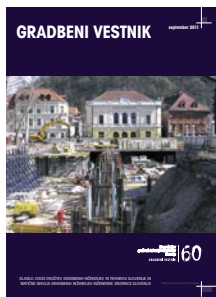




Zveza društev  
gradbenih inženirjev in tehnikov  
Slovenije  
GRADBENI VESTNIK

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, september 2011, letnik 60, str. 229-256

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 vstrel 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 **230**

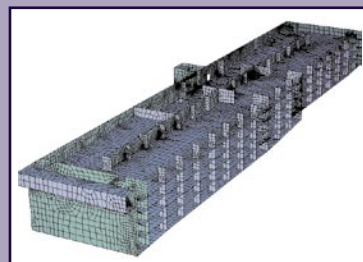
prof. Vukašin Ačanski, univ. dipl. inž. grad.

Vesna Filipič, dipl. inž. grad.

Marko Živec, univ. dipl. inž. grad.

### **PROJEKTIRANJE IN IZVEDBA PODZEMNE PARKIRNE HIŠE KONGRESNI TRG LJUBLJANA**

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF UNDERGROUND PARKING  
HOUSE CONGRESS SQUARE LJUBLJANA

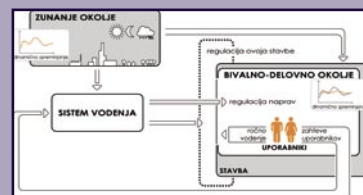


stran **237**

asist. dr. Mitja Košir, univ. dipl. inž. arh.

### **ANALIZA REGULACIJSKIH SISTEMOV BIVALNEGA OKOLJA V STAVBAH**

ANALYSIS OF CONTROL SYSTEMS FOR BUILDING PERFORMANCE



stran **246**

prof. dr. Miha Tomaževič, univ. dipl. inž. grad.

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

Aleš Oblak, univ. dipl. inž. str.

### **PROTIPOTRESNO UTRJEVANJE OPEČNIH ZIDOV S KOMPOZITNIMI OBLOGAMI**

SEISMIC STRENGTHENING OF BRICK MASONRY WALLS  
WITH COMPOSITE COATINGS



## Vabilo

33. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije

Slika na naslovnici: Gradnja podzemne garaže na Kongresnem trgu v Ljubljani,  
foto: Marko Živec

# PROJEKTIRANJE IN IZVEDBA PODZEMNE PARKIRNE HIŠE KONGRESNI TRG LJUBLJANA

## DESIGN AND IMPLEMENTATION OF UNDERGROUND PARKING HOUSE CONGRESS SQUARE LJUBLJANA

prof. Vukašin Ačanski, univ. dipl. inž. grad.

Vesna Filipič, dipl. inž. grad.

Marko Živec, univ. dipl. inž. grad.

GRADIS BP Maribor, d. o. o., Lavričeva ulica 3, 2000 Maribor

Strokovni članek

UDK: 625.748.28

**Povzetek** | Mestna občina Ljubljana, oddelek za urejanje prostora, je bila investitor podzemne parkirne hiše na območju Kongresnega trga s spremljajočimi objekti. Gradnja garažne hiše je potekala v samem središču Ljubljane. V času zasnove objekta in njegove izvedbe so se pojavili problemi zaradi neugodne geološke sestave tal, bližine obstoječih zgradb in prometnic, podtalnice v dveh nivojih in obširnih arheoloških izkopavanj. Glede na navedene okoliščine je bilo treba uvesti nove pristope za gradnjo. Izbrana je bila tehnologija gradnje po principu bele kadi ter varovanja gradbene jame z diafragmo, razprto s ploščami, ki so konstrukcijsko spojene in vpete v AB-polnilne stene ter podprte z vrsto srednjih stebrov. Objekt se je gradil od zgoraj navzdol ob podrobnem opazovanju pomikov okoliških zgradb, diafragme in nivoja talne vode.

**Summary** | Municipality of Ljubljana, Department of Land Management, is the investor in the construction of underground parking house in the area of Congress Square with surrounding buildings. The construction of the parking garage is implemented in the very heart of Ljubljana. At the time of building design and its execution several inconvenient geological problems have emerged as well as the problems concerning the proximity of existing buildings and roads, ground water in two levels, and extensive archaeological excavations. Under existing conditions new approaches to the construction needed to be introduced. The technology of the white wat and the security of the excavation pit that introduces a diaphragm braced by means of slabs, which are structurally connected and fixed to the reinforced concrete walls being supported by the central series of columns, were chosen. The structure has been built by from top to bottom technology with the reinstatement of more detailed monitoring displacement of surrounding buildings, the diaphragm, and the level of ground water.

### 1 • UVOD

Kongresni trg je eden od osrednjih trgov v Ljubljani. Med letoma 1945 in 1990 se je imenoval Trg osvoboditve. Trg je bil delno odprt prostor (nekdanji jarek) že v času

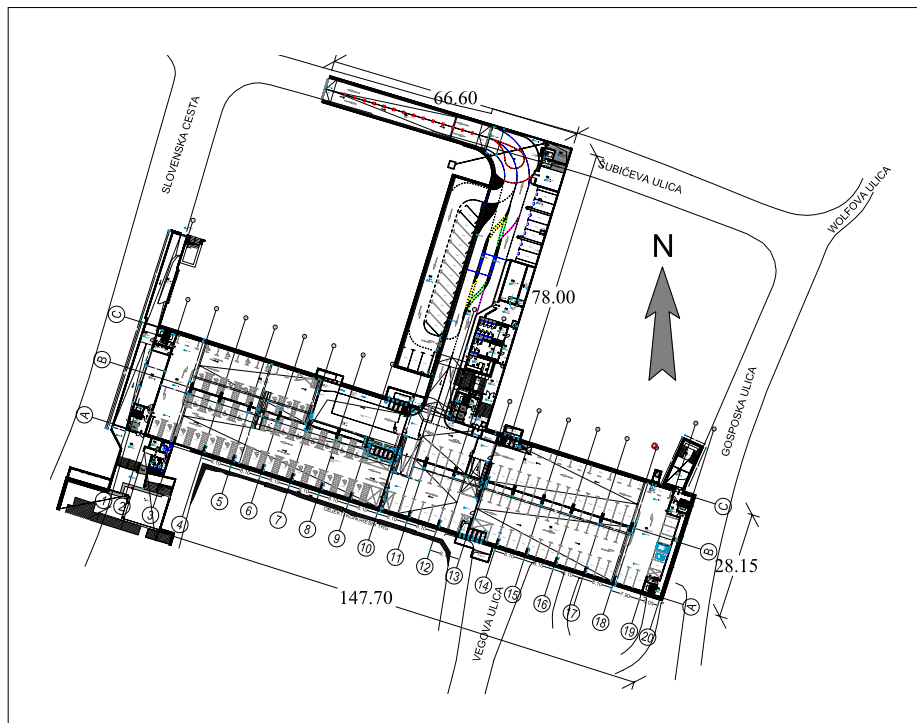
baroka, toda za potrebe kongresa Svete alianse, ki je potekal v Ljubljani, so trg razširili in preuredili na prostoru podrtega kapucinskega samostana. Parkovne površine so uredili po

kongresu, sedanjo ureditev s platanami je predlagal arhitekt Jože Plečnik pred drugo svetovno vojno. Po Plečnikovih načrtih so tlakovali odprti prostor, ki je služil kot parkirišče. Večji del prostora danes zavzema park Zvezda, ki je dobil ime zaradi simetrične, zvezdaste razporeditve poti, ki tečejo čez celoten park.

## 2 • SPLOŠNO O OBJEKTU

Garažna hiša ima štiri izhode, in sicer na severovzhodni strani tako imenovani izhod Paviljon, izhod park Zvezda, podhod do Plečnikovega podhoda in izhod Bukvarna. Parkirna hiša ima 750 parkirnih mest, od tega jih bo 41 za invalide. Garaža ima na zahodni strani pet etaž, medtem ko jih ima na vzhodni štiri, to pomeni, da garažne povozne plošče potekajo zunajnivojsko pod različnimi padci. Etažne višine so 2,60 m. Prometni režim je urejen tako, da promet poteka enosmerno po nivojskih ploščah in preko ramp med ploščami. V garažni hiši je na zahodni strani predvidena prezentacija arheoloških najdb, najdenih na območju Kongresnega trga. Parkirni prostori bodo dolžine 4,95 m in širine 2,60 m, to so tako imenovani nadstandardni parkirni prostori. Parkirni prostori za invalide bodo širine 4,05 m. Širina vozne rampe je 5,10 m.

Tehnologija gradnje garažne hiše je edinstvena v Sloveniji in poteka od zgornje plošče (kota - 0,40 m pod površjem) proti talni plošči na koti - 16,70 m oziroma - 12,66 m s sprotno končno finalizacijo plošč, sten in infrastrukturo.



Slika 1 • Tioris garaže

## 3 • SPLOŠNO O PROJEKTU

Projekt garažne hiše je razdeljen na tri faze, in sicer na projekt varovanja gradbene jame, projekt konstrukcije garaže s spremljajočimi objekti in projekt zunanje ureditve.

### 3.1 Varovanje gradbene jame

#### 3.1.1 Uvod

Varovanje gradbene jame garažne hiše se je izvedlo z AB-diafragmo debeline 65 cm, na katero se je naknadno izvedla AB-polnilna stena debeline 30 cm. Debelina dokončno izvedenih obodnih sten je tako 95 cm. Konstrukcija je razprta z razpornimi ploščami debeline 40 cm in 35 cm. Razporne plošče so z diafragmo konstrukcijsko spojene in so vpete v AB-polnilne stene. Podprte so z vrsto srednjih stebrov na rastrski razdalji 8,10 m. Plošče so v prečni smeri horizontalne, v sredini garaže pa so zamaknjene za pol etaže. Zamik se proti zahodnem in vzhodnem delu postopoma zmanjšuje in se na koncu izravnava.

Diafragma je dolžine od 22,70 m do 30,00 m, na območju dovoza pa od 20,10 do 22,80 m. Zaključni se na absolutnih kotah od 267,00 m. n. v. do 269,70 m. n. v. in se spreminja usklajeno z naklonom okolice. Vpetost diafragme je različna glede na zelo heterogeno geološko sestavo obravnavanega območja. Izkop gradbene jame sega pod nivo talne plošče in znaša od 17,50 m (kota 278,38 m. n. v.) do 13,26 m (kota 280,00 m. n. v.). Diafragma je iz betona C30/37, XC4, XD3, XF3, S4, PVII, Dmax 16 mm in armirana z rebrasto armaturo BSt 500S (B). Zaključni se 50 cm pod spodnjo površino prve plošče, nad njo sta se nato izvedli armiranobetonska greda in krovna plošča.

Pred pričetkom izvedbe diafragme se je izvedel vodilni kanal. Dolžina posameznih odsekov diafragme je bila odvisna od vsakokratne stabilnosti tal, izvedene dolžine so od 2,20 m do 4,50 m. Pri izvedbi diafragme ima bistveno vlogo bentonitna izplaka, ki med izkopom za

diafragmo poskrbi za stabilnost sten izkopa za panele. Izplaka s svojimi lastnostmi zagotavlja varnost izkopa panela. Vodilni kanali imajo poleg funkcije dovoda bentonitne izplake tudi funkcijo vodenja in pozicioniranja grabeža pri izkopu. Glede na to, da geološka sestava zemljin okolice ne omogoča izvedbe geotehničnih sider, je bil s projektom predviden izkop gradbene jame po fazah z razpiranjem. Konstrukcijski elementi varovanja gradbene jame so istočasno bodoči končni konstrukcijski elementi objekta garažne hiše.

Glede na oddaljenost objektov v okolici in geološko sestavo na mikrolokaciji se je izvedel izkop do nivoja -1 razporne plošče na območju osi od 1 do 4 in od 13 do 20, na ostalem območju pa je bila predvidena izvedba krovne razporne plošče in nato izkop pod njo. Na tem območju so stanovanjski objekti oddaljeni ca. 2,0 m in ni dopusten konzolni odkop diafragme.

#### 3.1.2 Geostatična analiza s programom PLAXIS 8.6

Geostatična analiza s programom PLAXIS 8.6 je bila izvršena po metodi končnih elemen-

tov v pogojih ravninskega deformacijskega stanja. Za modeliranje zemljin smo uporabili nelinearen elastoplastični konstitucijski zakon z upoštevanjem izotropnega utrjevanja (Hard-Soil-model). Izvedena je bila analiza v šestih karakterističnih prerezih z upoštevanjem faznosti razpiranja. Konstrukcija je bila modelirana kot ploskovno/linijska ustrezne togosti. Izdelovalec geotehničnega poročila je podal strižne karakteristike zemljin in vrednosti presiometričnega modula elastičnosti (deformabilnosti) za posamezne sloje. Karakteristike zemljin so bile določene na osnovi terenskih in laboratorijskih preiskav. Ugotovljeno je bilo, da je sestava tal zelo heterogena. Pod površjem terena se sprva pojavi 4 m debel

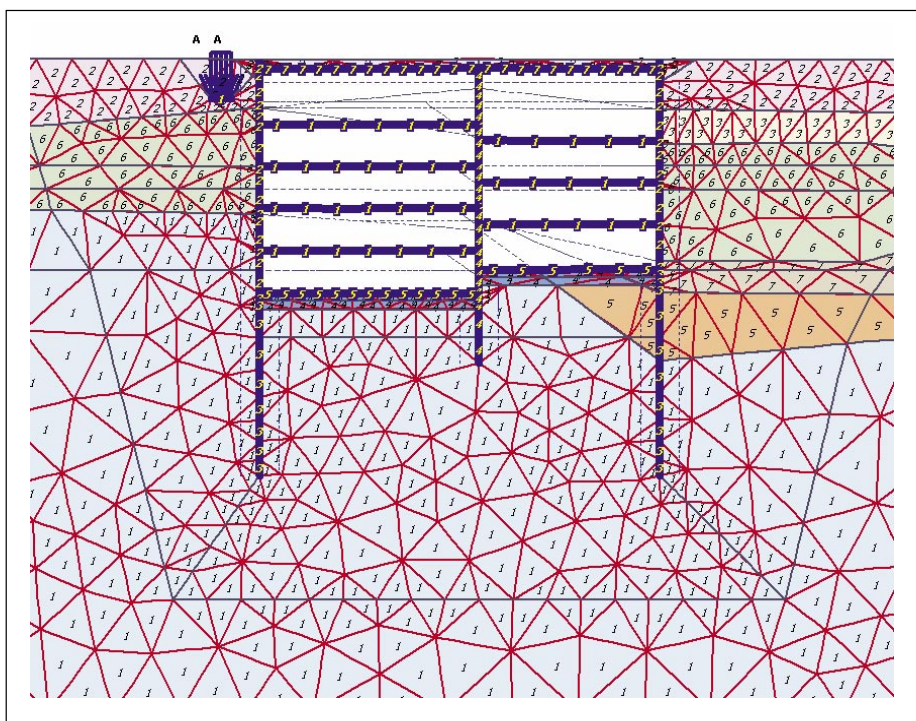
umetni masiv. Temu sledi mlajši savski nanos, ki sega od 4 do 9 m pod površino. Sledijo barjanski sedimenti z glinenimi melji in peski različnih konsistenc. Prodnati nanosi se pojavljajo pod globino približno 20 m. Hidrogeološki pogoji na lokaciji so zelo zahtevni zaradi viseče podtalnice, ki je ujeta v zgornje bolj prepustne prodno-peščene zemljine, ki ležijo na manj prepustnih meljnih glinah. Pojavlja se viseča gladina podzemne vode na globinah približno 7 do 8 m pod površjem. Te plasti segajo različno globoko, ponekod tudi pod spodnjo gladino podzemne vode. Vodonosnik zaradi tega mestoma deluje kot polodprt ali polzaprt vodonosnik. Zaradi tega je bilo treba računati z omočenostjo

plasti in pornimi tlaki že od globine 7,50 m naprej. Prava podtalnica je ugotovljena na absolutni koti 281,50 m. n. v.

Pri geostatični analizi varovanja gradbene jame je bilo upoštevano, da dno gradbene jame sega okoli 3 m pod piezometrično gladino podzemne vode pri normalnih razmerah, pri 20-letnih vodah pa lahko sega do 5,5 m pod gladino. Določila se je potrebna globina diafragme, da se prepreči večji dotok vode v gradbeno jamo in izpiranje finih frakcij.

Računski koraki in obtežni primeri so bili pri analizi modelirani skladno s tehnologijo izgradnje od zgoraj navzdol ob upoštevanju dveh nivojev talne vode. Opravljeni sta bili analiza mejnega stanja uporabnosti in analiza mejnega stanja stabilnosti s kontrolo globalne stabilnosti. Mejno stanje stabilnosti smo določili ob redukciji strižnih parametrov ( $\phi$ -redukcija), pristop 3. Direktna uporaba pristopa 2 ni možna, namesto faktoriranja vplivov faktoriramo učinke vplivov (notranje statične veličine). Pri dimenzioniranju konstrukcijskih elementov smo upoštevali manj ugodne vrednosti iz obeh analiz.

Na sliki 2 je prikazan karakteristični računski model za geostatično analizo, v preglednici 1 pa so prikazane materialne karakteristike zemljin.



Slika 2 • Karakteristični računski model

### 3.1.3 Rezultati geostatične analize

Geostatične izračune smo izvajali po evrokodih (ECO, EC1, EC2, EC4, EC7, SIST EN 1538:2002). Preverili smo, kolikšni so pomiki in kolikšno je povečanje notranjih statičnih veličin v konstrukciji, pri končni računski varnosti  $F = 1,0$  (serviceability limit state). Nato smo izvedli redukcijo strižne trdnosti ( $c$ - $\phi$  reduction) z varnostnim faktorjem  $F = 1,25$  (po SIST EN 1997-1), za vsako fazo izkopa pred izvedbo razporne plošče. Konstrukcijo smo na koncu tudi globalno preverili.

	$\gamma_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c_{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	$E_{so}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )
1 Q1p	21,00	1,00	36,0	65000,00
2 NA	21,00	1,00	35,0	45000,00
3 Q2p	21,00	1,00	35,0	40000,00
5 Q1g	20,50	1,00	28,0	4450,93
6 Q2g	20,50	1,00	27,0	5572,53
7 Q2pe	20,50	1,00	31,0	5572,53

Preglednica 1 • Materialne karakteristike zemljine

	$N_{max}$ (kN/m)	$Q_{max}$ (kN/m)	$M_{max}$ (kNm/m)	hor. pomik (mm)	
Diafragma na južni strani (ob hišah)	-1140,00	572,47	877,00	-560,35	14,60
Diafragma na severni strani (ob parku)	-980,40	-694,70	850,25	-912,58	17,00
Sredinski stebri osno na 8,10 (65 x 280 cm)	-534,32	609,42	816,13	-457,25	9,90
Razporna plošča RP - 4	-843,37	99,75	146,32	-248,22	/
Razporna plošča RP - 5	-694,90	115,70	145,60	-315,30	/

Preglednica 2 • Največje notranje statične veličine in pomik konstrukcijskih elementov



Rezultati geotehničnih izračunov izkazujejo največje obremenitve AB-diafragme, razpornih plošč in sredinskih stebrov v nivoju neposredno nad temeljno ploščo objekta. Skoraj v vseh analiziranih profilih je kritična faza izkop za kamnito temeljno blazino pod talno ploščo. Upoštevana je bila tudi možnost hipnega dviga spodnje podtalnice za 2,50 m. Največje notranje statične veličine v konstrukcijskih elementih pri računski varnosti  $F = 1,0$  so prikazane v preglednici 2.

Preglednica 2 prikazuje največje notranje statične veličine in pomike v konstrukcijskih elementih pri računski varnosti  $F = 1,0$ .

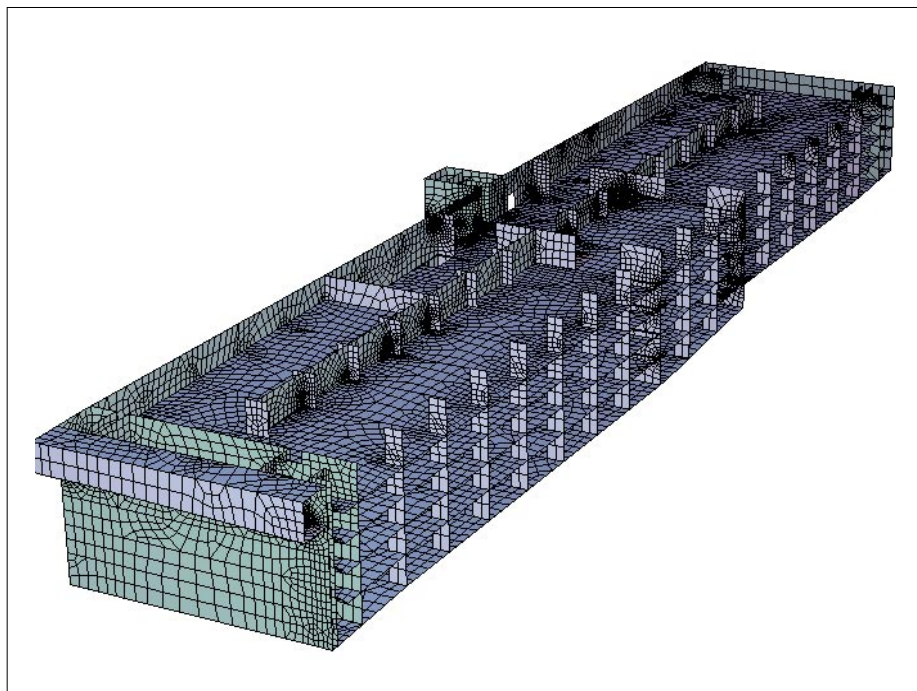
Kot pomemben rezultat geotehnične analize so bile mejne vrednosti pomikov – deformacij konstrukcijskih elementov garažne hiše in sosednjih objektov. Izračunani so bili pričakovani pomiki v horizontalni in vertikalni smeri na diafragmi in okoliških objektih. Projektne vrednosti so se primerjale z vrednostmi meritev monitoringa, ki se je izvajal po programu tehničnega opazovanja. Dosedanja merjenja so pokazala vrednosti znotraj pričakovanega. Geostatična analiza je pokazala, da bo projektirana globina diafragme preprečila večji dotok vode v gradbeno jamo, kar se je med izvedbo spremljalo z hidrogeološkim monitoringom na devetih avtomatskih merilnih mestih. Znotraj diafragme je bilo izvedenih 10 vodnjakov premera 500 mm, ki segajo pod koto dna izkopa in bodo omogočili znižanje nivoja podtalnice znotraj gradbene jame. Izvedena je bila tudi kontrola delovanja vzgonskih sil na zgradbo v primeru hitrega dviga spodnje podtalnice. Analize so pokazale, da po izvedbi talne plošče in opustitvi črpanja ne bo vertikalnega pomika konstrukcije.

