

maj 2022

letnik 71

Gradbeni vestnik

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



134

MODELIRANJE IZGUBE
UPORABNOSTI IN OCENA
NAVIDEZNE STAROSTI ASFALTNIH
VOZIŠČ NA OSNOVI VIZUALNE
OCENE STANJA

139

SPREMLJANJE KONDICIJSKEGA
STANJA BETONSKIH TEŽNOSTNIH
PREGRAD

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

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

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

Lektor: **Jan Grabnar**

Lektorica angleških povzetkov:
Romana Hudin

Tajnica: **Eva Okorn**

Oblikovalska zasnova: **Agencija GIG**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:
Kočeviski tisk

Naklada: 450 tiskanih izvodov
3000 naročnikov elektronske verzije

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

Letno izide 12 številčk. Letna naročnina
za individualne naročnike znaša 23,16 EUR;
za študente in upokoјence 9,27 EUR;
za družbe, ustanove in samostojne podjetnike
171,36 EUR za en izvod revije; za
naročnike iz tujine 80,00 EUR.
V ceni je všteti DDV.
Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:
SI56 0201 7001 5398 955

Slika na naslovnici:

stanovanjska soseka Novi vrtovi v Mariboru,
foto: Aleksander Papec

**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, maj 2022, letnik 71, str. 133-156

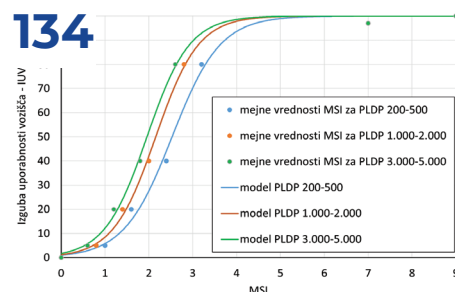
Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

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

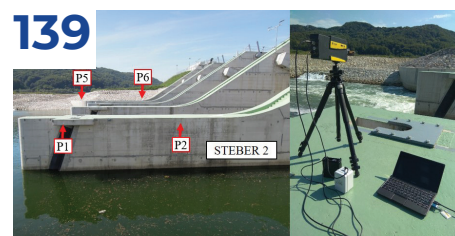
Uredništvo

ČLANKI PAPERS

dr. Primož Pavšič, univ. dipl. kem.
**MODELIRANJE IZGUBE UPORABNOSTI IN
OCENA NAVIDEZNE STAROSTI ASFALTNIH
VOZIŠČ NA OSNOVI VIZUALNE OCENE STANJA**
**MODELING LOSS OF SERVICEABILITY AND
ASSESSMENT OF APPARENT AGE OF ASPHALT
PAVEMENTS ON THE BASIS OF VISUAL
CONDITION ASSESSMENT**



dr. Mateja Klun, mag. inž. ok. grad.
prof. dr. Dejan Zupan, univ. dipl. inž. mat.
izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski, univ. dipl. inž. grad.
**SPREMLJANJE KONDICIJSKEGA STANJA
BETONSKIH TEŽNOSTNIH PREGRAD**
**STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF
CONCRETE GRAVITY DAMS**



POROČILO S STROKOVNEGA SREČANJA

GBC Slovenija
**TRAJNOSTNI PRISTOP K PROJEKTIRANJU
POTRESNO OBSTOJNIH ZIDANIH STAVB**



FOTOREPORTAŽA Z GRADBIŠČA

Tomaž Goričan, mag. inž. grad.
**IZVEDBA UREDITVE VOZLIŠČA Z UREDITVIJO
ŽELEZNIŠKE POSTAJE PRAGERSKO –
PODVOZ A1 IN PODHOD**



NOVI DIPLOMANTI

Eva Okorn

KOLENDAR PRIREDITEV

Eva Okorn

dr. Primož Pavšič, univ. dipl. kem.
primoz.pavsic@gi-zrmk.si
Gradbeni inštitut ZRMK, d. o. o.,
Dimičeva 12, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK 625.042:691.16

MODELIRANJE IZGUBE UPORABNOSTI IN OCENA NAVIDEZNE STAROSTI ASFALTNIH VOZIŠČ NA OSNOVI VIZUALNE OCENE STANJA

MODELING LOSS OF SERVICEABILITY AND ASSESSMENT OF APPARENT AGE OF ASPHALT PAVEMENTS ON THE BASIS OF VISUAL CONDITION ASSESSMENT

Povzetek

Pod vplivi prometnih obremenitev in okoljskih vplivov se kakovost vozišč stalno slabša. Z uporabo modificiranega švicarskega indeksa MSI lahko ocenimo in spremljamo staranje vozišča, sposobnost zagotavljanja njegove funkcije pa lahko opredelimo z izgubo uporabnosti vozišča. Prispevek podaja predlog nove modelne funkcije za opredelitev staranja vozišča oziroma njegove izgube uporabnosti na osnovi vizualne ocene stanja vozišča (MSI) in določitev njegove navidezne starosti glede na predlagani model staranja vozišč.

Ključne besede: vozišče, ocena stanja, MSI, model

Summary

Under the influence of traffic load and environmental conditions, pavements continuously deteriorate. Using the modified Swiss index (MSI), we can assess and monitor pavement aging, while its functionality can be defined by the loss of serviceability. The article presents a proposed new model function for describing pavement aging or loss of serviceability with the assessment of the pavement condition using MSI and the determination of the apparent pavement age, based on the proposed model of pavement aging.

Key words: pavement, condition assessment, MSI, model

1 UVOD

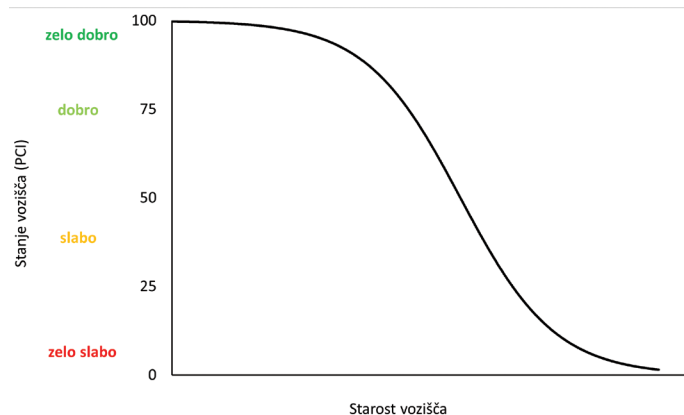
Za zagotavljanje primerne trajnosti vozišč se pri načrtovanju in gradnji le-teh upoštevajo prometne obremenitve in njihova predvidena rast, zunanji dejavniki, kot so podnebne razmere, in geometrija predvidenega vozišča [Žmavc, 2010]. Na osnovi teh podatkov se tako dimenzionira voziščna konstrukcija, pri čemer se običajno upošteva 20-letna planska (življenjska) doba vozišča [Žmavc, 2010]. Pod predvidenimi prometnimi obremenitvami in zunanjimi dejavniki se takšno vozišče seveda stara, pri čemer na vozišču nastajajo različne poškodbe ([AASTHO, 1993], [Joslin, 2019], [Majeed, 2019], [Sidess, 2020]). Poznavanje stanja kot tudi predvidevanje hitrosti propadanja vozišča pa sta ključni za planiranje vzdrževanja, obnov in potrebnih sredstev [Jamnik, 2003]. Ena izmed metod ugotavljanja stanja cest je vizualna ocena stanja vozniških površin po metodologiji modificiranega švicarskega indeksa MSI (angl. Modified Swiss Index). Pri tem se ocenjujejo različni tipi poškodb asfaltne vozne površine: razpokanost, obrabljenost, zakrpanost in poškodbe z udarnimi jamami. Na podlagi njihove jakosti in obsežnosti pa se lahko izračuna indeks MSI, ki dosega vrednost 0 do 9, pri čemer vrednost 0 pomeni brez poškodb, 9 pa najslabše možno stanje ([Jamnik, 2003], [Krže, 2020], [Žmavc, 2010]). Glede na vrednost MSI in prometno obremenitev (PLDP – povprečni dnevni letni promet) lahko stanje posameznega vozišča razvrstimo v 5 razredov, in sicer: zelo dobro, dobro, mejno, slabo in zelo slabo (preglednica 1 [Zupan, 2016]). Lahko pa se razredi stanja določijo tudi po drugačni metodologiji, prilagojeni specifičnim zahtevam posameznega cestnega omrežja [Krže, 2020].

Prometna obremenitev (PLDP)	Razredi stanja vozišča na državnih cestah (vrednosti MSI)				
	Zelo slabo	Slabo	Mejno	Dobro	Zelo dobro (pod)
Nad 10.000	Nad 2,4	1,6-2,4	1,0-1,6	0,4-1,0	Pod 0,4
5.000 - 10.000	Nad 2,5	1,7-2,5	1,1-1,7	0,5-1,1	Pod 0,5
3.000 - 5.000	Nad 2,6	1,8-2,6	1,2-1,8	0,6-1,2	Pod 0,6
2.000 - 3.000	Nad 2,7	1,9-2,7	1,3-1,9	0,7-1,3	Pod 0,7
1.000 - 2.000	Nad 2,8	2,0-2,8	1,4-2,0	0,8-1,4	Pod 0,8
500 - 1.000	Nad 3,0	2,2-3,0	1,5-2,2	0,9-1,5	Pod 0,9
200 - 500	Nad 3,2	2,4-3,2	1,6-2,4	1,0-1,6	Pod 1,0
Pod 200	Nad 3,4	2,6-3,4	1,7-2,6	1,1-1,7	Pod 1,1

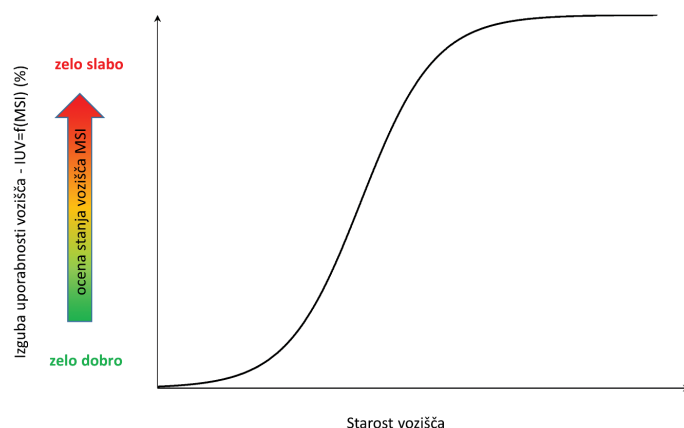
Preglednica 1. Razredi stanja vozišča z mejnimi vrednostmi MSI glede na PLDP [Zupan, 2016].

Staranje oziroma propadanje vozišča ni linearen proces ([AASTHO, 1993], [Joslin, 2019], [Samer, 2016], [Sidess, 2020]). V literaturi najpogosteje prikazan tipičen potek slabšanja stanja vozišča oziroma izgube uporabnosti vozišča podaja slika 1, pri čemer se za osnovo uporablja indeks PCI (angl. pavement condition index) ([AASTHO, 1993], [Hanandeh, 2022], [Joslin, 2019], [Samer, 2016], [Sidess, 2020], [Yu, 2005]). PCI opisuje stanje vozišča na podoben način kot MSI, vendar pa so nje-

gove vrednosti od 0 do 100, pri čemer pomeni 0 najslabšo kakovost oziroma porušitev vozišča, 100 pa najboljšo kakovost. Iz tega razloga poteka krivulja poslabšanja ali izgube uporabnosti vozišča na osnovi PCI navzdol, medtem ko smo pri nas privzeli potek krivulje v nasprotni smeri, kar je v skladu z opredelitvijo vrednosti MSI.



Slika 1. Potek tipične krivulje slabšanja stanja oziroma izgube uporabnosti vozišča na osnovi PCI [Joslin, 2019].



Slika 2. Potek tipične krivulje izgube uporabnosti vozišča na osnovi MSI.

Vsa vozišča se ne starajo enako hitro, temveč na razvoj izgube uporabnosti vpliva vrsta različnih dejavnikov, od kakovosti vgrajenih materialov, podnebnih sprememb, povečane ali zmanjšane prometne obremenitve in drugi ([Mahmood, 2014], [Žmavc, 2010]). Vozišča, ki se starajo hitreje od pričakovanega, tako izkazujejo višjo navidezno starost, tista, ki se starajo počasneje, pa nižjo navidezno starost. Navidezna starost vozišča je lahko pomemben podatek pri nadaljnjem načrtovanju ukrepov vzdrževanja ali sanacij.

Z uporabo ustrezne modelne funkcije in nekaterih osnovnih predpostavk, ki so predstavljene v tem prispevku, lahko povežemo stopnjo izgube uporabnosti vozišča (IUV) z vrednostjo MSI in za posamezne prometne obremenitve opredelimo tipični časovni razvoj poslabšanja vozišča, iz realnih podatkov MSI pa lahko ocenimo tudi navidezno starost vozišča.

2 MODELIRANJE

2.1 Modelne osnove

Za pripravo modela, s katerim bi lahko povezali oceno stanja vozišča MSI z izgubo uporabnosti vozišča (IUV) in njegovim časovnim razvojem, je bilo treba najprej posamezne razrede stanja vozišča opisati tudi s stopnjo poslabšanja oziroma z izgubo uporabnosti vozišča (IUV), ki jo podamo v deležih, izraženih z odstotki (%). Iz literature lahko povzamemo, da je pri tipičnem staranju vozišča po okoli 12 letih doseženo območje mejne vrednosti. Ob prehodu v območje slabega stanja je izguba uporabnosti vozišča okoli 40 %, dosežena pa je 75 % njegove predvidene življenjske dobe. Ob koncu planske dobe je vozišče predvidoma že v zelo slabem stanju, izgubo uporabnosti vozišča pa lahko ocenimo že na 80 % ([Bureau of Highway Maintenance, 2018], [FHWA, 2013], [Joslin, 2019]). Na podlagi teh predpostavk lahko posameznemu stanju vozišča, ovrednotenemu z mejnimi vrednostmi MSI, glede na predvideno prometno obremenitev podano v PLDP (povprečni letni dnevni promet), pripišemo tipično izgubo uporabnosti in tipično starost vozišča (preglednica 2). V prispevku smo se osredotočili na tri skupine prometnih obremenitev.

T_N (leta)	IUV _N (%)	Mejna vrednost MSI		
		PLDP 200-500	PLDP 1.000-2.000	PLDP 3.000-5.000
0	0	0	0	0
8	5	1,0	0,8	0,6
12	20	1,6	1,4	1,2
16	40	2,4	2	1,8
20	80	3,2	2,8	2,6
30	97	7,0	7,0	7,0
40	100	9,0	9,0	9,0

Preglednica 2. Tipična starost vozišča T_N in tipična izguba uporabnosti IUV_N glede na mejne vrednosti MSI pri nekaterih prometnih obremenitvah.

