do leta 2050 v Republiki Sloveniji [DSEPS, Dolgoročna strategija energetske prenove stavb do leta 2050, 2021], od leta 2024 pa naslavljanje problematike skozi celovito prenovo vključuje tudi prenovljena Evropska direktiva o energetske učinkovitosti stavb [EPBD 2024/1275, n.d.].

1.1 Predstavitev projekta in cilji raziskave

Oblikovalci politik, ki so hkrati upravniki mnogih državnih stavb, naj bi po eni strani ustvarjali spodbudno okolje, da bi preostali upravniki in lastniki lažje pristopali k ukrepom za zmanjšanje potresne ogroženosti, po drugi strani pa bi morali biti tudi sami zgled pri doseganju omenjenega cilja. V luči napisanega Zavod za gradbeništvo Slovenije (ZAG) v sodelovanju z Ministrstvom za pravosodje (MP) v okviru ciljno usmerjenega raziskovalnega projekta št. V2-2257 (B) z naslovom Strateške podlage za zmanjšanje potresne ogroženosti stavb pravosodja v Sloveniji pripravlja strokovne in znanstvene podlage za strategijo in nadaljnje aktivnosti za zmanjšanje potresne

ranljivosti stavb, ki so v uporabi sodnih organov in jih upravlja Ministrstvo za pravosodje. Glavne dejavnosti raziskovalnega projekta vključujejo:

- ocenjevanje potresne ogroženosti vseh stavb obravnavanega fonda, ki ga upravlja MP, z uporabo metod za individualno ocenjevanje glede na prevladujoč tip navpične konstrukcije ter razvrstitev stavb po ogroženosti,
- podrobne analize izbranih stavb v obstoječem stanju, po oceni bolj ogroženih in reprezentativnih za posamezen tip navpične konstrukcije, ki zajemajo podrobne preglede nosilne konstrukcije in preiskave vgrajenih materialov ter potisne analize potresne odpornosti,
- študije možnih različic protipotresne utrditve, ki zajemajo potisne analize izbranih stavb v utrjenem stanju, ob upoštevanju načinov utrditve, možnih za posamezen tip konstrukcije, skupaj z ocenami stroškov.

Rezultati projektnih aktivnosti bodo služili kot smernice za pripravo strokovnih podlag in projektiranje ukrepov za utrditev podrobno analiziranih stavb ter kot izhodišča za utrditev drugih stavb, omogočili bodo tudi bolj informirano finančno načrtovanje prihodnjih investicij za izboljšanje potresne odpornosti stavb pri upravljanju stavbnega fonda.

Prispevek podrobneje opisuje metodologijo in rezultate prvega dela projekta, tj. ocenjevanja potresne ogroženosti obravnavanega stavbnega fonda. Poleg tega na izbranem primeru rezultatov analiz sodišča v Sevnici [Lutman, 2022a] predstavlja metodologijo podrobne analize, ki bo aplicirana na izbrane, potresno bolj ogrožene stavbe, tj. podroben terenski pregled obstoječe nosilne konstrukcije in laboratorijske preiskave ter potisno analizo za izračun potresne odpornosti stavbe v njenem obstoječem stanju in možnih utrjenih stanjih za oceno učinkovitosti in stroškov utrditvenih ukrepov.

2 OBRAVNAVANI STAVBNI FOND – OSNOVNE ZNAČILNOSTI IN LOKACIJE

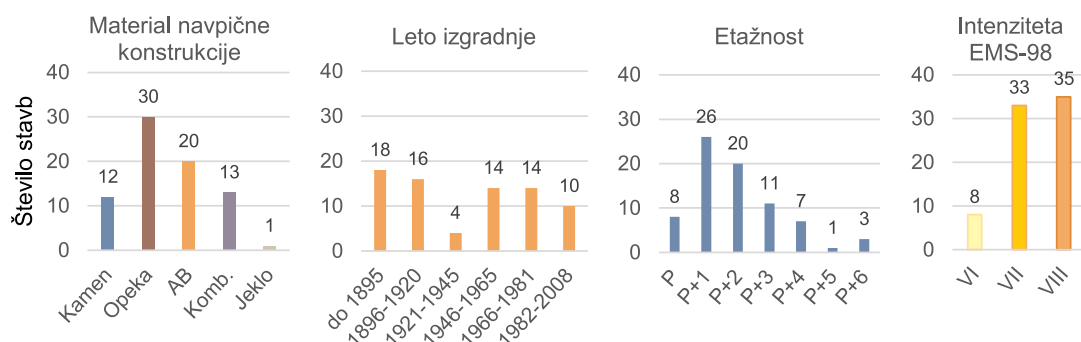
Za obravnavo je MP izbralo stavbe, ki so v celoti ali delno v uporabi sodišč ali drugih pravosodnih organov. Stavbe se razlikujejo po tipu navpične nosilne konstrukcije, številu nadstropij in starosti. Nahajajo se na 54 naslovih, pri čemer sta na 18 naslovih po dve ali več stavb s samostojno nosilno konstrukcijo, ki so

lahko tudi različno stare. Posledično je bilo v raziskavi skupno ocenjenih 76 stavb oziroma konstrukcijskih enot.

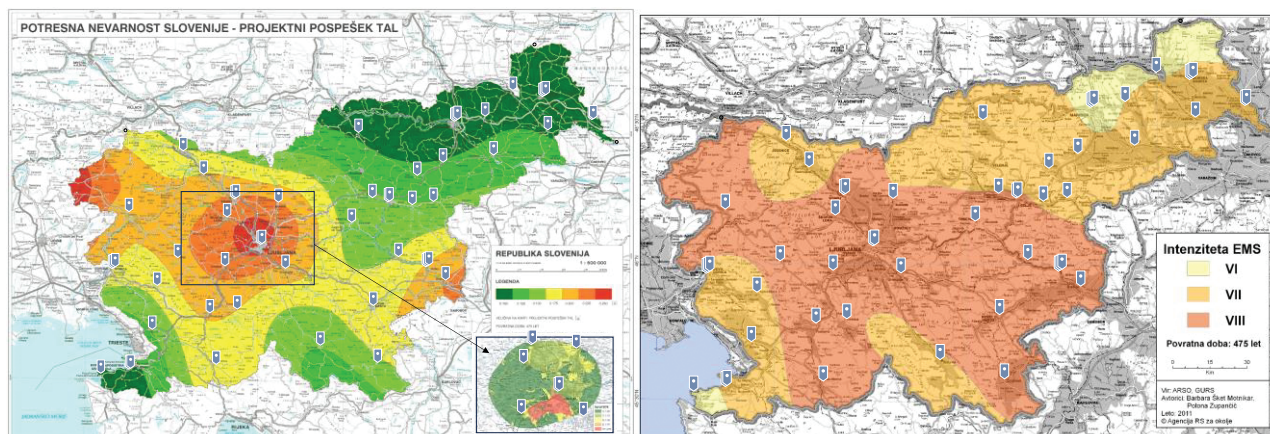
Dobra polovica stavb ima navpično nosilno konstrukcijo pretežno zidano, bodisi iz kamna (16 %) bodisi iz opeke (39 %) (slika 1). Nadalje je nosilna konstrukcija pri 26 % obravnavanih stavb armiranobetonska (AB), pri nadaljnjih 11 % stavb je navpična konstrukcija kombinacija zidov in armiranobetonskih stebrov oziroma sten, ena stavba pa ima navpično konstrukcijo jekleno. Polovica (50 %) stavb je bila zgrajena pred koncem druge svetovne vojne (SV) in sorazmerno enakomerna je zastopanost stavb iz posameznih obdobj po drugi SV (slika 1). Iz prvega povojnega obdobja, izpred uveljavitve prvih potresnih predpisov, so najstarejše AB-stavbe obravnavanih sodišč, te so praviloma brez ustreznih detajlov. V tem obdobju so bile nekatere stavbe izpred prve SV nadzidane z dodatnim nadstropjem, med njimi največji sodni poslopji v Ljubljani in Mariboru. Stavbe se medsebojno razlikujejo tudi po številu nadstropij: 11 % stavb je pritličnih, največja sta deleža eno- in dvonadstropnih stavb (34 % in 26 %), preostale so višje, najvišje imajo do šest nadstropij (slika 1).

Stavbe so razmeroma enakomerno razporejene po ozemlju Slovenije. Stojijo na območjih, kjer se vrednosti projektnega pospeška tal za 475-letno povratno dobo po novi Karti potresne nevarnosti [Šket Motnikar, 2021] gibljejo med 0,10 g in 0,30 g, medtem ko se po stari karti [Lapajne, 2001] gibljejo med 0,10 g in 0,25 g (slika 2, levo). Glede na to, da se je v Sloveniji uveljavila evropska potresna lestvica EMS-98 [Grünthal, 1998] ali krajše EMS, ki med drugim definira intenziteto potresa, je bila za uporabo v sistemu zaščite in reševanja izdelana Karta intenzitet za 475-letno povratno dobo [Šket Motnikar, 2011] (slika 2, desno). Intenziteta potresa po tej karti, ki je bila v predstavljenem delu podlaga za oceno poškodovanosti stavb v primeru potresa, se na lokacijah obravnavanih stavb giblje med VI in VIII (slika 1, desno).

Poleg tega je veliko obravnavanih stavb registriranih kot nepremična stavbna dediščina v Registru kulturne dediščine Slovenije (19 stavb), medtem ko jih dodatnih 19 stoji na zaščitenem območju mestnih središč ali arheološke dediščine. Čeprav slednje ne pomeni nujno omejitev, so te informacije pomembne za načrtovanje morebitnih prihodnjih in situ pregledov in preiskav ter, še pomembneje, za oblikovanje ukrepov za utrjevanje.



Slika 1. Osnovne značilnosti obravnavanega stavbnega fonda.



Slika 2. Karti potresne nevarnosti Slovenije za 475-letno povratno dobo za projektni pospešek tal (2001) z mikrorajonizacijo Ljubljane in okolice [Lapajne, 2001] (levo) in intenziteto potresa po EMS [Šket Motnikar, 2011] (desno).

3 METODOLOGIJA OCENJEVANJA

3.1 Ocena potresne odpornosti in ranljivosti

Osnovo za oceno potresne ogroženosti posamezne stavbe predstavlja ocena njene potresne odpornosti. Pri načrtovanju investicij v okviru upravljanja večjega števila stavb, tudi ukrepov za zmanjšanje potresne ogroženosti, se potresna odpornost ocenjuje s poenostavljenimi, a za namen dovolj zanesljivimi metodami za individualno ocenjevanje. V letu 2001 je bila na ZAG razvita metoda za ocenjevanje potresne odpornosti zidanih zgradb, tj. koeficienta SRC_u , imenovana PO-ZID [Lutman, 2001, 2014], ki temelji na optimalni izbiri vhodnih in izhodnih parametrov ter bazi podatkov in rezultatov do sedaj opravljenih računskih analiz. V banko podatkov je vključena večina zidanih stavb, ki so bile v predhodnih letih sistematično pregledane in računsko analizirane na ZAG. Zaradi specifičnosti armiranobetonskih konstrukcij je bila na ZAG v letu 2002 izdelana še metoda za ocenjevanje potresne odpornosti armiranobetonskih konstrukcij PO-AB [Lutman, 2002, 2013b]. Rezultati ocenjevanja potresne odpornosti po metodi PO-ZID za zidane stavbe so primerljivi z rezultati metode PO-AB za armiranobetonske (AB) konstrukcije.

Za oceno ranljivosti objektov oziroma oceno obsega pričakovanih poškodb je bila v letih 1994 do 1996 na IKPIR v sodelovanju z ZAG razvita metoda RAN-Z [Peruš, 1995]. Metodi PO-ZID in PO-AB, katerih rezultat je ocenjena vrednost reduciranega koeficienta potresne odpornosti SRC_{u-np} (s faktorjem povezanosti k_{np} [Tomažević, 1991] korigiran koeficient potresne odpornosti SRC_u), sta sicer bolj podrobni od metode RAN-Z, katere rezultat je številčna vrednost RAN-Z, a se je vrednost RAN-Z izkazala za primernejšo za nadaljnje ocenjevanje, tj. ocenjevanje potresne ogroženosti oziroma poškodovanosti. Zato se potresna ranljivost ocenjuje iz ocenjene vrednosti SRC_{u-np} in z uporabo korelacij med vrednostjo RAN-Z in vrednostjo SRC_{u-np} [Lutman, 2003]. Korelacije so bile ugotovljene na podlagi ocenjevanja 42 stavb, pri katerem sta bila za posamezno stavbo vrednosti SRC_{u-np} in RAN-Z ocenjeni neodvisno. Osnovni korelacije za zidane in AB-konstrukcije sta bili kasneje dopolnjeni za primere povezanih in armiranih zidanih konstrukcij in višjih

konstrukcij, katerih vrednosti osnovnih nihajnih časov so večje od 0,5 s. Vrednosti RAN-Z tako, v nasprotju z vrednostmi SRC_{u-np} , že zajemajo vpliv deformacijske kapacitete, odvisno od tipa konstrukcije.

Potresno odpornost in ranljivost je mogoče na opisani način oceniti za stavbe, za katere je na voljo ustrezna gradbenotehnična dokumentacija, iz katere je mogoče povzeti potrebne podatke.

3.2 Model POTROG in ocena potresne poškodovanosti

Model POTROG [Lutman, 2013b, 2014, 2024] je bil v osnovi razvit za podporo URSZR pri načrtovanju in izvedbi odziva in reševanja po potresu. Lahko se uporablja tudi za preliminarno ocenjevanje večjega števila stavb ali za informativno ocenjevanje posameznih stavb. Model je rezultat dolgoletnega raziskovalnega in strokovnega dela na področju potresnega inženirstva na ZAG ter multidisciplinarnega sodelovanja s partnerji (ARSO, Inštitut za varstvo in Oddelek za zaščito in reševanje Mestne občine Ljubljana).

Ocena potresne ogroženosti oziroma pričakovane poškodovanosti v modelu POTROG temelji na:

- potresni ranljivosti stavbe RAN-Z, ki temelji na podrobni analizi ali individualni oceni, če sta ti narejeni, ali pa jo model oceni s sledečimi osnovnimi parametri:
 - tipom konstrukcije (materialom navpične nosilne konstrukcije),
 - obdobjem izgradnje in
 - številom nadstropij, ter
- potresni nevarnosti na lokaciji stavbe, ki jo opredeljujeta:
 - intenziteta EMS na lokaciji stavbe po karti [Šket Motnikar, 2011] in
 - tip tal (lokalne značilnosti temeljnih tal).

Ocena potresne ranljivosti v modelu POTROG temelji na korelacijah med individualno ocenjeno potresno ranljivostjo RAN-Z in tremi osnovnimi parametri o stavbi. Korelacije so bile ugotovljene na vzorcu več kot 1000 obstoječih stavb v Sloveniji, ki sestavljajo bazo ZAG. To so predvsem stavbe, individual-

D0: ni poškodb	D1: zanemarljiva do majhna	D2: zmerna	D3: znatna do velika	D4: zelo velika	D5: uničenje
	ni poškodb konstrukcije, lažje nekonstrukcijske poškodbe	lažje konstrukcijske, zmerne nekonstrukcijske poškodbe	zmerne konstrukcijske, hude nekonstrukcijske poškodbe	hude konstrukcijske, zelo hude nekonstrukcijske poškodbe	zelo hude poškodbe konstrukcije
Zidane					
Armiranobetonske					
UPORABNE		ZAČASNO NEUPORABNE		NEUPORABNE	

Slika 3. Kategorije poškodovanosti od D0 do D5 po EMS (shematični prikaz in opis za zidane in armiranobetonske stavbe) ter uporabnost stavb po potresu [Grünthal, 1998].

no ocenjene v okviru dosedanjih projektov POTROG in drugih projektov, ki so jih financirali Mestna občina Ljubljana, Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport in druga ministrstva. Model je bil vzpostavljen za kamnite zidane stavbe, opečne zidane stavbe, AB-stavbe, stavbe s kombinacijo nosilnih zidov in AB-stebrov, jeklene stavbe in lesene stavbe. Z letom izgradnje se stavba uvrsti v enega od šestih časovnih obdobij (predstavljenih na sliki 1), ki so povezana s potresnimi predpisi, veljavnimi v času projektiranja oziroma gradnje, ali splošnimi zgodovinskimi mejniki. Prvo je obdobje pred letom 1896, ko je bil leto po ljubljanskem potresu sprejet Stavbinski red za občinsko ozemlje Deželnega stolnega mesta Ljubljane [Stavbinski red za občinsko ozemlje deželnega stolnega mesta Ljubljane, Deželni zakonik št. 28, XXI. kos, 1896], ki je, čeprav preprost, s svojimi pravili za gradnjo zidanih stavb pomembno prispeval k potresno odpornejši gradnji. Sledijo obdobji do prve SV oziroma druge SV (Obdobje 2: 1896–1920, Obdobje 3: 1921–1945) ter prvo obdobje po drugi SV. Slednje ima svoje posebnosti zaradi velikega obsega gradnje in pomanjkanja gradbenih materialov na eni strani ter odsotnosti potresnih predpisov na drugi strani (Obdobje 4: 1946–1965). Začetek novega obdobja (Obdobje 5: 1966–1981) sledi odredbi iz leta 1963 [Odredba o dimenzioniranju in izvedbi gradbenih objektov v potresnih območjih, 1963] in pravilniku iz leta 1964 [Pravilnik o začasnih tehničnih predpisih za gradnjo na seizmičnih področjih, 1964], ki sta znatno povečala potresne sile, na katere so bile projektirane konstrukcije stavb. Po močnejših potresih na Kozjanskem, v Furlaniji in Črni gori je bil leta 1981 sprejet posodobljen pravilnik [Ur. list SRFJ št. 31, 1981] (Obdobje 6: 1982–2008). Med stavbami, katerih individualne oziroma podrobne ocene potresne odpornosti predstavljajo osnovo za model POTROG, ni stavb, zgrajenih po letu 2008, ko je postala uporaba standardu Eurokod 8 [EN 1998-1:2005: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, 2005] pri projektiranju obvezna. Zato model ne omogoča ocene stavb iz tega zadnjega obdobja.

Potresna nevarnost na lokaciji posamezne stavbe na površju je opredeljena z vrednostjo s Karte intenzitete EMS [Šket Motnikar, 2011], ki velja na lokaciji stavbe, in vplivom tipa tal. Vpliv tipa tal na intenziteto potresa na površju je v modelu upoštevan kot sprememba intenzitete: -0,5 za tip tal A, +0,5 za tip tal E in +1,0 za tip tal S1, za tipe tal B, C in D se intenziteta ne spremeni.

Potresna ogroženost posamezne stavbe je v modelu POTROG izražena s poškodovanostjo, ki se na podani stavbi pričakuje ob potresu podane intenzitete. Glede na to, da lestvica EMS stavbe glede na njihovo ranljivost razvršča v ranljivostne razrede z oznakami od A do F, poškodovanost stavb pa opiše s petstopenjsko lestvico (slika 3), so bile v okviru projektov POTROG [Lutman, 2013b] za posamezne ranljivostne razrede lestvice EMS postavljene mejne vrednosti RAN-Z. Lestvica EMS namreč definira tudi intenziteto potresa, in sicer z obsegom poškodovanih stavb posameznih ranljivostnih razredov [Grünthal, 1998; Lutman, 2013b]. Poškodovanost obravnavane stavbe model POTROG izrazi z nizom šestih vrednosti: z verjetnostjo, da bo stavba pri potresu podane intenzitete nepoškodovana, z verjetnostjo, da bo utrpela poškodovanost kategorije 1 po EMS, /.../ in z verjetnostjo, da bo utrpela poškodovanost kategorije 5 po EMS [Lutman, 2013b]. Vsota navedenih šestih vrednosti je 1 oziroma 100 %.

Model POTROG je bil vzpostavljen in za zdaj velja le za območja z najvišjima dvema vrednostma projektnega pospeška tal po karti iz leta 2001 [Lapajne, 2001], tj. 0,225 g in 0,25 g oziroma za stavbe na teh območjih. Za ta območja (v nadaljevanju območja POTROG) so bile v prvem od projektov POTROG izdelane karte mikrorajonizacije (slika 2, spodnji desni kot). Omejitev veljavnosti modela izhaja iz dejstva, da stavbe iz baze ZAG, ki predstavljajo osnovo za ugotovljene zakonitosti modela, stojijo izključno na teh območjih. Omejitev uporabe modela je brezpogojna za stavbe, ki so bile projektirane po uveljavitvi prvih potresnih predpisov, in če je po karti potresne nevarnosti, veljavni v času projektiranja stavbe, potresna nevarnost na lokaciji stavbe manjša kot na območjih POTROG. Take stavbe so bile namreč projektirane na nižje potresne sile kot stavbe na območjih veljavnosti modela POTROG. Zato bi bila njihova potresna odpornost po modelu praviloma precejšnja, potresna ogroženost pa podcenjena. Če pa je na karti potresne nevarnosti iz časa projektiranja potresna nevarnost na lokaciji stavbe enaka kot na območjih POTROG, se model lahko uporablja.

Izjema pri omejitvi so lahko tudi stavbe, ki so bile projektiranje pred uveljavitvijo prvih potresnih predpisov. Ob predpostavki, da vpliv geografske lege stavbe na njeno potresno odpornost ni večji od vpliva preostalih dejavnikov, ki v modelu niso zajeti, je model za te stavbe pogojno veljaven.

3.3 Razvrščanje stavb

Za razvrščanje stavb glede na njihovo potresno ogroženost sta primerna dva parametra:

- razmerje med ocenjeno vrednostjo reduciranega koeficienta potresne odpornosti SRC_{u-np} in vrednostjo BSC_d , tj. vrednostjo koeficienta strižne obtežbe, določene na osnovi parametrov potresne obtežbe po standardu Evrokod 8 [Lutman, 2013b], in
- kumulativna verjetnost za poškodovanost kategorij 3, 4 in 5 po EMS, ki je vsota verjetnosti za poškodovanost 3, 4 in 5 (KVP), ocenjenih z modelom POTROG.

Potresno bolj ogrožene so stavbe z nižjo vrednostjo prvega in višjo vrednostjo drugega parametra.

Prvi parameter je le okvirni pokazatelj doseganja zahtevane potresne odpornosti po Evrokod 8. Pri oceni potresne odpornosti se namreč praviloma upoštevajo karakteristične in ne projektne trdnosti vgrajenih materialov, torej karakteristične trdnosti brez redukcije s faktorjem zaupanja, ki je lahko zelo različnih vrednosti, odvisno od nivoja poznavanja konstrukcije oziroma obsega detaljnega pregleda in testiranja vgrajenih materialov. Ocenjuje se torej mejni koeficient SRC_{u-np} in ne projektni koeficient SRC_d . Vrednost SRC_d bi bila nekoliko nižja od vrednosti SRC_{u-np} , doseganje projektnega koeficienta strižne obtežbe BSC_d in s tem zahtev EC8 pa tudi nekoliko nižje, kot kaže razmerje SRC_{u-np}/BSC_d .

Drugi parameter je bil kot primeren pokazatelj potresne ogroženosti prvič uporabljen v strokovnih podlagah za DSEPS [Lutman, 2020a; DSEPS, Dolgoročna strategija energetske prenove stavb do leta 2050, 2021].

4 OCENE OBRAVNAVANIH STAVB IN RAZVRSTITEV GLEDE NA POTRESNO OGROŽENOST

4.1 Tehnična dokumentacija in vizualni pregledi

V prvi fazi projekta je bilo iz razpoložljivega gradiva pokrajinskih in lokalnih arhivov, arhivov upravnih enot in arhivov sodišč ter arhiva MP izbranih ter digitaliziranih približno 4000 dokumentov oziroma načrtov (slika 4). Za vse digitalizirane dokumente je bila pregledana njegova vsebina, dokumenti z

iskano vsebino pa so bili pregledani podrobneje. Pridobljena dokumentacija je bila za 70 od skupno 76 obravnavanih stavb zadostna podlaga za individualno ocenjevanje. To pomeni, da je vsebovala načrte in izračune, iz katerih je bilo mogoče povzeti podatke o dimenzijah in sestavi konstrukcije, vrsti in mehanskih lastnostih vgrajenih gradiv, pri AB-konstrukcijah tudi armaturne načrte ali ustrezne zapise v statičnem računu glede količin armature in vrste armaturnega jekla.

V drugi fazi so se z vizualnimi pregledi stavb ugotavljale skladnost dejanskega stanja s pregledano dokumentacijo in morebitne poškodbe na vidnih delih konstrukcije. Morebitna neskladja in naknadni posegi, npr. dodatni preboji za vratne odprtine, so bili pri oceni upoštevani v največji možni meri. Podatki iz pridobljene dokumentacije in vizualni pregledi so služili tudi za oceno treh osnovnih parametrov o stavbi, ki so na voljo v Katastru nepremičnin [MNVP, GURS]. S tem se sistematično ugotavlja ustreznost podatkov v Katastru nepremičnin, predlagajo popravki in s tem omogoča večja zanesljivost modelnih ocen. Te so namreč strokovna podlaga sistema POTROG za vse stavbe, za katere v sistemu ni na voljo individualnih ali podrobnih ocen potresne ogroženosti.

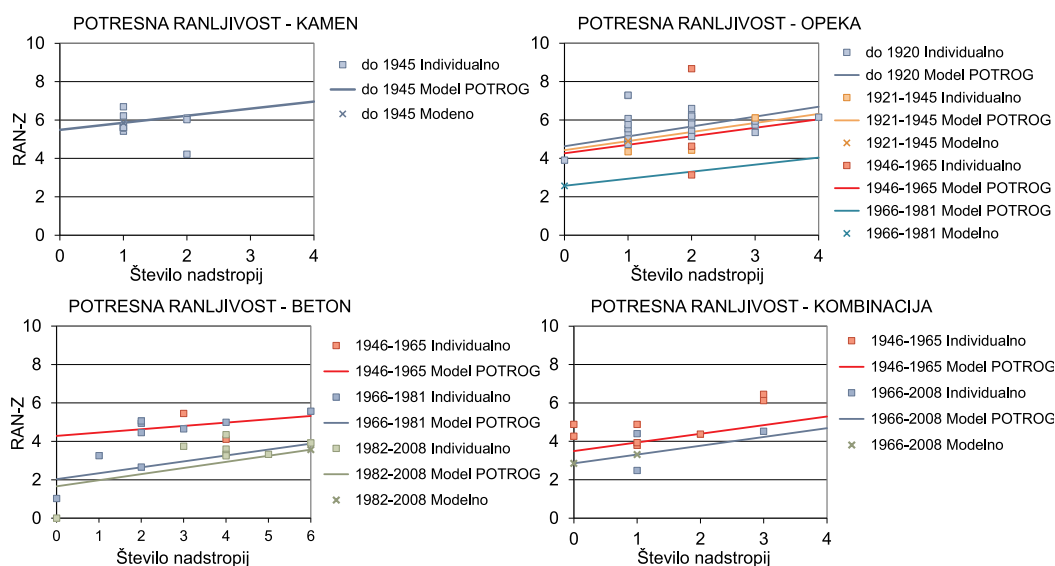
4.2 Ocene potresne ranljivosti

Ocene potresne odpornosti in potresne ranljivosti so bile izdelane oziroma pridobljene na treh nivojih natančnosti (podrobno, individualno in modelno). Za pet od 70 stavb z zadostno dokumentacijo za individualno ocenjevanje so bile podrobne potresne analize izdelane že v okviru predhodnih projektov in od tam pridobljene vrednosti reduciranega koeficienta potresne odpornosti SRC_{u-np} . V projektu je zato bilo individualno ocenjenih 65 stavb. Preostalih šest stavb je bilo ocenjenih z modelom POTROG. Pri tem so modelne ocene za tri stavbe (eno z AB-konstrukcijo in dve s kombinirano konstrukcijo) zaradi omejitve modela neustrezne.

Na sliki 5 so prikazane ocenjene vrednosti RAN-Z za vse obravnavane stavbe glede na material navpične konstrukcije razdeljene v štiri diagrame. V posameznem diagramu so prikazane tudi korelacije med potresno ranljivostjo in številom nadstropij [Lutman, 2013b]. Praviloma ima vsako od šestih izbranih obdobj svoj korelacijski koeficient, v nekaterih primerih je skupna korelacija za dve ali več obdobj. Za individualno ocenjene in predhodno podrobno analizirane stavbe so vrednosti RAN-Z na sliki 5 prikazane z markerji kvadratne oblike, za modelno ocenjene stavbe pa s križci, pri čemer so križci seveda na ustrezni korelacijski premici.



Slika 4. Razpoložljiva in pregledana tehnična dokumentacija.