### 3.2 Konstrukcija garaže s spremljajočimi objekti

#### 3.2.1 Uvod

Garaža pod Kongresnim trgom je dolga 147,70 m, široka 28,15 m in globoka 16,70 m na zahodni strani (kota 281,40 m. n.v.). Nadmorska višina zgornje kote plošče je 298,10 m. Na vzhodni strani je garaža globoka 12,66 m (kota dna talne plošče je 280,60 m. n.v.). Največja globina je v osrednjem delu konstrukcije in znaša 16,90 m (kota dna talne plošče 278,98 m. n.v.).

Glavni vhod v garažo je preko podvoza, ki poteka skozi park Zvezda, s katerega je speljana rampa do kote nivoja terena. V podvozu je elektrotransformator za napajanje garažne osvetlitve in dizelski agregat za morebitni izpad električne energije. V podvozu sta tudi



Slika 3 • Računski model konstrukcije garaže

požarna tehnika in požarni bazen s sistemom sprinkler v primeru požara v garaži.

Garažna hiša je v celoti izvedena brez dilatacij (integralna konstrukcija) razen dovodne rampe, ki je dilatirana od dovoza. Debeline etažnih plošč so 35 cm in so armirane s klasično armaturo. Debelina vrhnje plošče na koti – 0,40 m (298,10 m. n. v.) je debeline 40 cm in nad njo je predvidenih dodatnih 40 cm naklonskega betona, hidroizolacije, toplotne izolacije in Plečnikovih pohodnih plošč, katerih posebnost je, da nobena ni pravilne pravokotne oblike, zato bodo plošče narejene na gradbišču.

Obodne stene so debeline 30 cm in so neposredno vezane na diafragme debeline 65 cm preko tako imenovanih zadrž (slika 4), torej bodo v končnem stanju obodne stene debeline 95 cm. Armaturo tako imenovanih zadrž, ki zagotavljajo monolitnost med diafragmo in steno, so premera 14 mm in so na razdalji 15 cm.

Pri izbrani tehnologiji gradnje se plošče obešajo na stene, te pa so obešene na diafragme. Tak način tudi omogoča, da se sproti finalizirajo že zgrajene etažne plošče.

#### 3.2.2 Statična analiza s programom SOFISTIK

Statični račun je bil izdelan s pomočjo računalniškega programa SOFISTIK (račun prostorskih lupinastih konstrukcij po MKE). Plošče in stene so bile generirane z lupina-

stimi končnimi elementi. Računski model je bil definiran tako, da se kar najbolj približa dejanskemu objektu (slika 3).

Upoštevana je obtežba v skladu s standardi SIST EN 1991 do SIST EN 1997. Kot statična obtežba so bili upoštevani lastna teža posameznih konstrukcijskih elementov, sloji obdelave, zemeljski pritisk in koristna obtežba  $q_k = 2,5-5,0 \text{ kN/m}^2$  ( $Q_k = 20,0-90,0 \text{ kN}$ ) za garaže kategorije F in povzorne površine kategorije G v skladu s standardom SIST EN 1991-1.

#### 3.2.3 Postopek gradnje

Najprej se je na terenu izvedla podlaga opaža etažne plošče s potrebnim nadvišanjem in naklonom, na katero so se položile opažne plošče. Te morajo biti primerno očiščene in stikovane, saj je to spodnje lice plošče, ki bo ostalo tudi vidno brez kakršnihkoli popravkov. Nato se pritrdijo na opažne plošče PVC-cevi premera 120 mm na razdalji 120 cm za kasnejše betoniranje sten v etaži pod ploščo (slika 4).

Betoni etažnih plošč so kvalitete C 35/45 (XC4, XD3, XF3, CI-0,20, Dmax 16, S4, PV-III), stebrov in sten C 25/30 (XC4, XD3, XF3, CI-0,20, Dmax 16, S4, PV-III), vendar smo v nadaljevanju spremenili kvaliteto betona stebrov in sten na C 35/45 zaradi hitrejše vezave in posledično prihranka pri času izvedbe ter armirali z armaturo kvalitete BSt 500 S (B). Vsi AB-konstrukcijski elementi so bili izvedeni



Slika 4 • Armatura stika – zadrge med polnilno steno in diafragmo



Slika 5 • Profili HEM 400 v stebrih

skladno s standardom SIST-EN 206-1. Po končanju betoniranja etažne plošče se je pripravila armatura za stene.

Ko je bila dosežena marka betona stene 80 % celotne trdnosti, se je lahko začelo spodkopavati vmesne plošče, saj je bila zagotovljena zadostna sprijemnost med armaturo in betonom, da lahko plošče »obesimo« na stene, nakar se postopek ponavlja vse do temeljne plošče, katere debelina je 100 cm.

Stebri so bili prvotno zasnovni po principu diafragmskih panelov, vendar so statične analize pokazale na velike bočne tlake na diafragmo v spodnjih etažah konstrukcije, ki se prenašajo preko razpornih plošč na stebre v različnih nivojih. Posledično sta se pojavila potreba po močnem armiranju stebrov in problem stikovanja z razporno ploščo. Po temeljitih analizah in sodelovanju z izvajalci diafragme smo izbrali rešitev z vgradnjo dveh profilov HEM 400 v stebre dimenzij 280/65 cm, narejen po principu diafragme (slika 5). Profili so bili zaliti samo v peti stebrov, nadalje pa zasuti z enozrnatim pranim gramozom do vrha terena, tega se je postopno odstranjevalo ob izkopu in izvedbi etažne plošče. Začasno nosilnost za posamezne stebre tako v času izvedbe prevzame ta profil in zvarjeni palični nosilec, ki ju povezuje. Do vgradnje talne plošče se celotna obtežba, ki odpade na izvedene stebre, prenese preko jeklenih profilov na diafragmski temelj stebrov.

Poleg odprtih za prezračevalne jaške so v etažnih ploščah predvidene tudi tako imenovane transportne tehnološke odprtine dimenzij 8,00 m krat 4,50 m in potekajo skozi vse plošče razen talne. Teh tehnoloških odprtih je bilo devet in skozi njih sta se vršila izkop in transport materiala.

### 3.2.4 Hidrogeološki monitoring

Podatki so bili pridobljeni iz hidrogeološkega monitoringa, ki ga je izvajal Geološki zavod Slovenije (Oddelek za hidrogeologijo) za naročnika GI-ZRMK, ki je bil nosilec celotnega monitoringa za izvedbo gradbene jame.

Vzpostavljenih je bilo devet avtomatskih merilnih mest, ki so beležila nivo gladine spodnje in zgornje gladine vode. Do julija 2010 je znašala največja razlika med najvišjo in najnižjo do sedaj zabeleženo gladino spodnje podzemne vode 2,06 m. Znotraj diafragme se gladina podzemne vode giba skladno z gladino podzemne vode v piezometrih na zunanji strani diafragme. Ob močno povečani infiltraciji padavin lahko gladina podzemne vode v desetih dneh naraste tudi za 1 m ali več.

Gladina viseče podzemne vode se hitro odziva na padavine in se dnevno dvigne do visokega stanja. Visoko vodno stanje, ki dosega kletne prostore ob prenehanju infiltracije vode v tla, upade v nekaj dneh. Razlika med najvišjo in najnižjo do sedaj zabeleženo gladino viseče podzemne vode je 4,17 m in 1,74 m.

Črpanje vode je bila posebna naloga inštituta ZRMK in Geološkega zavoda Slovenije. Spremljala sta nihanje vode zunaj gradbene jame, da ne bi prišlo do izpiranja finih delcev iz zemljin in posledično do posedanja okoliških zgradb, saj je večina zgradb temeljena na lesenih pilotih. Na vse okoliške zgradbe so bili nameščeni reperji za opazovanje posedanja, ob različnih fazah gradnje in dejavnostih v gradbeni jami. Vodnjaki so se sproti krajšali glede na izvedbo etažnih plošč.

### 3.2.5 Arheološke najdbe

Na območju predvidene garažne hiše na Kongresnem trgu smo naleteali tudi na arheološke

najdbe. Zavod za varstvo kulturne dediščine (ZVKD) je pripravil projekt, kako bodo raziskali in odstranjevali plasti zemljine na območju gradbišča. Zahtevali so, da se razišče celotno območje garažne hiše do nivoja – 4,30 m oziroma 294,20 m n. v. (globina prve etaže). Ker pa je naša tehnologija zahtevala, da se plošče delajo od zgoraj navzdol, saj bi v nasprotnem primeru diafragme ob obstoječih zgradbah dobile prevelike deformacije in posledično bi prišlo do nezaželenih razpok na objektih, smo se odločili za drugačen pristop, in sicer z razpornimi cevmi (slika 6; arheologi niso odobravalici principa rudarskega dela – torej kopanja zemljine in raziskav pod ploščami). Na vzhodni, severovzhodni in jugovzhodni strani garaže razpornih cevi ni bilo treba izvesti, saj je statični izračun pokazal, da izkop do globine 3,30 m nima vpliva na deformacijo objektov Filharmonije in Univerze, saj sta bila zadostno oddaljena od roba gradbene jame. Zato je v tem območju arheološko izkopavanje potekalo nemoteno. Zapletlo se je na območju objekta od Kongresnega trga 2 do Kongresnega trga 15, saj so ti objekti od roba gradbene jame oddaljeni samo dva metra, kar je veliko premalo, da bi diafragme prenašale obtežbo bližnjih objektov. Zato smo se odločili, da na območju bližnjih objektov vgradimočasne razporne cevi premera 1000 mm in debeline 16 mm ter dolžine 28,15 m oziroma preko celotne širine garažne hiše, oprte v steno, ki ločuje park Zvezda in severni del garaže.

Vgradnja razpornih cevi je potekala s hidravličnimi stiskalnicami. Razporne cevi so bile obremenjene s tlačno silo, ki je premaknila diafragmo za majhen premik (5 mm) proti obstoječim objektom. Postopek smo ponavljali na vsakem stebri. Uporabili smo devet





- garaže s spremljajočimi objekti je izvedlo podjetje GRADIS, Biro za projektiranje, Maribor,
4. Izvajalca: Gradis skupina G in Tibar, d. o. o., s pooblaščenim podjetjem SWIETELSKY Kft.
  5. Monitoring: Gradbeni inštitut ZRMK, d. o. o., s podizvajalcema Geološkim zavodom Slovenije (Oddelek za hidrogeologijo) in GEOID, d. o. o.
  6. Revizija: Revizijo varovanja gradbene jame je izvedel Inštitut FGG, d. o. o., revizijo statične presoje konstrukcije garažne hiše je izvedlo podjetje A Consulting, d. o. o.
  7. Nadzor: Nadzor je izvajalo podjetje za inženiring in nadzor DDC, d. o. o. Pri gradnji varovalne konstrukcije je bilo treba zagotoviti projektantski nadzor, ki je s tekočo kontrolo preverjal točnost predpostavljenih mehansko-fizikalnih karakteristik temeljnih tal. Zaradi zahtevnosti izkopa velike globine v neugodni sestavi tal in prisotnosti podtalnice je bilo treba med gradnjo spremljati obnašanje varovalne konstrukcije in okoliških obstoječih objektov. Zato je bilo treba v sklopu opazovanja:
    - izdelati kataster razpok in morebitnih poškodb na obstoječih objektih v bližini izvedbe gradbene jame,
    - popisati obstoječe objekte, ali so podkleteni in kakšno temeljenje imajo,
    - objekte v vplivnem območju gradnje opremiti za natančno geodetsko merjenje morebitnih pomikov,
    - na točno določenih diafragmah in vseh sredinski stebrih vgraditi inklinometrične cevi, cevi za zagotavljanje zveznosti in reperje,
    - na vsaki strani gradbene jame na vrh povezovalne grede diafragme vgraditi geodetsko točko za natančno 3D-merjenje pomikov.

#### 4 • SKLEP

Podzemna garažna hiša je bila zgrajena po principu bele kadi in je v celoti integralna konstrukcija. Takšen pristop omogoča trajnost in minimalne stroške vzdrževanja ter zagotovi

življenjsko dobo 100 let, za katero je bil objekt projektiran. Gradnjo so oteževali bližina obstoječih objektov, neugodna geološka sestava tal, dva nivoja podtalnice, arheološke

najdbe in vse, kar je povezano z urbano ureditvijo. Začetek del je bil avgusta 2009, konec pa junija 2011.

#### 5 • LITERATURA

- Triantafyllidis, T., Planung und Bauausführung im Spezialtiefbau, Teil 1, Schlitzwand und Dichtwandtechnik, Ernst & Sohn, 2004.
- Frank, R., Bauduin, C., Driscoll, R., Kawadas, M., Krebs Ovesen, N., Orr, T., Schuppner, B., Eurocode 7, Geotechnical Design – general rules, Thomas Telford, 2004.
- GRADIS, Biro za projektiranje, d. o. o., Načrt varovanja gradbene jame za izgradnjo garaže in načrt konstrukcije, PZI št. 4172, 2009.
- Gradbeni inštitut ZRMK, d. o. o., Tehnično poročilo o geodetski meritvi na območju gradbišča, 14. 7. 2010.
- Geološki zavod Slovenije, Oddelek za hidrogeologijo, Hidrogeološka spremljava gradnje garažne hiše, 9. 8. 2010.



# ANALIZA REGULACIJSKIH SISTEMOV BIVALNEGA OKOLJA V STAVBAH

## ANALYSIS OF CONTROL SYSTEMS FOR BUILDING PERFORMANCE

asist. dr. Mitja Košir, univ. dipl. inž. arh.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana, Slovenija  
e-mail: mitja.kosir@fgg.uni-lj.si

Znanstveni članek

UDK: 699.8:681.5:620.92

**Povzetek** | Avtomatska regulacija stavbnega ovoja ter v stavbe vgrajenih naprav in sistemov omogoča aktiven in dinamičen način prilagajanja kvalitete notranjega bivalno-delovnega okolja v stavbah, hkrati pa predstavlja še neizkoriščeno področje možnih prihrankov energije. Kljub velikim naporom na področju varčevanja z energijo v graditeljstvu ostaja potencial uporabe avtomatskih regulacijskih sistemov v stavbah v veliki meri neizkoriščen. Razlogi za takšno stanje so večplastni in vsaj delno izvirajo iz nepoznavanja značilnosti in načinov izvedbe regulacijskih sistemov pri načrtovalcih stavb. Predstavljena analiza petih izbranih sistemov regulacije notranjega okolja v stavbah oriše osnovne značilnosti delovanja in zasnove le-teh. Sistemi, vključeni v pregled, obsegajo nabor eksperimentalnih aplikacij, razvitih v zadnjih 15 letih, ki temeljijo tako na konvencionalnih in uveljavljenih pristopih v regulacijski tehniki kot na naprednih »inteligentnih« načinih vodenja. Rezultati izvedene analize so pokazali možnost zmanjšanja porabe energije za ogrevanje in hlajenje stavb v obsegu 30 % ter zmanjšanja porabe električne energije za osvetljevanje do 50 % v primeru uvedbe avtomatske regulacije notranjega okolja. Primerjava zasnove in delovanja posameznih sistemov je dokazala upravičenost uporabe avtomatske regulacije v stavbah ter hkrati orisala osnovne smernice za razvoj ali aplikacijo podobnih sistemov v stavbah.

**Summary** | The automatic control of building envelopes and installed systems represents a highly dynamic way of indoor environment quality control. At the same time, such systems represent a large still untapped resource for reducing energy consumption in buildings. Despite of large efforts in the last few decades in the field of energy conservation in the built environment, the potential savings resulting from application of automatic control were not realized. Although the reasons for this are multiple, the fault is largely in the lack of necessary knowledge for their implementation among civil engineers and architects. The analysis of five selected systems for the holistic control of internal environment in buildings will present the main characteristics of their design and functioning. The selected systems are a representation of experimental efforts in the field for the last 15 years. Some of these systems are based on the conventional and well established control practices, while others utilise advanced »intelligent« control techniques. The executed analysis has shown the potential for reducing energy consumption of buildings for heating and cooling by 30 %, and energy consumption for artificial lighting by 50 % only by using appropriately designed automatic control system. The study results have justified the application of automatic control systems in buildings as well as stated basic guidelines in future development of experimental or commercial applications.

## 1 • UVOD

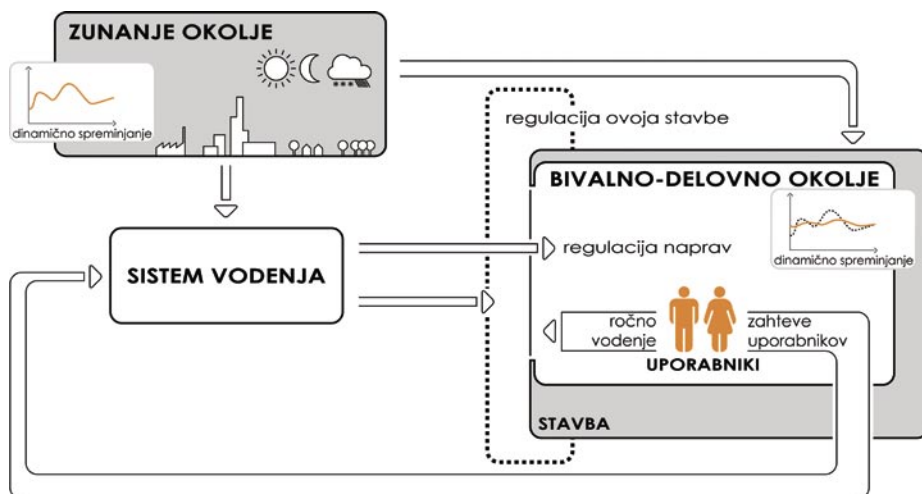
Avtomatska regulacija procesov je neločljivo povezana z razvojem človeške družbe in uporabljene tehnologije. Z višanjem zahtev ljudi (uporabnikov) po natančnosti, fleksibilnosti in hitrosti izvajanja tehnoloških procesov se neizbežno pojavlja vse večja potreba po avtomatskem vodenju le-teh. Prav tako uporaba avtomatizacije pogojuje večja kompleksnost tehnoloških sistemov in naprav, ki nas obkrožajo tako v industrijskih okoljih kot v vsakdanjem življenju (Zupančič, 2010). Pojavljanje potrebe po avtomatski regulaciji procesov v vsakodnevnem delovno-bivalnem okolju neposredno vpliva na način načrtovanja, izvedbe in vzdrževanja stavb. S pomočjo primerno uporabljene tehnologije vodenja je možno povečati stopnjo učinkovitosti, fleksibilnosti in odzivnosti stavbe kot celovitega sistema povezav med zunanjim in notranjim okoljem (Košir, 2008). Uporaba primerne avtomatske regulacije lahko izboljša kvaliteto notranjega okolja ter simultano omogoči večjo trajnost in boljšo energijsko učinkovitost stavbe. Kljub dokazanemu potencialu za prihranke pri energiji, porabljeni za delovanje stavbe ((Ruck, 2000), (Rubinstein, 1999)), in pozitivnih učinkih primerno reguliranega notranjega okolja na počutje in učinkovitost uporabnikov (Adner, 2003) stavb je uporaba avtomatske regulacije v stavbah relativno omejena. V večini primerov se uporablja le pri izoliranih sistemih ali elementih (npr. regulacija ogrevanja) brez celovite integracije s stavbo ali drugimi avtomatiziranimi sistemi. Tako prihaja do parcialnih aplikacij, kjer potencial holističnega obravnavanja prenosa energije, snovi in informacij med zunanjim in notranjim okoljem ni izkoriščen (Reinhart, 2003). Neusklajenost med posameznimi reguliranimi sistemi v stavbi, kot so recimo ogrevanje, avtomatsko senčenje in osvetljevanje, lahko pripelje do kontraproduktivnih medsebojnih interakcij, ki izničijo prednosti ali celo poslabšajo situacijo v primerjavi z nereguliranim delovanjem stavbe. Prav zaradi kompleksnosti in medsebojne povezave posameznih elementov delovanja stavbe je treba pristopiti k regulaciji le-te z gledišča (Kladnik, 1997), ki omogoča simultano obravnavanje ključnih elementov oblikovanja in regulacije notranjega okolja (Košir, 2008).