2.2 Metodologija

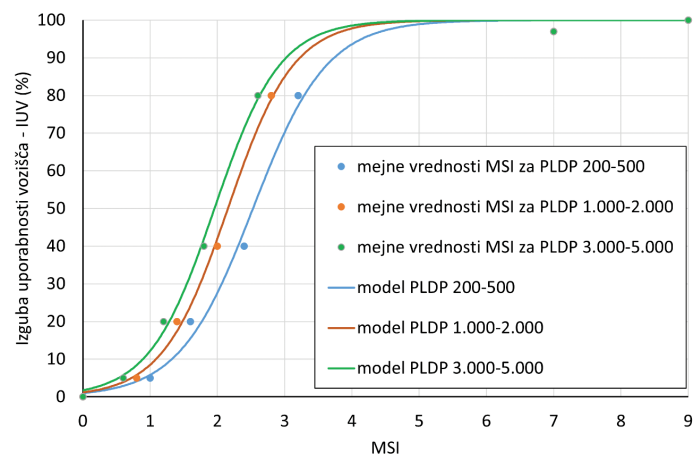
V prvi fazi priprave modela smo povezali izgubo uporabnosti vozišča (IUV) z vrednostmi MSI, ki opredeljujejo posamezno stanje vozišča pri izbrani prometni obremenitvi (preglednica 2).

Modelno funkcijo smo opredelili na osnovi metodologije izbiere empiričnih obrazcev [Bronštajn, 1963], pri čemer se je izkazalo, da odvisnost IUV od MSI lahko opišemo z enačbo (1). Za določitev parametrov modelov je bila uporabljena programska koda Solver, ki je del Microsoftovega Excela in sloni na nelinearnem programiranju s posplošeno metodo reduciranega gradienta (GRG) [Macuh, 2018] v povezavi z metodo najmanjših kvadratov.

$$IUV = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \times \tanh(K_{M1} \times (K_{M2} \times MSI - K_{M3}))\right) \times 100 \quad (1)$$

V enačbi (1) je IUV (%) funkcija vrednosti MSI, K_{M1} , K_{M2} , K_{M3} pa parametri modela.

Z rešitvijo modela dobimo po tri parametre za vsako obravnavano prometno obremenitev (preglednica 3). Za vsako prometno obremenitev lahko opredelimo odvisnost IUV od vrednosti MSI (slika 3) oziroma iz podanega MSI določimo pripadajočo IUV (enačba (1)).



Slika 3. Odvisnost IUV od MSI za različne prometne obremenitve.

Prometna obremenitev (PLDP)	Parametri modela IUV = f(MSI)		
	K_{M1}	K_{M2}	K_{M3}
200-500	0,093374	9,757281	24,681019
1.000-2.000	0,145154	7,075553	15,2619024
3.000-5.000	0,235195	4,386591	8,585876

Preglednica 3. Parametri modela odvisnosti IUV od MSI za izbrane prometne obremenitve.

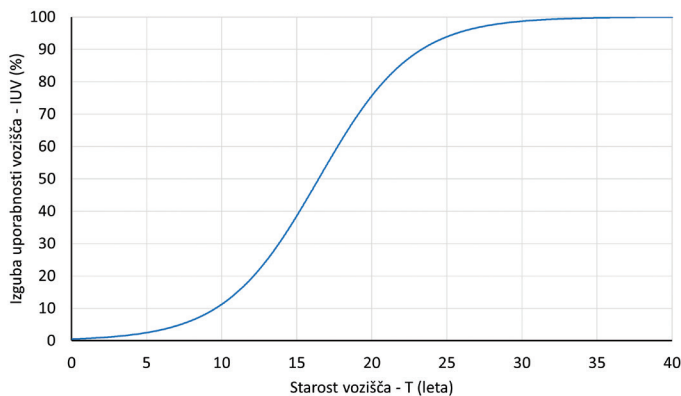
Na podoben način lahko povežemo IUV tudi s starostjo vozišča T v letih. Na ta način lahko definiramo tipično krivuljo izgube uporabnosti vozišča, ki je enake oblike kot odvisnost IUV od MSI in jo lahko opišemo z enačbo (2).

$$IUV = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \times \tanh(K_{T1} \times (K_{T2} \times T - K_{T3}))\right) \times 100 \quad (2)$$

V enačbi (2) je IUV (%) funkcija starosti vozišča T , K_{T1} , K_{T2} , K_{T3} pa parametri modela, ki so neodvisni od prometne obremenitve.

Ob uporabi vhodnih predpostavk potek krivulje (preglednica 2) ni odvisen od prometne obremenitve in nam podaja tipično oziroma referenčno krivuljo izgube uporabnosti vozišča skozi njegovo življenjsko dobo (slika 4). Parametri referenčne krivulje K_{T1} , K_{T2} , K_{T3} so predstavljeni v preglednici 4.

Ob poznavanju realne vrednosti MSI za neki cestni odsek lahko z uporabo enačbe (1) in parametrov za predvideno prometno obremenitev izračunamo izgubo uporabnosti vozišča (IUV), z uporabo enačbe (3) in parametrov K_{T1} , K_{T2} in K_{T3} pa izračunamo navidezno starost vozišča T_N , torej starost, ki bi bila za izmerjeni MSI pričakovana pri normalnem staranju.



Slika 4. Referenčna krivulja izgube uporabnosti vozišča v odvisnosti od starosti vozišča.

Parametri modela IUV = f(T)		
K_{T1}	K_{T2}	K_{T3}
0,160856	0,995027	16,374464

Preglednica 4. Parametri modela referenčne krivulje odvisnosti IUV od starosti vozišča.

$$T_N = \frac{\tanh^{-1}(50 \times IUV - 1) + K_{T1} \times K_{T3}}{K_{T1} \times K_{T2}} \quad (3)$$

Za vozišče znane starosti lahko po enačbi (2) določimo pričakovano vrednost IUV (IUV_N), ki bi ga moralo vozišče dosegati ob normalnem staranju. Iz IUV_N lahko po enačbi (4) izračunamo tudi pričakovano vrednost MSI (MSI_N) pri tej starosti vozišča.

$$MSI_N = \frac{\tanh^{-1}(50 \times IUV_N - 1) + K_{M1} \times K_{M3}}{K_{M1} \times K_{M2}} \quad (4)$$

V enačbi (4) je MSI_N referenčni modificirani švicarski indeks, ki bi ga moralo vozišče dosegati v času T , parametri K_{M1} , K_{M2} , K_{M3} pa morajo biti izbrani glede na predvideno prometno obremenitev.

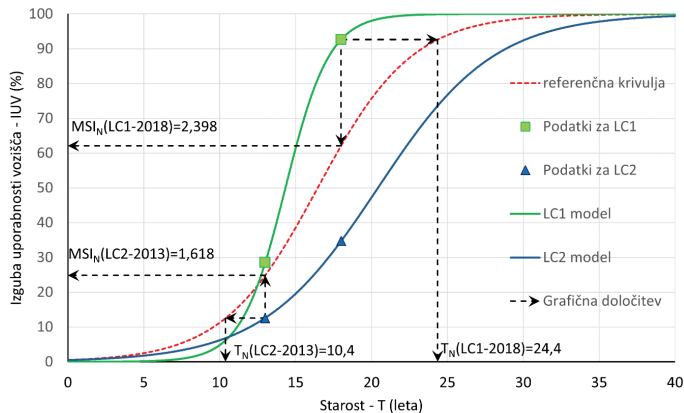
2.3 Praktični primer

Pripravljeni metodologijo smo uporabili na realnem primeru dveh lokalnih cest, pri čemer smo pridobili podatke o

Cesta	Starost vozišča (leta)	Izmerjeni MSI	Parametri modela			T_N	MSI_N
			K_{T1}	K_{T2}	K_{T3}		
LC1	13	1,71	0,132026	2,613297	37,450106	13,6	1,168
	18	3,39				24,4	2,398
LC2	13	1,21	0,161613	0,806229	16,468267	10,4	1,168
	18	1,85				14,5	2,398

Opomba: V izračunih uporabljeni K_{T1} , K_{T2} in K_{T3} za PLDP 1.000–2.000

Preglednica 5. Vhodni podatki in rezultati izračunov za praktični primer.



Slika 5. Potek staranja cestnih odsekov na osnovi realnih MSI ob referenčni krivulji staranja in grafični prikaz določitve navidezne starosti vozišča T_N ter za realno starost pričakovane vrednosti MSI_N .

MSI, določene na osnovi snemanja stanja vozišča za leti 2013 in 2018, okvirni termin izvedbe cest pa je bil ocenjen na leto 2000 [Žiberna 2019]. Za pripravo modela smo privzeli povprečno oceno stanja (MSI) za posamezni odsek in prometno obremenitev PLDP 1.000–2.000. S pomočjo podanih zvez in parametrov smo za vsako stanje (leto) posameznega odseka določili izgubo uporabnosti vozišča (IUV) na podlagi izmerjenega MSI, določili navidezno starost vozišča (T_N) in opredelili vrednost MSI, ki naj bi ga vozišče izkazovalo ob naravnem staranju (MSI_N). Z rešitvijo enačbe (2), na osnovi realnih vrednosti MSI, smo za vsak cestni odsek opredelili tudi predviden potek staranja (preglednica 5 in slika 5), pri čemer je v okviru izračuna treba za vsak realni odsek določiti specifične parametre modela K_{T1} , K_{T2} in K_{T3} .

Iz zbranih podatkov lahko ob uporabi v prispevku podanih mejnih vrednosti za oceno stanja vidimo, da se odsek LC1 stara bistveno hitreje od pričakovanj. V letu 2018 je odsek LC1 v že zelo slabem stanju in vozišče se je navidezno postaralo za skoraj deset let. Odsek LC2 se očitno stara počasneje, saj je njegova navidezna starost v letu 2013 le 10 let (prava starost 13 let), po petih letih (2018) pa je dosežena navidezna starost 14 let, tako da se je vozišče v tem obdobju postaralo za 4 leta.

3 SKLEP

Staranje vozišča ni linearen proces in ga ob vzpostavitvi nekaterih predpostavk in mejnih vrednosti lahko opišemo z izgubo uporabnosti vozišča (IUV) in povežemo z vrednostmi MSI. Na podlagi postavljenih modelov lahko definiramo referenčno krivuljo staranja vozišča in ob realnih podatkih vrednosti MSI določimo navidezno starost vozišča in referenčno vrednost MSI, ki bi bila za vozišče pri tej starosti pričakovana.

Modelni izračuni so nam lahko v pomoč pri ocenjevanju kakovosti in staranja posameznega realnega odseka vozišča in nam omogočajo boljše planiranje vzdrževalnih in sanacijskih ukrepov.

4 LITERATURA

AASTHO, Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Bronštejn, J.K., Semendjajev, K.A., Matematični priročnik za inženirje in slušatelje tehniških visokih šol, Založba življenje in tehnika v Ljubljani, 1963.

Bureau of Highway Maintenance, Highway Maintenance Manual (HMM) 04-05-01, Pavement Maintenance, 2018.

FHWA, Reformulated Pavement Remaining Service Life Framework, publication No. FHWA-HRT-13-038, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2013.

Hanandeh, S., Introducing mathematical modeling to estimate pavement quality index of flexible pavements based on genetic algorithm and artificial neural networks, Case Studies in Construction Materials, 16, 2022.

Jamnik, J., Vizualna ocena stanja vozniških površin na državnih cestah, Državne ceste: informativni bilten, Ministrstvo za promet, Direkcija Republike Slovenije za ceste, 6, 4, 10-12, 2003.

Joslin, K., Lopet, E., Cheng, D.X., Hicks, G., Literature Review on Performance, Best Practices, and Training Needs for Chip Seals, Slurry Surfacing, and Cape Seals, Mineta Transportation Institute, San Jose State University, 2019.

Krže, A., Ocena poškodovanosti cest in plan dolgoročne obnove in asfaltiranja cest z oceno stroškov v občini Šmartno pri Litiji, končno poročilo, Občina Šmartno pri Litiji, <https://obcina.smartno.si/wp-content/uploads/2020/03/Ocena-po%C5%A1kodovanosti-cest-in-plan-dolgoro%C4%8Dne-obnove-in-asfaltiranja-cest-z-oceno-stro%C5%A1kov-v-ob%C4%8Dini-%C5%A0martno-pri-Litiji.pdf>, 2020.

Macuh, B., Škrabl, S., Kos, S., Mejna analiza nosilnosti temeljnih tal pod plitvimi temelji po teoremu zgornje vrednosti, Gradbeni vestnik, 67, 260-267, 2018.

Mahmood, M., Cross-validation of multi-input deterioration prediction model (MID-PM) for network level pavement management, CADBE Doctoral Student Conference: 2014 proceedings, v: Hoxley, M., Crabbe, A., Nottingham Trent University, 9-10 junij 2014, 44-52, 2014.

Majeed, A.A., Kafi, E.M., The Role of Mathematical Models in Responding To Pavement Failures and Distresses in Texas, Journal of Physics: Conference Series, 1362, 2019.

Samer, W. K., Ericlisi, S., Flintsch, G. W., Bryce, J. M., Development of Enchanced Pavement Deterioration Curves, Virginia Transportation Research Council, 2016.

Sidess, A., Ravina, A., Oged, E., A model for predicting the deterioration of the pavement condition index, International Journal of Pavement Engineering, 22, 13, 1625-1636, 2020.

Yu, J., Pavement Service Life Estimation and Condition Prediction, Theses and Dissertations, University of Toledo, 2005.

Zupan, P., Ocena sistema za spremljanje in nadzor rednega vzdrževanja državnih cest v Republiki Sloveniji s predlogi za izboljšave, magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana, 2016.

Žiberna, S., Vrednotenje poškodovanosti cest v Mestni občini Nova Gorica, končno poročilo projekta, DFG Consulting d. o. o., 2006543-1-19-SZ z dne 10.01.2019, 2019.