Slika 5. Ocene potresne ranljivosti za posamezne obravnavane stavbe, ločeno za štiri tipe nosilne konstrukcije: Kamnita zidana (zgoraj levo), Opečna zidana (zgoraj desno), Armiranobetonska (spodaj levo) in Kombinacija nosilnih zidov in AB-stebrov (spodaj desno); ter primerjava s korelacijami modela POTROG za posamezna obdobja izgradnje.

Grafični prikaz individualnih ocen skupaj z modelnimi oziroma korelacijami pokaže raznolikost stavb, ki imajo isto kombinacijo treh parametrov iz REN, in tako dopolnjuje navedbe vzrokov za odstopanja posamezne stavbe v eno in drugo smer ter prikaže napake, ki jo na ravni posamezne stavbe prinaša uporaba modela POTROG.

Pri primerjavi individualnih ocen s pripadajočo korelacijo je med drugim treba upoštevati lokacijo stavbe in leto izgradnje. Ocene stavb, ki so glede na omejitve modela veljavne ali pogojno veljavne (točka 3.2), so praviloma enakomerno razvrščene nad in pod pripadajočo korelacijo. Individualno oceno take stavbe lahko primerjamo z vrednostjo na korelaciji, ki je za to stavbo modelna ocena, morebitno odstopanje individualne vrednosti RAN-Z od modelne pa je posledica razlik med značilnostmi stavbe in njene konstrukcije ter povprečnimi značilnostmi ustrezne skupine stavb v bazi ZAG.

Model POTROG je veljaven oziroma pogojno uporaben za vse obravnavane kamnite in opečne stavbe. Med kamnitimi (slika 5, zgoraj levo) izstopa stavba, katere individualna ocena $RAN-Z=4,22$ je izraziteje manjša od modelne vrednosti 6,23. To je posledica dejstva, da so bili v stavbi nosilni zidovi sistematično injektirani in zanje zato pri individualni oceni upoštevane izboljšane mehanske lastnosti. Pri opečnih stavbah (slika 5, zgoraj desno) je razlika v količini zidov v eni in drugi smeri zelo pogost vzrok za visoko potresno ranljivost. Med enonadstropnimi stavbami iz obdobja do leta 1920 je ta vzrok prisoten pri najranljivejši stavbi ($RAN-Z=7,29$). Najranljivejša med vsemi opečnimi ($RAN-Z=8,67$) je dvonadstropna stavba iz obdobja 1946-1965, ki v kritični etaži praktično nima prečnih nosilnih zidov. Po drugi strani je v isti skupini (opečna, P + 2, isto obdobje) najmanj ranljiva ustrezno zasnovana stavba, ki ima $RAN-Z=3,14$.

Pri armiranobetonskih stavbah, ki jih je skupno 20, je model POTROG veljaven za le tri stavbe, pogojno uporaben pa za dodatno eno stavbo. Za preostale stavbe model ni veljaven, saj so bile zgrajene po uvedbi prvih potresnih predpisov, stojijo na območjih nižje potresne nevarnosti, so bile temu ustrezno

projektirane in so zato pričakovano bolj ranljive kot stavbe na območjih POTROG. Potresna ogroženost po obstoječem modelu POTROG zanje ne bi bila ustrezna oziroma bi bila podcenjena. Pri AB-stavbah so med vzroki za visoko potresno ranljivost nizke trdnosti betona in velike vitkosti stebrov, pogosto različne v eni in drugi smeri, zaradi česar stebri nimajo ustrezne upogibne nosilnosti.

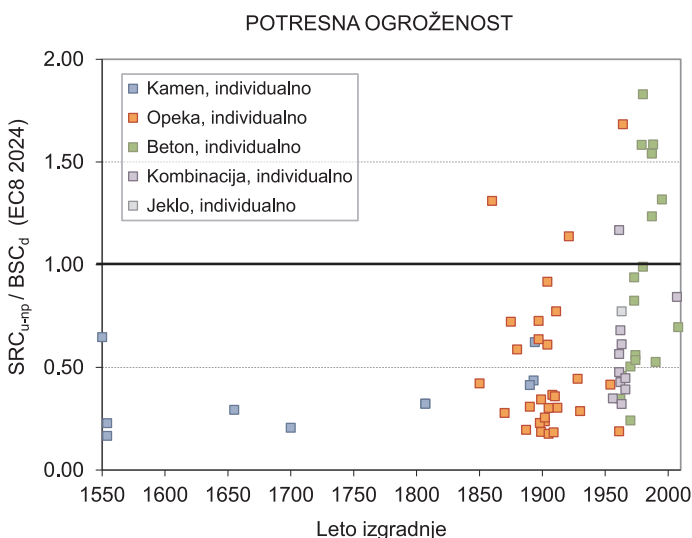
Pri stavbah s kombinirano konstrukcijo, ki jih je od obravnavanih skupno 13, je model POTROG veljaven za štiri stavbe, pogojno uporaben pa za dodatnih sedem. Kljub temu je potrebna ranljivost večine od teh enajstih stavb večja od potresne ranljivosti po modelu POTROG. Med vzroki za njihovo visoko potresno ranljivost so kasneje dodana sorazmerno velika teža v stavbi, vzroki, navedeni pri AB-stavbah, in neustrezna kombinacija nosilnih zidov in AB-stebrov.

4.3 Ocene potresne ogroženosti in razvrstitev

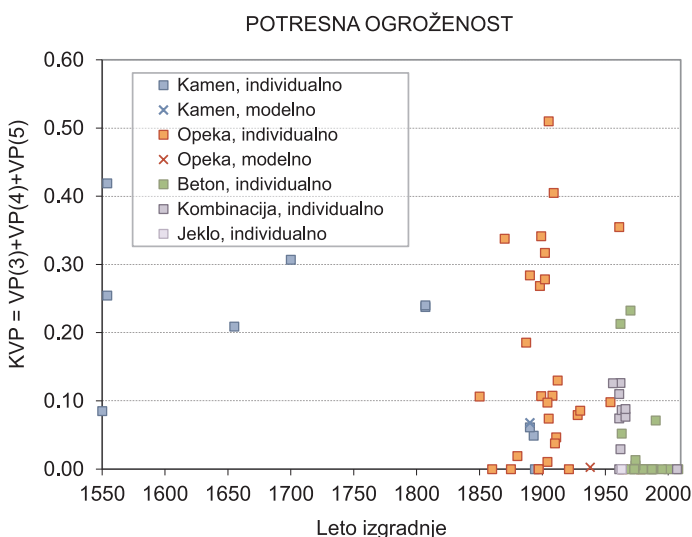
Ocena potresne ogroženosti posamezne stavbe po modelu POTROG temelji na oceni potresne ranljivosti in oceni potresne nevarnosti na lokaciji stavbe. Kot rečeno, je bila za 65 stavb upoštevana vrednost RAN-Z, določena na podlagi individualne ocene, za pet stavb vrednost RAN-Z na podlagi predhodne podrobne analize, za tri stavbe pa modelna ocena RAN-Z. Tri stavbe so zaradi odsotnosti dokumentacije in neprimernosti uporabe modela POTROG ostale neocenjene.

Pri oceni potresne nevarnosti je bil upoštevan tip tal, ki je bil za enajst stavb ocenjen na podlagi geoloških raziskav ali geomorfološkega pregleda, za nadaljnjih 13 stavb je bil tip tal povzet iz kart mikrorajonizacije, izdelanih v projektu POTROG, za preostalih 49 stavb pa je bilo za oceno poškodovanosti po modelu POTROG predpostavljeno, da so tla pod stavbo tipa B, C ali D, pri katerih je intenziteta na površju enaka intenziteti po karti (slika 2, desno), za določitev predpisane potresne obtežbe po EC8 pa je bil upoštevan tip tal C.

Na slikah 6 in 7 so prikazani rezultati, na sliki 6 izraženi z razmerjem SRC_{u-np}/BSC_d (potresna ogroženost je obratno sorazmerna z razmerjem SRC_{u-np}/BSC_d), na sliki 7 pa s kumulativno verjetnostjo poškodovanosti KVP (potresna ogroženost je sorazmerna s KVP).



Slika 6. Ocene potresne ogroženosti individualno ocenjenih stavb, izražene z razmerjem SRC_{u-np}/BSC_d , v odvisnosti od leta izgradnje.



Slika 7. Ocene potresne ogroženosti individualno in modelno ocenjenih stavb, izražene s kumulativno verjetnostjo poškodovanosti (KVP), v odvisnosti od leta izgradnje.

Po obeh razvrstitvah je potresno najbolj ogroženih istih pet stavb. Vse imajo navpično konstrukcijo zidano, ena kamnito, preostale opečno. Pri vseh je značilna sorazmerno visoka teža stavbe in sorazmerno majhna količina zidov v šibkejši tlorsni smeri. To je hkrati pet stavb, ki imajo med ocenjenimi najvišjo potresno ranljivost (slika 5). Ker pa je potresna nevarnost na lokacijah teh stavb različna, je vrstni red znotraj teh petih stavb

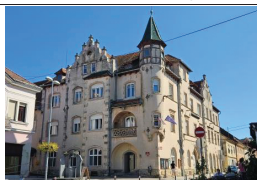
glede na potresno ogroženost (po eni in drugi razvrstitvi) drugačen kot glede na potresno ranljivost.

Najbolj ogroženi AB-stavbi sta po prvem kriteriju na 11. in 23. mestu, po drugem kriteriju pa na 15. oziroma 16. mestu. Obe sta med AB-stavbami tudi potresno najbolj ranljivi.

V preglednicah 1–4 so predstavljene potresno najbolj ogrožene stavbe posameznih tipov, tj. glede na vrsto materiala navpične nosilne konstrukcije. V preglednicah so prikazani osnovni parametri stavbe in rezultati individualnega ocenjevanja: ocena potresne odpornosti oziroma razmerje SRC_{u-np}/BSC_d in ocena

Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal	Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal																								
VR1-2, Vrhnika, Intenziteta: VIII, Tip tal: D	TO1, Tolmin, Intenziteta: VIII, Tip tal: D																								
																									
Navpična NK: Kamnito zidovje Leto izgradnje: 1554 Etažnost: P + 1 $SRC_{u-np}/BSC_d = 17 \%$	Navpična NK: Kamnito zidovje Leto izgradnje: 1700 Etažnost: P + 2 + M $SRC_{u-np}/BSC_d = 21 \%$																								
<table><tr><th>D0</th><th>D1</th><th>D2</th><th>D3</th><th>D4</th><th>D5</th></tr><tr><td>0%</td><td>24%</td><td>34%</td><td>30%</td><td>12%</td><td>0%</td></tr></table>	D0	D1	D2	D3	D4	D5	0%	24%	34%	30%	12%	0%	<table><tr><th>D0</th><th>D1</th><th>D2</th><th>D3</th><th>D4</th><th>D5</th></tr><tr><td>6%</td><td>31%</td><td>33%</td><td>24%</td><td>7%</td><td>0%</td></tr></table>	D0	D1	D2	D3	D4	D5	6%	31%	33%	24%	7%	0%
D0	D1	D2	D3	D4	D5																				
0%	24%	34%	30%	12%	0%																				
D0	D1	D2	D3	D4	D5																				
6%	31%	33%	24%	7%	0%																				

Preglednica 1. Osnovni podatki o stavbah in rezultati – razmerje SRC_{u-np}/BSC_d in niz verjetnosti za posamezne kategorije poškodovanosti po EMS (D0–D5) za dve potresno najbolj ogroženi kamniti zidani stavbi sodišč.

Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal	Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal																								
PO1, Postojna, Intenziteta: VIII, Tip tal: -	BR1, Brežice, Intenziteta: VIII, Tip tal: C																								
																									
Navpična NK: Opečno zidovje Leto izgradnje: 1905 Etažnost: K + P + 1(+ M) SRC _{u-np} /BSC _d = 18 %	Navpična NK: Opečno zidovje Leto izgradnje: 1909 Etažnost: K + P + 2 SRC _{u-np} /BSC _d = 18 %																								
<table><tr><td>D0</td><td>D1</td><td>D2</td><td>D3</td><td>D4</td><td>D5</td></tr><tr><td>0%</td><td>17%</td><td>32%</td><td>33%</td><td>15%</td><td>3%</td></tr></table>	D0	D1	D2	D3	D4	D5	0%	17%	32%	33%	15%	3%	<table><tr><td>D0</td><td>D1</td><td>D2</td><td>D3</td><td>D4</td><td>D5</td></tr><tr><td>0%</td><td>25%</td><td>34%</td><td>29%</td><td>11%</td><td>0%</td></tr></table>	D0	D1	D2	D3	D4	D5	0%	25%	34%	29%	11%	0%
D0	D1	D2	D3	D4	D5																				
0%	17%	32%	33%	15%	3%																				
D0	D1	D2	D3	D4	D5																				
0%	25%	34%	29%	11%	0%																				
SK1, Slovenske Konjice, Intenziteta: VII, Tip tal: -	NM1-2, Novo mesto, Intenziteta: VIII, Tip tal: A																								
																									
Navpična NK: Opečno zidovje Leto izgradnje: 1961 Etažnost: P + 2 SRC _{u-np} /BSC _d = 19 %	Navpična NK: Opečno zidovje Leto izgradnje: 1899 Etažnost: (K+P)+1(+M) SRC _{u-np} /BSC _d = 18 %																								
<table><tr><td>D0</td><td>D1</td><td>D2</td><td>D3</td><td>D4</td><td>D5</td></tr><tr><td>0%</td><td>29%</td><td>36%</td><td>26%</td><td>9%</td><td>0%</td></tr></table>	D0	D1	D2	D3	D4	D5	0%	29%	36%	26%	9%	0%	<table><tr><td>D0</td><td>D1</td><td>D2</td><td>D3</td><td>D4</td><td>D5</td></tr><tr><td>6%</td><td>25%</td><td>34%</td><td>25%</td><td>8%</td><td>1%</td></tr></table>	D0	D1	D2	D3	D4	D5	6%	25%	34%	25%	8%	1%
D0	D1	D2	D3	D4	D5																				
0%	29%	36%	26%	9%	0%																				
D0	D1	D2	D3	D4	D5																				
6%	25%	34%	25%	8%	1%																				

Preglednica 2. Osnovni podatki o stavbah in rezultati – razmerje SRC_{u-np}/BSC_d in niz verjetnosti za posamezne kategorije poškodovanosti po EMS za štiri potresno najbolj ogrožene opečne zidane stavbe sodišč.

potresne ogroženosti oziroma pričakovane poškodovanosti po modelu POTROG: za vsako posamezno kategorijo poškodovanosti po EMS [Grünthal, 1998] (slika 3) je navedena verjetnost, da jo bo ta stavba utrpela, če bo izpostavljena potresu z intenziteteto, ki se po karti potresnih intenzitet (slika 2, desno) in upoštevanim tipom tal pričakuje na lokaciji stavbe v 475-letni povratni dobi.

Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal						Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal					
LJ2, Ljubljana, Intenziteta VIII, Tip tal: C						CE1-1, Celje, Intenziteta VIII, Tip tal: -					
											
Navpična NK: AB-stebri Leto izgradnje: 1970 Etažnost: 2K + P + 5 (+ 6) SRC _{u-np} /BSC _d = 24 %						Navpična NK: AB-stebri Leto izgradnje: 1962 Etažnost: K + P + 2 (+ 3) + M SRC _{u-np} /BSC _d = 35 %					
D0	D1	D2	D3	D4	D5	D0	D1	D2	D3	D4	D5
12%	34%	31%	19%	4%	0%	14%	34%	31%	18%	3%	0%

Preglednica 3. Osnovni podatki o stavbah in rezultati – razmerje SRC_{u-np}/BSC_d in niz verjetnosti za posamezne kategorije poškodovanosti po EMS za dve potresno najbolj ogroženi armiranobetonski (AB) stavbi sodišč.

Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal						Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal					
KK2, Krško, Intenziteta VIII, Tip tal: -						KR1-1, Nova Gorica, Intenziteta VII, Tip tal: C					
											
Navpična NK: Opečni zidovi in AB-stebri Leto izgradnje: 1956 Etažnost: (K+) P + 1 + M SRC _{u-np} /BSC _d = 35 %						Navpična NK: AB-stebri in opečni zidovi Leto izgradnje: 1963 Etažnost: K + P + 3 SRC _{u-np} /BSC _d = 32 %					
D0	D1	D2	D3	D4	D5	D0	D1	D2	D3	D4	D5
23%	37%	28%	12%	0%	0%	33%	33%	24%	9%	0%	0%

Preglednica 4. Osnovni podatki o stavbah in rezultati – razmerje SRC_{u-np}/BSC_d in niz verjetnosti za posamezne kategorije poškodovanosti po EMS za dve stavbi sodišč, ki sta med potresno najbolj ogroženimi stavbami s kombinirano konstrukcijo.

5 PRIMER PODROBNE POTRESNE ANALIZE STAVBE SODIŠČA (ZA OBSTOJEČE STANJE IN ZA RAZLIČNE NIVOJE UTRDITEV)

V nadaljevanju projekta bo osem stavb izmed vseh obravnavanih podrobno analiziranih. Med izbranimi stavbami bodo stavbe z različnimi tipi navpične nosilne konstrukcije, med njimi pa praviloma potresno najbolj ogrožene. Zanje bodo opravljene podrobni pregledi nosilne konstrukcije in preiskave vgrajenih materialov, potisne analize potresne odpornosti v obstoječem stanju, študije možnih različic protipotresne utrditve, potisne analize potresne odpornosti v utrjenem stanju ter

ocene stroškov. Vsebinska podrobna obravnava je v nadaljevanju predstavljena na primeru sodišča v Sevnici.

Poslopje sodišča v Sevnici, ki verjetno izvira iz 18. stoletja in je bilo prvič dokumentirano leta 1807, sestavljata dve stavbi. V preteklosti sta bili dograjeni in prenovljeni, zlasti po požaru leta 1854. Glavna stavba ima tloris v obliki črke L, večji južni del meri približno 14,8 x 13,8 m, manjši severovzhodni del pa približno 6,6 x 7,0 m. Zadnja stavba je v tlorisu pravokotne oblike in meri približno 8,9 x 22,9 m. Jugoahodni del glavne stavbe je podkleten, nad pritličjem pa imata obe stavbi eno nadstropje in neizkoriščeno podstrešje. Višine etaž so različne; klet je visoka približno 2,6 m, pritličje v glavni stavbi 3,5 m v južnem delu in 3,3 m v severovzhodnem delu, pritličje v zadnji stavbi 2,8 m, nadstropje pa je visoko od 3,1 do 3,4 m. Glavno stavbo pokriva dve, zadnjo stavbo pa ena dvokapna streha.

5.1 Podroben in situ pregled in preiskave

Za oceno lastnosti nosilne konstrukcije in mehanskih lastnosti vanjo vgrajenih materialov je bil na obeh stavbah izveden detajlni pregled z odvzemom vzorcev gradiv, ki so bili nato laboratorijsko preiskani [Lutman, 2022b]. Program pregleda je za pritličje predstavljen na sliki 8, levo. Pregled in preiskave so bili izvedeni v skladu z evropskim standardom Evrokod 8-3 (SIST EN 1998-3:2005 Evrokod 8: Projektiranje konstrukcij za potrebno odpornost – 3. del: Ocenjevanje in prenova stavb).

Vizualni pregled poškodb (slika 8a, b) ter detajlni pregled z odstranitvijo ometa in oblog (slika 8c-i) sta bila izvedena, da bi določili vrsto, geometrijo in površinsko strukturo vseh elementov konstrukcije ter zaznali poškodbe. Da bi ocenili sestavo in mehanske lastnosti nosilnega zidovja po celotnem prečnem prerezu, so bila izvedena globinska sondiranja (slika 8e, f), pregledana je bila struktura odvzetih jeder, odvzeti vzorci malte (slika 8i) in opeke pa so bili laboratorijsko preiskani (slika 8j).

Nosilni zidovi, od katerih so nekateri kamniti, drugi mešano kamnito-opečni, tretji pa pretežno ali v celoti opečni, stojijo na kamnitih zidanih pasovnih temeljih. Debelina zidov se spreminja glede na višino in tloris, in sicer znaša 65–85 cm v kleti, 45–95 cm v pritličju in 35–55 cm v nadstropju. Stropne konstrukcije so banjasti oboki nad kletjo, različni tipi obokov ali ravni (večinoma leseni) stropovi nad pritličjem in pretežno leseni stropovi nad prvim nadstropjem.

5.2 Potisne analize stavbe (obstoječe in utrjeno stanje)

Z upoštevanjem rezultatov pregleda in preiskav ter uporabo etažnega modela so bile izvedene potisne analize [Tomažević, 2009], ločeno za glavno in zadnjo stavbo. Analizirana so bila naslednja stanja:

- Obstoječe stanje:** obstoječe stanje kamnitih in opečnih nosilnih zidov, zidovi so brez vodoravnih zidnih vezi, stropne konstrukcije so pomanjkljivo povezane z nosilnimi zidovi.
- Povezana nosilna konstrukcija:** nosilni zidovi so povezani z vodoravnimi zidnimi vezmi (ukrep), stropne konstrukcije so s sidri povezane z nosilnimi zidovi (ukrep).



Slika 8. Tloris pritličja glavne in zadnje stavbe sodišča v Sevnici z lokacijami preglednih mest (levo), pregled poškodb (a, b), pregled stropa in strehe (c, d), globinsko sondiranje v kamnitem zidovju (e, f), površinsko sondiranje (g, h), odvzeti kosi malte (i) in laboratorijski preskus vzorca malte (j).

- C. Delno utrjeni nosilni zidovi in povezana nosilna konstrukcija: kamniti nosilni zidovi so sistematično injektirani (ukrep) in vsi ukrepi v stanju B.
- D. Utrjeni vsi nosilni zidovi in povezana nosilna konstrukcija: opečni nosilni zidovi so utrjeni z armiranimi oblogami (ukrep), kamniti nosilni zidovi so utrjeni s sistematičnim injektiranjem in armiranimi oblogami (ukrep) in vsi ukrepi v stanju B.

Upoštevane mehanske lastnosti nosilnega zidovja v obstoječem stanju temeljijo na rezultatih tlačnih preskusov vzorcev iz opečnih zidakov in vzorcev malte ter na in situ in laboratorijskih preiskavah zidov, zgrajenih iz materialov podobnih kakovosti, ki so bili v preteklosti izvedeni na ZAG; za opečno oziroma kamnito/mešano zidovje so bile v analizah predpostavljene naslednje lastnosti: karakteristična tlačna trdnost 2,0 MPa oziroma 1,0 MPa, karakteristična natezna trdnost 0,09 MPa oziroma 0,10 MPa, modul elastičnosti 2000 MPa oziroma 2700 MPa, strižni modul 200 MPa ter prostorninska teža 18 kN/m³ oziroma 22 kN/m³. Za kamnito zidovje, utrjeno s sistematičnim injektiranjem, so bile predpostavljene vrednosti karakterističnih tlačne in natezne trdnosti ter elastičnega in strižnega modula enake 1,8 MPa; 0,18 MPa; 3000 MPa in 300 MPa. V analizah so bile upoštevane projektne trdnosti zidovja, tj. s faktorjem zaupanja CF = 1,2 reducirane karakteristične vrednosti. Armirane obloge se vgradijo na obeh straneh zidov,

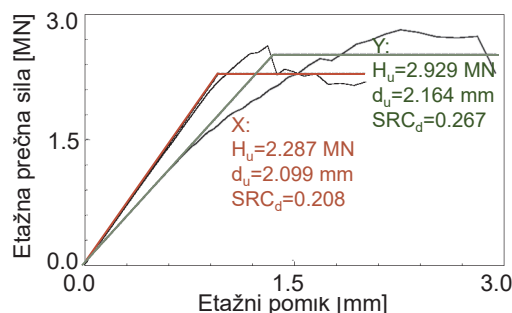
posamezna obloga je sestavljena iz armaturne mreže Q189, vgrajene v 2,5 cm debelo plast brizganega cementnega ometa, prečno skozi zid pa sta mreži na vsaki strani zidu medsebojno povezani s stremeni 6 Φ6 mm/m².

Pri potisni analizi je bil upoštevan etažni porušni mehanizem, povezanost nosilne konstrukcije in dejanske stalne navpične obtežbe, koristne navpične obtežbe in kombinacije obtežb pa so bile predpostavljene v skladu s standardi Evrokod. Dobljene potisne krivulje so bile idealizirane, upoštevajoč pogoj enakosti energij (krivulje so za glavno stavbo, za stanje povezane konstrukcije (B) prikazane na sliki 9, levo), potresna odpornost stavbe v različnih stanjih pa je bila ovrednotena s projektnim koeficientom potresne odpornosti SRC_d, ki je bil primerjen z zahtevano potresno odpornostjo v obliki projektnega koeficienta strižne obtežbe BSC_d, ki je določen z upoštevanjem potresnih spektrov po EC8 in projektnih pospeškov na stari [Lapajne, 2001] in novi [Šket Motnikar, 2021] karti potresne nevarnosti Slovenije (z oznakama Karta PN 2002 in Karta PN 2022 na sliki 9, desno). V preglednici na sliki 9, desno, so poleg SRC_d in BSC_d predstavljeni tudi z idealizacijo dobljeni mejni pomik μ in z njim izračunani faktor obnašanja q . Ocena potresne odpornosti za stanje A je bila pridobljena s korekcijo rezultatov za stanje B s faktorjem povezanosti k_{np} [Tomažević, 1991].

5.3 Učinkovitost utrditvenih ukrepov in ocene stroškov

Za glavno stavbo je v vseh stanjih kritična vzdolžna (X) smer potresne obtežbe. Iz preglednice na sliki 9 je razvidna učinkovitost posameznih nivojev utrditve (v stanjih B, C oziroma D glede na obstoječe stanje A), in sicer s primerjavo vrednosti razmerja med SRC_d in BSC_d za utrjeno stanje (B, C oziroma D) z vrednostjo SRC_d/BSC_d za obstoječe stanje (A). V preglednici so predstavljeni tudi stroški, ocenjeni za ukrepe, ki so upoštevani za določeno stanje.

Medtem ko bi se potresna odpornost stavbe bistveno izboljšala že s povezovanjem konstrukcije, je potresna odpornost, ki ustreza sedanjim potresnim zahtevam, dosežena le z utrditvijo vseh nosilnih zidov v stavbi – kamnitih s sistematičnim injektiranjem in z armiranimi oblogami ter opečnih z armiranimi oblogami (stanje D).



Stanje konstrukcije	A	B	C	D
SRC _d	0,146	0,208	0,224	0,359
d _u [mm]	/	2,099	2,763	2,531
q	1,5	1,788	2,127	2,015
Karta PN 2022 [Šket Motnikar, 2021]				
BSC _d	0,450	0,377	0,317	0,335
SRC _d /BSC _d	32%	55%	71%	107%
Karta PN 2002 [Lapajne, 2001]				
BSC _d	0,350	0,294	0,247	0,260
SRC _d /BSC _d	42%	71%	91%	138%
Ocena stroškov [€]		98,5k	120,7k	170,4k

Slika 9. Potisni in idealizirani krivulji za vzdolžno (X) in prečno (Y) smer potresne obremenitve za povezano stanje nosilne konstrukcije (varianta B) (levo); rezultati za kritično (X) smer za štiri stanja konstrukcije (A-D), primerjave s projektno potrebno obtežbo po stari in novi karti potresne nevarnosti (Karta PN 2002 [Lapajne, 2001] in 2022 [Šket Motnikar, 2021]) ter ocene stroškov (desno).

6 ZAKLJUČKI IN PRIHODNJE DELO

Ocena potresne ogroženosti stavb izbranega fonda, izvedena v okviru raziskovalnega projekta za zmanjšanje potresne ogroženosti pravosodnih stavb v Sloveniji, bo Ministrstvu za pravosodje, ki upravlja ta stavbni fond, omogočala strokovno in znanstveno podprto sprejemanje odločitev pri načrtovanju protipotresnih utrditev pri prenovah stavb tega fonda.

Tudi pri obravnavanih stavbah se v zasnovi in detajlih konstrukcije odraža vpliv časa, v katerem so bile projektirane, zgrajene in nekatere tudi rekonstruirane. Viden je vpliv gradbene prakse in zakonodaje, ki je veljala v preteklih obdobjih, zlasti predpisov s področja protipotresnega projektiranja, ki so bili v Sloveniji na žalost uvedeni po koncu prvega obdobja po drugi svetovni vojni, iz katerega imamo relativno veliko obstoječih stavb. Tudi pri stavbah sodišč so vse prepogoste prenove s posegi, ki zmanjšujejo potresno odpornost stavb. Zaporedje prenov zidanih stavb, pri katerih so značilne »prestavitve vrat« in »umestitve inštalacij« in niti niso ustrezno dokumentirane, ima lahko nepredstavljive posledice, ki bodo razgaljene ob potresu

primerne jakosti. Na drugi strani so bile pri nekaterih stavbah prenove ustrezne, dvigalni jaški so bili npr. izvedeni s samostojno konstrukcijo, dilatirano in zunaj gabaritov obstoječe stavbe.