Povečana potreba po energijski učinkovitosti ter želja po izboljšanju delovnih in bivalnih razmer v stavbah sta v zadnjih 20 letih pri-

vedla do velikega števila raziskav na področju oblikovanja stavbnega ovoja in energijsko učinkovitih sistemov ogrevanja, prezračevanja, hlajenja in osvetljevanja. Posledično se je veliko rešitev že preneslo ali pa se prenaša v gradbeno prakso in zavest načrtovalcev in izvajalcev. Popolnoma drugače pa je s področjem celovitega obravnavanja nadzora stavbnega ovoja, vgrajenih sistemov in naprav, ki predstavlja slabo raziskano področje z velikim potencialom za izboljšanje delovanja stavb (Selkowitz, 2004). Že poskusi v ZDA v devetdesetih letih prejšnjega stoletja s preprostim sistemom uravnavanja umetne osvetlitve v odvisnosti od razpoložljive dnevne svetlobe v poslovni stavbi so pokazali potencialne prihranke 30–40 % pri porabi električne energije za svetila, najbližja oknom, in 16–22 % pri svetilih globlje v prostoru (Rubinstein, 1999). Potencialni pozitivni učinki pa se ne končajo pri dnevni osvetlitvi in posledičnem zmanjšanju porabe električne energije, ampak lahko s pravilnim integriranjem regulacije termičnih aspektov kratkovalovnega sončnega sevanja dosežemo tudi drastično zmanjšanje porabe energije za ogrevanje in hlajenje. Prav potreba po integriranem pristopu k regulaciji notranjega bivalnega okolja se je izkazala kot ključna v oblikovanju udobnejšega bivalno-delovnega okolja, ki hkrati omogoča znatne prihranke energije (Kraimer, 2008). Zato eksperimentalni in do neke mere tudi komercialni regulacijski sistemi ne pristopajo le k uravnavanju vizualnega ali toplotnega ugodja v notranjem okolju, ampak poskušajo

vzpostaviti sistem, ki zaobjame celoto kompleksnih interakcij vplivnih faktorjev. Slika 1 predstavlja koncept zasnove regulacijskega sistema notranjega okolja, ki glede na zahteve uporabnikov ter pod vplivom zunanjih danosti regulira delovanje stavbnega ovoja kot tudi vgrajenih naprav. S takšnim sistemom je omogočen dinamičen odziv notranjega okolja stavbe na spremembe v zunanjem okolju in/ali željah uporabnikov. Zaradi neprestanega spreminjanja pogojev delovanja sistema mora biti regulator zasnovan kot zaprtozančni regulacijski sistem (Slika 2), pri katerem povratna zanka omogoča korekcijo odstopanj, ki nastanejo kot posledica zunanjih vplivov.

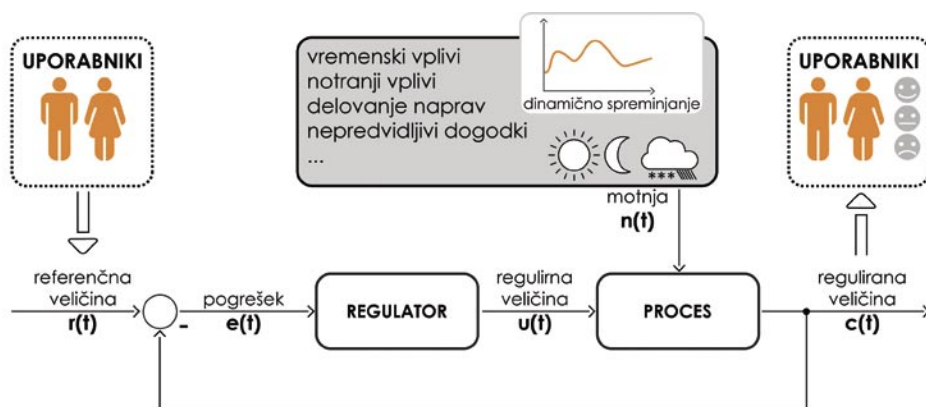
Pregled osnovnih značilnosti izbranih eksperimentalnih regulacijskih sistemov notranjega okolja stavb, predstavljenih v pričujočem članku, je namenjen predstavitvi trenutnega stanja tehnike na obravnavanem področju, oceni upravičenosti takšnih sistemov ter postavitvi osnovnih izhodišč za nadaljnji razvoj. Pregledani sistemi vodenja notranjega okolja stavb pristopajo k obravnavanju problematike na različne načine ter predvsem z različno stopnjo kompleksnosti. Tako nekateri sistemi regulirajo le senčenje in s tem povezane termične procese (solarni pritoki) ali notranjo naravno in umetno osvetljenost, medtem ko drugi poizkušajo zaobjeti širši spekter regulacije notranjega okolja. Skupni imenovalac vseh predstavljenih sistemov je želja po celoviti obravnavi regulacije ter izboljšanju lastnosti notranjega okolja ob hkratnem zvišanju energijske učinkovitosti stavbe. Za analizirane sisteme je bila izvedena tudi kvalitativna primerjava na konceptualnem nivoju z namenom izpostaviti osnovne koncepte oziroma strategije posameznih sis-



Slika 1 • Konceptualna shema zasnove holističnega regulacijskega sistema notranjega okolja



temov ter tako ovrednotiti njihove prednosti in potencialne slabosti. Rezultati primerjave predstavljajo smernice in merila oziroma orientacijo za nadaljnji razvoj eksperimentalnih ali komercialnih aplikacij.



Slika 2 • Shematični prikaz zasnove tipičnega zaprtozančnega regulacijskega sistema

## 2 • PREGLED ZNAČILNOSTI IZBRANIH REGULACIJSKIH SISTEMOV

### 2.1 Izbor

Regulacijski sistemi, vključeni v pričujočo analizo, so bili izbrani na podlagi medsebojne primerljivosti, kar pomeni, da jih je možno primerjati vsaj na nivoju koncepta, če že ne glede na dosežene rezultate. Predstavljen pregled obsega sisteme izvedene v zadnjih 15 letih, začenši z enim prvih in zelo odmevnih sistemov avtomatske regulacije notranjega okolja, izvedenem v Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) leta 1997 (Lee, 1998). Skupna značilnost večine predstavljenih sistemov je uporaba naprednih »inteligentnih« regulacijskih pristopov, kot sta mehka logika in genski algoritmi (GA), v kombinaciji z uveljavljenimi regulacijskimi tehnikami (proporcionalno-integrirno-diferencirni – PID-regulatorji). Prednost uporabe naprednih regulacijskih tehnik je predvsem v lažji preglednosti in preprostosti opisa kompleksnega sistema regulacije notranjega okolja, oziroma če parafraziramo besede Dounisa (Dounis, 2000), gre pri regulaciji notranjega okolja za mehek problem, ki zahteva uporabo mehkih rešitev. V pregled vključeni sistemi so sledeči:

- **Primer 1:** Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) ((Lee, 1998), (Ruck, 2000), (Vine, 1998)),
- **Primer 2:** Laboratorij za elektroniko (LOE) tehniške univerze na Kreti (Kolokotsa, 2000, 2002, 2005),
- **Primer 3:** Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (LESO-PB) ((Guillemin, 2003), (Guillemin, 2001, 2002)),
- **Primer 4:** KAMRA, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (UL

FGG) ((Kristl, 2007), (Trobec-Lah, 2005, 2006)),

- **Primer 5:** IRsNO, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (UL FGG) ((Košir, 2008), (Košir, 2010)).

Poleg naštetih in v analizi obravnavanih sistemov je v literaturi možno zaslediti še več rešitev, ki pa regulirajo le posamezne parametre notranjega okolja, kot je uravnavanje osvetljenosti ((Park, 2011), (Onaygil, 2003), (Koo, 2010), (Reinhart, 2004)) oziroma ogrevanja in sistemov za klimatizacijo gretje in hlajenje (KGH) ((Singh, 1999), (Liang, 2007), (Dounis, 2000), (Calvino, 2004)).

### 2.2 Primer 1: Lawrence Berkeley National Laboratory

Osnovni cilj v LBNL razvitega sistema je bil preveriti vpliv avtomatske regulacije senčil, umetne osvetlitve in KGH-sistema na porabo električne energije za osvetljevanje in hlajenje pisarniških prostorov. Regulacijski sistem je bil preizkušen v dveh skoraj identičnih pisarnah tlorisnih dimenzij 3,71 m x 4,57 m s svetlo etažno višino 2,68 m (lokacija Oakland, Kalifornija). Pisarni sta imeli na krajši stranici vgrajeno jugovzhodno orientirano enojno zasteklitev v skupni površini 7,5 m<sup>2</sup>, na zunanji strani senčeno s fiksnimi žaluzijami z omogočeno rotacijo posameznih lamel. Notranost je bila opremljena z umetno razsvetljavo, aktivirano in regulirano glede na razpoložljivo količino dnevne svetlobe ter hlajena in ogrevana s KGH-sistemom. Spremljane količine notranjega okolja so bile temperatura zraka, horizontalna in vertikalna osvetljenost ter poraba energije.

Merjene količine zunanjega okolja so bile horizontalna osvetljenost, neposredno in difuzno sončno sevanje ter temperatura zraka.

Regulacija vseh sistemov v pisarni ni bila popolnoma integrirana, saj je bilo uravnavanje pozicije žaluzij in notranje umetne osvetlitve z možnostjo zatemnitve krmiljeno neodvisno od KGH-sistema, ta je bil reguliran z lastnim PID-regulatorjem. Naklon senčil je bil voden s pomočjo PID-regulatorja in osebnega računalnika, s katerim so bile povezane tudi luči, ki so se zvezno odzivale na količino razpoložljive dnevne svetlobe, za znane preko fotosenzorja na stropu. Kot rotacije lamel senčila je bil omejen na premike med 0° (horizontalna pozicija) ter 68°, ko je bilo senčilo zaprto, vendar je kljub temu prepuščalo difuzno svetlobo. Osnovno pravilo delovanja senčil v sončnem vremenu je bilo preprečevanje vdora neposrednega sončnega sevanja ter s tem pojava bleščanja in pregrevanja pisarne. V primeru oblačnega vremena so senčila v čim večji meri dovoljevala neposreden stik z zunanostjo. Učinkovitost delovanja sistema je bila preverjena na podlagi primerjave med pisarnama, pri čemer je bila v eni pisarni regulacija senčil aktivna, v drugi pa so ta bila fiksirana pod določenim kotom. V času testiranja sta v obeh pisarnah delovala samodejno vodena KGH-sistema in avtomatska zatemnilna osvetlitev. Ko je bila žaluzija v neregulirani pisarni v horizontalni ravnini (0°), so bili povprečni dnevni prihranki regulirane pisarne 21 % pri energiji za hlajenje ter 21 % pri električni energiji za razsvetljavo, pri čemer je bil nivo notranje osvetljenosti večino časa vzdrževan znotraj zaželenega razpona med 540 in 700 lx. V primeru 45° naklona ročno uravnavanih žaluzij so bili prihranki pisarne z avtomatsko reguliranim senčilom le 4 % za hlajenje ter 46 % za osvetljevanje.

Manjši prihranki pri ohlajevanju so posledica večjega naklona senčila, ki bolje senči notranjost pred direktnim sončnim sevanjem. Poudariti je treba, da so potencialni prihranki sistema pri energiji za razsvetljavo še večji, če se jih primerja s pisarno, ki nima razsvetljave z zvezno zatemnilno regulacijo, ampak le z dvopoložajnim stikalom (ON-OFF).

### 2.3 Primer 2: Laboratorij za elektroniko tehniške univerze na Kreti

Regulacijski sistem notranjega okolja, razvit v LOE tehniške univerze na Kreti, je bil zasnovan kot aplikacija za reguliranje toplotnega in vizualnega okolja ter kvalitete zraka v realnem pisarniškem okolju. Spremljane okoljske vrednosti so bile notranja in zunanja temperatura, povprečna sevalna temperatura, hitrost premikanja notranjega zraka, relativna vlažnost, koncentracija CO<sub>2</sub> in notranja osvetljenost v pisarni. Obravnavan regulacijski sistem je uporabljal vodenje z mehko logiko in adaptivno vodenje z genskimi algoritmi (GA). Delovanje sistema so primerjali z obstoječim regulacijskim sistemom zgradbe, z dvopoložajnim sistemom za ogrevanje in hlajenje in ročno regulacijo umetne razsvetljave. Osnovna arhitektura regulacijskega sistema je temeljila na uporabi sistema pametne kartice (smart card), programljivega logičnega krmilnika (PCL) in osebnega računalnika. Pametna kartica je delovala kot vmesnik med uporabniki in sistemom, saj je posredovala njihove preference glede karakteristik notranjega okolja v PCL, ta pa je izvršil potrebne spremembe stanja aktuatorjev. Osebni računalnik je spremljal delovanje sistema in izvajal adaptacijo mehkih pravil regulatorjev z GA.

Vhodne vrednosti regulatorja so bile PMV-indeks (predicted mean vote – indeks predvideva povprečen odziv velike skupine ljudi na toplotno okolje) (Fanger, 1972), zunanja temperatura, koncentracija in hitrost izmenjave CO<sub>2</sub> ter notranja osvetljenost. Tem vrednostim je regulator s pomočjo nabora mehkih pogojno posledičnih pravil predpisal ustrezne izhodne reakcije sistema. Sistem se je odzval z ogrevanjem ali hlajenjem, odpiranjem in senčenjem okna ter aktiviranjem umetne osvetlitve. Osnovne nastavitve mehkih regulatorjev so omogočale maksimalno izkoriščanje ukrepov pasivne solarne arhitekture (PSA), te pa so se prilagajale glede na želje uporabnikov. Takšen način optimizacije lahko pri nerazumnih zahtevah pripelje do izrazito energijsko neučinkovitega delovanja sistema. Strukturno je sistem bil deljen na toplotno in svetlobno regulacijsko

zanko. Pri toplotni zanki so bila regulacijska pravila oblikovana tako, da se za različne letne čase uporabljajo različni pristopi. Tako je bilo omogočeno odpiranje oken v času prehodnih letnih časov in s tem naravno hlajenje prostora. Poleti in pozimi pa so bila okna zaprta, kar zmanjšuje izgube pri ogrevanju in hlajenju. Toplotna regulacijska zanka je uporabljala tudi senčenje okna, s čimer se v poletnem času preprečujejo, v zimskem času pa omogočajo solarni pritoki. Svetlobna regulacijska zanka je v primeru zadostne količine naravne svetlobe preprečila aktivacijo umetne razsvetljave, nivo osvetljenosti pa uravnavala s senčenjem. Učinkovitost delovanja sistema je bila preverjena v odnosu do obstoječega regulacijskega sistema notranjega okolja stavbe. Testno obdobje je obsegalo čas od januarja do julija ter tako zaobjelo celoten spekter letnih časov. V primerjavi z obstoječim regulacijskim sistemom je bil dosežen 26,5 % prihranek energije za ogrevanje in 14 % prihranek energije za hlajenje, kar na letni ravni znaša 20,5 %. Največji prihranek je regulacijski sistem dosegel pri osvetljevanju, kjer se je poraba energije zmanjšala za 66 %. Visoki prihranki pri razsvetljavi so bili posledica uporabe ročne regulacije v referenčni pisarni.

### 2.4 Primer 3: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Sistem je bil razvit za reguliranje osvetljenosti, senčenja in ogrevanja individualne pisarne v stavbi LESO-PB. Za referenco je služila skoraj identična sosednja pisarna, opremljena z obstoječim regulacijskim sistemom ogrevanja. Pisarni sta bili florisnih dimenzij 4,75 m x 3,60 m in svetle etažne višine 2,80 m, zastekljeni na južni strani z oknom površine 5,75 m<sup>2</sup>, senčenim z zunanjim tekstilnim rolojem. Sistem je bil krmiljen preko osebnega računalnika, ki je komuniciral z aktuatorji in senzorji preko Lonworks™ bus s standardnim protokolom Dynamic Data Exchange. Regulatorji so bili osnovani na mehki logiki, za optimizacijo pripadnostnih funkcij pa so načrtovalci uporabili GA.

V odvisnosti od prisotnosti uporabnikov v pisarni je sistem prioritetno obravnaval regulacijo osvetljenosti (uporabniki prisotni) ali regulacijo ogrevanja (uporabniki odsotni). Pri reguliranju notranje osvetljenosti je sistem poleg sledenja referenčni vrednosti notranje zelene osvetljenosti prostora pri vodenju premikov senčila upošteval tudi zahteve zagotavljanja ugodnega vizualnega okolja z vidika bleščanja. Najprej je bila z namenom preprečevanja bleščanja določena maks-

imalna dovoljena odprtost senčila, nato pa je sistem uravnaval notranjo osvetljenost prostora znotraj te omejitve. Največja dovoljena odprtost senčila je bila določena s pomočjo upoštevanja položaja sonca glede na fasado stavbe, s čimer je bilo možno spremljanje nizkih vpadnih kotov sončnih žarkov, ki odločilno vplivajo na pojav bleščanja. V primeru le difuznega sončnega sevanja omejitve glede maksimalne odprtosti senčila ni bilo. Regulacija ogrevanja pisarne je temeljila na predpostavki, da skozi zasteklitev potekata dva mehanizma izmenjave toplote. Prvi je energijski dotok zaradi solarnih pritokov, drugi pa transmisijske toplotne izgube zaradi temperaturnih razlik med zunanostjo in notranostjo. Rezultat je bila določitev »zelenega energijskega razmerja okna«, ki v odvisnosti od letnega časa vpliva na regulacijo senčila. V principu je to pomenilo senčenje poleti in omogočanje solarnih pritokov pozimi. V prehodnih obdobjih je sistem uporabljal kombinacijo zimske in poletne regulacije. Podoben pristop je bil uporabljen tudi pri obeh sistemih, zasnovanih na UL FGG. Pri porabi energije za ogrevanje je v primerjavi z obstoječim regulatorjem ogrevanja stavbe sistem LESO-PB dosegel 25 % prihranek. Sledenje zelenemu nivoju notranje osvetljenosti je bilo doseženo v povprečju z 42 premiki senčila dnevno, s čimer so bila odstopanja omejena na sprejemljivo vrednost ± 230 lx. Poleg regulacije osvetljenosti je sistem preprečeval tudi pojavljanje bleščanja, kar se je odrazilo v skoraj popolnoma zaprtem senčilu pri nizkih vpadnih kotih sončnega sevanja.

### 2.5 Primer 4: KAMRA UL FGG

KAMRA je regulacijski sistem, ki je bil zasnovan na FGG za uravnavanje termičnih in vizualnih tokov skozi transparenten del testne celice z dimenzijami 1 m x 1 m x 1 m z južno orientiranim oknom površine 1 m<sup>2</sup>. Okno je imelo na zunanji strani vgrajeno avtomatizirano roletno, celica pa je bila opremljena z električnim grelnikom za ogrevanje ter ventilatorjem za omogočanje hlajenja. Majhen volumen in zelo veliko razmerje med prostornino celice in delom transparentnega ovoja sta omogočila hitro odzivnost sistema na zunanje razmere. Posledično se je celica v primerjavi z realno stavbo pod vplivi zunanjih vremenskih razmer zelo hitro ogrela in tudi ohladila. Regulacija je bila zasnovana kot kaskadni sistem s primarnimi mehkiimi in sekundarnimi konvencionalnimi PID-regulatorji. Upravljanje s PLC-jem je bilo izvedeno preko standardnega osebnega računalnika in



vmesnika, zasnovanega v SCADA Factory Link programskem okolju.

Regulator sistema KAMRA je bil deljen na svetlobno in temperaturno regulacijsko zanko. Strukturno gledano je bil sistem oblikovan hierarhično tako, da je bila regulacija osvetljenosti prioritarna, razen če je bilo drugače določeno. Razlog za takšno strukturo je v večji dinamiki sprememb nivoja osvetljenosti v primerjavi s spreminjanjem temperaturnih pogojev. Poleg individualnega delovanja toplotne ali svetlobne zanke je sistem omogočal tudi tako imenovani harmonizirani način delovanja, pri čemer sta sodelovali obe regulacijski zanki. Regulacijska zanka za osvetlitev je bila zasnovana tako, da je položaj rolete uravnavan s pomočjo primerjave med referenčno in dejansko osvetljenostjo celice. Podobno zasnovano je imela tudi temperaturna zanka, ki je glede na referenčno in izmerjeno temperaturo z upoštevanjem razpoložljivega zunanega sončnega sevanja določila položaj rolete. Regulacija notranjih termičnih pogojev celice je bila izvedena ločeno za zimski in poletni čas, v obdobju prehodnih mesecev pa je bil odziv sistema dosežen s kombinacijo obeh. Harmonizirano delovanje sistema je bilo izvedeno s pomočjo ločenega regulacijskega bloka, ki je omogočal preklap med termično in svetlobno regulacijo. Sistem je pri regulaciji notranje osvetljenosti sledil želeni vrednosti z odstopanji  $\pm 300$  lx, kar je bilo doseženo s povprečno desetimi premiki senčila na uro. Izvedeno je bilo tudi bolj natančno sledenje, kjer so bila odstopanja manjša od  $\pm 90$  lx, vendar z nesprejemljivo visokim številom premikov

senčila. Kljub pogostemu pregrevanju celice je bil sistem s pomočjo senčila v času prehodnih letnih časov sposoben vzdrževati notranje temperature za 1–4 K višje od zunanjih, kar je zaželen pojav v pomladno-jesenskem času.