Žmavc, J., Vzdrževanje cest, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, DRC, 2010.

dr. Mateja Klun, mag. inž. ok. grad.
mateja.klun@fgg.uni-lj.si



prof. dr. Dejan Zupan, univ. dipl. inž. mat.
dejan.zupan@fgg.uni-lj.si



izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski, univ. dipl. inž. grad.
andrej.kryzanowski@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana



SPREMLJANJE KONDICIJSKEGA STANJA BETONSKIH TEŽNOSTNIH PREGRAD

STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF CONCRETE GRAVITY DAMS

Znanstveni članek
UDK 627.82:69.059.4

Povzetek

V Sloveniji se vse bolj soočamo s problemom staranja pregradnih objektov, saj povprečna starost slovenskih pregrad že presega 40 let. Hkrati pa se spoprijemamo tudi s spremenjenimi razmerami, na primer s spremembami v režimih obratovanja na pregradah, namenjenih za hidroenergetsko izrabo. Te spremembe lahko dodatno prispevajo k procesu staranja in k zmanjšanju obratovalne varnosti pregrad. Pregrade so strateško zelo pomembni infrastrukturni objekti, ki prinašajo številne ekonomske (energetika, vodno gospodarstvo, kmetijstvo, turizem) kot tudi družbene koristi (razvojne možnosti v regiji, spodbude gospodarskega razvoja). V primeru tehničnih okvar in porušitev (delnih ali popolnih) pa predstavljajo nevarnost za dolvodna območja. Zagotavljanje dobrega kondicijskega stanja starajočih se pregrad predstavlja enega ključnih izzivov pregradnega inženirstva ne zgolj v Sloveniji, temveč tudi drugod po svetu. V prispevku predstavljamo metodologijo za spremljanje kondicijskega stanja betonskih pregrad s spremljanjem vibracij v kombinaciji z računsko analizo konstrukcije. Metodologija temelji na uporabi nekontaktnih in kontaktnih meritev z beleženjem ambientalnih vibracij. Eksperimentalno delo smo izvajali na pregradi Brežice, ki smo jo pričeli spremljati že med gradnjo in v prvem letu obratovanja.

Ključne besede: vibracije, pregrada, meritve, spremljanje kondicijskega stanja, metoda končnih elementov

Summary

In Slovenia, we are increasingly confronted with the problem of aging dam structures as the average age of Slovenian dams is already over 40 years. At the same time, we are also facing changes in other factors, especially significant changes in time-dependent loads and new patterns in turbine operation manoeuvres, with multiple starts and stops on a daily basis. These changes can lead to a decrease in structural and operational safety of dams. Dams are built to serve for a long time and require safe and reliable operation. They also play an important role in society, as they bring numerous benefits, i.e., in addition to electrical generation, also water storage, irrigation, flood control. However, in the event of their technical or structural failure (partial or total), they pose a threat to downstream areas. The ageing of dams, the preservation of their functionality and the preservation of structural health are currently the greatest challenges in dam engineering in Slovenia and abroad. This article presents a novel methodology to monitor structural health of concrete dams using the noncontact and contact measurements of ambient vibrations in combination with computational structural analysis. We present the in-situ experiment at Brežice dam initiated already during the construction and continued into the first year of operation.

Key words: vibration, concrete dam, measurements, structural health monitoring, finite element analysis

1 UVOD

V svetu se letno zgradi približno 200 pregrad različnih tipov, ki presegajo konstrukcijsko višino 15 m in se po tem kriteriju uvrščajo med velike pregrade [Bernstone, 2006]. Intenzivnost gradnje pa je bila še večja v sredini prejšnjega stoletja. Po podatkih Slovenskega nacionalnega komiteja za velike pregrade (SLOCOLD) smo v Sloveniji pred letom 1980 zgradili 60 % pregrad. Podobna situacija je tudi drugod po svetu, na primer v ZDA so pred letom 1979 zgradili več kot 80 % pregrad, v Avstraliji pa pred letom 1969 več kot polovico ([ANCOLD, 2018], [SLOCOLD, 2021], [USBR, 2018]). Tako lahko predvidevamo, da je večina pregrad, ki bodo v razvitem svetu obratovalne v 21. stoletju, že zgrajenih. To pomeni, da bodo upravljavci objektov vse pogosteje soočeni s problemom staranja pregrad, njihove funkcionalnosti in tudi s problematiko ohranjanja dobrega kondicijskega in zanesljivega obratovalnega stanja objektov. Poudariti moramo, da so pregrade zelo pomembni infrastrukturni objekti, ki prinašajo številne ekonomske in družbene koristi. Hkrati pa vsaka pregrada pomeni tudi tveganje [Zhang, 2016]. Zaradi razgibane topografije in razpršenosti gradnje v Sloveniji se veliko urbanih površin nahaja v vplivnem območju pod pregradami, zato moramo poskrbeti, da so naše pregrade v dobrem stanju ter da se z njimi učinkovito in varno gospodarimo.

V prispevku predstavljamo rezultate analize vplivov obratovanja na kondicijsko stanje betonskih masivnih pregrad. Pri tem smo se osredotočili na spremljanje vibracij betonske konstrukcije zaradi običajnih obratovalnih manevrov z elektrostrojno in hidromehansko opremo pri proizvodnji električne energije in zaradi prelivanja vode čez pregrado v primeru evakuacije poplavnih voda. Eksperimentalni del, kjer smo merili dinamični odziv na jezovni zgradbi hidroelektrarne Brežice, smo uporabili za validacijo računskega modela strojnice in prelivnih polj. Betonsko konstrukcijo pregrade Brežice smo pričeli spremljati že v času gradnje in tako zabeležili referenčno stanje objekta z dejanskimi začetnimi karakteristikami, ki je služilo za osnovo nadaljnjih raziskav na objektu. Glavnino eksperimentalnega dela smo opravili v času zagonskih testov elektrostrojne in hidromehanske opreme. V raziskavi smo se osredotočili na betonsko konstrukcijo, ki je zaradi obratovanja hidroelektrarne izpostavljena stalnim vibracijam. Beton je zaradi heterogene sestave in začetne zaloge mikro razpok v svoji strukturi občutljiv za delovanje vibracij, še zlasti če je izpostavljenost betonske konstrukcije vibracijam stalna. Pričakovana projektna doba pregrad je zelo dolga in presega obdobje 50 let. V tem času se na hidroenergetskih pregradah zamenja vsa elektrostrojna in hidromehanska oprema, nekatera celo večkrat [Letcher, 2019]. Menjava betonske konstrukcije je precej zahtevnejši poseg, zato je vzdrževanje in zagotavljanje dolge življenjske dobe toliko pomembnejše. Pri gradnji pregrad uporabljamo masivne hidrotehnične betone, za katere veljajo posebni pogoji in primerjavi z običajnimi konstrukcijskimi betoni (večja karakteristična zrna agregata, uporaba nizkohidratacijskih cementov, vgradnja v večjih količinah, nizka toplota hidratacije). Na ta način želimo omejiti pojav mikro razpok, vendar pa se mu ne moremo povsem izogniti. Za vsak beton, tudi če je vgrajen v optimalnih pogojih, se razvije začetno stanje mikro razpok. Te se razvijejo zaradi pojava nateznih napetosti med agregatnimi zrni in vezivom v času strjevanja. Masivni hidrotehnični betoni so še

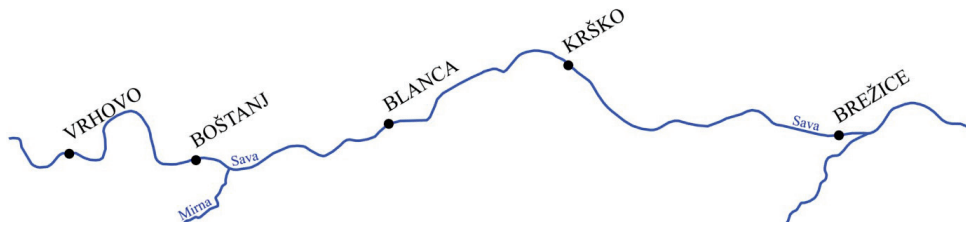
posebej podvrženi pojavu zgodnjega mikro razpokanja ([Minashi, 2004], [Sriravindrarajah, 1989]). Proces tvorjenja razpok se razlikuje glede na tip betona. Pri običajnih konstrukcijskih betonih nižje in srednje trdnosti se te tvorijo v cementnem kamnu in na stični površini zrn agregata. Pri hidrotehničnih betonih pa je situacija nekoliko bolj kompleksna, saj se zaradi prisotnosti večjih frakcij agregatnih zrn razpoke tvorijo tudi v agregatnih zrnih, te pa se nato združujejo z razpokami na stični površini med cementnim kamnom in zrni agregata. Zaradi naštetega pa so hidrotehnični betoni bolj izpostavljeni procesom zgodnjega staranja ([ACI Committee 207, 2009], [FIB, 1999]).

Z izrazom staranje pregrad opisujemo vse materialne spremembe, ki nastajajo ob izpostavljenosti časovno odvisnim vplivom [Zenz, 2008]. O staranju pregrad govorimo po preteku 5 let od pričetka obratovanja, poškodbe, ki se pojavijo prej, pa so povezane z napakami pri zasnovi in vgradnji [ICOLD Committee on Dam Ageing, 1994]. Glavni vzroki za pospešeno staranje betonskih pregrad so alkalna agregatna reakcija, kemični napad (sulfati, kloridi), abrazija, kavitacija, spiranje, volumske deformacije betona, temperaturni cikli ter vibracije zaradi obratovanja hidroelektrarne. Vibracije pri obratovanju hidroelektrarn predstavljajo dodatno ciklično obtežbo konstrukcije, ki povzroča utrujanje materiala in posledično pospešuje staranje konstrukcije. Utrujanje lahko razdelimo v 3 skupine: (i) utrujanje z nizkim številom ciklov ($N_f \leq 10^3$) in visokimi amplitudami napetosti; (ii) utrujanje z velikim številom ciklov ($10^3 \leq N_f \leq 10^7$) in nizkimi amplitudami napetosti; ter (iii) utrujanje z zelo velikim številom ciklov ($N_f \geq 10^7$) in z zelo nizkimi amplitudami napetosti [Shah, 1970]. Primer utrujanja materiala z nizkim številom ciklov predstavlja primer potresne obtežbe. Primer utrujanja materiala z velikim številom ciklov pa predstavljajo obtežbe zaradi vetra, prometa ali obratovanja strojev in opreme. Slednje je tipično za hidroenergetske objekte s posledicami tako na elektrostrojno opremo kot na betonski konstrukciji. Zaradi heterogene sestave in posledic procesa hidratacije se že v mladem betonu v času strjevanja pojavijo prve mikro razpoke, kar je z vidika odpornosti materiala proti utrujanju manj ugodno, saj se pri stalno prisotni ciklični obtežbi te začetne razpoke širijo, se medsebojno povezujejo in povečujejo razpokanost konstrukcije, kar posledično vpliva na pospešeno staranje materiala [Courtney, 2005]. S povečanjem deleža razpokanosti hidrotehničnih betonov na mikro ravni še ni nujno ogrožena strukturna varnost, pojavijo pa se težave pri zagotavljanju vodotesnosti. S stalno izpostavljenostjo cikličnim obremenitvam se razpoke vse bolj širijo, pri tem pa je treba upoštevati še izpostavljenost stalnemu hidrostatskemu tlaku in spremljajoče se hidrodinamične procese, ki proces tvorbe razpok dodatno pospešijo, s tem pa tudi procese staranja konstrukcije. Ob tem se poveča izpostavljenost konstrukcije za kemični napad in zmanjša odpornost proti temperaturnim nihanjem, kar še dodatno vpliva na proces staranja.

2 METODE

2.1 Pregrada Brežice

Hidroelektrarna Brežice je peta elektrarna v nizu hidroelektrarn na spodnji Savi in leži v neposredni bližini mesta Brežice (slika 1).



Slika 1. Pregrade na spodnji Savi.

To je kombinirana težnostna pregrada, ki jo sestavlja osrednja betonska pregrada, na katero se priključujeta visokovodna napisa, ki omejujeta območje zadrževalnika (slika 2). Skupna dolžina objektov je več kot 14 km. Uradno se je gradnja pregrade Brežice pričela leta 2014, leta 2018 pa je bilo izdano uporabno dovoljenje za jezovno zgradbo HE Brežice [HESS, 2022]. Koncesija za hidroenergetsko izrabo je podeljena za obdobje 50 let z možnostjo podaljšanja, rok pa je začel teči z dnem, ko je bilo izdano veljavno gradbeno dovoljenje ([UL RS, 2011], [UL RS, 2012]).

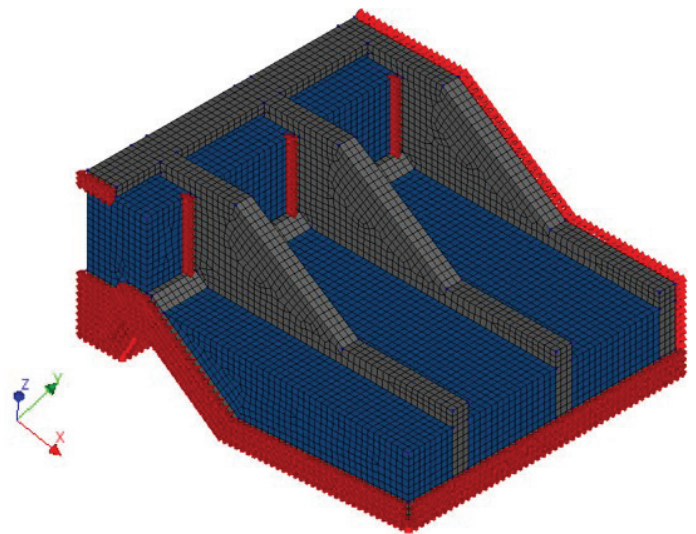


Slika 2. Pregrada Brežice iz zraka [HESS, 2022].

Jezovno zgradbo skupne dolžine 160 m in z maksimalno konstrukcijsko višino 36,5 m sestavljajo pogonski objekt (blokovi tip strojnice) in prelivni del s petimi prelivnimi polji. V strojnici so nameščene tri vertikalne, dvojno regulirane Kaplanove turbine s posamično močjo 15,2 MW in z načrtovano srednjo letno proizvodnjo 161 GWh. HE Brežice obratujejo kot pretočna elektrarna z omejeno možnostjo izkoriščanja kapacitet zadrževalnika. Prostornina akumulacije znaša več kot 19 milijonov m³, maksimalna dovoljena obratovalna denivelacija pa znaša 1,1 m. Prelivna polja so široka 15 m, vsako je opremljeno s segmentno zapornico z zaklopko in lahko prevaja pretok približno 1000 m³/s. Obratovalni režim prelivnih polj je zasnovan tako, da se v času visokih voda zapornice na prelivnih poljih dvignejo in se v reki vzpostavi naravno gladinsko stanje. Reka Sava ima hudourniški značaj, maksimalni zabeleženi pretok v profilu Save pri Brežicah je iz leta 2010 in znaša 3680 m³/s, ocenjena stoletna poplavna voda pa 3750 m³/s. V času poplavnih voda so potopljene tudi najnižji deli stebrov, ki razmejujejo posamezna prelivna polja. Elektrarna pa preneha obratovati, ko pretoki v reki dosežejo 800 m³/s. Strojnica elektrarne je umeščena na levo brežino reke Save ([Bombač, 2012], [IBE, 2016], [INFRA, 2012], [Rak, 2012]).