Vse obravnavane stavbe so bile razvrščene po individualno ocenjeni potresni ogroženosti, tako glede pričakovane poškodovanosti kot glede doseganja potresne odpornosti, predpisane s standardom Evrokod 8. Razvrstitve predstavljajo strokovno podlago za prioritete pri prenovah. Primerjava ocen z zakonitostmi modela POTROG pokaže, da ocene sledijo zakonitostim, obenem pa je bilo njihova odstopanja od zakonitosti mogoče razložiti z ugotovljenimi posebnostmi glede lastnosti konstrukcij.

V teku so podrobne obravnave osmih stavb, ki so bile med potresno najbolj ogroženimi izbrane kot referenčne. Te obravnave zajemajo podroben pregled konstrukcije, odvzem in laboratorijske preiskave vzorcev gradiv ter podrobne analize

potresne odpornosti. Izvedene bodo na podoben način, kot so bile izvedene pri primeru ene bolj ogroženih stavb sodišča v Sevnici in so predstavljene v prispevku. Rezultati teh obravnav bodo lahko skupaj z možnimi nabori ukrepov služili kot podlaga za pripravo projektne dokumentacije za utrditev konstrukcije posamezne stavbe ter kot reference in informacije za odgovornejše načrtovanje investicij Ministrstva za pravosodje v stavbni fond v prihodnjem obdobju.

7 ZAHVALA

Rezultati ocene potresne ogroženosti so doseženi v okviru ciljnega raziskovalnega programa (CRP) št. V2-2257 (B) z naslovom Strateške podlage za zmanjšanje potresne ogroženosti stavb pravosodja v Sloveniji, ki ga financirata Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost RS (ARIS) in Ministrstvo za pravosodje RS. Rezultati, predstavljeni kot referenčni primer konkretne pravosodne stavbe, so bili doseženi v okviru sporazuma o dodelitvi sredstev št. C2030-21-298769. Raziskave so bile izvedene tudi s podporo infrastrukturnega programa IO-0032 (A), ki ga financira ARRS.

8 LITERATURA

Babič, A., Žižmond, J., Dolšek, M., Potresno tveganje stavb-nega fonda v Sloveniji, Gradbeni Vestnik, (71), 34–47, 2022.

Bosiljkov, V., Gostič, S., Kržan, M., Antolinc, D., Žarnić, R., Izdelava in demonstracija modela za načrtovanje ohranjanja umetnostnozgodovinske dediščine v vojnih spopadih: končno poročilo za CRP MIR M4-0207. Ljubljana: UL FGG; ZRMK Institut, 2009.

Direktiva (EU) 2024/1275 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 24. aprila 2024 o energetske učinkovitosti stavb (preno-vitev), Pridobljeno: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/?uri=CELEX:32024L1275>

Dolšek, M., Žižmond, J., Babič, A., Lazar Sinković, N., Jamšek, A., Gams, M., Isaković, T., Seizmični stresni test stavbnega fonda Republike Slovenije (2020-2050). Ljubljana: UL FGG, IKPIR, 2020.

DSEPS, Dolgoročna strategija energetske prenove stavb do leta 2050. Vlada RS, 2021.

EN 1998-1:2005: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, 2005.

Gostič, S., Poročilo o pripravi strokovnih podlag za strategijo zagotavljanja potresne odpornosti mesta Idrija - hitra ocena potresne ogroženosti večjega števila stavb. Ljubljana: Gradbeni inštitut ZRMK, 2013.

Grünthal, G., European macroseismic scale 1998 (EMS-98), 1998.

Lapajne, J., The MSK-78 intensity scale and seismic risk, Engineering Seismology, 20(1), 105–112, [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(84\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0013-7952(84)90047-4), 1984.

Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupanč, P., Nova karta potresne nevarnosti - projektni pospešek tal namesto intenzitete, Gradbeni Vestnik : Glasilo Zveze Društev Gradbenih Inženirjev in Tehnikov Slovenije., (50), 140–149, 2001.

Lutman, M., Ugotovitev analitičnih korelacij med rezultati starejših in nove metode za oceno potresne odpornosti ter aplikacija ugotovljene analitične korelacije na rezultatih starejših ocen. Ljubljana: Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2003.

Lutman, M., (a), CHERPLAN: krepitev kulturne dediščine z okoljskim načrtovanjem in upravljanjem: ocena potresne ogroženosti stavb v občin Idrija: poročilo (p. 91 f.). Ljubljana: Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2013.

Lutman, M., (a), Ocena potresne ogroženosti stavb ožje vlade in tipičnih stanovanjskih stavb v Sloveniji ter strokovna priporočila: poročilo. Ljubljana: Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2020.

Lutman, M., (a), Pregled in preiskave nosilne konstrukcije ter analiza potresne odpornosti stavbe Okrajnega sodišča v Sevnici s smernicami za potrebne ukrepe: 2. faza. Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2022.

Lutman, M., Model for Seismic Risk Management in Slovenia. Predstavljeno na WCEE2024, Milano, Italy, 2024.

Lutman, M., Banovec, P., Cerkl, M., (b), POTROG 4 : nadgradnja sistema za določanje potresne ogroženosti in odzivnosti za potrebe zaščite in reševanja v Sloveniji : raziskovalni projekt, zaključno poročilo. ZAG, Inštitut za vodarstvo, Pridobljeno: <https://www.gov.si/zbirke/projekti-in-programi/potrog/>, 2020.

Lutman, M., Banovec, P., Cerkl, M., Šket Motnikar, B., POTROG 3 : nadgradnja sistema za določanje potresne ogroženosti in odzivnosti za potrebe zaščite in reševanja v Sloveniji : raziskovalni projekt, zaključno poročilo. ZAG, Inštitut za vodarstvo, Pridobljeno: <https://www.gov.si/zbirke/projekti-in-programi/potrog/>, 2018.

Lutman, M., Fenjveši, P., (b), Pregled in preiskave nosilne konstrukcije ter analiza potresne odpornosti stavbe Okrajnega sodišča v Sevnici s smernicami za potrebne ukrepe : 1. faza. Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2022.

Lutman, M., Kreslin, M., Banovec, P., Cerkl, M., POTROG 2 : nadgradnja sistema za določanje potresne ogroženosti in odzivnosti za potrebe zaščite in reševanja v Sloveniji : raziskovalni projekt, zaključno poročilo. ZAG, Inštitut za vodarstvo, Pridobljeno: <https://www.gov.si/zbirke/projekti-in-programi/potrog/>, 2016.

Lutman, M., Motnikar, B. Š., Weiss, P., Klemenc, I., Zupančič, P., Cerkl, M., ... Banovec, P., Aspects of Earthquake Risk Management in Slovenia, 4th International Conference on Building Resilience, Incorporating the 3rd Annual Conference of the ANDROID Disaster Resilience Network, 8th – 11th September 2014, Salford Quays, United Kingdom, 18, 659–666, [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00988-5](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00988-5), 2014.

Lutman, M., Peruš, I., Ocena potresne ogroženosti 12 objektov v Lek d.d. Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana, 2002.

Lutman, M., Peruš, I., Tomazevič, M., Potresna odpornost objektov v Mestni občini Ljubljana. Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana, 2001.

Lutman, M., Weiss, P., Klemenc, I., Zupančič, P., Šket Motnikar, B., Banovec, P., Cerkl, M., (b), POTROG: Potresna ogroženost v Sloveniji za potrebe Civilne zaščite. Ljubljana, Slovenia: Zavod za gradbeništvo Slovenije, Agencija Repu-

blike Slovenije za okolje, Inštitut za vodarstvo, Pridobljeno: <https://www.gov.si/zbirke/projekti-in-programi/potrog/>, 2013.

MNVP, Resolucija o krepitvi potresne varnosti do leta 2050 »PREHITIMO POTRES« (ReKPV50) (2023), Pridobljeno: <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2023-01-3592>, 2023.

MNVP, GURS, Kataster nepremičnin [Baza podatkov]. Portal prostor, Pridobljeno: <https://www.e-prostor.gov.si/podrocja/parcele-in-stavbe/kataster-nepremicnin/>, 2025.

Odredba o dimenzioniranju in izvedbi gradbenih objektov v potresnih območjih. Ur. l. SRS 18/63, 1963.

Peruš, I., Fajfar, P., Reflak, J., Potresna ogroženost in varstvo pred potresi. Poročilo št. 1: Metodologija za oceno potresne ranljivosti obstoječih gradbenih objektov: zidane in armiranobetonske konstrukcije stavb. IKPIR, 1995.

Pravilnik o začasnih tehničnih predpisih za gradnjo na seizmičnih področjih. Ur. l. SFRJ, št. 39/1964, 1964.

Sheppard, P., Tomažević, M., Izhodišča in kriteriji za ugotavljanje potresne ranljivosti zidanih zgradb. Ljubljana, december 1986. (Št. IKPI-86/11). Ljubljana: ZRMK, 1986.

Šket Motnikar, B., Zupančič, P., Karta intenziteta EMS. ARSO, GURS, Pridobljeno: https://potresi.arso.gov.si/doc/dokumenti/potresna_nevarnost/intenziteta_resevanje.jpg, 2011.

Šket Motnikar, B., Zupančič, P., Živčič, M., Atanackov, J., Jamšek Rupnik, P., Čarman, M., ... Gosar, A., Tolmač karte: Nova karta potresne nevarnosti Slovenije (2021) za namen projektiranja potresno odpornih stavb. ARSO, Urad za seizmologijo, MOP, Pridobljeno: https://potresi.arso.gov.si/doc/dokumenti/potresna_nevarnost/Tolmac_karte_potresne_nevarnosti_2021.pdf, 2021.

Stavbinski red za občinsko ozemlje deželnega stolnega mesta Ljubljane, Deželni zakonik št. 28, XXI. kos. Ljubljana, 1896.

Tomažević, M., Potresno odporne zidane stavbe. Ljubljana: Tehnis, 2009.

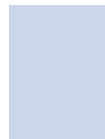
Tomažević, M., Lapajne, J., Sheppard, P., Bergant, M., Lutman, M., Codec, M., Vidrih, R., Potresna ogroženost mesta Ljubljane. Ljubljana: ZRMK: Seizmološki zavod R Slovenije, 1991. 2 zv. (24, 102 str.), ilustr. [COBISS.SI-ID 349287], (No. 2. zvezek) (p. 102). Ljubljana: ZRMK, Seizmološki zavod R Slovenije, 1991.

Ur. list SRFJ št. 31, Pravilnik o tehničnih normativih za graditev objektov visoke gradnje na seizmičnih območjih, 1981.

asist. dr. Mateja Držecnik, univ. dipl. inž. grad.
mateja.drzecnik@um.si
mateja.drzecnik@gic.si



red. prof. dr. Uroš Klanšek, univ. dipl. gosp. inž.
uros.klansek@um.si
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo
Smetanova 17, 2000 Maribor



dr. Tjaša Zupančič Hartner, prof. biol. in kem.
tjasa.zh@gic.si



dr. Rok Cajzek, mag. gosp. inž.
rok.cajzek@gic.si
GIC GRADNJE d.o.o.
Sv. Florijan 120, 3250 Rogaška Slatina



Pregledni znanstveni članek
UDK/UDC: 658.5:666.97:004.94

NAPREDNO UPRAVLJANJE BETONARN S PODPORO DIGITALNIH DVOJČKOV

ADVANCED CONCRETE PLANT MANAGEMENT WITH THE SUPPORT OF DIGITAL TWINS

Povzetek

Članek predstavlja najnovejše stanje tehnike na področju naprednega upravljanja betonarn s podporo digitalnih dvojčkov (angl. Digital Twins, DT), s poudarkom na povezovanju senzorskih podatkov, spremljanju procesov v realnem času, napovednem vzdrževanju, simulacijah delovanja in usposabljanju v kontekstu razvoja Industrije 4.0. Za zagotavljanje ažurnega virtualnega modela betonarne, tj. njenega DT, se kontinuirano zbirajo potrebni podatki iz številnih sistemskih komponent. Računalniška analitika, ki podpira DT betonarne in se napaja s podatki v realnem času, omogoča hitre prilagoditve v proizvodnem procesu, kar izboljšuje učinkovitost in zmanjša količino odpadkov. DT betonarne tako služi tudi kot učinkovito orodje za usposabljanje strokovnjakov, saj omogoča preizkušanje različnih scenarijev brez tveganja za dejanski obrat. Poleg tega DT izboljša preglednost delovanja in predvidljivost vzdrževanja betonarne ter poveča njeno operativno učinkovitost, kar vodi do znižanja stroškov in doseganja višjih nivojev kakovosti poslovanja. Prispevek poudari vlogo DT pri preoblikovanju tradicionalnih proizvodnih procesov, kot je proizvodnja betona, in podaja reprezentativen dejanski primer srednje velike betonarne, ki s podporo DT kaže napredek pri upravljanju tovrstnih proizvodnih obratov.

Ključne besede: betonarne, digitalni dvojčki, Industrija 4.0, spremljanje procesov, vzdrževanje, simulacije, usposabljanje.

Summary

The article presents the latest state of the art in the field of advanced management of concrete plants with the support of digital twins (DT). Here, the discussion focuses on sensor data integration, real-time process monitoring, predictable maintenance, operation simulations and training in the context of the development of Industry 4.0. For the purpose of providing a constantly up-to-date virtual model of the concrete plant, i.e. of its DT, the necessary data is continuously collected from several system components. Computer analytics, which supports the DT of the concrete plant and is fed with real-time data, enables rapid adjustments in the production process, thus increasing its efficiency and reducing the amount of waste. With such characteristics, the DT of the concrete plant can also serve as an effective tool for training professionals, making it possible to deal with various scenarios without risk. In addition, the DT improve the transparency of operations and the predictability of concrete plant maintenance and increase its operational efficiency, which in turn leads to a reduction in costs and the achievement of higher levels of business quality. The article emphasizes the role of DT in the development of traditional manufacturing processes, such as concrete production. A representative example of an actual medium-sized DT-supported concrete batching plant is given, showing advances in the management of such a production facility.

Key words: concrete plants, digital twins, Industry 4.0, process monitoring, maintenance, simulations, training.

1 UVOD

Četrta industrijska revolucija, poznana kot Industrija 4.0, opredeljuje aktualno obdobje sprememb v gospodarstvu, zlasti v proizvodnem sektorju, ki ga poganjajo nove digitalne tehnologije, kot so internet stvari (angl. Internet of Things, IoT), množični podatki (angl. Big Data, BD), umetna inteligenca (angl. Artificial Intelligence, AI), strojno učenje (angl. Machine Learning, ML), kibernetski fizični sistemi (angl. Cyber-Physical Systems, CPS) in digitalni dvojčki (angl. Digital Twins, DT).

Industrija 4.0 temelji na konceptu IoT, ki z uporabo integriranih senzorjev, programske opreme in komunikacijskih omrežij omogoča povezljivost ter medsebojno interakcijo različnih naprav v proizvodnih procesih. IoT omogoča zajemanje in prenos podatkov v realnem času, kar predstavlja temelj za učinkovito spremljanje in optimizacijo proizvodnje ([Yang, 2018], [Liu, 2022], [Noor-A-Rahim, 2023]). Omenjena orodja zagotavljajo v kombinaciji z DT in AI napredne analitične metode, ki izboljšujejo odločanje, zmanjšujejo napake in povečujejo proizvodno učinkovitost ([Pan, 2021], [Rathore, 2021]).

Tehnologije strojnega učenja v okviru Industrije 4.0 dodatno nadgrajujejo to povezljivost, saj omogočajo razvoj naprednih napovednih modelov za avtomatizacijo proizvodnih procesov ter proaktivno preprečevanje nezaželenih zaustavitev naprav ali proizvodnih sistemov ([Baduge, 2022], [Nguyen, 2023]). Z uporabo teh pristopov se izboljšuje učinkovitost dela, zagotavlja optimalno razporejanje virov in zmanjšujejo se stroški vzdrževanja zaradi boljšega predvidevanja okvar.

CPS združujejo fizične in digitalne entitete v inteligentna proizvodna okolja, ki omogočajo samoregulacijo in prilagajanje delovnih pogojev glede na sproti pridobljene podatke. Sinergija med fizičnim in digitalnim omogoča izvajanje simulacij, ki izboljšujejo zanesljivost proizvodnje ter zmanjšujejo stroške razvoja novih izdelkov. Kljub tem prednostim Industrija 4.0 prinaša izzive, kot so potreba po sofisticiranih varnostnih protokolih in zagotavljanju usposobljenosti kadra za delo z novimi tehnologijami [Alshammari, 2021]. Kibernetska varnost ostaja ključni izziv, saj industrijski sistemi postajajo vedno bolj povezani in izpostavljeni napadom ([Bhamare, 2020], [Raj, 2023]).

Koncept DT, prvotno razvit za vesoljsko industrijo [Grieves, 2016], se je zaradi svoje uporabnosti hitro razširil v druga področja industrije, vključno z gradbeništvom. DT so danes pomembna gonilna sila Industrije 4.0. So natančne digitalne replike fizičnih obratov, sistemov ali procesov, ki omogočajo simulacijo, analizo in optimizacijo njihovega delovanja v realnem času [Tao, 2019]. Tehnologija temelji na podatkih, ki jih zbirajo IoT-senzorji in jih nato AI ter analitična orodja obdelajo za izboljšanje napovedovanja stanja sistemov, preprečevanje okvar kakor tudi optimizacijo proizvodnje ([Pan, 2021], [Javaid, 2023]).

DT predstavljajo napredno tehnološko rešitev, ki omogoča bistvene izboljšave v gradbeni industriji, ki se tradicionalno sooča z nizko produktivnostjo in visokimi stroški proizvodnje. Integracija DT-tehnologij omogoča rešitve za optimizacijo procesov, zmanjšanje odpadkov in povečanje energetske učinkovitosti, kar prinaša tako ekonomske kot okoljske koristi [Opoku, 2021]. Napredne DT-rešitve omogočajo napovedno vzdrževanje in zaznavanje nepravilnosti v konstrukcijah v realnem času. To

zmanjšuje tveganja na gradbiščih in bistveno izboljšuje splošno varnost pri delu ([Chen, 2023], [Torzoni, 2024]). Sistemi DT denimo lahko integrirajo senzorje in napredne analitične algoritme, ki zaznavajo anomalije na gradbišču v realnem času, s čimer izboljšajo možnosti pravočasnega ukrepanja za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev pri delu [Wang, 2022]. Poleg tega omogočajo vključitev pristopa informacijskega modeliranja zgradbe (angl. Building Information Modelling, BIM), kar pripomore k boljšemu nadzoru in upravljanju celotnega življenjskega cikla objektov [Begić, 2024].

Integracija DT v gradbeno industrijo zahteva obravnavo več izzivov, vključno s potrebo po standardizaciji podatkov, zagotavljanjem kibernetske varnosti ter interoperabilnostjo med različnimi digitalnimi rešitvami [Omrany, 2023]. Da bi premagali te izzive, raziskovalci predlagajo uporabo standardiziranih podatkovnih formatov, semantičnega modeliranja ter robustnih sistemov za upravljanje podatkov, ki zagotavljajo točnost in zanesljivost informacij [Dai, 2024]. DT v betonarnah predstavljajo ključno orodje za napredno upravljanje in optimizacijo proizvodnje betona. Senzorski podatki zagotavljajo spremljanje procesov v realnem času, napovedno vzdrževanje in simulacije delovanja, kar izboljšuje učinkovitost ter zmanjšuje količino odpadkov [Sacks, 2020]. Takšni digitalni modeli omogočajo tudi izobraževanje strokovnjakov brez tveganja in povečujejo transparentnost ter predvidljivost proizvodnje. DT tako izboljšujejo operativno učinkovitost in znižujejo stroške poslovanja, s tem pa prispevajo k trajnostnemu razvoju industrije.

Vendar pa vpeljava DT v gradbeno industrijo ni brez izzivov. Integracija kompleksnih informacijskih sistemov, skladnost z varnostnimi standardi in varovanje podatkov pri uvedbi DT v prakso odpirajo tako tehnična kot operativna vprašanja, katerih odgovori terjajo skrbno načrtovanje. Ključna področja, ki zahtevajo poglobljeno obravnavo, vključujejo integracijo, interoperabilnost, natančnost, popolnost, zasebnost in varnost podatkov; razširljivost in kompleksnost samega sistema; ter njegovo upravljanje in vzdrževanje [Omrany, 2023]. Da bi premagali omenjene izzive, raziskovalci predlagajo vključevanje standardiziranih formatov podatkov, protokolov in aplikacijskih programskih vmesnikov (angl. Application Programming Interface, API) za brezhibno sodelovanje entitet sistema; semantično modeliranje podatkov in ontologij za integracijo podatkov; ter izvajanje postopkov validacije in robustnega upravljanja podatkov, da se zagotovi točnost ([Alshammari, 2021], [Han, 2023], [Držečnik, 2025a]).

Kljub obširni literaturi o DT v gradbeništvu pa je konkretna obravnava njihove uporabe v betonarnah še vedno redka. Večina znanstvenih prispevkov se osredotoča bodisi na splošne koristi DT v proizvodnih ali infrastrukturnih sistemih bodisi na gradbene objekte z visoko stopnjo digitalizacije, kot so pamentne stavbe. Sistematizirane analize, ki bi identificirale najprimernejše procese za digitalizacijo v okviru DT prav v betonarnah, pogosto manjkajo ali pa so razdrobljene, nepovezane ali preveč splošne, zato ne omogočajo enotne in aplikativne presoje primernih digitalnih rešitev za tovrstna proizvodna okolja.

Nedavne raziskave ([Omrany, 2023], [Jahangir, 2024]) sicer prikazujejo potencial DT za podporo »mehkim« (angl. lean) pristopom – tj. vitkemu načinu vodenja proizvodnje, ki temelji na zmanjševanju izgub, neprestanem izboljševanju procesov ter povečanju učinkovitosti z minimalno porabo virov. V tem

kontekstu lahko DT služijo kot orodje za sprotno spremljanje, analizo in optimizacijo procesov v realnem času, kar neposredno podpira cilje vitke proizvodnje. Kljub temu pa omenjene študije pogosto ostajajo na konceptualni ravni in ne ponujajo dovolj konkretnih smernic za implementacijo DT-rešitev v realna, kompleksna proizvodna okolja, kot so betonarne, ki imajo specifične tehnološke zahteve in omejitve.

Posledično v znanstveni literaturi primanjkuje strukturiranih modelov in prilagojenih strategij, ki bi podjetjem v industriji betona omogočali učinkovito načrtovanje, uvajanje ter dolgoročno vzdrževanje DT-tehnologij. Nadaljnje raziskovanje, ki se osredotoča na identifikacijo konkretnih procesov, merljivih kazalnikov uspešnosti ter integracijskih zahtev digitalne transformacije v betonarnah, je zato nujno. Le z razvojem sistemskih, znanstveno utemeljenih pristopov bo mogoče zagotoviti učinkovito uvedbo digitalnih orodij v tovrstna specializirana proizvodna okolja ter s tem prispevati k njihovi večji odpornosti, operativni učinkovitosti in trajnostni usmerjenosti v času industrijskih preobrazb.

Za uspešno implementacijo DT v betonarnah je ključna usmeritev v konkretne koristi, kot so: povečana zanesljivost opreme, zmanjšanje proizvodnih izgub, izboljšano vzdrževanje ter

optimizacija porabe energije in materialov. Kot izpostavljata avtorja ([Jahangir, 2024], [Broo, 2023]), je pri uvedbi DT nujno zagotoviti ustrezno podatkovno infrastrukturo, kadrovske usposobljenosti ter jasno opredeljene cilje in pričakovane koristi. Poleg tega je pomembno, da se DT ne uvede kot samostojen digitalni projekt, temveč kot del širše digitalne strategije celotnega podjetja. Uvajanje mora biti postopno, začenši s pilotnimi primeri (npr. spremljanje stanja mešalnika ali porabe energije), ter podprto z jasnimi kazalniki uspešnosti, ki omogočajo vrednotenje vpliva DT na učinkovitost in trajnost proizvodnje.

Na podlagi pregleda literature in izkušenj iz prakse smo identificirali ključna področja v betonarni, kjer je implementacija DT posebno smiselna in izvedljiva. Ti procesi so prikazani v Preglednici 1, ki predstavlja strnjen pregled reprezentativne znanstvene literature, ki se nanaša na uporabo DT v ključnih procesih betonarne. Namen pregleda je prikazati, kako DT prispevajo k izboljšanju različnih vidikov delovanja betonarne, kot so spremljanje stanja opreme, upravljanje receptur, optimizacija materialnih tokov, energetska učinkovitost, napovedno vzdrževanje, zagotavljanje varnosti, usposabljanje kadra ter strateško odločanje. Za vsak proces so navedeni možni učinki implementacije DT, skupaj z referencami iz literature, ki

Proces v betonarni	Možni učinki implementacije DT	Viri
Spremljanje stanja opreme	Realno časovno spremljanje stanja naprav, zgodnje zaznavanje okvar, boljša diagnostika.	([Werner, 2019], [Schröder, 2016])
Priprava in nadzor receptur mešanja	Optimizacija mešanja z uporabo simulacij, avtomatizacija glede na pogoje okolja.	([Tekinerdogan, 2020], [Uhlemann, 2017])
Upravljanje materialnih tokov	Vizualizacija tokov materialov, napoved zalog, optimizacija logistike.	([Omran, 2023], [Weerapura, 2023], [VDMA, 2015])
Izboljševanje energetske učinkovitosti	Spremljanje porabe energije, simulacija energetskih scenarijev, zmanjšanje izgub, manjši CO ₂ -odtis.	([Arbizzani, 2023], [Javaid, 2023], [Rüßmann, 2015])
Napovedno vzdrževanje opreme	Predikcija napak, zmanjševanje zastojev, nižji stroški vzdrževanja.	([Chen, 2023], [van Dinter, 2022], [Werner, 2019], [Schröder, 2016])
Upravljanje varnostnih opozoril	Prikaz nevarnih območij, sinhronizacija opozoril, simulacija kriznih scenarijev.	([Wang, 2021], [Liu, 2022], [Wang, 2022])
Usposabljanje in razvoj kadra	Virtualno usposabljanje, vadbene simulacije, hitrejši prenos znanja.	([Broo, 2023], [Tao, 2018])
Analiza proizvodnih trendov	Odkrivanje trendov, odstopanj, podpora strateškemu odločanju.	([Rathore, 2021], [Tekinerdogan, 2020])
Optimizacija proizvodne učinkovitosti	Identifikacija izgub, stalno izboljševanje, podpora vitkim metodam »lean methods«*.	([Omran, 2024], [Jamwal, 2022], [Sacks, 2020], [Bischoff, 2015])
Zagotavljanje kakovosti in standardiziranje delovnih postopkov	Vzpostavitev standardnih postopkov, enotna baza znanja, sledljivost procesov, povezanost z BIM/ERP.	([Jahangir, 2024], [Nguyen & Adhikari, 2023], [Sacks, 2020], [Schröder, 2016], [Wang, 2022],)

Preglednica 1. Strnjen pregled reprezentativne znanstvene literature glede možnih učinkov implementacije DT v proizvodne procese betonarne.

podpirajo te ugotovitve. S tem preglednica ponuja zgoščen vpogled v trenutno stanje raziskav na področju digitalizacije betonarn in ponuja osnovo za razumevanje, kje in kako DT lahko ustvarjajo dodano vrednost v industrijski praksi. Pregled služi kot podpora pri nadaljnjem razmisleku o uvedbi digitalnih tehnologij v proizvodno okolje in odpira prostor za razpravo o potencialih ter usmeritvah nadaljnjega razvoja.

Koristi DT za gradbeništvo kakor tudi nasploh, kljub omenjenim izzivom, še vedno odtehtajo njihovo uvedbo in uporabo. Pričujoči članek se osredotoča na področje naprednega upravljanja betonarn s podporo DT, s poudarkom na povezovanju senzorskih podatkov, spremljanju procesov v realnem času, napovednem vzdrževanju, simulacijah delovanja in usposabljanju v kontekstu razvoja Industrije 4.0. Za namen zagotavljanja nenehno ažurnega virtualnega modela dejanske betonarne, tj. njenega DT, se ves čas zbirajo potrebni podatki iz številnih sistemskih komponent. Računalniška analitika, ki podpira DT betonarne in se napaja s podatki v realnem času, omogoča hitre prilagoditve v proizvodnem procesu, ki tako povečajo njegovo učinkovitost in zmanjšajo količino odpadkov. S takšnimi lastnostmi lahko DT betonarne služi tudi kot učinkovito orodje za usposabljanje strokovnjakov, s katerim je možno obravnavati različne scenarije brez tveganja. Poleg tega DT izboljša preglednost delovanja in predvidljivost vzdrževanja betonarne ter poveča njeno operativno učinkovitost, kar vodi do znižanja stroškov in doseganja višjih nivojev kakovosti poslovanja.

