

Primljen / Received: 3.4.2013.

Ispravljen / Corrected: 10.7.2013.

Prihvaćen / Accepted: 15.7.2013.

Dostupno online / Available online: 10.9.2013.

Pucolanski mortovi za konzervatorsku obradu starih zidanih konstrukcija

Autori:



Dr.sc. **Slavica Vujović**, dipl.ing.arh.
Pokrajinski zavod za zaštitu spomenika
kulture, Petrovaradin
slavaheritage@yahoo.com



Snežana Vučetić, dipl.ing.teh.
Sveučilište u Novom Sadu
Tehnološki fakultet
snezana@uns.ac.rs



Dr.sc. **Vilma Ducman**, dipl.ing.građ.
ZAG Ljubljana
Slovenski nacionalni inštitut za graditeljstvo
vilma.ducman@zag.si



Prof.dr.sc. **Jonjaua Ranogajec**, dipl.ing.teh.
Sveučilište u Novom Sadu
Tehnološki fakultet
janjar@uns.ac.rs

Stručni rad

[Slavica Vujović, Snežana Vučetić, Vilma Ducman, Jonjaua Ranogajec](#)

Pucolanski mortovi za konzervatorsku obradu starih zidanih konstrukcija

Projektiranje sanacijskih mortova počelo je karakterizacijom uzoraka starog morta sačuvanih na malim prostorima podova donžonske kule u bačkoj tvrđavi. Ispitana su dva materijala (stara cigla i glineni materijal) da bi se odabrao pucolanski materijal koji je kasnije upotrijebljen kao komponenta sanacijskog morta. Na temelju analize kompatibilnosti ispitanih starih mortova i novoprojektiranih mortova baziranih na gašenom vapnu, za konzervatorsku sanaciju donžonske kule odabran je mort u kojem se kao pucolanski materijal koristi drobljena otpadna cigla.

Ključne riječi:

glina, pucolan, konzerviranje, srednjovjekovna tvrđava, gašeno vapno, kompatibilnost

Professional paper

[Slavica Vujović, Snežana Vučetić, Vilma Ducman, Jonjaua Ranogajec](#)

Pozzolanic mortars for the conservation of old masonry structures

The design of repair mortars started from the characterization of the original mortar samples preserved in small areas in the floors of the Dungeon Tower, Bač Fortress. Two materials (waste brick and clay material) were investigated in order to select the pozzolanic material which later was a component of the repair mortar. Based on the compatibility test of the examined old mortars and of the newly developed mortars, slaked lime based, the mortar with the ground waste brick as a pozzolanic material was selected for the conservation treatment of the Dungeon Tower.

Key words:

clay, pozzolan, conservation, medieval fortress, slaked lime, compatibility

Fachbericht

[Slavica Vujović, Snežana Vučetić, Vilma Ducman, Jonjaua Ranogajec](#)

Puzzolanischer Mörtel für die Erhaltung alter Mauerwerkskonstruktionen

Die Zusammenstellung von Reparaturmörteln ist mit der Charakterisierung von Mörtelproben des bestehenden Füllmittels begonnen worden, das in begrenzten Bereichen des Kerkerturms der Bač Festung erhalten geblieben war. Zwei verschiedene Stoffe (Ziegelschutt und Tonerde) sind untersucht worden, um das Puzzolanmaterial zu wählen, das als Bestandteil des Reparaturmörtels verwendet werden sollte. Auf Kompatibilitätsproben des bestehenden Füllmittels und der neu entwickelten Mörtel beruhend, ist ein Mörtel aus Löschkalk mit zerkleinertem Ziegelschutt als Puzzolanmaterial gewählt und für die Instandsetzung des Kerkerturms angewandt worden.