2.2 Numerični model

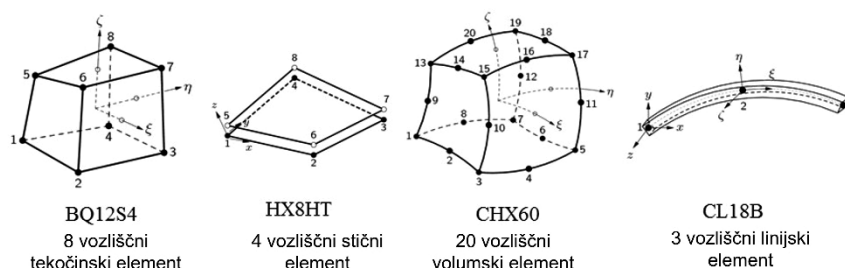
Obnašanje konstrukcije smo ocenili s sodobnimi programskimi orodji. Ta orodja smo uporabili tudi za določanje primernih merilnih mest za eksperimentalni del in oceno vpliva sprememb v konstrukciji na dinamično obnašanje le-te. V programskem orodju Diana 10.2 [DIANA FEA, 2017] smo izdelali dva ločena numerična modela: model prelivnih polj in model strojnice. Pri izdelavi modela prelivnih polj smo upoštevali načelo simetrije in modelirali zgolj polovico segmenta, kjer simetrijsko os predstavlja sredinska črta v smeri gorvodno-dolvodno (v modelu v smeri globalne osi X po sredini 3. prelivnega polja), kar sovpada tudi s statično zasnovo konstrukcije (slika 3). Prelivno območje pregrade sestavlja pet prelivnih polj, razdeljenih s stebri širine 2,7 m, dolžine 51,15 m ter spremenljive višine, ki je najvišja na gorvodni strani (22,9 m) in najnižja na skrajno dolvodni točki (15 m). Vsako prelivno polje je široko 15 m. Fiksni del prelivnega praga je v najvišji točki 11,3 m nad najnižjo točko globine podslapja. Vpliv segmentnih zapornic smo modelirali preko robnih pogojev. Razbijačev in galerije nismo vključili v model.



Slika 3. Model prelivnih polj.

V modelu smo definirali tudi tekočinske elemente in stični element na mestu stika fluidnega elementa s konstrukcijskimi elementi. Slika 4 prikazuje uporabljene končne elemente.

Za beton smo predpostavili linearni materialni model. Vodo smo modelirali kot nestisljivo, preprečili smo pojav površinskih valov. Na spodnjem robu modela so preprečeni pomiki v smeri



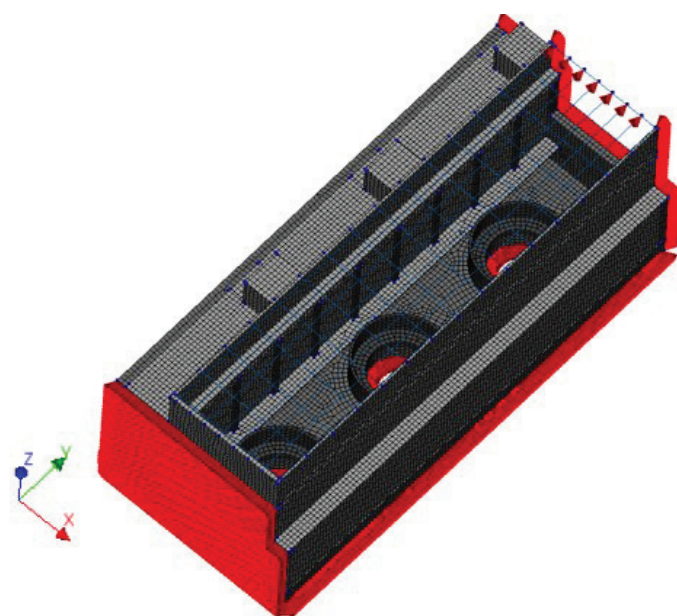
Slika 4. Uporabljeni končni elementi [DIANA FEA, 2017].

osi X, Y in Z, vpliv objekta strojnice je na boku nadomeščen s podporami v smeri osi Y. Definirali smo fazni model, ki je omogočal izračune brez dodane vode v akumulaciji in podslaplju in z njo.

pogoj smo postavili, da pri odzivu sodeluje vsaj 90 % mase v modelu. V skladu s SIST EN 1992-1-1 smo preverili tudi odpornost betonske konstrukcije proti utrujanju [SIST, 2004]. Staranje objekta smo simulirali s spreminjanjem vrednosti modula elastičnosti betona. Predpostavili smo globalno znižanje vrednosti modula elastičnosti v območju do približno 10 %, nato smo izvedli večje število analiz.

2.3 Dopolnitev programa opazovanja pregrade

Približno 2 leti po pričetku gradnje objekta, leta 2016, smo na objektu začeli periodične meritve vibracij. Namen teh meritev je bila določitev referenčnega stanja novozgrajenega objekta, ki služi za podlago za nadaljnja opazovanja in ocene kondicijskega stanja na pregradi Brežice kot tudi na sorodnih objektih na spodnjesavski verigi. Slika 6 prikazuje stanje betonske konstrukcije v času začetnih meritev pred preusmeritvijo Save. Gradbišče je bilo organizirano v suhi gradbeni jami. Gradbena dela na konstrukciji prelivnega dela in zgradbe strojnice so bila v večini zaključena, v teku so bila montažna dela elektrostrojne in hidromehanske opreme. Konstrukcija jezovne zgradbe še ni bila izpostavljena delujočim obtežbam zaradi obratovanja elektrarne, kar je predstavljalo edinstveno referenčno začetno stanje pregrade za spremljanje vplivov dinamičnih obremenitev na konstrukcijo. Meritve vibracij na konstrukciji jezovne zgradbe lahko razdelimo na obdobje v času gradnje z namenom določitve lastnih nihajnih oblik konstrukcije in obdobje



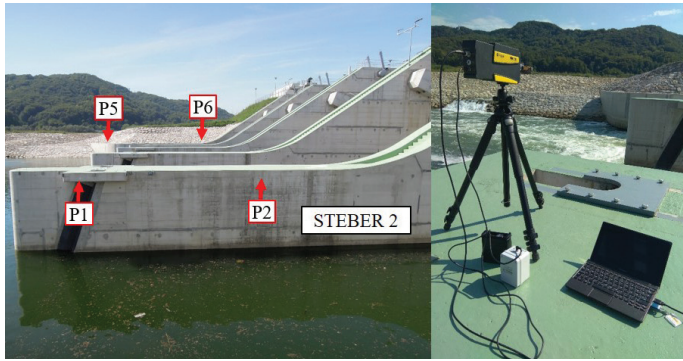
Slika 5. Model strojnice.

Model stojnice obsega tlorisno površino 58,2 m x 24,1 m v obsegu: masivnega betonskega bloka na nivoju turbinske etaže z upoštevanem odprtin turbinskih traktov ter vse vertikalne elemente do nivoja jeklene strehe (slika 5). Temeljnih masivnih betonov nismo modelirali, na spodnjem robu smo zato predpostavili togo vpetje v podlago. Južna stena, na kateri je bilo precej eksperimentalnih točk, je debela 40 cm z dodatnimi 9 stebri, dimenzij 60 x 60 cm, ki podpirajo žerjavno progno. Streho smo modelirali z linijskimi elementi, ki smo jim pripisali geometrijo profilov HEA in IPE, ter materialne lastnosti jekla S235. Za beton smo predpostavili linearno-elastično obnašanje, za materialne lastnosti smo privzeli projektne vrednosti betona C25/30.

Pri določitvi velikosti končnih elementov smo predpisali maksimalno velikost stranice elementa (1 m na modelu prelivnih polj ter 0,5 m na modelu strojnice). Izvedli smo modalno analizo z namenom določitve lastnih nihajnih oblik. Pri modelu strojnice smo določili prvih 200 lastnih nihajnih oblik, pri modelu prelivnih polj pa prvih 100 lastnih nihajnih oblik. Za



Slika 6. Meritve v času gradnje.



Slika 7. Nekontaktne meritve vibracij stebrov v prelivnih poljih.

v času zagonskih poskusov delovanja elektrostrojne in hidromehanske opreme, ki je glede obremenitev na konstrukcijo referenčno obratovalno stanje z namenom določitve tipičnih nihanj, vzbujenih zaradi obratovanja elektrarne.

Meritve smo v začetnem obdobju v času poteka gradbenih del v suhi gradbeni jami izvajali s pomočjo prenosnega laserskega vibrometra [Polytec, 2016]. Vir nihanj so bila gradbena in montažerska dela na gradbišču, del meritev pa smo izvedli tudi v popoldansko večernem času, ko je bila na lokaciji minimalna količina ambientalnega vzbujanja z namenom odprave eventualnih neugodnih vplivov, ki bi utegnili vplivati na določitev lastnih nihajnih časov in lastnih nihajnih oblik konstrukcije. Temu obdobju so sledile meritve vibracij konstrukcije v času testov elektrostrojne in hidromehanske opreme pred pričetkom poskusnega obratovanja HE Brežice. V tem obdobju smo izmerili vibracije objekta med različnimi prehodnimi pojavi v procesu poskusov delovanja elektrostrojne in hidromehanske opreme, kot so hitre in redne zapore agregata, zagon, sinhronizacija. V obdobju testnih preskusov je intenzivnost teh pojavov večja kot pri normalnem obratovanju. Upoštevati pa je treba dolgoročnost teh pojavov, ki so na hidroenergetskih objektih stalno prisotni in na dolgi rok predstavljajo enega najpomembnejših vzrokov za utrujanje betonskih konstrukcij. Pri postavitvi merske opreme za spremljanje vibracij smo morali rešiti problem vpliva nihanja stojišča merske naprave, kar smo kompenzirali z namestitvijo pospeškometerov na mersko napravo za izločitev šuma, ki ga povzroča nihanje opreme. Dodatno smo namestili pospeškometre in hitrostne doze tudi na samo konstrukcijo in na turbinsko in generatorsko ohišje. S tem smo zajeli vse potrebne parametre, ki so pomembni za interpreta-

cijo meritev [Klun, 2019]. Primer meritve v prelivnem polju z uporabo nekontaktnih metod je prikazan na sliki 7. Objektu ne vsiljujemo dodatnih vibracij, saj je ob običajnem obratovanju na objektu že prisotnega dovolj vzbujanja. Glavna prednost takšnih meritev je, da ne povzročajo motenj v rednem obratovanju ter da je izmerjeni odziv dejanski odziv konstrukcije na obratovalno obtežbo. Vzpostavljeni sistem dinamičnega opazovanja tako dopolnjuje obseg rednih aktivnosti monitoringa na pregradi.

3 ANALIZA IN REZULTATI

V tem poglavju so predstavljeni rezultati modalne analize numeričnega modela. Rezultati meritev na pregradi HE Brežice so obširno predstavljeni v članku, objavljenem v reviji Journal of Civil Structural Health Monitoring ter doktorski nalogi prve avtorice tega članka ([Klun, 2020a], [Klun, 2020b]). Rezultati modalne analize modela prelivnih polj so prikazani na sliki 8. Prikazani sta prva in druga lastna nihajna oblika stebra 2 za suho stanje, pri katerem se prva nihajna oblika nahaja v frekvenčnem spektru pri 10,9 Hz in druga nihajna oblika pri 15,8 Hz. Z upoštevanjem vpliva vode v računskem modelu pa vrednosti prve in druge lastne frekvence pričakovano padejo na 10,6 Hz in 14,9 Hz. Na istem stebru smo izvajali tudi meritve, izmerjene vrednosti so: 10,8 Hz za prvo nihajno obliko in 16,8 Hz za drugo. Odstopanja med računsko in izmerjeno vrednostjo so 3 % pri prvi lastni frekvenci in 6 % pri drugi ([Klun, 2020a], [Klun, 2020b]). S primerjavo slik 7 in 8 lahko razberemo še, da je lokacija merilnih ročk na mestih, kjer je jasno možno spremljati spremembe prve in druge lastne frekvence.

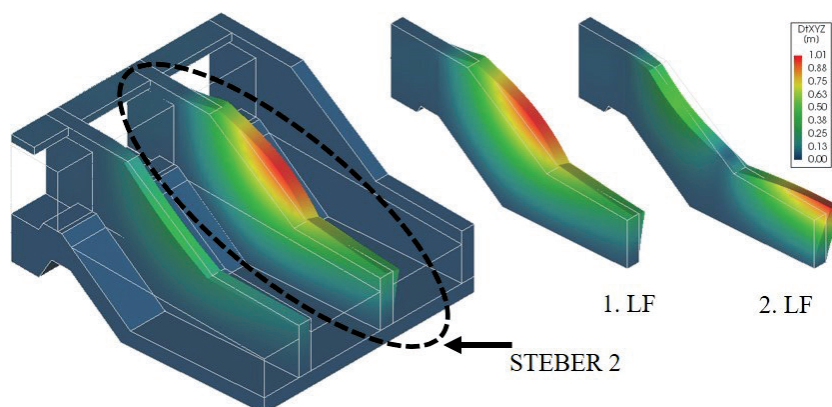
S spreminjanjem vrednosti modula elastičnosti smo nato simulirali staranje konstrukcije. Staranje betona je kompleksen proces, povezan tudi s povečanjem razpokanosti betona. Za opis fenomena staranja smo se odločili za pristop, ki se v pregradnem inženirstvu uporablja pogosto, staranje betonske konstrukcije smo opisali s spreminjajočimi se vrednostmi modula elastičnosti betona ([Chen, 2019], [Gogoi, 2007], [Nahar, 2020]). Rezultati analize so prikazani v preglednicah 1 in 2. Zmanjševanje vrednosti modula elastičnosti se odraža v mehčanju konstrukcije, vrednosti tako prve kot tudi druge lastne frekvence padajo sorazmerno s padcem modula elastičnosti. Zmanjšanje modula elastičnosti za 10 % povzroči 5-% zmanjšanje vrednosti obeh lastnih frekvenc ne glede na to, ali gre za suho ali za toplopljeno stanje konstrukcije.

Modul elastičnosti	[$\cdot 10^7$ kN/m ²]	3,10	3,07	3,03	2,99	2,96	2,92	2,89	2,85	2,82	2,79
1. lastna frekvenca	[Hz]	10,98	10,93	10,85	10,78	10,72	10,65	10,60	10,53	10,48	10,42
2. lastna frekvenca	[Hz]	15,81	15,73	15,63	15,52	15,45	15,34	15,26	15,16	15,08	14,99

Preglednica 1. Lastne frekvence na modelu prelivnih polj.