Prispevek poudari vlogo DT pri razvoju tradicionalnih proizvodnih procesov, kot je proizvodnja betona. Podan je reprezentativen primer dejanske srednje velike betonarne, podprte z DT, ki prikazuje napredek pri upravljanju tovrstnih obratov in vlogo integracije DT z obstoječimi informacijskimi sistemi, kar dodatno izboljša celovito upravljanje proizvodnih procesov.

2 UČINKI UVEDBE DIGITALNEGA DVOJČKA V BETONARNO

DT, kot ena izmed omogočitvenih tehnologij, postaja čedalje bolj pomembna za gradbeno proizvodnjo, zlasti v betonarnah, kjer sodobno poslovanje zahteva učinkovite proizvodne procese in vrhunsko kakovost izdelkov. Kakor je bilo že omenjeno, gre pri DT za virtualno upodobitev fizičnih objektov ali sistemov, denimo betonarn, o katerih je tukaj govora, kar omogoča povezovanje digitalnega in fizičnega sveta. Povezava med fizičnim sistemom in DT se vzpostavi s pomočjo senzorjev, ki omogočajo sprotno zbiranje podatkov o stanju in pogojih v betonarni. Ti podatki se nato uporabijo za ustvarjanje virtualnega modela, ki natančno odraža trenutne pogoje in stanje fizičnega sistema betonarne ter omogoča izvedbo natančnih simulacij njenega delovanja, kar prispeva k boljšemu razumevanju in upravljanju dejanske proizvodnje betona in betonskih (pol)izdelkov. Na ta način lahko podjetja prepoznajo in odpravijo težave v proizvodnji, optimizirajo porabo materiala in energije ter tako pomembno prispevajo k trajnostnemu razvoju, saj omogočajo bolj smotno uporabo virov, kar zmanjšuje ekološki odtis betonarne in zagotavlja večjo okoljsko učinkovitost celotnega proizvodnega procesa [van Dinter, 2022].

DT v betonarnah pokrivajo celoten cikel nastajanja betonskih proizvodov, od vhodnih surovin do končnega izdelka. Ta digitalna tehnologija omogoča simulacijo različnih betonskih

mešanic za potrebe izbora optimalnih vhodnih materialov in zagotavljanja skladnosti s standardi kakovosti. Integracija senzorjev in napredne analitike nudi možnost odkrivanja napak v sestavinah ali v procesu mešanja v realnem času, kar prispeva k hitrejšemu ter učinkovitejšemu odzivu na težave [Uhlemann, 2017]. Uporaba DT neposredno vpliva na nivo kakovosti končnih izdelkov betonarn, saj dopušča simulacijo in testiranje različnih mešanic v virtualnem okolju ter predhodno oceno lastnosti betona, kot so trdnost, vodotesnost, obstojnost idr., še preden se material uporabi v praksi [Kosse, 2022].

Po izsledkih reference [Uhlemann, 2017] pridobivanje zadostne baze podatkov za učinkovito načrtovanje proizvodnega procesa terja velik delež celotnega časovnega vložka. Tradicionalni pristopi vključujejo ročno zbiranje podatkov in izvedbo simulacij za analizo rezultatov, kar je zamudno in pogosto nezadostno za potrebe sodobnih proizvodnih sistemov, ki zahtevajo cikle optimizacije skoraj v realnem času. DT odpravlja te pomanjkljivosti z avtomatiziranim zbiranjem podatkov in takojšnjo analizo, kar omogoča hitrejšo in natančnejšo prilagoditve proizvodnih procesov.

Kljub prednostim vpeljava DT v betonarno terja občuten napor. Zahteva namreč določeno začetno finančno naložbo, obsežno tehnično strokovno znanje, skrbno integracijo v obstoječ informacijski sistem in usposabljanje osebja. Ena glavnih ovir za uvedbo DT v mikro, mala in srednje velika podjetja (MSP) je nizek nivo avtomatizacije ter pomanjkljiva standardizacija podatkov. Raziskava, ki jo je pred desetletjem izvedla nemška inženirska zveza [VDMA, 2015], je pokazala, da je takrat le desetina anketiranih podjetij imela celovito urejeno zbiranje podatkov o procesih in napravah, medtem ko je le tretjina pridobljene podatke uporabila za povratne informacije v proizvodnji. Tudi pregled novjših objav še vedno razkriva precejšen prostor za napredek gradbene industrije na tem področju in kaže na potrebo po vertikalni integraciji omogočitvenih tehnologij v celotnem podjetju, da bi se potem lahko izkoristile vse prednosti, ki jih digitalizacija omogoča. Ne glede na omenjeno lahko DT MSP ponudi številne priložnosti, zlasti povečanje preglednosti proizvodnih procesov, izboljšanje nadzora v realnem času in zmanjšanje stroškov virov. Glede na referenco [Bischoff, 2015] lahko DT prinesejo pomembne izboljšave v MSP, ne da bi pri tem zahtevali obsežne finančne naložbe, kar je poglobljenega pomena za podjetja z omejenimi viri.

Informacijsko modeliranje gradenj, tj. BIM, je še ena pomembna digitalna tehnologija, ki je tesno povezana s konceptom DT. BIM zajema ustvarjanje in upravljanje digitalnih predstavitev fizičnih in funkcionalnih značilnosti zgradb, kot je denimo betonarna, ter zagotavlja celovito platformo za načrtovanje, oblikovanje in upravljanje gradbenih ter infrastrukturnih projektov [Begić, 2024]. Integracija BIM in DT dodatno izboljšuje možnosti simulacije, napovedovanja in optimizacije delovanja zgradb tekom njihovega življenjskega cikla. Ključno vlogo pri takšni integraciji ima lastnost DT, da se ta lahko prilagaja spremembam v fizičnem okolju ter zagotavlja točne in ažurne informacije za podporo odločanju [Revolti, 2024].

Napredek raziskav na področju DT v gradbeni industriji jasno kaže, da se ta tehnologija uspešno uveljavlja kot ključno orodje za izboljšanje učinkovitosti, sledljivosti in zanesljivosti proizvodnih procesov. Medtem ko številni avtorji obravnavajo širšo rabo DT v upravljanju objektov [Nguyen, 2023], serijski

proizvodnji [Kosse, 2022], pametni logistiki [Begić, 2024] in zagotavljanju kibernetске varnosti [Bhamare, 2020], se vse bolj uveljavlja potreba po konkretnih implementacijah teh konceptov v dejanskem proizvodnem okolju. Raziskave kažejo na precejšnje potencialne uporabe DT za optimizacijo vzdrževanja ([Jamwal, 2022], [Chen, 2023]), zmanjšanje okoljskega vpliva in večjo prožnost v dobavnih verigah, hkrati pa opozarjajo na nujnost standardizacije podatkovnih tokov, interoperabilnosti sistemov in izobraževanja kadra za učinkovito upravljanje novih tehnologij ([Držečnik, 2025a], [Drobnyi, 2023]). Kljub številnim prednostim ostajajo nekatere tehnološke in organizacijske ovire, kot so začetni stroški, pomanjkanje podatkovne infrastrukture in kompleksnost povezovanja fizičnih naprav z digitalnim okoljem, še vedno pomemben izziv, zlasti za mala in srednje velika podjetja ([Bischoff, 2015], [Arbizzani, 2023]).

V tem okviru sledita poglavji, ki obravnavata implementacijo DT v tehnološko okolje betonarne in njegovo praktično uporabno vrednost. Tretje poglavje tako analizira, kako uvedba DT omogoča prehod s tradicionalnega vzdrževanja na zahtevo v smeri preventivnega in nato napovednega vzdrževanja, ki temelji na kontinuiranem zajemu in analizi podatkov v realnem času. DT v tem kontekstu deluje kot osrednji informacijski sistem, ki povezuje senzoriko, digitalne modele in analitične algoritme. To omogoča pravočasno zaznavanje odstopanj v delovanju opreme, identifikacijo vzorčnih nepravilnosti ter optimizirano načrtovanje vzdrževalnih posegov glede na dejanske pogoje in obremenitve. Posledično se znižujejo stroški obratovanja, podaljšuje življenjska doba opreme, zmanjšuje delež nenačrtovanih zastojev ter dviguje raven zanesljivosti in varnosti delovanja.

Poleg nadzora stanja opreme omogoča DT tudi celovito optimizacijo proizvodnega procesa. Sproten zajem in analiza podatkov omogočata prepoznavanje ozkih grl, napak v recepturah in energetskih izgub. Na podlagi simulacij različnih scenarijev lahko upravljavci testirajo vzdrževalne in proizvodne strategije v virtualnem okolju, brez tveganja za prekinitev delovanja. Tako postane možno dinamično prilagajanje delovanja glede na zunanje razmere, zahteve naročil ali izredne dogodke. Dodatno DT služi tudi kot varno učno okolje za usposabljanje osebja, saj omogoča ponavljanje postopkov, odziv na simulirane napake in razvijanje operativnih kompetenc brez fizičnega tveganja.

V četrtem poglavju je predstavljen primer implementacije DT v dejansko betonarno. Gre za celovito integracijo informacijskega modela objekta, senzorike, podatkovnih tokov in nadzornega sistema v enoten digitalni sistem, ki omogoča vizualizacijo delovanja v realnem času, napovedovanje napak in optimizacijo vzdrževanja. Konkretna uvedba DT v proizvodnem okolju služi kot empirična validacija konceptov, predstavljenih v predhodnih poglavjih. Primer izpostavlja merljive izboljšave na učinkovitost delovanja, zmanjšanje izpadov, izboljšanje kakovosti betonskih mešanic ter višjo raven varnosti in okoljske skladnosti delovanja.

3 VZDRŽEVANJE BETONARNE S PODPORO DIGITALNEGA DVOJČKA

Tehnologija DT omogoča digitalno transformacijo vzdrževanja betonarn z uvedbo podatkovno podprtega in prediktiv-

nega upravljanja opreme in procesov. Vzdrževanje se pri tem transformira iz reaktivnega in časovno načrtovanega pristopa v pametno, sprotno prilagodljivo in podatkovno vodeno upravljanje, ki temelji na spremljanju stanja naprav, zaznavanju nepravilnosti ter napovedovanju okvar. Digitalna transformacija sicer ne temelji izključno na tehnologiji DT, vendar ta predstavlja ključno komponento v širšem okviru Industrije 4.0. V kombinaciji z drugimi naprednimi tehnologijami, kot so senzorika, IoT, AI, oblačne platforme in analitika velikih podatkov, omogoča natančno simulacijo obratovalnih pogojev, optimizacijo vzdrževalnih ciklov ter sprejemanje odločitev na podlagi aktualnih podatkov. Splošno znana resnica je, da so primerno vzdrževane betonarne poglobljene pomena za proizvodnjo visokokakovostnega betona, njihovo učinkovito delovanje pa je bistveno za zagotavljanje skladnosti s standardi kakovosti na eni strani in obvladovanje obratovalnih stroškov na drugi strani. Za uspešno izvedbo takšnega vzdrževanja je treba izdelati DT za vsako ključno komponento v betonarni, od mešalcev, silosov in črpalk do transportnih in dozirnih sistemov, kar vključuje podrobne digitalne modele, povezane s senzorji ter napravami, ki zbirajo podatke o delovanju in stanju opreme. Ti senzorji spremljajo vrsto parametrov, kot so vibracije, tlak, temperatura in pretok, kar omogoča celovito sliko delovanja vsakega posameznega podsistema.

Za uspešno implementacijo DT je ključno, da so digitalni modeli dovolj podrobni, točni in informacijsko bogati, da zanesljivo predstavljajo dejansko stanje objektov in procesov. V tem kontekstu visoka natančnost pomeni ustrezen Level of Development (LOD), kar vključuje tako geometrijsko kot semantično natančnost. Na primer, modeli z LOD 300 ali višjim vključujejo točne dimenzije in tehnične značilnosti elementov, medtem ko LOD 400 in 500 omogočata podrobno proizvodno in obratovalno spremljanje ter upravljanje na podlagi podatkov iz realnega okolja. Poleg tega je treba zagotoviti zanesljiv prenos ter integracijo podatkov iz fizičnega v digitalno okolje, da DT odraža dejansko stanje v realnem času. DT tako omogoča ne le vizualizacijo, temveč tudi izvajanje napredne analitike, kar podpira informirano odločanje na ravni posameznih komponent in celotnega sistema.

Posebno pozornost je treba nameniti ločevanju dveh osnovnih ravni upravljanja, in sicer vzdrževanje betonarne in vzdrževanje tehnoloških procesov, ki se izvajajo v betonarni.

Vzdrževanje fizičnih komponent vključuje stalno spremljanje delovanja mehanskih, hidravličnih in električnih sistemov z namenom zagotavljanja njihove zanesljivosti in optimalnega delovanja. Čeprav je mogoče izvajati prediktivne (napovedne) in pogojne (kondicijsko osnovane) strategije vzdrževanja tudi brez digitalnih tehnologij, uvedba DT prinaša dodatne prednosti, saj omogoča bolj integrirano, ažurno in sistematično spremljanje stanja sistema. Senzorji, nameščeni na ključnih točkah opreme, v realnem času zbirajo podatke o temperaturi, vlagi, vibracijah, tlaku in drugih kazalnikih delovanja ter jih prenašajo v virtualni model DT. Na tej podlagi se izvaja podrobna analiza stanja sistema, ki vključuje primerjavo meritev z referenčnimi vrednostmi, prepoznavanje trendov degradacije, ocenjevanje preostale življenjske dobe komponent ter odkrivanje odstopanj, ki lahko kažejo na nastanek napake ali okvare. Tako imenovano bolj precizno napovedovanje temelji

na naprednih algoritmih AI in ML, ki združujejo zgodovinske podatke in realnočasovne meritve za oceno verjetnosti okvare v določenem časovnem obdobju.

DT odpira tudi nove možnosti, kot so simulacije različnih scenarijev, samodejno zaznavanje anomalij, vizualizacija sistema v realnem času, integracija z informacijskimi sistemi, kot sta ERP (Enterprise Resource Planning), ki omogoča celovito upravljanje poslovnih procesov podjetja, in CMMS (Computerized Maintenance Management System), ki je specializiran za načrtovanje, spremljanje in izvajanje vzdrževalnih aktivnosti, ter napredno planiranje vzdrževanja na podlagi dejanskega stanja komponent. V tem kontekstu se vzdrževanje običajno deli na tri glavne vrste: (i) preventivno vzdrževanje, ki se izvaja vnaprej na osnovi časovnih intervalov ali priporočil proizvajalca z namenom preprečevanja okvar; (ii) kondicijsko (pogojno) vzdrževanje, ki temelji na spremljanju dejanskega stanja opreme in se izvaja takrat, ko določeni parametri presežejo mejne vrednosti; ter (iii) interventno vzdrževanje, ki se izvaja kot odziv na že nastalo okvaro ali motnjo. Za preprečevanje nepredvidenih izpadov je ključno, da so vsi pomembni podatki pravilno zajeti, konsistentno vključeni v sistem DT in da so vzdrževalni postopki prilagojeni novim digitalnim možnostim. S tem se omogoči proaktiven pristop k vzdrževanju, ki zmanjšuje tveganje za nenadne okvare in povečuje zanesljivost proizvodnih sistemov ([Kritzinger, 2018], [Držičnik, 2025b]). To vključuje tudi nove možnosti, kot so avtomatizirano opozarjanje na kritična odstopanja, simulacije scenarijev okvar in optimizacija urnikov vzdrževanja glede na realne pogoje delovanja sistema.

Ugotovitve raziskovalcev [Werner, 2019] kažejo, da je ključ do uspešnega napovednega vzdrževanja v sprotnem zbiranju in analizi podatkov, ki nudijo možnost bolj natančne ocene življenjske dobe sredstev. DT omogoča identifikacijo vzorcev delovanja, zaznavo odstopanj in samodejno generiranje vzdrževalnih nalog. Nadaljnje raziskave [Arbizzani, (2023)] poudarjajo dodatno vrednost DT kot orodja za trajnostno delovanje in energetsko optimizacijo, saj se odločitve o vzdrževanju izvajajo na podlagi realnega stanja, kar zmanjšuje nepotrebne posege. Poleg tega DT podpira razvoj prilagodljivih strategij, pri katerih se življenjski cikel posameznih komponent spremlja in vrednoti skozi čas, kar omogoča optimizirano časovno planiranje zamenjav ali obnove. Tak pristop znatno povečuje zanesljivost proizvodnje v gradbeni industriji [Wang, 2022]. Kondicijsko vzdrževanje na osnovi dejanskega stanja komponent se že danes uveljavlja kot temelj digitaliziranih in trajnostnih strategij industrijskega upravljanja

Napredna analitična orodja AI in ML je sicer možno uporabiti za optimizacijo vzdrževalnih procesov tudi brez DT, vendar pa njegova uporaba omogoča pomembne nadgradnje, dodatno integracijo in celovitejši pristop k optimizaciji procesov. Z analizo preteklih podatkov o zmogljivosti opreme je mogoče razviti modele za napovedovanje življenjske dobe komponent in načrtovanje vzdrževalnih posegov. Takšna analitika lahko dodatno prispeva k zmanjšanju nepotrebnih vzdrževalnih posegov in uporabe virov. Ti modeli simulirajo scenarije in omogočajo eksperimentiranje z različnimi strategijami vzdrževanja, kar vzdrževalnim timom omogoča izbiro najbolj učinkovitih pristopov za posamezen obrat. S takšnim pristopom možno tudi zmanjšati nepotrebne prekinitve v proizvodnji in optimizirati rabo virov [Uhlemann, 2017].

Omenjeni način vzdrževanja v betonarnah pomembno vpliva tudi na njihovo varnost delovanja. Z nenehnim spremljanjem stanja takšnih obratov v realnem času lahko DT pravočasno prepoznajo potencialna tveganja, kot so nenavadna nihanja v delovanju ali znaki preobremenjenosti ter omogočijo pravočasne intervencije, kar zmanjšuje tveganje za nesreče in okvare. Poleg tega DT betonarn omogočajo analizo vzrokov okvar in razvoj ukrepov za preprečevanje podobnih težav v prihodnosti, s čimer ustvarjajo varnejše delovno okolje za zaposlene in zmanjšujejo tveganje za poškodbe opreme in infrastrukture [Držičnik, 2025a]. Z izvajanjem stalnega nadzora in optimizacijo delovanja opreme v betonarni DT prav tako prispeva k zmanjšanju porabe energije, kar pozitivno vpliva na stroškovno učinkovitost ter trajnostno poslovanje podjetja. Učinkovitejša delovanje opreme, ki je sistematično vzdrževana, povzroča manjše emisije in omogoča boljši izkoristek surovin, kar je pomembno za okoljsko ozaveščeno poslovno prakso. Ta napredna kontrola procesov prispeva tudi k boljši kakovosti betonskih izdelkov, saj DT omogočajo natančno regulacijo parametrov, kot so razmerja sestavin in časi strjevanja, kar vodi k večji zanesljivosti končnega izdelka.

Kljub številnim prednostim pa uvedba DT v betonarno s seboj prinaša tudi nekatere izzive. Razen vlaganj v fizično opremo in digitalno tehnologijo je prav tako nujno potrebno usposobiti osebe za kompetentno delo v posodobljenem delovnem okolju, kar zahteva tako tehnične kot operativne kompetence. Za izkoriščanje vseh prednosti napredne tehnologije je ključnega pomena, da se DT redno posodablja in vzdržuje, s čimer se zagotavlja natančnost in učinkovitost sistema skozi čas. Pričakuje se, da bo širša uvedba DT v betonarne v prihodnosti postala nuja, saj bodo konkurenca ter višje operativne zahteve dodatno spodbujale podjetja k digitalizaciji. Vsekakor bo napredek v senzorski tehnologiji, podatkovni analitiki in AI omogočil razvoj še zanesljivejših DT, kar bo dodatno izboljševalo učinkovitost vzdrževanja in splošno delovanje betonarn, opremljenih s to tehnologijo.

4 PRIMER UVEDBE DIGITALNEGA DVOJČKA V BETONARNO

4.1 Osnovne tehnične lastnosti betonarne

Betonarna Nagonje 2.0 (slika 1), je proizvodni obrat podjetja GIC GRADNJE, d. o. o., s sedežem v Rogaški Slatini, specializirana za izdelavo zahtevnih betonskih kompozitov. Tehnološka infrastruktura vključuje mešalec za beton, avtomatizirane transportne trakove, tehtnice, komandno sobo z nadzornim sistemom za spremljanje in zbiranje podatkov SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), priročni laboratorij, napravo za reciklažo svežega betona, večkomorni zalogovnik agregatov, silose za cement ter črpalke za doziranje aditivov. Celoten mešalni sistem je umeščen na nosilni jekleni konstrukciji, proizvodnja pa poteka skladno s standardi SIST EN 206 in SIST 1026.

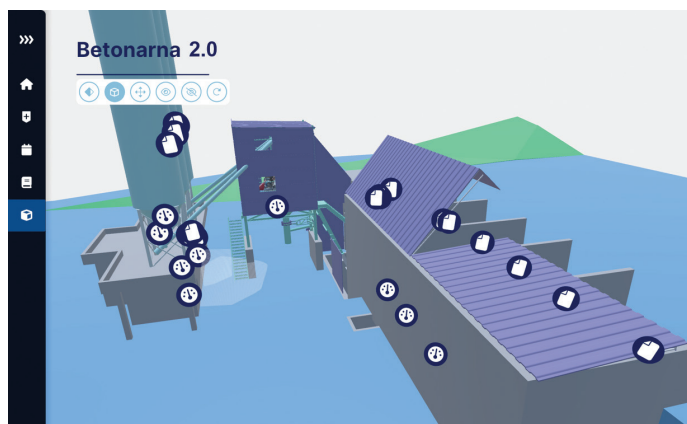
Betonarna Nagonje 2.0 predstavlja referenčni primer integracije digitalnih tehnologij in visoke stopnje avtomatizacije v proizvodnji betona, kar jo uvršča med pametne proizvodne obrate skladno z načeli Industrije 4.0. Ključne tehnološke rešitve vključujejo vgradnjo IoT-senzorjev za spremljanje fizikalnih lastnosti vhodnih surovin (npr. vlaga v agregatih), digitalno



Slika 1. Betonarna Negonje 2.0.

nadzorovano doziranje preko celovitega informacijskega sistema ERP (Enterprise Resource Planning) betonarne, uporabo sistema SCADA za centraliziran nadzor tehnoloških parametrov, merilnike porabe energije za posamezne naprave ter digitalno vremensko postajo za spremljanje okoljskih pogojev. Napredni merilni in dozirni sistemi omogočajo natančno tehtanje, sprotno sledljivost materialnih tokov in nadzor nad celotnim proizvodnim procesom in se beležijo v ERP betonarne.

Za projektiranje in izvedbo obrata je bil izdelan tridimenzionalni informacijski model (BIM), ki vključuje geometrijske značilnosti konstrukcije, razporeditev tehnološke opreme, notranjo logistiko in skladiščne cone. Čeprav je bil model prvotno namenjen načrtovanju gradnje, danes predstavlja temelj digitalnega dvojčka betonarne. BIM omogoča povezavo med geometrijskimi elementi in realnočasovnimi operativnimi podatki, kar vzpostavlja osnovo za digitalno spremljanje, simulacijo in upravljanje proizvodnje.



Slika 2. Predpripravljen BIM-model objekta za digitalni dvojček betonarne Negonje 2.0.

Digitalni dvojček betonarne predstavlja integriran informacijski sistem, ki v realnem času preslika fizično delovanje obrata v digitalno okolje. Združuje več funkcionalnih ravni: fizično raven (IoT-senzorji, merilniki, vremenska postaja), podatkovno raven (zbiranje in sinhronizacija podatkov), analitično komponento (napovedni model, podprt z umetno inteligenco) ter vizualiza-

cijski uporabniški vmesnik (BIM-model, nadzorna plošča). Ta arhitektura omogoča sprotno spremljanje obratovalnih pogojev, zaznavanje odstopanj in podporo pri odločanju.

Senzorji beležijo vse ključne parametre v vseh fazah proizvodnje – od priprave surovin do doziranja in mešanja – ter jih v realnem času prenašajo v centralno enoto digitalnega dvojčka. Sistem omogoča zaznavanje odstopanj, sprotno opozarjanje operaterjev ter beleženje stanj za nadaljnjo analizo. Napovedni model, podprt z metodami AI, temelji na zgodovinskih in trenutnih podatkih ter omogoča predvidevanje fizikalnih lastnosti mešanic (npr. konsistence, trdnosti) že pred izvedbo dejanskega mešanja. Na tej osnovi sistem predlaga korekcije časa mešanja ali razmerij sestavin, kar povečuje homogenost in zanesljivost proizvodnje.

Poleg napovedne analitike digitalni dvojček omogoča spremljanje ravni zalog, natančnost doziranja cementa in agregatov ter zmanjševanje materialnih izgub. Samodejno generira laboratorijska poročila, omogoča vpogled v parametre svežega in strjenega betona ter analizo proizvodnih ciklov v različnih časovnih okvirih. Te funkcionalnosti omogočajo dolgoročno spremljanje učinkovitosti in postopno optimizacijo proizvodnje na podlagi prepoznanih trendov.

Ob tem je pomembno poudariti, da digitalni dvojček ne predstavlja same digitalne transformacije vzdrževanja, temveč deluje kot orodje, ki to transformacijo omogoča in podpira. S tem, ko konsolidira podatke iz različnih virov – vključno s senzoriko, IoT, SCADA- in ERP-sistemi – v konsistentni, ažurni in dostopni obliki, uporabnikom omogoča celovit pregled nad delovanjem posameznih komponent ter sistema kot celote. Njegova ključna vrednost ni zgolj v vizualizaciji, temveč predvsem v tem, da omogoča strukturirano izvajanje vzdrževalnih protokolov, zaznavanje odklonov, prepoznavanje vzorcev okvar in celo simulacijo scenarijev obratovanja. V določenih primerih omogoča tudi avtomatizirano odločanje, s čimer postane digitalni dvojček aktivno upravljavsko okolje. To okolje podpira prehod od reaktivnega k preventivnemu in napovednemu vzdrževanju, hkrati pa omogoča vključevanje napredne analitike in spremembe organizacijskih postopkov znotraj širšega konteksta digitalne preobrazbe [Zupančič Hartner, 2024].

4.2 Prednosti uvedbe digitalnega dvojčka v betonarno

Betonarna Negonje 2.0 že deluje kot pametna tovarna, usklajena z osnovnimi načeli Industrije 4.0, kot so kibernetsko-fizični sistemi, povezljivost, decentralizirano odločanje, podatkovna transparentnost in sprotna prilagodljivost procesov. Ključni del digitalne preobrazbe obrata predstavlja uvedba DT, ki združuje napredno senzoriko, IoT in zmogljivosti za obdelavo podatkov v realnem času. Osnovni elementi digitalnega modela vključujejo virtualne predstavitve tehnoloških sklopov betonarne (npr. mešalnik, transportni trakovi, zalogovniki, dozirne enote), z njimi povezane procesne parametre (npr. temperatura, vlažnost, pretok, hitrost mešanja, poraba energije) ter algoritme za analizo in napovedovanje. Model se sproti ažurira prek senzorjev, ki so nameščeni na ključnih komponentah opreme in kontinuirano zbirajo podatke o delovanju naprave. Ti podatki se samodejno prenašajo v digitalni model, kjer se primerjajo z referenčnimi vrednostmi in preteklo zgodovino, kar omogoča odkrivanje odstopanj, optimizacijo delovanja in napovedovanje vzdrževalnih potreb.

DT betonarne tako omogoča dinamične simulacije in analize v realnem času, kar prinaša več pomembnih prednosti, kot so:

- operativna vidljivost – analitika v realnem času zagotavlja celovit pregled nad delovanjem obrata, kar omogoča spremljanje njegovega delovanja in učinkovito sprejemanje odločitev na podlagi informacij,
- napovedno vzdrževanje – z analizo vzorcev podatkov se lahko napovejo morebitne okvare opreme, kar ponuja možnost za proaktivno vzdrževanje in skrajšanje trajanja izpadov obrata,
- optimizacija procesov – možnost izvedbe simulacij različnih scenarijev delovanja pomaga optimizirati proizvodne procese, zmanjšati količino odpadkov in na splošno izboljšati učinkovitost obrata,
- avtomatizirano spremljanje in dokumentiranje delovanja betonarne, kar omogoča vzpostavitev rednih operativnih protokolov,
- usposabljanje osebja – možnost vadbe upravljanja v virtualnem okolju brez tveganja, preden se začne delo z dejansko opremo obrata.

