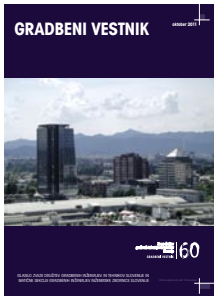




Zveza društev  
gradbenih inženirjev in tehnikov  
Slovenije  
GRADBENI VESTNIK

60



# Gradbeni vestnik • GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKO ZBORNICE SLOVENIJE

UDK-UDC 05 : 625; ISSN 0017-2774  
Ljubljana, oktober 2011, letnik 60, str. 257-284

Izdajatelj:

**Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS)**, Leskoškova 9e, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200; faks 01 52 40 199 v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (MSG IZS)**, ob podpori **Javne agencije za knjigo RS, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani** in **Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**  
**prof. dr. Matjaž Mikoš**  
**Jakob Presečnik**  
MSG IZS: **Gorazd Humar**  
**mag. Črtomir Remec**  
**doc. dr. Branko Zadnik**  
FGG Ljubljana: **doc. dr. Marijan Žura**  
FG Maribor: **Milan Kuhta**  
ZAG: **prof. dr. Miha Tomaževič**

Glavni in odgovorni urednik:

**prof. dr. Janez Duhovnik**

Sodelavec pri MSG IZS:

**Jan Kristjan Juteršek**

Lektor:

**Jan Grabnar**

Lektorica angleških povzetkov:

**Darja Okorn**

Tajnica:

**Eva Okorn**

Oblikovalska zasnova:

**Mateja Goršič**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

**Kočevski tisk**

Naklada:

**3000 izvodov**

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

<http://www.zveza-dgits.si>

Letno izide 12 števil. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 22,95 EUR; za študente in upokojence 9,18 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 169,79 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

## 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 presledki 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, navadni in elektronski naslov; oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek 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. Poglavlja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavlja 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, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja 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 in opisana z naslednjimi podatki: priimek, začetnica imena prvega avtorja, 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: [janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si](mailto:janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si). V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

Uredništvo

# Vsebina • Contents

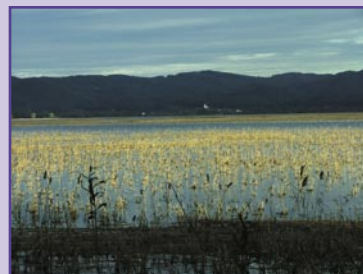
## Članki • Papers

stran **258**

doc. dr. Darko Drev, univ. dipl. inž. kem. teh.  
izr. prof. dr. Jože Panjan, univ. dipl. inž. grad.

### **SAMOČIŠČENJE CERKNIŠKA JEZERA KOT KOMBINACIJA RASTLINSKE ČISTILNE NAPRAVE IN SEKVENČNEGA REAKTORJA**

SELPURIFICATION PROCESSES IN LAKE CERKNICA  
WITH COMBINATIONS CONSTRUCTED WETLAND AND  
OF SEQUENCE RECTOR

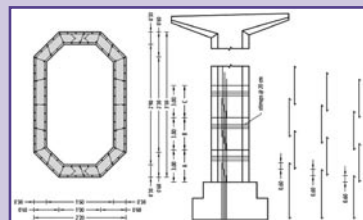


stran **267**

izr. prof. dr. Tatjana Isaković, univ. dipl. inž. grad.  
prof. dr. Matej Fischinger, univ. dipl. inž. grad.

### **IZBOLJŠAVE POTRESNEGA ODZIVA OBSTOJEČIH MOSTOV**

IMPROVEMENTS OF THE SEISMIC RESPONSE OF EXISTING BRIDGES

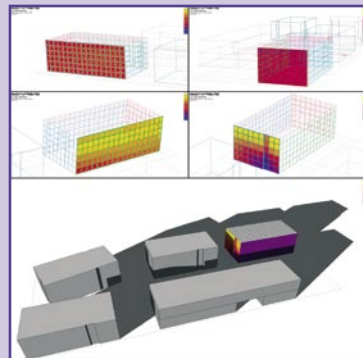


stran **279**

Miloš Todorović, univ. dipl. inž. grad.  
prof. dr. Žiga Turk, univ. dipl. inž. grad.

### **UPOŠTEVANJE TRAJNOSTNIH KRITERIJEV PRI PROJEKTIRANJU Z ORODJI BIM**

DESIGNING USING SUSTAINABILITY CRITERIA WITH BIM TOOLS



## Novi diplomanti

J. K. Juteršek, univ. dipl. inž. grad.

## Koledar prireditev

J. K. Juteršek, univ. dipl. inž. grad.

Slika na naslovnici: Kristalna palača in stolpnici BTC ter Emona v Ljubljani, foto: Srečko Balič

# SAMOČIŠČENJE CERKNIŠKEGA JEZERA KOT KOMBINACIJA RASTLINSKE ČISTILNE NAPRAVE IN SEKVENČNEGA REAKTORJA

## SELPURIFICATION PROCESSES IN LAKE CERKNICA WITH COMBINATIONS CONSTRUCTED WETLAND AND OF SEQUENCE RECTOR

**doc. dr. Darko Drev, univ. dipl. inž. kem. teh.**

IZVRS, darko.drev@izvrs.si

Hajdrihova 28 c, 1000 Ljubljana

**izr. prof. dr. Jože Panjan, univ. dipl. inž. grad.**

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Jamova 2, 1000 Ljubljana, joze.panjan@ul-fgg.si

**Znanstveni članek**

UDK: 502.171:531.62

**Povzetek** | Cerkniško jezero je presihajoče – periodično jezero, ki lahko doseže površino 26 km<sup>2</sup> in volumen 80 km<sup>3</sup>. Za jezera je značilno, da se sčasoma starajo. Cerkniško jezero pa nima lastnosti pravih jezer pa tudi običajnih močvirij ne. Zato so vsi fizikalni, kemijski in biološki procesi specifični. Poglavitna posebnost, ki ima največji vpliv na razvoj rastlin in živali, je, da je dno menjaje suho in poplavljen. Pri samočiščenju smo ga obravnavali kot rastlinsko čistilno napravo in kot sekvenčni reaktor s periodo polnjenja in praznjenja na šest mesecev. Osnovni procesi samočiščenja hranil v jezeru so usedanje suspendiranih snovi na dno, vgradnja hranil v rastline in delna denitrifikacija. Ponavljajoče se polnjenje in praznjenje jezera vzdržujejo ekosistem na zgodnji, relativno produktivni stopnji razvoja, nekje med »mladostjo in zrelostjo« jezera oziroma oligotrofno do eutrofno. Največjo obremenitev za jezero predstavlja kmetijstvo, ki prispeva ca. 66 % fosforja in 53 % dušika in naselja s ca. 33 % fosforja in 44 % dušika. V Cerknškem jezeru se na podlagi naših izračunov (samo)očisti okoli 24 % fosforja in 40 % dušika.

**Summary** | Lake Cerknica is a intermittent – periodical lake, which may reach the surface of 26 km<sup>2</sup> and volume of 80 km<sup>3</sup>. It is characteristically for lakes to age over time. Lake Cerknica is neither a typical lake nor marshland. Therefore, all its physical, chemical and biological processes are rather specific. The main feature having the greatest impact on the development of plants and animals is that its bottom alternately dry or flooded. Regarding selfpurification it was treated as a purifying plant and a sequential reactor with a period of approximately 6 months. The basic processes of selfpurification are: suspended solids settling at its bottom, the installation of nutrients into plants, and partial denitrification. Repeated filling and emptying maintained the lake ecosystem at an early, relatively productive, stage of development, somewhere between "youth and maturity," or it is oligotrophic to eutrophic. Agriculture, which contributes approximately 66 % of phosphorous and 53 % of nitrogen and surrounding villages with approximately 33% phosphorous and 44 % nitrogen represent the greatest load for the lake. On the basis of our calculations only about 24 % phosphorus and 40 % nitrogen is purified in Lake Cerknica.

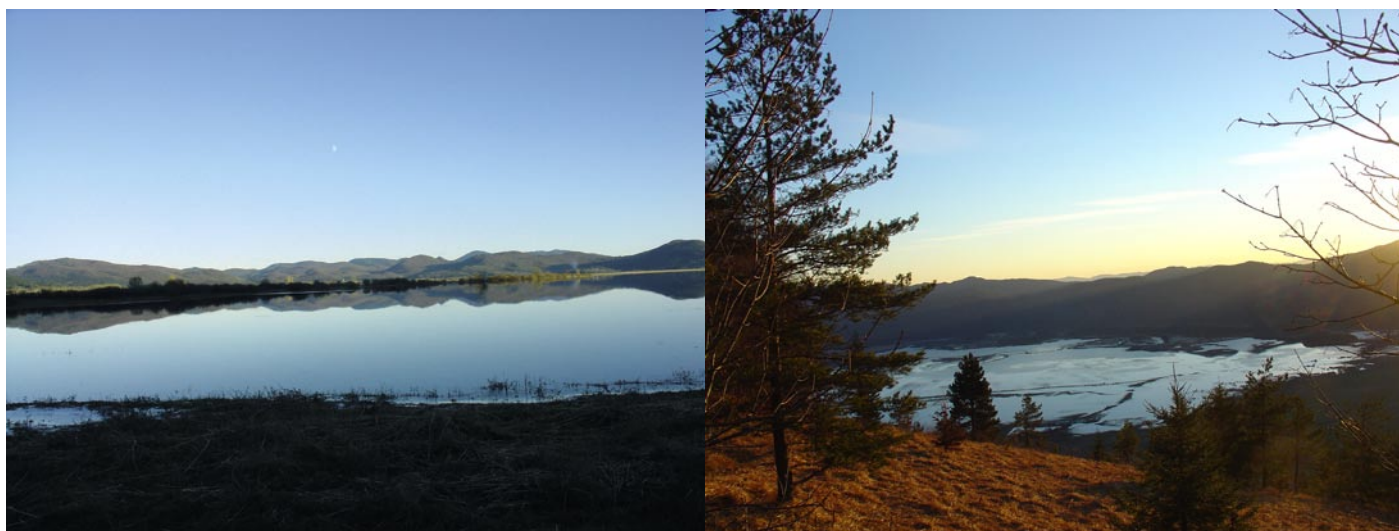
## 1 • UVOD

Cerkniško jezero je presihajoče – periodično jezero s periodo približno šest mesecev. V »namočeni« polovici leta je največje slovensko naravno jezero, ki meri okoli 26 km<sup>2</sup>, s prostornino približno 80 km<sup>3</sup> in največjo globino malo manj kot 20 metrov. Osnovna ekološka značilnost jezera je veliko nihanje vodne gladine, dno je menjaje se suho in poplavljenno, velikost poplavljenih površin pa se zelo spreminjajo. Edini površinski pritok na Cerkniškem polju je reka Cerkniščica. Voda priteka v jezero predvsem iz kraških izvirov, razporejenih ob robu, odteka pa samo podzemeljsko, skozi ponore v dnu in robu jezera. Ob močnem deževju se jezero napolni v nekaj dneh (Gaberšček, 2002). Voda ostaja v njem povprečno štiri do pet mesecev, v glavnem od marca do junija in

od oktobra do konca januarja. Pričetek nastajanja jezera je približno nad koto 548 m.n.m, kar pomeni ca. 0,7 km<sup>2</sup> površine. Cerkniško jezero je plitvo in neslojevito (nestratificirano), s povprečno globino med 1,5 do 3 m, v takih jezerih je recikluracija hranil in s tem tudi rast fitoplanktona mnogo večja kot v globljih jezerih (Kovač, 2005).

Vodni sistem najlažje očisti naravni del onesnaženja, medtem ko antropogeni del onesnaženja z vedno novimi spojinami jezero močno obremeni. V sušnem obdobju se pospeši aerobna razgradnja nakopičenih organskih snovi. Ob ponovni napolnitvi jezerske kotanje ostane na dnu rastlinje ali pa strnišče, ki da detritus. Iz zemlje in razpadajočih ostankov se izlužijo hranilne snovi, ki so podlaga za

razvoj rastlinskega planktona ((Mander, 2003), (Moss, 1989)). Ker jezero ni globoko, pomladansko sonce hitro ogreje vodo in plitvo dno. Vetrovi in potoki plitvo vodo dobro premešajo, kisika je dovolj in tudi ogljikovega dioksida. Primarna produkcija na jezeru je zato velika. Na splošno velja, da večja ko so nihanja vodne gladine, večja je produktivnost sistema. Najbolj pomembne za čiščenje vode so bakterije, ki imajo prednost pred drugimi organizmi zaradi razmerja med površino in telesno težo ter zmožnostjo hitrega razmnoževanja. Višje podvodne rastline s svojimi listi in stebli delujejo predvsem kot sito in substrat za mikroorganizme. Glavna povzročitelja slabšanja kakovosti Cerkniškega jezera sta predvsem intenzivno kmetijstvo in urbanizacija ((Drev, 2009), (Merrington, 2002)). Pri prevelikih količinah voda s hranili lahko pride do eutrofikacije, to je do preobremenjenosti in rušenja ekoravnotežja – cvetenja alg.



Slika 1 • Pogled na Cerkniško jezero jeseni in pozimi (foto: Panjan)

## 2 • METODE DELA

Meritve onesnaženja Cerkniškega jezera potekajo v okviru programa monitoringa kakovosti jezer pod okriljem Agencije republike Slovenije za okolje – ARSO. Upoštevali bomo obdobje med letoma 1989 in 1999.

Ob višjem vodostaju se kaže znižanje vrednosti BPK-ja, medtem ko na KPK vodostaj nima izrazitega vpliva. Meritve kažejo večje onesnaženje s hranili na pritokih kot v samem jezeru.

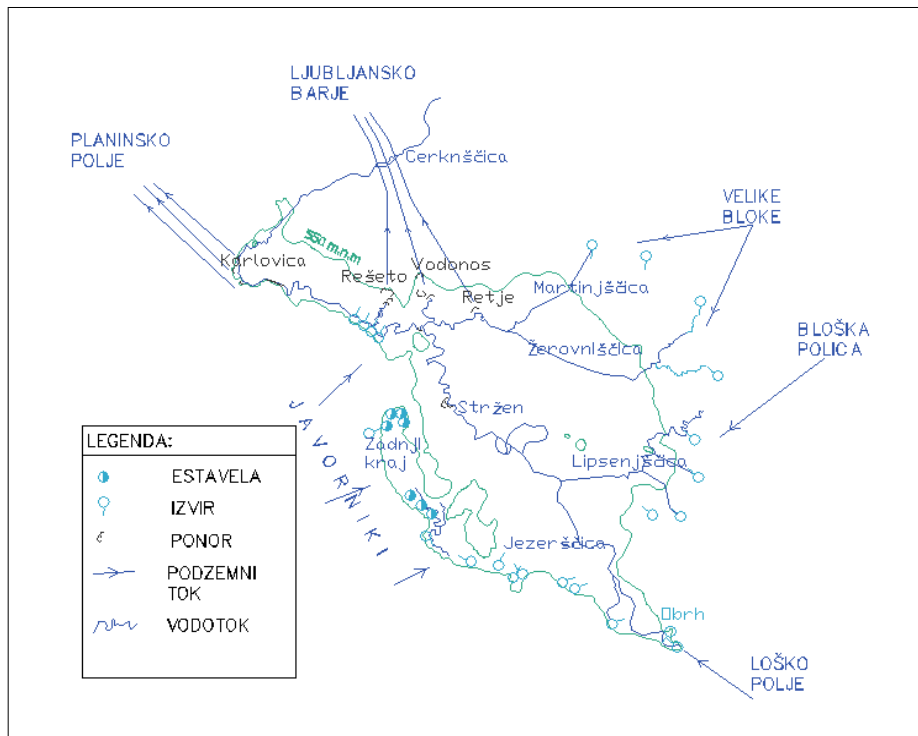
Sistem Cerkniškega jezera želimo predstaviti kot kombinacijo rastlinske čistilne naprave – RČN, in skvenčnega reaktorja – SBR, kot veliko biološko čistilno napravo, ki preko usedanja in z mikroorganizmi, rastlinami ter apnenčastimi in dolomitnimi tlemi »vsrkava« in izloča hranila ter spreminja onesnaženje (suspendirane snovi, pH, BPK, KPK ...) oziroma omogoča samočiščenje.

Upoštevani so naslednji samočistilni procesi:

- usedanje (mehansko odlaganje suspendiranih snovi na dno),
- odstranjevanje N in P skozi rastlinje (s košnjo),
- denitrifikacija (izguba N<sub>2</sub> v ozračje),
- odstranjevanje hranil skozi alge.

Skupna bilanca za Cerkniško jezero je realna v času, ko jezero obstaja, to je v povprečju devet mesecev na leto. Takrat je jezero celovito in vode so premešane. V času nizkih vodostajev, ki se pojavijo dvakrat na leto, pa je jezero razdeljeno na več podsistemov. Površinski sistemi vodotokov so ločeni in zato lahko govorimo o treh podsistemih, in sicer Cerkniščice, ki

se steka v Karlovinci, Strženi, ki presahne na poti do Jamskega zaliva, in še Zadnji kraj, ki je brez površinskega vodotoka in se vanj stekajo vode iz Javornikov, glej sliko 2.



Slika 2 • Prikaz površinskih vodotokov, podzemnih vodnih zvez, ponorov in izvirov na Cerknjskem polju (Kovač, 2005)

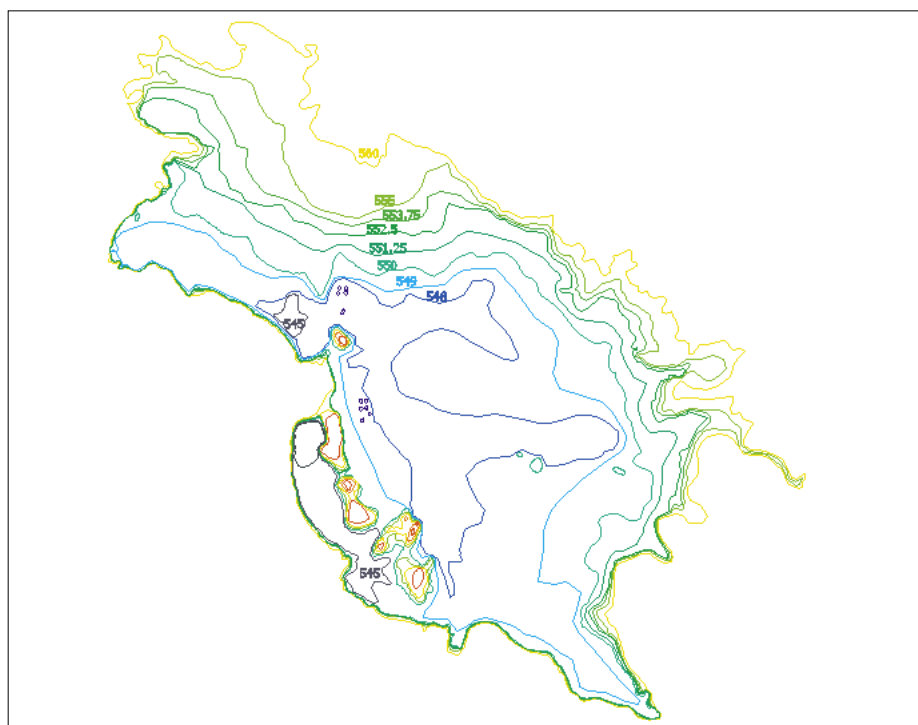
### 3 • PRIMERJAVA PROCESOV SAMOČIŠČENJA Z RČN IN TEHNIČNIMI REAKTORJI SBR

Samočistilni procesi so v Cerknjskem jezeru dinamični zaradi polnjenja in praznjenja. Sposobnost Cerknjskega jezera, da zmanjša organsko onesnaženje, predela in odstrani velik del hranil, lahko primerjamo z nekaterimi tehnološkimi načini čiščenja odpadne vode, kot so rastlinske čistilne naprave – RČN, ali lagune, zaradi polnjenja in praznjenja pa so podobni tudi sekvenčnim reaktorjem SBR. Zato bomo poizkušali naravne procese v jezeru primerjati in opisati s temi tehničnimi postopki čiščenja.

#### 3.1 Hidrološki parametri

##### Računanje površine in volumna

Gladina jezera niha, zato se jezerska površina in volumen med letom neprestano spreminjata. Osnovne podatke smo pridobili iz topografskih kart 1 : 25.000, iz katerih so odčitane izohipse 546, 550, 552,5, 550 in 560 m.n.m. in v avtoCAD-u izrisane ter izračunane površine ploskve in njihovi volumni, glej sliko 3. Vsa nihanja so izmerjena na merilni postaji v Dolejnem Jezeru z nadmorsko višino 545,556 m.



Slika 3 • Izohipse Cerknjskega jezera – polja (Kovač, 2005)

### Nihanje gladine

Nihanje vodostaja se iz leta v leto spreminja. Visok vodostaj lahko nastopi vsako leto ob drugem času, tako da ne moremo z gotovostjo trditi, v katerem mesecu bo jezero prazno ali polno. Zelo je odvisno od meteorološkega leta. Tako je za večletna opazovanja za avgust značilen najnižji vodostaj v letu, slika 5, vendar je bil leta 1989 v avgustu vodostaj višji kot v večini drugih mesecev. Vsi podatki so dobljeni iz meritev gladin vode v obdobju med letoma 1989 in 1999.