## 2.6 Primer 5: IRsNO UL FGG

Integralen regulacijski sistem notranjega okolja oziroma IRsNO je bil razvit na osnovi izkušenj in spoznanj pridobljenih s sistemom KAMRA. Regulacijski sistem je bil zasnovan za uporabo v pisarni stavbe FGG, kjer je uravnaval osvetljenost, ogrevanje, hlajenje in prezračevanje, vezano na koncentracijo CO<sub>2</sub> v notranjem okolju. Pisarna je bila florisnih dimenzij 7,48 m x 4,93 m ter svetle etažne višine 3,88 m, na zahodni strani je bilo okno s skupno površino zasteklitve 11,40 m<sup>2</sup>. Okno je bilo z zunanje strani senčeno s šestimi avtomatiziranimi žaluzijami, prezračevanje zagotovljeno z motoriziranim odpiranjem okna, hlajenje in ogrevanje pa s stropnimi nizkotemperaturnimi radiacijskimi paneli. Sistem je spremljal in beležil lastnosti notranjega (osvetljenost, temperatura zraka, relativna vlažnost zraka, koncentracija CO<sub>2</sub>, poraba energije za ogrevanje in hlajenje) in zunanjega okolja (globalno in odbito sončno sevanje, osvetljenost, temperatura zraka, relativna vlažnost zraka, prisotnost padavin, smer in hitrost vetra) preko senzorske mreže, ki je posredovala potrebne podatke v PLC, ki je nato aktiviral aktuatorje. IRsNO je bil zasnovan kot dualni regulacijski sistem, kar pomeni, da lahko deluje kot konvencionalni PID ali kot kaskadni sistem z mehkiimi in PID-regulatorji.

IRsNO je bil razdeljen na štiri regulacijske zanke, in sicer na zanke za uravnavanje osvetljenosti, ogrevanja, ohlajevanja in prezračevanja. Vsaka od zank je glede na izmerjena trenutna stanja in zunanje pogoje aktivirala ustrezne aktuatorje. Zaradi kompleksnosti in velikega števila aktuatorjev je bilo na delovanje sistema možno vplivati z regulacijskimi pravili, časovno odvisnimi urniki delovanja in tudi z določanjem deviacijskih odstopanj od referenčnih vrednosti, znotraj katerih sistem miruje. Hierarhična urejenost je v primeru zasedenega prostora zagotavljala prednost regulaciji notranje osvetljenosti in fiziološkega prezračevanja, v nasprotnem primeru pa regulaciji ogrevanja ali ohlajevanja. S tem je bila zagotovljena prednost reguliranja količin, ki so z gledišča udobja uporabnikov bolj problematične. Pri doseganju zelenih vrednosti kontroliranih parametrov notranjega okolja je sistem prioritarno uporabljal PSA-ukrepe, torej je bila energijska učinkovitost regulacije vgrajena v samo osnovo sistema. Sistem se je izkazal kot zelo učinkovit pri regulaciji notranje osvetljenosti, saj je bil v večini vremenskih pogojev zmožen ohraniti dejansko vrednost osvetljenosti znotraj definiranih meja (+ 100 lx, - 50 lx) okoli referenčne vrednosti. Takšni rezultati so bili tipično doseženi z manj kot petimi premiki žaluzij na uro. Pri regulaciji notranjih temperaturnih pogojev je sistem vzdrževal notranjo temperaturo zraka v območju  $\pm 3$  K okoli želenih vrednosti, večja odstopanja so se pojavljala le v vročih poletnih dneh. Kot učinkovito se je v poletnem času pokazalo tudi nočno hlajenje s prezračevanjem, saj je sistem prostor shladil tudi za 4–5 K.

na takšna nihanja. Za zadovoljstvo uporabnikov je treba zagotoviti primerno sledenje referenčnim vrednostim (odstopanja  $\pm 200$  lx so zaradi adaptacijske sposobnosti očesa še sprejemljiva) in čim manjše število aktivacij aktuatorjev. Moteča, prepogosta aktivacija aktuatorjev je velikokrat vzrok za nezadovoljstvo uporabnikov z regulacijskim sistemom (Kolokotsa, 2000). V primeru analiziranih sistemov lahko na podlagi zgoraj navedenega kriterija ocenim vse sisteme kot primerne (Preglednica 1). Konceptualno gledano so regulacijska pravila 1, 2, 4 in 5 sistema primerljiva, saj je bilo vodenje aktuatorjev vezano na primerjavo zelene in dejanske vrednosti osvetljenosti, regulator pa je poskušal zmanjšati razliko med njima (Trobecc-Lah, 2006). Bolj kompleksen pristop je bil izveden v primeru 3 (LESO-PB), kjer je bila poleg notranje osvetljenosti spremljana tudi zunanja vertikalna

## 3 • ANALIZA

Med izbranimi primeri regulacije notranjega okolja je opaziti tako podobnosti kot kar nekaj razlik. Predvsem pri pristopih k testiranju delovanja sistemov ni mogoče izpeljati neposrednih vzporednic, saj so bili sistemi uporabljeni v zelo različnih stavbah in klimatskih pogojih, oba parametra pa izrazito vplivata na končne rezultate in učinkovitost. Zaradi takšne raznolikosti primerjanih regulacijskih sistemov je edini relevanten način primerjave sistemov obravnava konceptualnih osnov, ki tvorijo strategije k reguliranju notranjega bivalno-delovnega okolja. Prav preučitev konceptov, torej osnov lastnosti različnih pristopov, najbolj pripomore nadaljnjemu razvoju podobnih sistemov. Analiza sistemov v

nadaljevanju je bila izvedena ločeno za regulacijo osvetljenosti in regulacijo ogrevanja, hlajenja in prezračevanja.

### 3.1 Regulacija osvetljenosti

Regulacija osvetljenosti notranjih prostorov predstavlja zahtevno nalogo, saj mora biti sistem sposoben delovati v širokem razponu hitro spreminjajočih se vrednosti nivoja zunanje osvetljenosti. Na splošno spremembe zunanje osvetljenosti med 1000 in 5000 lx niso nenavadne (npr. trenutna pooblačitve), kar posledično pripelje do velikih nihanj v notranji osvetljenosti. Regulacijski sistem notranje osvetljenosti mora biti zasnovan tako, da se z aktivacijo aktuatorjev primerno odzove

osvetljenost v ravnini zasteklitve in pozicija sonca na nebu. S tem je zagotovljena zelo natančna slika o dejanskih zunanjih pogojih, ki omogoča zaznavanje difuzne osvetljenosti (oblačno vreme) ter hkrati direktnega vpliva pozicije sonca (jasno vreme). Sistem s takšno zasnovo je sposoben aktivno preprečevati bleščanje in s tem ustvariti še boljše notranje vizualne pogoje, kot jih je možno doseči le z regulacijo osvetljenosti.

Pri pregledu doseženih rezultatov posameznih sistemov se pokaže, da izrazitih odstopanj v učinkovitosti delovanja med posameznimi analiziranimi primeri ni (Preglednica 1). Najbolj izstopa sistem KAMRA (primer 4) tako s številom premikov rolete kot z maksimalnimi odstopanji od referenčne vrednosti notranje osvetljenosti. Razlog za večja odstopanja so v tem, da je bil sistem preizkušen v prostoru velikosti 1 m<sup>3</sup>, kjer ima na nivo notranje osvetljenosti zelo velik vpliv svetloba, odbita od notranjih površin.

Zmožnost vzdrževanja manjših odstopanj od referenčne vrednosti pri sistemu IRsNO pa gre pripisati dejstvu, da sistem upravlja 6 žaluzij, s čimer je omogočena izrazito zvezna regulacija notranje osvetljenosti. Kot smiselna se je pokazala tudi uporaba zvezno reguliranega zatemnjevanja luči pri sistemih LBNL, LOE in LESO-PB, saj omogoča manj skokovito spreminjanje notranje osvetljenosti v času, ko zunanji pogoji še ne omogočajo zadostne naravne osvetljenosti (npr. zgodaj dopoldne, pozno popoldne). Iz predstavljenih rezultatov je možno sklepati, da bolj kompleksen sistem regulacije, izveden v primeru LESO-PB, ne predstavlja posebne prednosti v primerjavi s preprostejšimi rešitvami pri uravnavanju nivoja notranje osvetljenosti. To pa seveda ne pomeni, da takšna zasnova regulacijskega sistema v določenih podnebni razmerah ni upravičena, saj omogoča poleg regulacije notranje osvetljenosti tudi nadzor bleščanja.

Na podlagi konceptov in rezultatov delovanja analiziranih sistemov se je kot izredno uporaben pristop k regulaciji notranje osvetljenosti izkazala relativno preprosta zasnova regulatorja, kjer sistem zmanjšuje napako oziroma odstopanje med regulirano in referenčno veličino (Slika 2). To pomeni, da se s pomočjo upravljanja razpoložljivih aktuatorjev (senčila, umetna razsvetljava) poskuša dejansko izmerjeno osvetljenost približati željeni vrednosti. Glavna potencialna slabost takšnega pristopa je prepogosto in s tem moteče delovanje aktuatorjev, kar je razvidno iz delovanja sistema KAMRA, ki je bil sposoben zelo natančnega sledenja, vendar s prevelikim številom premikov senčila (Preglednica 1, opomba 7). Zelo učinkovita rešitev tega problema je določitev še sprejemljivih odstopanj od zelene vrednosti oziroma sprejemljivega pasu vrednosti notranje osvetljenosti, znotraj katerega sistem ne aktivira aktuatorjev. Skozi analizo delovanja izbranih sistemov se je pokazalo, da bolj kom-

OSVETLJENOST	Primer 1 LBNL	Primer 2 LOE	Primer 3 LESO-PB	Primer 4 KAMRA	Primer 5 IRsNO
REGULACIJA					
naravne osvetljenosti	DA	DA	DA	DA	DA
umetne osvetljenosti	DA	DA	DA	NE <sup>1</sup>	DA
bleščanja	NE <sup>2</sup>	NE	DA	NE	NE
AKTUATORJI					
za regulacijo naravne osvetljenosti	žaluzije <sup>3</sup>	žaluzije	tekstilni rolo	PVC roleta	žaluzije
število	1	/ <sup>4</sup>	1	1	6
za regulacijo umetne osvetljenosti	luči z zvezno zatemnitvijo	luči z zvezno zatemnitvijo	luči z zvezno zatemnitvijo	/	luči <sup>5</sup>
za regulacijo bleščanja	/	/	tekstilni rolo	/	/
DELOVANJE					
odstopanja od reference	± 200 lx <sup>6</sup>	± 200 lx	± 230 lx	± 300 lx <sup>7</sup>	+100 lx, -50 lx
premiki senčila v 60 min	< 6	/ <sup>4</sup>	≈ 4	≈ 10	< 5
prihranki el. energije	-14 – 52 % <sup>8</sup>	66 % <sup>9</sup>	/	/	/

#### OPOMBE

<sup>1</sup> testna celica ni imela vgrajenih svetil

<sup>2</sup> bleščanje je bilo pasivno regulirano z uporabo fiksnih rotirajočih žaluzij

<sup>3</sup> fiksne žaluzije z možnostjo reguliranja naklona lamel

<sup>4</sup> podatki niso navedeni v pregledani literaturi

<sup>5</sup> uporabljena je bila dvopolažajna (ON/OFF) regulacija

<sup>6</sup> sprejemljiva osvetljenost definirana na območju 540 do 700 lx, za referenčno vrednost je bila privzeta vrednost 620 lx

<sup>7</sup> dosežena so bila tudi odstopanja manjša od ± 90 lx, vendar z večjim številom premikov rolete

<sup>8</sup> prihranki so odvisni od pozicije fiksne žaluzije v referenčni pisarni

<sup>9</sup> veliki prihranki so posledica uporabe ročne regulacije umetne razsvetljave v referenčni pisarni

Preglednica 1 • Pregled značilnosti primerjanih sistemov – regulacija osvetljenosti

pleksen sistem regulacije (sistem LESO-PB) ni upravičljiv v primeru, če bi bil namenjen samo uravnavanju notranje osvetljenosti. Je pa takšen sistem smiseln pri dodatnem nadzoru bleščanja.

### 3.2 Regulacija ogrevanja, hlajenja in prezračevanja

V primerjavi z dinamiko in nepredvidljivostjo sprememb pri regulaciji notranje osvetljenosti je za termične procese v zgradbah značilen bolj predvidljiv odziv, predvsem pa manj izrazita nihanja v vrednostih notranje temperature zraka (Szokolay, 2008). Relativno počasno in dokaj predvidljivo dnevno in sezonsko nihanje reguliranih vrednosti predstavlja z gledišča regulacijske tehnike manjšo težavo, kot je regulacija osvetljenosti. Na potek termičnih procesov in s tem na odziv stavbe, vgrajenih naprav in uporabnikov izrazito vplivajo mikro-, mezo- in makroklimatski pogoji lokacije, na kateri stoji stavba (Krainer, 2008). Pri zasnovi

regulacijskega sistema toplotnih procesov v stavbi je zato treba oblikovati pravila, ki predstavljajo odziv na dane klimatske razmere ter omogočajo izkoriščanje zunanjih danosti s pomočjo PSA-ukrepov. Vsi analizirani sistemi so bili načrtovani za lokacije z zmernim klimatskim podnebjem, za katerega so značilna izrazita sezonska ter majhna dnevna nihanja v zunanji temperaturi zraka. Primera 1 in 2 (LNBL in LOE) sta bila načrtovana za mediteransko klimo, ki predstavlja varianto zmerne klime s poudarjeno potrebo po hlajenju v poletnem času, ostali trije primeri pa imajo večjo potrebo po ogrevanju v zimskem in prehodnem obdobju. Z gledišča zasnove regulacijskega sistema so ravno prehodna obdobja med zimskim in poletnim časom tista, ki potencialno predstavljajo težavo, saj se v tem času lahko pojavlja kombinacija zelo različnih vremenskih razmer. V spomladanskem ali jesenskem času se lahko v 24 urah pojavi potreba po ogrevanju (noč, jutro, zvečer),

senčenju zaradi pregrevanja (visoki solarni pritoki v sredini dneva) ali celo aktivnem hlajenju, če senčenje ne zadostuje. Pri vseh opisanih sistemih, razen pri sistemu LBNL, je bila ta potencialna težava rešena na način, da se v času prehodnih obdobj uporabljata kombinacija regulacijske zanke za ogrevanje in hlajenje. V primeru sistema KAMRA in IRsNO je bil prehod med zimskim in poletnim režimom definiran s pomočjo razlike med notranjo in zunanjo temperaturo zraka. Če je notranja referenčna temperatura višja od zunanje izmerjene temperature zraka, sistem uporablja le regulacijsko zanko z ogrevalnim režimom, v obratnem primeru pa v določenem razmerju vplivata na delovanje aktuatorjev tako zimsko kot poletna temperaturna regulacijska zanka. Podobno pravilo je bilo uporabljeno tudi pri LESO-PB sistemu, kjer je bil prehod med ogrevanjem in ohlajevanjem definiran s pomočjo spremljanja povprečnih zunanjih dnevni temperatur zraka.

OGREVANJE HLAJENJE PREZRAČEVANJE	Primer 1 LBNL	Primer 2 LOE	Primer 3 LESO-PB	Primer 4 KAMRA	Primer 5 IRsNO
REGULACIJA					
ogrevanja	DA	DA	DA	DA	DA
hlajenja	DA	DA	DA	DA <sup>1</sup>	DA
prezračevanja	DA <sup>2</sup>	DA	NE	NE	DA
AKTUATORJI					
za regulacijo ogrevanja	žaluzije, KGH-sistem	žaluzije, KGH-sistem	tekstilni rolo, el. konvektorji	PVC-roleta, el. grelci	žaluzije, rad. paneli
za regulacijo hlajenja	žaluzije <sup>3</sup> , KGH-sistem	žaluzije, KGH-sistem, okno <sup>4</sup>	tekstilni rolo <sup>5</sup>	el. ventilator <sup>6</sup>	žaluzije, rad. paneli, okno <sup>4</sup>
za regulacijo prezračevanja	KGH-sistem	okno <sup>7</sup>	/	/	okno <sup>7</sup>
DELOVANJE					
prihranki pri ogrevanju	/	26,5 % <sup>9</sup>	25 %	/ <sup>10</sup>	/ <sup>10</sup>
prihranki pri hlajenju	7 – 32 % <sup>8</sup>	14 % <sup>9</sup>	/	/ <sup>10</sup>	/ <sup>10</sup>
odstopanja od reference	/	/	/	± 3 K	± 3 K

#### OPOMBE

<sup>1</sup> hlajenje s prezračevanjem (vgrajen ventilator) ter omejitev solarnih pritokov, aktivni sistem hlajenja ni bil vgrajen

<sup>2</sup> uporabljen je bil KGH-sistem za ogrevanje, hlajenje in prezračevanje z ločeno regulacijsko zanko

<sup>3</sup> fiksne žaluzije z možnostjo reguliranja naklona lamel

<sup>4</sup> hlajenje s prezračevanjem v primeru ugodnih zunanjih pogojev (npr. hlajenje v nočnem času)

<sup>5</sup> zgradba, v kateri je bil testiran regulacijski sistem, ni bila opremljena s sistemom aktivnega hlajenja

<sup>6</sup> hlajenje z ventilatorjem zaradi hitrega termičnega odziva testne celice v večini primerov ni bilo dovolj učinkovito

<sup>7</sup> fiziološko prezračevanje vezano na koncentracijo CO<sub>2</sub> v notranjem zraku

<sup>8</sup> prihranki so odvisni od pozicije fiksne žaluzije v referenčni pisarni

<sup>9</sup> poraba energije, merjena v obdobju od januarja do julija, letni prihranek energije za ogrevanje in hlajenje bi bil 20,5 %

<sup>10</sup> prihranki porabljene energije niso navedeni, saj sistem ni bil primerjan z referenčnim prostorom

Preglednica 2 • Pregled značilnosti primerjanih sistemov – regulacija ogrevanja, hlajenja in prezračevanja



Kot referenčno vrednost pri nadzoru ogrevanja in hlajenja so vsi sistemi razen LOE uporabljali notranjo temperaturo zraka. V primeru sistema LOE je bil kot regulirana vrednost uporabljen PMV-faktor, ki zajema širši spekter parametrov definiranja kvalitete notranjega okolja. Pri vseh sistemih, ki so primerjali porabo energije za ogrevanje in/ali hlajenje z referenčnim prostorom, je prišlo do zmanjšanja porabe energije (Preglednica 2), kar kaže na večjo energijsko učinkovitost holistično zasnovanih sistemov v primerjavi s konvencionalnimi sistemi. V primeru sistema KAMRA in IRsNO primerjava z referenčnim prostorom ni bila izvedena, pokazalo pa se je, da sta oba sistema sposobna zelo dobro slediti zelenim vrednostim notranje temperature zraka (Preglednica 2), kar izrazito vpliva na temperaturno ugodje uporabnikov. V primeru sistema 2 in 5 je bila regulacija hlajenja izvedena s pomočjo kombinacije senčenja, aktivnega hlajenja in hlajenja s prezračevanjem. Hlajenje z izmenjavo notranjega in zunanjega

zraka je uporabno predvsem v nočnem času, ko so zunanje temperature zraka nižje od zelenih notranjih vrednosti. V primeru sistema IRsNO je bilo na takšen način možno doseči znižanje notranje temperature zraka tudi za 5 K v času ene noči. V opisu sistema LOE ni navedeno, kako učinkovito je hlajenje s prezračevanjem, pričakovati pa je, da je manj učinkovito kot v primeru IRsNO, saj je regulirani prostor v milejši klimi, kjer so dnevna nihanja temperature zunanjega zraka manjša. Pri obeh sistemih, ki sta omogočala hlajenje s prezračevanjem, je bila izvedena tudi regulacija fiziološko pogojenega prezračevanja, ki je bilo vezano na mejno referenčno vrednost koncentracije CO<sub>2</sub> (Preglednica 2). Takšen način omogoča hitro, odzivno in učinkovito prezračevanje, ki zagotavlja konstanten nivo kvalitete zraka ter s tem močno vpliva na udobje uporabnikov.

Iz uporabljenih strategij regulacije termičnih procesov v obravnavanih primerih je možno zaključiti, da so le-te izrazito vezane na klimat-

ske danosti lokacije in značilnosti posamezne stavbe. S poznavanjem teh danosti je možno načrtovati polje aplikacij, ki so lahko uspešne pri neki stavbi. Glavni pristop, razviden iz analize opisanih primerov, je definicija dveh tipičnih sezonskih (v primeru zmerne klime) načinov delovanja stavbe in regulatorja. Definiranje zimskega (povečevanje solarnih dobitkov) in poletnega (preprečevanje pregrevanja) delovanja sistema predstavlja osnovno arhitekturo zasnove regulacijskih pravil. Takšna pravila ob upoštevanju časovne dinamike termičnih procesov v stavbi zagotavljajo primerno delovanje ob relativno monotoni zunanji pogoji. Težave nastopijo pri prehodnih obdobjih, kjer lahko nastopijo v enem dnevu tako zahteve po ogrevanju kot hlajenju. Primerna rešitev opisane težave je način, izveden v primerih sistemov KAMRA in IRsNO, ki uporabljata evaluacijsko funkcijo za določitev stopnje vpliva zimske in poletne regulacije na delovanje aktuatorjev.