4.3 Vzdrževanje v betonarni z digitalnim dvojčkom

Tehnologija DT bistveno izboljša postopke vzdrževanja v betonarni. Redna vzdrževalna opravila, kot so preverjanje nivoja olja v menjalniku mešalnika, pregledovanje stanja mešalnih lopatic in zagotavljanje delovanja hidravličnega izpustnega ventila, so načrtovana na podlagi analize podatkov v realnem času. S takšnim pristopom se ne le podaljšuje življenjska doba opreme betonarne, ampak se tudi zagotavlja dosledna kakovost proizvodnje, ki se v njej odvija. Operater mora, na primer, pred začetkom dela preveriti praznost tehtalnih posod, zaprtost in tesnjenje izstopnih ventilov, puščanje olja reduktorja mešalca, in nepoškodovanost lopatic mešalca ter preveriti morebitno puščanje olja ali težave s hidravličnim sistemom. Med proizvodnim procesom je poleg tega pomembno spremljati delovanje izpustnih vrat in pravilno smer vrtenja mešalnih gredi. Vzdrževanje visokega nivoja varnosti je ravno tako ključno področje, ki je izboljšano z uvedbo tehnologije DT v

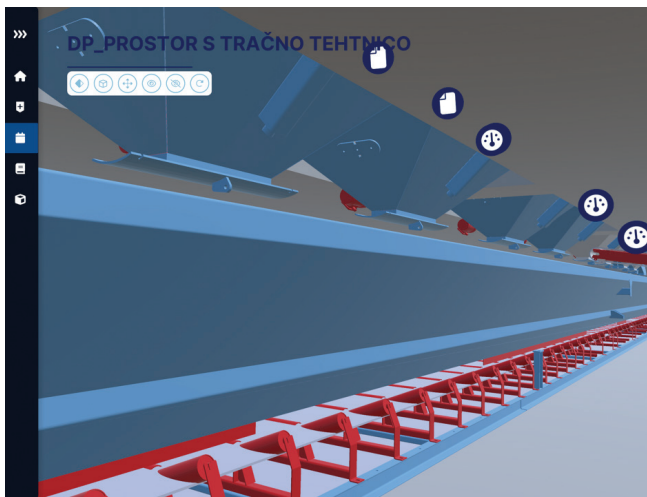
betonarno. Poseben sistem DT vključuje protokole za varno delovanje betonarne, kot je denimo zagotavljanje, da so vse varnostne naprave nameščene in pravilno delujejo, preden se proizvodni proces začne.

DT tako pomeni nepogrešljivo tehnologijo za povečanje učinkovitosti, zanesljivosti in varnosti funkcioniranja betonarne, ki hkrati dopušča prilagoditev proizvodnih procesov. Proaktivno vzdrževanje, optimizacija procesov in nadzor v realnem času prispevajo k zmanjšanju obratovalnih stroškov, višji kakovosti betonskih mešanic in tudi manjšemu vplivu betonarne na okolje. Na primer, v okviru pametne betonarne podjetja GIC Gradnje se DT uporablja za optimizacijo procesa mešanja betona, kjer sistem samodejno prilagodi razmerja komponent (voda, cement, agregat) glede na trenutno vlažnost agregata in temperaturo okolja, s čimer se zagotavlja konstantna kakovost mešanice in zmanjšuje možnost napak. Uvedba periodičnih operativnih protokolov omogoča sistematično spremljanje in analiziranje delovanja obrata, kar zagotavlja dolgoročno izboljševanje učinkovitosti. S tem DT ponuja možnosti, da betonarna lahko zadosti sodobnim industrijskim zahtevam in pričakovanjem trga ter sočasno podpira trajnostno in prilagodljivo poslovanje.

4.4 Premagovanje izzivov digitalnega dvojčka v betonarni

Praktične izkušnje, pridobljene v obravnavani betonarni, so pokazale, da uvedba DT v takšen obrat s seboj prinaša tudi določene izzive, kot so denimo integracija kompleksnih IT-sistemov, zagotavljanje kibernetske varnosti in vzpostavljane interoperabilnosti med različnimi programskimi aplikacijami. Za premagovanje teh težav se priporoča naslednje:

- standardizacija podatkovnih formatov – uporaba takšnih formatov podatkov, komunikacijskih protokolov in različnih API-jev omogoča brezhibno izmenjavo informacij in sistemsko integracijo; s tem se zmanjša tveganje za neskladja med podatki in izboljša učinkovitost pri vodenju procesov,
- robustno upravljanje informacij – dosledno izvajanje uveljavljenih postopkov, tehničnih priporočil in komunikacij-



Slika 3. Usposabljanje osebja za delo z digitalnim dvojčkom betonarne Negonje.

skih standardov, npr. OPC UA [OPC Foundation, 2023] in Asset Administration Shell (AAS) [Boss, 2021]), za ravnanje s podatki zagotavlja njihovo točnost, celovitost in varnost. Takšen pristop omogoča sistematično shranjevanje in organiziranje podatkov, kar olajša njihovo uporabo v realnem času ter prispeva k boljši sledljivosti in poglobljeni analizi procesov,

- usposabljanje in podpora zaposlenih – dvig kompetentnosti osebja za uporabo novih tehnologij in razumevanja pomena DT za delovanje betonarne; sistematično usposabljanje ter stalna tehnična podpora (glej sliko 3) zagotavljajo možnosti, da zaposleni lahko učinkovito uporabljajo nove tehnologije in rešujejo izzive v praksi.

Za varnost delovanja DT betonarne v spletnem okolju je integracija naprednih zaščitnih mehanizmov za preprečevanje nepooblaščenega dostopa in zlorabe podatkov ter kibernet-skih napadov izjemnega pomena. Z namenom preprečevanja nepooblaščenega dostopa in zmanjšanja tveganja kibernet-skih napadov [Boštjančič Pulko, 2025] je nujno razviti močne varnostne protokole, ki vključujejo:

- šifriranje podatkov – s tem se zagotavlja, da so podatki, ki se prenašajo ali shranjujejo, zaščiteni pred morebitnimi zlorabami,
- večfaktorska avtentikacija – ta omogoča dodatno plast varnosti in zmanjšuje tveganje za nepooblaščen dostop,
- nenehno spremljanje sistema – revizije in posodobitve varnostnih protokolov omogočajo hitro prepoznavanje ranljivosti, odzive na morebitne varnostne grožnje in s tem zmanjšajo tveganje za motnje v delovanju betonarne,
- izvajanje rednih analiz tveganj – sistematično ocenjevanje in upravljanje tveganj omogoča pravočasno identifikacijo in preprečevanje potencialnih groženj informacijske varnosti,
- pripravo načrtov za krizno upravljanje in zagotavljanje neprekinjenega poslovanja – jasni postopki za ukrepanje ob incidentih pomagajo zmanjšati vpliv morebitnih motenj na delovne procese betonarne,
- ozaveščanje in usposabljanje zaposlenih – redno izobraževanje zaposlenih glede kibernet-ske varnosti je ključnega pomena za preprečevanje napadov, ki izkoriščajo človeški dejavnik,
- redno izvajanje varnostnih kopij podatkov – omogoča hitro obnovo informacijskih sistemov v primeru izgube podatkov zaradi napadov ali tehničnih okvar.

Uvajanje teh varnostnih ukrepov pripomore k stabilnemu in varnemu delovanju DT v betonarni, obenem pa povečuje zaupanje zaposlenih in investorjev v zanesljivost in varnost novih tehnologij.

4.5 Ekonomske in okoljske koristi digitalnega dvojčka v betonarni

Projekt pametne tovarne Betonarna Nagonje 2.0 je obsegal načrtovanje in izgradnjo trajnostnega proizvodnega objekta po smernicah trajnostne gradnje z vključitvijo digitalne infrastrukture, reciklirnega sistema in okolju prijazno umestitvijo in ureditvijo. Osnovni namen realizacije projekta je bil povečati zmogljivosti proizvodnje betona, zmanjšati porabo naravnih virov, zagotoviti krožnostni materialni tok ter vzpostaviti ener-

getsko učinkovito, okolju prijazno delovanje betonarne. Projekt sledi načelom Industrije 4.0 z uvajanjem digitalnih tehnologij, avtomatizacije in podatkovno podprtega vodenja procesov, hkrati pa odraža vrednote Industrije 5.0 z osredotočenostjo na človeka – varnost, usposobljenost zaposlenih ter vključujoč, trajnostni pristop k razvoju obrata.

Ekonomske koristi uvedbe DT v betonarno se kažejo v nadzoru nad procesi, v znižanju obratovalnih stroškov, optimizirani porabi naravnih virov in minimalnem trajanju izpadov vsled izboljšane obvladovanja proizvodnih procesov ter sistematičnega napovednega vzdrževanja. Uvedbo DT v betonarni je smiselno podpreti z analizo pred implementacijo in po njej, vendar že obstoječa študija (Weerapura, 2023) dokazuje njegovo učinkovitost z validacijo simuliranih podatkov in strokovnimi intervjuji iz realnih RMC-obratov. Dokazane koristi vključujejo zmanjšanje proizvodnih izpadov, boljše vzdrževanje opreme, višjo produktivnost ter večje zadovoljstvo strank. Vendar pa bi za kvantitativno potrditev učinkov v konkretnem podjetju bila potrebna dodatna empirična analiza z realnimi podatki pred uvedbo in po njej. Okoljske koristi vključujejo izboljšano energijsko učinkovitost in zmanjšane emisije CO₂, kar je v skladu z globalnimi prizadevanji za zmanjšanje ogljičnega odtisa in trajnostni razvoj. V betonarni se s podporo tehnologije DT poleg običajnih projektiranih oziroma predpisanih betonov proizvajajo tudi nizkoogljični betoni. Na ta način betonarna Nagonje 2.0 ne le dosega višje standarde trajnostne gradnje, ampak postavlja nove temelje za ekonomsko in okolju prijaznejšo proizvodnjo betona, ki lahko sledi zahtevam trajnostnega razvoja in trajnostne gradnje.

5 SKLEP

Pričujoči članek je predstavil najnovejše stanje tehnike na področju naprednega upravljanja betonarn s podporo DT. Pri tem se je osredotočil na povezovanje senzorskih podatkov, spremljanje procesov v realnem času, predvidljivega vzdrževanja, simulacij delovanja in usposabljanja v kontekstu razvoja Industrije 4.0. Podan je bil reprezentativen primer dejanske srednje velike betonarne, podprte z DT, kjer je bil prikazan napredek pri upravljanju takega proizvodnega obrata. Že pri obravnavi področja upravljanja betonarn se je pokazalo, da tehnologija DT prinaša številne koristi in izzive gradbenemu sektorju, ki pregovorno izkazuje nižjo produktivnost in višje stroške proizvodnje v primerjavi z večino drugih področij industrije. Koristi uporabe DT lahko v številnih primerih pomembno presegajo izzive njihove implementacije, kar je razvidno tudi iz predstavljenega primera. Vendar je treba poudariti, da je vsaka uvedba DT specifična in je njen uspeh, vključno z donosnostjo naložbe, močno odvisen od različnih dejavnikov, kot so velikost podjetja, raven obstoječe digitalne infrastrukture, začetni vložki ter stopnja pripravljenosti za organizacijske spremembe.

Virtualno modeliranje in simulacije s podporo DT omogočajo preizkušanje različnih scenarijev v varnem, nadzorovanem okolju, s čimer se precej izboljšajo osnove za kakovostno odločanje in zmanjšajo možnosti za napake pri dejanskih situacijah. DT izboljšujejo preglednost delovanja in predvidljivost vzdrževanja fizičnih obratov, sistemov ali procesov ter povečajo njihovo operativno učinkovitost, kar posledično vodi do znižanja stroškov in doseganja višjih nivojev kakovosti poslovanja. Poleg ekonomskih, tehničnih in operativnih koristi, ki so v

fokusu podjetij, DT omogočajo tudi boljše varovanje okolja. To je še posebno pomembno z vidika svetovnih prizadevanj za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov in spodbujanja trajnostnega razvoja.

Uvedba DT zahteva določeno spremembo v načinu razmišljanja in dela, kar v tradicionalno usmerjeni panogi, kot je gradbeništvo, lahko naleti na odpor. Zato je za uspešno vpeljevanje sodobnih tehnologij v prakso ključno postopno razvijati digitalne kompetence v podjetju, sistematično usposabljanje zaposlene in prilagajati delovne procese v sodelovanju z njimi. Za podjetja v gradbeni panogi je bistveno, da se prilagajajo spremembam vseobsegajoče digitalizacije, da ohranjajo svojo konkurenčnost v hitro razvijajočem se industrijskem okolju. Vsekakor pa nadaljnji razvoj in širša uporaba DT v gradbeništvu terjata tesno sodelovanje med raziskovalci, strokovnjaki iz industrije in regulatorji. Za celovito izkoriščanje velikega potenciala te inovativne digitalne tehnologije so ključne nadaljnje raziskave in razvoj na področju standardizacije podatkovnih formatov, protokolov in različnih API-jev ter vzpostavitev jasnih pravnih in etičnih smernic.

Na podlagi izvedene analize znanstvenih virov in predstavljenega primera uvedbe tehnologije DT v betonarni Nagonje je mogoče jasno opredeliti, da DT predstavljajo kvalitativni preskok v načinu upravljanja betonarn, ki presega tradicionalne vzdrževalne prakse. V nasprotju z zgodovinsko uveljavljenim pristopom, ki temelji na statičnih servisnih intervalih, tehničnih navodilih proizvajalcev in subjektivni presoji vzdrževalnega osebja, tehnologija DT omogoča prehod v podatkovno podprto, prilagodljivo in trajnostno naravnano vzdrževanje.

Osrednji prispevek članka je v oblikovanju in demonstraciji modela naprednega vzdrževanja, ki temelji na realnem času, senzoriki, historičnih trendih ter virtualni simulaciji delovanja ključnih komponent obrata. Tak model omogoča dinamično določanje servisnih posegov glede na intenzivnost rabe, temperaturne obremenitve, mehanske vibracije in druge obratovalne parametre, kar bistveno povečuje natančnost vzdrževalnega odločanja, zmanjšuje nepotrebne posege ter prispeva k ciljno usmerjeni rabi virov v duhu krožnega gospodarstva. Ob tem DT deluje kot aktivni člen v optimizaciji energetske učinkovitosti, zmanjšanju materialnih izgub ter stalnem zagotavljanju kakovosti končnega produkta.

Primer iz betonarne Nagonje dokazuje, da je z DT mogoče vzpostaviti celovito digitalno zrcaljenje vseh ključnih operacij, vključno z doziranjem, mešanjem, skladiščenjem in transportom surovin. Integracija BIM-modela, IoT-senzorjev in analitike v realnem času omogoča sprotno spremljanje in prilagajanje parametrov ter izvedbo simulacij različnih scenarijev delovanja brez vpliva na dejansko proizvodnjo. Na podlagi dobljenih rezultatov je mogoče oblikovati smernice za nadaljnjo digitalno transformacijo betonarn, ki vključujejo standardizacijo podatkovnih tokov, interoperabilnost med sistemi več obratov ter vzpostavitev kibernetično varnega okolja. Ključno vlogo pri tem bo igrala nadaljnja integracija AI za samodejno optimizacijo proizvodnih in vzdrževalnih procesov.

Predstavljeni pristop ne potrjuje zgolj tehnološke izvedljivosti, temveč nakazuje tudi smernice za sistematičen prenos DT v širšo betonsko industrijo. Na podlagi praktičnih rezultatov je mogoče oblikovati metodološki okvir za postopno digitalno

transformacijo betonarn, ki vključuje standardizacijo podatkovnih vmesnikov, usposabljanje kadra in postopno nadgradnjo obstoječe infrastrukture. Tako DT postaja ne le orodje za tehnično optimizacijo, temveč strateški element dolgoročne konkurenčnosti in trajnostnega razvoja proizvodnih sistemov v gradbeni industriji.

6 ZAHVALA

Raziskovalni program št. P2-0129 je sofinancirala Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna. Del raziskave je bil izveden v okviru projektov Betonarna Nagonje 2.0 in GRAD 4.0, sofinanciranih s strani Republike Slovenije in Evropske unije prek Mehanizma za okrevanje in odpornost – Next-GenerationEU.

7 LITERATURA

Alshammari, K., Beach, T., Rezgui, Y., Cybersecurity for Digital Twins in the Built Environment: Current Research and Future Directions, *Journal of Information Technology in Construction*, 26, <https://doi.org/10.36680/J.ITCON.2021.010>, 2021.

Arbizzani, E., Cancelli, E., Clemente, C., Cumo, F., Giofrè, F., Giovenale, A.M., Palme, M., Paris, S., Technological Imagination in the Green and Digital Transition, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-29515-7>, 2023.

Baduge, S.K., Thilakarathna, S., Perera J.S., Arashpour M., Sharafi P., Teodosio, B., Shringi A., Mendis P., Artificial Intelligence and Smart Vision for Building and Construction 4.0: Machine and Deep Learning Methods and Applications, *Automation in Construction*, 141, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440>, 2022.

Begić, H., Galić, M., Klanšek, U., Active BIM System for Optimized Multi-Project Ready-Mix-Concrete Delivery, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 31, <https://doi.org/10.1108/ECAM-11-2022-1064>, 2024.

Bhamare, D., Zolanvari, M., Erbad, A., Jain, R., Khan, K., Meskin, N., Cybersecurity for Industrial Control Systems: A survey, *Computers and Security*, 89, <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101677>, 2020.

Bischoff, J., Taphorn, C., Wolter, D., Braun, N., Fellbaum, M., ... Scheffler, D., Erschließen der Potentiale der Anwendung von 'Industrie 4.0' im Mittelstand, Agiplan GmbH, Fraunhofer IML, ZENIT GmbH, 2015.

Boss B., Malakuti S., Lin S. W., Usländer T., Clauer E., Hoffmeister M., Stojanovic L., Digital Twin and Asset Administration Shell Concepts and Application in the Industrial Internet Industrie 4.0 Consortium & Plattform.. https://www.iiconsortium.org/pdf/Digital-Twin-and-Asset-Administration-Shell-Concepts-and-Application-Joint-Whitepaper.pdf?utm_source=chatgpt.com, dostop: 2025, 2021.

Boštjančič Pulko I., Božič G., Čaleta D., Čaleta M., Jakopin B., Jerina P., Mravljak M., Obrecht M., Priročnik kibernetične varnosti, Urad Vlade Republike Slovenije za informacijsko varnost (UR-SIV), 2025.

- Broo, J., Schooling, J., The Adoption of Digital Twins: Enablers, Challenges and Benefits, Proceedings of the 58th Hawaii International Conference on System Sciences, <https://hdl.handle.net/10125/109736>, 2023.
- Chen, C., Fu, H., Zheng, Y., Tao, F., The Advance of Digital Twin for Predictive Maintenance: The Role and Function of Machine Learning, Journal of Manufacturing Systems, 71, 581-594, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.10.010>, 2023.
- Dai, C., Cheng, K., Liang, B., Zhang, X., Liu, Q., Kuang, Z., Digital Twin Modeling Method Based on IFC Standards for Building Construction Processes, Frontiers in Energy Research, 12, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1334192>, 2024.
- Drobnyi, V., Hu, Z., Fathy, Y., Brilakis, I., Construction and Maintenance of Building Geometric Digital Twins: State of the Art Review, Sensors, 23(9), <https://doi.org/10.3390/s23094382>, 2023.
- Držečnik, M., Klanšek, U., Advances and Challenges of Enhancing Operational Efficiency and Maintenance Protocols in the Construction Industry by Combining DT, AI, and Optimization, L. Carvalho, L. Reis, A. Neves de Almeida Baptista Figueiredo, & N. Russo (Eds.), Leveraging Technology for Organizational Adaptability (pp. 225-284). IGI Global Scientific Publishing, <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6045-3.ch011>, 2025a.
- Držečnik, M., Klanšek, U., Hartner Zupančič, T., Cajzek, R., Improving Concrete Plant Operations and Maintenance with Digital Twin Technology, 33rd International Conference on Organization and Technology of Maintenance (OTO 2024), Springer, 1242, https://doi.org/10.1007/978-3-031-80597-4_13, 2025b.
- Grieves, M., Origins of the Digital Twin Concept, Florida Institute of Technology, NASA, Working Paper, https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept, 2016.
- Han, B., Habibi, M. A., Richerzhagen, B., Schindhelm, K., Zeiger, F., Lamberti, F., Schotten, H. D., Digital Twins for Industry 4.0 in the 6G Era, IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 4, 820-835, <https://doi.org/10.1109/OJVT.2023.3325382>, 2023.
- Jahangir, M., Solihin, W., Khan, N., A review of drivers and barriers of Digital Twin adoption in building project development processes, Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 29, 141-178, <https://www.itcon.org/paper/2024/8>, 2024.
- Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., Deep Learning for Manufacturing Sustainability: Models, Applications in Industry 4.0 and Implications, International Journal of Information Management Data Insights, 2, <https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2022.100107>, 2022.
- Javaid M., Haleem A., Suman R., Digital Twin Applications Toward Industry 4.0: A Review, Cognitive Robotics 3, 71-92, <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.003>, 2023.
- Kosse, S., Vogt, O., Wolf, M., König, M., Gerhard, D., Digital Twin Framework for Enabling Serial Construction, Frontiers in Built Environment, 8, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.864722>, 2022.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W., Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification, IFAC-PapersInLine, 51, 1016-1022, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>, 2018.
- Nguyen, T. D., Adhikari, S., The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review, Sustainability, 15, <https://doi.org/10.3390/su151310462>, 2023.
- Noor-A-Rahim, M., John, J., Firyaguna, F., Sherazi, H. H. R., Kushch, S., Vijayan, A., ... Armstrong, E., Wireless Communications for Smart Manufacturing and Industrial IoT: Existing Technologies, 5G and Beyond, Sensors, 23, <https://doi.org/10.3390/s23010073>, 2023.
- Omrany, H., Al-Obaidi, K.M., Husain, A., Ghaffarianhoseini, A., Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies and Future Directions, Sustainability 2023, 15, <https://doi.org/10.3390/su151410908>, 2023.
- OPC Foundation, OPC UA – Interoperability for Industrie 4.0 and the Internet of Things (IoT), OPC Foundation, Industrial Internet Consortium, <https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2023/05/OPC-UA-Interoperability-For-Industrie4-and-IoT-EN.pdf>, dostop: 12.7.2025, 2023.
- Opoku, D. G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., Digital Twin Application in the Construction Industry: A Literature Review, Journal of Building Engineering, 40, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102726>, 2021.
- Pan, Y., Zhang, L., Roles of Artificial Intelligence in Construction Engineering and Management: A Critical Review and Future Trends, Automation in Construction, 122, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>, 2021.
- Raj, N., Analysis of Fog Computing: An Integrated Internet of Things (IoT) Fog Cloud Infrastructure for Big Data Analytics and Cyber Security, International Conference on Artificial Intelligence and Smart Communication, 1215-1219, <https://doi.org/10.1109/AISC56616.2023.10085681>, 2023.
- Rathore, M. M., Shah, S. A., Shukla, D., Bentafat, E., Bakiras, S., The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and Opportunities, IEEE Access, 9, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060863>, 2021.
- Revolti, A., Gualtieri, L., Pauwels, P., Dallasega, P., From Building Information Modeling to Construction Digital Twin: a Conceptual Framework, Production and Manufacturing Research, 12, <https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2387679>, 2024.
- Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H. S., Girolami, M., Construction with Digital Twin Information Systems, Data-Centric Engineering, 1, <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>, 2020.
- SIST EN 206:2013+A1:2016, Beton, Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2016.

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

Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., Nee, A. Y. C., Digital Twin in Industry: State-of-the-Art, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15, 2405-2415, <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>, 2019.

Torzoni, M., Tezzele, M., Mariani, S., Manzoni, A., Willcox, K. E., A Digital Twin Framework for Civil Engineering Structures, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 418, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116584>, 2024.

Uhlemann, T. H. J., Lehmann, C., Steinhilper, R., The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0, In Procedia CIRP, 61, 335-340. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.152>, 2017.

Yang, C., Shen, W., Wang, X., The Internet of Things in Manufacturing: Key Issues and Potential Applications, IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine, 4, 6-15. <https://doi.org/10.1109/msmc.2017.2702391>, 2018.

van Dinter, R., Tekinerdogan, B., Catal, C., Predictive Maintenance Using Digital Twins: A Systematic Literature Review, Information and Software Technology, 151, <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107008>, 2022.

X., Liu, C., Song, X. & Cui, X., Development of an Internet-of-Things-Based Technology System for Construction Safety Hazard Prevention, Journal of Management in Engineering, 38, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0001035](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0001035), 2022.

VDMA, Industrie 4.0 Readiness, IMPULS-Stiftung für den Maschinenbau, den Anlagenbau und die Informationstechnik, 2015, <https://impuls-stiftung.de/wp-content/uploads/2022/05/Industrie-4.0-Readiness-deutsch.pdf>.

Wang, X., Liu, C., Song, X., Cui, X., Development of an Internet-of-Things-Based Technology System for Construction Safety Hazard Prevention, Journal of Management in Engineering, 38, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0001035](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0001035), 2022.

Wang, Y., Research on Computer Vision Application for Safety Management in Construction. Theoretical and Natural Science, 30, 232-242. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/30/20241124>, 2024.

Weerapura, V., Sugathadasa, R., De Silva, M. M., Nielsen, I., Thibbotuwawa, A. Feasibility of Digital Twins to Manage the Operational Risks in the Production of a Ready-Mix Concrete Plant. Buildings, 13(2), 447, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13020447>

Werner, A., Zimmermann, N., Lentjes, J., Approach for a Holistic Predictive Maintenance Strategy by Incorporating a Digital Twin, Procedia Manufacturing, 39, 1743-1751. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.265>, 2019.

Zupančič Hartner, T., Cajzek, R., Povečanje proizvodnih zmogljivosti novih betonskih mešanic z izgradnjo nove betonarne s sodobno reciklirano napravo, GIC GRADNJE d.o.o., Končno poročilo o investiciji, s prilogami, št. pogodbe JR INVEST 303-1-12/2022/6, oktober, 2024.

asist. dr. Tilen Turk, mag. inž. kem. inž.

tilen.turk@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



doc. dr. Petra Štukovnik, univ. dipl. inž. geol.

petra.stukovnik@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



prof. dr. Marjan Marinšek, univ. dipl. inž. kem. tehnol.

marjan.marinsek@fkkt.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo,
Večna pot 113, 1000 Ljubljana



prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.

violeta.bokan-bosiljkov@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek

UDK/UDC: 666.123.4:620.284:691.32

VPLIV TEŽKIH KOVIN IZ RECIKLIRANEGA AGREGATA NA LASTNOSTI BETONA

IMPACT OF HEAVY METALS FROM RECYCLED AGGREGATE ON CONCRETE PROPERTIES

Povzetek

Zeleni prehod v gradbeništvu med drugim zahteva zmanjšanje ogljičnega odtisa betona, ki ostaja najbolj uporabljan gradbeni material na svetu. Poleg že uveljavljene uporabe sekundarnih surovin pri proizvodnji cementa se vse bolj raziskuje tudi uporaba recikliranega agregata kot delne ali popolne zamenjave naravnega kamenega materiala. Recikliran agregat lahko izvira iz različnih industrijskih procesov, zato pogosto vsebuje nečistoče, ki vplivajo na hidratacijske procese cementa. To se je pokazalo pri recikliranem agregatu iz rudarske industrije, kjer prisotne orudene težke kovine zavirajo vezanje cementne matrice in upočasnijo razvoj trdnosti. V raziskavi smo recikliran agregat in njegov vpliv na lastnosti cementnih kompozitov sistematično okarakterizirali, določili njegovo mineraloško sestavo, spremljali spremembe hitrosti ultrazvočnih valov in temperature med vezanjem in strjevanjem cementnih kompozitov z različnimi deleži recikliranega agregata ter določili časovni razvoj njihove tlačne in upogibne trdnosti. Na podlagi analize rezultatov smo opredelili mejno koncentracijo recikliranega agregata, ki je še primerna za uporabo v gradbeništvu.

Ključne besede: recikliran agregat, težke kovine, beton, vezanje betona.