Povprečno globino jezera ( $H_{npovp}$ ) na nadmorski višini ( $n$ ) je določena po enačbah od 3.1 do 3.4.

$$H_{npovp} = \frac{\sum_{i=545}^n \Delta H_i * P_i}{\sum_{i=545}^n P_i} \quad (1)$$

Tu pomenita:

$$P_i = \text{površina dna na višini } i \quad (2)$$

$$\Delta H_i = H_n - i \quad (3)$$

$$i = \text{od kote } 545 \text{ do } H_n \quad (4)$$

Sprememba volumna pa je enaka:

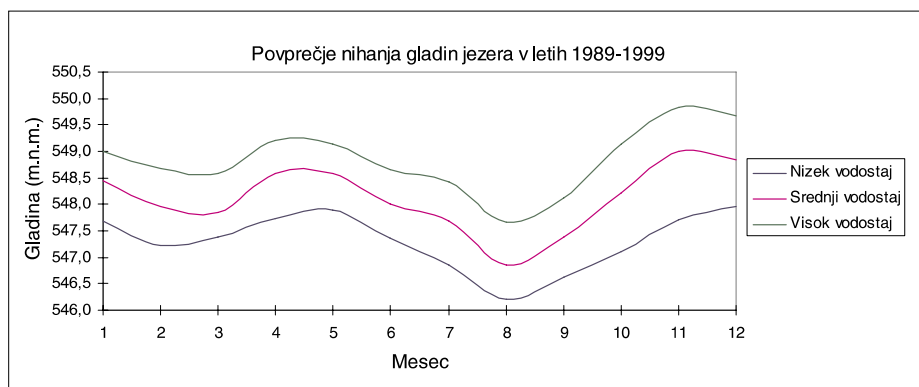
$$\frac{dV}{dt} = Q_{vtok} - Q_{iztok} \pm dR = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (5)$$

kjer sta:

$$Q_{vtok} = \text{padavine} \cdot \text{koeficient odtoka} \cdot \text{prispevna površina} \quad (6)$$

$$Q_{iztok} = Q_{iztok} (\text{zmogljivost ponorov, višina vode}) \quad (7)$$

$R$  = razlika med dotokom in odtokom



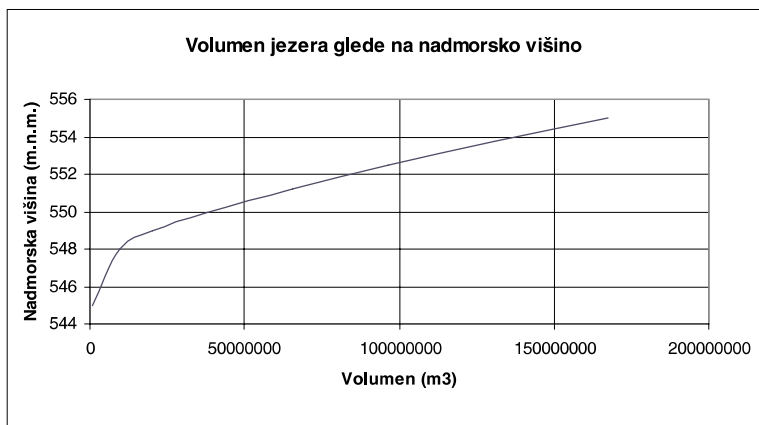
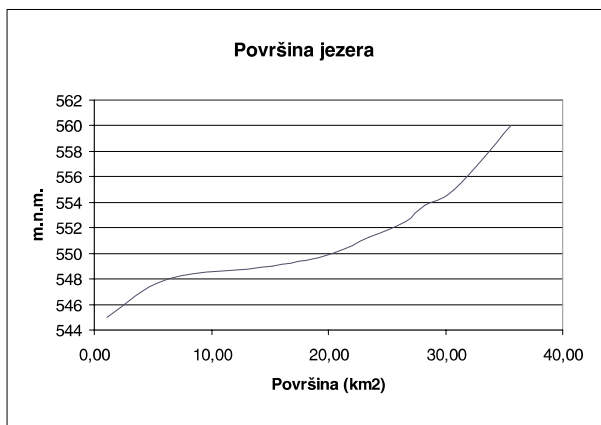
Slika 4 • Povprečno nihanje gladin Cerklješkega jezera na vodomerni postaji Dolenje Jezero v obdobju 1989–1999

| Višina – kota | globina | površina          |                    |
|---------------|---------|-------------------|--------------------|
| (m.n.m.)      | (cm)    | (m <sup>2</sup> ) | (km <sup>2</sup> ) |
| 545           | 0       | 1056827           | 1,06               |
| 546           | 100     | 2812645           | 2,81               |
| 547           | 200     | 4568464           | 4,57               |
| 548           | 300     | 6324282           | 6,32               |
| 549           | 400     | 15186310          | 15,19              |
| 550           | 500     | 20258178          | 20,26              |
| 551,25        | 625     | 23480840          | 23,48              |
| 552,5         | 750     | 26589039          | 26,59              |
| 553,75*       | 875     | 28203119          | 28,20              |

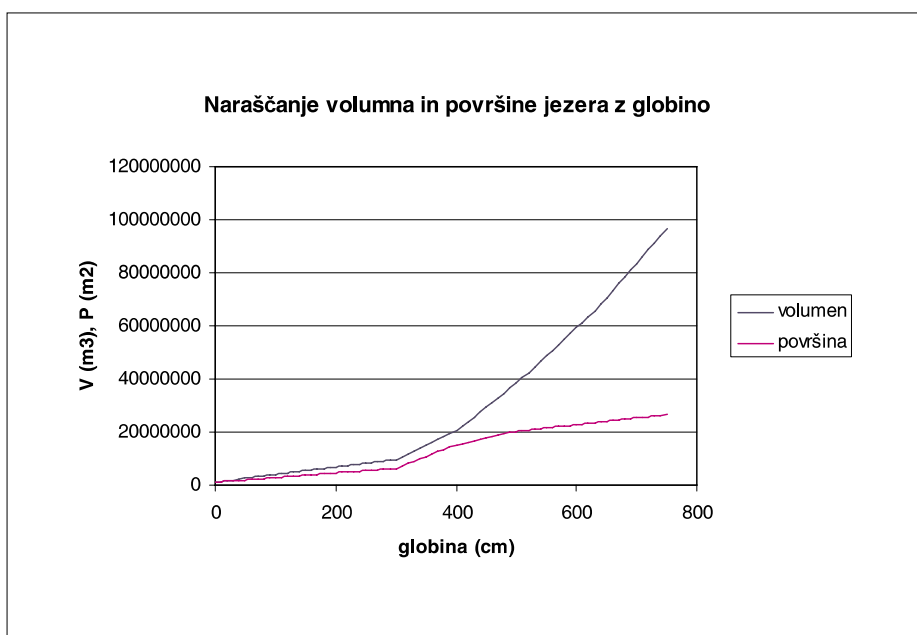
Preglednica 1 • Izračun površine Cerklješkega jezera glede na povprečni vodostaj v obdobju 1989–1999 (Kovač, 2005)

| Površine in volumni pri različnih nadmorskih višinah |                  |                                   |                                   |                                   |                                   |
|--|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Nadmorska višina (m.n.m.)                            | Višinska razlika | P <sub>ovršina</sub>              | ΔP                                | V <sub>volumen</sub>              | V <sub>kumulativ</sub> *          |
|  | (m)              | 10 <sup>6</sup> (m <sup>2</sup> ) | 10 <sup>6</sup> (m <sup>2</sup> ) | 10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> ) | 10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> ) |
| 545  | 1,00             | 1,057                             | 0                                 | 1,057                             | 1,057                             |
| 548  | 3,00             | 6,324                             | 0,149                             | 8,661                             | 9,718                             |
| 549  | 4,00             | 15,186                            | 8,862                             | 10,755                            | 20,473                            |
| 550  | 5,00             | 20,258                            | 5,072                             | 17,722                            | 38,195                            |
| 551,25   | 6,25             | 23,481                            | 3,223                             | 27,337                            | <b>65,532</b>                     |
| 552,50   | 7,50             | 26,589                            | 3,108                             | 30,984                            | 96,516                            |
| 553,75   | 8,75             | 28,203                            | 1,614                             | 34,214                            | 130,730                           |

Preglednica 2 • Izračun volumnov Cerklješkega jezera glede na koto vodostaja (\*) Gabršček (2009), Jezero, ki presiha, stran 34, podaja naslednje volumne: kota 549 m.n.m. ca. 11 mili. m<sup>3</sup>, na koti 550 m.n.m. ca. 28 mili. m<sup>3</sup> in na koti 553 m.n.m. ca. 100 mili. m<sup>3</sup>)



Slika 5 • Diagram površine in volumna jezera glede na koto gladine



Slika 6 • Prikaz naraščanja volumna in površine jezera z globino (Kovač, 2005)

Pri izračunu volumnov so lahko precejšnje razlike med posameznimi avtorji zaradi pomanjkanja podatkov (ni natančnih geodetskih izmer), ter zaokroževanja pri korigiranju volumna. Največja možna napaka oziroma razlika je ob nizkem vodostaju (med kotama 545 m.n.m. do 548 m.n.m.) oziroma pri manjših volumnih jezera, ki lahko znaša tudi več deset odstotkov. Glavni vzrok so kotanje in požiralniki, ki niso natančno določljivi in lahko prinesejo velik delež k napaki volumna. Nad koto nadmorske višine 549 m pa se napaka zmanjšuje in je po oceni od 5 do 10 %, čeprav takrat sodeluje pri odtokih večje število ponorov. Osnovni nadzor velikostnega razreda volumnov smo naredili na podlagi podatka iz Programa monitoringa kakovosti jezer za leto 2003, ARSO, ko je bil izračunan volumen jezera pri površini 24 km<sup>2</sup>, ca. 76.106 m<sup>3</sup>, po naših izračunih pa je pri površini 23,5 km<sup>2</sup> volumen enak ca. 65,53.106 m<sup>3</sup> in na podlagi podatkov (Gabršček, 2009), glej opombo pri preglednici 2.



Slika 8 • Cerknika jezero v obdobju, ko si ga lahko predstavljamo kot rastlinsko čistilno napravo ali mokrišče (foto: Kovač)



### 3.2 Primerjava jezera z rastlinsko čistilno napravo in/ali mokriščem

Rastlinske čistilne naprave s površinskim tokom dobro opravljajo čiščenje BPK, suspendiranih delcev, bakterij in nitratov, medtem ko pri odstranjevanju amonijaka in fosforja le delno. Trstičevje je pomembno predvsem, ker nudi prostor, na katerem se razvija aerobni biofilm (Valsami-Jones, 2004). V mokriščih je nitrifikacija zaradi organskih odpadkov, močvirskih rastlin, ki služijo kot izmenjevalci kationov, pospešena.

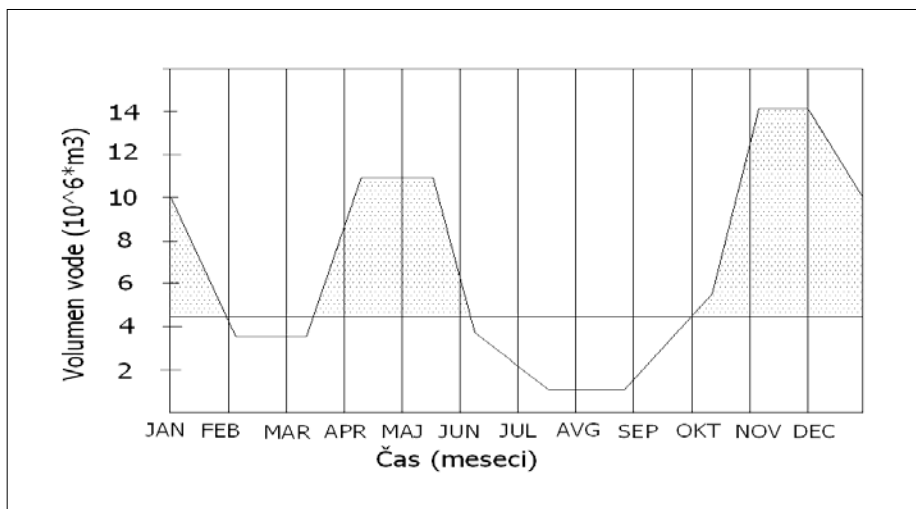
Za Cerkniško jezero v primerjavi s čiščenjem onesnažene odpadne vode v rastlinskih čistilnih napravah ali mokriščih lahko ugotovimo, da pride do:

- usedanja suspendiranih snovi,
- filtracije in kemičnega obarjanja na kontaktih voda–substrat in voda–rastline,
- kemične transformacije snovi,
- adsorpcije in ionske izmenjave na površini rastlin, substrata, sedimenta in organskega drobirja,
- rastlinje, detritus in pritoki zagotavljajo povratni substrat v jezeru ali njegovem dnu,
- razbitja in transformacije polutantov z organizmi in rastlinami,
- odstranjevanja hranil zaradi mikroorganizmov in rastlin,
- plenjenja in naravnega odmiranja patogenih organizmov,
- rastline dovajajo kisik v prst preko koreninskega sistema,
- rastline dovajajo kisik tudi mikrobnim biomasi, ki porablja nečistoče za svojo rast.

### 3.3 Primerjava jezera z reaktorjem SBR

Osnovna podobnost med SBR in Cerkniškim jezerom je periodično polnjenje in praznjenje »reaktorske posode«, v kateri potekajo vse faze čiščenja (polnjenje, mešanje, aeracija, reakcija, usedanje, praznjenje) (Panjan, 2004).

Gladina hitreje narašča, kot upada, ob normalnih pogojih praznjenja jezero upada za okrog šest cm na dan, napolni pa se v nekaj dneh. Pri poplavah znaša maksimalni dotok 210 do 240 m<sup>3</sup>/s, srednji letni pretok je 16,4 m<sup>3</sup>/s, minimalni dotok pa 2 m<sup>3</sup>/s (Gabršček, 2009). Pretočna sposobnost ponikev in požiralnikov, ki odvajajo vodo proti Rakovemu Škočjanu in nato naprej proti Planinskemu polju, znaša maksimalno 74 m<sup>3</sup>/s, odtok proti Ljubljanskemu barju pa ca. 16,1 m<sup>3</sup>/s. Vendar pa dejanska pretočna sposobnost požiralnikov nikoli ni dosežena. Maksimalni odtok torej znaša ca. 40 do 90 m<sup>3</sup>/s. Pri maksimalnih poplavah znaša razlika med dotokom in odtokom od 120 do 200 m<sup>3</sup>/s, kar je vzrok obstoja presihajočega jezera.



Slika 9 • Prikaz faz povprečnega polnjenja in praznjenja Cerkniškega jezera v obdobju 1989–1999

Na sliki 9 so prikazane povprečne faze polnitve in praznitve za desetletno obdobje 1989–1999.

Tako lahko ugotovimo s primerjavo delovanja med Cerkniškim jezerom in reaktorjem SBR naslednje:

- Ko je  $Q_{\text{dotok}} > Q_{\text{iztok}}$ , poteka v jezeru polnjenje, in nasprotno, ko je  $Q_{\text{dotok}} < Q_{\text{iztok}}$ , se jezero prazni.
- Sistem Cerkniškega jezera se najbolj ujema s sistemom SBR s kontinuiranim polnjenjem in/ali praznjenjem.
- Medtem ko en cikel pri SBR traja nekaj ur (ca. šest ur), traja na Cerkniškem jezeru od ca. štiri do deset mesecev, povprečno šest mesecev. Povprečno sta dve polnitvi na leto, ena aprila, druga novembra, in dve praznitvi, ena julija in druga februarja.
- Bazen SBR je enotno premešan, medtem ko je Cerkniško jezero lahko občasno pri nizkih vodostajih razdeljeno na več zalivov in je voda različno obremenjena.
- Cerkniško jezero ima več pritokov in odtokov, medtem ko ima SBR praviloma en prtok in en odtok.
- Volumen suspenzije aktivnega biološkega blata brez »odpadne« vode je v Cerkniškem jezeru manjši v primerjavi z volumnom dane »odpadne« vode v SBR.
- V jezeru je dovolj organskih snovi (ogljika) za izvedbo III. faze čiščenja.

### 3.4 Statistična analiza izmerjenih parametrov hranil glede na vodostaj in izračuni samočiščenja ter nekaterih parametrov evτροφnosti

*Statistična analiza izmerjenih parametrov hranil glede na vodostaj*

S statistično analizo izmerjenih parametrov smo ugotavljali tudi medsebojno soodvisnost oziroma korelacijo glede na vodostaj. Povezavo med dvema skupinama podatkov lahko določimo s kovarianco vzorca.

$$\text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_x) \cdot (y_i - \bar{y}_y) \quad (8)$$

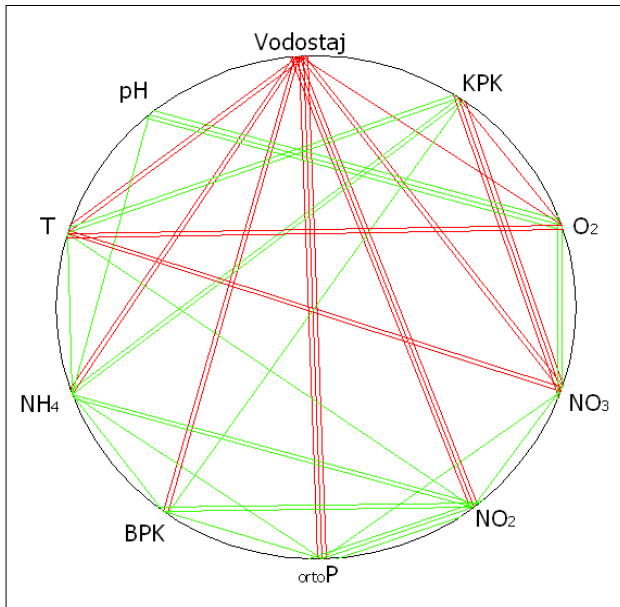
Bredimenzionalna mera povezanosti med dvema skupinama podatkov je korelacijski koeficient.

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{s_x \cdot s_y} \quad (9)$$

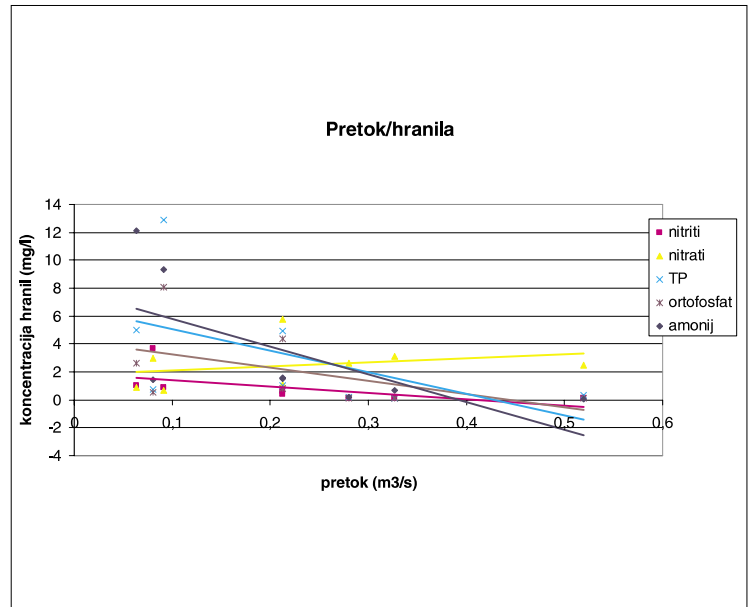
Vrednosti blizu ena pomenijo močno linearno povezavo (oziroma korelacijo) med dvema skupinama podatkov, negativna korelacija pa pomeni, da večje vrednosti ene količine pogojujejo manjše vrednosti druge. Če je vrednost okoli nič, pomeni, da linearne povezave med podatki ni. Statistična pomembnost oziroma značilnost pove, kako zanesljiva je statistična povezava, ki je izračunana po enačbi:

$$R = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (10)$$

Statistične analize kažejo povezanost med nivojem vode in obremenjenostjo s hranili (dušikom in fosforjem), slika 7. To drži predvsem za fosforjeve spojine, katerih koncentracije so pri višjem vodostaju nižje. Nekoliko manj to drži za dušikove spojine, predvsem nitrate. Pri višjem vodostaju se kaže znižanje vrednosti BPK, medtem ko na KPK vodostaj nima izrazitega vpliva.



Slika 7 • Povezava med kakovostnimi parametri in vodostajem v jezeru (Kovač, 2005) (Linearna povezava med posameznimi parametri, kjer pomeni rdeča črta negativno povezavo, zelena pozitivno, več črt pa močnejšo povezavo.)



Slika 10 • Odvisnost med pretokom Cerknjšice in koncentracijo hranil v pritoku

Izračuni samočiščenja in nekaterih parametrov evτροφnosti

Totalna redukcija hranil na celotnem vodnem ekosistemu se izračuna po osnovni bilančni enačbi:

$$R = \sum Q_{dotok} * C_{dotok} - \sum Q_{iztok} * C_{iztok} \quad (11)$$

Pri čemer je:

R – količina hranil, ki se v sistemu reducirajo (kg/leto)

$Q_{dotok}$  – povprečni letni dotok

$C_{dotok}$  – povprečna koncentracija hranil na dotoku

$Q_{iztok}$  – količina vode na iztoku

$C_{iztok}$  – povprečna koncentracija hranil na iztoku

Stopnjo čiščenja lahko izračunamo po naslednji enačbi:

$$\eta = 100 - \frac{\sum Q_{vtok} * C_{vtok}}{\sum Q_{iztok} * C_{iztok}} * 100 \quad (12)$$

Tako smo dobili rezultate letne redukcije hranil, kot jih prikazuje preglednica 3.

Ob napolnitvi jezerske kotanje ostane na dnu rastlinje, ki daje veliko detritusa, ki je podlaga za razvoj rastlinskega planktona. Sončna energija seže do dna. Veter in potoki plitvo vodo dobro premešajo. Jezero se zaradi presihajoče narave in nenadnih motenj ne stara in ostaja na relativno produktivni stopnji razvoja, nekje med mladostjo in zrelostjo.

Za izračun stopnje evτροφnosti smo uporabil podatke o meritvah onesnaženja Cerknjškega jezera, značilne parametre povodja in hidrološke parametre jezera po hidroloških kriterijih (1). Pri tem so najbolj pomanjkljivi podatki o obremenitvah prispevne površine. Nepopolne so tudi meritve onesnaženja jezera. Zaradi pomanjkanja podatkov o spreminjanju dotoka med letom srednji zadrževalni čas ne kaže povsem natančnih vrednosti. Pri izračunu je podana povprečna vrednost pretoka med letom (18 m³/s).

V preglednici 4 so prikazana razmerja med koncentracijami hranilnih snovi v dotokih in iztoku. V primeru, da je razmerje N : P večje kot 7, se fosfor šteje kot limitirajoči element za rast alg. Razmerje N : P je na iztoku manjše kot na dotoku, kar pomeni, da se v sistemu jezera bolj intenzivno porablja dušik kot fosfor. Razmerje med celokupnim fosforjem in ortofosfatom ter med nitrati in celokupnim dušikom ostaja na iztoku približno enako kot na dotoku. Bistveno se zmanjša razmerje med amonijem in nitriti ter nitrati

|                     | $P_{tot}$ | ortoP | $NH_4$ | $NO_2$ | $NO_3$ | $N_{tot}$ |
|---------------------|-----------|-------|--------|--------|--------|-----------|
| Redukcija (kg/leto) | 20230     | 7951  | 107304 | -6570  | 683559 | 268631    |
| Čiščenje (%)        | 24        | 20    | 42     | -30    | 38     | 40        |

Preglednica 3 • Letna redukcija hranil v Cerknjškem jezeru, izračunana glede na koncentracije snovi v dotoku in odtoku

| Razmerja | $N_{tot}:P_{tot}$ | $P_{tot}:ortoP$ | $NH_4:NO_2$ | $NO_3:NO_2$ | $NO_3:N_{tot}$ | $NO_3:NH_4$ |
|----------|-------------------|-----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| dotok    | 7,87              | 2,06            | 11,65       | 82,16       | 2,76           | 7,05        |
| iztok    | 6,30              | 1,97            | 5,16        | 38,95       | 2,79           | 7,55        |

Preglednica 4 • Razmerja med koncentracijami snovi na dotoku in iztoku

| Stopnja trofiranosti   | 1  | 2          | 3a        | 3b                                 | 4          | 5           |
|--|--|------------|-----------|------------------------------------|------------|-------------|
|  | oligotrofne                              | mezotrofne | evtrofne  | evtrofne                           | politrofne | hipertrofne |
|  |  |            | slojevite | neslojevite                        |            |             |
| <b>1.) Hidrografija</b>  | slojevite: holomiktično ali meromiktično |            |           | nestbilno slojevite (polimiktične) |            |             |
| Srednja globina z (m)  |  |            |           | 3                                  |            |             |
| Maksimalna globina z (m)   |  |            | < 20      |                                    |            |             |
| Srednji zadrževalni čas:   |  |            |           |                                    |            |             |
| $\bar{\tau} = \frac{\text{volumen jezera}}{\text{letni dotok}}$  | 1,92                                     | 0,25       |           |                                    |            |             |
| <b>2.) Prispevno področje</b>                                    |  |            |           |                                    |            |             |
| Volumski kvocient:   |  |            |           |                                    |            |             |
| $V_q = \frac{\text{prispevna površina}}{\text{volumen voda}}$    |  | 6          | 18        | 44                                 |            |             |
| (km <sup>2</sup> *10 <sup>6</sup> m <sup>-3</sup> )              |  |            |           |                                    |            |             |
| Površinski kvocient:   |  |            |           |                                    |            |             |
| $F_q = \frac{\text{prispevna površina}}{\text{površina voda}}$   | 10                                       | 27         | 63        |                                    |            |             |
| Delež gozda % v prispevnem podr.                                 | ≥ 80                                     |            |           |                                    |            |             |
| <b>3.) Obremenitev</b>   |  |            |           |                                    |            |             |
| $B = \frac{\text{populacijski ekvivalent}}{\text{volumen voda}}$ |  | 433        | 1370      | 3318                               |            |             |
| (PE*10 <sup>6</sup> m <sup>-3</sup> )                            |  |            |           |                                    |            |             |
| Vnos N (gN/(m <sup>2</sup> *a))                                  | 0,62                                     |            |           |                                    |            |             |

Preglednica 5 • Izračuni evτροφnosti za klasifikacijo stoječih voda po hidroloških kriterijih

in nitriti. Zanimivo je, da so na iztoku večje koncentracije nitrata kot na dotoku, kar bi lahko razložili, da gre v primeru Cerkniškega jezera za samočiščenje, ki ne poteče do konca. Amonijev in nitritni dušik se oksidirata v nitratni dušik, ker je v vodi raztopljenega dovolj kisika.