### 3 • SKLEP

Analizirani primeri regulacijskih sistemov notranjega okolja ponujajo vpogled v področje intervencij v grajenem okolju z velikim potencialom za izboljšanje kvalitete bivalno-delovnega okolja in prihranke energije za delovanje stavb. Kljub dokazanemu potencialu za prihranke pri porabljeni energiji je število apliciranih sistemov relativno majhno (Selkowitz, 2004). Razlogi za takšno stanje so verjetno kompleksne narave, vendar so vsaj delno posledica slabega poznavanja potencialnih rešitev primarnih načrtovalcev stavb (arhitekti, gradbeni inženirji), nezainteresiranosti investitorjev ter majhnega števila komercialno dostopnih rešitev. Dodatni faktor sta verjetno tudi strošek izvedbe in kompleksnost sistemov, ki neizbežno potrebujejo strokovno vzdrževanje. Izvedena analiza osnovnih značilnosti ter medsebojna primerjava sistemov notranjega okolja predstavlja osnovne smernice za naprej. Skozi opise je orisana potrebna infrastruktura, ki ob primernem znanju o delovanju stavb kot sistemu izmenjave energije, snovi in informacij omogoča izboljšanje kvalitete notranjega okolja kot tudi zmanjšanje porabe energije. Pri regulaciji osvetljenosti se je kot zelo učinkovit izkazal sistem, ki zmanjšuje razliko med referenčno in regulirano vrednostjo s simultanim omejevanjem prepogostega

aktiviranja aktuatorjev. Regulacija ogrevanja in hlajenja predstavlja nalogo, neločljivo povezano s klimatskimi danostmi lokacije stavbe, glede na katere je treba oblikovati primerna regulacijska pravila. Glavna težava termične regulacije so predvsem nepredvidljiva prehodna obdobja, ki zahtevajo primeren dizajn sistema. Pri analiziranih sistemih je bila ta težava odpravljena z izvajanjem kombiniranih ukrepov med ogrevalno in hladilno sezono. Vpliv avtomatske regulacije na izboljšanje kvalitete notranjega delovno-bivalnega okolja je razviden iz rezultatov, doseženih z vsemi petimi sistemi, saj so vsi omogočali kvalitetno regulacijo notranje osvetljenosti, toplotnega ugodja in kvalitete zraka (regulirana v primeru sistema LOE in IRsNO). Pri sistemih LBNL, LOE in LESO-PB je bila opravljena primerjava porabljene energije za delovanje stavbe med referenčnim (obstoječi prostor) in avtomatsko reguliranim prostorom. Rezultati so pokazali na izredno velike potencialne prihranke pri porabljeni energiji za ogrevanje, ohlajevanje in umetno razsvetljavo (Preglednici 1 in 2). Kljub očitnim prednostim uporabe avtomatskih regulacijskih sistemov notranjega okolja pa se je treba zavedati pomena uporabnikov, saj ti ključno vplivajo na to, ali bo neki sistem v stavbi deloval ali ne. Pri uporabi popolnoma avtoma-

tiziranih regulacijskih sistemov se je izkazalo, da se zaznana učinkovitost sistema s strani uporabnikov lahko zelo razlikuje od dejanske fizikalne učinkovitosti le-tega (Ruck, 2000), kar lahko privede do nezadovoljstva uporabnikov z delovanjem sistema. Slednji bodo zaradi motečega delovanja (hitri premiki senčila, pogosto izklapljanje luči, hrup ...) takšen sistem verjetno zavrnili ali pa ga poskušali onemogočiti. Dodatno se je pokazalo, da je omogočanje ročnega nadzora nad delovanjem sistema zelo pomembno pri pripravljenosti uporabnikov, da avtomatski sistem sprejmejo. Možnost posega uporabnika v nastavitve in delovanje regulacijskega sistema omogoča individualizacijo nastavitvev ter s tem v določenih okvirih tudi boljše delovanje celotnega sistema. Seveda sistem, ki upošteva želje uporabnikov, deluje bolje in energijsko varčnejše le pri smiselnih zahtevah in nastavitvah delovanja. Prav tako mora biti vmesnik med sistemom in uporabniki izveden na nivoju, ki ne presega znanja in sposobnosti povprečnega uporabnika, saj v nasprotnem primeru ta takšnega sistema ne bo želel uporabljati. Pri preveč komplicirani komunikaciji med uporabnikom in regulacijskim sistemom obstaja možnost, da bo sistem ostal izključen oziroma se bo uporabljal le v ročnem načinu upravljanja (Shaw, 1998). Iz vsega naštetega je možno zaključiti, da se tako kot pri stavbi kot celoti tudi pri avtomatskih sistemih regulacije notranjega okolja vse prične in konča pri zahtevah, potrebah in odzivih uporabnikov.

## 4 • LITERATURA

- Ander, D. G., *Daylighting, Performance and design*, Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- Calvino, F., La Gennusa, M., Rizzo, G., Scaccianoce, G., The control of indoor thermal comfort conditions: introducing a fuzzy adaptive controller, *Energy and Buildings*, Elsevier, l. 36, št. 2, 97–102, 2004.
- Dounis, A. I., Manolakis, D. E., Design of a fuzzy system for living space thermal-comfort regulation, *Applied Energy*, Elsevier, l. 69, št. 2, 119–144, 2000.
- Fanger, P. O., *Thermal Comfort*, McGraw-Hill, New York, 1972.
- Guillemin, A., Morel, N., An Innovative lighting controller integrated in a self-adaptive building control system, *Energy and Building*, Elsevier, l. 33, št. 5, 477–487, 2001.
- Guillemin, A., Morel, N., Experimental results of a self-adaptive integrated control system in buildings: a pilot study, *Solar Energy*, Elsevier, l. 72, št. 5, 397–403, 2002.
- Guillemin, A., Using genetic algorithms to take into account user wishes in an advanced building control system, doktorska disertacija, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2003.
- Kladnik, R., Krainer, A., Perdan, R., Light and thermal energy coordination in building, V: PLEA 1997 KUSHIRO: the 14th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, 1997 Kushiro, Japan: proceedings. Vol. 1. Tokyo, PLEA, 59–64, 1997.
- Kolokotsa, D., Niachou, K., Geros, V., Kalaitzakis, K., Stavrakakis, G. S., Santamouris, M., Implementation of an integrated indoor environment and energy management system, *Energy and Buildings*, Elsevier, l. 37, št. 1, 93–99, 2005.
- Kolokotsa, D., Stavrakakis, G. S., Kalaitzakis, K., Agoris, D., Genetic algorithms optimized fuzzy controller for the indoor environmental management in buildings implemented using PLC and local operating networks, *Artificial Intelligence*, Elsevier, l. 15, št. 5, 417–428, 2002.
- Kolokotsa, D., Tsiavos, D., Stavrakakis, G. S., Kalaitzakis, K., Antonidakis, E., Advanced fuzzy logic controllers designed and evaluated for buildings occupants thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction, *Energy and Buildings*, Elsevier, l. 33, št. 6, 531–543, 2000.
- Košir, M., Integralen regulacijski sistem notranjega okolja na osnovi uporabe mehke logike, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2008.
- Košir, M., Krainer, A., Kristl, Ž., Solar gains regulation via holistically defined control system of the internal environment, *Proceedings Graz ISES*, Graz, 1–8, 2010.
- Krainer, A., Sustainable architecture, bioclimatic architecture, on line teaching package. SARA – Sustainable Architecture Applied to Replicable Public Access Buildings, [http://kske.fgg.uni-lj.si/Index\\_SI.htm](http://kske.fgg.uni-lj.si/Index_SI.htm), 2008.
- Kristl, Ž., Košir, M., Trobec-Lah, M., Krainer, A., Fuzzy control system for thermal and visual comfort in building, *Renewable Energy*, Elsevier, l. 33, št. 4, 694–702, 2007.
- Lee, S. E., DiBartolomeo, L. D., Selkowitz, E. S., Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office, *Energy and Buildings*, Elsevier, l. 29, št. 1, 47–63, 1998.
- Liang, J., Du, R., Design of intelligent comfort control system with human learning and minimum power control strategies, *Energy Conversion and Management*, Elsevier, l. 49, št. 4, 517–528, 2008.
- Onaygil, S., Güler, Ö., Determination of the energy saving by daylight responsive lighting control system with an example from Istanbul, *Building and Environment*, Elsevier, l. 38, št. 7, 973–977, 2003.
- Park, B. C., Choi, A. S., Jeong, J. W., Lee, E. S., Performance of integrated system of automated roller shade systems and daylight responsive dimming systems, *Building and Environment*, Elsevier, l. 46, št. 3, 747–757, 2011.
- Reinhart, C. F., Voss, K., Monitoring manual control of electric lighting and blinds, *Lighting Research & Technology*, SAGE, l. 35, št. 3, 243–260, 2003.
- Reinhart, C. F., *Lightswitch*, 2002, a model for manual and automated control of electric lighting and blinds, *Solar Energy*, Elsevier, l. 77, št. 1, 15–28, 2004.
- Rubinstein, F., Jennings, J., Avery, D., Blanc, S., Preliminary results from an advanced lighting controls testbed, IESNA 1998 Annual Conference, SanAntonio, TX, 10.–12. avgust, 1998, *Journal of the IES*, 1999.
- Ruck, N., Aschehoug, Ø., Aydinli, S., Christoffersen, J., Courret, G., Edmonds, I., Jakobiak, R., Kischkoweit-Lopin, M., Klinger, M., Lee, E., Michel, L., Scartezzini, J. L., Selkowitz, S., *Daylight in Buildings A source book on daylighting systems and components*, International Energy Agency (IEA) Solar Heating and Cooling Programme, Energy Conservation in Buildings & Community Systems, Pariz, 2000.
- Selkowitz, S., Lee, E., Integrating automated shading and smart glazings with daylighting controls, *International Symposium on Daylighting Buildings*, IEA SHC TASK 31, 2004.
- Singh, G., Zaheer-uddin, M., Patel, R. V., Adaptive control of multivariable thermal processes in HVAC systems, *Energy Conversion and Management*, Elsevier, l. 41, št. 15, 1671–1685, 2000.
- Shaw, I. S., *Fuzzy Control of Industrial Systems, Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London, 1998.
- Szokolay, S. V., *Introduction to architectural science, The basis of sustainable design – 2nd ed.*, Architectural Press, Oxford, 2008.
- Trobec-Lah, M., Zupančič, B., Krainer, A., Fuzzy control of illumination and temperature comfort in a test chamber, *Building and Environment*, Elsevier, l. 40, št. 12, 1626–1637, 2005.
- Trobec-Lah, M., Zupančič, B., Peternelj, J., Krainer, A., Daylight illuminance control with fuzzy logic, *Solar Energy*, Elsevier, l. 80, št. 3, 307–321, 2006.
- Vine, E., Lee, E., Clear, R., DiBartolomeo, D., Selkowitz, S., Office worker response to an automated Venetian blind and electric lighting system: a pilot study, *Energy and Buildings*, Elsevier, l. 28, št. 2, 205–218, 1998.
- Zupančič, B., *Zvezni regulacijski sistemi*, l. del, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2010.

# PROTIPOTRESNO UTRJEVANJE OPEČNIH ZIDOV S KOMPOZITNIMI OBLOGAMI

## SEISMIC STRENGTHENING OF BRICK MASONRY WALLS WITH COMPOSITE COATINGS

**prof. dr. Miha Tomažević, univ. dipl. inž. grad.,**

[miha.tomazevic@zag.si](mailto:miha.tomazevic@zag.si)

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

[matija.gams@zag.si](mailto:matija.gams@zag.si)

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

**Aleš Oblak, univ. dipl. inž. str.,**

[oblak.ales@si.sika.com](mailto:oblak.ales@si.sika.com)

Sika, d. o. o., Prevale 13, 1236 Trzin

**Znanstveni članek**

UDK: 699.841

**Povzetek** | Raziskovali smo učinkovitost protipotresnega utrjevanja opečnega zidovja z različnimi vrstami kompozitnih oblog, ki smo jih armirali bodisi z mrežo iz steklenih vlaken bodisi s tkanino iz steklenih oziroma karbonskih vlaken. Kot matrični material smo pri armiranju z mrežo uporabili z vlakni ojačeno cementno malto z nizkim modulom elastičnosti, pri armiranju s tkanino pa epoksidno smolo. Preverili smo tudi učinek karbonskih lamel, nalepljenih na zid z epoksidno smolo. Iz opeke normalnega formata dimenzij 250/125/60 mm smo s podaljšano malto nizke trdnosti sezidali 28 zidov. Na štirih smo ugotavljali mehanske lastnosti osnovnega zidovja, ostale pa smo utrdili in jih pri konstantni obremenitvi s tlačno silo preiskali s ciklično vodoravno obtežbo, delujočo v njihovi ravnini. V vseh primerih je bil porušni mehanizem strižnega tipa, njegova značilnost pa je bila delaminacija obloge, ki se je odtrgala od zidovja in izklonila takoj po nastanku poškodb v zidovju in skrčenju zidovja pri ponovljenih obremenitvah z vodoravno obtežbo. Zaradi delaminacije obloge je prišlo do hipnega upadanja odpornosti in togosti, kar je praktično pomenilo porušitev zidov. Preiskave so pokazale, da obloge s kompozitnimi materiali povečajo togost, v večini primerov povečajo odpornost, le malo pa izboljšajo deformacijsko kapaciteto zidov. Ne glede na to velja sklep, da so metode utrjevanja opečnih zidov s kompozitnimi oblogami učinkovita rešitev za povečanje potresne odpornosti. Rezultati raziskav tudi nakazujejo, v katero smer naj gre razvoj materialov in tehnologij, da bi se izboljšali deformacijska kapaciteta in sposobnost sipanja energije s kompozitnimi materiali utrjenih zidov.

**Summary** | The efficiency of strengthening of brick masonry walls for seismic loads by application of different types of composite coating, reinforced by either glass fibre grid or glass/carbon fibre fabric, has been investigated. Fibre reinforced cement mortar with low modulus of elasticity has been used as matrix material in the case of grid, and epoxy resin in the case of fabric reinforcement. In addition, the efficiency of carbon plates, glued on the masonry by epoxy resin, has been also studied. 28 walls, made of normal format, 250/125/60 mm bricks, laid in low strength lime-cement mortar, have been prepared for testing. Four specimens have been tested to determine the basic mechanical properties of unstrengthened masonry, whereas the others have been strengthened and tested by subjecting them to constant pre-loading and cyclic in-plane lateral load reversals. Failure



mechanism was of shear type and was characterized by delaminating of coating, which pulled off the masonry and buckled as soon as damages occurred in the walls. As a result of delaminating, sudden resistance and stiffness degradation took place, leading to collapse of the walls. The analysis of test results indicated, that by coating the walls, lateral in-plane stiffness is increased and lateral resistance improved. However, because of failure mechanism, composite coatings had little effect on the improvement of displacement capacity. Although a general conclusion can be made that the strengthening of brick masonry walls with composite coatings represents an efficient strengthening method, further efforts are needed to develop materials and application technologies which would reduce the rigidity of composite-based coatings, and improve the displacement and energy dissipation capacity of the strengthened walls.

## 1 • UVOD

V mestih in na podeželju na hribovitih in drugih potresno najbolj ogroženih območjih Slovenije so za gradnjo hiš stoletja uporabljali lokalno pridobljeni kamen. Opeko so izdelovali in zato tam z njo tudi gradili v severovzhodnem, potresno manj ogroženem ravninskem delu, ki je del Panonske nižine. Šele sredi 19. stoletja je v mestih opeka začela izpodrivati kamen. Potres leta 1895, ki je prizadel Ljubljano, ni bil posebno močan. Je pa povzročil dovolj škode, da je bil del mesta zgrajen na novo. Naravna nesreča je bila izkoriščena za razvoj Ljubljane, ki je šele z urbanizacijo in popotresno obnovo dobila pravo mestno podobo. Mestne večnadstropne stavbe so bile sicer še vedno zidane, vendar grajene z opeko. Po potresu je takratna oblast izdala predpis, v katerem so bila določila za izboljšanje kakovosti gradnje: zahteve glede trdnosti opeke in malte ter debeline zidovja v odvisnosti od višine stavbe in, za potresno odpornost še pomembneje, zahteve za povezovanje zidov z zidnimi vezmi (Vidrih, 1995). V številnih opečnih stavbah iz tistega obdobja je zato v zidovju najti jeklene trakove, v vogalih sidrane okrog navpično vloženi sider, s katerimi so povezali zidovje, v katerega so na podoben način sidrali tudi lesene oziroma kombinirane jekleno-lesene stropne konstrukcije.

Izkušnje z obnašanjem opečnih stavb po potresih pri nas nimamo veliko. Potresi, ki so v zadnjih desetletjih povzročali poškodbe (Ilirska Bistrica, 1956, Kozjansko, 1973, Posočje, 1976, 1998 in 2004), so prizadeli območja, kjer so bile v večini stare kamnite hiše. Opečnih hiš je bilo malo, še manj večnadstropnih, kakršne so v večjih mestih, novejša družinska hiša pa so se obnesle zadovoljivo, če le med gradnjo ni bilo večjih napak. Zato je bila pri nas, pa tudi drugod, kjer so razmere podobne, pozornost posvečena predvsem razvoju

tehnoloških rešitev za utrjevanje kamnitega zidovja. Čeprav pričakujemo, da se bodo opečne hiše, zgrajene z upoštevanje pravil, uveljavljenih po potresu leta 1895, obnašale bolje kot kamnite, pa novejša študije potresne ranljivosti kažejo ((Lutman, 2007), (Lutman, 2010)), da potresna odpornost teh stavb ne ustreza zahtevam današnjih standardov (Evrokod, 2005). Zato marsikatero opečno stavbo iz popotresnega obdobja, ki je danes razglašena za arhitekturno kulturno dediščino in bo ostala v uporabi, čaka protipotresna utrditev. Razen stavb arhitekturne dediščine je v Ljubljani in drugih mestih še precej drugih zidanih stavb vseh vrst, ki prav tako ne ustrezajo kriterijem današnjih standardov. Te stavbe so bile sezidane v obdobju med obema svetovnjima vojnima, še posebno po drugi svetovni vojni, dokler niso bili uveljavljeni prvi slovenski, kasneje jugoslovanski potresni predpisi ((Oredba, 1963), (Pravilnik, 1964)) oziroma dokler v visoki gradnji ni prevladal armirani beton.

Za utrjevanje opečnega zidovja starih zidanih stavb so bile razvite različne metode, osnovane na uporabi klasičnih materialov, cementne malte ali ometa, betona in jeklene armature, kot so oblaganje z armiranocementnim oziroma armiranobetonskim ometom, torkretiranje, prefiguriranje, injektiranje itd. Učinkovitost nekaterih metod je bila preverjena eksperimentalno s preiskavami v laboratoriju in na terenu, že utrjene stavbe pa so bile izpostavljene tudi ponovljenemu potresu. Kot smo že poročali tudi v Gradbenem vestniku ((Tomažević, 2005), (Tomažević, 2009)), so bile v nekaterih primerih metode utrjevanja učinkovite, v drugih pa so se izkazale za pomanjkljive.

V zadnjih desetletjih proizvajalci sanacijskih materialov ponujajo številne rešitve za

utrjevanje zidanih konstrukcij s kompozitnimi oblogami, ki so armirane s sintetičnimi materiali in ki so se izkazale učinkovite pri armiranobetonskih konstrukcijah. Pri njih s karbonskimi (CFRP) oziroma s steklenimi vlakni utrjeni polimeri (GFRP) nadomeščajo jekleno armaturo. Novim armaturam se prilagaja tudi matrični material, tj. material, v katerega je vložena armatura in ki armaturo povezuje z osnovno konstrukcijo. Namesto klasičnih ometov ali brizganega betona je matrika bodisi z vlakni ojačena cementna malta bodisi epoksidna smola. Razvite so bile različne tehnološke rešitve, učinkovitost marsikatere rešitve pa je bila preverjena tudi z laboratorijskimi preiskavami ((Schwegler, 1994), (Triantafillou, 2001), (ElGawady, 2006), (Konthesingha, 2010)). Postopki so tehnološko primerni, saj so precej bolj čisti kot pri klasičnih materialih. So suhi, preprosto prilagodljivi dejanskim razmeram, ne zahtevajo uporabe mehanizacije, so časovno izjemno učinkoviti itd. Čeprav doktrine varstva arhitekturne dediščine večinoma ne dopuščajo posegov v stare konstrukcije z materiali, ki niso kompatibilni z obstoječimi, so kompoziti večkrat primerni, saj z njihovo uporabo ne spreminjamo dimenzij elementov konstrukcije, ohranimo pa tudi osnovne funkcije obstoječih elementov. Pomanjkljivosti sta cena, ki je še danes, predvsem če se uporabljajo karbonska vlakna, razmeroma visoka, ter dejstvo, da njihova učinkovitost še ni dovolj raziskana.