Summary

The green transition in construction requires, among other measures, reducing of the carbon footprint of concrete, which remains the most widely used construction material worldwide. In addition to the well-established use of secondary raw materials in cement production, increasing attention is being paid to the use of recycled aggregate as a partial or complete replacement for natural stone aggregate. Since recycled aggregate may originate from various industrial processes, it often contains impurities that affect the hydration processes of cement. This has been observed in recycled aggregate from the mining industry, where ore-bound heavy metals delay the cement matrix setting and slow down the strength development. In this study, recycled aggregate and its influence on the properties of cement composites were systematically characterized. We determined its mineralogical composition, monitored changes in ultrasonic pulse velocity and temperature during the setting and hardening of cement composites with different recycled aggregate contents, and measured the time-dependent development of compressive and flexural strength. Based on the analysis of the results, we identified the threshold concentration of recycled aggregate that is suitable for use in construction.

Key words: recycled aggregate, heavy metals, concrete, concrete setting.

1 UVOD

Proizvodnja betona, predvsem pridobivanje njegovih primarnih surovin: cementa, agregata in vode, zaradi široke uporabe tega materiala pomembno vpliva na okolje ter zahteva posebno pozornost pri varovanju naravnih virov [Mehta, 2013]. Evropske smernice predvidevajo zmanjšanje ogljičnega odtisa grajenega okolja, zato se v gradbeništvu vedno bolj uporabljajo sekundarne surovine oziroma reciklirani materiali [Nearly-zero energy and zero-emission buildings – European Commission, n.d.]. Uporaba recikliranih materialov je v gradbeništvu že dolgoletna praksa. Pri proizvodnji cementa se uporabljajo surovine, ki izkazujejo vezivne lastnosti, na primer granulirana plavžna žlindra, filterjski pepel in mikro silika. Omenjeni reciklirani materiali so za uporabo v mešanih cementih primerno regulirani s standardi, ki predpisujejo njihove kemijske zahteve. S tem se prepreči njihov morebitni negativni vpliv na mehanske lastnosti in obstojnost betona.

V zadnjem času so se z namenom prehoda na ogljično nevtralni beton in hkrati celovite izrabe virov v raziskavah in celo na trgu pojavili številni reciklirani agregati. Reciklirani agregati so lahko po nastanku in kemijski sestavi različni. Med reciklirane agregate sodijo drobljene ruševine betonskih in zidanih konstrukcij ter kamniti materiali rudarske industrije, ki nimajo zadostne ekonomske vrednosti [Xing, 2022]. Tehnološki postopki ekstrakcije kovin iz rude se razlikujejo glede na vrsto kamnine in vrsto kovine, pri čemer procesi praviloma temeljijo na oksidacijskih in redukcijskih reakcijah. Ruda se v naravi pojavlja kot zmes različnih mineralov, ki med seboj različno reagirajo, zato ekstrakcija kovin nikoli ni popolnoma učinkovita. Med postopki ekstrakcije je ruda izpostavljena številnim kemikalijam, ki omogočajo ločevanje mineralnih faz in pridobivanje zadostne količine ciljnih kovin. Pri tem pa nastajajo velike količine rudarskih odpadkov, ki pogosto vsebujejo proste težke kovine. Te so okoljsko problematične, saj so bioakumulativne in lahko delujejo nevrotoksično na ljudi in živali [Tam, 2018]. Številne študije [Chen, 2018; Giergiczny, 2008] so preučevale uporabo betona za sanacijo tal, kontaminiranih s težkimi kovinami. Beton učinkovito imobilizira težke kovine z njihovo adsorpcijo na C-S-H-gel, medtem ko njegova trdna matrica omogoča preprostejše odstranjevanje onesnaženih materialov iz okolja ter njihovo nadaljnjo obdelavo v predelovalnih obratih. Študije [Chen, 2018; Giergiczny, 2008], ki obravnavajo uporabo betona pri remediaciji tal, ne poročajo o vplivu težkih kovin na hitrost vezanja betona. Ugotavljajo pa, da imajo prisotne težke kovine visoko afiniteto do kalcijevih ionov, zato v njihovi prisotnosti prihaja do zakasnitve vezanja in posledično počasnejšega razvoja trdnosti betona [Garg, 2017; Keppert, 2018; Krishnaraj, 2020; Massarweh, 2021; Silatikunsatid, 2018].

Agregat praviloma v betonu predstavlja večinski prostorninski delež, zato mora biti njegova kakovost skladna s standardi. Ker številne študije [Katayama, 2004, 2010; Štukovnik, 2015, 2019; Turk, 2025] izpostavljajo reaktivnost agregata v alkalnem okolju, se postavlja vprašanje morebitnega vpliva recikliranega agregata kot sekundarne surovine s prisotnimi težkimi kovinami na začetek vezanja in razvoj trdnosti betona. V ta namen smo recikliran agregat iz rudnika svinca in cinka sistematično okarakterizirali v skladu s standardi za agregate, določili njegovo mineraloško sestavo ter opredelili koncentracijo recikliranega agregata, ki bi lahko bila primerna za uporabo pri pripravi betona.

2 MATERIALI IN METODE

Za namen preiskave smo izbrali dva agregata – referenčni agregat R in recikliran agregat S. Agregata sta bila frakcije 0/4.

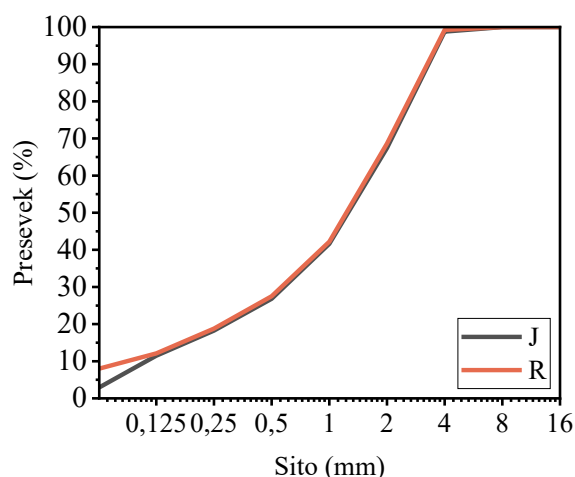
2.1 Prostorninska masa, vodovpojnost in zrnavostna sestava

Prostorninska masa in vodovpojnost izbranih agregatov je bila določena skladno s standardom SIST EN 1097 [SIST, 2011b]. Agregatoma smo določili zrnavostno sestavo skladno s standardom SIST EN 933-1 [SIST, 2012].

Prostorninska masa in vodovpojnost sta prikazani v preglednici 1. Agregata nista vsebovala humoznih delcev. Njuna zrnavostna sestava je bila primerljiva in je prikazana na sliki 1.

Agregat	Prostorninska masa (kg/m ³)	Vodovpojnost (%)	Humozni delci
S	2730	0,7	NE
R	2848	0,5	NE

Preglednica 1. Fizikalne lastnosti agregatov.



Slika 1. Zrnavostna sestava agregatov.

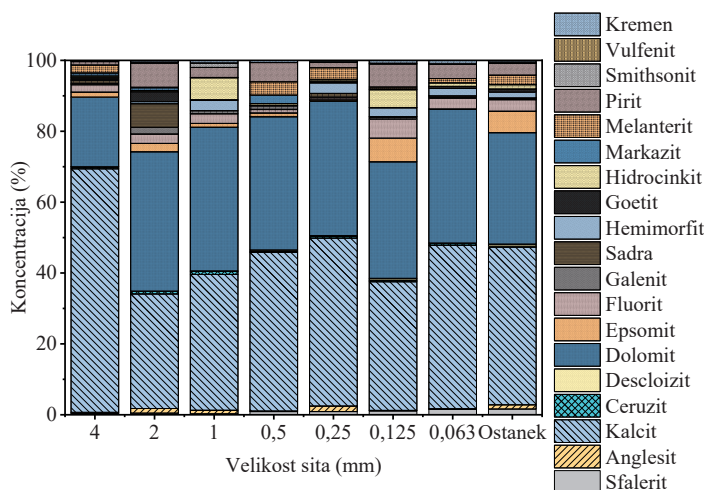
Na podlagi literature [Y. Wang, 2023] smo določili tudi pH omenjenih agregatov. Ugotovili smo, da je pH agregata S bil nekoliko nižji v primerjavi z agregatom R. pH-vrednost agregata S je namreč znašala 8,1, medtem ko je pH referenčnega agregata znašala 9,1.

2.2 Mineraloška sestava agregatov

Za določitev mineraloške sestave agregatov smo uporabili praškovno rentgensko difrakcijo Bruker PANalytical X'Pert PRO MPD z radiacijo CuK α 1 ($\lambda=1,54$). Difraktogrami so bili posneti

v območju 2θ 10°–80°. Difraktogrami smo kvantitativno analizirali s programom Bruker Topas, ki temelji na Rietveldovi metodi.

Agregat R je vseboval 99,5 % minerala dolomit in 0,5 % minerala kalcit. V agregatu S sta prevladovala minerala dolomit in kalcit. Njuna koncentracija se je spreminjala z velikostjo zrn. Kremena je bilo malo, največ 0,5 %. Agregat S je poleg teh treh mineralov vseboval tudi minerale, ki so vsebovali karbonatne, sulfatne in sulfidne skupine. Kovinski kationi omenjenih mineralov so bili po večini železovi, svinčevi in cinkovi. Koncentracije mineralov za različne velikosti zrn so prikazane na sliki 2.



Slika 2. Mineraloška sestava agregata S za različne velikosti zrn.

2.3 Priprava cementnih mešanic

Cementne mešanice smo pripravili s čistim portlandskim cementom (CEM I, glede na standard SIST EN 197 [SIST, 2011a]). Prostorninski delež agregata v mešanici je bil 60 %. Vodocementno razmerje je bilo 0,45, ustrezna konsistenca sveže mešanice pa je bila dosežena z uporabo superplastifikatorja (0,6 %). Pripravili smo mešanice različnih koncentracij recikliranega agregata (agregat S), in sicer 0 %, 25 %, 50 %, 75 % in 100 %. Pripravljenim mešanicam smo določili konsistenco z razlezom po SIST EN 1015-3 [SIST, 2001] in prostorninsko maso v svežem stanju po SIST EN 1015-6 [SIST, 1999] (Preglednica 2).

Označevanje mešanic sledi naslednjemu pravilu:

- oznaki R in S označuje prisotnost referenčnega (R) in sekundarnega (S) agregata;
- številka v nadaljevanju (na primer _25) označuje delež agregata S v mešanici.

Iz rezultatov v preglednici 2 vidimo, da se z večanjem deleža agregata S večja konsistenca sveže mešanice, pri drugače enaki sestavi. Povečanje konsistence pri sestavi S_100, ki ni vsebovala referenčnega agregata, je rezultiralo v segregaciji mešanice, zato smo znižali delež superplastifikatorja za 0,15 % in s tem dosegli približno enak razlez, kot pri sestavi RS_75.

2.3.1 Določitev začetka vezanja z ultrazvokom

Strukturiranje cementnih kompozitov v zgodnji fazi je izrazito časovno odvisno in poteka v več stopnjah glede na nastajanje produktov hidratacije cementa. Časovni potek hitrosti vzdolžnih ultrazvočnih (UZ) valov neposredno odraža količino celotne in povezane trdne faze v mikrostrukturi: ko ta narašča zaradi hidratacije, narašča tudi hitrost UZ-valov. Zato je hitrost vzdolžnih UZ-valov odličen kazalnik za spremljanje vezanja in zgodnjega strjevanja cementnih kompozitov [Serdar, 2020]. Najbolj neposreden pristop določitve začetka vezanja cementnega kompozita je določitev meje za hitrost vzdolžnih UZ-valov. V različni literaturi [Serdar, 2020] so za začetek vezanja predlagane hitrosti med 800 in 2700 m/s; širok razpon odraža vpliv merilne opreme in sestave materiala. Pri večjem deležu agregata in/ali prisotnosti večjih kamnitih zrn so za začetek vezanja pogosto navedene nižje hitrosti, čeprav več agregata praviloma dvigne absolutno hitrost zaradi večje prostornine trdne faze [Serdar, 2020]. Tudi oblika krivulje hitrost UZ-valov/čas je odvisna od sestave cementnega kompozita: sistemi z visokim deležem agregata pogosto izkazujejo tri faze, čiste cementne paste pa pet faz [Serdar, 2020]. Zaradi prisotnosti agregata v naših mešanicah bomo kot oceno začetka vezanja cementnega kompozita izbrali čas pri hitrosti UZ-valov enaki 800 m/s, kot je predlagano v [Lee, 2004] za malto s CEM I in vodocementnim razmerjem 0,5. Meritve ultrazvočnih valov smo izvajali v kalupu znanih dimenzij, ki je imel odprtine za vstavitev ultrazvočnih sond. Med testom morajo biti sonde poravnane, poznati moramo tudi njihovo razdaljo, hkrati pa morajo med testom biti v tesnem stiku s preizkušancem. Za namen določitve začetka vezanja z ultrazvokom smo uporabili toplotno izoliran kalup z notranjimi dimenzijami 10 cm x 10 cm x 10 cm. Interval merjenja ultrazvočnih valov je bil

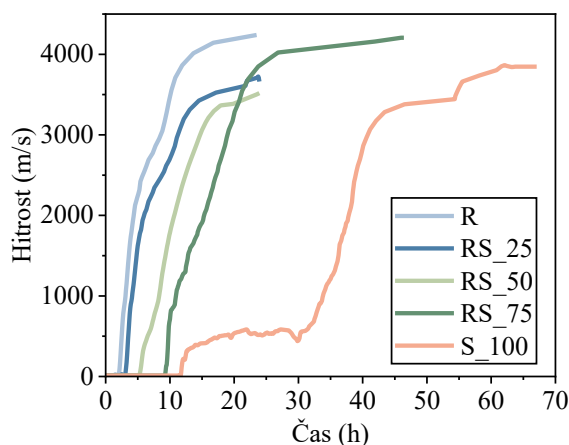
Mešanica	Vodocementno razmerje	Superplastifikator (%)	Razlez (mm)	Prostorninska masa (kg/m ³)
R	0,45	0,6	131,5	2291
RS_25	0,45	0,6	152,5	2252
RS_50	0,45	0,6	173,5	2290
RS_75	0,45	0,6	214,0	2361
S_100	0,45	0,45	196,5	2260

Preglednica 2. Lastnosti cementnih mešanic v svežem stanju.

nastavljen na pet minut, uporabili smo longitudinalne sonde Proceq 54 kHz in procesirno enoto Proceq Pundit PL-200. Preiskave so potekale v klimatiziranem prostoru s temperaturo 21°C.

Krivulje sovisnosti med hitrostjo UZ-valov in časom so prikazane na sliki 3. Ugotovimo lahko, da se z večanjem prostorninskega deleža recikliranega agregata S podaljšuje čas vezanja cementne malte. Najmanjši vpliv na začetek vezanja je imela sestava s 25-odstotnim prostorninskim deležem agregata S, ki je začela vezati po 3,9 ure, kar je za 1,1 ure več kot pri referenčni mešanici R (2,8 ure). Sledile so mešanice RS_50, RS_75 in S_100 z začetki vezanja 7,7 ure, 10,1 ure in 32,9 ure. Tvorba metastabilne faze, ki slabo prevaja ultrazvočne valove, je bila opažena pri mešanici S_100 in je bila prisotna vse do 31,5 ure. Nakloni krivulj hitrost/čas se od začetka vezanja naprej pa vse do hitrosti 3000 m/s med seboj pomembno ne razlikujejo, iz česar lahko sklepamo, da onesnaževala v recikliranem agregatu nimajo bistvenega vpliva na mehanizem hidratacije cementa.

Poleg časa pri hitrosti UZ-valov 800 m/s (V800m/s) smo ocenili še čas pri prevojnih točkah PT1 in PT2, ki jih določimo s pomočjo odvoda hitrosti po času [Serdar, 2020] in sta dobri oceni začetka in konca vezanja cementnega kompozita. Rezultati, prikazani v preglednici 3, potrjujejo, da je hitrost 800 m/s za naše sestave primerna izbira za oceno začetka vezanja, saj se pripadajoči časi od časov PT1 razlikujejo za manj kot 10 %. Izjema je sestava RS_50, kjer je razlika 13 %.



Slika 3. Sovisnost med hitrostjo vzdolžnih UZ-valov in časom za pet sestav cementnih malt.

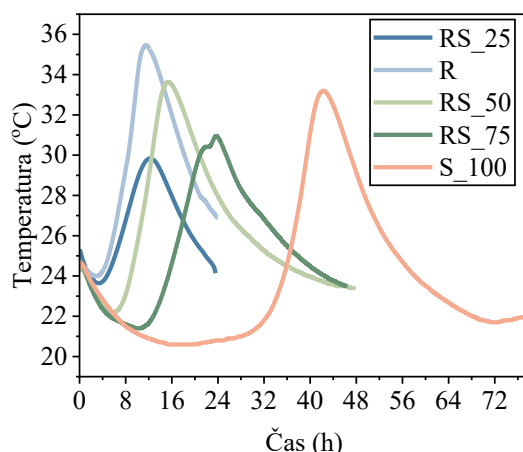
2.3.2 Meritev temperature zaradi hidratacije cementa

Meritve sprememb temperature zaradi hidratacije cementa smo izvajali z namenom validacije ultrazvočnih meritev. Uporabili smo Pt/Cd-termočlene, interval meritev je bil nastavljen na 2 minuti. Mešanica je bila vgrajena v toplotno izoliran kalup enakih dimenzij kot pri ultrazvočnih meritvah. Termočlen smo vstavili v center mešanice, saj smo tam pričakovali najvišjo temperaturo. Tudi te preiskave so potekale v klimatiziranem prostoru s temperaturo 21°C.

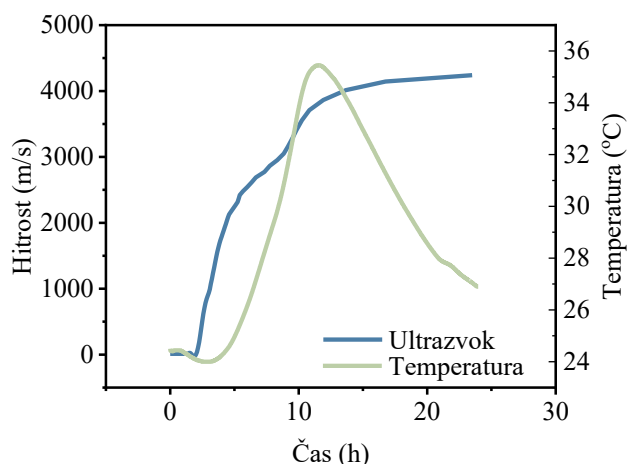
Razvoj temperature zaradi hidratacije cementa je prikazan na sliki 4. Ugotovimo lahko, da razvoj temperature dobro sledi ultrazvočnim meritvam (slika 5).

Začetek naraščanja temperature po koncu latentne faze (Tz) je bilo pri mešanici R, RS_25, RS_50, RS_75 oziroma S_100 pri času 3,67 ure, 4,17 ure, 6,9 ure, 12,13 ure oziroma 31,45 ure (preglednica 3). Ti časi se nekoliko razlikujejo od časov ocenjenega začetka vezanja V800m/s in PT1. Vseeno pa predstavljajo dovolj dobre ocene začetka vezanja v primeru, da preiskav z ultrazvokom ni mogoče opraviti. V nadaljevanju smo določili še čas Tk, pri katerem se je hitrost naraščanja temperature upočasnila (odvod temperature po času se je zmanjšal). Rezultati so podani v preglednici 3 in kažejo, da je čas pri Tk dobra ocena konca časa PT2, če preiskav z ultrazvokom ni mogoče opraviti, na primer zaradi nerazpoložljivosti ustrezne opreme ali tehničnih omejitev na terenu.

Ugotovimo lahko, da prisotna onesnaževala pomembno vplivajo na čas začetka vezanja, saj se z večanjem deleža agregata S daljša čas začetka vezanja. Poleg tega se podaljša tudi čas vezanja, v katerem preide mešanica iz plastičnega v trdno agregatno stanje. Če kot čas vezanja upoštevamo tako PT2-PT1



Slika 4. Razvoj temperature cementnih mešanic.



Slika 5. Spremljanje razvoja mikrostrukture z UZ-meritvami ter meritvami temperature – primer za sestavo R.

kot TK-Tz, lahko ugotovimo, da ima sestava R čas vezanja približno 6,5 ure, RS_25 med 5,6 in 7,1 ure, RS_50 med 7,1 in 8,8 ure, medtem ko ima mešanica S_100 čas vezanja med 7,9 in 9,1 ure.

	V800m/s (h)	PT1 (h)	PT2 (h)	PT2-PT1 (h)	Tz (h)	Tk (h)	Tk-Tz (h)
R	2,8	3,0	9,5	6,5	3,7	10,3	6,6
RS_25	3,9	4,0	11,1	7,1	4,2	9,8	5,6
RS_50	7,7	6,8	15,6	8,8	6,9	14,0	7,1
RS_75	10,1	10,6	18,8	8,2	12,1	20,6	8,5
S_100	32,9	31,1	39,0	7,9	31,5	40,6	9,1

V800m/s – čas pri hitrosti vzdolžnih UZ-valov 800 m/s
PT1 – čas prve prevojne točke na diagramu hitrost/čas (lokalni minimum)

PT2 – čas zadnje prevojne točke na diagramu hitrost/čas (lokalni maksimum)

Tz – čas na začetku naraščanja temperature (po indukcijski dobi)

Tk – čas na koncu največje hitrosti naraščanja temperature

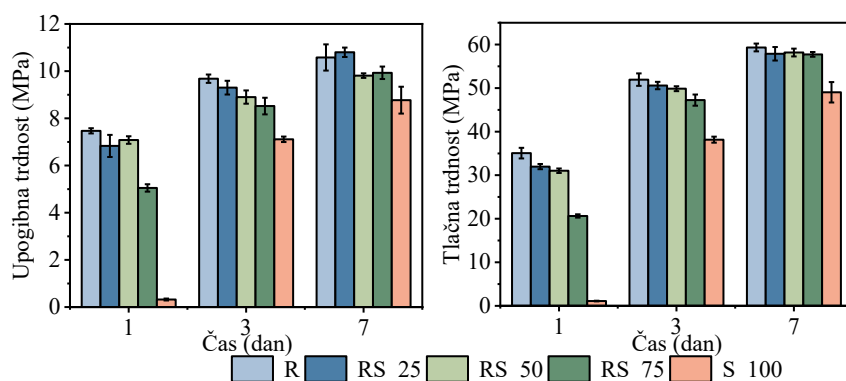
Preglednica 3. Ocenjeni časi začetka in konca vezanja ter trajanje vezanja.

2.3.3 Razvoj tlačne in upogibne trdnosti

Tlačno in upogibno trdnost smo preverjali po 1, 3 in 7 dneh skladno s standardom SIST EN 1015-11 [SIST, 2020]. Upogibno trdnost smo določali na stiskalnici MTS Exceed Model E43 s

Upogibna in tlačna trdnost cementnih kompozitov sta predstavljeni na sliki 5. Najvišjo upogibno trdnost po enem dnevu je imela referenčna mešanica R z vrednostjo $7,5 \pm 0,1$ MPa. Sledili sta ji mešanici RS_25 in RS_50. Višji koncentraciji recikliranega agregata sta rezultirali v bistveno manjši upogibni trdnosti pri sestavi RS_75 in vrednosti blizu ničle za S_100. Po treh dneh je upogibna trdnost kompozitov R in RS_25 primerljiva, medtem ko je pri sestavah RS_50, RS_75 in RS_100 povprečna upogibna trdnost dosegala za 8 %, 12 % in 27 % manjše vrednosti v primerjavi z referenčno mešanico. Po sedmih dneh sta imeli sestavi R in RS_25 enako upogibno trdnost (okrog 11 MPa), medtem ko sta sestavi RS_50 in RS_75 dosegli nekoliko nižjo vrednost (9,5 MPa). Sestava S_100 je po sedmih dneh še vedno dosegala najnižjo upogibno trdnost (9 MPa).

Podobna razmerja med trdnostmi smo ugotovili tudi pri tlačnih preiskavah. Mešanica R je po enem dnevu dosegla povprečno tlačno trdnost 35 MPa, sestavi RS_25 in RS_50 pa 32 MPa. Mešanica RS_75 je dosegla tlačno trdnost 20 MPa, sestava S_100 pa po enem dnevu ni mogla prevzeti obremenitve. Po treh dneh je bila vrednost tlačne trdnosti sestav R, RS_25 in RS_50 primerljiva. Mešanica RS_75 je po treh dneh dosegla 90 % tlačne trdnosti referenčne mešanice, mešanica S_100 pa je dosegla tlačno trdnost 40 MPa. Po sedmih dneh so vse sestave razen S_100 dosegale primerljive vrednosti tlačne trdnosti blizu 60 MPa. Sestava z recikliranim agregatom S je dosegla 50 MPa, kar je za 10 MPa nižja vrednost kot pri preostalih štirih sestavah. Ugotovili smo, da uporaba recikliranega agregata pomembno vpliva na razvoj zgodnjih upogibnih in tlačnih trdnosti, še posebej pri starosti 1 dan. Vpliv na razvoj trdnosti je kratkotrajen in je posledica oblikovanja metastabilnih hidratacijskih produktov, ki imajo v primerjavi s konvencionalnimi hidratacijskimi produkti cementa nižje upogibne in tlačne trdnosti.



Slika 6. Upogibne (levo) in tlačne (desno) trdnosti cementnih kompozitov.

kapaciteto 50 kN in hitrostjo obremenjevanja 0,25 mm/min. Tlačno trdnost smo določali z univerzalno hidravlično stiskalnico kapacitete 5000 kN, pri čemer smo največjo silo določili z merilno dozo kapacitete 500 kN. Rezultati upogibnih trdnosti so podani kot povprečje treh meritev, rezultati tlačnih trdnosti pa predstavljajo povprečje šestih vzorcev. Rezultati meritev so bili tudi statistično ovrednoteni z metodo analize varianc (ANOVA). Analiza varianc je pokazala statistično pomembne razlike med mešanicami.

3 DISKUSIJA

Analiza XRD je pokazala prisotnost kovinskih sulfidov v recikliranem agregatu, kot so sfalerit, galenit, pirit, smithsonit, epsomit, hemimorfit in melanterit. Njihove koncentracije so v območju med 0,3 % in 2,8 %. Največji masni delež v recikliranem agregatu so zavzemali železovi sulfidi, iz česar sklepamo, da predstavljajo ekonomsko nezanemljiv del pri ekstrakciji rude. Pri ekstrakciji cinka in svinca je bila kamnina izpostavljena oksida-

cijskim pogojem in visokim temperaturam, kar je med drugim povzročilo oksidacijo železovih sulfidov v njihovo vodotopno obliko [Lead, n.d.]. Študije poročajo, da se svinčevi in cinkovi ioni lahko ob prisotnosti železovih ionov sproščajo že med vlažnim mletjem rude [B. Huang, 2019; X. Wang, 2020]. Galenit kot vir svinčevih ionov se v takem sistemu obnaša kot anoda in oksidira. S tem se tvorijo svinčevi ioni, svinčev hidroksid in svinčev oksisulfid [X. Wang, 2020]. Hkrati sta lahko izpostavljenost oksidativnim pogojem in visoka temperatura povzročili tudi tvorbo epsomita iz dolomita. Visoka koncentracija sulfatov in sulfidov lahko pojasni nižjo pH-vrednost recikliranega agregata v primerjavi s referenčnim agregatom. Nižja pH-vrednost ima lahko pomemben vpliv na vezanje cementnih kompozitov. Wang in sod. [Y. Wang, 2023] so ugotovili, da je omenjena metoda določanja pH-vrednosti agregata dober pokazatelj njegove sestave.

Z večanjem koncentracije recikliranega agregata se je večal razlez sveže malte, kar pomeni, da bi za enako konsistenco (enak razlez) lahko nižali delež superplastifikatorja ali količino vode. Omenjeni pojav si lahko razložimo z znižanjem elektrostatske odbojne sile med vodo in cementnim delcem zaradi prisotnosti kovinskih spojin v agregatu [T. Huang, 2022].

Višji delež recikliranega agregata je po drugi strani podaljšal čas začetka vezanja ter čas prehoda v trdno agregatno stanje. Za sestavi RS_75 in S_100 so postali časi začetka in konca vezanja predolgi za običajno uporabo. Glede na meritve vezanja z ultrazvokom se je v vzorcu S_100 po 12 urah oblikoval tudi metastabilni produkt, ki je bil prisoten vse do 30 ur. Meritve z ultrazvokom in trdnosti kažejo, da spojine, prisotne v recikliranem agregatu, reagirajo s cementno matrico, tudi ko je njihov delež v agregatu nekaj odstotkov. Vsekakor pa njihov vpliv na začetne trdnosti in čas vezanja ni velik pri 25- in 50-odstotnem prostorninskem deležu recikliranega agregata. Pri večjih deležih recikliranega agregata pa sta potrebna previdnost in razumevanje procesov v mikrostrukturi, da se izognemo poznejšim težavam. Rezultati upogibne in tlačne trdnosti sestave S_100, ki vsebuje samo recikliran agregat, kažejo na zamik v razvoju trdnosti, predvsem zaradi časa začetka vezanja, ki je daljši od 30 ur, in daljšega prehoda v trdno agregatno stanje (40 ur). To pomeni, da bi potencialno lahko bila za uporabo v gradbeništvu uporabna tudi ta sestava cementnega kompozita.