Schlüsselwörter:

Ton, Puzzolane, Erhaltung, mittelalterliche Festung, Löschkalk, Kompatibilität

1. Uvod

Kada se restauratorski posao obavlja da bi se vratila izgubljena kohezija ili prionjivost, tada se konzervatorske strategije smatraju najprikladnijima za obavljanje manjih popravaka, za zapunjavanje udubina i sanaciju pukotina te za konsolidiranje starih materijala. Međutim, kada se radi o ozbiljnijim nedostacima, kao što je primjerice opće propadanje građevine ili značajno odvajanje gradiva, tada je u nekim slučajevima potrebna bilo djelomična ili potpuna zamjena starih materijala. Kada se radi o mortovima, svakako je važno projektirati takve materijale koji su kompatibilni s postojećom podlogom (kamen, cigla, stari mort) i s fragmentima starog morta, te koji su u dovoljnoj mjeri otporni na vanjske utjecaje [1]. Tehnika koja se primjenjuje za polaganje novih mortova, isto kao i uvjeti njege, također su značajni za uspješnu obnovu građevine koju želimo zaštititi.

Osnovni elementi ovog rada temelje se na načelima autentičnosti (pregled i razumijevanje sastava i karakteristika starih povijesnih mortova) i kompatibilnosti (razvoj mortova sličnih karakteristika) te na činjenici da na tržištu nema odgovarajućih komercijalnih proizvoda. Predmet konzervatorskog postupka i istraživanja koja se provode u ovom radu jest donžonska (centralna) kula u tvrđavi Bač. Polazište zahvata odnosi se na unutarnje uređenje kule. Trebalo je uzeti u obzir načela za obnovu spomenika jer će se građevina nakon sanacije koristiti kao turistički i obrazovni centar s odgovarajućim izložbenim prostorom. U samoj su kuli sačuvani manji fragmenti prvobitnog morta koji su restauratorima poslužili za laboratorijska ispitivanja. Ta su ispitivanja obavljena namjerom da se odrede novi kompatibilni materijali sljedećih karakteristika: estetska dopadljivost i boja trebaju udovoljavati strogim kriterijima, odgovarajuća plastičnost koja omogućuje primjenu tradicionalnih metoda pripreme i ugradnje, te adekvatna mehanička svojstva tako da materijal bude otporan na habanje, tj. na prolazak brojnih

posjetitelja. Također se trebala osigurati i relativna stabilnost u postojećim mikroklimatskim uvjetima.