Zaradi velikih razlik med mehanskimi lastnostmi zidovja in kompozitnih materialov (tlačne in natezne trdnosti in še posebno deformabilnostnih parametrov, modula elastičnosti in strižnega modula) je učinkovit prenos obremenitev med osnovnim zidovjem in kompozitnimi oblogami kljub različnim ponujenim tehnološkim rešitvam lahko vprašljiv. To še posebno velja pri potresni obtežbi, ki povzroča dodatne strižne in natezne obremenitve na stiku obeh vrst materialov. Ker se zanimanje za uporabo sodobnih materialov in tehnoloških

rešitev povečuje, cena materialov pa postaja sprejemljiva, smo v Zavodu za gradbeništvo Slovenije v sodelovanju s podjetjem Sika, d. o. o., slovensko izpostavo podjetja Sika AG iz Švice, zasnovali in izpeljali obsežen eksperimentalni program, v okviru katerega smo

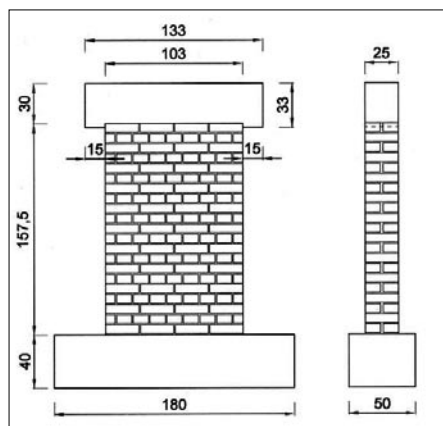
raziskovali učinkovitost spektra tehnoloških rešitev utrjevanja zidov z oblogami, armiranimi s kompozitnimi materiali, na potresno odpornost opečnih zidov. Cilj raziskav je bil pripraviti navodila za projektiranje in izvedenosti vrednosti parametrov, ki naj bi jih projek-

tanti posegov v stare zidane stavbe uporabljali pri preprojektiranju in računskem preverjanju učinkovitosti utrjevanja opečnih zidov s kompozitnimi oblogami. O delu eksperimentalnih raziskav, ki smo jih šele nedavno zaključili, poročamo v tem prispevku.

## 2 • PROGRAM RAZISKAV, METODE UTRJEVANJA IN PREISKAVE UČINKOVITOSTI

Pri zasnovi programa raziskav smo upoštevali stanje stroke in verjetnost, da se bo posamezna rešitev izkazala za uspešno tudi v praksi. Na podlagi rezultatov drugod opravljenih preiskav smo pozornost namenili učinku utrjevanja z oblogami, katerih armaturo predstavljajo mreža oziroma tkanina iz steklenih vlaken (GFRP), in ne toliko učinku utrjevanja s karbonskimi (CFRP) lamelami in z oblogami, armiranimi s karbonsko tkanino. Trdnost oblog z armaturo iz steklenih vlaken je sicer manjša, se pa te obloge zaradi večje deformabilnosti bolj prilagodijo lastnostim zidovja. Takšna obloga je tudi cenejša in s tem primernejša za širšo uporabo.

Raziskave možnosti uporabe kompozitnih oblog smo opravili na opečnih zidovih, ki naj bi predstavljali zidovje starih mestnih opečnih hiš. Ker nam v času izvajanja projekta ni uspelo pridobiti opeke iz primerne obstoječe stavbe, smo preizkusne zidove sezidali iz nove opeke, nabavljene na tržišču. Da bi raziskali učinkovitost različnih tipov oblaganja, smo v laboratoriju sezidali 28 zidov dimenzij 1500/1000/250 mm (višina/dolžina/debelina). Vsi so bili sezidani na armiranobetonskih temeljih, zaključeni pa z armiranobetonskimi vezmi, preko katerih smo v zidove vnašali navpično in vodoravno obtežbo in vanje po potrebi sidrali tudi kompozitno armaturo oblog. Dimenzije zidov prikazuje slika 1.



Slika 1 • Dimenzije preizkusnih zidov (v cm)

Na štirih zidovih smo ugotavljali mehanske lastnosti osnovnega, neutrjenega zidovja. Dva smo preiskali na tlak, dva pa smo, podobno kot utrjene zidove, pri konstantni tlačni obremenitvi preiskali s ciklično vodoravno obtežbo, delujočo v ravnini zidov. Ta, referenčna zidova sta služila za ugotavljanje učinka različnih načinov utrjevanja. Preostalih 24 zidov smo utrdili z 10 različnimi utrditvenimi rešitvami. Polovico, 12 zidov, smo pred utrditvijo preiskali v osnovnem stanju, pri čemer smo preiskavo zaključili po doseženi maksimalni odpornosti in nastanku zmernih poškodb, polovico pa smo utrdili v nepoškodovanem stanju. Vsega skupaj smo tako izvedli 38 preiskav s ciklično vodoravno obtežbo.

### 2.1 Načini utrjevanja

Zidove smo utrdili z različnimi vrstami oblog, pri čemer smo za armiranje uporabili mrežo iz steklenih vlaken (GFRP) ali pa tkanino iz steklenih (GFRP) oziroma karbonskih vlaken (CFRP). Glede na matrični material in uporabljeno armaturo lahko tipe utrditev razdelimo v štiri skupine:

- oblogo s cementno malto, armirano z GFRP-mrežo,
- oblogo z GFRP-tkanino v matriki iz epoksidne smole,
- oblogo s CFRP-tkanino v matriki iz epoksidne smole in
- utrditev s CFRP-lamelami, nalepljenimi na zidovje z epoksidno smolo.

Podrobneje so posamezni načini utrjevanja opisani v naslednjih točkah:

- utrditev tipa 5: enostranska obloga iz 15 mm debele z vlakni ojačene cementne malte z nizkim modulom elastičnosti, armirana z navpično položeno GFRP-mrežo, ki ni bila sidrana v zid;
- utrditev tipa 6: enaka obloga, vendar položena na obeh straneh zidu. Obloga tipa 6a ni sidrana v zid, obloga tipa 6b je

sidrana s petimi, obloga tipa 6c z osmimi, obloga tipa 6d pa s 13 sidri;

- utrditev tipa 7: obojestranska obloga iz 25 mm debele cementne malte, po celotni površini zidu armirana z diagonalno položeno GFRP-mrežo, dodatno pa ob robovih še z 250 mm širokima, v navpični smeri položena trakovoma enake GFRP-mreže. Obloga je sidrana s po 4 sidri v vsakem vogalu zidu;
- utrditev tipa 8: enostranska obloga iz diagonalno in navpično položenih 300 mm širokih trakov iz GFRP-tkanine v 2 mm debeli epoksidni matriki, sidrana s po 4 sidri v vsakem vogalu zidu;
- utrditev tipa 9: enako kot tip 8, vendar obojestransko položena obloga;
- utrditev tipa 10: enako kot 9, le da je tkanina iz karbonskih vlaken (CFRP);
- utrditev tipa 11: zid je na obeh straneh utrjen z diagonalno in navpično položenimi togimi CFRP-lamelami (trakovi), nalepljenimi na zid z epoksidno smolo. Lamele (trakovi) so sidrani v temelj in zaključno armiranobetonsko vez;
- utrditev tipa 12: obojestranska obloga iz vodoravno položene GFRP-tkanine v 2 mm debeli epoksidni matriki, sidrana z 8 sidri;
- utrditev tipa 13: obojestranska obloga iz 15 mm debele cementne malte, armirana z diagonalno položeno GFRP-mrežo, ki ni bila sidrana v zid;
- utrditev tipa 14: obojestranska obloga iz tankega sloja cementne malte, armirana z navpično položeno GFRP-mrežo, sidrana v zid z 8 sidri.

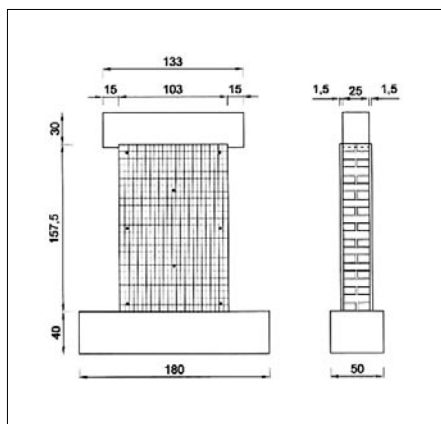
Značilnosti posameznih tipov utrditve so povzete v preglednici 1. Navedeno je tudi število zidov, utrjenih na posamezen način ter koliko in kateri zidovi so bili pred preiskavo v utrjenem stanju že poškodovani. Način polaganja kompozitne armature oblog je shematično prikazan na slikah 2–5, posamezni detajli utrjevanja pa na slikah 6 in 7. Utrjevanje zidov v laboratoriju so izvedli inštruktorji sodelujočega podjetja v skladu s tovarniškimi navodili. Pred utrditvijo so bili predhodno že poškodovani zidovi sanirani z injektiranjem oziroma zapiranjem razpok z epoksidno smolo.

Tip	Št. sider	Armatura	Smer	Matrika	Št. zidov
5*	-	GFRP-mreža	Navpično	Malta	2 (2)**
6a	-	GFRP-mreža	Navpično	Malta	1
6b	5	GFRP-mreža	Navpično	Malta	2 (1)
6c	8	GFRP-mreža	Navpično	Malta	2 (1)
6d	13	GFRP-mreža	Navpično	Malta	1
7	4 x 4 v vogalih	GFRP-mreža	Diagonalno	Malta	2 (2)
8*	4 x 4 v vogalih	GFRP- tkanina	Diag.+navp.	Epoksi	2
9	4 x 4 v vogalih	GFRP- tkanina	Diag.+navp.	Epoksi	2
10	4 x 4 v vogalih	CFRP- tkanina	Diag.+navp.	Epoksi	2
11	-	CFRP-lamele	Diag.+navp.	Epoksi	2
12	8	GFRP- tkanina	Vodoravno	Epoksi	2 (2)
13	-	GFRP-mreža	Diagonalno	Malta	2 (2)
14	8	GFRP-mreža	Navpično	Tenka malta	2 (2)

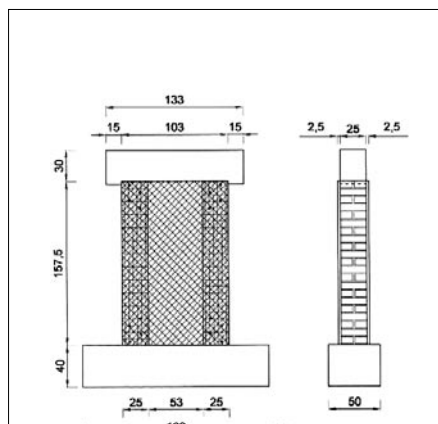
\* Enostranska obloga

\*\* V oklepaju je navedeno število predhodno poškodovanih zidov

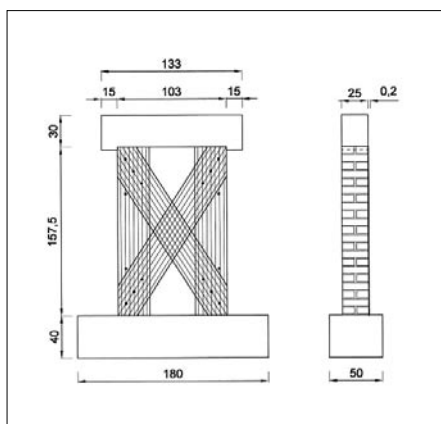
Preglednica 1 • Načini utrjevanja



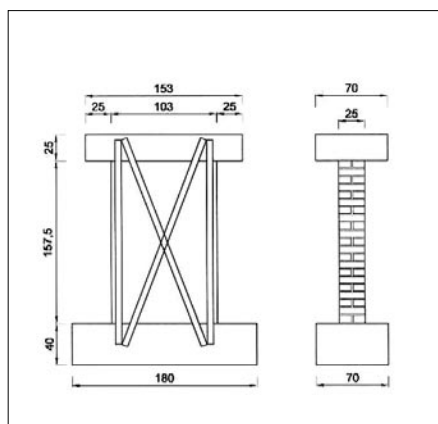
Slika 2 • Kategorija a, tip 6c. Shematični prikaz utrditve (mere v cm)



Slika 3 • Kategorija a, tip 7. Shematični prikaz utrditve (mere v cm)



Slika 4 • Kategorija a ali c, tipi 8-10. Shematični prikaz utrditve (mere v cm)



Slika 5 • Kategorija d, tip 11. Shematični prikaz utrditve (mere v cm)



Slika 6 • Diagonalno postavljena GFRP-mreža in nanašanje cementne malte



Slika 7 • Vgrajevanje karbonskih sider:  
a.) vstavljanje sider v luknjo,  
b.) razširitev vlaken pred nanosom matrike

## 2.2 Materiali

Kot rečeno, smo za zidanje namesto stare opeke, odvzete iz obstoječe stavbe, uporabili novo polno opeko normalnega formata (250/125/60 mm) deklarirane tlačne trdnosti 20 MPa (dejansko 29 MPa) in podaljšano malto, ki smo ji dodali le toliko cementa, da je hitro pridobila želeno trdnost. Iz razpoložljive banke podatkov (Lutman, 2009) je razvidno,



da tlačna trdnost uporabljene opeke ustreza trdnosti stare opeke boljše kakovosti. Volumsko razmerje med cementom, apnom in peskom je bilo 0,25 : 1,8, povprečna vrednost tlačne trdnosti, določene na vzorcih, odvzetih med zidanjem vseh zidov, pa 1,14 MPa. Tudi ta vrednost je v skladu z vrednostmi, ugotovljenimi na dejanskih starejših stavbah.

Za utrditev zidov smo uporabili material, ki ga sodelujoče podjetje ponuja na tržišču. Mehanskih in drugih lastnosti uporabljenih materialov nismo preiskovali. Ker ima proizvajalec vzpostavljen učinkovit sistem kontrole kakovosti, smo se zadovoljili z deklariranimi podatki.

Mreža iz steklenih vlaken SikaWrap®-350G se uporablja v kombinaciji s cementno malto Sika® MonoTop®-722 Mur. Mreža z okenci približno 17/15 mm (nominalno 15,7/10,1 mm) je mreža iz steklenih vlaken z alkalno odporno oblogo. Trdnost posamezne niti je 3,4 GPa, obremenitve, ki jih prenese mreža, pa so 77 kN/m v vzdolžni in 76 kN/m v prečni smeri. Natezna togost, ki se izraža z obremenitvijo pri 1 % raztezka, je 20 kN/m v vzdolžni in 25 kN/m v prečni smeri. Raztezek pri porušitvi je 3 %.

Malta Sika® MonoTop®-722 Mur je z vlakni ojačena cementna malta z nizkim modulom elastičnosti, ki vsebuje reaktivne pucolanske komponente, izbrane agregate in posebne dodatke. Tlačna trdnost po 28 dneh, določena po standardu EN 196-1, je 22 MPa, upogibna trdnost 7 MPa in modul elastičnosti, določen po EN 13412, 8 GPa.

Tkanina iz steklenih vlaken SikaWrap®-430G je enosmerno pletena tkanina, ki se na zidove nanaša in lepi z epoksidno smolo Sikadur®-330. Tkanina je debela 0,17 mm in ima modul elastičnosti v nategu 76 GPa. Deformacija pri pretrgu je 2,8 %, natezna trdnost vlaken pa 2,3 GPa. Tkanina iz karbonskih vlaken SikaWrap®-230C je tudi enosmerno pletena tkanina, ki se na zidove polaga v epoksidni matriki Sikadur®-330. Tkanina je debela 0,131 mm in ima modul elastičnosti v nategu 238 GPa. Raztezek pri pretrgu je 1,8 %, natezna trdnost vlaken pa 4,3 GPa.

Sikadur®-330 je dvokomponentna impregnacijska epoksidna smola, ki se uporablja pri nanašanju GFRP- ali CFRP-tkanine na zidovje. Njene lastnosti, izmerjene v skladu s standardom DIN 53455 po 7 dneh, so: natezna trdnost 30 MPa, upogibni modul elastičnosti 3,8 GPa, natezni modul elastičnosti 4,5 GPa in raztezek pri porušitvi 0,9 %.

Sidra iz karbonskih vlaken SikaWrap®Anchor C so v gazo zavita karbonska vlakna, priprav-

ljena v obliki vrvi premera 10 mm, ki se razreže na primerne kose. Natezna trdnost vlaken je 1,59 GPa. Preden se vložijo v luknje, na zahtevanih mestih izvrtane skozi zid, se razrežejo na kose, ki so približno 200 mm daljši od debeline zidu. Z njih se odstrani ovoj (gaza), sidra pa se namočijo v epoksidno smolo. Sidra se skozi luknje, zapolnjene z epoksidno smolo, vstavijo s preprostim orodjem (slika 7a). Na obeh straneh zidu se vlakna pahljačasto razširijo in prilepijo na pripravljeno površino z epoksidno smolo (slika 7b).

CFRP-lamele (trakovi) Carbodur® S 512 so trakovi dimenzije 50/1,2 mm (širina/debelina), ki se na zid nalepijo z dvokomponentnim epoksidnim lepilom Sikadur®-30. Modul elastičnosti trakov je 165 GPa, natezna trdnost 2,8 GPa, raztezek pri porušitvi pa 1,7 %.

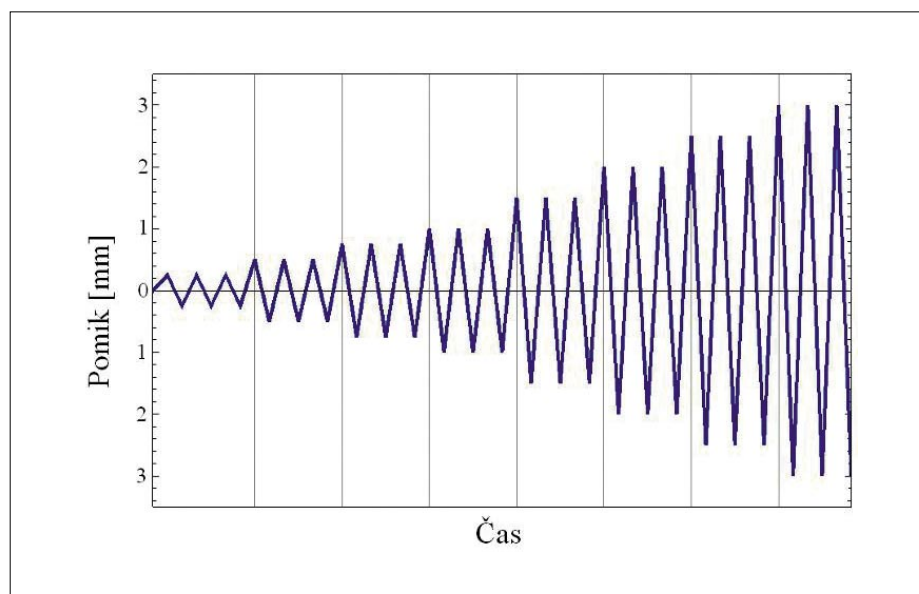
### 2.3 Potek preiskave in meritev

Postopek določevanja tlačne trdnosti in modula elastičnosti zidovja je bil v skladu s standardom EN 1052-1, v osnovnem, neutrjenem stanju pa smo preiskali samo dva zidova. Povprečna vrednost tlačne trdnosti zidovja je bila  $f_c = 4,1$  MPa, modul elastičnosti pa  $E = 1094$  MPa.

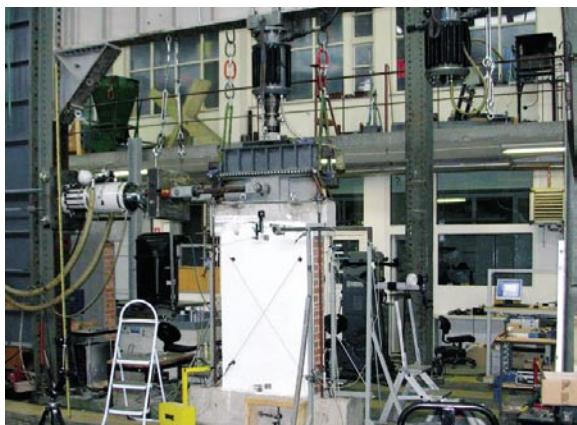
Vse preostale zidove smo preiskali kot navpične elemente, obremenjene s konstantno navpično silo, ki je v zidovih povzročala povprečne tlačne napetosti,  $\sigma$ , v velikosti 30 % povprečne tlačne trdnosti zidovja,  $f_c$  (razmerje predobremenitve  $\sigma/f_c = 0,3$ ). Vodravne potresne sile, delujoče v ravnini zidov, smo ponazorili z vsiljenimi, programiranimi cikličnimi pomiki, ki jih je povzročal dvosmer-

no delujoči hidravlični bat, preko kardanske gredi pritrjen na zaključno vez zidu. Amplitude vsiljenih pomikov smo postopoma povečevali vse do porušitve zidov. Pri vsaki amplitudi smo obremenjevanje trikrat ponovili, s čimer smo ugotavljali upadanje odpornosti in togosti pri ponavljajočih se cikličnih obremenitvah. Potek pomikov med preiskavo je shematično prikazan na sliki 8.

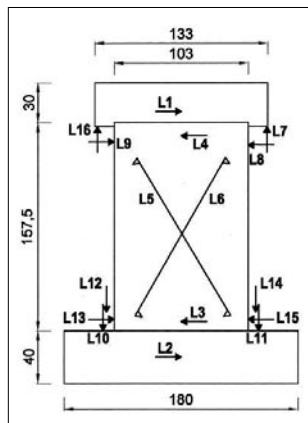
Armiranobetonski temeljni bloki, na katerih so bili zidovi sezidani, so bili z vijaki pritrjeni na laboratorijsko preizkuševalno ploščad, pričakovano vrtenje (rocking) s tega obloga utrjenih zidov, pa smo želeli preprečiti s sistemom navpičnih jeklenih vezi, postavljenih ob navpičnih robovih zidu. Vezi smo prednapeli toliko, da je na vsaki strani zidu sila v vezeh znašala 10 % celotne predobremenitve (sila v batu 80 %). Silo v palicah vezi smo med preiskavo merili in jo, če je bilo to potrebno, po vsakem ciklu obremenjevanja zidu nastavili na novo. Preizkuševalni sistem je predstavljal jekleni preizkuševalni okvir, na katerega sta bila pritrjena hidravlična bata za nanos obtežbe. Konstantno navpično silo, ki se je preko jeklene profila in valjčnega ležišča prenašala na zaključno vez zidu, je povzročal enosmerno delujoči bat, povezan s plinskim akumulatorjem. Vodravne pomike smo vsiljevali z dvosmerno delujočim programskim batom, ki je bil z zidom oziroma zaključno vezjo povezan s členkasto priključenim jeklenim drogrom (slika 9). Zidovi so bili opremljeni z merilniki pomikov, deformacij in sil, s katerimi smo merili pomike, zasuke in sile. Instrumentiranje zidov prikazuje slika 10.