Na podlagi rezultatov preiskav, prikazanih v tem prispevku, lahko ugotovimo, da je uporaba recikliranega agregata S v gradbeništvu možna. Pred njegovo praktično uporabo pa je treba poznati njegovo mineraloško sestavo in tehnološke procese, ki jim je bil ta agregat izpostavljen, preden je postal sekundarna surovina. Ravno tako je treba pri agregatu S sistematično preveriti njegovo kompatibilnost z različnimi cementi ter mineralnimi dodatki in kemijskimi dodatki. Dolgoročna obstojnost betona s tem agregatom kot tudi "usoda" težkih kovin, ko je beton podvržen intenzivnemu propadu, še nista raziskani, zato je smiselno agregat S uporabiti za betone, kjer ni zahteve po dolgi življenjski dobi in kjer beton ni izpostavljen agresivnim vplivom okolja.

Podaljšani časi vezanja pri agregatu S kažejo na nepričakovan vpliv recikliranega agregata na lastnosti betonov pri zgodnjih starostih. Vezanje betonov ni preiskava, ki bi jo izvajali v okviru začetnega tipskega preizkusa betona (ZTPB) po SIST EN 206

[SIST, 2003], zato lahko tovrsten vpliv agregata spregledamo. Pred vključevanjem različnih sekundarnih surovin v betone, kjer imajo vlogo agregata, je zato treba najprej ustrezno dopolniti obvezen nabor preiskav za ZTPB.

4 ZAKLJUČEK

S sistematičnim pristopom smo ugotovili, da je uporaba recikliranega agregata S v gradbeništvu možna. V primeru recikliranega agregata, ki izhaja iz rudnika svinca in cinka, se je 25-odstotna koncentracija izkazala kot najprimernejša za uporabo v betonu. To smo pokazali z ultrazvočnimi meritvami in meritvami temperature med vezanjem cementnega kompozita ter tlačnimi in upogibnimi trdnostmi cementnih kompozitov pri zgodnji starosti. Ugotovili smo, da na čas začetka vezanja in čas prehoda kompozita v trdno agregatno stanje pomembno vplivajo tudi nizke koncentracije težkih kovin, katere se z rutinskimi preiskavami agregata pogosto zanemari. Hkrati je mineraloška karakterizacija recikliranega agregata kompleksna, predvsem zaradi kompleksnih tehnoloških postopkov pridobivanja svinca in cinka.

5 ZAHVALA

Avtorji se za financiranje raziskav zahvaljujejo ARIS iz programskih skupin P2-0185 in P1-0175.

6 LITERATURA

Chen, X., Guo, Y., Ding, S., Zhang, H., Xia, F., Wang, J., Zhou, M., Utilization of red mud in geopolymer-based pervious concrete with function of adsorption of heavy metal ions, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.263>, 2018.

Garg, N., White, C. E., Mechanism of zinc oxide retardation in alkali-activated materials: An: in situ X-ray pair distribution function investigation, *Journal of Materials Chemistry A*, 5(23), 11794–11804, <https://doi.org/10.1039/c7ta00412e>, 2017.

Giergiczny, Z., Król, A., Król, K., Immobilization of heavy metals (Pb, Cu, Cr, Zn, Cd, Mn) in the mineral additions containing concrete composites, *Journal of Hazardous Materials*, 160, 247–255, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.007>, 2008.

Huang, B., Lai, H., Deng, J., Xu, H., Fan, G., Study on the Interaction between Galena and Sphalerite during Grinding Based on the Migration of Surface Components, *ACS Omega*, 4(7), 12489–12497, <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b01173>, 2019.

Huang, T., Yuan, Q., Zuo, S., Xie, Y., Shi, C., New insights into the effect of gypsum on hydration and elasticity development of C3S paste during setting, *Cement and Concrete Research*, 159, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106860>, 2022.

Katayama, T., How to identify carbonate rock reactions in concrete, In *Materials Characterization* (Vol. 53, pp. 85–104), <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2004.07.002>, 2004.

Katayama, T., The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) - Its mineralogical and geochemical details, with special reference

to ASR, Cement and Concrete Research, 40(4), 643–675, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.020>, 2010.

Keppert, M., Retarding action of various lead (II) salts on setting of Portland cement, In Key Engineering Materials (Vol. 760 KEM, pp. 43–48). Trans Tech Publications Ltd, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.760.43>, 2018.

Krishnaraj, L., Ramesh, N., Kumar, R. S., George, P. K., Characterization Study of Zinc Sulphate's Influence and Retarding Mechanism with Coarser and Finer Fly Ash Particles in Concrete, KSCE Journal of Civil Engineering, 24(9), 2751–2766, <https://doi.org/10.1007/s12205-020-2116-5>, 2020.

Lead, (n.d.), Retrieved April 19, 2024, from <https://www.essentialchemicalindustry.org/metals/lead.html#>

Lee, H. K., Lee, K. M., Kim, Y. H., Yim, H., Bae, D. B., Ultrasonic in-situ monitoring of setting process of high-performance concrete, Cement and Concrete Research, 34(4), 631–640, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.10.012>, 2004.

Massarweh, O., Maslehuddin, M., Al-Dulaijan, S. U., Shameem, M., Performance evaluation of heavy oil fly ash as a retarder of Portland cement hydration, Journal of Building Engineering, 34, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101881>, 2021.

Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M., Concrete : microstructure, properties, and materials (4th ed.). Mc Graw Hill, 2013.

Nearly-zero energy and zero-emission buildings - European Commission, (n.d.), Retrieved May 12, 2025, from https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-and-zero-emission-buildings_en?utm_source=chatgpt.com

Serdar, M., Gabrijel, I., Schlicke, D., Staquet, S., Azenha, M. (Eds.), Advanced Techniques for Testing of Cement-Based Materials. Cham: Springer International Publishing, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39738-8>, 2020.

Silatikunsatid, T., Jaitanong, N., Narksitipan, S., A study on influence of zinc oxide in cement composite materials, In Key Engineering Materials (Vol. 772 KEM, pp. 95–99). Trans Tech Publications Ltd, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.772.95>, 2018.

SIST, SIST EN 1015-6:1999: Metode preskušanja zidarskih malt - 6. del: Ugotavljanje prostorninske mase sveže malte, 1999.

SIST, SIST EN 1015-3:2001. Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Ljubljana: Slovenski inštitut za standardizacijo, 2001.

SIST, SIST EN 206-1:2003: Beton – 1.del – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost, 2003.

SIST, (a), SIST EN 197-1:2011:Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, 2011.

SIST, (b), SIST EN 1097-1:2011: Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 1: Determination of the resistance to wear, 2011.

SIST, SIST EN 933-1:2012: Preskusi geometričnih lastnosti agregatov, 2012.

SIST, SIST EN 1015-11:2020 Metode preskušanja zidarske malte - 11. del: Določevanje upogibne in tlačne trdnosti strjene malte, 2020.

Slovenski standard. SIST EN 933-1:2012, Preskusi geometričnih lastnosti agregatov, = Tests for geometrical properties of aggregates. [Ljubljana]: Slovenski inštitut za standardizacijo, 2012.

Štukovnik, P., Bosiljkov, V. B., Marinšek, M., Detailed investigation of ACR in concrete with silica-free dolomite aggregate, Construction and Building Materials, 216, 325–336, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.260>, 2019.

Štukovnik, P., Marinšek, M., Mirtič, B., Bokan Bosiljkov, V., Influence of alkali carbonate reaction on compressive strength of mortars with air lime binder, Construction and Building Materials, 75, 247–254, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.024>, 2015.

Tam, V. W. Y., Soomro, M., Evangelista, A. C. J., A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017), Construction and Building Materials, 172, 272–292, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>, 2018.

Turk, T., Marinšek, M., Štukovnik, P., Bokan Bosiljkov, V., Resistance of cement composites with an alkali carbonate reaction (ACR) to chloride ions and the freeze-thaw cycles, Case Studies in Construction Materials, 22, e04363, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04363>, 2025.

Wang, X., Qin, W., Jiao, F., Wu, J., The influence of galvanic interaction on the dissolution and surface composition of galena and pyrite in flotation system, Minerals Engineering, 156, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106525>, 2020.

Wang, Y., Chen, J., Yan, Q., Peng, Y., Kong, L., Quantitative characterization of aggregates and their chemical constituents in terms of acid and alkaline indicators, Case Studies in Construction Materials, 18, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02079>, 2023.

Xing, W., Tam, V. W., Le, K. N., Hao, J. L., Wang, J., Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: A critical review, Construction and Building Materials, 317, 125950, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125950>, 2022.

32. SLOVENSKI KOLOKVIJ O BETONIH

IRMA Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije je v sodelovanju z IZS organiziral

32. slovenski kolokvij o betonih z naslovom Struktura betona in njen vpliv na mehanske lastnosti in obstojnost. Kolokvij je potekal 28. maja 2025 v dvorani Plečnik 1, Four Points by Sheraton Ljubljana Mons, s 111 udeleženci.

Na kolokviju so obravnavali posamezne parametre od nano do makro nivoja strukture betona kot kompozitnega materiala. Poudarek je bil na prikazu vpliva posameznega parametra kakor tudi celotne strukture na mehanske lastnosti in predvsem na obstojnost betona. Podrobnejši potek kolokvija je razviden iz programa (slika 1).

32. SLOVENSKI KOLOKVIJ O BETONIH 32 th SLOVENIAN COLLOQUIUM ON CONCRETE		PROGRAM PROGRAMME	irma inštitut za raziskavo materialov in aplikacije d.o.o.
STRUKTURA BETONA IN NJEN VPLIV NA MEHANSKE LASTNOSTI IN OBSTOJNOST / STRUCTURE OF CONCRETE AND ITS IMPACT ON MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY			
9:00	Pozdravni govor / Welcome speech: Mag. Črtomir Remec, Predsednik Inženirske zbornice Slovenije / President of the Slovenian Chamber of Engineers		
9:30	Dr. Tomaž Vuk, Dr. Andrej Ipavec, Alpacem Cement d.d., Slovenija Razvoj cementov in njihov vpliv na strukturo betona / Development of cements and their impact on the structure of concrete		
10:00	Wioletta Jackiewicz-Rek, Tomasz Benedysiuk, Prof. Andrzej Garbacz, Ph.D., D.Sc., Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Poland New, functional aspects of concrete surface engineering / Novi, funkcionalni vidiki inženirstva betonskih površin		
10:30	Prof. Dr. Luc Courard, University of Liege, Belgium, Prof. Dr. Benoit Bissonnette, Laval University, Canada Use of recycled sand and expansive agents for the production of more durable and sustainable mortars / Uporaba recikliranega peska in ekspanzijskih dodatkov za izdelavo trajnejših in trajnostnih malt		
11:30	Odmor / Break time		
12:00	Tilen Turk, Prof. Dr. Violeta Bokan Bosiljkov, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodetijo, Slovenija Vpliv vrste karbonatnega agregata na obstojnost betonov javne infrastrukture izpostavljene zmrzovanju in solem / Impact of the type of carbonate aggregate on the durability of civil infrastructure concretes exposed to freezing and salts		
12:30	Prof. Dr. Ivana Banjad Pečur, Prof. Dr. Nina Štirmer, Dr. Jelena Šantek Bajto, Dr. Ivana Carević, Ivo Vičan, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Hrvatska Sustainable development of concrete structures using waste ashes / Trajnostni razvoj betonskih konstrukcij z uporabo odpadnega pepela		
13:00	Doc. Dr. Marina Škondrič, Asist. Ognjen Govedarica, V. Prof. Dr. Branislava Lekić, V. Prof. Dr. Aleksandar Savić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Dr. Vera Obradović, viši naučni saradnik, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Prof. Dr. Dragica Jevtić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Srbija Pervious concrete paving flags – Durability challenges / Votle betonske plošče – izzivi trajnosti		
13:30	Prof. Dr. Naser Kabashi, Msc. E. Krasniqi, Prof. Asst. M. Muhaxheri, Msc. Y. Murati, University of Prishtina, Department of Civil Engineering, Kosovo Influence of chemical admixtures on waterproofing and their effects on the durability of concrete / Vpliv kemičnih dodatkov na vodotesnost in njihov vpliv na obstojnost betona		
13:50	Dr. Jakob Šušteršič, Rok Ercegovič, Sandi Drolc, Teja Török Resnik, IRMA Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije, Slovenija Vpliv strukture betona in malte na korelacijo med dolgotrajnim cikličnim zmrzovanjem/taljenjem in mehanskimi lastnostmi / Impact of concrete and mortar structure on the correlation between long-term freeze/thaw cycling and mechanical properties		
14:10	Dr. Rok Cajzek, Dr. Tjaša Zupančič Hartner, GIC GRADNJE in Matija Zupančič, ArtRabel, Slovenija Preobrazba proizvodnje: Digitalni dvojček kot ključ za upravljanje betonarn in nadzorna točka za upravitelja / Transforming production: the digital twin as the key to concrete batching plant management and the control point for the manager		
14:30	Delovno kosilo / Working lunch		

Slika 1. Program predavanj v okviru 32. slovenskega kolokvija o betonih.

Članki vseh predavanj so podani v Zborniku gradiv in referatov (CIP – Kataložni zapis o publikaciji, Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana, 666.972.1(082)).

Kolokvij se je začel s pozdravnim govorom predsednika IZS mag. Črtomirja Remca (slika 2). V svojem govoru je poudaril velik pomen permanentnega izobraževanja inženirskega kadra, ki je potrebno za vpeljavo novosti v vsakodnevno prakso na vseh nivojih gradbeništva. Zato so vsakoletni kolokviji o betonih primerno dopolnilo programov izobraževanja IZS.



Slika 2. Pozdravni govor predsednika IZS mag. Črtomirja Remca.

Prvo predavanje z naslovom Vpliv vrste karbonatnega agregata na obstojnost betonov javne infrastrukture izpostavljene zmrzovanju in solem je podala dekanja UL FGG prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov (slika 3), ki ga je pripravila skupaj s Tilnom Turkom. Povzetek njenega predavanja: Obstojnost pospešeno starih cementnih kompozitov z dolomitnim ali apnenčastim agregatom je bila sistematično preizkušena v primeru izpostavljenosti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli. Spremembo mase in elastičnega modula so merili po vsakem pe-



Slika 3. Prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, dekanja UL FGG, je podala prvo predavanje z naslovom Vpliv vrste karbonatnega agregata na obstojnost betonov javne infrastrukture, izpostavljene zmrzovanju in solem.

tem ciklu zmrzovanja in tajanja, tlačno in upogibno trdnost po vsakem desetem ciklu, spremembo skupne poroznosti pa po 30 ciklih. Rezultati preiskav so pokazali, da so v splošnem vzorci izgubljali maso zaradi luščenja površine, zmanjšali sta se njihova tlačna in upogibna trdnost, poroznost pa se je povečala. Je pa bilo poslabšanje lastnosti različno veliko. Ugotovili so, da stranski produkti alkalno-karbonatne reakcije (ACR) s kloridnimi ioni kemijsko ne reagirajo. Poleg tega se zdi, da je oblikovanje hidrotalcita med potekom ACR prednostna reakcija, pred karbonatizacijo faze AFm, in pozitivno vpliva na odpornost cementnih kompozitov z dolomitom, ki so izpostavljeni zmrzovanju in solem. Kemična analiza je pokazala nastanek mono-karboaluminatne faze v cementnih kompozitih z apnenčevim agregatom, kar bi lahko pojasnilo njihovo slabšo odpornost proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli v primerjavi z dolomitnimi kompoziti.

Drugo predavanje z naslovom Novi, funkcionalni vidiki inženirstva betonskih površin je podal prof. Andrzej Garbacz, Ph.D., D.Sc., Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Poljska (slika 4). Soavtorja sta Wioletta Jackiewicz-Rek in Tomasz Benedysiuk. Povzetek njihovega predavanja: Površinski inženiring je znanstveni in tehnološki pristop, povezan z načrtovanjem, izdelavo in uporabo površinskih plasti za izboljšanje lastnosti podlage, zlasti odpornosti proti koroziji in obrabi, pa tudi estetskih lastnosti. Uporablja se za številne konstrukcijske materiale, kot so kovinske zlitine, vključno z intermetali in nanomateriali. V tem članku je predstavljena uporaba površinskega inženiringa za ustvarjanje površinskih lastnosti betonskih površin, tj. arhitekturnih in fotokatalitskih betonov.



Slika 4. Prof. Andrzej Garbacz, Ph.D., D.Sc., Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, je imel predavanje z naslovom Novi, funkcionalni vidiki inženirstva betonskih površin.

Tretje predavanje z naslovom Uporaba recikliranega peska in ekspanzijskih dodatkov za izdelavo trajnejših in trajnostnih malt sta pripravila prof. dr. Luc Courard, University of Liège, Belgija (slika 5), in prof. dr. Benoit Bissonnette, Laval University, Kanada (slika 6). Povzetek njenega predavanja: Razpoložljivost virov za gradbeno industrijo postaja vse bolj negotova, hkrati pa se povečuje količina gradbenih odpadkov in odpadkov iz rušenja objektov. Usklajevanje potreb in sekundarnih virov ter

prispevanje k ponovni uporabi je koristen in spodbuden znanstveni izziv. Da bi omogočili resnično krožno gospodarstvo v gradbeništvu, je treba premagati pravne in regulativne ovire. Delo na lokalni ravni in razvoj ustrezne obdelave gradbenih odpadkov in odpadkov iz rušenja dajeja prednost predelavi in plemenitjenju sekundarnih materialov za prefabrikate, 3D-tiskani beton ali materiale za sanacijo. Vse težje je zagotoviti razpoložljivost kakovostnega peska za proizvodnjo betona. Recikliran betonski pesek je lahko ob ustrezni proizvodnji resna alternativa za malte in betone nizke do srednje zahtevnosti. Analizirane so tehnične lastnosti recikliranih peskov in podani predlogi za povečanje obsega dodajanja v malte. Hkrati so predlagane minimalne zahteve za uporabo recikliranega peska v 3D-maltah. Osnovne lastnosti se primerjajo s klasičnimi materiali, analizira pa se tudi trajnost končnih izdelkov. Zdi se, da pospešeni proces karbonatizacije izboljša lastnosti recikliranih peskov (pred proizvodnjo betona in/ali po njej). Ekspanzijski dodatki lahko pomagajo tudi pri obvladovanju različnih vrst krčenja, ki se lahko pri mešanicah z recikliranimi peski še poveča. Širša in bolj

sistematična uporaba recikliranih materialov dolgoročno zahteva prilagojene predpise in specifikacije; to je pomembno za znatno zmanjšanje vpliva gradbeništvu na okolje.

Četrto predavanje z naslovom Trajnostne inovacije v portlandskem cementu: priložnosti in izzivi so pripravili dr. Tomaž Vuk, dr. Andrej Ipavec in Sašo Seljak, Alpacem Cement, d. d. Predaval je Sašo Seljak (slika 7). Povzetek predavanja: Globalna industrija betona in cementa doživlja preobrazbo v smeri trajnosti, ki jo spodbuja nujnost zmanjšanja emisij CO₂ in povečanje materialne učinkovitosti. Članek preučuje ključne napredke v tehnologiji portlandskega cementa s poudarkom na strategijah zmanjševanja klinkerja, energetske učinkovitosti mletju in prilagojenih kemijskih dodatkih. Tehnična SWOT-analiza ocenjuje izvedljivost inovativnih cementov, kot sta CEM II/C cement in LC³ (cement iz kalcinirane gline in apnenca). Članek se zaključi s konkretnimi priporočili za deležnike v industriji in vključuje študijo primera, ki prikazuje dejanski vpliv teh inovacij na odpornost proti kloridom.



Slika 5. Prof. dr. Luc Courard, University of Liège, je podal prvi del predavanja z naslovom Uporaba recikliranega peska in ekspanzijskih dodatkov za izdelavo trajnejših in trajnostnih malt.



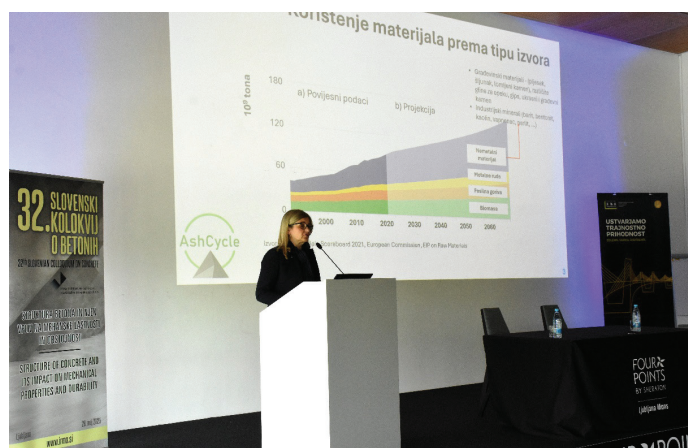
Slika 7. Sašo Seljak, Alpacem Cement, d. d., je imel predavanje z naslovom Trajnostne inovacije v portlandskem cementu: priložnosti in izzivi.



Slika 6. Drugi del predavanja z naslovom Uporaba recikliranega peska in ekspanzijskih dodatkov za izdelavo trajnejših in trajnostnih malt je podal prof. dr. Benoit Bissonnette, Laval University.

Prof. dr. Ivana Banjad Pečur, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Hrvatska (slika 8), je podala peto predavanje z naslovom Trajnostni razvoj betonskih konstrukcij z uporabo odpadnega pepela. Soavtorji so bili prof. dr. Nina Štirmar, dr. Jelena Šantek Bajto, dr. Ivana Carević in Ivo Vićan. Povzetek njihovega predavanja: Kontinuirana rast gradbene industrije je tesno povezana s povečano porabo energije, emisijami toplogrednih plinov ter nastankom velikih količin gradbenih odpadkov in odpadkov iz rušenja objektov, kar vse prispeva k velikim okoljskim izzivom. Zaradi vse večje okoljske ogroženosti so nujno potrebni inovativni pristopi, ki uporabljajo reciklirane gradbene materiale ter surovine in sekundarne materiale, ki so učinkoviti z vidika virov. Kot odgovor na to se je v betonski industriji razmahnilo vključevanje nizkoogljičnih alternativ, kot je pepel iz sežiganja odpadkov. Ta študija se osredotoča na vključevanje pepela iz lesne biomase in blata iz čistilnih naprav kot delnega nadomestka za naravne agregate v betonskih mešanicah s ciljem zmanjšati odvisnost od kamnolomov in podpreti bolj trajnostne prakse pridobivanja agregatov. Z upoštevanjem načel krožnega gospodarstva je cilj te strategije ne le zmanjšati one-

snaževanje okolja in emisije toplogrednih plinov, temveč tudi čim bolj zmanjšati nastajanje odpadkov. Poleg tega uporaba alternativnih materialov spodbuja ohranjanje virov, podpira ohranjanje ekosistemov in spodbuja razvoj novih trgov. V tej raziskavi so bili opravljeni preskusi na svežem in strjenem betonu, proizvedenem v industrijskih pogojih, da bi ocenili učinkovitost premalo izkoriščenega pepela iz sežiganja odpadkov kot delnega nadomestka za pesek. Rezultati dokazujejo potencial alternativnih materialov za izpolnjevanje mehanskih zahtev in zahtev glede trajnosti montažnih betonskih izdelkov, hkrati pa podpirajo ravnanje z industrijskimi stranskimi proizvodi in optimizirajo dolgoročno razpoložljivost materialov, kar so ključni dejavniki za povečanje trajnosti v betonskem sektorju.



Slika 8. Prof. dr. Ivana Banjad Pečur, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, je podala predavanje z naslovom *Trajnostni razvoj betonskih konstrukcij z uporabo odpadnega pepela*.

Šesto predavanje z naslovom *Votle betonske plošče – izzivi trajnosti* so pripravili kolegi iz Beograda: doc. dr. Marina Škondrić, asist. Ognjen Govedarica, v. prof. dr. Branislava Lekić, v. prof. dr. Aleksandar Savić, dr. Vera Obradović in prof. dr. Dragica Jevtić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Srbija. Predavala je doc. dr. Marina Škondrić (slika 9), ki se je na začetku svojega predavanja spomnila na preminulega kolega prof. dr. Dimitrija Zakića, ki je bil zadnjih deset let redni in aktivni udeleženec kolokvijev. Povzetek njihovega predavanja: Prepustne prometne površine se pogosto obravnavajo kot ena od rešitev za urbana območja, saj lahko izboljšajo infiltracijo padavinske vode in zmanjšajo učinek mestnega toplotnega otoka. V okviru predstavljene raziskave so bile preiskane votle betonske plošče kot ena od vrst prepustnih prometnih površin in možnost njihove uporabe v hladnem podnebju. Tri vrste mešanic (ena referenčna mešanica in dve betonski mešanici, ki vsebujeta elektrofiltrski pepel kot delni nadomestek cementa) so bile preiskane glede odpornosti proti zmrzovanju s prisotnostjo soli za tajanje in brez nje. Vzorci so bili za vsak preskus razdeljeni v dve skupini, pri čemer je bilo v eni skupini dreniranje plošč dovoljeno, v drugi pa omejeno. Masa vzorcev in hitrost ultrazvočnih impulzov sta bili izmerjeni med cikli zmrzovanja in tavanja, upogibna in tlačna trdnost vzorcev pa sta bili izmerjeni po končanih preskusih. Rezultati so pokazali,

da imajo preskušene votle betonske plošče dobro zmrzlinško odpornost. Pri testiranju, ki je vključevalo nasičenje vzorcev s solno raztopino, so rezultati pokazali, da plošče ne prenesejo več kot sedem ciklov zmrzovanja in tavanja, če je drenaža omejena. Pri vzorcih, ki so se drenirali, se je upogibna trdnost v primerjavi z referenčnimi vzorci zmanjšala, vendar so bile vrednosti tlačne trdnosti podobne ali višje.



Slika 9. Predavanje z naslovom *Votle betonske plošče – izzivi trajnosti* je podala doc. dr. Marina Škondrić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet.

Sedmo predavanje z naslovom *Vpliv kemičnih dodatkov in elektrofiltrskega pepela na vodotesnost in trajnost betona* je podal prof. dr. Naser Kabashi, University of Prishtina, Department of Civil Engineering, Kosovo (slika 10). Soavtorji predavanja so bili msc. Enes Krasniqi, prof. asst. Milot Muhaxheri in msc. Ylli Murati. Povzetek njihovega predavanja: V tej študiji je predstavljena celostna ocena vpliva kristaliničnih kemijskih dodatkov in elektrofiltrskega pepela na mehanske lastnosti, trajnost in trajnostnost betona. Načrtovani sta bili dve eksperimentalni fazi. Prva faza se je osredotočila na povečanje trajnosti z uporabo kristaliničnih dodatkov za vodotesnost, pri čemer je bilo 36 vzorcev testiranih na tlačno trdnost, prepustnost in mikrostrukturo. Druga faza je vključevala 24 vzorcev betona v osmih različnih sestavah mešanic, ki so vsebovale spremenljivo vsebnost elektrofiltrskega pepela in zmanjšano količino cementa. Te mešanice so bile ocenjene glede trdnosti, prodora vode in vpliva na okolje z uporabo kazalnikov ocene življenjskega cikla (LCA), vključno s potencialom globalnega segrevanja (GWP) in kumulativnim povpraševanjem po energiji (CED). Rezultati prve faze so pokazali, da so kristalinični dodatki znatno izboljšali neprepustnost in mehansko trdnost. Mikroskopska analiza je potrdila gostejšo notranjo strukturo in učinek blokiranja por. V drugi fazi so mešanice z do 30-odstotno zamenjavo elektrofiltrskega pepela pokazale večjo trajnostnost ob omejenem zmanjšanju učinkovitosti. Predvsem MIX IV in MIX V sta zagotavljala najboljše razmerje med strukturno celovitostjo in okoljsko učinkovitostjo. MIX VIII je dosegel najnižji GWP in CED, vendar z manjšo tlačno trdnostjo. Ta dvojni pristop potrjuje, da je mogoče s kombinirano uporabo dodatkov za vodotesnost in optimiziranih dopolnilnih cementnih materialov doseči zmogljivostno usmerjeno in okoljsko ozaveščeno zasnovo betona.