1.1. Bačka tvrđava – obilježja i povijest konzervatorskih zahvata

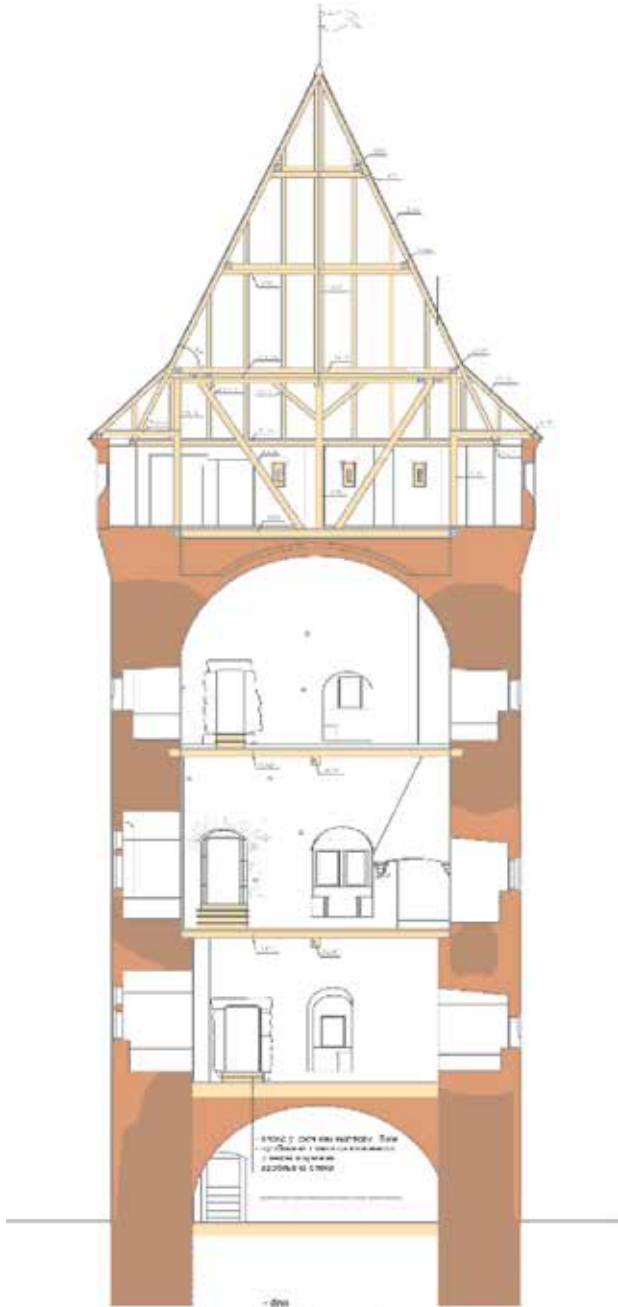
Bačka tvrđava ubraja se među "tvrđave na vodi" a odlikuje se obrambenim sustavom koji je posebno prilagođen za močvarna područja. Sastoji se od same utvrde i podgrađa, a smještena je na meandru rijeke Mostonga (pritoka rijeke Dunav). Fortifikacijski se kompleks nalazi u blizini grada Bača, tj. zapadno od same aglomeracije, kako je to prikazano na slici 1. Mjesto na kojem je smještena tvrđava značajno je arheološko nalazište jer su na njemu ljudi neprekidno obitavali još od neolitskog razdoblja. Prva faza gradnje obavljena je od 1338. do 1342. godine za vrijeme vladavine hrvatsko-ugarskog kralja Karla Roberta iz dinastije Anžuvina. Intenzivna gradnja započela je međutim u 15. stoljeću kada su primijenjene nove vojne tehnologije te kada je južna granica tvrđave pojačana radi zaštite od turskih naleta. Turci su međutim tvrđavu ipak osvojili 1529. godine, a koristili su je sve do 1686. kada je oslobođena. Tijekom Rakoczyjeve bune (1704.) tvrđava je devastirana, i nakon toga nikada nije obnovljena. Iako je njen fizički integritet u potpunosti narušen, iz sačuvanih dijelova vidimo da se radi o sofisticiranoj arhitekturi fortifikacijske škole kasnogotičkog stila, s određenim elementima ranotalijanske renesanse.

Vrijednost i značaj bačke tvrđave u potpunosti su priznati u novije doba, pa je tako utvrda 1948. godine stavljena na popis zaštićenih spomenika. Ta godina označava kraj daljnjeg propadanja tvrđave i bespravnog odnošenja materijala s tog lokaliteta [3]. Rekonstrukcija utvrde počela je 1960. godine s radovima na donžonskoj kuli, koja je ustvari i najbolje očuvana građevina u tvrđavi. Na početku radova nedostajao je cjelokupan gornji dio kule, pa se tako rekonstrukcija temeljila na postojećim podacima, uzimajući u obzir prvobitni izgled građevine [4].



Slika 1. Panoramski prikaz Bača s tvrđavom na lijevoj strani i donžonskom kulom (označeno crvenom bojom) [2]

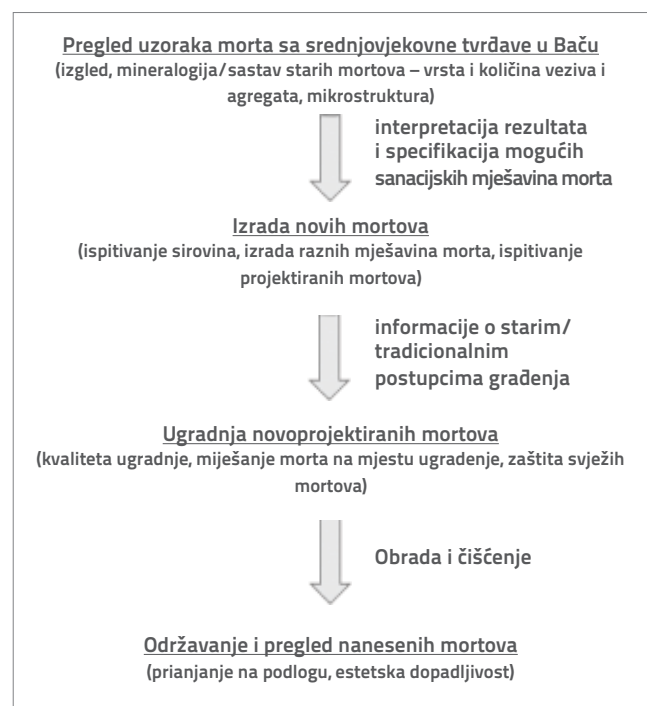
Obnova je prekinuta 1962. godine prije nego što su dovršeni radovi u unutrašnjosti kule, ali je posao ipak nastavljen 2003. godine. Konzervatorsko-restauratorski poslovi na pet katova obavljani su kao prioritetan zadatak (slika 2.). Kako nije bilo arhitektonskih podataka, posebna je pozornost usmjerena na svojstva materijala. Konačna odluka o sastavu materijala koji su se trebali koristiti za podove i zidove donesena je na osnovi temeljitog multidisciplinarnog istraživačkog rada.