Modul elastičnosti	[$\cdot 10^7$ kN/m ²]	3,10	3,07	3,03	2,99	2,96	2,92	2,89	2,85	2,82	2,79
1. lastna frekvenca	[Hz]	10,58	10,53	10,46	10,39	10,34	10,27	10,22	10,15	10,09	10,04
2. lastna frekvenca	[Hz]	14,86	14,78	14,69	14,59	14,52	14,42	14,34	14,25	14,17	14,09

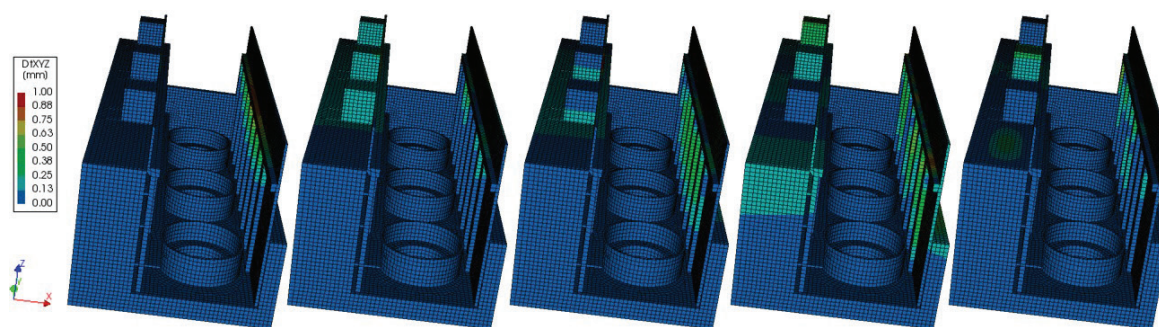
Preglednica 2. Lastne frekvence na modelu prelivnih polj z dodano vodo v modelu.



Slika 8. Prva in druga nihajna oblika modela prelivnih polj.

Na sliki 9 prikazujemo prvih 5 nihajnih oblik za model strojnice, dobljenih z računskim modelom strojnice, prvih 5 lastnih frekvenc se nahaja pri vrednostih 5,8 Hz, 8,2 Hz, 10,6 Hz, 14,1 Hz, 20,1 Hz. Lastne frekvence, izmerjene na objektu, se od izračunanih razlikujejo za 1–9 %, za primerjavo navajamo še merjene vrednosti: 6 Hz, 8,3 Hz, 11,5 Hz, 14,5 Hz in 21,4 Hz [Klun, 2020a].

mi boljšimi materialnimi lastnostmi od projektnih. V preglednici 3 prikazujemo rezultate simulacij za prvih 5 lastnih frekvenc. Tudi na tem modelu opazimo pojav mehčanja pri padanju vrednosti modula elastičnosti. Pri spremembi modula elastičnosti za približno 3 % pride do spremembe vrednosti lastnih frekvenc za približno 1 %. Predpostavljeno 10-% zmanjšanje



Slika 9. Prvih 5 nihajnih oblik modela strojnice.

Tudi na tem modelu smo simulirali staranje s spreminjanjem vrednosti modula elastičnosti. Izvedli pa smo še dodatno simulacijo modela strojnice, kjer smo predpostavili višjo vrednost modula elastičnosti od projektnih vrednosti. Znano je, da se vrednosti modula elastičnosti mladega betona spreminjajo s časom, da je smiselno sklepati, da v času, ko smo bili prisotni na objektu, proces hidratacije še ni bil povsem zaključen, kar bi lahko pomenilo, da se bodo materialne lastnosti betona še nekoliko izboljšale, preden se bo beton začel starati. V ta namen je bila izvedena še dodatna simulacija s predpostavljeni-

modula elastičnosti zaradi staranja pomeni približno 4-% spremembo vrednosti lastnih frekvenc strojnice.

S pomočjo rezultatov numeričnega modela smo preverili tudi odpornost na utrujanje po SIST-EN 1992-1-1 na območjih z maksimalnimi tlačnimi napetostmi ($\sigma_{c,max}$) [SIST, 2004]. Območja z maksimalnimi tlačnimi napetostmi se pojavljajo na dnu turbinskih jaškov, maksimalna vrednost znaša 10,9 MPa. Odpornost na utrujanje se določi ob upoštevanju vrednosti maksimalnih tlačnih napetosti, časa od vgradnje do pričetka

Modul elastičnosti	[$\cdot 10^7$ kN/m ²]	3,2	3,1	3,03	2,96	2,92	2,85	2,82	2,79
1. lastna frekvenca	[Hz]	5,79	5,71	5,66	5,61	5,57	5,52	5,49	5,46
2. lastna frekvenca	[Hz]	8,18	8,12	8,08	8,03	8,01	7,96	7,94	7,93
3. lastna frekvenca	[Hz]	10,56	10,42	10,32	10,24	10,20	10,13	10,10	10,07
4. lastna frekvenca	[Hz]	14,09	13,90	13,77	13,64	13,56	13,42	13,36	13,29
5. lastna frekvenca	[Hz]	20,11	19,81	19,60	19,39	19,26	19,05	18,95	18,86

Preglednica 3. Vpliv modula elastičnosti na lastne frekvence strojnice.

obratovanja, končnega števila ciklov in projektnih vrednosti betona. Ocenili smo, da je od vgradnje betona do pričetka zagonskih preskusov, ko je bila konstrukcija izpostavljena vibracijam preteklo približno eno leto ($t_0 = 400$ dni). Z uporabo enačb (1) in (2) smo določili

$$f_{cd,fat} = k_1 \beta_{cc}(t_0) f_{cd} \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (1)$$

$$\beta_{cc} = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (2)$$

projektno trdnost betona $f_{cd,fat}$ odpornega proti utrujanju, ki znaša 15,3 MPa. Za vrednost parametra k_1 smo privzeli 0,85, kar je priporočena vrednost za število ciklov $N = 10^6$, s predstavlja koeficient za tip cementa (0,25 za razred N), f_{cd} projektna tlačna trdnost betona, f_{ck} karakteristična tlačna trdnost betona, t starost betona v dneh. V enačbi (2) smo za vrednost t privzeli $t = t_0$. Ocenili smo, da je razmerje $\frac{\sigma_{c,max}}{f_{cd,fat}} = 0,71 < 0,9$. To pomeni, da konstrukcija ustreza pogoju odpornosti na utrujanje po SIST-EN 1992-1-1.

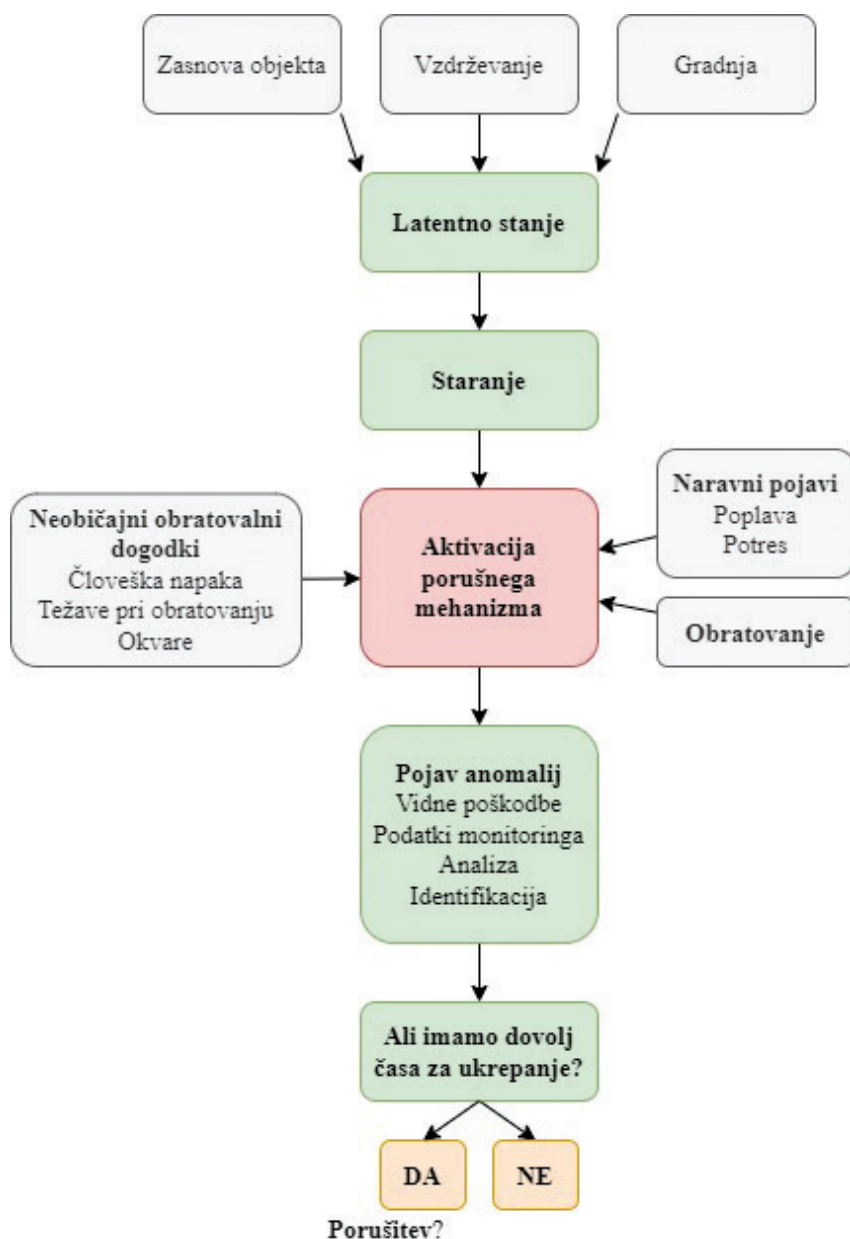
4 DISKUSIJA

Analiza objekta z vidika vibracij je pomembna iz dveh razlogov, prvi je izboljšanje možnosti vpogleda v proces staranja konstrukcije, drugi pa prepoznavanje posledic dinamičnih procesov in vplivov delovanja turbin na konstrukcijo. Poleg meritev na objektu smo izvedli tudi meritve neposredno na ohišju turbin z namenom določitve glavnih vzbujalnih frekvenc v strojnici zaradi obratovalnih manevrov in izmerili naslednje frekvence: 1,8 Hz, 3,6 Hz, 7,2 Hz, 21,4 Hz, 35,7 Hz in 42,9 Hz. Vibracije so posledica vrtenja agregatov (nazivna hitrost znaša 107 obr/min), pojava višjih harmonikov in pulzacij vodnega toka pri prehodu čez turbinski trakt. Vzbujanje je bolj intenzivno pri prehodnih pojavih, kot so zagon, zaustavitev, proces sinhronizacije pred vklopom na mrežo, krmljenje in prilagajanje med obratovanjem. Z vidika betonske konstrukcije je optimalno obratovanje v nazivnem območju, torej v območju, kjer ima agregat najbolj izkoristek. Pri obratovanju agregatov želimo, da je obratovanje čim bolj enakomerno; vsakršne nenadne spremembe pri obratovanju (spremembe obremenitve agregatov, zaustavitve in zagoni ...), ki povzročijo odklik od točke optimalnega izkoristka, pa ne povzročajo le poškodb na agregatu, ampak tudi vplivajo na staranje nosilne konstrukcije. Iz literature so znani primeri, ko so povečani zagonski cikli, ki so presejali načrtovane vrednosti, vodili v odpovedi nosilne konstrukcije [Lopez, 2003]. Večini hidroenergetskih pregrad v Sloveniji je bila namenjena drugačna vloga in niso bile zasnovane za to, da prevzemajo vlogo sistemskih elektrarn, za katere so značilni obratovalni režimi, ki se nenehno prilagajajo trenutnim potrebam elektroenergetskega sistema. Prav tako niso bili upoštevani vplivi podnebnih sprememb, ki tudi vplivajo na obratovalne režime hidroenergetskih objektov. Vloga pretočnih elektrarn v verigi se je danes povsem spremenila. Njihova hitra odzivnost in zmožnost zagotavljanja sistemskih rezerv in storitev jih postavlja med najbolj fleksibilne vire električne energije. Posledično sprejemajo tudi vlogo sistemskih elektrarn pri zagotavljanju stabilnosti v sistemu in vzdrževanju ravnovesja med porabo in proizvodnjo energije. To predstavlja spremembo glede na načrtovanje njihove vloge v preteklosti, saj

so bile elektrarne zasnovane kot pretočne, ki obratujejo zgolj po pretoku blizu optimalnih pogojev. Iz literature lahko zasledimo oceno, da vsak zagon in zaustavitev turbine na njej povzročita poškodbe, ki so enakovredne tistim pri 15 do 20 ur rednega obratovanja [Trivedi, 2013]. V naši raziskavi smo prvi analizirali vplive obratovanja na nosilno konstrukcijo in glede na izvedene rezultate meritev lahko z gotovostjo pričakujemo, da podobne ugotovitve kot za strojno opremo veljajo tudi za betonske konstrukcije. Za razliko od jeklenih konstrukcij so poškodbe na betonski konstrukciji težje opazne, ker se procesi večinoma odvijajo v notranjosti. Ko poškodbe postanejo vidne na površini, je konstrukcija praviloma že kočno oslABLJENA. Zveze med dinamičnimi lastnostmi in stanjem konstrukcije so premalo poznane pri masivnih vodnih objektih, kjer je pozornost usmerjena v dokazovanje obnašanja pri pojavu potresa, malo ali nič analiz pa je namenjenih problematiki vplivov zaradi običajnega obratovanja objektov. Meritve in analize na pregradi Brežice so pokazale, da so frekvence vzbujanja zaradi obratovanja elektrarne in lastne frekvence objekta dokaj blizu, kar glede na način obratovanja predstavlja resno težavo. Prve tri lastne frekvence strojnice so pri 5,8 Hz, 8,2 Hz, 10,6 Hz, nedaleč stran pa sta druga in tretja lastna frekvenca objekta: 3,6 Hz in 7,2 Hz, kar je skrb zbujajoče. Glede na navedeno lahko ugotovimo, da obstaja velika verjetnost, da je konstrukcija pregrade zaradi vsiljenega nihanja izpostavljena bistveno večjim obremenitvam, kot bi pričakovali. Glede na konstrukcijsko podobnost objektov na spodnji Savi lahko pričakujemo podobne razmere na vseh objektih. To pomeni, da bo treba nameniti tudi ustrezno pozornost opazovanju objektov in spremljati procese staranja v sklopu rednega opazovanja objektov.

S periodičnimi meritvami vibracij na objektu je mogoče spremljati staranje betonske konstrukcije, saj se na primer pojav mehčanja odraža v spremembah lastnih frekvenc, kar smo pokazali z računskim modelom. Proces tako lahko prepoznamo pred pojavom vidnih poškodb, kar občutno izboljša obratovalno varnost objekta, dolgoročno zniža stroške vzdrževanja ter pomaga podaljševati življenjsko dobo pregrad. Vzpostavitev sistema opazovanja pregrad je zakonska obveza upravljavca. Pogoj za uspešno spremljanje staranja objekta in interpretacijo kondicijskega stanja pa je nujen, da se na objektu poleg spremljanja vibracij izvajajo vse aktivnosti rednega monitoringa. Ključno je, da objekt spremljamo na dolgi rok in ne šele po pojavu poškodb. Slika 10 prikazuje shematsko zakritost latentnih stanj konstrukcije, ki navidezno mirujejo (ker jih ne spremljamo) do pojava aktivacijskega dogodka. Po pojavu poškodb pa proces napreduje hitreje in je za ukrepanje manj časa, sledijo lahko prisilne zaustavitve, dolgi remontni, v skrajnem primeru pa odstranitev objekta. Pri načrtovanju novih pregrad je vpliv vibracij treba vključiti že v fazi načrtovanja objektov in objekt začeti spremljati že v času gradnje. Spoznanja s pregrade Brežice pa lahko služijo za izboljšanje varnosti in vzdrževanja vseh konstrukcij sorodnih objektov pri nas, tako obstoječih kot tistih, ki so še v fazi načrtovanja.