Slika 10. Prof. dr. Naser Kabashi, University of Prishtina, Department of Civil Engineering, je podal predavanje z naslovom Vpliv kemičnih dodatkov in elektrofiltrskega pepela na vodotesnost in trajnost betona.

Osmo predavanje z naslovom Vpliv strukture betona in malte na korelacijo med dolgotrajnim cikličnim zmrzovanjem/taljenjem in mehanskimi lastnostmi so pripravili dr. Jakob Šušteršič, Rok Ercegovič, Sandi Drolc, Teja Török Resnik, IRMA Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije. Predaval je dr. Jakob Šušteršič (slika 11). Povzetek predavanja: V članku sta predstavljena dva sklopa preiskav. V prvem sklopu so podani in obravnavani rezultati preiskav betonov z dobro zgoščeno in homogeno strukturo, v drugem pa rezultati preiskav cementno-apnenih malt z olajšano in porozno strukturo zaradi dodanega ekspandiranega vermikulita. Betoni in malte so se preiskovali glede na tlačno trdnost in statični modul elastičnosti pri različnih starostih ter notranjo odpornost proti zmrzovanju/tajanju do 1000 ciklov. Vsi betoni in malte izkazujejo odpornost proti dolgotrajnemu cikličnemu zmrzovanju/tajanju. Pri tem pa dosegajo betoni visoke tlačne trdnosti in statične module elastičnosti, malte pa dosti manjše, odvisno od dodane količine ekspandiranega vermikulita.



Slika 11. Predavanje dr. Jakoba Šušteršiča, IRMA, z naslovom Vpliv strukture betona in malte na korelacijo med dolgotrajnim cikličnim zmrzovanjem/taljenjem in mehanskimi lastnostmi.

Deveto, zadnje predavanje na letošnjem kolokviiju z naslovom Digitalni dvojček kot ključ za upravljanje betonarn in nadzorna točka za upravitelja je podala dr. Tjaša Zupančič Hartner, GIC GRADNJE, d. o. o. (slika 12). Soavtorji so bili Domen Šprajc in dr. Rok Cajzek, GIC GRADNJE, d. o. o., in Matija Zupančič, ArtRabel. Povzetek njihovega predavanja: Prispevek obravnava digitalni dvojček (DT) kot ključno orodje za upravljanje betonarn in kot osrednjo nadzorno točko za upravitelje. Digitalni dvojček omogoča celovit nadzor nad proizvodnimi, logističnimi, infrastrukturnimi in kadrovskimi procesi s pomočjo realno časovnih podatkov, analitike in 3D-modela objekta. Temelji na informacijskem modelu gradnje (BIM), ki povezuje geometrijske in procesne podatke z nadzornimi sistemi (SCADA, ERP, IoT), ter vključuje funkcionalnosti za spremljanje kakovosti, vzdrževanja, varnosti in skladnosti. Na primeru Betonarne Negenje 2.0 prispevek prikazuje, kako digitalni dvojček postane strateški upravljavski sistem – ne le za tehnično spremljanje proizvodnje, temveč tudi za podporo odločanju, optimizaciji virov in dolgoročno vodenje obrata. Predstavljena rešitev se umešča v širši kontekst Industrije 4.0 in potrjuje, da sta za uspešno uvedbo digitalnega dvojčka ključna podpora vodstva in dobro sodelovanje interdisciplinarnih strokovnjakov, gradbeno-digitalnega ekosistema.



Slika 12. Dr. Tjaša Zupančič Hartner, GIC GRADNJE, d. o. o., je podala predavanje z naslovom Digitalni dvojček kot ključ za upravljanje betonarn in nadzorna točka za upravitelja.

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

FOTOREPORTAŽA BRV HOTAVLJE



Slika 1. Pokrita brv čez reko Soro na Hotavljah, avgust 2025. (foto: Klemen Ilovar)

Lokacija: Hotavlje, 4224 Gorenja vas

Investitor: Občina Gorenja vas - Poljane

Projektant arhitekture: ELEA iC projektiranje in svetovanje, d. o. o.

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

Projektant ceste: PNG projekt nizke gradnje Ljubljana, d. o. o.

Izvajalec: Topos Hotavlje, d. o. o., Teskro, d. o. o.

V poplavah avgusta 2023 je reka Poljanska Sora v naselju Hotavlje odnesla več kot tretjino dotedanje lesene brvi. Obstoječi objekt je bil poplavno neustrezen, saj je bila spodnja kota preklade le 0,43 m nad gladino visokih voda Q100. Poleg tega je bil objekt podprt z dvema vmesnima podporama v strugi, levi krajni opornik pa je še dodatno zmanjševal pretočni profil reke. Zaradi navedenih pomanjkljivosti in dotrajanosti konstrukcije je bila obstoječa brv odstranjena in nadomeščena z novo, poplavno varnejšo brvjo.

Arhitekturno je nova brv zasnovana v smislu ohranjanja kulturne dediščine, saj so ohranjeni glavni konstrukcijski material (les), streha in proporci obstoječega objekta. Objekt je poleg kolesarjev in pešcev namenjen tudi motornemu prometu, ki pa je omejen s svetlo širino in višino objekta ter dovoljeno skupno maso vozila 12 t.



Slika 2. Obstoječa brv pred poplavami avgusta 2023.



Slika 3. Gradnja AB krajnega opornika, avgust 2024.

Nova brv reko premošča z enim razponom dolžine 34,4 m. Glavno nosilno funkcijo opravljata dve vzporedni paličji iz lesenega spodnjega in zgornjega pasu ter lesenih stebrov, diagonale so jeklene. Koristna obtežba se na paličji prenaša prek sekundarne nosilne konstrukcije, ki jo sestavljajo lesene podnice in vzdolžniki ter jekleni prečniki. Za vse lesene elemente nosilne konstrukcije je uporabljen lepljen lameliran les. Izjema so roke ostrešja, izdelane iz tehnično sušenega in vzdolžno spojenega masivnega lesa, ter podnice in robniki, ki so prav tako iz masivnega lesa. Prekladna konstrukcija je podprta na armiranobetonskih krajnjih opornikih, ki sta globoko temeljena na uvtanih pilotih s premerom 1,0 m.



Slika 4. Vizualizacija notranjosti brvi.

V prvi fazi gradnje sta bili izvedeni rušitev obstoječega objekta in gradnja novih opornikov. V drugi fazi sta sledili priprava delovnega platoja in sestava palične nosilne konstrukcije nove brvi. Vsi elementi konstrukcije so bili izdelani v delavnici in nato na lokacijo prepeljani v enem kosu. Zatem je bila 40-tonska konstrukcija dvignjena na krajna opornika, objekt pa dokončan z izvedbo strehe, podnic, ograj in druge opreme.



Slika 5. Prevoz lesenih elementov, september 2024.



Slika 6. Sestava nosilne konstrukcije, oktober 2024.



Slika 7. Nosilna konstrukcija med dvigom, oktober 2024.



Slika 8. Nosilna konstrukcija po namestitvi na krajna opornika, oktober 2024.

Pred predajo objekta v uporabo je bil opravljen obremenilni test konstrukcije s tremi vozili skupne mase 37,5 t. Rezultati obremenilnega testa so potrdili ustreznost obnašanja nosilne konstrukcije.



Slika 9. Izvedba kritine, oktober 2024.



Slika 10. Obremenilni test, november 2024.



Slika 11. Detajl spoja, december 2024.



Slika 12. Notranjost brvi, december 2024.

Avtor fotoreportaže: Dominik Klemenčič, mag. inž. grad. (Elea iC, d. o. o.)

FOTOREPORTAŽA CENTER KROŽNEGA GOSPODARSTVA ZARICA



Slika 1. Zaključena nosilna konstrukcija Centra krožnega gospodarstva Zarica (3. 9. 2025). Foto: Mitja Lalović.

Lokacija: Kranj

Investitor: Komunala Kranj, javno podjetje, d. o. o.

Naziv projekta: Projektiranje in gradnja upravne stavbe CKG Zarica, z upoštevanjem okoljskih vidikov

Projektant arhitekture: Kombinat arhitekti, projektiranje, d. o. o.

Projektant gradbenih konstrukcij: CBD, d. o. o.

Izvajalec: Konzorcij Tosidos, d. o. o., in Riko, d. o. o.

Avgusta 2025 smo v družbi Tosidos za naročnika Komunalo Kranj pričeli montažo lesene nosilne konstrukcije upravne stavbe Centra krožnega gospodarstva Zarica, ki je umeščena v središče območja dejavnosti komunalnega podjetja v Kranju ob reki Savi. Vizija podjetja, ki opravlja javne komunalne službe, temelji na zavezanosti načelom krožnega gospodarstva in trajnostnega razvoja. Kombinat arhitekti so zasnovali inovativno krožno stavbo, ki odraža naročnikove usmeritve, njena nosilna konstrukcija pa je skoraj v celoti izvedena iz lesa.

Pred pričetkom izvedbe temeljne plošče, ki je edini armiranobetonski element v objektu, je bila izvedena zamenjava temeljnih tal v povprečni globini štiri metre.

Montaža nosilne konstrukcije je trajala tri tedne, potekala je brez zapletov in skladno s terminskim planom. Za pripravo, organizacijo in izvedbo lesene gradnje je skrbel Tosidosov tehnolog, ki je vodil celoten proces – od zasnove 3D-modela in delavniških načrtov za razrez lesa z minimalnim odpadom do logistike razporeda dostav plošč na gradbišče ter montažnih načrtov.



Slika 2. Temeljna plošča (5. 8. 2025). Foto: Nejc Vurnik.



Slika 3. Gradnja pritlične etaže (19. 8. 2025). Foto: Nejc Vurnik.



Slika 4. Izvedba 1. etaže (25. 8. 2025). Foto: Nejc Vurnik.



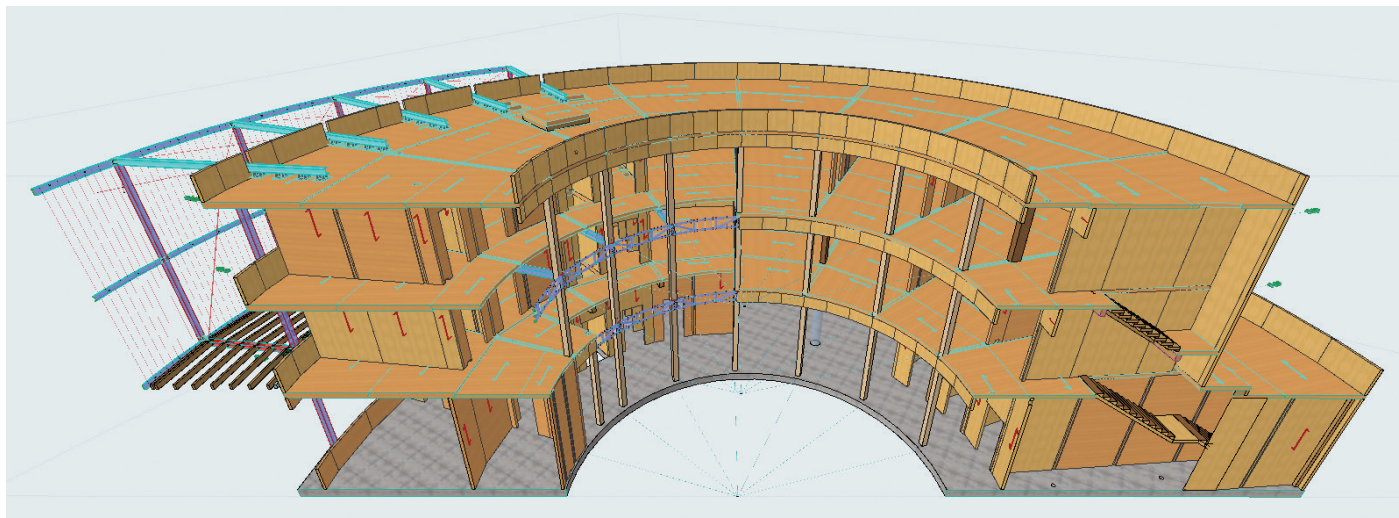
Slika 5. Zaključevanje zgornje, 2. etaže (1. 9. 2025). Foto: Nejc Vurnik.

Osnovni volumen stavbe obsega tri etaže v skupni višini 12,3 metra in ima premer 32 metrov. Razdeljen je na dva kolobarja: zunanji bo obsegal funkcionalne prostore z vidnim lesenim stropom, v notranjem kolobarju pa bo potekal hodnik.



Slika 6. Pogled na notranji atrij. Foto: Mitja Lalović.

Konstruktivno je osnovni nosilni sistem objekta zasnovan s serijo križno lepljenih CLT-sten in lesenih lepljenih nosilcev, ki potekajo v radialni smeri objekta na rastru 24°, v petnajstih oseh. Lepljeni nosilci so podprti s stebri. V tangencialni smeri preko sten in nosilcev potekajo CLT-plošče. Torzijsko stabilnost objekta poleg CLT-sten v radialni smeri dopolnjujejo še CLT-stene v tangencialnih smereh ter štiri jeklena povezja v vsaki etaži. V pritlični etaži najdemo tudi en betonski steber z obodom iz kanalizacijskih cevi (vir: projektna dokumentacija).



Slika 7. 3D-prerez. Vir: Mitja Lalović Lalović.



Slika 8. Kombinacija les-jeklo-beton. Foto: Katarina Sirk.



Slika 9. Stopnice ob notranjem atriju. Foto: Mitja Lalović.

Objekt CKG Zarica bo nedvomno lep primer trajnostne gradnje, ki ga bodo odlikovali obnovljivi materiali, nizke vgrajene emisije, uporaba recikliranih materialov, energetska učinkovitost in čisti gradbeni procesi. Po količini uporabljenega lesa se bo uvrstil med največje v Sloveniji, saj je v konstrukcijo vgrajenih približno 650 m³ lesa, večinoma križno lepljenega (CLT). V nadaljevanju del bodo v notranjosti objekta uporabljeni različni reciklirani materiali, kot so parket, predelane svetilke, tlakovci in notranja oprema.

Gradbeništvo ima velik vpliv na okolje, zato je naša skupna zaveza, da sledimo načelom trajnostne gradnje. Načrtovati in graditi moramo pametno, odgovorno in z mislijo na prihodnost.



Slika 10. Montaža jeklenega nosilca na CLT-stene. Foto: Mitja Lalovič.



Slika 11. Končni videz stavbe CKG Zarica. Vir: Kombinat arhitekti.

Avtorji fotoreportaže: Martin Baumgartner, Naida Zalokar, Katarina Sirk, Tosidos, d. o. o.

FOTOREPORTAŽA BAZEN KRŠKO



Slika 1. Gradbišče Bazen Krško.

Lokacija: Krško

Investitor: Občina Krško

Izvajalec: GIC GRADNJE, d. o. o.

Fotografije: arhiv GIC GRADNJE, d. o. o.

Na vzhodnem robu Krškega, ob Ulici krških žrtev, poteka gradnja sodobnega pokritega bazena, ki bo postal osrednji športni objekt posavske regije. Projekt v investiciji Občine Krško in izvedbi podjetja GIC GRADNJE, d. o. o., sodi med največje javne investicije občine v zadnjem desetletju in bo mestu prinesel napredno, trajnostno zasnovano športno infrastrukturo za rekreacijo, tekmovanja in medgeneracijsko druženje.

Arhitekturno bo objekt zasnovan v kompaktni paviljonski obliki z enokapno streho in obsežnimi zasteklitvami, ki omogočajo odprto vizualno povezavo z okolico. Objekt bo vključeval tekmovalni bazen z dvanajstimi plavalnimi progami, učni bazen, velnes, fitnes, večnamenske dvorane, bar ter sanitarije za avtodome. Posebnost zasnove so ločeni vhodi za športnike, obiskovalce in druge uporabnike, kar omogoča hkratno izvajanje različnih programov brez medsebojnega motenja.

Gradnja poteka skladno s časovnim načrtom, zaključek pa je predviden v drugi polovici leta 2026. Objekt je načrtovan v skladu s sodobnimi arhitekturnimi in gradbeno-tehničnimi standardi, z upoštevanjem energetske učinkovitosti in trajnostnih načel. Predstavlja pomemben korak k urbanistični prenovi območja ob vhodu v mesto ter bo po dokončanju postal nova identitetna točka Krškega in širše regije.

V nadaljevanju osvetljujemo gradbene faze in izzive, ki spremljajo izvedbo tega tehnično zahtevnega in za lokalno skupnost pomembnega objekta.

Za kakovostno izvedbo je ključno natančno načrtovanje betoniranja. Na gradbišču Bazena Krško so betonaže potekale v jutranjih ali nočnih urah, ko so pogoji najugodnejši. To zmanjšuje tveganje za izsuševanje in nastanek mikrorazpok, kar je ključnega pomena pri masivni temeljni plošči.



Slika 2. Jutranja betonaža.

Jutranja betonaža večjega segmenta temeljne plošče prikazuje natančno usklajen potek del – z organiziranim dotokom betona preko črpalk, kar omogoča kontinuirano vgradnjo in enakomerno obdelavo površin. Homogena izvedba celotnega sloja je bistvena za zagotovitev vodotesnosti in konstrukcijske stabilnosti



Slika 3. Nočna betonaža.

V ospredju so razvidni vgrajeni cevni razvodi, armatura in sistemski opaži, ki opredeljujejo obliko bodočih bazenskih sten. Dela so potekala v soju reflektorjev, ob sodelovanju več ekip, ki so usklajeno zagotavljale kakovostno izvedbo tudi v zahtevnejših svetlobnih pogojih.



Slika 4. Nega betona.

Temeljna plošča, ki mora prenašati velike obremenitve in zagotavljati vodotesnost, je bila po betoniranju skrbno negovana. Uporabljeni so bili folije, redno vlaženje in zaščitna sredstva za upočasnjevanje izhlapevanja vode. Takšna nega omogoča ustrezno hidratacijo cementa in razvoj trdnosti ter skupaj s tehničnim nadzorom predstavlja ključen element zagotavljanja kakovosti in trajnosti konstrukcije.



Slika 5. *Dela na plošči nad kletjo.*

Na gradbišču potekajo intenzivna gradbena dela na nadgradnji konstrukcijskih elementov nad kletno etažo. Ob zaključeni temeljni plošči in izvedenih stenah kleti so se začele aktivnosti, povezane z opaževanjem, armiranjem in pripravo na betoniranje nosilne medetažne plošče, ki leži nad kletnimi prostori in bazenskimi rezervoarji.



Slika 6. Umestitev Bazena Krško v neposredno bližino reke Save.

Zaradi lege objekta na območju z majhno poplavno nevarnostjo so bile že ob projektiranju predvidene dodatne varnostne rešitve. V skladu z uredbo o gradnji na poplavnih območjih in vodnim soglasjem so bili izvedeni ključni ukrepi: dvig temeljne plošče nad poplavno ravnino, zatesnitev kletnih odprtín, uporaba vodotesnega betona in učinkovita drenaža. Klet je delno vkopana, pritličje pa dvignjeno za 1,3 m. Vsi sistemi so načrtovani za izredne razmere, objekt pa ustreza sodobnim smernicam varne in trajnostne gradnje.



Slika 7. Gradbišče Bazena Krško – priprava za naslednjo fazo betoniranja.

Zračni posnetek prikazuje gradbišče Bazena Krško tik ob reki Savi. Vidni sta izvedeni bazenska plošča in konstrukcija pritličja, medtem ko organizacija žerjavov, dovoznih poti in skladišč materiala omogoča nemoten potek del. Vsaka faza gradnje – od temeljev do konstrukcijskih detajlov – je usmerjena v trajnost, kakovost in dolgoročno uporabnost, kar priča o odgovornem pristopu vseh udeležениh v projektu.

Avtor fotoreportaže: dr. Mateja Držečnik, univ. dipl. inž. grad., GIC GRADNJE, d. o. o.

NOVI DIPLOMANTI GRADBENIŠTVA

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Primož Ivanuša, Geometrija in statika ločnih konstrukcij, mentor doc. dr. Peter Češarek, somentorica strok. svetnik Mojca Premuš;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=170238&lang=slv>

Peter Peterman, Analiza medetažne plošče AB stanovanjske stavbe, mentorica doc. dr. Jerneja Češarek Kolšek;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=169868&lang=slv>

Roman Bašelj, Horizontalne hidroizolacije cestnih premostitvenih objektov, mentor viš. pred. dr. Matej Kušar;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=1706473>

David Lovko, Izvedba gradbene jame in temeljenja v strugi reke Krke ob gradnji Resslervega mostu v Mršechi vasi, mentor doc. dr. Bojan Čas, somentor izr. prof. dr. Andrej Kryzanowski;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=170440>

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Tomaž Grlj, 3-D modeliranje sprememb valovanja ob valobranih, mentor doc. dr. Gorazd Novak;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=170231&lang=slv>

Hana Huth Lukšič, Vpliv povišanih temperatur na mehanske lastnosti konopljinoga betona, mentor prof. dr. Tomaž Hozjan, somentor doc. dr. Gregor Trtnik;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=169887&lang=slv>

Primož Đuričić Žibert, Ocena požarnega tveganja stavb, mentor prof. dr. Tomaž Hozjan, somentorica asist. dr. Sabina Huč;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=170244&lang=slv>

Miha Masten, Eksperimentalno in numerično določanje dinamičnega odziva enostavnega modela konstrukcije, mentor izr. prof. dr. Matija Gams, somentor doc. dr. Anže Babič;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=170234&lang=slv>

Katja Kopušar, Analiza in projektiranje skladiščne plošče, mentor prof. dr. Boštjan Brank;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=170948>

Ožbej Gosnik, Formalna in neformalna komunikacija na gradbišču, mentor doc. dr. Robert Klinc;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=170669>

Jon Bezgovšek, Geotehnično projektiranje plitvih temeljev - primerjava obstoječih in novih standardov Evrokod, mentor izr. prof. dr. Boštjan Pulko;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=171038>

Anastasija Lazarević, Prednosti in omejitve uporabe BIM kot ogrodja za operativno izvajanje projektov, mentor doc. dr. Robert Klinc;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=171419>

Brina Pečjak, Umirjanje prometa na Pionirski cesti v Dolenjskih Toplicah, mentor doc. dr. Peter Lipar;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=171422>

Ambrož Rodošek, Izdelava BIM-modela zgrajenega večetažnega objekta na podlagi oblaka točk s programsko opremo Allplan, mentor doc. dr. Robert Klinc, somentor doc. dr. Klemen Kregar;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=171160>

Mojca Pavlin, Načela ravnanja ob nastanku zemeljskih plazov, mentor prof. dr. Janko Logar, somentor doc. dr. Matej Maček;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=171631>

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

Miha Koplan, Račun povosov armiranobetonske plošče z upoštevanjem razpok in reoloških pojavov, mentor izr. prof. dr. Sebastjan Bratina, somentor Žiga Plevel;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=170239&lang=slv>

Janez-Jani Kosec, Analiza »križnih« prehodov za pešce z mikrosimulacijskim modelom in smiselnost uvedbe v slovenskem prostoru, mentor doc. dr. Peter Lipar, somentor doc. dr. Rok Marsetič;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=170226&lang=slv>

Tomaž Durcik, Analiza in dimenzioniranje karakterističnih elementov nosilne konstrukcije večetažne stanovanjske stavbe, mentor izr. prof. dr. Sebastjan Bratina;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=170242>

Urban Zemljič, Optimizacija in digitalizacija poslovnih procesov v gradbenem inženiring podjetju, mentor doc. dr. Robert Klinc, somentor asist. dr. Aleksander Srdić;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=170243&lang=slv>

Martina Stopar, Vpliv temperature in dušenja na vibracije brvi z nosilnim sistemom nateznega traku zaradi dinamične obtežbe pešcev, mentor doc. dr. Bojan Čas, somentor doc. dr. Peter Češarek;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=171696>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO (smer Informacijsko modeliranje zgradb - BIM A+)

Sangeen Khan, Predlogi generativnega oblikovanja preko integracije LLM-BIM, mentor prof. dr. Žiga Turk;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=171102>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Lana Radulović, Vrednotenje vpliva prestrežanja padavin na kinetično energijo dežnih kapljic, mentorica prof. dr. Mojca Šraj, somentorica asist. dr. Katarina Zabret;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=170209>

III. STOPNJA – DOKTORSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRAJENO OKOLJE

Tilen Turk, Vpliv izbranega dolomitnega agregata na lastnosti svežega in obstojnost strjenega betona, mentorica prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, somentorja doc. dr. Petra Štukovnik in izr. prof. dr. Marjan Marinšek;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=170218&lang=slv>

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

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Rok Skok, Analiza vseživljenjskih stroškov za leseno montažno stavbo, mentorica izr. prof. dr. Nataša Šuman, somentor Željko Vene;
<https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=92860&lang=slv>

Maša Žlavs, Razvoj toplotnoizolacijskega geopolimera na osnovi elektrofilterskega pepela z dodatkom perlita, mentor izr. prof. dr. Andrej Ivanič, somentor doc. dr. Gregor Kravanja;
<https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=93656&lang=slv>

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Redon Karpuzi, zaključek študija brez zaključnega dela.
Enes Hukić, zaključek študija brez zaključnega dela.
Aljaž Marolt, zaključek študija brez zaključnega dela.
Lara Vrbnjak, zaključek študija brez zaključnega dela.
Amar Beširević, zaključek študija brez zaključnega dela.
Nina Draganović, zaključek študija brez zaključnega dela.
Žak Artelj, zaključek študija brez zaključnega dela.
Nik Žnidarič, zaključek študija brez zaključnega dela.
Delfina Mileska, zaključek študija brez zaključnega dela.

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Martina Ribič, Primerjalna analiza konvencionalnega in BIM pristopa k pripravi načrtov armiranobetonskih elementov, mentor doc. dr. Žiga Unuk, somentor doc. dr. Milan Kuhta, delovni somentor Vid Lešič;
<https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=93163&lang=slv>

III. STOPNJA – DOKTORSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Damjan Maučec, Uporaba analize občutljivosti za namen razvoja smernic za načrtovanje energijsko učinkovitih večetažnih lesenih stavb z ustreznim toplotnim ugodjem, postavljenih v različnih klimatskih conah, mentorica prof. dr. Vesna Žegarac Leskovar, somentor prof. dr. Miroslav Premrov;
<https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=92598>

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

KOLEDAR PRIREDITEV

9.–12.9.2025

XXI Technical Dam Control International Conference
Krakov, Poljska
<https://tkz.is.pw.edu.pl/en/>

16.–17.9.2025

Mednarodna konferenca InnoRenew CoE 2025 "From lab to life: innovative solutions for a healthier and greener built environment"
Izola, Slovenija
<https://innorenew.eu/sl/iric2025/>

17.9.2025

Dan Združenja za beton Slovenije (ZBS)
Ljubljana, Slovenija
www.zabeton.si/shranite-si-datum-17-9-2025-za-dan-zbs/

17.–21.9.2025

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

24.–27.9.2025

21. simpozij gradbenih konstruktorjev Severne Makedonije
Ohrid, Makedonija
<http://mase.gf.ukim.edu.mk/>

1.–3.10.2025

8. posvetovanje slovenskih geoteknikov in 24. Šukljotov dan
Rogaška Slatina, Slovenija
<https://sloged.si/8psg/>

15.–17.10.2025

Mednarodno naučno-stručno svetovanje »Geotehnički aspekti gradvinarstva i zemljotresno inženjerstvo 2025«
Vrnjačka Banja, Srbija
<https://ingkomora.rs/vesti/savetova-e-geotehnicki-aspekti-gra-evinarstva-i-zem-otresno-inzhe-erstvo-2025>

6.11.2025

GBC Slovenia - 9. Trajnostna konferenca
Ljubljana, Slovenija
<https://gbc-slovenia.si/dogodki-in-izobrazevanja/9-trajnostna-konferenca>

12.–13.11.2025

12. Dnevi gradbenega prava
Laško, Slovenija
www.uradni-list.si/izobrazevanja/dogodek/12--dnevi-gradbenega-prava/

13.–14.11.2025

46. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije
Portorož, Slovenija
www.sdgk.si

19.–21.11.2025

ITA Slovenija - 15. mednarodna konferenca o predorih in podzemnih objektih
Ljubljana, Slovenija
<https://conference.ita-slovenia.si/>

22.–24.4.2026

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

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

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

20.–23.10.2026

INTERPRAEVENT 2026
Sapporo, Hokkaido, Japonska
www.kokusaisabo.or.jp/interpraevent2026/english/home-e.htm

23.–27.11.2026

WLF7 - 7th World Landslide Forum
Amrita, Faridabad Campus, 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