Slika 2. Donžonska kula, prikaz konzervatorskih zahvata – poprečni presjek [4] (lako osjenčana područja: 2003.-2007., srednje osjenčana područja: 1960. – 1962., i jako osjenčana područja: postojeća konstrukcija)

1.2. Metodologija izrade novoprojektiranih mortova

Da bi se dobili rezultati koji omogućuju besprijekorno projektiranje novih mortova, istraživački je rad bio usredotočen na četiri aspekta: laboratorijska ispitivanja starih mortova s poda donžonske kule, projektiranje novih mortova u laboratorijskim uvjetima, ugradnja projektiranih mortova primjenom održivog konzervatorskog postupka te provjera nanesenih mortova nakon određenog vremenskog razdoblja (četiri godine), slika 3. Ovu je metodologiju definirao multidisciplinarni istraživački tim sastavljen od arheologa, arhitekata i građevinskih inženjera iz Područnog zavoda za zaštitu spomenika kulture, Petrovaradin, te stručnjaka za znanost o materijalima i mikrobiologiju iz Tehnološkog fakulteta Sveučilišta u Novom Sadu.



Slika 3. Shematski prikaz metodologije za izradu novoprojektiranih mortova

Metode i tehnike

Osnovne značajke mikrotekture te mineraloški i kemijski sastav starih i novoprojektiranih uzoraka morta određeni su rendgenskom difrakcijom, optičkom i pretražnom elektronskom mikroskopijom (SEM), diferencijalnom termičkom analizom (DTA) i diferencijalnom pretražnom kalorimetrijom (DSC). Ti se postupci često primjenjuju za analizu mineralnih faza i kemijskog sastava uzoraka keramike i morta [5].

Mineralogija ispitanih materijala (povijesnog morta i sirovina) utvrđena je rendgenskom difrakcijom (XRD) pomoću difraktometra PW 1050, PHILIPS, pri čemu se kao izvor zračenja koristio $\text{CuK}\alpha$. Morfologija i kemijski sastav analizirani su

pomoću pretražne elektronske mikroskopije (SEM). SEM analiza uzoraka obavljena je pomoću elektronskog mikroskopa JSM – 6460LV, JEOL. Ispitani uzorci obloženi su zlatom pomoću uređaja BAL – TEC SCD 005 (180 s/30mA, udaljenost 50 mm). Termička analiza (DTA sa TG i DSC) obavljena je da bi se dobile preciznije informacije o mineralnom sastavu pucolanskih materijala sadržanih u starim mortovima. Rezultati DTA dobiveni su za statičko stanje zraka pomoću termičkog analizatora STA 503, Bahr mjerenjem u rasponu od 20 do 1000 °C, pri brzini zagrijavanja od 10°C u minuti. Uzorci su pohranjeni u aluminijske posude za taljenje metala. Referentni materijal je prazna aluminijska posuda. Ispitivanje DSC obavljeno je pomoću pretražnog kalorimetra Q20 V23. 10 Build 79, NY (SAD), počevši od okolne temperature pa do 500°C, pri čemu je brzina zagrijavanja iznosila 2°C/min. Pucolanska aktivnost materijala odabranih za projektiranje novih mortova određena je izravno mjerenjem potrošnje kalcijevih iona (volumetrijska metoda) te posredno određivanjem električne provodljivosti. Karakteristike morta nanesenog u donžonsku kulu određene su pomoću prenositve optičke mikroskopije.