Meritve tudi kažejo – predvsem za občasne nizke pritoke – relativno zelo visoke koncentracije hranil. Ob nizkem vodostaju so vode, ki se iztekajo v podzemlje, bolj onesnažene kot takrat, ko je polje poplavljen.

Najizrazitejše je to na pritoku Cerkniščica, na merilni postaji Karlovica, pred ponorno jamo. Tam so koncentracije hranil v času, ko jezero presahne (pod nadmorsko višino 548 m), nekajkrat višje od koncentracij v času, ko je jezero polno. Za 3-krat je višji BPK5, 1,7-krat so višje koncentracije skupnega dušika, 2,5-krat več je amonija, 17,2-krat več nitritov, 1,8-krat več nitratov, 5,4-krat več skupnega fosforja in 4,5-krat več ortofosfatov.

Prav tako smo vstavil podatke o Cerkniškem jezeru za klasifikacijo stoječih voda po nekaterih trofičnih kriterijih ((Panjan, 2004), (Ilič, 2008), (Drev, 2008)). V tem primeru lahko določimo le nekaj parametrov, saj ni znano razmerje volumen hipolimnija–volumen epilimnija, ker ju praktično ni oziroma ni stratificirano ... Tako smo določili le celotni fosfor, klorofil, pH, amonij in nitrate.

Iz preglednice 5 je razvidno, da se jezero uvršča od oligotrofne stopnje pa do politrofne stopnje, praktično pa ne doseže hipertrofne stopnje, razen za amonij.

Kisik doseže najnižjo vrednost avgusta, to je tudi mesec, ko je vodostaj jezera najnižji.

Od julija do septembra so praviloma dosežene najvišje koncentracije amonija, BPK5, KPK in suspendiranih snovi. To je posledica najnižjega vodostaja, najvišjih letnih temperatur in posledično najnižje koncentracije raztopljenega kisika v vodi. Kisik doseže najnižjo vrednost avgusta, to je tudi mesec, ko je vodostaj

jezera najnižji. V jezeru se kaže tudi trend upadanja koncentracij amonija in povišanje visokih koncentracij ortofosfata, medtem ko druge snovi v obdobju 1993–2003 ne kažejo določenega trenda.

Dušikove snovi se večinoma odstranijo s pomočjo mikroorganizmov in gredo v atmosfero, preostali del pa se vgradi v rastline in se kot organski dušik usede na dno. Fosfor, ki se usede na dno v partikulirani obliki, se povečini odstrani iz vodnega telesa z obarjanjem z magnezijevimi, železovimi in kalcijevimi ioni. Drugi del se vgradi v rastline.

Glede na letno količino odstranjenih hranil, ki smo jih izračunali, smo ocenili delež samočiščenja Cerkniškega jezera (Drev, 2008). Največji delež, približno 57 %, predstavlja usedanje suspendiranih snovi. Naslednji večji delež, ca. 33 % za fosfor in ca. 18 % za dušik, se odstrani skozi rastline. Nato predstavlja okoli 17 % denitrifikacija. Skozi alge pa se izloči ca. 10 % fosforja in ca. 7 % dušika.

| Stopnja trofiranosti                                    | 1           | 2          | 3a        | 3b          | 4          | 5           |
|---|-------------|------------|-----------|-------------|------------|-------------|
|   | oligotrofne | mezotrofne | evtrofne  | evtrofne    | politrofne | hipertrofne |
|   |             |            | slojevite | neslojevite |            |             |
| Celotni fosfat – P (mg/l) <sup>4</sup>                  | 0,008       | 0,037      | 0,07      |             |            |             |
| Klorofil-a <sup>665</sup> (mg/m <sup>3</sup> )          | 1,5         |            |           |             |            |             |
| pH-vrednost v epilimniju                                |             | 7,7 - 8,2  |           |             |            |             |
| Amonij v epilimniju NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l) |             |            | 0,4       | 0,01        | 0,4        |             |
| Nitrat NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> :                   |             |            |           |             |            |             |
| – maks. konc. (mg/l)                                    | 6,9         |            |           |             |            |             |
| – povpr. letna konc. (mg/l)                             | 2,04        |            |           |             |            |             |

Preglednica 6 • Izračuni evτροφnosti s pomočjo preglednice za klasifikacijo stoječih voda po trofičnih kriterijih

#### 4 • SKLEP

Primer Cerkniškega jezera je zelo zahteven za raziskave, predvsem zaradi kraškega značaja dna jezera, ki onemogoča natančno določanje prispevne površine, dotoka in odtoka. Vsakršno računanje je zahtevno, saj je Cerkniško jezero vsak dan drugo jezero, z drugačnim volumnom, površino in globino. Samočistilne sposobnosti sistema Cerkniškega jezera se spreminjajo glede na velikost jezera. V času, ko je jezero presušeno, odteka voda iz najbolj obremenjenega vodotoka – Cerkniščice, neposredno v kraško podtalje brez čiščenja v jezerskem

sistemu, koncentracije hranil pa so nekajkrat večje kot v času, ko je jezero polno. V času, ko je jezero polno, se voda »razredči« in zmeša s preostalo, manj obremenjeno vodo.

Glede na izračune skozi Cerkniško jezero letno potuje 300 do 600 ton dušika in 40 do 80 ton fosforja (Drev, 2009). Od tega se od 20 do 45 % hranil zadrži v jezeru, odvisno predvsem od višine vodostaja in letnega časa. Najbolj se odstrani oziroma transformira amonij, ki se v povprečju odstrani za okoli 40 %. Amonij se preobrazi v nitrate, ki kažejo – v primerjavi z

dotoki v jezeru – 30-odstotno povečanje. To je posledica kratkega časa zadrževanja v jezeru, zaradi česar denitrifikacija ne poteče v celoti. Ekosistem slabše odstranjuje fosforjeve snovi kot dušikove. Tla se namreč zasitijo z ortofosfatnimi ioni. To je verjetno predvsem zaradi možnosti denitrifikacije in hlapnosti amonijaka, medtem ko se lahko fosforjeve snovi trajno odstranjujejo edino skozi požeto rastlinje. Ocenili smo deleže samočiščenja Cerkniškega jezera. Največji delež, približno 57 %, predstavlja usedanje suspendiranih snovi. Naslednji večji delež, ca. 33 % za fosfor in ca. 18 % za dušik, se odstrani skozi rastline in okoli 17 % z denitrifikacijo. Skozi alge pa se izloči (usede) ca. 10 % fosforja in ca. 7 % dušika.

#### 5 • LITERATURA

- Drev, D., Slane, M., Panjan, J., Die Untersuchung über die ländlichen Badegewässer und entsprechenden Massnahmen zu deren verbesserung in Sloweinien, Wasserwirtschaft 98, 12/2008, str. 36-40, 2008.
- Drev, D., Kovač, M., Panjan, J., Ocena masnih obremenitev Cerkniškega jezera s hranili, Gradbeni vestnik, letnik 58, št. 5, str. 114–122, 2009.
- Gaberščik, A., Jezero, ki izginja, Monografija o Cerkniškem jezeru, Društvo ekologov Slovenije, Ljubljana, 333 strani, 2002.
- Ilič, D., Panjan, J., Ocena vpliva fosforja iz kmetijstva na evτροφikacijo površinskih voda v Krajinskem parku Goričko, Gradbeni vestnik, letnik 57, str. 310–316, 2008.
- Kovač, M., Preliminarna ocena samočistilne sposobnosti odstranjevanja dušika in fosforja v cerkniskem jezeru, UL FGG, diplomsko delo, 71 strani, 2005.
- Mander, U., Jenssen, P., Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Cold Climates, WIT Press, 2003.
- Merrington, G., Winder, L., Parkinson, R., Redman, M., Agricultural pollution, Environmental problems and practical solutions, Spon press, 2002.
- Moss, B., Ecology of fresh waters, Blackwell Science, 1998.
- Panjan, J., Osnove zaščite voda, UL FGG, 102 strani, 2004.
- Valsami-Jones, E., Phosphorus in Environmental Technologies, IWA Publishing, Cornwall, UK, 656 strani, 2004.
- ARSO, Program monitoringa kakovosti jezer za leto 2003, 2003.

# IZBOLJŠAVE POTRESNEGA ODZIVA OBSTOJEČIH MOSTOV

## IMPROVEMENTS OF THE SEISMIC RESPONSE OF EXISTING BRIDGES

izr. prof. dr. Tatjana Isaković, univ. dipl. inž. grad.

prof. dr. Matej Fischinger, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR)

tisak@ikpir.fgg.uni-lj.si, matej.fischinger@ikpir.fgg.uni-lj.si

Znanstveni članek

UDK: 624.042.7

**Povzetek** | Prikazali smo eksperimentalne ciklične preiskave odziva AB-mostnih stebrov, ki vsebujejo pomanjkljive konstrukcijske detajle in možnosti za izboljšanje njihovega potresnega odziva. Najprej je analiziran tipičen škatlast steber, za katerega je poleg drugih pomanjkljivih detajlov značilna premajhna strižna nosilnost. Upogibni odziv stebra je bil boljši, kot je bilo pričakovano, predvsem zaradi ugodne škatlaste oblike prečnega prereza in nizke tlačne sile. Steber se je porušil v strigu, zato je bila na dva načina povečana njegova strižna nosilnost. Steber je bil utrjen z betonskim in CFRP-plaščem. Na oba načina je bila pri minimalni utrditvi uspešno povečana njegova strižna nosilnost. Betonski plašč je bil učinkovitejši pri izboljšanju duktilnosti stebra. Boljšo duktilnost stebra bi lahko zagotovili tudi s CFRP-objetjem, vendar bi bilo treba steber utrditi z večjo količino CFRP-trakov (uporabljena je bila minimalna količina CFRP-trakov). Preizkušen je bil tudi tipičen mostni steber s prerezom I-oblike, ki vsebuje zadostno količino strižne armature, vendar ta armatura ne izpolnjuje vseh zahtev standarda EC8/2 glede objekta betonskega jedra in preprečitve uklona upogibne armature. Ugotovili smo, da se lahko v takšnih stebrih zgodi krhka porušitev, ker neustrezno konstruirana in prešibka stremena ne morejo preprečiti uklona vzdolžnih armaturnih palic. Posledično je duktilnost takšnih stebrov premajhna, še zlasti glede na predpostavke, ki so bile uporabljene pri njihovem projektiranju. Preučili smo tudi možnosti za njihovo utrditev, in sicer z uporabo CFRP-plaščev. Poseben problem je predstavljalo sidranje plašča v steber. Ugotovili smo, da sidra iz ogljikovih vlaken niso učinkovita in da bolj obeta sidranje plašča s pomočjo jeklenih ploščic, pritrjenih na steber z jeklenimi vijaki.

**Summary** | Cyclic experiments of as-built and strengthened RC bridge columns with substandard construction details are presented in the paper. In the first part of the paper, the cyclic response of hollow box column with several substandard details is analysed. Its main deficiency was insufficient shear strength. The flexural response of as-built column was better than it was expected, due to the favourable box shape and low compression forces. The column was strengthened using concrete and CFRP wrapping. Both strengthening techniques successfully increased the shear strength of column with minimum amount of wrapping. The concrete strengthening was more efficient in improving the column ductility capacity. To improve the ductility capacity of the investigated type of column using CFRP wrapping, larger amount of CFRP strips was needed (note that the minimum amount of CFRP strips was used). In the second part of the paper, the investigations of the cyclic response of columns with I shape cross-section are presented. These columns include sufficient amount of the shear reinforcement, but the lateral reinforcement does not fulfil all the requirements of the EC8/2 standard, which are related to the confinement of concrete core and prevention of buckling of the longitudinal bars. The failure of as-built

column was brittle because of the insufficient amount of lateral reinforcement, which was not properly shaped and anchored to the concrete core, could not prevent buckling of the longitudinal bars. Considering the assumptions that were used in its design, the ductility capacity of the investigated column was found to be insufficient. The column was strengthened using CFRP wrapping. The main problem in the design of the strengthening solution was the construction of anchors, which were used to fix CFRP sheets to concrete. Anchoring using carbon fibres was not efficient. The more promising was anchoring using steel plates and steel bolts.

## 1 • UVOD

Sodobni principi potresnega inženirstva so doobra spremenili nekdanjo prakso projektiranja mostov na potresnih območjih. Še zlasti se je spremenilo projektiranje stebrov, ki kot ključni konstrukcijski elementi odločilno vplivajo na potresno varnost celotnega mostu. Največje spremembe lahko opazimo pri količini in načinu konstruiranja prečne armature.

V starejših mostovih so stebri vsebovali mnogo manj prečne armature, kot to zahtevajo sodobni predpisi in standardi, med njimi tudi standard Evrokod 8 – 2. del (EC8/2) (SIST EN 1998-2, 2006), ki je v Sloveniji v obvezni uporabi od leta 2008. Vzrokov za povečanje prečne armature v stebrih je več.

Standard EC8/2 zahteva, da se zagotovijo naslednje tri poglobilne funkcije prečne armature: 1) prečna armatura mora zagotoviti zadostno strižno nosilnost stebra, 2) mora je biti dovolj, da prepreči uklon vzdolžnih armaturnih palic (upogibne armature), in 3) mora zagotoviti zadostno objetje betonskega jedra. Tako preprečimo tri načine porušitve (glej sliko 1), ki so vsi neduktilni, torej krhki in trenutni,

poškodbe pa težko popravljive oziroma pogosto tudi nepopravljive.

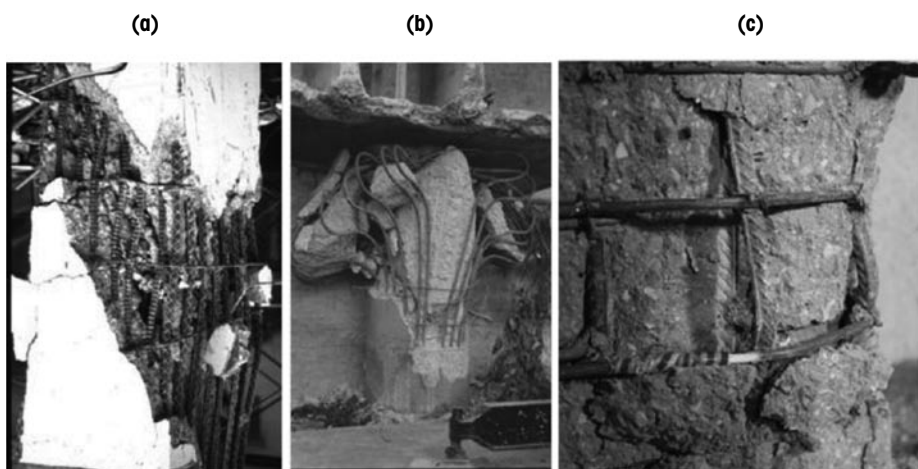
1) Po EC8/2 prvo funkcijo zagotovimo eksplicitno z metodo načrtovanja nosilnosti. Standard namreč predpisuje, da se količina potrebne strižne armature določi na osnovi največjih možnih prečnih sil, ki se lahko pojavijo v stebri, te pa določimo na osnovi dejanske upogibne nosilnosti stebrov. Zato je količina potrebne strižne armature običajno precej večja od tiste, ki bi bila določena zgolj na osnovi računskih prečnih sil. Glede na to, da so v preteklosti ravno računске prečne sile običajno določale potrebno količino strižne armature, je lahko strižna nosilnost, še zlasti kratkih stebrov, pomanjkljiva. Ker so takšni stebri običajno imeli še nekaj pomanjkljivih detajlov, smo jih eksperimentalno preizkusili, da ugotovimo, kakšen je njihov potresni odziv. Preizkusili smo značilen steber (glej 3. poglavje), ki je imel votel škatlast prerez. Rezultati preiskave so prikazani v 3. poglavju. Na osnovi ugotovljenega potresnega odziva smo preučili možne tehnike za njegovo izboljšanje

ter posamezne tudi eksperimentalno preizkusili in primerjali med sabo. Preučili smo možnost strižne utrditve s pomočjo betonskega in CFRP-plašča (angl. Carbon Fiber Reinforced Polymer). Rezultati preiskav so prikazani v 3. poglavju.

2) in 3) Preostali dve funkciji prečne armature (zagotovitev zadostnega objetja betonskega jedra in preprečitev uklona vzdolžnih armaturnih palic) zagotovimo implicitno tako, da upoštevamo konstrukcijska pravila, ki jih predpisuje EC8/2. Slednja so lahko v posameznih primerih precej ostra, zlasti če jih primerjamo s prakso v preteklosti. Občutno se je povečala minimalna predpisana količina stremen in zmanjšale dovoljene maksimalne razdalje med stremenami po višini stebra kot tudi v horizontalni ravnini prečnega prereza (glej 2. poglavje).

Z izjemo najstarejših naj bi bila večina mostov, ki so bili zgrajeni v okviru avtocestnega križa v Sloveniji, projektirana, upoštevajoč vse tri funkcije prečne armature, čeprav takrat EC8/2 ni bil uradni veljavni standard. V skladu s priporočili DARS-a in IKPIR-a so bili mostovi takrat projektirani, upoštevajoč določila predstandarda prEC8/2 (pr ENV 1998-2, 1994) iz leta 1994, kjer so vse te funkcije bile zajete. Vendar najdemo tudi konstrukcije, ko ta določila niso bila upoštevana, in sicer v primerih, kjer so bila določila EC8/2 (prEC8/2) precej ostra, še posebno tista glede zagotavljanja zadostnega objetja betonskega jedra in preprečevanja uklona vzdolžnih armaturnih palic.

Da bi ugotovili, ali so tako stroge zahteve povsem upravičene tudi na območjih srednje seizmičnosti, ki je značilna za Slovenijo, smo eksperimentalno preizkusili značilen mostni steber I-prečnega prereza. Upoštevali smo nekaj značilnih odstopanj od zahtev standarda (glej 2. in 4. poglavje), ki se predvsem nanašajo na drugi dve funkciji prečne armature (zagotavljanje objetja betonskega jedra in preprečitev uklona vzdolžnih armaturnih palic). Rezultati teh preiskav so prikazani v 4. poglavju.



Slika 1 • Možni načini krhke porušitve mostnih stebrov: a) nezadostna strižna nosilnost, b) nezadostno objetje betonskega jedra, c) uklon vzdolžnih armaturnih palic

Tako kot pri škatlastih stebrih smo tudi tukaj preučili možne načine za njihovo potresno utrditev. Še zlasti nas je zanimala primerčnost uporabe CFRP-plaščev. Poseben izziv

je predstavljalo sidranje tkanine na obstoječi prerez. Več detajlov o preučeni rešitvi je prikazanih v 4. poglavju.

Vsi eksperimenti, ki so prikazani v članku, so bili narejeni v sodelovanju z Zavodom za gradbeništvo Slovenije.

## 2 • PREGLED ZAHTEV STANDARDA EC8/2 IN PRIMERJAVA S PRAKSO

Potrebno strižno armaturo stebrov določimo z upoštevanjem metode načrtovanja nosilnosti. To pomeni, da na osnovi upogibne nosilnosti stebrov najprej določimo največje možne strižne sile v stebrih. Postopek je opisan v priročniku za projektante iz leta 1994 (Fajfar, 1994) oziroma v navodilih za projektiranje v skladu z EC8/2 iz leta 2010 (Isaković, 2010), zato ga tukaj ne bomo posebej razlagali. Še enkrat poudarimo le to, da so največje možne strižne sile pogosto precej večje od računskih, ki jih določimo z analizo konstrukcije in ki so bile v preteklosti upoštevane pri računu potrebne strižne nosilnosti.

Največje možne strižne sile morajo biti manjše od strižne nosilnosti stebra. Pri projektiranju novih mostov se strižna nosilnost določi v skladu s standardom Evrokod 2 (EC 2) (SIST EN 1992-1-1, 2005), ki zahteva, da se strižna nosilnost betona zanemari v vseh primerih, če je ta manjša od največje možne strižne sile. V takšnih primerih se celotna strižna sila prevzame s strižno armaturo. Standard EC8/2 predpisuje še dodatne pogoje, kjer se vrednost strižne nosilnosti, ocenjene po EC2, še dodatno zmanjša, in sicer za okoli 25 odstotkov.

Na osnovi rezultatov eksperimenta, prikazanega v 3. poglavju, smo s posebno študijo, ki je že bila predstavljena v Gradbenem vestniku (Isaković, 2006), ugotovili, da so lahko takšne zahteve standardov EC2 in EC8/2 precej konservativne. Zato smo v obravnavanih primerih za oceno strižne nosilnosti uporabili drugačna postopka – tista, ki sta predlagana v Evrokodu 8/3 (SIST EN 1998-3, 2005) oziroma UCSD-postopek (Priestley, 1997).

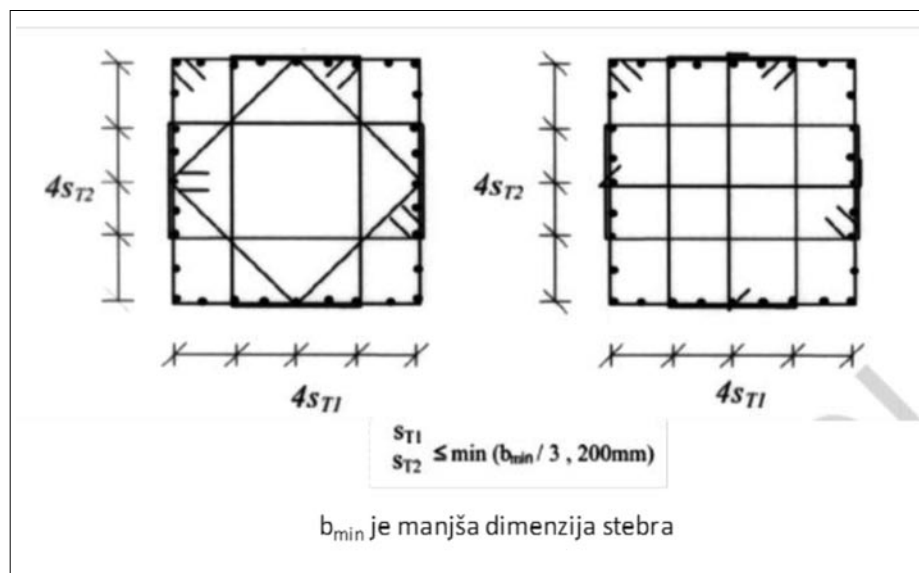
Za zagotovitev potrebnega objeta betonskega jedra in preprečitev uklona vzdolžnih armaturnih palic EC8/2 predpisuje minimalno potrebno količino prečne armature ter maksimalne razdalje med stremenami vzdolž stebra in v ravnini prereza stebrov. Vsi ti pogoji veljajo v primerih, ko tlačna sila v stebrih preseže 8 % karakteristične vrednosti največje možne tlačne sile v prerezu ( $A_c \cdot f_{ck}$ , kjer je  $A_c$  ploščina prereza in  $f_{ck}$  karakteristična tlačna trdnost betona). V naših mostovih je tipična vrednost

te sile v mejah 8 % do 11 % največje možne tlačne sile.