Računski modeli so pomembno orodje pri analizi hidrotehničnih objektov. Pri modeliranju časovno odvisnih procesov in pojava ter vpliva poškodb pa je zelo pomembno to,



Slika 10. *Procesi pri staranju pregrad.*

kakšna izhodišča so bila privzeta. Pri modeliranju časovno odvisnih procesov ni dovolj, da privzamemo samo projektno vrednost, temveč tudi to, da vključimo čim več informacij na podlagi spremljanja dejanskega stanja objektov. Pri modeliranju pregrad imamo opraviti s precej spremenljivkami, zato je nujno, da vključujemo rezultate monitoringa, brez katerih kalibracija modela niti ni možna. Prednost našega pristopa je tudi v tem, da je bil model umerjen na referenčno stanje konstrukcije, ki še ni bila izpostavljena zunanjim vplivom. Kot tak se lahko model uporabi kot referenčni za spremljanje staranja, saj imamo poznano izhodiščno stanje konstrukcije in materialnih parametrov, ki jih običajno pri klasičnih analizah, ki jih največkrat izvedemo šele po nastanku poškodb, ne poznamo in v tem primeru lahko sklepamo o materialnih parametrih zgolj na pod-

lagi projektnih vrednosti. Na pregradi Brežice smo v času gradnje izmerili referenčno stanje, ta meritev je ključna za izvajanje nadaljnega spremljanja objekta, v omejenem obsegu pa bo možen tudi prenos na objekte s podobnimi konstrukcijskimi lastnostmi. Zato je pomembno, da se v sklop rednega monitoringa čim prej vključi spremljanje dinamičnih parametrov tudi na drugih pregradah na reki Savi in da se izdelajo analize stanja pregrad in napovedi procesov staranja ter na osnovi tega predvidijo ustrezni korekcijski ukrepi.

5 ZAKLJUČEK

Namen te raziskave je prva podrobna in celovita obravnava vsiljenih dinamičnih obremenitev pregrad in s tem povezanega problema staranja betonskih hidroenergetskih pregrad. Opisana problematika za zdaj ne predstavlja večjih težav pri novejših objektih. Ker pa je povprečna starost hidroenergetskih pregrad v Sloveniji že višja od 40 let, bodo posledice utrujanja in vsiljenih vibracij v daljšem časovnem obdobju postale vse bolj aktualna težava upravljavcev teh objektov. Kondicijsko stanje pregradnega objekta vpliva tudi na zanesljivost proizvodnje in trajnost, kar bo v luči energetske neodvisnosti in nadaljnega zagotavljanja sistemskih storitev, ki pogosto zahtevajo obratovanje na način, ki povzroča pospešeno staranje konstrukcije, pomemben dejavnik obratovanja in varnosti pregrad. V okviru raziskave smo na pregradi Brežice vzpostavili sodoben monitoring že v času gradnje objekta in ga nadaljevali vse do časa poskusnega obratovanja. Izdelali smo računski model pregrade, simulirali staranje objekta ter njegov vpliv na vrednosti lastnih frekvenc. Računske vrednosti smo validirali z eksperimentalnimi rezultati. Z uvedbo spremljanja dinamičnih procesov v sklopu rednega monitoringa in uvedbo numeričnih modelov pri analizi procesov lahko izdelamo napovedi procesov staranja v prihodnje in predlog korektivnih ukrepov za izboljšanje stanja pregrad.

6 ZAHVALA

Delo je nastalo v okviru doktorskega študija prve avtorice in je bilo delno sofinancirano iz raziskovalnega programa P2-0180 Vodarstvo in geotehnika, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

7 LITERATURA

ACI Committee 207, Guide to Mass Concrete ACI 207.1R-05. Farmington Hills, MI, 2009.

ANCOLD, spletna stran, Register of Large Dams in Australia, https://www.ancold.org.au/?page_id=24, ANCOLD, datum vpogleda 12. 6. 2018, 2018.

Bernstone, C., Automated performance monitoring of concrete dams. Engineering Geology, Lund University, Lund, 2006.

Bombač, M., Hydraulic research of the construction pit of HPP Brežice on a physical model, Acta Hydrotechnica, 25(42), 1-16, 2012.

Courtney, T. H., Mechanical Behaviour of materials (2nd ed.). Long Grove, Illinois: Waveland press, Inc., 2005.

DIANA FEA, User's Manual - Release 10.2. Diana FEA BV. Delft, Netherlands, 2017.

HESS, spletna stran, <https://www.he-ss.si/he-brezice-fotogalerija.html>, HESS d.o.o., Brežice, datum vpogleda 7. 5. 2022, 2022.

IBE, Projektna dokumentacija HE Brežice (Interno gradivo HESS). Ljubljana, 2016.

ICOLD Committee on Dam Ageing, Ageing of dams and appurtenant works Review and recommendations Bulletin 93. Paris: ICOLD - CIGB, 1994.

INFRA, Program izvedbe objektov vodne, državne in lokalne infrastrukture ter objektov Vodne in energetske infrastrukture v nedeljivem razmerju za izgradnjo Novelacija št. 1 HE Brežice. Brežice, 2012.

International federation for structural concrete (FIB), Structural Concrete Textbook on behavior, design and performance, Vol. 1, 1999.

Klun, M., Zupan, D., Lopatič, J., Kryžanowski, A., On the application of laser vibrometry to perform structural health monitoring in non-stationary conditions of a hydropower dam. Sensors, 19(17):3811, <https://doi.org/10.3390/s19173811>, 2019.

Klun, M., Zupan, D., Kryžanowski, A., Vibrations of a hydropower plant under operational loads, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 10(1), 29-42, doi: 10.1007/s13349-019-00367-2, 2020a.

Klun, M., Analysis of Concrete Gravity Dam Conditions using State-of-the-art Experimental and Numerical Methods, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, doktorska naloga, 2020b.

Letcher, T. M. (Ed.), Managing Global Warming An Interface of Technology and Human Issues. Academic Press, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>, 2019.

Lopez, F., Restrepo Velez, L., Assessment and structural rehabilitation with post-tensioning and CFRP of a mass concrete structure subjected to dynamic loading, In FIB Symposium Concrete Structures in Seismic Regions. Athens, Greece, 2003.

Mihashi, H., Leite, J. P. D. B., State-of-the-art report on control of cracking in early age concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 2(2), 141-154, <https://doi.org/10.3151/jact.2.141>, 2004.

Polytec, Portable Digital Vibrometer PDV-100 High Resolution Digital Velocity Measurement, 1-3, 2016.

Rak, G., Müller, M., Šantl, S., Steinman, F., Use of hybrid hydraulic models in the process of hydropower plants design on the lower Sava, Acta Hydrotechnica 25/42, 25(42), 59-70, 2012.

Shah, S. P., Chandra, S., Fracture of Concrete Subjected to Cyclic and Sustained Loading, ACI Materials Journal, 67(10), 816-827, 1970.

SIST, SIST EN 1992-1-1, Evrokod 2: Projektiranje konstrukcij. Del 1-1, Splošna pravila in pravila za stavbe, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2004.

SLOCOLD, spletna stran, Seznam velikih pregrad v Sloveniji, http://www.slocold.si/pregrade_seznam.htm, SLOCOLD - Slo-

venski nacionalni komite za velike pregrade, datum vpogleda 20. 3. 2022, 2022.

Sriravindrarajah, R., Swamy, R. N., Load effects on fracture of concrete. *Materials and Structures*, 22(1), 15-22, <https://doi.org/10.1007/BF02472690>, 1989.

Trivedi, C., Gandhi, B., Michel, C. J., Effect of transients on Francis turbine runner life: A review, *Journal of Hydraulic Research*, 51(2), 121-132, <https://doi.org/10.1080/00221686.2012.732971>, 2013.

UL RS, Uredba o državnem prostorskem načrtu za območje hidroelektrarne Brežice, Uradni list RS št. 50/12 in 69/13, Uradni list Republike Slovenije, 2012.

UL RS, Zakon o pogojih koncesije za izkoriščanje energetskega potenciala Spodnje Save (ZPKEPS-1), Uradni list RS, št. 87/11, 25/14 – ZSDH-1, 50/14, 90/15, 67/17 in 65/20, Uradni list Republike Slovenije, 2011.

USBR, spletna stran, National Inventory of Dams Dataset, <http://nid.usace.army.mil/>, USBR, datum vpogleda 12. 6. 2018, 2018.

Zenz, G., Long Term Behaviour of Dams – Earthquake Loading Design. In Z. Yueming (Ed.), *Proceedings of the 1st International Conference on Long Time Effects and Seepage Behavior of Dams* (pp. 1-13). Nanjing, China: Hohai University Press, 2008.

Zhang, L., Peng, M., Chang, D., Xu, Y., *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment*. Singapore: Wiley, 2016.



Sporočilo za javnost

GBC Slovenija – Trajnostni pristop k projektiranju potresno obstojnih zidanih stavb

21. april 2022, strokovno izobraževanje v prostorih ZAG, Dimičeva 12, Ljubljana

V Ljubljani, 22. aprila 2022: Slovensko združenje za trajnostno gradnjo GBC Slovenija je v sodelovanju z družbo Wienerberger Slovenija v četrtek, 21. aprila, v prostorih ZAG v Ljubljani organiziralo strokovno srečanje, na katerem so obravnavali usmeritve za projektiranje potresno obstojnih zidanih stavb ter z različnih zornih kotov osvetlili problematiko potresne varnosti pri nas. Predavanja na temo, kako v prihodnje graditi varne stavbe ter kako sanirati obstoječe, da bodo potresno varnejše, so prispevali strokovnjaki z Zavoda za gradbeništvo (ZAG), raziskovalnega inštituta InnoRenew CoE & Univerze na Primorskem, Univerze v Splitu ter predstavniki družb Wienerberger in Knauf Insulation. Projektantom in arhitektom iz vrst IZS in ZAPS sta zbornici za strokovno izpopolnjevanje dodelili po 3 kreditne točke.

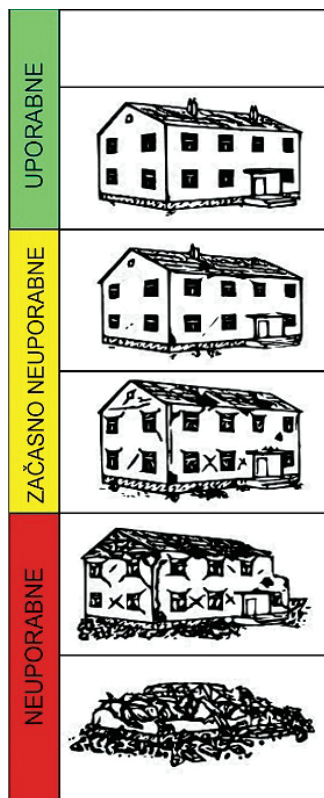


»S tem izobraževalnim dogodkom, ki ga je spremljalo več kot 80 udeležencev, smo v združenju za trajnostno gradnjo želeli načrtovalcem stavb podati čim več koristnih informacij in usmeritev za protipotresno gradnjo, ki jim bo v pomoč tako

pri snovanju novogradenj kot tudi pri sanacijah obstoječih večstanovanjskih in poslovnih objektov.« je uvodoma poudaril **dr. Iztok Kamenski, predsednik UO GBC Slovenija**. »Na potrebe bi morali biti bolj pripravljeni, zato je tudi ocenjevanje potresne ogroženosti stavb nujno. Najbolj ranljive stavbe bo treba utrditi ali pajih nadomestiti z novimi, da bi zmanjšali najhujše posledice v primeru potresa. Doslej smo večji poudarek namenjali energetski prenovi, ki jo z različnimi finančnimi spodbudami in sprejetimi ukrepi stimulira tudi država, v prihodnje pa bo večjo pozornost treba posvetiti še potresni varnosti, kar pa bo za obstoječe starejše objekte tehnično in finančno bistveno bolj zahtevno. Upoštevat moramo, da je Slovenija potresno zelo izpostavljena, tveganje za nastanek škode in za življenje ljudi pa veliko. Da bi lahko gradbeniki in arhitekti pri načrtovanju predvideli ustrezno potresno varnost stavb, potrebujejo prave informacije in znanje o sistemih, metodah in tudi razpoložljivih materialih, s katerimi bodo lahko take objekte tudi uspešno in kakovostno zasnovali.«

Ocena potresne ogroženosti stavb v Sloveniji

Mag. Marjana Lutman, univ. dipl. ing. grad., iz ZAG je udeležencem predstavila interdisciplinarne raziskovalne projekte **POTROG** za oceno potresne ogroženosti stavb in odgovornosti za potrebe zaščite in reševanja v Sloveniji, ki jih izvaja ZAG skupaj s partnerji, financira pa Uprava RS za zaščito in reševanje. Rezultati teh projektov so hkrati tudi podlaga za reševanje aktivnosti v zvezi z izvajanjem ukrepov na področju potresne varnosti in postavljanjem prioritet reševanja potresno najbolj ogroženih stavb v Sloveniji. ZAG je za te projekte pripravil strokovne podlage ter orodja oz. aplikacije, ki jih potrebuje civilna zaščita, strokovna in tudi širša javnost, saj ti prispevajo k vsestranski pripravljenosti na potres in bistveno zmanjšujejo potresno tveganje.