Volumetrijska metoda za ocjenjivanje pucolanske aktivnosti provedena je mjerenjem potrošnje iona Ca²⁺ u zasićenoj vapnenoj otopini (u kontaktu s pucolanskim materijalima) pripremljenoj na sobnoj temperaturi, u unaprijed definiranim vremenskim razmacima. Vapnena otopina je filtrirana i analizirana postupkom kompleksometrijske titracije pomoću EDTA-e (etilen diamin tetra octene kiseline) i mureksidnog indikatora. Taj je indikator korišten zbog svog svojstva da mijenja boju od ružičaste do ljubičaste. Potrošnja iona Ca²⁺ kod analiziranih pucolanskih materijala mogla se izravno povezati s pucolanskom aktivnošću ispitanih materijala (u otopini se gubitak Ca²⁺ pripisuje pucolanskoj aktivnosti) [6].

Pucolanska aktivnost ispitana je mjerenjem električne provodljivosti pomoću mjerača provodljivosti MA 5962. Poznato je da je stupanj pucolanske reakcije proporcionalan smanjenju električne provodljivosti. Pad električne provodljivosti je razlika između početne i konačne vrijednosti električne provodljivosti u ispitnoj suspenziji (zasićena otopina Ca(OH)₂ u prisutnosti ispitanih pucolanskih materijala). On predstavlja stupanj kemijske reakcije između pucolanskih

materijala i Ca(OH)₂ u ispitnoj otopini. Mehanička svojstva novoprojektiranih mortova kao što su otpornost na savijanje određena su na prizmatičnim uzorcima dimenzija 10 mm x 10 mm x 60 mm, nakon 3, 7 i 28 dana. Pripremljeni uzorci morta ispitani su pomoću uređaja Toyoseiki, AT-L-118B, Tokio, Japan.