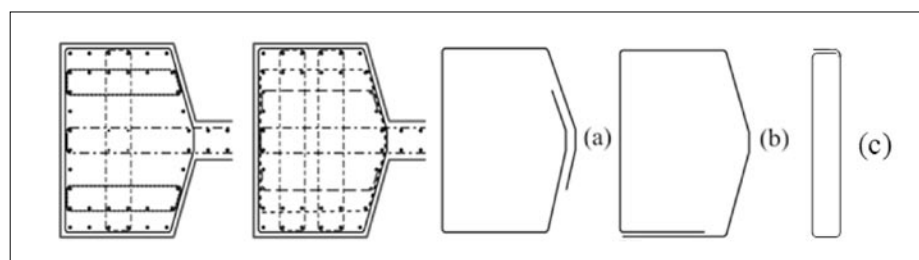
Predpisani minimalni volumski delež stremen v pravokotnih stebrih duktilnih mostov znaša  $\omega_{w,min} = 0,12$  za vsako smer prereza posebej. To pomeni, da v primeru jekla S500 in betona C30/37 znaša minimalni delež stremen  $\rho_w = 0,552$  %. Za primerjavo navedimo podatke, da je ta delež v stebrih I-prerezov, in sicer v vzdolžni smeri obstoječih mostov, v mejah 0,21 % do 0,40 %.

Maksimalna razdalja med stremenami je enaka manjši izmed naslednjih dveh vrednosti: šest premerov vzdolžnih armaturnih palic oziroma 1/5 manjše dimenzije betonskega prereza. V primeru vzdolžnih palic  $\phi 28$  in I-stebrov z

manjšo dimenzijo pasnice 120 cm to pomeni, da je lahko prečna armatura vzdolž kritičnega območja stebra (dolžina plastičnega členka) razmaknjena največ 16 cm. Ta razdalja se lahko še dodatno zmanjša na osnovi pogoja, da mora prečna armatura preprečiti tudi uklon vzdolžnih armaturnih palic. Če so stremenami iz jekla tipa C in je razmerje med mejo tečenja in natezno trdnostjo tega jekla 1,35, znaša največja dovoljena razdalja 5,6 premera vzdolžne armature, kar pri vzdolžnih palicah  $\phi 28$  pomeni 15 cm. Pri jeklih slabše kakovosti je ta razdalja še manjša. V velikem številu obstoječih mostov je razdalja med stremenami v področju plastičnih členkov stebrov 20 cm. Standard predpisuje tudi maksimalno razdaljo med stremenami v horizontalni ravnini prereza, določa pa tudi dovoljene oblike stremen, ki so prikazane na sliki 2. S slike 2 je razvidno, da so lahko vzdolžne armaturne palice, ki



Slika 2 • Oblikovanje stremen v skladu z EC8/2



Slika 3 • Tipična stremenami v stebrih s prečnim prerezo I-oblike

so podprte s stremeni, med sabo oddaljene največ 20 cm ali toliko, kolikor znaša tretjina manjše dimenzije prereza (manjša izmed teh dveh razdalj). Vsa stremena morajo biti ustrezno sidrana v betonsko jedro s kljukami pod kotom 135°. Izjema so le posamezna enojna stremena, ki lahko imajo na eni strani kljuko pod kotom 90°. Kot bo prikazano v 4. poglavju, se je kljukam pod kotom 90° povsod

treba izogibati, tudi v takšnih izjemnih primerih, ne glede na to, da so formalno dovoljene. Na sliki 3 so prikazani detajli prečne armature, ki so značilni za nekatere izmed obstoječih mostov. Stremena so običajno večstrižna. Zunanje streme je izvedeno kot zaprto streme. Najpogosteje je preklapljeno ob stiku pasnice in stojine (detajl a), vendar so tudi takšni primeri, kjer je preklap

izveden na krajši stranici pasnice (detajl b). Predvsem detajl (b) je precej vprašljiv, zato smo ga upoštevali v študijah, prikazanih v 4. poglavju. Notranja stremena so različnih oblik. V študijah smo upoštevali detajl (c), prikazan na sliki 3. Maksimalna razdalja med palicami vzdolžne armature, ki so podrte s stremeni, ponekod močno presega mejo 20 cm, celo tudi dvakrat.

### 3 • KRATKI ŠKATLASTI STEBRI S PREMAJHNO STRIŽNO NOSILNOSTJO

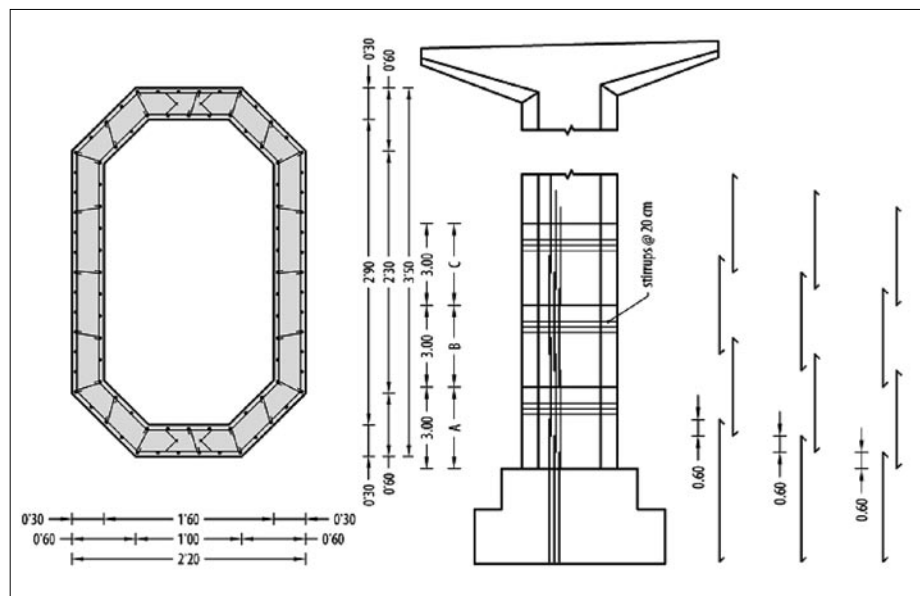
#### 3.1 Opis osnovnih značilnosti in konstrukcijskih detajlov prečne armature stebra

Analizirali smo tipičen kratek votel škatlasti stebel z armaturnimi detajli, prikazanimi na sliki 4. Povzemimo le osnovne značilnosti, ki se nanašajo na pomanjkljive konstrukcijske detajle:

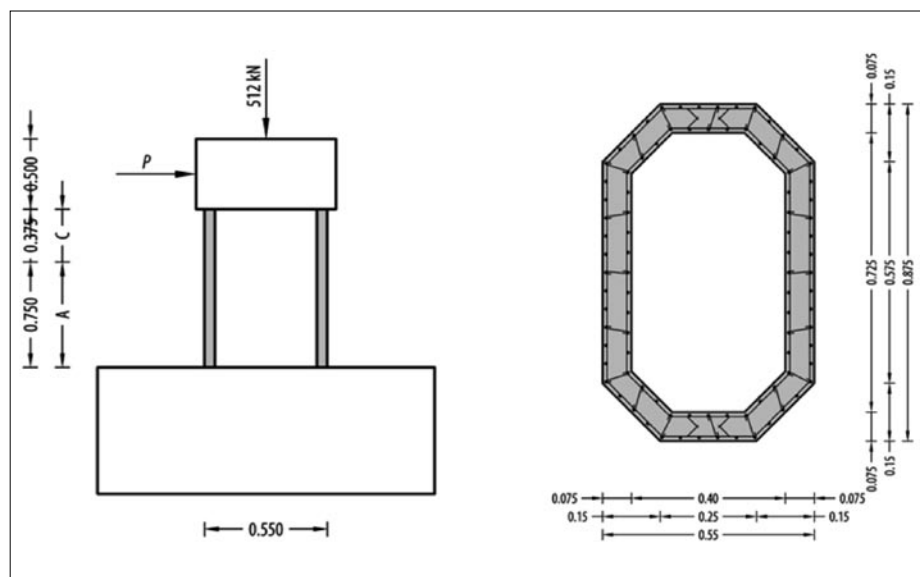
- 1) Količina strižne armature je razmeroma majhna in ne zagotavlja zadostne strižne nosilnosti, ki je potrebna glede na potresne obremenitve. Količina strižne armature se zmanjšuje od dna proti vrhu stebra.
- 2) Prečna armatura je izvedena na notranji strani stebrov, kar pomeni, da ni preprečen uklon vzdolžne armature, objekte betonskega jedra pa je zelo pomanjkljivo. Pri velikih tlačnih obremenitvah se lahko zaradi tega stebel poruši krhko zaradi razpadanja betonskega jedra.
- 3) Preklopi vzdolžnih armaturnih palic so izvedeni v področju največjih obremenitev stebra, kar lahko zmanjša upogibno nosilnost kot tudi sposobnost sipanja potresne energije.
- 4) Vzdolžna in prečna armatura sta iz gladkega jekla, za katero je značilna slabša sprejemnost med betonom in armaturo, kar lahko zmanjša nosilnost kot tudi duktilnost stebra.

#### 3.2 Kratek opis eksperimentalnih cikličnih preiskav stebra

Ciklični odziv škatlastega stebra s pomanjkljivimi detajli (glej sliko 4) smo v sodelovanju z ZAG-om (Bevc, 2006) eksperimentalno preizkusili na modelu v merilu 1 : 4 (glej sliko 5). Ploščina prereza stebra je znašala 0,169 m<sup>2</sup>, vztrajnostni moment pa 0,0136 m<sup>4</sup>. S posebnimi preiskavami je bilo ugotovljeno, da je znašala povprečna tlačna trdnost betona 41,6 MPa. Stebel je bil armiran z upogibno armaturo iz jekla, ki je imelo mejo tečenja 324 MPa. Odstotek upogibne armature na



Slika 4 • Osnovne značilnosti obravnavega škatlastega stebra



Slika 5 • Osnovni podatki o modelnem stebri



mestu vpetja v temelj je znašal 1,5. Upogibna armatura se je postopoma zmanjševala proti vrhu stebra. Steber je bil armiran s prečno armaturo premera  $\phi 4$  mm. Palice prečne armature so bile postavljene na medsebojni razdalji 5 cm. Premer prečne armature se je proti vrhu stebra zmanjšal na  $\phi 2,5$  mm. Jeklo, iz katerega je bila narejena prečna armatura, je imelo mejo tečenja 240 MPa. Prečna armatura je bila postavljena na notranji strani vzdolžne armature. Glede na tako neobičajno konstruirano armaturo pred eksperimentom ni bilo mogoče z gotovostjo analitično napovedati upogibne in strižne nosilnosti stebra.

Oсна sila v stebri je bila razmeroma nizka (512 kN). Tlačna napetost je bila približno 7 % povprečne tlačne trdnosti betona. Drugi podatki o stebri so prikazani na sliki 5.

### 3.3 Ciklični odziv obstoječih stebrov

Modelni steber, opisan v predhodnem poglavju, smo preizkusili ciklično v 15 fazah. Vsaka faza je imela tri polne cikle. V vsakem ciklu smo steber obremenjevali do določenega pomika/sile.

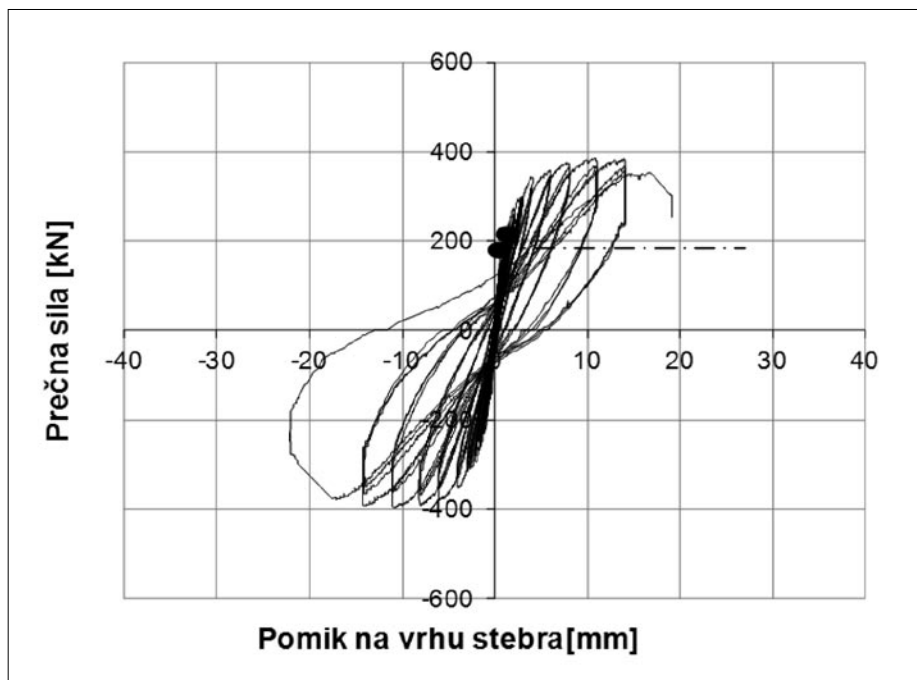
Zveza med pomikom na vrhu stebra in prečno silo v stebri, ki je registrirana med eksperimentom, je prikazana na sliki 6.

Pri sili 150 kN smo opazili prve tanke razpoke, ki so se pojavljale postopoma, najprej na mestu vpetja v temelj, potem pa tudi višje, proti vrhu stebra. Prve palice upogibne armature so stekle, ko smo na vrhu stebra dosegli pomik 2,1 mm (povprečno rotacijo stebra, ki je znašala 0,13 % višine stebra). Pri tem je bila dosežena sila 291 kN v eni smeri obremenjevanja in 269 kN v drugi. Razpoke so se pojavile na višini 55 cm od vpetja. Pri pomiku 2,5 mm (pri povprečni rotaciji, enaki 0,16 % višine stebra) na vrhu stebra so nastale upogibno-strižne razpoke pod kotom približno 45° glede na os stebra.

Sila v stebri je naraščala, dokler ni bil dosežen pomik 11 mm (povprečna rotacija enaka 0,7 % višine stebra). Maksimalna izmerjena prečna sila je pri tem znašala 394 kN. Strižne razpoke so se že močno razširile, pojavljati pa so se začele tudi navpične razpoke. Začel je odpadati krovni sloj betona.

Pri pomiku 17,6 mm (pri povprečni rotaciji stebra, enaki 1,12 % višine stebra) je nosilnost hipno padla in je bila dosežena porušitev stebra v strigu. Pri tem so se strižne razpoke močno razširile (glej sliko 7). Krovna plast betona je odpadla tudi na notranji strani prereza. Uklonile so se vzdolžne armaturene palice.

Upogibni odziv stebra navkljub številnim pomanjkljivim detajlom ni bil zelo slab. Ste-



Slika 6 • Zveza med pomikom na vrhu stebra in prečno silo v stebri



Slika 7 • Steber po zaključenem testu

ber se je sicer porušil v strigu, vendar se je pred tem zgodilo tečenje upogibne armature, kar pomeni, da je razpolagal z določeno duktilnostjo. Če upoštevamo, da je večji del upogibne armature stekel pri pomiku 5 mm, lahko rečemo, da je razpoložljiva duktilnost za pomike znašala  $\mu_p = 17,6 / 5 = 3,5$ . Pri tem je še posebno treba poudariti, da je takšna duktilnost bila dosežena predvsem zaradi

zelo ugodne oblike prečnega prereza stebra in majhne tlačne sile v stebri. Škatlasti prerezi namreč razpolagajo s široko tlačno cono, kar v primerjavi s prerezi drugih, manj ugodnih oblik (glej 4. poglavje) pomeni, da so tlačne napetosti manjše. Zato se v takšnih stebrih zmanjša nevarnost razpada betonskega jedra oziroma stebra zaradi ugodne oblike prečnega prereza že sam po sebi brez posebne prečne armature razpolaga z določeno duktilnostjo. Standard EC8/2 v takšnih primerih ne zahteva posebne armature za objetje, vendar v vsakem primeru zahteva, da so stremena postavljena na zunanji strani vzdolžnih armaturnih palic. Poudarimo še to, da v primeru manj ugodnih oblik prečnih prerezov, kot je npr. I-prerez, lahko pričakujemo precej manjšo razpoložljivo duktilnost (glej 4. poglavje).

Duktilnost je seveda odvisna tudi od osnih sil v stebri. Nizka osna sila prav tako ugodno vpliva na razpoložljivo duktilnost stebra, saj steber ne obremenjuje z velikimi tlačnimi napetostmi. Zato tudi standard EC8/2 v primeru nizkih osnih sil ne zahteva posebne armature za objetje betonskega prereza.

### 3.4 Opis utrditve stebra

Steber, opisan v predhodnem poglavju, smo utrdili tako, da je njegova strižna nosilnost zadoščala zahtevam potresne obtežbe na lokacijah, kjer so mostovi s podobnimi stebri. Ker zahteve niso drastično presegle razpoložljive strižne nosilnosti, je bila potrebna

razmeroma šibka utrditev. Analizirali smo dva načina utrditve: a) z betonskim plaščem in b) CFRP-plaščem.

Načrtovanje potresne utrditve je bila precej zahtevna naloga, saj je bilo na preprost način mogoče izvesti utrditev le na znanji strani stebra. Posebni ukrepi na notranji strani stebra bi bili zelo zahtevni. Zato je bilo treba določiti ravno pravnjo količino objetta stebra, saj bi prevelika količina objetta na zunanji strani lahko škodila odzivu stebra na notranji strani. Z objettjem prereza se namreč poveča največja možna tlačna deformacija v betonu, kar lahko ima za posledico povečanje globine tlačne cone v prerezu oziroma večje tlačne deformacije na notranji neutrjeni strani stebra. To lahko povzroči odpadanje krovne plasti

betona na notranji strani stebra in nato uklon palic vzdolžne armature. Zato je bilo treba zagotoviti takšno objetto, ki zagotavlja potrebno strižno nosilnost, ki ni premočna, in seveda takšno, ki jo je mogoče izvesti.

Strižno nosilnost obstoječih stebrov smo ocenili tako, kot je opisano v (Isaković, 2006). Razliko med obstoječo in potrebno strižno nosilnostjo stebra smo zagotovili tako, kot je prikazano na slikah 8 in 9 (na sliki 8 je prikazano betonsko objetto, na sliki 9 pa objetto s CFRP-trakovi). Prikazana sta modelna stebra v merilu 1 : 4.

Betonski plašč je bil debeline 2 cm (kar ustreza 8 cm v prototipu) in je bil armiran z upogibno armaturo iz palic  $\phi 3,4$  mm ( $\phi 14$  v prototipu), postavljenih na razdalji 2,5 cm

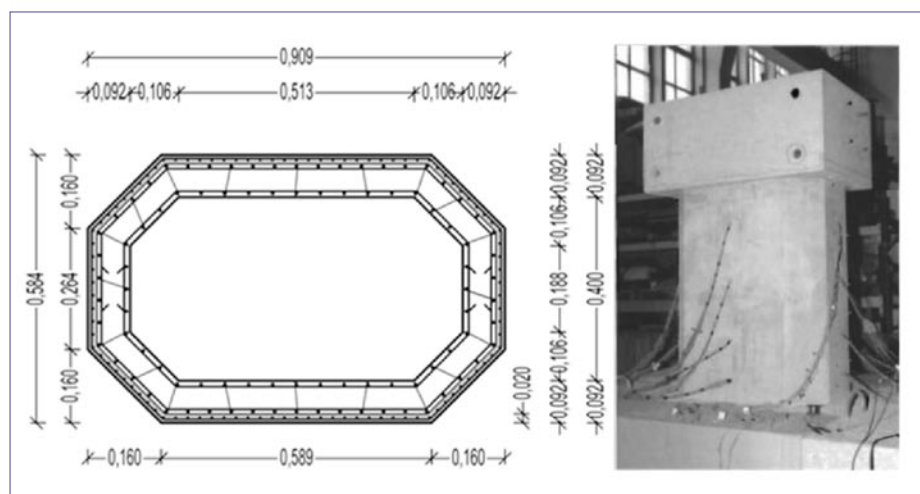
(10 cm v prototipu). Prečna armatura je bila prav tako izvedena s palicami  $\phi 3,4$  mm ( $\phi 14$  v prototipu) na razdalji 2,5 cm (10 cm v prototipu). Izmerjena cilindrična tlačna trdnost betona je znašala 60 MPa, jeklo je bilo kakovosti S240.

Utrditev s CFRP-plaščem je bila opravljena v obliki trakov, zato da smo lahko ob enem analizirali tudi maksimalno razdaljo med trakovi, ki še zagotavlja zadostno strižno nosilnost. Trakovi so bili široki 7,5 cm (kar ustreza 30 cm v prototipu) in postavljeni na medosni razdalji 10 cm (40 cm v prototipu). Vsak izmed trakov je vseboval le eno plast tkanine, ki je bila preklopljena na dolžini 20 cm. Ogljikova vlakna so bila postavljena le v vodoravni smeri, saj nismo želeli povečevati upogibne nosilnosti stebra. Povečanje upogibne nosilnosti stebra bi namreč pomenilo povečanje potresnih zahtev v obstoječih temeljih, za katere utrditev ni bila načrtovana.

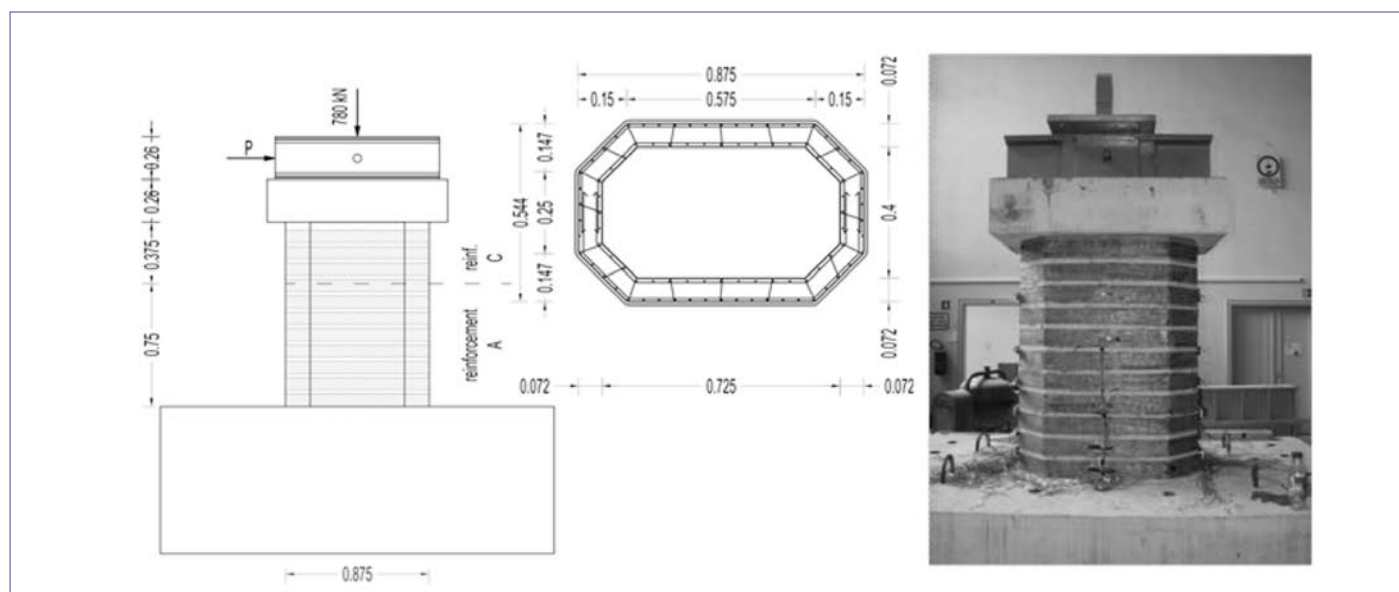
### 3.5 Ciklični preizkus in ciklični odziv utrjenih stebrov

Oba utrjena stebra smo preizkusili ciklično po podobni proceduri, kot smo preizkusili neutrjeni stebel (glej poglavje 3.3). Globalni odziv (zveza med silo v steboru in pomikom na vrhu stebra) obeh utrjenih stebrov je prikazan na sliki 10, poškodbe preizkušancev po končanih testih pa na sliki 11.