Potresi so dogodki, na katere ne moremo vplivati, jih pa lahko merimo in statistično obdelamo. Za projektiranje so tako glede na tip tal pomembni evidentiranje seizmičnega dogajanja na kartah potresne mikrorajonizacije, ocena potresne odpornosti oz. ranljivosti stavb, saj so od njih odvisne posledice potresa, in evidentiranje števila uporabnikov, ki se v njih nahajajo. V Sloveniji sta bili do leta 2001 v veljavi dve metodi ocenjevanja potresne ranljivosti zidanih stavb (V_s v letu 1986 in RAN-Z v letu 1995), zatem pa še metodi PO-ZID (2001) in potresna odpornost armiranobetonskih stavb PO-AB (2002). Hitri računski metodi sta bili razviti zato, da bi bili rezultati čim bolj objektivni in tudi primerljivi z rezultati analiz različnih vrst konstrukcij. Nekaj stavb je bilo analiziranih s podrobnimi metodami, glavnina pa s hitrimi. Tako je ocenjenih že več kot 1600 stavb, več kot 300 pa v okviru projektov POTROG. Večina se jih nahaja na območjih višje potresne nevarnosti ter na območjih zgodovinskih potresov. Po namembnosti gre za stavbe višjega pomena, kot so šole in večstanovanjski objekti, kjer se zadržuje večje število ljudi, med njimi pa je kar dve tretjini starejših. Te stavbe so sicer res potresno bolj ranljive, vendar največji problem predstavljajo višji objekti, zgrajeni po drugi svetovni vojni. Potresna ranljivost stavbe je namreč odvisna od njene konstrukcije, števila nadstropij ter starosti objekta. Pri ocenjevanju posledic potresa na stavbah se model POTROG navezuje že na evropsko potresno lestvico EMS-98, ki stavbe uvršča v razrede ranljivosti (intenzitetna lestvica od 1 do 12, pri čemer se od 6. naprej pričakuje poškodbe na stavbah) ter v kategorije poškodovanosti stavb (lestvica od 0 do 5). V okviru štirih projektov POTROG so bile razvite aplikacije za splošno javnost (Oceni svojo stavbo in Baza individualno ocenjenih stavb) ter aplikacije za pristojne organe in institucije s področja zaščite, reševanja in pomoči, s katerimi ti hitro pridobijo podrobne informacije o posameznem prizadetem območju, poškodova-

nosti stavb in življenjski ogroženosti populacije. Razvoj modela POTROG sovпада z obdobjem številnih prenov, zlasti tistih objektov, v katerih so bile finančne spodbude namenjene povečanju energetske učinkovitosti, vendar pa za dražje posege za utrditev stavb investitorji žal niso imeli dodatnih sredstev. Šele v letu 2019 so v dolgoročni strategiji med cilje energetske prenove stavb do leta 2050 vključili tudi potresni vidik. Z modelom POTROG so izdelane strokovne podlage ter postavljen kriterij za prioritarno podrobnejšo analizo in protipotresno utrditev. V strategiji za večstanovanjske stavbe do leta 2024 je uvedena še izkaznica stavbe kot instrument za informiranje lastnikov o energetske učinkovitosti ter potresni in požarni varnosti, predvideno pa je tudi financiranje za celovito prenovu stavb in za usposabljanje izvajalcev.

Protipotresna gradnja z zidaki Porotherm

O zidavi stavb z uporabo zidakov Porotherm družbe Wienerberger so v nadaljevanju prispevali predavanja **prof. dr. Miha Tomažević** z Zavoda za gradbeništvo, **prof. Boris Trogrlič** z Univerze v Splitu ter **Amel Emkić**, mag. inž. grad., iz družbe Wienerberger.

Prof. dr. Tomažević je predstavil eksperimentalne raziskave, s katerimi so preverjali možnosti zidanja stavb z zidaki *Porotherm IZO Profi (Wi Plan)* na potresnih območjih. Z njimi so raziskovali mehanske lastnosti zidovja (ciklične strižne in preiskave tlačne trdnosti) ter raziskavo vplivov navpičnih vezi, ob zaključku projekta pa so na ZAG pripravili še priporočila za projektiranje in zidanje. Raziskave, ki jih je podprla družba Wienerberger, so pokazale, da se bodo stavbe višine treh, štirih ali tudi do petih etaž, sezidane z opečnimi bloki v sistemu povezanega zidovja, med potresom obnašale v skladu z zahtevami standarda EC 8. Ugotovili so, da navpične vezi močno povečajo sposobnost nosilnosti, deformabilnosti in sipanja energije



konstrukcije med potresom, vezi v mejnem stanju porušitve in razpadanja zidov pa so celo prevzele navpično obtežbo in preprečile porušitev konstrukcije. Povečanje odpornosti konstrukcije z navpičnimi vezmi povezanih zidov na potresno ob-

težbo v primerjavi z odpornostjo konstrukcije iz nearmiranega zidovja je jasno pokazalo na zahtevo, da je treba vpliv navpičnih vezi upoštevati tudi pri računskih analizah potresne odpornosti konstrukcije.

Predstavniki Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Splitu prof. Boris Trogrlič je predstavil rezultate testiranja, ki so jih izvedli za potrebe ugotavljanja protipotresne odpornosti stavbe, sezidane z zidaki *Porotherm IZO Profi*. Prvo se je nanašalo na eksperimentalno preskušanje polnilnega zidovja pri delovanju sile pravokotno na ravnino zidu, drugo pa na



numerično analizo toplotnih lastnosti zidanega objekta. Pri tem so preverjali opečni zid s tremi različnimi oblikami sidranja v armirano betonski zid ter izvedli primerjavo rezultatov numerične analize, izdelane na osnovi računalniške simulacije transmissijskega toplotnega toka, in sicer skozi opečni zid z integrirano toplotno izolacijo in skozi armirano betonski zid z izolacijo. Analiza je pokazala na velike prihranke energije v primeru zunanega opečnega zidu, ki omogoča bistveno hitrejšo segrevanje notranjih prostorov.

Gradbeni inženir Amel Emkić iz družbe Wienerberger je v nadaljevanju predstavil celostni pristop k projektiranju in gradnji protipotresnih stavb in opozoril na nujnost hitrejšega razvoja materialov in sistemskih rešitev. To zahteva izpolnjevanje in spoštovanje različnih zahtev stroke za različne konstrukcijske sisteme, ki se nanašajo na trdnost materiala, energijsko učinkovitost, akustiko, požar in njihovo trajnost. Predstavil je koncept trajnostnega razvoja in optimizacije opečnih zidakov za različne sisteme gradnje na potresno ogroženih območjih (povezano, polnilno in predelno zidovje) ter poudaril prednosti novih materialov (*Porotherm Dryfix sistem*), ki omogočajo enostavnejšo in trikrat hitrejšo gradnjo objektov z izboljšanimi toplotnimi lastnostmi, visoko požarno odpornostjo in zvočno izolativnostjo ter visoko sposobnostjo akumulacije toplote ob nižjih emisijah CO₂, kar investitorju ob nizkih stroških gradnje in vzdrževanja v prostorih nudi tudi prijetno in zdravo klimo. Zatem je predstavil še moderno programsko opremo **AmQuake**, skladno z zadnjimi evropskimi standardi Evrokod 6 in 8 in modernimi metodami vrednotenja potresne odpornosti, ki je na-



menjena projektantom pri načrtovanju varnih zidanih zgradb na potresnih območjih. Uvedba standarda Evrokod v EU obvezuje inženirje, da preverijo skoraj vse nove zidane zgradbe glede na njihovo potresno varnost, kar pomeni tudi gradnjo varnejših stavb za prebivalstvo. Program AmQuake, ki temelji na analizi pushover in metodi nadomestnega okvirja, jim tako z uporabo modernih verificiranih metod hitro in učinkovito pomaga pri zahtevanih preverjanjih varnosti, tak pristop pa jim ponuja tudi največ možnosti za izkoristek celotne nosilnosti konstrukcije.

Potresi in požarna varnost stavb

Primož Bernard, dipl. inž. str., iz družbe Knauf Insulation se je v svojem predavanju osredotočil na fasade, ki predstavljajo kritični element stavbe, še zlasti če se ob potresih zaradi poškodb strojnih inštalacij na objektu razširi požar. Pri požarih so v začetni fazi pomembne lastnosti materialov ter njihova odzivnost na ogenj, saj lahko skrajšajo ali podaljšajo požar na objektu, v drugi, polno razviti fazi, pa je bolj pomembna požarna odpornost konstrukcije za preprečevanje širjenja požara tudi na sosednje objekte. Odziv na ogenj se v večini primerov preverja s SBI-testiranjem, klasifikacija gradbenih materialov po standardu SIST EN 13 501-1 pa jih razvršča v razrede od negorljivih do lahko gorljivih (od A do F). Požarna odpornost pa



je lastnost konstrukcije, pri kateri spremljamo odzivnost glede temperature, celovitosti, nosilnosti in sevanja (oznake so R, EW, EI in REI, izkazane v minutnih časovnih intervalih 30, 60, 90 in 120). V nadaljevanju je predstavil še požarno varstvene zahteve za kompozitne fasade, ki se najpogosteje uporabljajo za stanovanjske objekte. Stavbe so klasificirane po vrstah objektov (CC-SI), glede na višino ter zahtevano klasifikacijo same fasade oz. obloge zunanjih sten. Glede na zahteve smernice TSG-1-001 (2019), ki pripada Pravilniku o požarni varnosti v stavbah, morajo biti fasade stavb kritične infrastrukture negorljive, medtem ko so za stanovanjske objekte pod določenimi pogoji dovoljene tudi druge vrste fasad (stavbe nad 10 metrov višine morajo imeti po obodu stavbe med vsako etažo ločnico z razširjenim in neprekinjenim požarnim pasom). V posebno kategorijo sodijo stavbe, višje od 22 metrov, kjer je evakuacija ljudi ob požaru bistveno zahtevnejša. Zatem je predstavil še preskusne

metode, s katerimi Knauf Insulation s svojimi izolacijskimi materiali iz kamene volne dokazuje doseganje visokih požarnih zahtev. Na koncu je izpostavil še dilemo, zaradi katere nastaja nov evropski standard za preskušanje požarnih lastnosti fasad. Trenutno veljavno ocenjevanje varnosti kompozitnih sistemov je v kontekstu realnega okolja verjetno precejšeno, vsekakor pa nerealno. Na vprašanje, ali je SBI-test primeren za oceno nevarnosti kompozitnega sistema na fasadi, je namreč odgovor negativen. Projekt novega evropskega standarda za testiranje kompozitnih fasad je trenutno v drugi fazi, sledili ji bosta še dve z novimi preizkusi v evropskih laboratorijih po novih kriterijih ocenjevanja, po sprejetju standarda pa bo potrebna še implementacija v evropsko zakonodajo. K sreči je slovenska TSG-1-001 z razpoložljivimi predpostavkami dobro zasnovana, zato jo lahko do sprejetja novega standarda uspešno uporabljamo.

Potresno utrjevanje stavb z lesnimi ploščami

Slovenija, ki leži na potresnem območju in kjer je več kot tretjina prebivalcev visoko potresno ogrožena, ima pestro zgodovino ne tako šibkih potresov, najbolj pa nam je v spominu ostalo Posočje. V Sloveniji imamo velik fond stavb s seizmično neodpornimi stavbami, med katerimi je tudi veliko energijsko neučinkovitih. Načini energetske sanacije stavb so lahko tudi bolj kompleksni in hkrati naslavlajo tudi potresno problematiko. **Doc. dr. Iztok Šušteršič** z raziskovalnega inštituta InnoRenew CoE & Univerze na Primorskem je prispeval predavanje na temo **potresnega utrjevanja zidanih stavb s križno lepjenimi lesenimi ploščami**. Predstavil je različne metode in možnosti uporabe lesa tako za sanacije obstoječih stavb, ki so potresno slabše odporne, kot tudi možnosti uporabe lesa za namen povečanja potresne varnosti pri novih zgradbah. Vse zainteresirane, ki se zanimajo za prenovo objektov z uporabo lesa, je povabil tudi na konferenco Woodrise 2022, ki bo potekala v Portorožu od 6. do 9. septembra letos.

Fotografije: arhiv GBC Slovenija

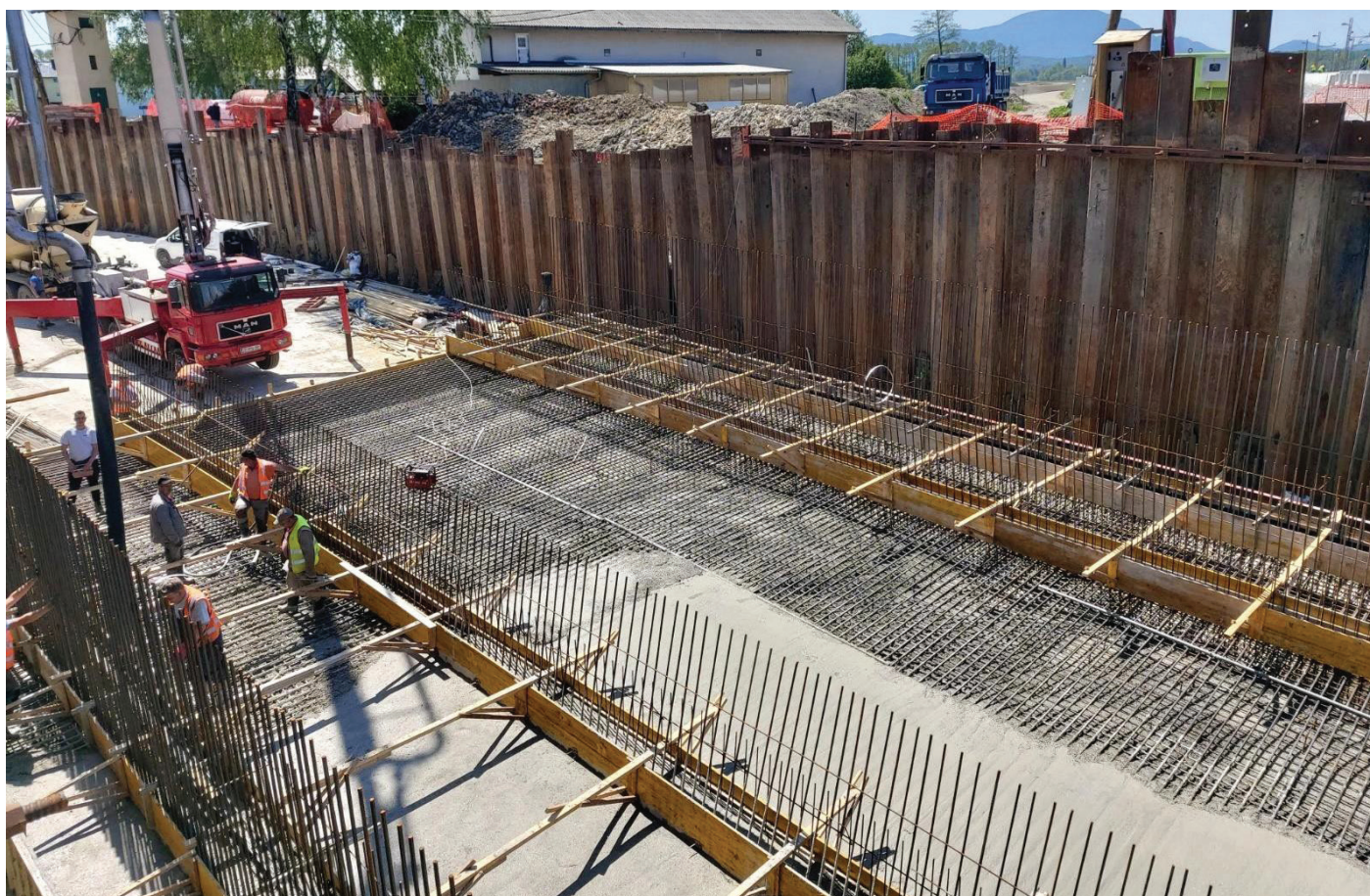


Več informacij: dr. Iztok Kamenski, predsednik UO GBC Slovenija, M: 041 716 845,
E: info@gbc-slovenia.si; W: www.gbc-slovenia.si

FOTOREPORTAŽA IZVEDBA UREDITVE VOZLIŠČA Z UREDITVIJO ŽELEZNIŠKE POSTAJE PRAGERSKO – PODVOZ A1 IN PODHOD



EVROPSKA UNIJA
EVROPSKI SKLAD ZA
REGIONALNI RAZVOJ



Slika 1. Betoniranje talne plošče kampade 5 na podvozu A1 (maj 2022).