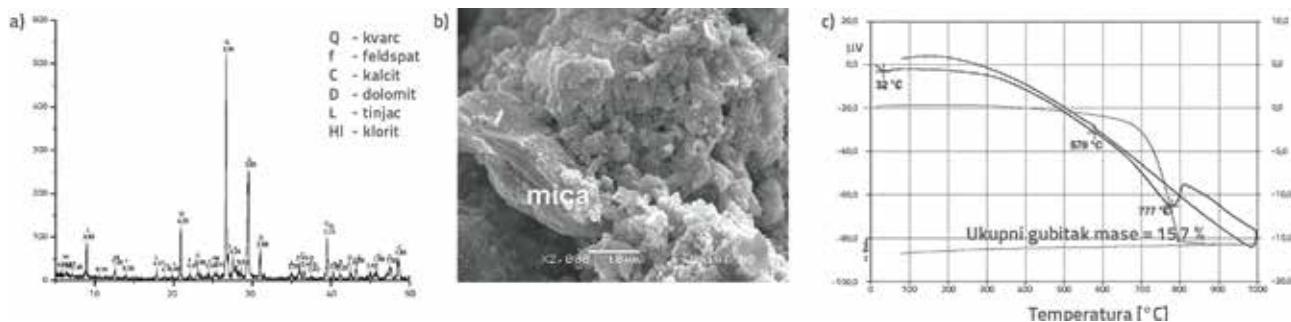
2. Eksperimentalna analiza

2.1. Stari mortovi

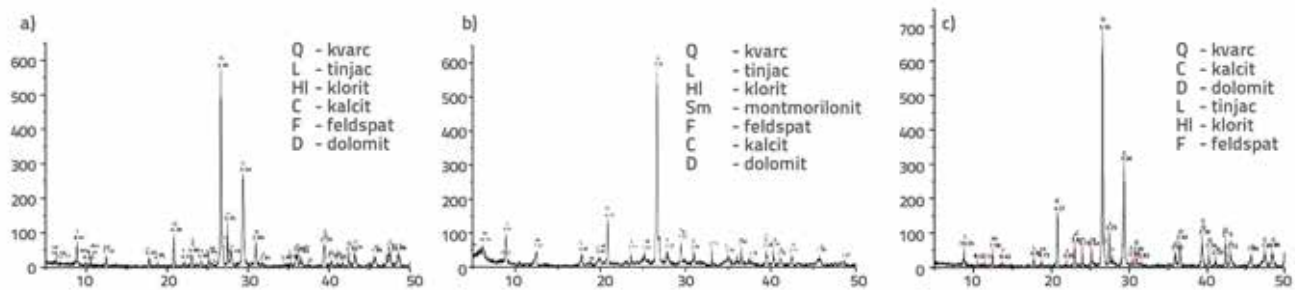
Uzimanje uzoraka starog morta iz završnog sloja podova donžonske kule obavljeno je na mjestima na kojima nije bilo većih oštećenja. Uzet je dovoljan broj uzoraka da se može obaviti planirana analiza: određivanje odnosa između veziva i agregata, analiza mikrostrukture i strukture (optička i pretražna elektronska mikroskopija, XRD). Dobiveni rezultati, koji predstavljaju osnovu za projektiranje novih sastava morta, prikazani su na slici 4. i u tablici 1.

Tablica 1. Karakteristike starih mortova [7]

Uzorak	TB M1: mort iz završnog sloja poda
Fotografija	
Prikaz analize	rendgenska difrakcija, optička i pretražna elektronska mikroskopija, diferencijalna termička analiza i diferencijalna pretražna kalorimetrija,
Osnovne karakteristike ispitanih uzoraka povijesnog morta – završnog sloja morta	sustav baziran na kvarcu, mineralima gline (klorit), feldspatu, tinjcu, karbonatima (kalcit, dolomit), s odlomcima cigle veličine cca 1 mm; analiza SEM pokazala je na prisutnost tinjca, slika 4; težinski omjer vapna i agregata = 1/3 (dobiven prosijavanjem);



Slika 4. Rezultati analize uzoraka povijesnog morta: a) rendgenska difrakcija; b) pretražna elektronska mikroskopija; c) diferencijalna termička i termogravimetrijska analiza [7]



Slika 5. Rendgenska difrakcija: a) lokalna glina (korištena u proizvodnji Pozz1 i Pozz2); b) stara drobljena cigla (Pozz3); c) odlomci drobljene cigle i uzorka povijesnog morta TBM1

2.2. Novi mortovi, sastav i analiza u laboratorijskim uvjetima

Važno polazište za projektiranje sanacijskog/zamjenskog morta sastoji se u karakterizaciji starog morta i njegovog povijesnog konteksta [7]. Na osnovi rezultata dobivenih ispitivanjem uzorka povijesnog morta TB M1, te uzimajući u obzir činjenicu da se u povijesnoj – umjetničkoj gradnji nekada najviše koristio vapneni mort, donesena je odluka da novoprojektirani mortovi (DM1, DM2 i DM3) budu materijali bazirani na vapnu. Kao što je prikazano u tablici 2, ti su uzorci pripremljeni miješanjem agregata (lokalno dostupni pijesak) i komercijalnog hidratiziranog vapna s potencijalno pucolanskim materijalima (stare drobljene cigle i lokalna pečena glina), slika 5.

Tablica 2. Maseni udio veziva, agregata i pucolana u novoprojektiranim mortovima DM1-DM3

Uzorci morta – DM	Maseni omjer vezivo/agregat/pucolan
DM1 (na bazi pucolanskog materijala Pozz1)	1/3/1
DM2 (na bazi pucolanskog materijala Pozz2)	1/3/1.5
DM3 (na bazi pucolanskog materijala Pozz3)	1/3/3