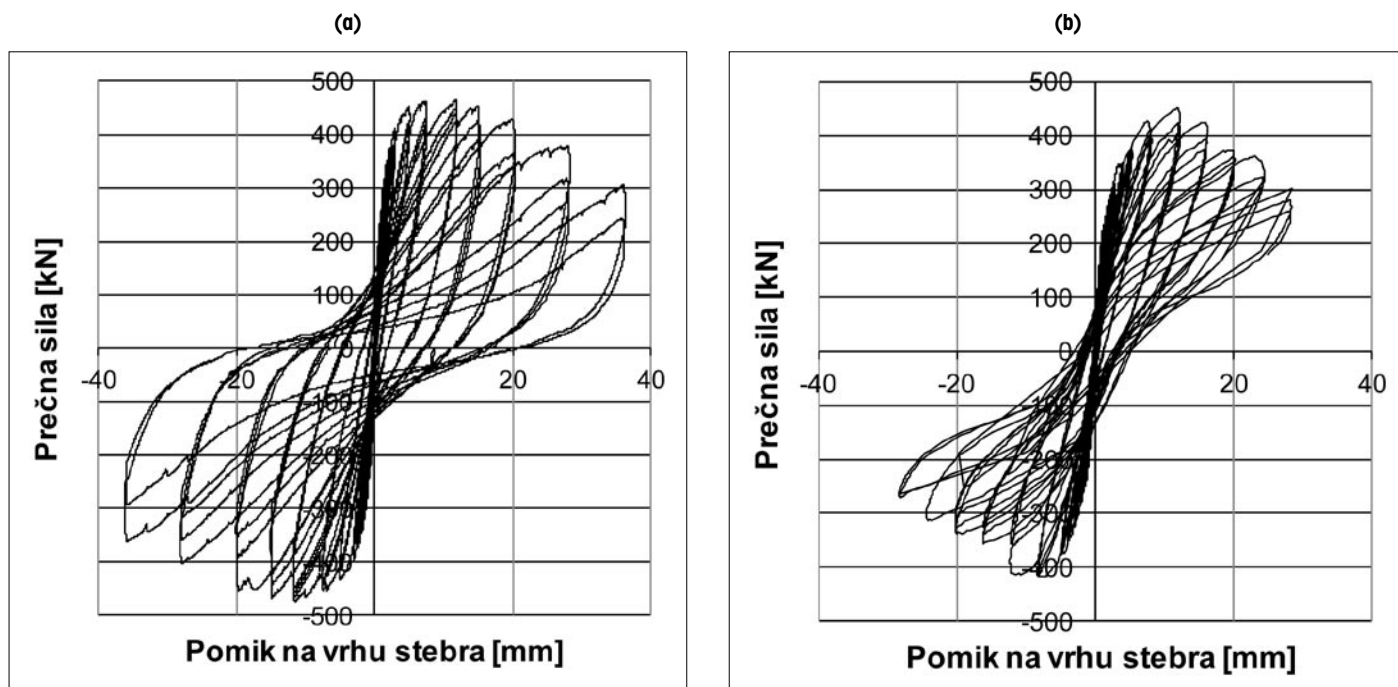
Generalno gledano, sta se oba stebra obnašala podobno. Oba načina utrditve sta zagotovila zadostno strižno nosilnost, saj je v obeh stebrih bila preprečena strižna porušitev. Tudi ciklično obnašanje in tip porušitev sta bila



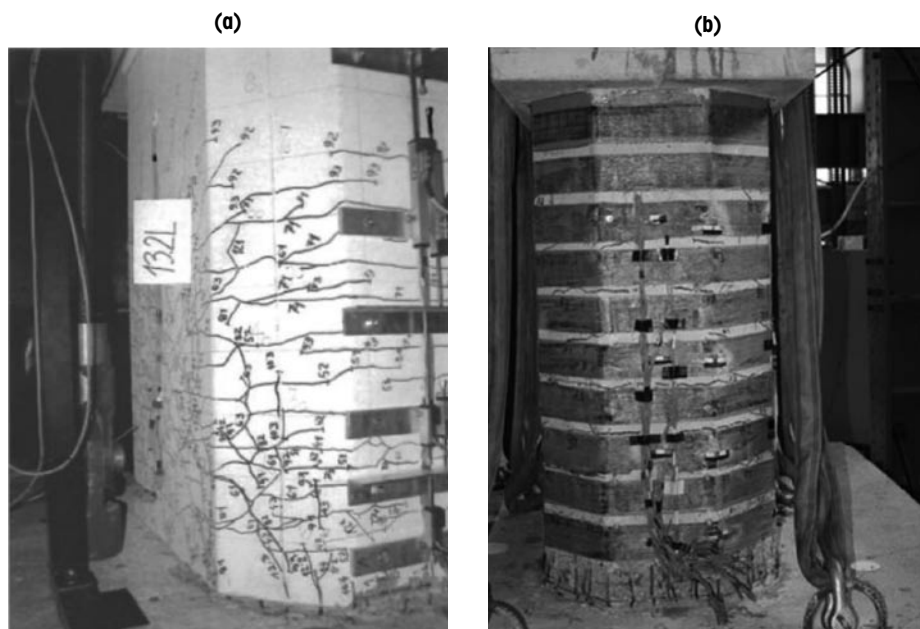
Slika 8 • Utrditev stebra z betonskim plaščem



Slika 9 • Utrditev stebra s CFRP-trakovi



Slika 10 • Zveza med silo v stebru in pomikom na vrhu stebra: a) steber, utrjen z betonskim plaščem, b) steber, utrjen s CFRP-plaščem



Slika 11 • Poškodbe utrjenih stebrov: (a) steber, utrjen z betonskim plaščem, (b) steber, utrjen s CFRP-plaščem

podobna. Najprej je začela odpadati krovna plast betona na zunanji in notranji strani stebra, potem so se palice upogibne armature začele uklanjati in se nato postopoma pretrgale. V posameznih primerih je bila porušena sprejemnost med palico in betonom, zato je prišlo do izvleka palic, predvsem tistih, ki so bile preklapljene blizu vpetja stebra v temelj. V

obeh primerih utrditve se je ob temelju pojavila izrazita vodoravna razpoka, ki se je vedno bolj odpirala, potem ko so palice vzdolžne armature izgubljale svojo nosilnost.

Ne glede na podobno obnašanje je bilo objetje z betonskim plaščem bolj učinkovito, saj je omogočilo večje sipanje energije (glej histerezi na sliki 10). V primeru betonskega

objetja so se palice vzdolžne armature zaradi dodatne plasti betona začele uklanjati kasneje kot v primeru CFRP-trakov, kjer se je to zgodilo takoj zatem, ko je odpadla krovna plast med plaščem in jedrom stebra. Zato je nosilnost v primeru betonskega plašča padala počasneje kot pri utrditvi s CFRP-trakovi.

To je razvidno tudi s slike 10, kjer vidimo, da je v obeh primerih bila dosežena podobna upogibna nosilnost (470 kN v primeru betonske utrditve in 450 kN v primeru CFRP-utrditve), vendar je v primeru utrditve s CFRP-trakovi upogibna nosilnost padla hitreje oziroma so se palice vzdolžne armature hitreje poškodovale in izgubile svojo nosilnost. Pri tej analizi je treba poudariti, da je bila v primeru utrditve s CFRP-plaščem upogibna armatura v stebru pred eksperimentom že nekoliko zarjavela in se ji je zaradi tega verjetno nekoliko zmanjšala duktilnost. Tudi to je lahko pospešilo uklon in trganje vzdolžnih armaturnih palic in posledično hitrejši padec nosilnosti stebra.

Če primerjamo odziv utrjenih stebrov z ne-utrjenim, lahko rečemo, da so se potem, ko je bila izboljšana strižna nosilnost stebra, aktivirali drugi mehanizmi porušitve, ki so bili posledica drugih pomanjkljivih konstrukcijskih detajlov v stebru. Nastopila sta uklon palic vzdolžne armature (ta v originalnem stebru sploh ni bila podrta) in izvlek posameznih palic, ki so bile preklapljene v področju največjih obremenitev v bližini vpetja v temelj.

### 3.6 Sklepi

Z eksperimenti je bilo pokazano, da lahko strižno nosilnost stebrov učinkovito povečamo z betonskimi ali CFRP-plašči. Na primeru tipičnega škatlastega stebra s premajhno strižno nosilnostjo smo eksperimentalno preverili učinkovitost teh dveh načinov utrditve. Generalno gledano, lahko rečemo, da je v obeh primerih mehanizem porušitve bil bistveno drugačen kot pri neutrnjenem stebri, ki se je strižno porušil. Potem ko je z utrditvijo bila povečana strižna nosilnost stebra, so se aktivirali drugi načini porušitve, ki so bili po-

sledica drugih konstrukcijskih pomanjkljivosti v stebri.

Minimalna utrditev s CFRP-trakovi je sicer povečala strižno nosilnost stebra, vendar ni mogla preprečiti uklona vzdolžnih armaturnih palic, ki jim je v originalnem stebri podporo zagotavljala le krovna plast betona. CFRP-plašč ni mogel preprečiti niti izvleka posameznih armaturnih palic, ki so bile preklopljene na področju največjih upogibnih obremenitev. Zaradi tega se duktilnost stebra ni izboljšala. Če bi poleg strižne nosilnosti želeli povečati tudi duktilnost stebra, bi morali v spodnjem

delu stebra zagotoviti več plasti CFRP-trakov. V obravnavanem primeru je betonski plašč zagotovil boljši ciklični odziv stebra. Mehanizem porušitve je bil sicer podoben kot pri CFRP-utrditvi, vendar je bil betonski plašč zaradi dodatne plasti betona učinkovitejši, saj je uklon vzdolžne armature nastopil nekoliko kasneje kot v primeru CFRP-trakov. Tako je bila poleg strižne nosilnosti nekoliko povečana duktilnost stebra (duktilnost za pomike je znašala približno  $\mu_d = 5,6$ ). Boljši odziv je dosežen tudi zaradi tega, ker vzdolžna armatura ni bila zarjavela.

## 4 • STEBRI S PREČNIM PREREZOM I-OBLIKE, KI IMAJO POMANJKLJIVO PREČNO ARMATURO ZA OBJETJE IN PREPREČEVANJE UKLONA UPOGIBNE ARMATURE

### 4.1 Opis eksperimentalnih preiskav obstoječih I-stebrov

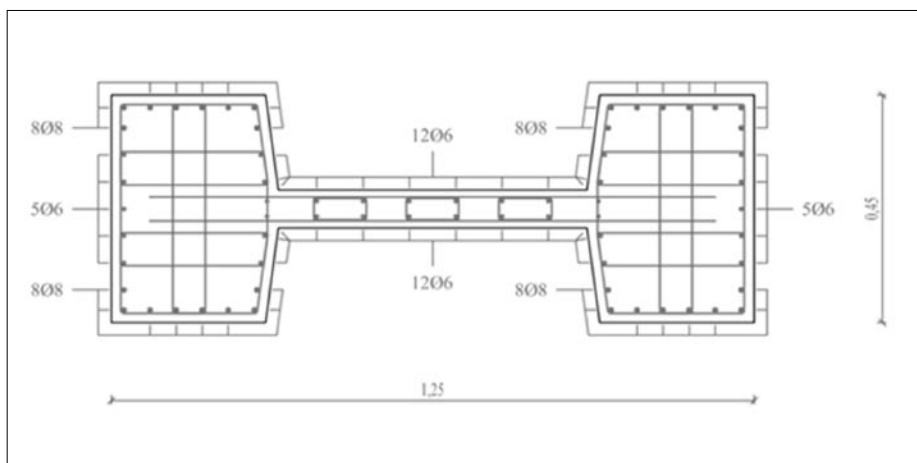
Veliko novejših mostov je podprtih s stebri I-prereza. Nekateri med njimi vsebujejo konstrukcijske detajle, ki nekoliko odstopajo od zahtev standarda EC8/2. Zato smo (v sodelovanju z ZAG-om) preizkusili ciklično obnašanje takšnih stebrov.

Značilni steber smo preizkusili v merilu 1 : 4. Višina preizkušanca je znašala 2,9 m. Steber smo obremenjevali s horizontalno silo na višini 2,5 m, kar ustreza povprečni višini tipičnega mostnega stebra 10 m. V modelnem stebri so bili upoštevani vsi konstrukcijski detajli, značilni za prototipni steber (glej 2. poglavje). Prečni preizkušanca je prikazan na sliki 12.

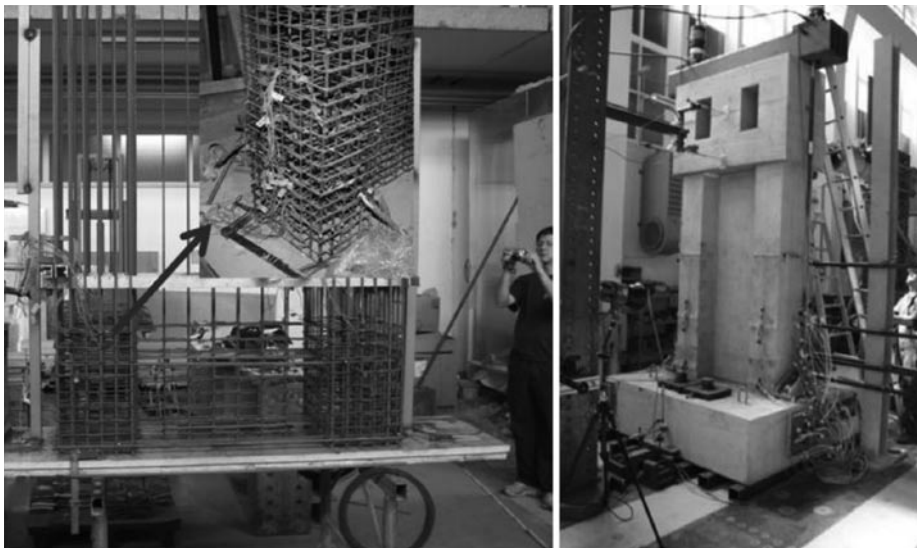
Projektirni trdnostni razred betona je bil C30/37. Izmerjena tlačna trdnost na kocki je bila 36 MPa. Vzdolžna armatura je bila kakovosti S500 ( $f_{yk} = 500$  MPa). Za vzdolžno armaturo smo uporabili palice premerov  $\phi 6$  (kar ustreza palicam  $\phi 24$  v prototipu) in  $\phi 8$  (palice  $\phi 32$  v prototipu). Izmerjeni meji tečenja sta znašali 607 MPa za palice  $\phi 6$  in 628 MPa za palice  $\phi 8$ . Deformacija, pri kateri so se palice pretrgale, je znašala 3,2 % za palice  $\phi 6$  in 9 % za palice  $\phi 8$ .

Ker za izvedbo prečne armature nismo imeli na voljo rebraste armature ustreznega premera, smo namesto te uporabili gladko armaturo S240 ( $f_{yk} = 240$  MPa) premera  $\phi 4,2$  mm. S takšno armaturo smo zagotovili enak volumski delež stremen kot v izhodiščni konstrukciji, in sicer 0,037 (glej 2. poglavje).

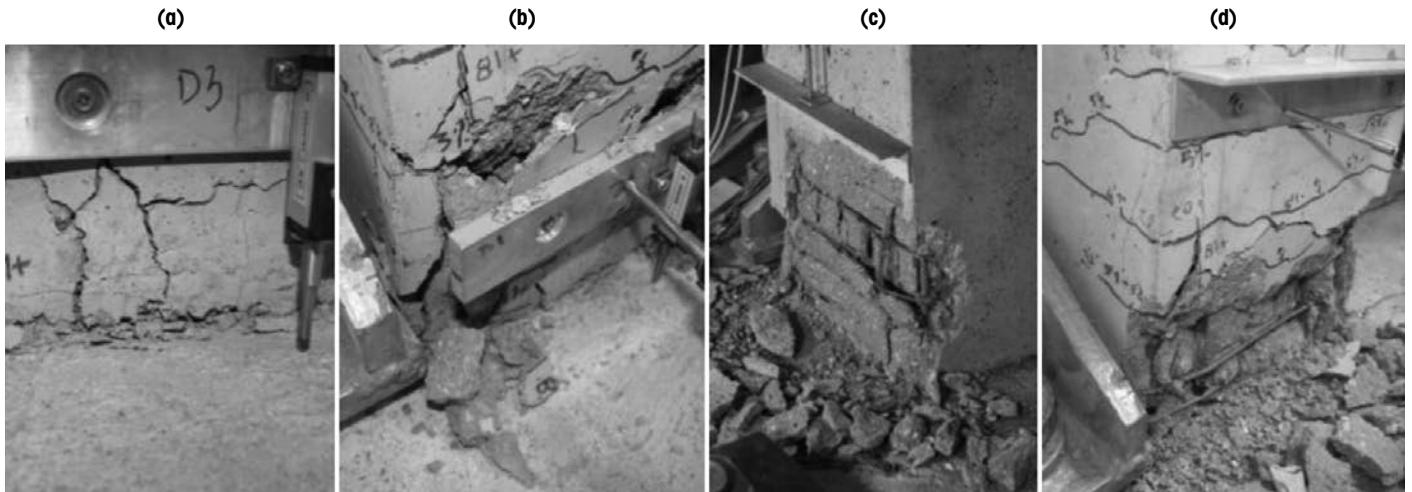
Količina stremen, ki smo jo zagotovili v preizkušanci, je zagotavljala zadostno strižno



Slika 12 • Prečni preizkušanca



Slika 13 • Priprava armature preizkušanca in preizkušaneec pred testom



Slika 14 • a) Zaščitna plast je začela odpadati pri pomiku 50 mm, b) dokončno je odpadla pri pomiku 80 mm, b) potem so se uklonile vzdolžne palice na strani stebra, kjer so bila preklopljena stremena, c) nato še na nasprotni strani

nosilnost, saj je bila določena z metodo načrtovanja nosilnosti. Zato ni bilo nobene nevarnosti, da se steber poruši v strigu, kar je kasneje potrdil tudi eksperiment.

Stremena – tako kot v prototipnem stebru – niso povsem zadoščala drugim zahtevam standarda EC8/2 glede objetja betonskega prereza in preprečitve uklona vzdolžne armature (glej 2. poglavje). Količina prečne armature je bila približno trikrat manjša od minimalno predpisane armature za objetje, tudi če zanemarimo pomembno dejstvo, da so stremena bila neustrezno oblikovana. Stremena niso bila sidrana v betonsko jedro, ampak samo preklopljena na strani krajše stranice pasnice (glej slike 3b in 3c).

Glede na premajhno količino stremen za objetje tudi pogoj o maksimalni dovoljeni razdalji v ravnini prereza med podprtimi palicami vzdolžne armature ni bil izpolnjen. Največja razdalja med podprtimi palicami vzdolžne armature je znašala približno 10 cm, kar ustreza razdalji 40 cm v prototipu. Stremena so bila postavljena na medsebojni razdalji 5 cm vzdolž celotne višine stebra, kar ustreza razdalji 20 cm v prototipnem stebru.

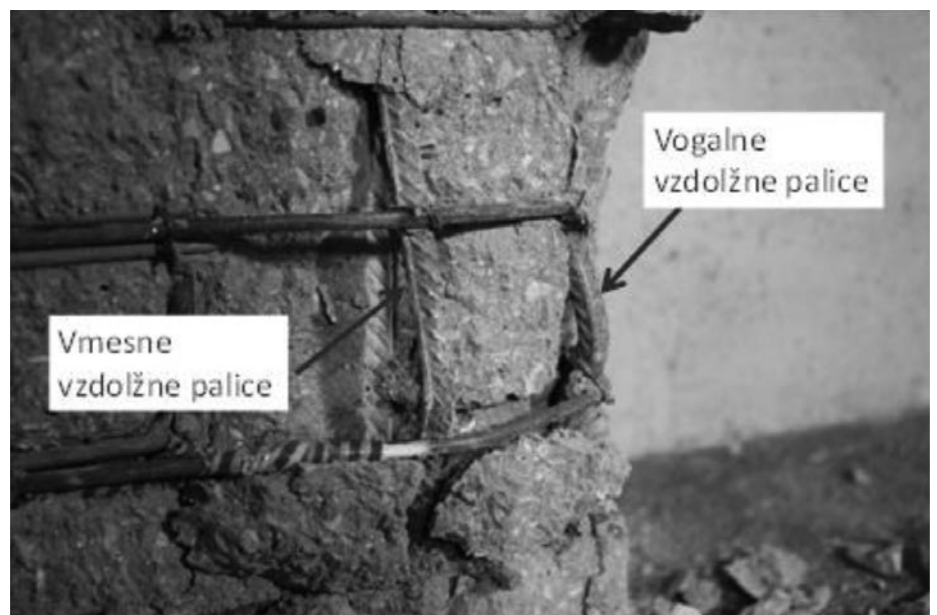
Steber smo preizkušali v smeri stranice dolžine 45 cm. To ustreza obremenitvam mostu v njegovi vzdolžni smeri. Model stebra je bil med preiskavo v pokončnem položaju (glej sliko 13). Preiskava je potekala v devetih fazah. V vsaki fazi smo izvedli po tri cikle z enako amplitudo. Predvideli smo sistem obremenjevanja, ki smo ga v začetnih fazah (pred tečenjem armature) kontrolirali s silo, v preostalih fazah pa s pomiki.

#### 4.2 Ciklični odziv obstoječih stebrov

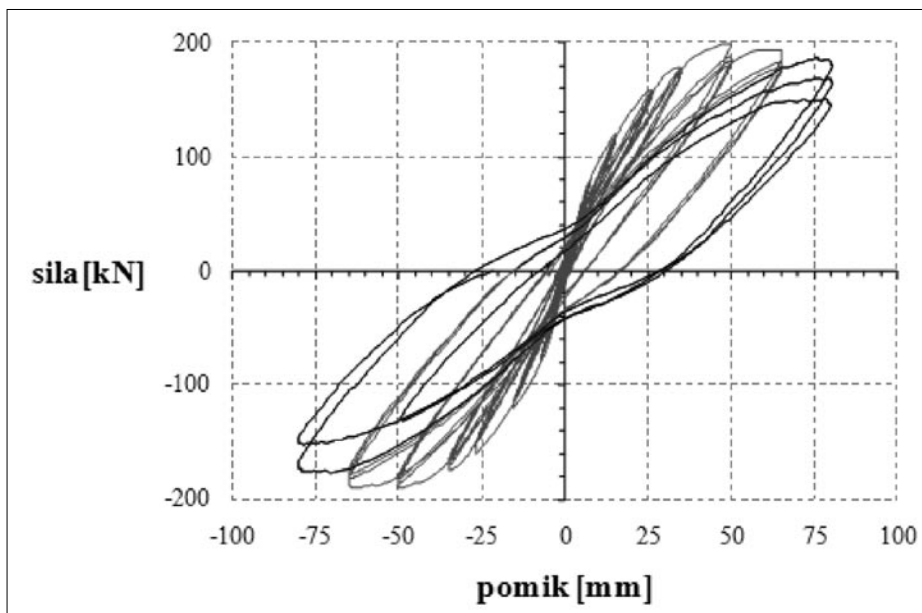
V prvih šestih fazah eksperimenta ni bilo zaznati večjih poškodb, le tanjše upogibne razpoke v območju največjih upogibnih obremenitev, ki so se enakomerno širile od dna proti vrhu stebra. Pri pomiku 35 mm (povprečni rotaciji stebra, enaki 1,4 % višine stebra) je prišlo do tečenja armaturnih palic in prvih večjih razpok na dnu stebra. V naslednji fazi je bila dosežena maksimalna upogibna nosilnost stebra pri horizontalni sili ca. 200 kN in pomiku 50 mm (povprečni rotaciji stebra enaki 2 % višine stebra). Potem se je nosilnost začela zmanjševati, poškodbe pa so postajale vedno večje. Začela je odpadati zaščitna plast (slika 14a), ki je popolnoma odpadla

pri pomiku 80 mm (povprečni rotaciji, enaki 3,2 % višine stebra) na višini 2,5 m od vpetja stebra v temelj (glej sliko 14b). Temu je sledil uklon palic vzdolžne armature. Na sliki 14c je prikazan uklon vzdolžnih palic na strani stebra, kjer so bila preklopljena stremena, na sliki 14d pa na nasprotni strani, kjer je bil obseg poškodb manjši. V tretjem ciklu zadnje faze smo preizkus prekinili, saj je bil steber že tako poškodovan, da je zaradi narave poškodb obstajala nevarnost, da se hipno poruši.