Lokacija: Pragersko

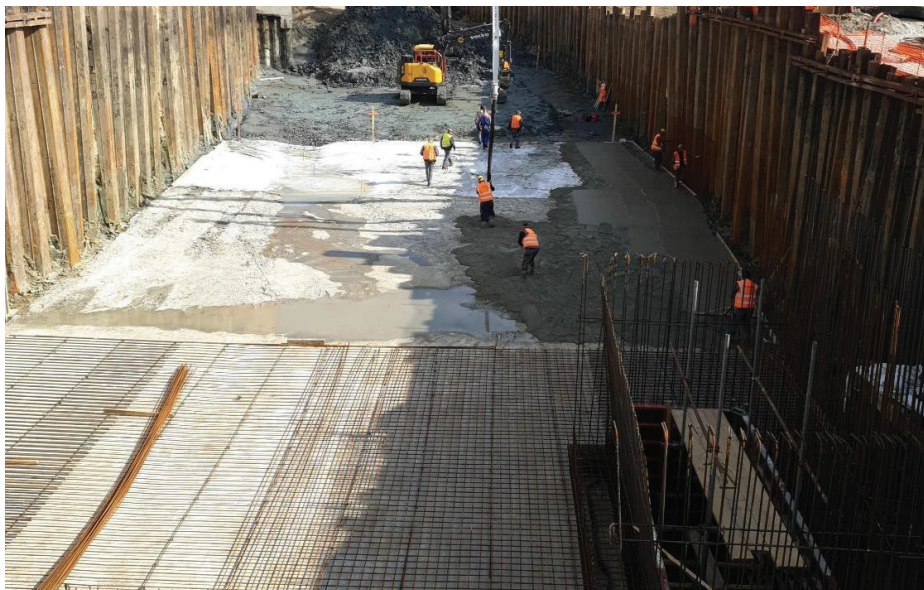
Investitor: Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo (projekt je sofinanciran iz Evropskega sklada za regionalni razvoj (ESRR))

Projektant gradbenih konstrukcij podhoda in podvoza A1: Promico, d. o. o.

Glavni izvajalec na projektu: Riko, d. o. o.

Inženir: DRI upravljanje investicij, Družba za razvoj infrastrukture, d. o. o.

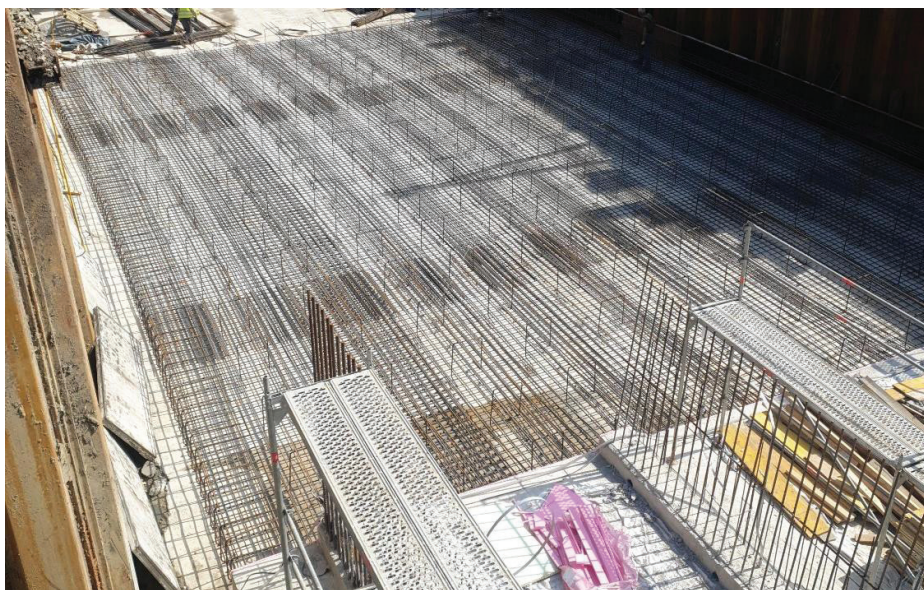
V preteklem letu so se pričela dala pri projektu Izvedba ureditve vozišča z ureditvijo železniške postaje Pragersko. V sklopu projekta se bodo tako izvedle rekonstrukcije in novogradnje stavb (objekt signalnovarnostnih ter telekomunikacijskih naprav (SVTK), garaža pri objektu SVTK, prometni urad ...), nadgradnja tirov in tirnih naprav, izgradnja gradbeno inženirskih objektov (podvoz A1, podhod, prepusti ...), ureditev in izgradnja cest, komunalne infrastrukture, aktivne protihrupne zaščite itd. V centru Pragerskega sta glavna objekta podvoz A1 in podhod.



Slika 2. Polaganje armature kampade 4 (faza 1) in izdelava podbetona za kampado 5 na podvozu A1 (april 2022).

PODVOZ A1

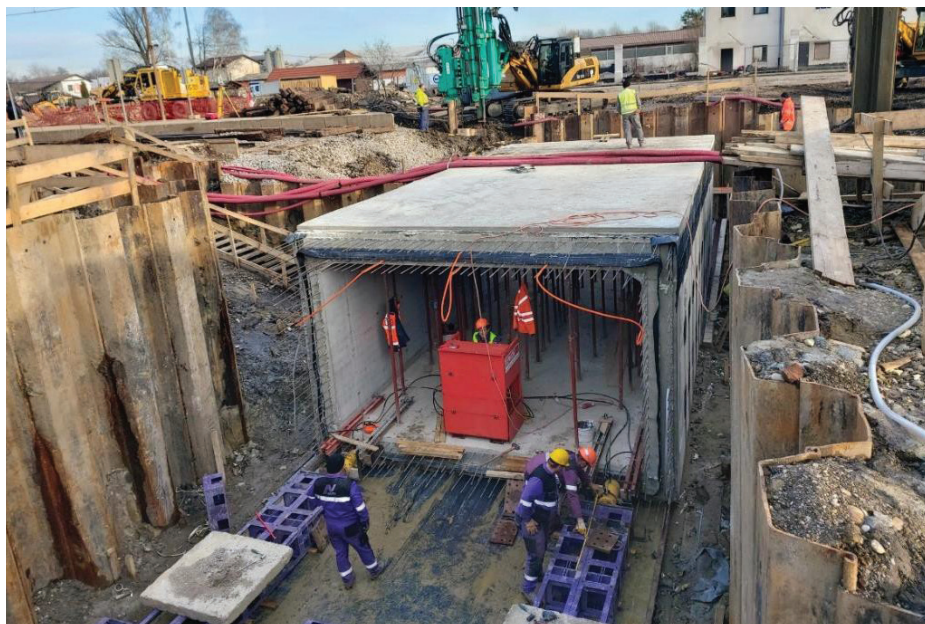
Konstrukcija podvoza A1 je zasnovana v vodotesni kesonski izvedbi skupne dolžine 194,31 m. Sestavljena je iz osmih kampad dolžin 27,69 + 22,44 + 23,31 + 36,62 + 22,98 + 22,20 + 21,90 + 17,03 m. Armiranobetonski keson objekta je U-oblike svetle širine 13,66–16,21 m. Višina sten znaša od 1,5 m do 6,6 m. Njihova debelina je 80 cm, na vrhu pa se zmanjša na 30 cm. Na obeh straneh vozišča bosta izvedena denivelirana hodnika za pešce in kolesarje. Izgradnja konstrukcije podvoza A1 obsega tudi tri prekladne konstrukcije (za železnico ter dve za cestni promet).



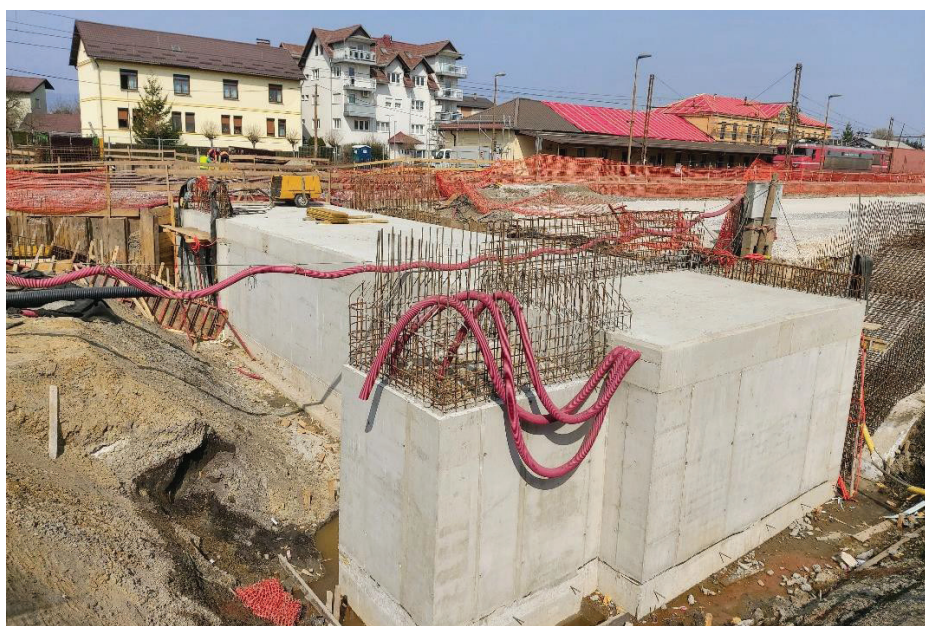
Slika 3. Polaganje armature kampade 5 na podvozu A1 (april 2022).

PODHOD

Konstrukcija podhoda je zasnovana kot armiranobetonski okvir v vodotesni izvedbi. Skupna dolžina podhoda je 37,43 m, njegova svetla širina znaša 5,00 m, višina pa 2,95 m. Konstrukcija je izvedena kot enovita kampa brez dilatacij. Debelina talne plošče in sten podhoda je 45 cm, debelina krovne plošče pa je 45–48 cm. Celotna konstrukcija obsega tudi tri stopnišča in tri dvigalne jaške. Podhod je grajen v dveh glavnih fazah. Prva faza obsega izgradnjo pozicije 1 podhoda izven območja končnega stanja podhoda ter potiskanje na končno mesto (potiskanje objekta se izvede zaradi zagotavljanja ustreznega železniškega prometa v času gradnje). Druga faza po obsega izgradnjo ostalih elementov konstrukcije na končnem mestu.



Slika 4. Potiskanje prve faze podhoda na končno mesto (december 2021).



Slika 5. Betonska konstrukcija podhoda (marec 2022).

Objekta podvoz A1 in podhod bosta pripomogla, da bo prometna ureditev v Pragerskem sodobna in varna.

Avtor: Tomaž Goričan, mag. inž. grad. (DRI, d. o. o.)

Z varnostjo modre linije.

Zaščita pred udarnim zvokom
na stopnišču.

Optimalna zaščita pred udarnim zvokom deluje le v celovitem sistemu Schöck Tronsole®, ki je primeren za ravne in zavite stopnice. Kot neprekinjena modra linija, zagotavlja akustično ločitev stopnic. S sistemom Schöck Tronsole® pade nivo udarnega zvoka pod 40 dB.

www.schoeck.com

NOVI DIPLOMANTI GRADBENIŠTVA

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Vasja Hodnik, Analiza možnosti optimizacije energetske proizvodnje HE Moste na Savi, mentor izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski, somentor Mitja Dušak;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=136374>

Blaž Košorok, Analiza možnosti optimizacije energetske proizvodnje HE Medvode na Savi, mentor izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski, somentor Mitja Dušak;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=136372>

III. STOPNJA - DOKTORSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRAJENO OKOLJE

Luka Pajek, Energijska učinkovitost enostanovanjskih bioklimatskih stavb glede na podnebne spremembe, mentor izr. prof. dr. Mitja Košir;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=136717>

Maruša Goluža, Konflikti pri umeščanju prometne infrastrukture v prostor v Sloveniji, mentor izr. prof. dr. Drago Kos, somentorica izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=136486>

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

3.-5.6.2022

Global Conference on Civil Engineering
Oxford, Velika Britanija
www.ceconf.org

16.-18.6.2022

**GSCAEE2022 – 2nd Global Summit on Civil,
Architectural and Environmental Engineering**
Kopenhagen, Danska
www.thescientistt.com/civil-structural-environmental-engineering/2022

27.-29.6.2022

**IS-Cambridge 2022 — 10th International Symposium
on Geotechnical Aspects of Underground
Construction in Soft Ground**
Cambridge, Velika Britanija
www.is-cambridge2020.eng.cam.ac.uk/

4.-7.7.2022

**ACEER 2022 — 4th International Conference on
Advances in Civil and Ecological Engineering
Research**
Spletna konferenca
www.aceerconf.org/

2.-5.9.2022

**ICCUE 2022 - 9th International Conference on Civil
and Urban Engineering**
Peking, Kitajska
www.iccue.org/

5.-7.9.2022

**17th Danube - European Conference on Geotechnical
Engineering**
Bukarešta, Romunija
<https://sites.google.com/view/17decgero/home>

12.-15.9.2022

**EUROCK 2022 — Rock and Fracture Mechanics in
Rock Engineering and Mining**
Espoo, Finska
www.eurock2022.com

13.-17.9.2022

**ICOSSAR 2021-2022, 13th International Conference on
Structural Safety & Reliability**
Spletna konferenca
www.icossar2021.org

15.-17.9.2022

**ICSCE 2022 — 6th International Conference on
Structural and Civil Engineering**
Barcelona, Španija
www.icsce.org

28.-29.9.2022

4. gradbeno - prostorsko - okoljska konferenca
Ljubljana, Slovenija
<https://gradbeno-prostorsko-okoljska-konferenca.si/>

24.-26.10.2022

**ICCEFA'22 - 3rd International Conference on Civil
Engineering Fundamentals and Applications**
Hibridna konferenca
<https://iccefa.com>

26.-28.10.2022

**ICBSTS 2022 — 3rd International Conference on
Building Science, Technology and Sustainability**
Lizbona, Portugalska
www.icbsts.org

25.-28.6.2023

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

17.-21.9.2023

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

14.-17.11.2023

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

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