Slika 8 • Shematično prikazan časovni potek vsiljenih pomikov med preiskavo zidov



Slika 9 • Pogled na tipičen zid med preiskavo



Slika 10 • Razporeditev merilnih pomikov (mere v cm)

### 3 • REZULTATI PREISKAV IN ANALIZA

#### 3.1 Porušni mehanizmi

V vseh primerih je med preiskavo prevladoval strižni mehanizem obnašanja. Kot kažejo meritve in oblika histereznih zank odvisnosti sila-pomik, izmerjenih med preiskavo, so jeklene navpične vezi v veliki meri preprečile tudi vrtenje zidov (rocking) na temelju.

Pri referenčnih, neutrjenih zidovih so poškodbe v obliki diagonalno usmerjenih razpok najprej nastale v osrednjem območju zidov. S povečevanjem amplitud vsiljenih pomikov so nastajale nove razpoke, ki so potekale tako po

vodoravnih in navpičnih regah kot po opeki in so se razširile po celotni površini zidov. Število razpok se je večalo in njihova širina povečevala, pri ponovljenih obremenitvah z enako amplitudo pa je zid začel izgubljati odpornost. Zid se je porušil, ko sta začela razpadati stranska dela zidu, s širokima poševnima razpokama ločena od osrednjega dela (slika 11).

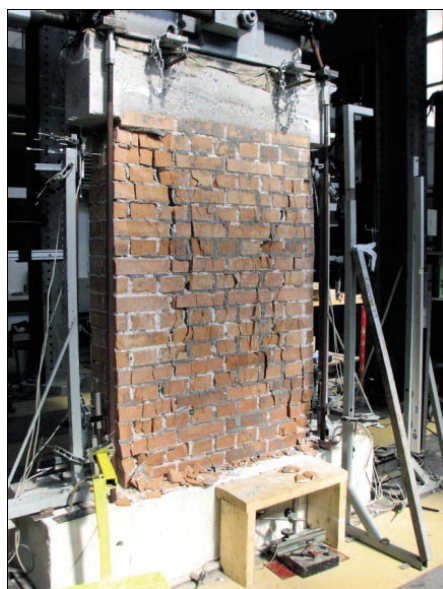
Pri zidovih, utrjenih z oblogami, lahko v splošnem ločimo dve fazi obnašanja: fazo, ko se utrjeni zid obnaša kot monolitni element,

in fazo, ko se obloga loči od zidovja. Pred ločitvijo – delaminacijo se z oblogo utrjeni zid obnaša kot monolitni element sestavljenega prereza. Ko pa zaradi velikih strižnih napetosti, nastalih med na eni strani togo in močno oblogo, na drugi strani pa mehkim in šibkim zidovjem, odpove slabši material in se obloga začne ločevati oziroma se odlupi, pride do trenutnega padca odpornosti in togosti. V končni fazi se vse obremenitve spet prenašajo po zidovju, tako da se vsa preostala kapaciteta odpornosti lahko pripiše osnovnemu zidu.

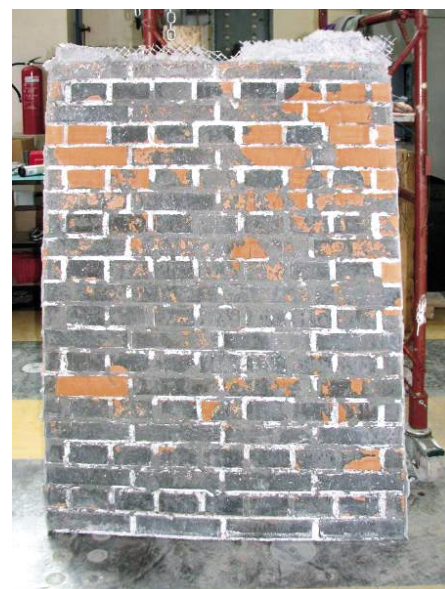
Pri zidovih, utrjenih z oblogo iz z vlakni ojačene cementne malte, armirane z GFRP-mrežo (utrditev tipa 5, 6 in 13), je bil mehanizem odtrganja (delaminacije) obloge odvisen od števila sider,



Slika 11 • Referenčni, neutrjeni zid pred porušitvijo

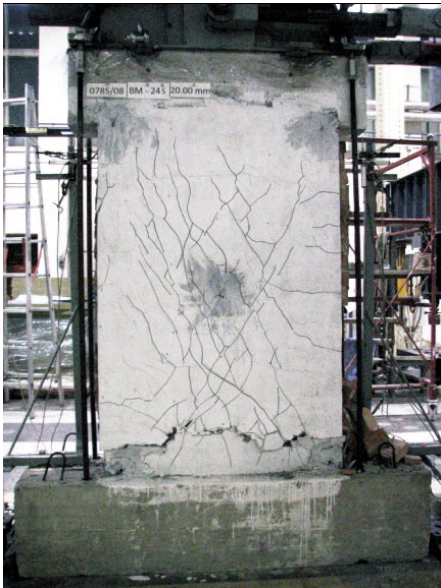


Slika 12 • Diagonalno položena GFRP-mreža v cementni malti (utrditev tipa 13): razpoke v zidu po odstranitvi delaminirane obloge

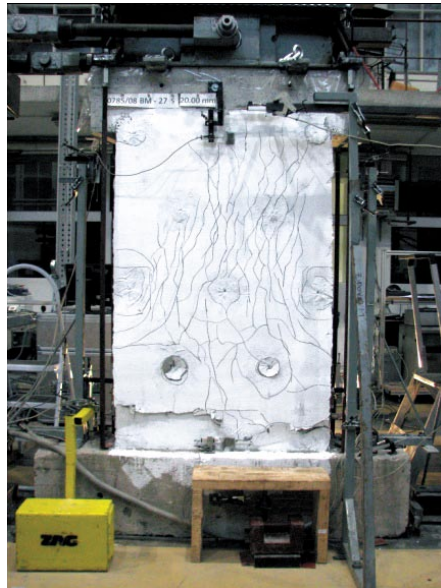


Slika 13 • Diagonalno položena GFRP-mreža v cementni malti (utrditev tipa 13): odstranjena obloga po končani preiskavi zidu

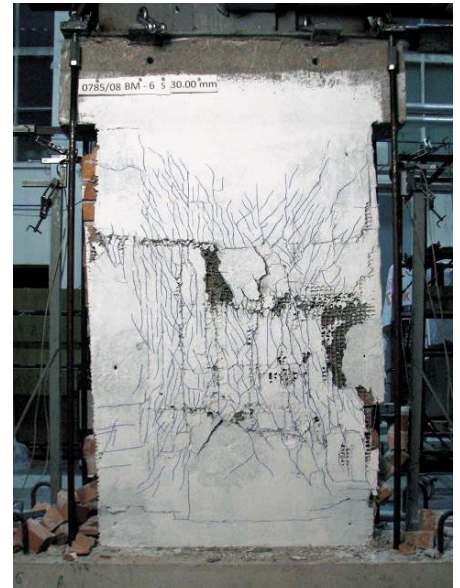




Slika 14 • Navpično položena GFRP-mreža v cementni malti, 5 sider (utrditev tipa 6b). Poškodbe pri porušitvi



Slika 15 • Navpično položena GFRP-mreža v cementni malti, 13 sider (utrditev tipa 6d). Poškodbe pri porušitvi



Slika 16 • Pretrganje GFRP-mreže pri porušitvi zidu (utrditev tipa 14)

s katerimi je bila obloga povezana z osnovnim zidom, pa tudi od smeri, v kateri je bila mreža položena. V primerih, ko sider ni bilo (utrditev tipa 5 in 6a in 13), so v spodnjem delu zidu najprej nastale vodoravne upogibne razpoke. Te so se pri navpično položeni mreži precej povečale, medtem ko so bile pri diagonalno položeni mreži manj izrazite. Ker je obloga v območju vodoravne razpoke kmalu začela odstopati od zidu, se ostale razpoke niso pretirano širile in povečevale. Ko so vsiljeni pomiki dosegli vrednost mejnega pomika osnovnega zidu, je obloga v celoti odstopila. Odpornost zidu je pri ponovljeni obremenitvi z enako amplitudo pomika močno padla. Na sliki 12 se vidi stanje razpok v zidu po odstranitvi odlep-ljene obloge z diagonalno položeno mrežo, slika 13 pa prikazuje po preiskavi odstranjeno oblogo z diagonalno položeno GFRP-mrežo, naneseno na isto stran zidu. Na primeru obloge z GFRP-mrežo v malti se na odtisu obloge lepo vidi, da se je večinoma porušil stik med malto in opeko. Čeprav sledovi opeke na oblogi kažejo dobro sprjemnost, so večji deli opeke ostali le na manjšem delu površine obloge, ki se, nanesena na zid brez sider, niti ni premočno poškodovala.

Pri utrditvi, kjer je bila enaka obloga sid-rana (utrditev tipa 6b, 6c in 6d), so sidra preprečila njeno popolno delaminacijo. Tudi pri teh zidovih je najprej tik nad spodnjo vrsto sider nastala vodoravna razpoka, pri povečanih vsiljenih pomikih pa skoraj po celotni površini obloge poševno usmerjene

razpoke. Ob robovih je bilo opaziti tudi nekaj vodoravnih razpok, nastalih zaradi upogiba utrjenega zidu (slika 14). Čeprav je kazalo, da obloga dobro sodeluje z osnovnim zi-dom, je pri povečanih obremenitvah začela odstopati. V končnem stanju se je del obloge tik nad vodoravno razpoko, kjer se je po nekaj ciklih obremenjevanja začela drobiti tudi opeka, izklonil in porušil. Okrog sider je lepo vidna krožna porušna linija (slika 15). V

primeru obloge, kjer je bila mreža položena v tanki malti (utrditev tipa 14), je pred porušitvijo nastala razmeroma velika, diagonalno usmer-jena razpoka, mreža iz steklenih vlaken pa se je vzdolž razpoke strgala (slika 16). To je povzročilo, da se odpornost in deformacijska kapaciteta zidu v primerjavi z referenčnim zidom nista prav nič povečali.

Pri zidovih, ki so bili utrjeni z diagonalno položeno GFRP-mrežo, ojačeno ob robovih



Slika 17 • Poševno usmerjene razpoke v osrednjem delu zidu in natezne razpoke v robnih ojačitvah (utrditev tipa 7)



Slika 18 • Detajl pretrganja niti diagonalno položene GFRP-mreže (utrditev tipa 7)

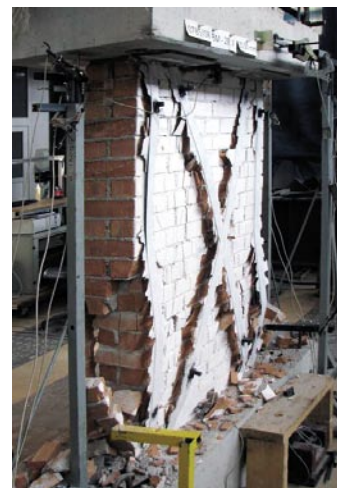




Slika 19 • Detajl odlučene obloge z GFRP-kanino v epoksidni matriki po končani preiskavi (utrđitev tipa 9)



Slika 20 • Izbočenje obloge z GFRP-kanino v epoksidni matriki (utrđitev tipa 9)



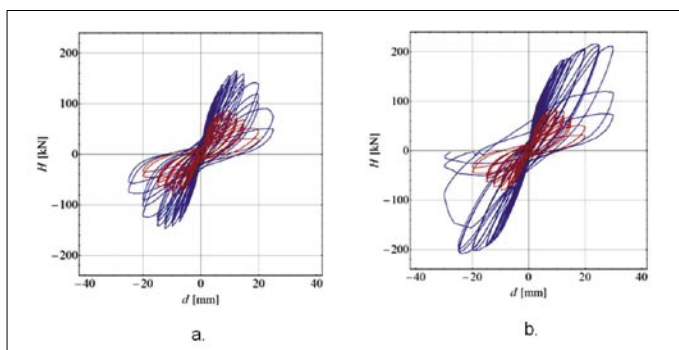
Slika 21 • Zid, utrjen s CFRP-trakovi (utrđitev tipa 11), pred porušitvijo

zidov z navpičnimi trakovi iz enake mreže, v vogalih sidranimi s sidri iz karbonskih vlaken (utrđitev tipa 7), je bil mehanizem porušitve drugačen. V osrednjem delu zidov med obema robnima ojačitvama je nastala mreža enakomerno porazdeljenih, diagonalno usmerjenih razpok. Ko so med preiskavo vsiljeni pomiki presegli mejne vrednosti referenčnih zidov, so v pasovih robnih ojačitvah nastale vodoravne natezne razpoke. V končni fazi se je zid porušil zaradi povečanja poševne razpoke v osrednjem delu zidu, kar je privedlo do pretrganja mreže (sliki 17 in 18). Tudi v tem primeru je prišlo do delaminacije posameznih delov obloge, vendar pri občutno povečani odpornosti in pri večjih pomikih kot pri referenčnem zidu.

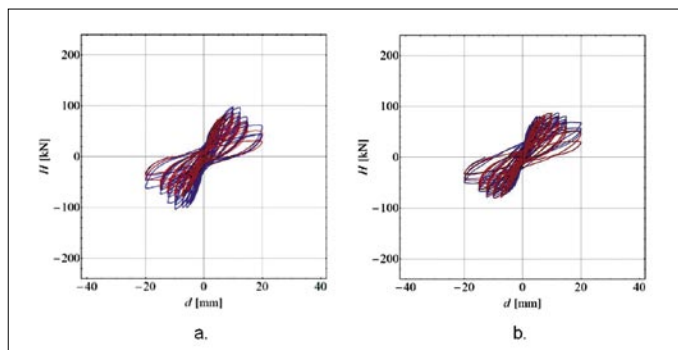
Porušni mehanizmi zidov, utrjenih z oblogo iz GFRP- ali CFRP-kanine v matriki iz epoksidne smole (utrđitve tipa 8–10 in 12), so bili nekoliko drugačni. Predvsem so bili odvisni od porazdelitve in števila sider. V primeru, ko so bila sidra skoncentrirana v vogalih zidov, se je obloga bodisi odlučila bodisi izbočila po celi površini zidu (sliki 19 in 20), pri čemer je – v nasprotju z malto – odtrgala plast opečnega materiala. V primerih, ko so bila sidra enakomerno porazdeljena po celotni površini zidu (utrđitev tipa 12), pa je prišlo do lokalnega izbočenja obloge. Takoj ko je delaminacija obloge dosegla dovolj veliko površino, se je učinek utrđitve izgubil.

Pri zidovih, ki so bili utrjeni s CFRP-lamelami/trakovi, z epoksidno smolo nalepljenimi na zid v obeh diagonalnih smereh in navpično ob obeh

robvih zidov (utrđitev tipa 11), so trakovi začeli odstopati in se izklanjati že pri razmeroma majhnih amplitudah vsiljenih pomikov (slika 21). Čeprav sidranje lamel v beton temeljnega bloka in zgornjo armiranobetonsko vez ni popustilo, odtrgane lamele niso imele nobenega učinka na odpornost in deformabilnost preiskanih zidov. Pri utrđitvi s togimi lamelami so še posebno prišlo do izraza velike razlike v deformabilnosti enega in drugega materiala: ko so v zidu zaradi nastalih poškodb pri ciklični obtežbi začeli nastajati opaznejši skrčki (deformacije v navpični smeri), so toge lamele, nalepljene z epoksidno smolo, takoj iztrgale plast opeke in se izbočile. Kot v primeru GFRP- ali CFRP-kanine v epoksidni matriki je bilo tudi v primeru CFRP-lamel, nalepljenih z epoksidno smolo, zidovje tisti material, ki je prvi popustil.



Slika 22 • Obloga s cementno malto, armirano z GRP-mrežo, sidrano v zid, je močno izboljšala odpornost, ne pa toliko deformacijsko kapaciteto zidu. Rdeče: neutrjeni zid a.) navpično položena mreža (utrđitev tipa 6c), b.) diagonalno položena mreža z robnimi ojačitvami (utrđitev tipa 7)



Slika 23 • Obloga z GFRP- ali CFRP-kanino v epoksidni smoli (utrđitev tipov 8–10 in 12) je nekoliko izboljšala odpornost (a), medtem ko CFRP-lamele (utrđitev tipa 11) niso vplivale na mehanske lastnosti zidu (b). Rdeče: neutrjeni zid

### 3.2 Odpornost in deformabilnost

Med preiskavo s ciklično vodoravno obtežbo smo merili odvisnosti med vodoravnimi silami in pomiki zgornjega roba zidov. Nekaj histereznih odvisnosti med vodoravno silo in pomiki, izmerjenimi na zidovih, značilnih predstavnikih vseh kategorij utrditvenih metod, je prikazanih na slikah 22 in 23. Za boljše predstavo o učinkih posameznih utrditvenih metod so na vseh slikah vrisane tudi histerezne odvisnosti, izmerjene med preiskavo neutrnjenih, referenčnih zidov.

Da bi lahko ovrednotili učinkovitost posameznih utrditvenih načinov, smo med seboj primerjali odpornost in deformacijsko kapaciteto pri treh mejnih stanjih, ki jih lahko definiramo na ovojnicah histerezne zank:

- mejno stanje nastanka razpok (poškodb); stanje je določeno z vodoravno silo in pomikom, pri katerih v zidu nastanejo razpoke (poškodbe), ki povzročijo očitno spremembo togosti;
- maksimalna odpornost;
- mejno stanje porušitve, ki je določeno z močnim upadanjem odpornosti pri ponovitvi strižnih obremenitev oziroma s samo porušitvijo zidu.

Rezultati preiskav so povzeti v preglednici 2, kjer so pri značilnih mejnih stanjih navedene vrednosti vodoravne sile,  $H$ , pomika, izmerjenega v višini zaključne vezi,  $d$ , in pomika, izraženega v brezdimenzijski obliki s kotom zasuka,  $\Phi$ , to je z razmerjem med pomikom zidu v višini zaključne vezi in višino zidu,  $h$ ,  $\Phi = d/h$  (v %  $h$ ). V preglednici 2 navedene vrednosti so povprečja, izmerjena pri prvem od treh amplitudnih ciklov v pozitivni in negativni smeri. Za primerjavo so navedene tudi vrednosti, izmerjene med preiskavo referenčnih zidov.

Rezultati preiskav so analizirani v preglednici 3, kjer so vrednosti odpornosti in pomikov utrjenih zidov primerjane s povprečnimi vrednostmi, izmerjenimi med preiskavo neutrnjenih, referenčnih zidov. Med seboj so primerjane tudi vrednosti efektivne togosti, dogovorno definirane z razmerjem med vodoravno silo in pomikom pri mejnem stanju poškodb,  $K_g = H_{cr}/d_{cr}$ .

Če analiziramo rezultate, navedene v preglednici 3, lahko ugotovimo, da je debelejša obloga, tj. obloga iz cementne malte, armirana z GFRP-mrežo, nekoliko bolj izboljšala odpornost zidu kot tanjša obloga, tj. obloga z GFRP- ali CFRP- $\lambda$ kanino v matriki iz epoksidne smole. V prvem primeru se je odpornost glede na odpornost osnovnega zidu povečala za 20–70 %, v drugem pa za 17–42 %. Proti pričakovanjem

Tip utrditve	Meja poškodb			Maksimalna odpornost			Porušitev		
	$H_{cr}$ (kN)	$d_{cr}$ (mm)	$\Phi_{cr}$	$H_{max}$ (kN)	$d_{max}$ (mm)	$\Phi_{max}$	$H_u$ (kN)	$d_u$ (mm)	$\Phi_u$
<b>Neutrnjeno</b>	<b>54,74</b>	<b>3,00</b>	<b>0,19</b>	<b>89,54</b>	<b>9,01</b>	<b>0,58</b>	<b>34,33</b>	<b>20,00</b>	<b>1,28</b>
5	44,41	1,75	0,11	107,79	11,02	0,71	39,89	20,00	1,30
6a	56,52	1,50	0,10	114,34	6,68	0,43	36,51	14,99	0,96
6b	59,75	1,50	0,10	132,93	9,15	0,59	35,62	22,50	1,46
6c	57,87	1,75	0,11	143,09	12,35	0,80	54,72	22,49	1,46
6d	63,97	2,00	0,13	125,10	13,45	0,86	18,60	24,97	1,60
7	94,70	3,50	0,23	204,18	21,69	1,40	17,47	30,05	1,93
8	44,44	1,50	0,10	104,39	9,82	0,63	40,63	17,51	1,12
9	39,65	1,50	0,10	108,82	11,71	0,75	31,80	19,98	1,28
10	44,86	1,50	0,10	115,77	9,89	0,64	21,54	19,99	1,29
11	42,67	1,50	0,09	76,12	11,03	0,69	33,77	17,49	1,10
12	63,18	2,75	0,17	126,58	13,68	0,85	29,34	19,99	1,25
13	81,38	3,00	0,19	153,27	10,80	0,70	42,67	17,48	1,13
14	53,95	2,00	0,13	125,41	15,97	1,00	34,10	27,48	1,72

Preglednica 2 • Rezultati preiskav: odpornost,  $H$ , pomiki,  $d$ , in zasuki,  $\Phi$ , pri značilnih mejnih stanjih

število in porazdelitev sider nista bistveno vplivali na povečanje odpornosti.