Na strani, kjer so bila preklopljena stremena, je bilo več vzrokov, zaradi katerih so se vzdolžne armaturne palice uklonile. Prvi vzrok so neustrezno oblikovana stremena, ki niso bila sidrana s kljukami v betonsko jedro. V trenutku, ko je



Slika 15 • Detajli uklona vzdolžnih armaturnih palic po zaključenem eksperimentu



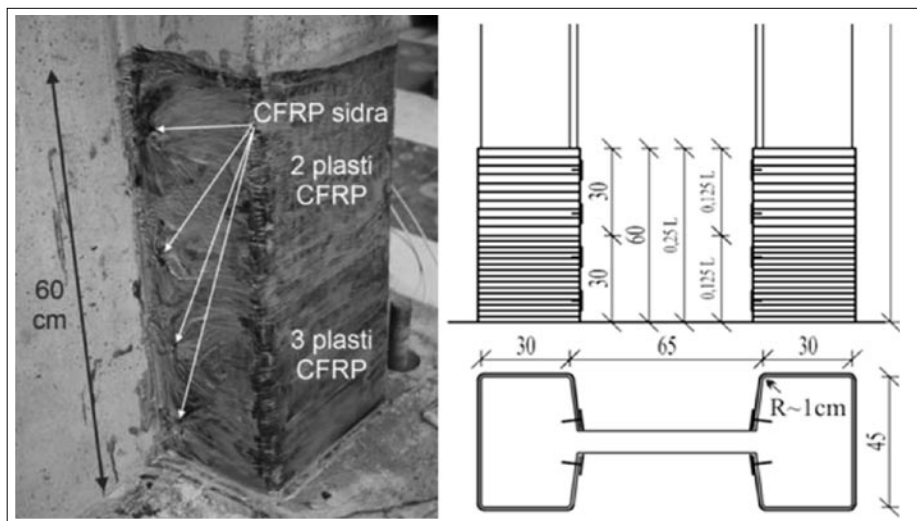
Slika 16 • Zveza med pomikom na vrhu stebra in prečno silo v stebri

odpadla zaščitna plast betona, se je njihova učinkovitost glede preprečitve uklona vzdolžnih armaturnih palic občutno zmanjšala, saj so se stremena začela odpirati.

Neustrezno oblikovana stremena niso bila edini vzrok, zaradi katerega so se uklanjale vzdolžne palice. Opazili smo, da so se te uklanjale na dva različna načina. Palice so se v vogalih stremen uklonile med dvema sosednjima stremenoma, vmesne palice pa kar med štirimi zaporednimi stremenami (glej sliko 15). Glede na prvi način uklona lahko sklepamo, da je bila vertikalna razdalja med stremenami (vzdolž stebra) prevelika. To je bilo tudi pričakovano, saj je bila večja od tiste, ki je predpisana v standardu. Drugi način uklona pa kaže na to, da je količina stremen premajhna oziroma da so obstoječa stremena neučinkovita. Da je bila količina stremen premajhna, lahko sklepamo tudi po uklonu upogibnih armaturnih palic na strani stebra, kjer so stremena zvezno potekala (niso bila preklopljena).

Zveza med pomikom na vrhu stebra in prečno silo v stebri, ki je bila registrirana med eksperimentom, je prikazana na sliki 16. Dosežen je bil maksimalni pomik 80 mm (povprečna rotacija stebra je enaka 3,2 % višine stebra), pri katerem se je nosilnost hipno zmanjševala in je v tretji ponovitvi cikla padla na 80 % tiste, zabeležene v prvem ciklu. Treba je poudariti, da padec sile v tretjem ciklu, ni nastal zaradi zmanjšane togosti stebra pri ponovitvah cikla, ampak zaradi vedno večjih poškodb upogibnih palic.

S slike 16 lahko sklepamo, da je tečenje upogibne armature nastopilo pri pomiku 35 mm (povprečni rotaciji stebra, ki je znašala 1,4 % višine stebra), tako kot je tudi bilo ugotovljeno z opazovanjem stebra med eksperimentom. Dosežena je razmeroma majhna duktilnost za pomike, ki znaša  $\mu_D = 80 \text{ mm} / 35 \text{ mm} = 2,3$ . Če upoštevamo dejstvo, da je takšna duktilnost določena brez kakršnihkoli varnostnih faktorjev, lahko sklepamo, da za mostove, v katerih stebri vsebujejo podobno količino in podobno oblikovano prečno armaturo, ne bi smeli upoštevati faktorja obnašanja  $q = 3,5$ , ki ga običajno upoštevamo pri projektiranju grednih mostov. Še zlasti ne zaradi tega, ker je bila porušitev stebra v osnovi krhka, saj je



Slika 17 • Utrditve I-stebra s CFRP-plaščem

nosilnost zelo hitro padala, porušitev pa nastopila pri pomiku, ki je bil le 1,6-krat večji od tistega, pri katerem je zabeležena maksimalna nosilnost ( $80 \text{ mm} / 50 \text{ mm} = 1,6$ ).

Preizkus je potrdil še eno dejstvo, in sicer da mora biti armatura na potresnih območjih narejena iz kakovostnega jekla, za katero je značilna velika deformacija, pri kateri se palice pretrgajo (jeklo tipa C). Vzdolžne palice v stojini, ki sicer niso odločilno vplivale na nosilnost stebra, vendar so vseeno imele določen vpliv na njegov odziv, so se vse pretrgale, saj je maksimalna natezna deformacija jekla, iz katerega so bile narejene, bila le 3,2 %. Če bi bile tudi palice v pasnicah iz enakega jekla kot tiste v stojini, bi porušitev stebra nastopila še veliko prej, duktilnost pa bi bila veliko manjša.

#### 4.3 Utrditve stebra in ciklični odziv utrjenega stebra

Tako kot v primeru škatlastih stebrov smo analizirali tudi možne načine utrditve I-stebra. Glavni cilj utrditve je bil preprečiti uklon palic vzdolžne armature, kar bi povečalo tudi duktilnost stebra.

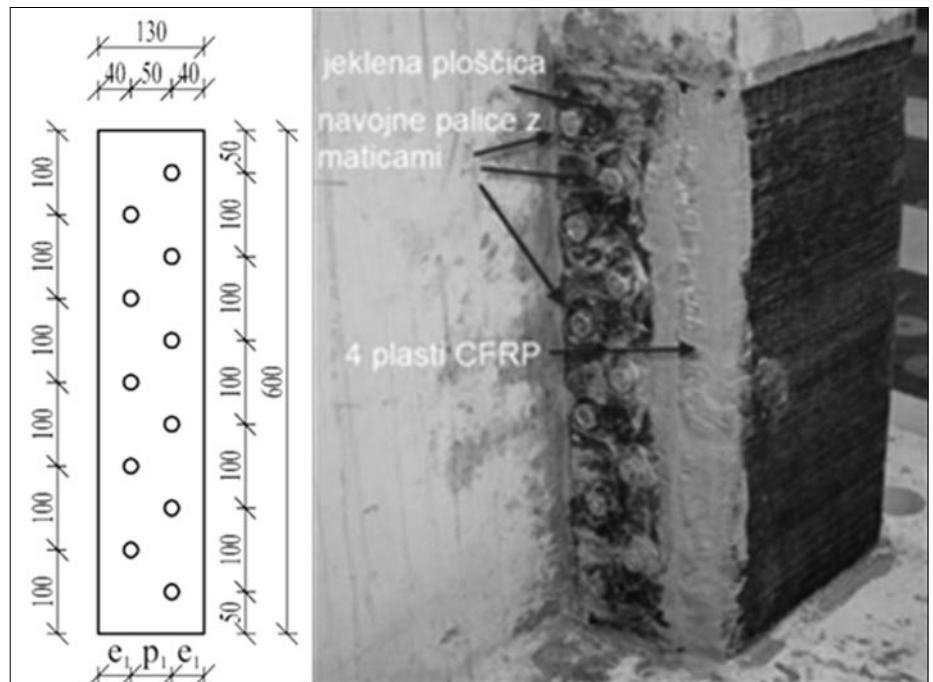
Zanimala nas je predvsem možnost utrditve I-stebra s CFRP-plaščem, ker je izvedba takšne utrditve nekoliko preprostejša in hitrejša od drugih možnosti (jekleni ali betonski plašči). Zaradi oblike stebra pa izvedba utrditve ni bila tako enostavna kot pri škatlastem stebri, kjer smo prerez enostavno ovili s CFRP-trakovi. Zaradi I-oblike prereza smo lahko ovili le pasnice stebra (glej sliko 17), pa še te le delno. Da bi plašč zagotovili potrebno učinkovitost, smo ga morali na primeren način sidrati, in sicer na mestu stika pasnice in stojine prereza (glej sliko 17).

V prvi različici smo CFRP-plašč sidrali s pomočjo sider iz ogljikovih vlaken (glej sliko 17). To različico smo preizkusili kar na poškodovanem stebri, ki smo ga porušili v predhodnem preizkusu (glej predhodno poglavje). Steber smo najprej sanirali z uporabo sanacijske malte in ga nato ovili s CFRP-plaščem do višine 60 cm, tj. do dvakratne pričakovane višine plastičnega členka, in sicer na prvi polovici s tremi plastmi, na drugi pa z dvema plastema CFRP-*t*kanine. Glede na to, da je bil steber praktično porušen, poškodbe pa takšne, da jih je bilo zelo težko sanirati, ni bilo pričakovati, da bo sanacija zelo veliko izboljšala odziv stebra. Zato razpoke ob vpetju stebra nismo injektirali, prav tako nismo ravnali uklonjenih palic ali stikovali (npr. z varjenjem) odprtih stremen. Glede na to, da smo načrtovali tudi utrditev nepoškodovanega stebra in dodaten ciklični preizkus tega stebra, je bil glavni cilj preizkusa utrjenega, prehodno poškodovanega stebra predvsem preveriti učinkovitost sider iz ogljikovih vlaken. Uporabili smo štiri sidra na medsebojni razdalji približno 12 cm.

Ugotovili smo, da s takšnimi sidri ne moremo zagotoviti želene učinkovitosti plašča. Pri večjih upogibnih obremenitvah so se namreč pojavile upogibne razpoke v plastični matrici zaradi razmeroma velikih upogibnih deformacij. Ena izmed razpok je nastala tik pod sidrom na mestu največjih obremenitev. Zato spodnji del plašča ni bil več učinkovito sidran v steber in se je posledično zelo hitro odlepil od stebra. Na mestu največjih obremenitev ni bilo več učinkovitega objetja.

V predhodno opisanem preizkusu smo ugotovili, da je treba plašč bolj zvezno sidrati v steber. Zato smo pri utrditvi nepoškodovanega stebra spremenili detajl sidranja. Namesto sider iz ogljikovih vlaken smo uporabili jeklene ploščice, ki smo jih na steber pritrdili z jeklenimi vijaki (glej sliko 18). Na višini 60 cm smo pasnice stebra utrdili s štiriplastnim CFRP-plaščem. Načrtovali smo enak preizkus kot pri neutrnjenem stebri.

Preizkus je potekal po načrtih, vse dokler ni bila dosežena meja tečenja v vzdolžnih palicah pri doseženem pomiku 35 mm (povprečni rotaciji stebra, ki je znašala 1,4 % višine stebra). Meritve so pokazale, da plastifikacija ni bila koncentrirana le v prerezu ob vpetju stebra, kar je kazalo na učinkovitost plašča. V naslednjem ciklu pri pomiku 50 mm (pri povprečni rotaciji stebra, enaki 2 % višine stebra) se je zaradi okvare na batu zgodilo nenadzorovano hipno povečanje pomika na vrhu stebra, kar je povzročilo porušitev stebra



Slika 18 • Detajl sidranja z jekleno ploščico, pritrjeno z jeklenimi vijaki

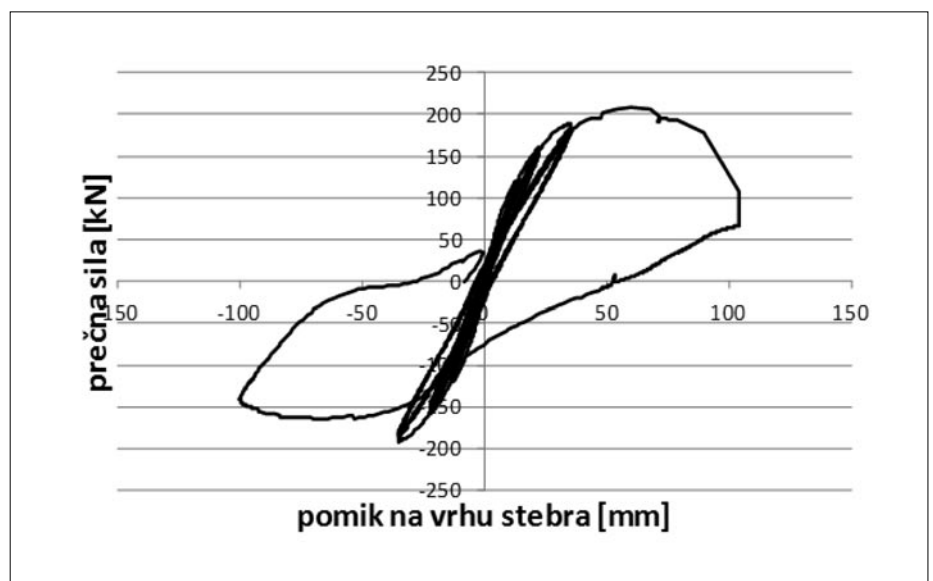
(slika 19). V trenutku so se potrgale praktično vse natezne palice, medtem ko sta tlačna cona in plašč ostala nepoškodovana. Po tem lahko sklepamo, da je bil uporabljeni način sidranja učinkovit. To bomo preizkusili s ponovitvijo ponesrečenega eksperimenta. Priprave za novi preizkus že potekajo.

#### 4.4 Sklepi

Eksperimentalno smo preizkusili ciklično obnašanje mostnega stebra s prečnim pre-

rezom I-oblike, ki je imel prečno armaturo, ki je zagotavljala zadostno strižno nosilnost, vendar ni izpolnjevala vseh zahtev standarda EC8/2 glede objetja betonskega jedra in preprečitve uklona vzdolžnih armaturnih palic.

Pri cikličnem obremenjevanju se je steber porušil zaradi uklona vzdolžnih (upogibnih) armaturnih palic. Uklon je nastopil zaradi neustrezno oblikovanih stremen, ki niso bila pravilno sidrana v betonsko jedro, in zaradi premajhne količine stremen. Razpoložljiva



Slika 19 • Zveza med silo v stebri in pomikom na vrhu stebra

duktilnost za pomike je znašala komaj 2,3, pomik, pri katerem se je zgodila porušitev stebra, pa je bil le 1,6-krat večji od tistega, pri katerem je bila registrirana maksimalna nosilnost stebra. Uklon vzdolžnih armaturnih palic je povzročil zelo hiter padec nosilnosti, poškodbe stebra pa je bilo zelo težko sanirati, saj je bila porušitev stebra v osnovi krhka. Raziskava je potrdila, da lahko v stebrih s prečnim prerezom I-oblike, ki je zaradi majhne tlačne cone neugodna, dosežemo duktilno obnašanje le z zadostno količino pravilno oblikovanih stremen, ki so ustrezno sidrana v betonsko jedro s kljukami. V nasprotnem

primeru stremena zelo hitro izgubijo svojo funkcijo, takoj zatem ko odpade zaščitna plast betona, saj se začnejo razpirati. Posledično ne morejo več preprečiti uklona vzdolžne upogibne armature.

Glede na rezultate eksperimenta lahko sklepamo, da mostov s podobno konstruiranimi stebri ne bi smeli projektirati s predpostavko o duktilnem obnašanju mostu oziroma poštevatvi faktor obnašanja  $q = 3.5$ , saj je razpoložljiva duktilnost pod predpostavljeno vrednostjo.

Analizirali smo tudi možne načine utrditve takšnega stebra. Preverjali smo možnost

utrditve s CFRP-plašči, ki smo jih ovili okoli pasnic stebra in sidrali v steber na dva načina: s sidri iz ogljikovih vlaken in z jekleno ploščico, pritrjeno z jeklenimi vijaki. Prva rešitev se je izkazala za neprimerno. Druga rešitev žal ni bila v popolnosti preizkušena, saj se je zaradi okvare na batu modelni steber nepričakovano porušil. Pri tem sta pritrditve CFRP-plašča na steber in sam plašč ostala nepoškodovana, kar kaže na to, da je bilo zagotovljeno učinkovito sidranje. V načrtu je ponovitev preizkusa, s katerim bomo to ponovno preverili.

#### 4 • ZAHVALA

Vsi opisani eksperimenti so bili narejeni na ZAG-u. Še zlasti se zahvaljujema kolegoma mag. Alojzu Bevcu in dr. Urošu Bohincu, s katerima sva zelo tesno sodelovala pri opisanih raziskavah.

Del prikazanih raziskav je opravljen v sklopu doktorskih nalog dr. Jake Zevnika in Zlatka

Vidriha, ki sta poleg analitičnega opravila tudi veliko pripravjalnega dela na preizkušancih. Njuno delo je financiralo Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo Republike Slovenije.

Raziskave škatlastih stebrov je delno financiral Dars. Podjetje Sika, d. o. o., Slovenija je

doniralo ves material, uporabljen za izvedbo utrditve s CFRP-plašči, in je tudi opravilo vsa dela, ki so bila povezana z namestitvijo teh plaščev.

V pripravi in analizi preizkušancev je sodeloval tudi študent Damjan Jamnik v okviru svojega diplomskega dela. Vsem se lepo zahvaljujema.

#### 5 • LITERATURA

Bevc, L., Tomažević, M., Fischinger, M., Isaković, T., Bohinc, U., Zevnik, J., Študije in modelne preiskave potresne ranljivosti in predlogi utrditve za stebre viadukta Ravbarkomanda in sorodno konstruirane premostitvene objekte: razširjeni povzetek študije, Zavod za gradbeništvo Slovenije: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo, 2006.

Fajfar, P., Fischinger, M., Isaković, T., EUROCODE 8/2, projektiranje konstrukcij v potresnih območjih – mostovi: preliminarni priročnik, Ljubljana: FAGG, Oddelek za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo, 1994.

Isaković, T., in Fischinger, M., Strižna nosilnost ciklično obremenjenih mostnih stebrov, Gradbeni vestnik, letnik 55, št. 11, str. 276–287, november 2006.

Isaković, T., Evrokodi: gradivo za izobraževalni tečaj o Evrokodih, projektiranje potresno odpornih mostov po pravilih iz Evrokoda 8/2, navodila in komentar izbranih določil, Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2010.

Priestley, M. J. N., Seible, F., Calvi, G. M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, 1997.

Pr ENV 1998-2, Evrokod 8, Projektiranje konstrukcij na potresnih območjih, 2. del: Mostovi, prENV 1998-2:1994, 1994.

SIST EN 1992-1-1– Evrokod 2, Projektiranje betonskih konstrukcij, 1-1. del, Splošna pravila in pravila za stavbe, SIST EN 1992-1-1:2005, maj 2005.

SIST EN 1998-2, Evrokod 8, Projektiranje konstrukcij na potresnih območjih, 2. del: Mostovi, SIST EN 1998-2:2006, maj 2006.

SIST EN 1998-3, Evrokod 8, Projektiranje konstrukcij na potresnih območjih, 3. del, Ocena in prenova stavb, SIST EN 1998-3:2005, oktober 2005.



# UPOŠTEVANJE TRAJNOSTNIH KRITERIJEV PRI PROJEKTIRANJU Z ORODJI BIM

## DESIGNING USING SUSTAINABILITY CRITERIA WITH BIM TOOLS

**Miloš Todorović, univ. dipl. inž. grad.**

Informacijsko modeliranje zgradb, Miloš Todorović, s. p.  
<http://www.bim.si/>

**prof. dr. Žiga Turk, univ. dipl. inž. grad.**

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR)  
<http://www.zturk.com/>

**Znanstveni članek**

UDK: 624.03:681.5

**Povzetek** | Boj proti podnebnim spremembam je pomembna politična in tehnološka prioriteta, zmanjšanje porabe energije pa tudi gospodarska nujnost. Grajeno okolje je odgovorno za približno 40 % vseh toplogrednih izpustov in porabe energije. Ocenjujemo, da bi približno polovico te energije lahko prihranili. Hipoteza pričujoče raziskave je, da so prihranki še posebno veliki, če trajnostne kriterije upoštevamo od samega začetka procesa načrtovanja, in da nam je pri tem v veliko pomoč tehnologija informacijskih modelov stavb. Preskusli smo jo na primeru stavbe Tehnološkega parka Ljubljana. Z uporabo BIM-orodij (Autodesk Revit 2010) in programov za analizo fizike stavbe Autodesk Green Building Studio in Autodesk Ecotect Analysis 2010 smo toplogredne izpuste zmanjšali za skoraj polovico, ne da bi temeljiteje posegli v lastnosti stavbe. Rezultat kaže, da so BIM-orodja in dodatni programi za analizo zreli za redno uporabo in da z njimi dosežemo bistveno bolj trajnostne stavbe. Nadaljnje delo in raziskave potekajo v okviru kompetenčnega centra TIGR.

**Summary** | Fighting against climate changes is an important political and technological priority; furthermore the reduction of energy usage is also an economical necessity. Built environment is responsible for app. 40 % of all greenhouse gases and energy usage. It is estimated that nearly a half of that energy could be saved. The hypothesis of this research is that savings are especially large, when sustainable criteria is used from the very start of design and with that the use of technology with building information models is in great help. We tested it on an example for future buildings planned in Technological Park in Ljubljana. With the use of BIM tools (Autodesk Revit 2010) and software for building's energy analysis Autodesk Green Building Studio and Ecotect Analysis 2010 we reduced greenhouse gases for nearly 50 %, without greatly interfering in building's characteristics. The results show that BIM tools and additional software for analysis are mature enough for regular usage and that we can achieve significantly more sustainable buildings by using them. Further work and research is being done within the competence center TIGR.

## 1 • UVOD

Od konca osemdesetih let iz raziskovalnih laboratorijev v industriji prodira nov način obvladovanja informacij v gradbeništvo. Tehnologija je bila najprej znana pod izrazom »model gradbenih produktov« (Turk, 1992), v zadnjih letih pa se je uveljavila kratica BIM (angl. Building Information Modeling – BIM) (Cerovšek, 2005). Informacijski model zgradbe je zbirka podatkov, v kateri naj bi bilo v visokostrukturirani obliki zapisanih čim več informacij o objektu, ki nastajajo in se uporabljajo skozi njegovo celotno življenjsko dobo. Že zasnova in projektiranje tečeta na celovitem trirazsežnem modelu zgradbe, ki si ga posamezni projektanti delijo in ki ga v končni fazi lahko uporabi tudi upravnik zgradbe za njeno upravljanje. V pričujoči raziskavi nas je zanimalo, če so BIM- in pripadajoča orodja zrela za to, da podprejo projektiranje z upoštevanjem trajnostnih kriterijev.

Izraza zeleno in trajnostno šele v zadnjih letih pridobivata pomen. Strokovno se je izraz zeleno razširil v primernejši izraz trajnostno, ki zajema več učinkov, ki jih dejansko ta princip prinaša. Zeleno se namreč nanaša predvsem na reciklažo in okolju prijazno delovanje, trajnostno pa zajema celotni življenjski cikel produkta oziroma objekta (Krygiel, Nies, 2008).

Kot rezultat zavedanja pomembnosti trajnostnega delovanja so se v Evropski uniji

(EU) vzpostavile t. i. tehnološke platforme, ki bodo odigrale pomembno vlogo pri tržno pogojenem razvoju industrijskih sektorjev in brez katerih bi bili težko doseženi zastavljeni lizbonski cilji na področju gospodarske rasti in konkurenčnosti, s tem pa tudi cilji socialne in okoljske politike. Kot posledica visoke pomembnosti gradbene industrije v gospodarskem sektorju Evrope se je izoblikovala tudi Evropska gradbena tehnološka platforma (*European Construction Technology Platform, ECTP*), ki je dobro organizirana in pozicionirana v EU.

Trajnostni razvoj je zajet v vsebinskem poglavju »Kakovost življenja« platforme, kjer so osnovni nameni osredotočeni na iskanje načinov za manjšo porabo energije, manjše nastajanje toplogrednih plinov, manjšo generacijo odpadkov ipd. V okviru ECTP je bila februarja 2005 predstavljena tudi Vizija 2030 (*Vision 2030*) – vizija za trajnostni in konkurenčni gradbeni sektor do leta 2030 (*A vision for a sustainable and competitive construction sector by 2030*). Vizija upa na do 30-odstotno zmanjšanje stroškov življenjskega cikla zgradb, 50-odstotno zmanjšanje izvedbenega časa in 50-odstotno zmanjšanje nesreč na gradbiščih.

V trajnostno delovanje pa bo industrija prisiljena tudi zaradi davčnih in regulatornih posegov držav, ki bodo tako pritiskale na

energijsko potratne panoge. Prav tako lahko pričakujemo nadaljnje naraščanje cen surovin in energije, zato bosta energetska in snovna učinkovitost postali ključni pri konkurenčnosti (Turk, 2009).

V predstavljeni raziskavi nas je zanimalo, kakšno vlogo v zvezi s trajnostnim razvojem bo na področju informacijskih tehnologij igral BIM, ali so aktualna BIM-orodja že dovolj izpopolnjena, da prinašajo dodano uporabno vrednost, in kako se zaradi uporabe novih tehnologij spremeni ustaljeni način trajnostnega projektiranja.

### 1.1 Struktura članka

Članek v poglavju 2 predstavi obravnavano stavbo in način, kako v programu Revit Architecture 2010 pripravimo prostorski informacijski model konceptualne zasnove zgradbe, primeren za nadaljnje analize, upoštevajoč trajnostne kriterije. Predstavljena je ocena porabljenega časa za izdelavo takega modela, da je projektiranje v okolju BIM mogoče primerjati s trenutnimi poteki projektiranja in časovnimi okviri let-tega.

V poglavju 3 se članek osredotoči na predstavitev dveh programov, namenjenih energijskim analizam objektov. V programu Eco-tect Analysis 2010 sta predstavljeni študiji osončenosti in osenčenosti ter s tem vpliv objekta na okolico in nasprotno. V programu Green Building Studio pa je predstavljena energijska analiza celotnega objekta.

V zadnjem poglavju 4 so predstavljeni ugotovitve in delo.

nikom družin (*Family Editor*) ali okoljem konceptualnih mas (*Conceptual Mass Editor*) pa so možnosti kreiranja tudi najkompleksnejših elementov zgradb skoraj neomejene.

Za potrebe trajnostne analize objekta smo obravnavali le nadzemeljski del objekta, tj. štirinadstropni objekt poslovnih prostorov. Odločitev smo sprejeli zato, ker podzemeljski garažni del ni toplotno izoliran, depoji mestnega muzeja so obravnavani v projektu kot samostojni objekt, objekt poslovnih prostorov pa s svojo zasnovo predstavlja skoraj idealni testni model za analizo, saj je preproste pravokotne oblike in vsebuje vse pomembnejše elemente za analizo.

Pri modeliranju objekta v konceptualni zasnovi natančno definiranje konstrukcije ni potrebno. Osnovna filozofija zasnove za nadaljnjo trajnostno analizo je v tem, da pripravimo bistveno obliko modela (lupino modela) z glavnimi parametri, ki se nanašajo na raz-

## 2 • MODELIRANJE V PROGRAMU REVIT ARCHITECTURE 2010

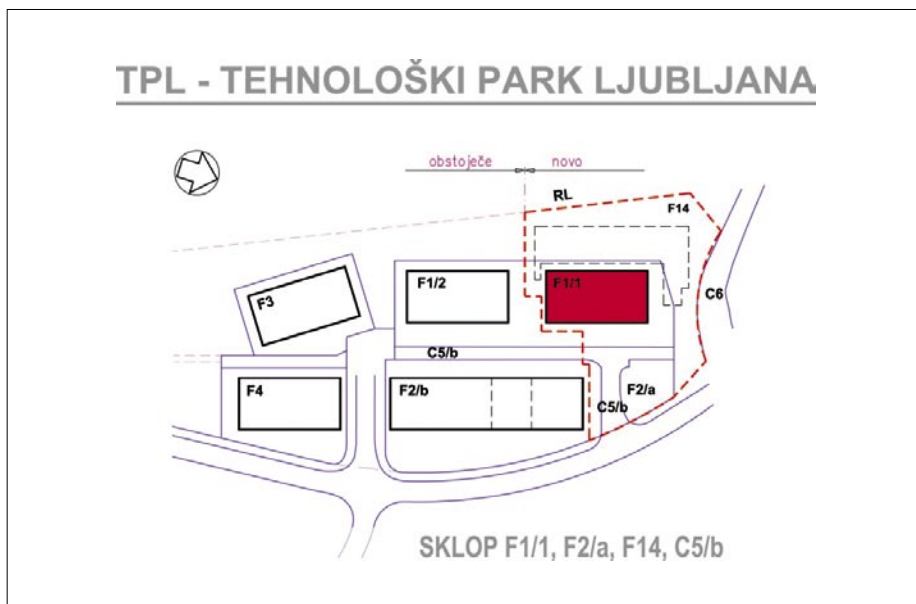
Kot predmet študije smo izbrali bodoča nova objekta v sklopu tehnološkega parka na Brdu v Ljubljani, imenovana Objekt F1/1 in Objekt depojev mestnega muzeja. Odgovorni vodja projekta je univ. dipl. inž. arh. Boštjan Kolenc iz podjetja Inženiring 4M, d. o. o., s katerim smo se dogovorili za sodelovanje in dovoljenje za uporabo omenjenega objekta. Objekt bo zgrajen v okviru 2. etape izgradnje 1. faze tehnološkega parka. Zasnovo objekta bi lahko razdelili na tri etape – nadaljevanje obstoječe podzemne garaže v dveh etažah, dilatacijsko ločeni podzemni del, namenjen arhivu mestnega muzeja, in nadzemni del poslovnih prostorov v širih nadstropjih.

Platforma Autodesk Revit je v svetovnem merilu vodilno BIM-orodje. Za gradnike pro-

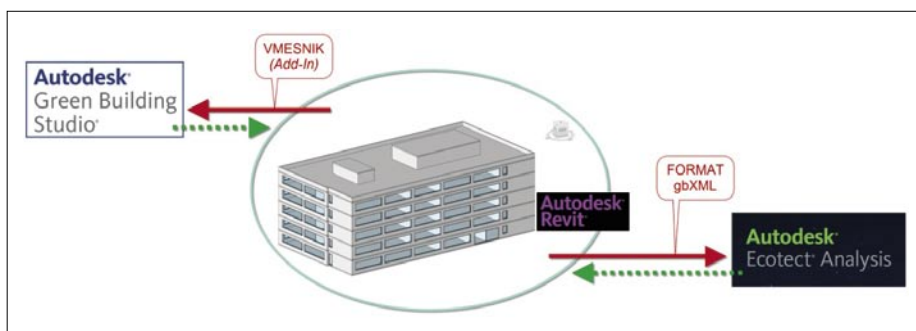
storskega informacijskega modela zgradbe uporablja t. i. družine gradnikov (sistemske, prenosljive ali unikatne). Lahko so dvo- ali tridimenzionalne, najpogosteje pa so kombinacija obeh različic. Družine se združujejo in medsebojno prepoznavajo po kategorijah. V kategorije družin razvrščamo označevalne elemente (sistemske osi, oznake za preze ipd.), osnovne gradbene elemente (stene, plošče, okna, vrata ipd.) in vizualne elemente okolice (rastline, vozni park ipd.). Za interakcijo s 3D-prostorom se večina elementov navezuje na nivoje (*Levels*) ali na referenčne ravnine (*Reference Planes*), ki omogočajo glavno in najpomembnejšo lastnost modela, tj. parametričnost. Družine so lahko najosnovnejšega tipa (generične), z urejeval-

slojenost po etažah in prostorih. Detajlnejša zasnova zahteva več časa za modeliranje, poveča možnosti pojava napak in upočasnjuje simulacijo brez bistvenih izboljšav oziroma natančnosti končnih rezultatov ((Krygiel, Nies, 2008), (Autodesk, 2010)). Uporabimo lahko generične tipe plošč in sten brez definiranja materiala oziroma sestave posameznih elementov. Tudi pri oknih lahko uporabimo najosnovnejše tipe družin oken, saj so za nadaljnjo analizo predvsem važna razmerja površin oken in sten. Vrat v model prav tako ni treba vstavljati, ker ne igrajo pomembne vloge pri analizi. Še največ pozornosti moramo posvetiti definiranju prostorov, saj moramo predvsem paziti, da je upoštevan celoten volumen modela.

Ob uporabi arhitekturnih podlog (AutoCAD) in predhodnem poznavanju zasnove objekta smo konceptualno formo zmodelirali v štirih urah. Tako smo ocenili, da bi projektant (ob povprečnem poznavanju modelirnih tehnik v programu Revit) lahko izdelal zasnovo objekta, primerno za nadaljnji izvoz in analizo, v roku enega delovnega dneva. Seveda to velja za primer, ko odgovorni arhitekt ne uporablja BIM-tehnologij in ko so analize domena drugih projektantov. Pravilni pristop oziroma BIM-proces temelji na tem, da že arhitekt pri snovanju objekta uporablja prostorski BIM-model, ki ga najprej preko konceptualnih mas formalno oblikuje in ga nato na omejen način pretvori v osnovno lupino objekta z glavnimi parametri, potrebnimi za nadaljnje analize. Zaradi enostavnosti uporabe lahko številne analize nato s tem modelom izvaja že projektant arhitekt sam, za kar se je začel aktualizirati tudi izraz Green BIM ali zeleni BIM, ki bo od arhitektov zahteval oziroma jim omogočal osnovno trajnostno analizo v začetnih fazah projektiranja, kar je tudi smiseln trajnostni pristop. To ne pomeni, da bodo arhitekti morali postati strokovnjaki



Slika 1 • Tlorisna shema tehnološkega parka in obravnavani objekt F1/1



Slika 2 • Shematski prikaz programskih povezav konceptualnega modela objekta F1/1, pripravljenega v programu Revit, za potrebe energetskih analiz

in odgovorni projektanti še za to področje, ampak bodo za nadaljnje natančnejše analize še vedno potrebni projektanti specialisti trajnostnega načrtovanja. Trajnostna analiza v zgodnejših fazah načrtovanja ima potencialno večje učinke.

Objekt konceptualne zasnove za študije različnih energetskih analiz v program Ecotect Analysis uvozimo preko izvoznega formata gbXML, v program Green Building Studio pa se povežemo preko vmesnika (*add-in*) v programu Revit.

### 3 • TRAJNOSTNA ANALIZA

#### 3.1 Ecotect Analysis 2010

V programu Ecotect lahko opravimo številne analize – od naravnega prezračevanja, vetrne energije, fotovoltaičnega zajema energije, termalne analize, solarnega obsevanja, vpliva okolice, analize senc in odbojev, dnevne osvetljenosti, akustične analize do načrtovanja sencil. Članek obravnava dve od teh študij, to

sta analiza povprečne dnevne osončenosti in študija senc.

Prvi korak predstavlja vnos objekta za analizo. Program omogoča svoje modelirno okolje, zmožen pa je uvoza tudi številnih formatov analitičnih modelov, med drugim tudi formata gbXML, ki ga pripravimo s funkcijo Export v programu Revit. Naslednji korak predstavlja

definiranje lokacije objekta v realnem prostoru. To običajno privzamemo samodejno preko vnosa vremenske datoteke (WEA – *Weather Data Files*). Če vremenskih podatkov ne najdemo v obsežni osnovni bazi, lahko te definiramo tudi preko drugih uveljavljenih formatov s pretvorbo v integrirani aplikaciji *Weather Manager*. To je bilo treba narediti tudi v obravnavanem primeru, ko smo preko povezave v programu na spletni strani Ministrstva ZDA za energijo našli in pretvorili vremenske datoteke za Ljubljano. Iz podatkov nadmorske višine

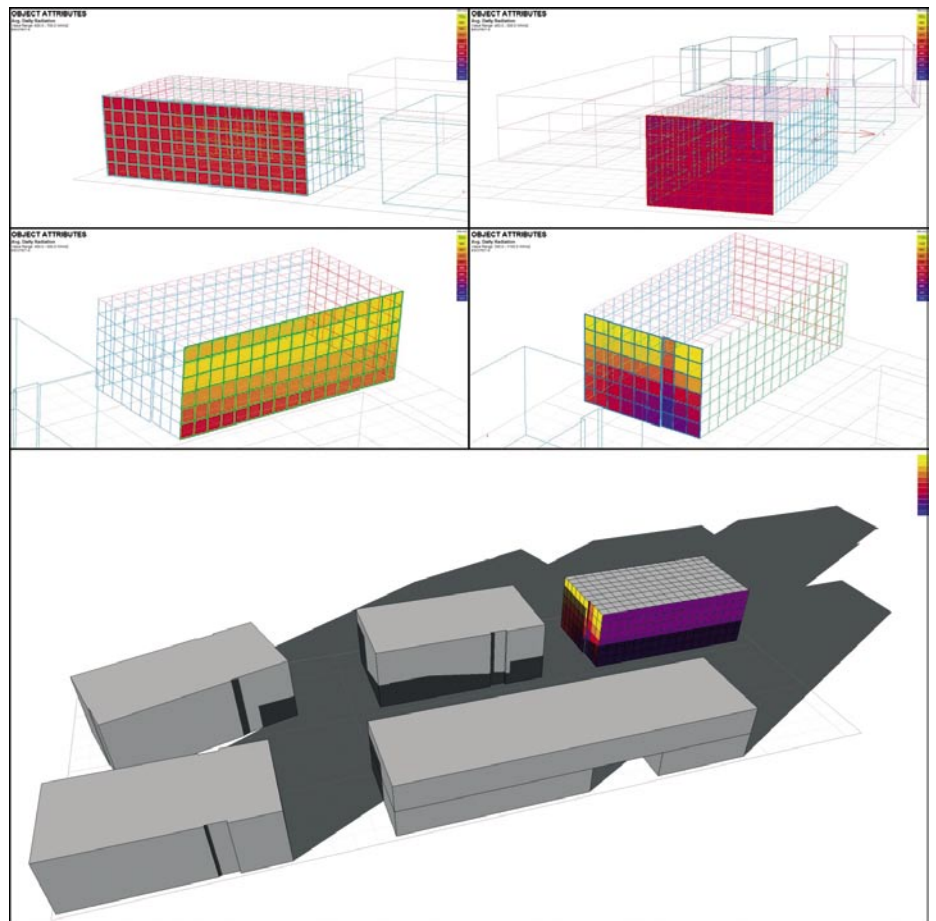
in lociranja GPS-koordinat sklepamo, da so bili vremenski podatki dobljeni preko merilnih mest na ljubljanskem letališču.

Za zeleno analizo vpliva objekta na okolico in nasprotno je bilo treba v projekt vnesti še druge objekte v okolici. Okoliške objekte F1/2, F2b, F3 in F4 smo vsakega posebej zmodelirali v konceptualni zasnovi v programu Revit, jih skupaj z obravnavanim objektom F1/1 združili v enotno datoteko ter situacijsko medsebojno razporedili in izvozili v Ecotect. Za obravnavane analize je bila nadaljnja poenostavitev objektov v enotne kubuse sprejemljiva, saj so pomembni volumni, ki vplivajo na padanje senc, računanje pa se tako pospeši. Ploskve fasade objekta F1/1 smo nato razdelili na manjše ploskve dimenzij 3000 mm za doseganje natančnejših rezultatov analize osončenosti. Parametre le-te nastavimo preko uporabniku prijaznega pogovornega okna (čarovnika), ki nas vodi skozi nastavitve in hkrati ponuja tudi krajše razlage. Grafične rezultate analize lahko prikažemo za vsako fasado posebej, lahko pa jih tudi zberemo s prikazom na vseh fasadah. Grafični prikazi rezultatov temeljijo na barvnih shemah količinske osončenosti, izražene v  $Wh/m^2$ . Vključimo lahko tudi prikaz padanja senc, kar še dodatno pomaga pri interpretaciji rezultatov.

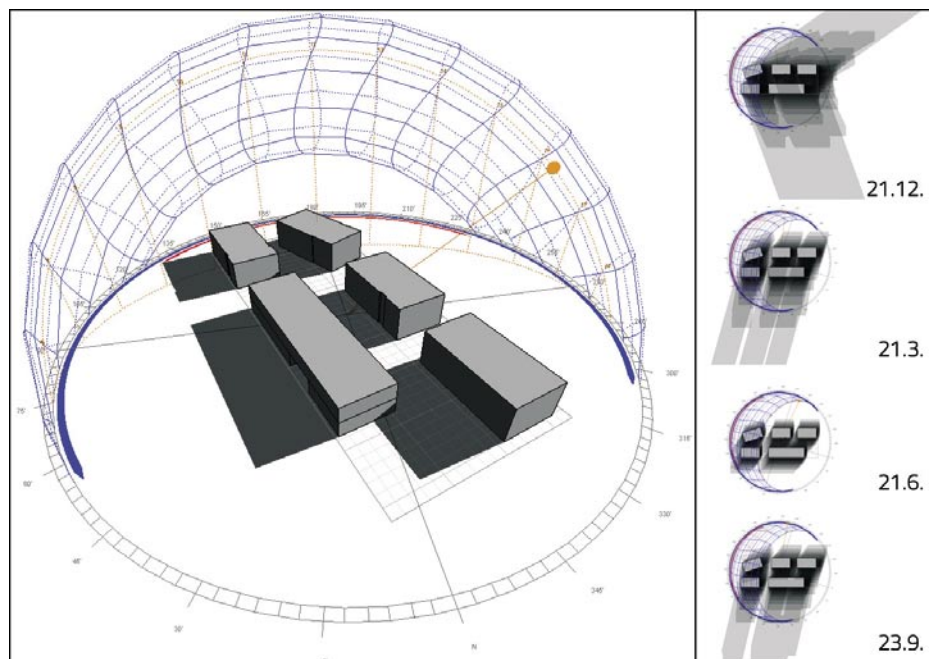
Skupaj s študijami osončenosti si projektant s študijami padanja senc na objekt zaradi sosednjih objektov in nasprotno pomaga pri razumevanju postavitve objekta v okolje. Na tak način lahko jasno grafično določa lokacijske potrebe po postavitvah dodatnih senčilnih sistemov oziroma prilagaja razmerje zasteklitvenih površin. Ecotect ponuja edinstven 3D-grafični prikaz letne poti sonca na nebu, ki uporabniku omogoča jasn vpogled v stanje na lokaciji ob kateremkoli času v letu. Omogoča tudi prikaz bolj konvencionalnih 2D-solarnih diagramov (sferični, stereografični, enakomerni, ortografični ipd.), ne nazadnje pa tudi kot numerični izpis v obliki tabele. Pomemben podatek diagramov predstavljajo vrednosti za azimut in višinski kot sonca, saj preko njih projektanti natančno določajo tudi parametre, ki oblikujejo dodatne senčilne sisteme. Zanimiva in uporabna je funkcija prikaza razpona padanja senc. Za še boljše razumevanje osončenosti oziroma osončenosti pa lahko tudi nadzorujemo prikaz padanja senc samo na izbranih površinah, tudi v obliki animacije.

### 3.2 Green Building Studio

Program Green Building Studio (GBS) deluje kot internetni program oziroma servis za en-



Slika 3 • Prikaz rezultatov povprečne dnevne osončenosti za posamezne fasade, za vse fasade hkrati in z dodatnim prikazom padanja senc (1. december ob 8.30)



Slika 4 • Dnevna in letna pot sonca in z njo povezano padanje senc objektov (levo) in prikaz razpona padanja senc (desno)

ergetska analizo celotnega objekta (*whole-building energy analysis web service*). Uporabnik si najprej namesti dodatek (*plug-in*) za program Revit ali samostojni program *Autodesk Green Building Studio Desktop*, ki je namenjen uporabnikom, ki ne uporabljajo platforme Revit in želijo uvoziti model v formatu gbXML iz katerekoli druge BIM-aplikacije. Uvoz objekta iz programa Revit nas neposredno poveže z internetnim servisom GBS, kjer sledimo petim korakom nastavitvev za začetek analize.

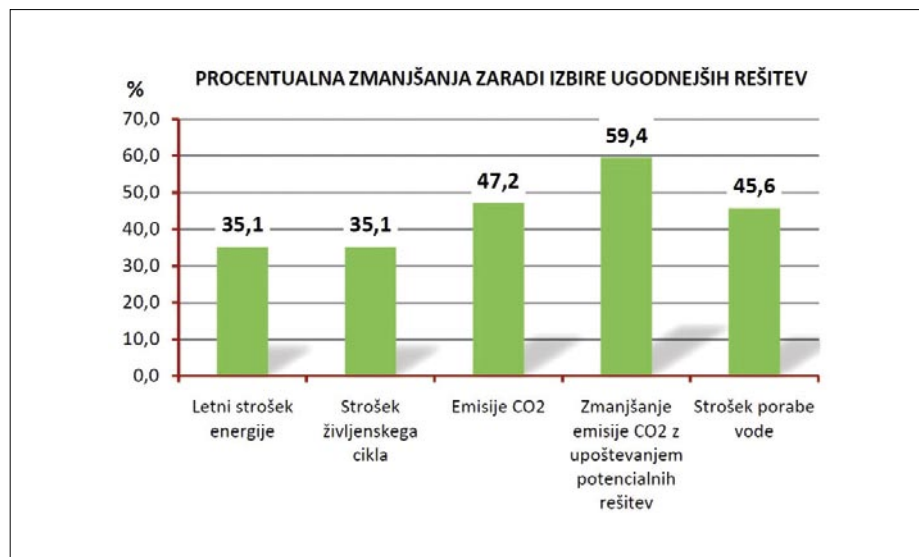
- Poimenovanje objekta, definiranje tipa zgradbe in sheme delovanja oziroma obratovanja.
  - Lociranje objekta v okolju Google Maps.
  - Pregled in izbor najprimernejše vremenske postaje, iz katere program črpa podatke.
  - Kontrola lokacije, izbira valute in cene elektrike in goriva.
  - Potrditev odgovornosti deljenja podatkov.
- Ko zaključimo z vnosom osnovnih parametrov za analizo, nas program vodi na stran z rezultati, kjer najdemo organiziranost podatkov in rezultatov:

- energijski in emisijski rezultati,
- kategorizacija po sistemu ENERGY STAR Agencije Združenih držav za varovanje okolja (*United States Environmental Protection Agency*), ki je namenjen le projektom znotraj ozemlja ZDA in je v obravnavanem projektu onemogočena,
- poraba vode,
- fotovoltaična analiza,
- kategorizacija dnevne osvetljenosti po sistemu LEED,
- vremenski podatki za lokacijo,
- 3D-prostorski pogled VRML objekta.