Po pričakovanju je debelina obloge vplivala na togost zidov: zidovi, utrjeni z oblogo iz cementne malte, armirane z GFRP-mrežo, so bili bolj togi kot zidovi, utrjeni z GFRP- ali CFRP- $\lambda$ kanino v matriki iz epoksidne smole. Ne glede na debelino in število sider pa je bilo razmeroma majhno povečanje deformacijske kapacitete zidov. Vzrok za to je pripisati izrazitejšemu upadanju odpornosti pri ponovljenih obremenitvah kot pri neutrnjenih, referenčnih zidovih (glej preglednico 4), upadanje odpornosti pri ponovljenih obremenitvah pa je bilo posledica hitre delaminacije obloge.

V obnašanju na enak način utrjenih zidov, ki so bili pred utrditvijo poškodovani, in tistih, ki so bili utrjeni nepoškodovani, ni bilo opaziti razlik. Proti pričakovanjem nismo opazili večjih razlik v obnašanju in vrednostih odpornosti in deformabilnosti niti pri zidovih, kjer je bil enak način utrditve izveden samo na eni ali pa obeh straneh zidu (primerjaj utrditev tipov 5 in 6a oziroma utrditev tipov 8 in 9).

Med vsemi tipi utrditve se je najbolje izkazala utrditev z obojestransko oblogo s cementno malto, armirano z diagonalno položeno GFRP-mrežo in navpičnimi robnimi ojačitvami, s sidri v vogalih, povezanimi z zidom (utrditev tipa 7). V tem primeru je bila odpornost v primerjavi z neutrnjenim zidom večja za skoraj 130 %, za

50 % pa je bil večji tudi pomik pri porušitvi. Žal je tudi v tem primeru pri ponovitvi obremenitve prišlo do močnega in hitrega upadanja odpornosti.

Najslabše se je obnesla utrditev s togimi CFRP-lamelami (trakovi), nalepljenimi na zidovje z epoksidno smolo. V tem primeru se v primerjavi z referenčnim, neutrnjenim zidom ni povečala niti odpornost niti deformacijska kapaciteta. Lamele so povečale samo začetno togost zidu, niso pa imele praktično nobenega vpliva na odpornost in deformacijsko kapaciteto. Čeprav sidranje lamel v betonske temelje in zgornjo vez ni popustilo, so zaradi delaminacije in izbočenja tlačnih lamel, elementi v nategu ostali neizkoriščeni.

Meritve, ki smo jih izvajali med preiskavami, so pokazale, da pri ciklično spreminjajoči se vodoravni obtežbi v nelinearnem območju nastanejo v zidovju tudi veliki skrčki v navpični smeri, kljub temu da se navpična sila ne spreminja. Prenosa deformacij reda velikosti skoraj odstotka višine zidu z zidovja na kompozitne materiale trdnost opeke ne more zagotoviti. Mehанизem nastanka delaminacije je bil še posebno očit en pri togih CFRP-lamelah, ki so se odrgale in izklonile takoj, ko so v zidovju nastale poškodbe. Zaradi velikih razlik med trdnostjo osnovne opeke in prijemnostjo, ki jo zagotavlja epoksidna matrika, je porušitev nastala v opeki in ne na stiku epoksidne matrike oziroma lepila z zidovjem.

Tip utrditve	Togost		Odpornost		Mejni pomik	
	$K_e$ (kN/mm)	Utrjen/ neutrjen	$H_{max}$ (kN)	Utrjen/ neutrjen	$d_u$ (mm)	Utrjen/ neutrjen
<b>Neutrjeno</b>	<b>18,20</b>		<b>89,6</b>		<b>20,00</b>	
5	25,23	1,38	107,79	1,20	20,00	1,00
6a	37,68	2,06	114,34	1,28	14,99	0,75
6b	39,83	2,18	132,93	1,48	22,50	1,13
6c	33,29	1,82	143,09	1,60	22,49	1,12
6d	31,98	1,75	125,10	1,40	24,97	1,25
7	27,47	1,51	204,18	2,28	30,05	1,50
8	29,62	1,62	104,39	1,17	17,51	0,88
9	26,43	1,45	108,82	1,22	19,98	1,00
10	29,91	1,64	115,77	1,29	19,99	1,00
11	28,45	1,56	76,12	0,85	17,49	0,87
12	25,82	1,42	126,58	1,41	19,99	1,00
13	28,57	1,57	153,27	1,71	17,48	0,87
14	27,94	1,53	125,41	1,40	27,48	1,37

Preglednica 3 • Učinek utrjevanja

Tip utrditve	$d_{Hmax}$		$d_{u-1}^*$		$d_u$	
	$H_2/H_1$	$H_3/H_1$	$H_2/H_1$	$H_3/H_1$	$H_2/H_1$	$H_3/H_1$
<b>Neutrjeno</b>	<b>0,94</b>	<b>0,91</b>	<b>0,88</b>	<b>0,80</b>	<b>0,69</b>	-
5	0,92	0,88	0,88	0,79	0,79	0,68
6a	0,87	0,74	0,86	0,80	0,85	0,77
6b	0,91	0,85	0,83	0,72	-	-
6c	0,97	0,93	0,88	0,78	0,71	0,60
6d	0,94	0,89	0,84	0,69	0,62	0,33
7	0,97	0,94	0,88	0,76	0,59	0,33
8	0,93	0,85	0,87	0,78	0,77	0,68
9	0,94	0,90	0,88	0,79	0,77	0,55
10	0,89	0,84	0,85	0,74	0,39	-
11	0,97	0,95	0,93	0,86	0,84	0,68
12	0,93	0,88	0,90	0,85	0,63	0,59
13	0,94	0,91	0,94	0,88	0,62	0,48
14	0,93	0,89	0,82	0,71	0,52	0,66

\* Amplituda pomika v fazi pred doseženim mejnim pomikom

 Preglednica 4 • Upadanje odpornosti pri maksimalni odpornosti in pri mejnem stanju porušitve ( $H_{1-cikel}/H_{1-cikel}$ )

V preglednici 4 analiziramo upadanje odpornosti pri ponavljanju obremenitev. Analiza kaže, da se je referenčni, neutrjeni zid obnašal razmeroma stabilno, saj je odpornost pri ponovitvi obremenitve pri maksimalni odpornosti upadla

za samo 9 %, eno amplitudno stopnjo pred doseženim mejnim pomikom,  $d_{u-1}$  pa upadanje pri tretji ponovitvi ni bilo večje od 20 %. Medtem ko o posebnih razlikah velikosti upadanja odpornosti pri doseženi maksimalni

odpornosti zidov, utrjenih z različnimi kompozitnimi oblogami, težko govorimo, so razlike v obnašanju utrjenih zidov v nadaljevanju preiskave večje. Stopnja upadanja odpornosti pri ponavljanju obremenitev kaže, da po delaminaciji obloge večino obremenitev prevzame osnovni zid, vendar na podlagi vrednosti, navedenih v preglednici 4, težko sklepamo o zakonitostih.

Da bi opažanja med preiskavo potrdili tudi z energetskimi kriteriji, smo analizirali razmerja med vhodno in disipirano energijo, ki jih dobimo med preiskavo posameznega zidu. Kapaciteto sipanja energije smo analizirali s primerjavo med kumulativno vhodno energijo,  $E_{inpr}$ , potrebno za deformacijo zidu od začetka preiskave do pomika, pri katerem razmerje analiziramo, in disipirano histerezo energijo do istega trenutka,  $E_{hys}$ . Kumulativno vhodno energijo smo definirali kot skupno delo hidravličnega bata, opravljeno na celotni poti od začetka preiskave do deformacije zidu pri obravnavani amplitudi pomika. V posameznem ciklu obremenjevanja vhodna energija predstavlja delo hidravličnega bata, potrebno za potisk zidu od neobremenjenega položaja do amplitudnega vrha, ter povlek zidu od razbremenjenega položaja do amplitudnega vrha v nasprotni smeri. Disipirano energijo smo izrednotili na podlagi izmerjenih histereznih odvisnosti med vodoravno silo in pomikom. Količino disipirane energije v enem ciklu obremenjevanja predstavlja površina histerezne zanke med dvema zaporednima amplitudnima vrhovoma, kumulativno disipirano energijo pa vsota površin vseh histereznih zank od začetka preiskave do obravnavane amplitude pomika. Razmerja med disipirano histerezo in kumulativno vhodno energijo pri posameznih mejnih stanjih so izračunana v preglednici 5, razmerja med vhodno oziroma disipirano energijo pri meji nastanka poškodb in porušitvi glede na vhodno oziroma disipirano energijo pri maksimalni odpornosti pa so izračunana v preglednici 6.

Razmerja med disipirano in vhodno energijo ne kažejo posebnih zakonitosti oziroma razlik med posameznimi kategorijami in tipi utrditve zidov. Razmerja, ki smo jih ugotovili pri utrjenih zidovih, ne odstopajo od razmerja, ugotovljenega pri neutrjenih vzorcih. Z analizo vrednosti, navedenih v preglednici 5, lahko ugotovimo le, da se z naraščajočimi poškodbami v vseh primerih povečuje razmerje med disipirano histerezo in vhodno energijo. Enak sklep nam da tudi analiza oblike registriranih histereznih zank.



	Meja poškodb	Maksimalna odpornost	Porušitev
Tip utrditve	$\frac{E_{hys}}{E_{inp}}$	$\frac{E_{hys}}{E_{inp}}$	$\frac{E_{hys}}{E_{inp}}$
<b>Neutrjeno</b>	<b>0,29</b>	<b>0,39</b>	<b>0,55</b>
5	0,31	0,37	0,52
6a	0,27	0,28	0,53
6b	0,26	0,35	0,51
6c	0,24	0,33	0,48
6d	0,24	0,50	0,59
7	0,17	0,32	0,42
8	0,33	0,42	0,53
9	0,30	0,46	0,56
10	0,30	0,44	0,55
11	0,36	0,43	0,53
12	0,26	0,41	0,50
13	0,21	0,26	0,39
14	0,29	0,42	0,54

Preglednica 5 • Razmerja med disipirano histerezo in kumulativno vhodno energijo,  $E_{hys}/E_{inp}$  pri mejnih stanjih

Tip utrditve	Vhodna		Disipirana	
	$\frac{E_{inp,cr}}{E_{inp,max}}$	$\frac{E_{inp,coll}}{E_{inp,max}}$	$\frac{E_{hys,cr}}{E_{hys,max}}$	$\frac{E_{hys,coll}}{E_{hys,max}}$
<b>Neutrjeno</b>	<b>0,18</b>	<b>2,23</b>	<b>0,13</b>	<b>3,17</b>
5	0,04	1,79	0,03	2,46
6a	0,06	2,17	0,05	4,12
6b	0,03	1,63	0,02	2,33
6c	0,03	1,79	0,02	2,61
6d	0,03	1,49	0,02	1,77
7	0,06	1,32	0,03	1,74
8	0,04	1,85	0,03	2,37
9	0,02	1,57	0,01	1,91
10	0,03	1,52	0,02	1,91
11	0,04	1,67	0,03	2,05
12	0,07	1,32	0,04	1,58
13	0,10	1,47	0,07	2,17
14	0,03	1,62	0,03	2,11

Preglednica 6 • Razmerja med disipirano histerezo oziroma kumulativno vhodno energijo na meji nastanka poškodb in porušitve glede na energijo pri maksimalni odpornosti

Rezultati v preglednici 6 kažejo, da je bil za nastanek prvih poškodb pri vseh utrjenih zidovih potreben manjši del energije, potrebne, da se doseže maksimalna odpornost, kot pri neutrjenih zidovih. Na to, da je obnašanje utrjenih zidov manj duktilno kot obnašanje neutrjenih zidov, kaže razmerje med energijo,

potrebno za porušitev, in energijo, potrebno, da se doseže maksimalna odpornost. Razmerje  $E_{inp,coll}/E_{inp,max}$  je v vseh primerih manjše pri utrjenih kot pri neutrjenih zidovih. Podobno lahko ugotovimo, če analiziramo disipirano histerezo energijo. Nepričakovano odstopa le zid, utrjen z oblogo s cementno

malto, armirano z GFRP-mrežo, ki pa ni bila sidrana v zid (utrditev tipa 6a). Razmerja so precej višja za disipirano histerezo kot pa za vhodno energijo, kar je v skladu z ugotovitvami, ki jih da analiza rezultatov iz preglednice 5.

## 4 • SKLEPI

Raziskovali smo učinkovitost protipotresnega utrjevanja opečnih zidov z različnimi tipi oblog, armiranih s kompozitnimi materiali. Med seboj smo primerjali obnašanje oblog s cementno malto, armirano z GFRP-mrežo in oblog z GRFP- ali CFRP- tkanino v matriki iz epoksidne smole. Poleg tega smo preiskali tudi zidove, utrjene s togimi CFRP-lamelami (trakovi), nalepljenimi na zid z epoksidno smolo. Preiskali smo 24 zidov, utrjenih na 10 različnih načinov, dodatno pa za primerjavo še dva zidova v osnovnem, neutrjenem stanju.

V vseh primerih je prevladovalo strižno obnašanje. Raziskave so potrdile učinkovitost utrjevanja opečnih zidov s kompozitnimi oblogami. Povečanje odpornosti, ki se je gibalo med 20–130 % odpornosti osnovnega,

nearmiranega zidu, je bilo odvisno od tipa obloge. Obloge so precej povečale tudi togost zidov. Žal je bil zaradi delaminacije in uklona obloge mehanizem porušitve večinoma neduktilen, z izrazitim upadanjem odpornosti in togosti pri ponovitvi obremenitev že kmalu po doseženi maksimalni odpornosti. Zaradi neduktilnega porušnega mehanizma se deformacijska kapaciteta zidov, utrjenih s kompozitnimi oblogami, ni bistveno izboljšala.

Rezultati študije kažejo, da je izmed vseh preiskanih metod najbolj učinkovito oblaganje opečnih zidov s cementno malto, ojačeno z vlakni in armirano z mrežo iz steklenih vlaken. Če je mreža položena v diagonalni smeri in sidrana na ustrezen način, se povečata tako odpornost kot deformabilnost zidu.

Izdelati splošno veljavna priporočila, kot smo načrtovali, za zdaj še ni mogoče. Raziskave v tej smeri nadaljujemo v sodelovanju z raziskovalci iz tujine. Poleg tega raziskujemo lastnosti materialov, ki jih potrebujemo pri razvoju računskega modela. O tem bomo poročali v enem od naših prihodnjih prispevkov. Ugotovili smo, da so metode utrjevanja opečnih zidov s primernimi kompozitnimi oblogami lahko učinkovita rešitev za povečanje potresne odpornosti, čeprav sama uporaba FRP-jev še ne pomeni nujno izboljšanja potresne odpornosti. Rezultati raziskav tudi nakazujejo, v katero smer naj gre razvoj materialov in tehnologij, da bi se učinkovitost posameznih tehnoloških rešitev izboljšala. Treba bo razviti materiale in aplikacije, ki bodo zmanjšali razlike med togostjo kompozitne obloge in zidovja in preprečili prezgodnjo delaminacijo obloge.

## 5 • ZAHVALA

Raziskave, ki jih predstavljamo v članku, so del aplikativnega raziskovalnega projekta L2-0578, ki ga je financirala Agencija Republike Slovenije za raziskovalno dejavnost, sofinan-

ciralo pa podjetje Sika, d.o.o., iz Trzina, slovenska podružnica matične korporacije Sika AG iz Švice. Pri pripravi programa raziskav so sodelovali strokovnjaki podjetja Sika iz

Ljubljane in Züricha, materiale za utrjevanje je dobavila italijanska podružnica, zidove pa so utrdili inštruktorji slovenske podružnice podjetja Sika.

## 6 • LITERATURA

- ElGawady, M., Lestuzzi, P., Badoux, M., Shear Strength of URM Walls Retrofitted Using FRP, *Engineering Structures*, 28(12): 1658–1670, 2006.
- Konthesingha, C., Masia, M., Petersen, R., Mojsilović, N., Simundic, G., Page, A., Cyclic In-plane Shear Behaviour of Unreinforced Masonry Panels Retrofitted with Fibre Reinforced Polymer Strips, *Proceedings of the 8th International Masonry Conference*, Dresden, 2010.
- Lutman, M., Ocenjevanje potresne odpornosti in ranljivosti objektov, poročilo. Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana, 2007.
- Lutman, M., Bohinc, U., Report on laboratory tests of brick masonry walls: compressive strength and resistance to cyclic lateral loading, poročilo. Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana, 2009.
- Lutman, M., Seismic Resistance Assessment of Heritage Masonry Buildings in Ljubljana, *International Journal of Architectural Heritage*, 4(3): 198–221, 2010.
- Odredba o dimenzioniranju in izvedbi gradbenih objektov v potresnih območjih, Uradni list SR Slovenije, št. 18, Ljubljana, 1963.
- Pravilnik o tehničnih normativih za graditev objektov visoke gradnje na seizmičnih območjih, Uradni list SFRJ, št. 31, Beograd, 1981.
- Schwegler, G., Masonry Construction Strengthened with Fiber Composites in Seismically Endangered Zones, *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Dunaj, 1994.
- SIST EN 1990-1-1: 2004, Evrokod, Osnove projektiranja konstrukcij, 2005.
- SIST EN 1998-1: 2005, Evrokod 8, Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij, 1. del, Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, 2005.
- Triantafyllou, T. C., Fardis, M. N., Strengthening of Historic Masonry Structures With Composite Materials, *Materials and Structures*, 30(8): 486–496, 1997.
- Tomažević, M., Lutman, M., Klemenc, I., Weiss, P., Obnašanje zidanih stavb med potresom v Bovcu, 12. 7. 2004, *Gradbeni vestnik*, 54(1): 2–12, 2005.
- Tomažević, M., Stavbe kulturne dediščine in potresna odpornost: kaj smo se naučili? *Gradbeni vestnik*, 58(9): 219–228, 58(10): 242–249, 2009.
- Vidrih, R., Godec, M., Ljubljanski potres leta 1895 in njegov vpliv na razvoj gradbeno-tehničnih predpisov, *Ujma*, 9: 231–237, 1995.

**4BUILD**  
managing construction projects

**Profesionalna programska rešitev  
za gradbeništvo**

[www.4build.eu](http://www.4build.eu)

ZBOROVANJE  
GRADBENIH  
KONSTRUKTORJEV  
SLOVENIJE  
BLED, HOTEL GOLF  
6.-7. OKTOBER 2011

V  
A  
B  
I  
L  
O

Gospodarska kriza v Sloveniji je najbolj udarila ravno po gradbeništvu. Posledice močno čutimo tudi gradbeni konstruktorji. Padec povpraševanja po naših storitvah je povzročil padec vrednosti našega dela, dodatno škodo kvaliteti povzroča princip izbora samo po kriteriju najnižje cene pri javnih naročilih. Kako kljub temu zagotoviti ustrezno kvaliteto projektov, od katerih je odvisna varnost stavb, mostov in ostalih javnih objektov? Kako lahko bankrotirano gradbeništvu vlaga v raziskave in razvoj za zagotovitev mednarodne konkurenčnosti? Kako preživeti?

Za iskanje odgovorov na ta in seveda tudi druga bolj strokovno obarvana vprašanja bo dovolj priložnosti na 33. zborovanju gradbenih konstruktorjev Slovenije, zato vas vabimo, da se nam pridružite na tej tradicionalni prireditvi.

## PRIJAVA

Svojo udeležbo na zborovanju prijavite s tem, da nam pošljete izpolnjeno prijavo, ki jo odrežete od tega vabila in plačate potrebno kotizacijo. Kotizacijo nakažite na transakcijski račun Slovenskega društva gradbenih konstruktorjev 02085-0015319187 (sklic: 00 33-2011). Prijavi prosimo priložite potrdilo o plačani kotizaciji.

## KOTIZACIJA

Kotizacija za udeležbo na zborovanju, v kateri so zajeti stroški organizacije in publikacije zborovanja, kakor tudi stroški skupnega kosila prvega dne zborovanja in večernega družabnega srečanja, znaša 220 EUR na osebo in že vključuje DDV. Za upokojence in študente znaša kotizacija 110 EUR. Kotizacija je prenosljiva na drugo osebo, ne bomo pa je vračali.

## PROMOCIJA DEJAVNOSTI

Na podlagi dogovora z organizatorjem bo na zborovanju mogoča tudi promocija vaših izdelkov in storitev.

## DODATNE INFORMACIJE

Aktualni podatki povezani z organizacijo in potekom zborovanja bodo objavljeni na spletni strani društva [www.sdgk.si](http://www.sdgk.si).

Za morebitne dodatne informacije pa lahko pokličete tudi Jožeta Lopatiča po telefonu na št.: **01 476 8600** ali pošljete elektronsko pošto na naslov [info@sdgk.si](mailto:info@sdgk.si).

## Prijava za 33. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije 6.in 7.oktobra 2011

Ime in priimek: \_\_\_\_\_

Davčna številka: \_\_\_\_\_

Podjetje oz. ustanova: \_\_\_\_\_

Podpis: \_\_\_\_\_

Naslov: \_\_\_\_\_

Kotizacija je bila nakazana na transakcijski račun Slovenskega društva gradbenih konstruktorjev, Jamova 2, Ljubljana, št. 02085-0015319187.

Telefon: \_\_\_\_\_

E-mail: \_\_\_\_\_

Potrdilo o plačani kotizaciji je priloženo.