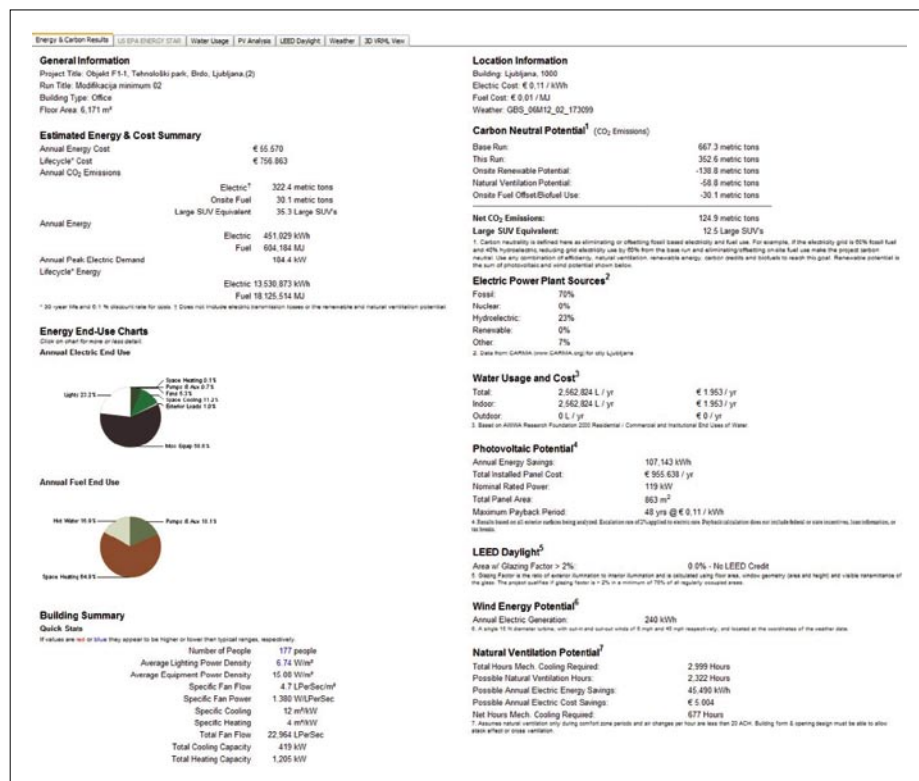
Obravnava rezultatov v članku je osredotočena na prvi in tretji zavihek, tj. energijske in emisijske rezultate in porabo vode. Sprva se nam je zdelo interpretiranje letnih emisij CO<sub>2</sub> s številom športnih terencev nekoliko neprimerno in tipično ameriško, a je primerjava povsem na mestu, saj je količina emisij CO<sub>2</sub>, izražena v tonah, veliko manj oprijemljiva oziroma razumljiva za običajnega uporabnika. Zanimiv je tudi prikaz emisijskega nevtralnega potenciala, ki sestoji iz količine osnovnih emisij objekta ter odbitkov le-teh v primeru upoštevanja možnih lokacijskih potencialov obnovljivih virov, upoštevanja možnosti naravnega prezračevanja ter uporabe biogoriv. Bistvena funkcionalnost programa je možnost primerjave različnih alternativnih rešitev projekta (*Design Alternatives*). Vse variantne rešitve lahko shranimo in jih potem tudi medsebojno primerjamo. Alternativne spremembe so razvrščene v sedem kategorij. V

prvi določamo spremembe rotacije celotnega objekta in spremembe sistemov OVK (*HVAC*) – ogrevanje, ventilacija in klimatizacija. V drugi spreminjamo učinkovitost in način kontroliranja luči (umetnega osvetljevanja) v objektu. Tretja ponuja konstrukcijske spremembe strehe. Zadnji štiri pa se nanašajo na posamezne fasade in njihovo zasnovo konstrukcije, tip in površino

zasteklitve. Zaradi trenutne aktualnosti in uporabe programa večinoma le na območju ZDA so konstrukcijske in tipske možnosti vezane na ameriške standarde in trg. Zato smo se odločili, da bo raziskava temeljila večinoma le na univerzalnih alternativnih možnostih, ki se nanašajo na rotacijo in procentualne alternative.



Slika 5 • Odstotna zmanjšanja zaradi izbire ugodnejših rešitev



Slika 6 • Končni rezultati modificiranega projekta z izbiro posameznih najugodnejših alternativnih rešitev

Pri izbiri najugodnejše alternativne rešitve smo v večini primerov izbirali med najugodnejšimi posameznimi rešitvami. Edino pri zmanjšanju zasteklitvenih površin smo upoštevali rešitev s 25-odstotnim zmanjšanjem, saj se nam je 50-odstotno zmanjšanje zdelo neprimerno v primerjavi z osnovno idejo zasnove zgradbe. Izbrali smo rotacijo za 45° v smeri urnega kazalca (od prvotno postavljene orientacije z vzdolžno osjo objekta v smeri sever–jug). Za sistem OVK smo izbrali ameriškim standar-

dom prilagojen tip *17 SEER/0,85 AFUE Split/Pkgd < 5,5 ton*. Efektivnost luči smo zmanjšali za 40 % od prvotne rešitve. Upoštevali smo uporabo senzorjev gibanja in naravne svetlobe z upravljanjem. Za tip zasteklitve smo izbrali *Insulated Green Reflective Low-e* s predvideno toplotno prehodnostjo  $U = 1,49 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Dodatno zmanjšanje stroškov je predstavljala tudi izbira varčnih vodovodnih rešitev, ki jih lahko izberemo pod zavihkom porabe vode. V osnovni rešitvi smo pustili

efektivnost stranišč, umivalnikov, tušev na standardni, medtem ko smo pri najugodnejši končni analizi uporabili rešitve z nizkim pretokom (*Low-Flow*) oziroma rešitev s senzorji pri umivalnikih (*Hands-Free*). V fazi zasnove objekta predstavljajo tako velike spremembe v efektivnosti delovanja zgradbe zelo pomembno možnost zagotavljanja visokega nivoja kakovosti projektiranja, posebno ko take rešitve dobimo na hiter, preprost in zanesljiv način, ki ga ponuja GBS.

## 4 • UGOTOVITVE IN SKLEPI

BIM se je izkazal za koristnega tudi v primeru projektiranja z upoštevanjem trajnostnih kriterijev. Sodelovanje BIM-modelirnika s programi za analizo kaže že na kar dobro interoperabilnost aplikacij.

Končni rezultati BIM-projektiranja z upoštevanjem trajnostnih kriterijev so presenetljivo pozitivni. Ko primerjamo rezultate analize osnovne zasnove zgradbe in analize z alternativnimi rešitvami v programu Green Building Studio (GBS), lahko vidimo opazne prihranke. Letni stroški energije so se zmanjšali za dobrih 30.000 evrov oziroma za 35,1 %. Emisije CO<sub>2</sub> pa so se zmanjšale kar za 47,2 % (314,7 t), prav tako so se za 45,6 % (1640 evrov) zmanjšali stroški zaradi porabe vode. K skoraj 50-odstotnemu zmanjšanju emisij CO<sub>2</sub> sta največ prispevali rešitvi izbire sistema OVK

(25 %) in zmanjšanje efektivnosti luči (16 %). Izkušnje z delom na opisanih objektih kažejo, da lahko program Revit že z osnovnim znanjem doprinese h kakovosti projektiranja. Modeliranje je preprosto, parametričnost modela pa izraža svojo prednost zlasti pri spremembah, ko se pripravljena dokumentacija sproti prilagaja in posodablja.

Program Ecotect demonstrira enostavnost izvedbe osnovnih analiz v konceptualni zasnovi projektiranja. Program je poleg osnovnih analiz in vpogleda v delovanje zgradbe namenjen detajlnjšim analizam in projektiranju v trajnostnem smislu, kar članek sicer ne obravnava. Vodenje analize povprečne dnevne osončenosti je preprosto. Interpretacija rezultatov je razumljiva in primerno grafična za takojšnje razumevanje posameznih situacij

tudi za laičnega opazovalca. Študija senc v večini primerov daje sprotne rezultate in interpretacijo, saj uporabnik ob modifikacijah časa spremlja sprotno prikazovanje padanja senc. Za še boljše prikaze program omogoča izdelavo animacij posameznih stanj.

Green Building Studio (GBS) po drugi strani predstavlja program, namenjen enostavni, efektivni in hitri analizi stanja in delovanja zgradbe, ter je izključno namenjen uporabi v konceptualni zasnovi za doseganje čim boljših energetskih in snovnih rezultatov delovanja objekta. Tako rekoč v hipu, ko je model vnesen v GBS, lahko preverimo rezultate in delovanje vnesene zasnove objekta. Tudi izvajanje alternativnih rešitev je hitro in preprosto.

Delo na tem področju nadaljujemo v kompetenčnem centru TIGR – Trajnostno in inovativno gradbeništvo. To je eden izmed sedmih kompetenčnih centrov za obdobje 2010–2013 in ima za cilj bistveno izboljšati stavbe z vidika energetske in snovne učinkovitosti.

## 5 • LITERATURA

Autodesk, Using Autodesk Ecotect Analysis and Building Information Modeling, 2010.

Povzeto po:

[http://www.kelarpacific.com/resources/Documents/using\\_autodesk\\_ecotect\\_analysis\\_and\\_building\\_information\\_modeling\\_final.pdf](http://www.kelarpacific.com/resources/Documents/using_autodesk_ecotect_analysis_and_building_information_modeling_final.pdf) (8. 4. 2011).

Cerovšek, T., Informacijski modeli zgradb in standardizacija: razvoj in uporaba ISO STEP, CIS2 in IFC, Gradbeni vestnik, avgust. 2005, letnik 54, str. 190–208, ilustr., 2005.

ECTP, Challenging and Changing Europe's Built Environment, A vision for a sustainable and competitive construction sector by 2030, 2005.

Povzeto po:

<http://www.ectp.org/documentation/ECTP-Vision2030-25Feb2005.pdf> (5. 12. 2009).

Gumilar, V., Pristop k razvoju in naloge Slovenske gradbene tehnološke platforme, 2. sestanek, 2005.

Povzeto po:

[http://www.sgtp.si/dokumentacija/Slovensko/Slovenska%20gradbena%20tehnoloka%20platforma\\_Vladimir%20Gumilar.pdf](http://www.sgtp.si/dokumentacija/Slovensko/Slovenska%20gradbena%20tehnoloka%20platforma_Vladimir%20Gumilar.pdf) (5. 12. 2009).

Krygiel, E., Nies, B., Green BIM, Successful Sustainable Design With Building Information Modeling, Indianapolis, Indiana, Wiley Publishing, str. 241, 2008.

Todorović, M., Projektiranje z orodji BIM ob upoštevanju trajnostnih kriterijev, diplomska naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2010.

Turk, Ž., Modeliranje gradbenih produktov, Zbornik 6. seminarja Računalnik v gradbenem inženirstvu. FAGG, Ljubljana, str. 1–16, 1992.

Turk, Ž., Construction IT Research – Climate Change Agenda, Trends in Civil and Structural Engineering Computing Chapter 19, str. 413–423, 2009.

# NOVI DIPLOMANTI

## UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

### VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Bojan Bazilija**, Projekt organizacije renaturacije mrtvice na Vipavi pri Renčah, mentor doc. dr. Andrej Kryžanowski

**Lucijan Marodi**, Analiza in sanacija plazu Prapretno, mentor izr. prof. dr. Janko Logar, somentor asist. Sebastjan Kuder

**Tadej Cotelj**, Preiskave mulja iz Luke Koper za načrtovanje stabilizacije z globinskim mešanjem, mentor izr. prof. dr. Janko Logar

**Jure Turk**, Statični izračun jeklenega proizvodnega objekta, mentor prof. dr. Jože Korelc

**Janez Žokalj**, Infrastrukturne potrebe za izvajanje dejavnosti, mentor doc. dr. Primož Banovec

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Mihela Baumgartner**, Projektiranje jeklenega cilindričnega rezervoarja, mentor prof. dr. Boštjan Brank

**Nuša Lazar**, Projektiranje stavb na sprejemljivo potresno tveganje – primer osem-etažne armiranobetonske stavbe, mentor izr. prof. dr. Matjaž Dolšek

**Nina Volkar**, Termika spodnje Save v času izgradnje verige hidroelektrarn, mentor prof. dr. Matjaž Četina, somentor dr. Andrej Širca

**Mojca Kogoj**, Hidravlične razmere zaradi plavja pri premostitvah, mentor prof. dr. Franc Steinman

**Urška Kocjančič**, Fazno spremenljiv material v visokoizolativnem tankoslojnim stavbnem ovoju, mentor prof. dr. Aleš Krainer, somentor prof. dr. Jožef Peternej

**Blaž Zoubek**, Projektiranje in nelinearni odziv AB montažne stavbe pri potresnem vplivu, mentor izr. prof. dr. Tatjana Isaković, somentor prof. dr. Matej Fischinger

**Blaž Hudobivnik**, Eksperimentalne preiskave in numerična analiza opečnate zidovine, mentor doc. dr. Vlatko Bosiljkov, somentor asist. Patricija Cotič

**Andrej Anžlin**, Numerične simulacije potresnega odziva Yfong zidane stavbe, mentor izr. prof. dr. Matjaž Dolšek, somentor dr. Matija Gams

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ VODARSTVA IN KOMUNALNEGA INŽENIRSTVA

**Nejc Vesel**, Uporaba odvečnega blata iz občinske komunalne čistilne naprave, mentor izr. prof. dr. Viktor Grilc, somentor izr. prof. dr. Jože Panjan

**Črt Pečar**, Integralni sistemi za ravnanje z odpadki v Obalni regiji in možnosti njihove predelave, mentor izr. prof. dr. Viktor Grilc

**Urška Martinčič**, Modeliranje izmenjave živega srebra med sedimentom in vodo v Tržaškem zalivu, mentor doc. dr. Dušan Žagar, somentor prof. dr. Matjaž Četina

**Sandi Hribar**, Študija odvoda in čiščenja vode v občini Grosuplje z zaščito potoka Grosupeljščica, mentor izr. prof. dr. Jože Panjan, somentor asist. dr. Mario Krzyk

### MAGISTRSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Anžej Kne**, Razvoj večkriterijskega modela za celovito ocenjevanje stanovanjskih enot, mentor izr. prof. dr. Jana Šelih

**Zoran Kuhar**, Metodologija za finančno analizo in kontrolo izvajanja projektov v gradbeništvu, mentor izr. prof. dr. Jana Šelih

**Jernej Nučič**, Obvladovanje tveganj v gradbenem izvajalskem podjetju, mentor izr. prof. dr. Jana Šelih

## OPERATIVNO GRADBENIŠTVO VISOKOŠOLSKI PROGRAM

**Damjan Podgorelec**, Ocena potresne odpornosti stanovanjske hiše v Ljubljani, mentor izr. prof. dr. Matjaž Dolšek

**Elena Bajc**, Vrednotenje kmetijskih zemljišč v postopku komasacije, mentor izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač

**Primož Janežič**, Statična analiza poslovno-trgovskega centra z nosilno jekleno konstrukcijo, mentor prof. dr. Jože Korelc, somentor asist. dr. Peter Skuber

**Leon Pelc**, Inženirska predloga za informacijski modelirnik stavb, mentor doc. dr. Tomo Cerovšek

**Žan Gominšek**, "Parkiraj in se pelji" parkirišča, mentor viš. pred. mag. Jure Kostanjšek

**Marko Jovanovski**, Ocena potresne odpornosti zidane enodružinske hiše v Grosuplju, mentor izr. prof. dr. Matjaž Dolšek

**Andraž Savarin**, Projektiranje lesene strehe, mentor doc. dr. Jože Lopatič

**Matej Pukšič**, Razvoj nepremičninskega projekta "Stanovanjski bloki Selo", mentor izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač

## UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

### VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Simon Balazič**, Projektiranje AB kontinuirnega nosilca, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentor Aljoša Klobučar, univ. dipl. inž. grad.

**Matjaž Lorenčič**, Montažna AB hala s primarnim nosilcem spremljivega prereza, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentor Aljoša Klobučar, univ. dipl. inž. grad.

**Klemen Štarkelj**, Sanacija in ojačitev večstanovanjske hiše, mentor doc. dr. Andrej Štrukelj

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Matej Ferlinc**, Uporaba programa Dlubal RSTAB za projektiranje sovprežnih nosilcev, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentor doc. dr. Simon Šilih

**Mateja Konobelj**, Primerjava varovanja globoke gradbene jame z Benotto piloti in jet-grouting slopi, mentor izr. prof. dr. Bojan Žlender, somentor doc. dr. Borut Macuh

**Lidija Kuhelnik**, Ekologija lesene gradnje, mentor red. prof. dr. Miroslav Premrov, somentor pred. dr. Vesna Žegarac Leskovar

**Jernej Maher**, Analiza vpliva vetra na strešno konstrukcijo Motodroma Petrolija, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentorja viš. pred. Viktor Markelj, univ. dipl. inž. grad. in doc. dr. Simon Muhič

**Klara Pucko**, Linijski toplotni most ob odprtinah v ovoju lahkih konstrukcij, mentor izr. prof. dr. Dean Korošak

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

#### – Bolonjski študijski program 1. stopnja

Študij so zaključili z diplomskim izpitom:

**Rok Časar**

**Benjamin Čoh**

**Lea Gomboc**

**Martin Heričko**

**Andrej Jazbec**

**Matjaž Klemenčič**

**Karmen Košutar**

**Rebeka Kržaj**

**Matjaž Leskovar**

**Tadej Medved**

**Gorazd Mernik**

**Urh Pavič**

**Miha Pukšič**

**Nina Repolusk**

**Anže Rosec**

**Uroš Rozman**

**Gregor Senekovič**

**Mitja Smej**

**Niko Smej**

**Martin Špes**

**Žiga Unuk**

**Matic Urbanč**

**Vito Žalig**

**UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA  
GRADBENIŠTVO – EKONOMSKO POSLOVNA  
FAKULTETA**

**INTERDISCIPLINARNI UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GOSPO-  
DARKEGA INŽENIRSTVA – SMER GRADBENIŠTVO**

**Nina Jug**, Vpliv izbire postopka izračuna nihajnega časa na velikost potresnega vpliva in ekonomske posledice, mentorja izr. prof. dr. Matjaž Skrinar – FG in doc. dr. Andreja Lutar Skerbinjek – EPF, so-mentor dr. Tomaž Žula

**Denis Slanič**, Ekonomski in tehnični vidik energetske sanacije večstanovanjskega objekta v Kamnici, mentorja doc. dr. Nataša Šuman – FG in red. prof. dr. Anton Hauc – EPF

**INTERDISCIPLINARNI UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GOSPO-  
DARKEGA INŽENIRSTVA – SMER GRADBENIŠTVO**

**– Bolonjski študijski program 1. stopnje**

**Jasmina Kevrić**, Organizacija ureditve gradbišča in primer izkaza poslovnega izida za gradnjo Varstveno delovnega centra INCE Mengeš, mentorja doc. dr. Uroš Klanšek – FG in doc. dr. Iztok Kolar – EPF

**Urška Kmpolšek**, Organizacija in ovrednotenje stroškov ureditve gradbišča Zdravstvenega doma dr. Adolfa Drolca v Mariboru, mentorja doc. dr. Uroš Klanšek – FG in doc. dr. Barbara Bradač Hojnik – EPF

**Darko Kranjc**, Nanotehnologija v gradbeništvu – nanogradnja, mentorja red. prof. dr. Danijel Rebolj – FG in red. prof. dr. Duško Uršič – EPF

**Matej Levstek**, Vzpostavitev in vrednotenje katastra gospodarske javne infrastrukture, mentorja izr. prof. dr. Boštjan Kovačič – FG in red. prof. dr. Duško Uršič – EPF, somentor Rok Kamnik, univ. dipl. inž. geod.

**Nikola Nassif**, Analiza listin v okviru obnovljivih virov energije in učinkovite rabe energije, mentorja doc. dr. Tomaž Pliberšek – FG in red. prof. dr. Duško Uršič – EPF

**Mateja Robnik**, Vrednotna analiza toplotnoizolacijskih materialov, mentorici doc. dr. Nataša Šuman – FG in doc. dr. Aleksandra Pisnik Korda – EPF

**Marko Žižek**, Geodetske meritve in časovno planiranje monitoringa pri gradnji garažne hiše, mentorja izr. prof. dr. Boštjan Kovačič – FG in red. prof. dr. Duško Uršič – EPF, somentor Rok Kamnik, univ. dipl. inž. geod.

Študij so zaključili z diplomskim izpitom:

**Jernej Babij**  
**Ilija Gavrić**

**Anja Krobat**  
**Mojca Roženičnik Korošec**

Rubriko ureja • **Jan Kristijan Juteršek**, univ. dipl. inž. grad.

## KOLEDAR PRIREDITEV

**16.-18.11. 2011**

**10. mednarodni simpozij o gradnji predorov in podzemnih prostorov**

Kongresni center MONS, Ljubljana, Slovenija  
[www.ifa-slovenia.si](http://www.ifa-slovenia.si)

**24.-25.11.2011**

**13. kolokvij o asfaltih in bitumnih**

Kranjska Gora, Slovenija  
[www.zdruzenje-zas.si](http://www.zdruzenje-zas.si)

**7.-9.2.2012**

**56. Betontage: Wandel gestalten**

Neu-Ulm, Nemčija  
[www.betontage.de/programm/fachprogramm.html](http://www.betontage.de/programm/fachprogramm.html)

**7.-9.3.2012**

**3rd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials**

Kassel, Nemčija  
[www.hipermat.de](http://www.hipermat.de)

**12.-17.3.2012**

**6th World Water Forum**

Marseille, Francija  
[www.worldwatercouncil.org/index.php?id=6th\\_forum\\_kick-off](http://www.worldwatercouncil.org/index.php?id=6th_forum_kick-off)

**19.-20.4.2012**

**Betontag 2012**

Dunaj, Avstrija  
[www.betontag.info](http://www.betontag.info)

**22.-27.4.2012**

**European Geosciences Union  
General Assembly 2012**

Dunaj, Avstrija  
[www.meetings.copernicus.org/egu2012/](http://www.meetings.copernicus.org/egu2012/)

**23.-27.4.2012**

**12th Congress Interpraevent 2012**

Grenoble, Francija  
[www.interpraevent.at/palm-cms/upload\\_files/Kongresse/Flyer-Interpraevent-2012.pdf](http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Kongresse/Flyer-Interpraevent-2012.pdf)

**11.5.2012**

**3. Münchener Tunnelbau-Symposium**

München, Nemčija  
[www.unibw.de/geotechnik](http://www.unibw.de/geotechnik)

**29.5.-1.6.2012**

**SSCS International Conference Numerical Modeling Strategies for Sustainable Concrete Structures**

Aix en Provence, Francija  
[www.sscs2012.com](http://www.sscs2012.com)

**11.-14.6.2012**

**Concrete structures for a sustainable community**

Stockholm, Švedska  
[www.fibstockholm2012.se](http://www.fibstockholm2012.se)

**17.-20.6.2012**

**4th International Symposium on Bond in Concrete 2012: Bond anchorage, detailing**

Brescia, Italija  
[www.rilem.net/eventDetails.php?event=461](http://www.rilem.net/eventDetails.php?event=461)

**8.-12.7.2012**

**10th International Conference on Concrete Pavements Québec**

City, Québec, Kanada  
[www.concretepavements.org](http://www.concretepavements.org)

Rubriko ureja • **Jan Kristijan Juteršek**, ki sprejema predloge za objavo na e-naslov: [msg@izs.si](mailto:msg@izs.si)