2.3. Analiza pucolanskih materijala

Dva predstavnika novonastalih pucolanskih materijala (Pozz1 i Pozz2) proizvedeni su kalcinacijom lokalno dostupne gline. Pucolanski materijal Pozz3 je materijal od drobljene cigle (otpadni materijal) koji ne udovoljava uvjetima za građevne materijale. Za proizvodnju pucolanskih materijala (Pozz1 i Pozz2) određena je temperatura kalcinacije gline na bazi strukture povijesnih odlomaka cigle koji su se nalazili u starom mortu te na bazi mineraloškog sastava lokalne gline, slika 5. Prisutnost minerala kao što su tinjac, klorit i smektit te količina kalcita i dolomita (slika 5.a) bila je prva naznaka da je temperatura kalcinacije stare drobljene cigle iznosila otprilike 800 °C. Proces otvrdnjavanja djelomično formirane tekuće faze omogućio je nastanak materijala s dobrim pucolanskim svojstvima [9]. Termička obrada budućih pucolanskih materijala, Pozz1 i Pozz2, određena je na osnovi te činjenice te uzimajući u obzir mineraloška svojstva lokalne gline. Kalcinacija je obavljena u laboratorijskim uvjetima (brzina zagrijavanja 10 °C/h; 2,5 h pri T_{max} 960 °C), s tim da su za proizvodnju dvaju pucolanskih materijala primjenjuju različiti postupci. Glina za proizvodnju pucolanskog materijala Pozz1 najprije je sušena a nakon toga drobljena i kalcinirana, dok je u slučaju pucolanskog materijala Pozz2 glina najprije sušena a zatim kalcinirana i drobljena. Čak i materijali za koje se obično ne smatra da imaju dobru pucolansku aktivnost mogu imati dobru reakciju s ionima Ca^{+2} nakon postupka

Tablica 3. Električna provodljivost [msec/cm³] otopine vapna i vode nakon dodatka pucolanskih materijala

Vrijeme	Pozz1*	Pozz2*	Pozz3*	Čista otopina vapna i vode	Referentna vapnena otopina s kvarcnim pijeskom
0 min.	38	38	38	38	38
3 min.	30	36	36	38	37
15 min.	29	32	32	38	37
45 min.	27	30	32	38	37
90 min.	27	28	30	38	37
7 dana	26	27	27	38	37
Δ (7 dana)	12	11	11	0	1

* s otopinom vapna i vode

drobljenja. Tome je razlog činjenica da imaju veliku specifičnu površinu koja je potrebna za takve reakcije [10]. U slučaju analiziranih materijala, spomenuti proizvodni postupci (sušenje/kalcinacija/mljevenje) definirani su da bi se ocijenio utjecaj postupka mljevenja na pucolansku aktivnost dobivenih materijala.

Električna provodljivost sustava od vapna i vode koji sadrže pucolanske materijale (Pozz1, Pozz2 i Pozz3) izmjerena je u određenom vremenu. Dotični rezultati prikazani su u tablici 3. Ako rezultate analiziranih materijala (Pozz1, Pozz2 i Pozz3) usporedimo s referentnom otopinom, možemo zaključiti da su svi ispitani uzorci pucolanski aktivni materijali, vidi tablicu 3. U prvim je minutama najreaktivniji sustav bio pucolanski materijal Pozz1, dok su nakon sedam dana svi sustavi bili više ili manje jednako reaktivni. S obzirom na to da su materijali Pozz1 i Pozz2 tretirani pri istoj temperaturi kalcinacije (T_{max} 960 °C), jača reakcija materijala Pozz1 s kalcijevim ionima u prvim minutama reakcije objašnjava se postupkom mljevenja [6].

Ocjenjivanje pucolanske aktivnosti provedeno je pomoću volumetrijske metode. Potrošnja iona Ca^{2+} prikazana je za svaki ispitani pucolanski materijal u tablici 4.

Tablica 4. Rezultati ocjenjivanja pucolanske aktivnosti pomoću volumetrijske metode [$\Delta m (Ca^{2+}) (g/10ml) \cdot 10^{-4}$]

Vrijeme	Pozz1	Pozz2	Pozz3
5 min.	0.06675	0.18250	/
30 min.	0.36675	0.18250	6.467
60 min.	0.63332	0.40000	6.733
24 h	0.80000	0.42670	6.867

Rezultati prikazani u tablici 4 pokazuju da se pucolanski materijal Pozz3 odlikuje najvećom potrošnjom kalcijevih iona u zasićenoj otopini kalcijevog hidroksida. Tako visoke vrijednosti rezultat su hidratacijskog procesa i vezivanja kalcijevih iona s pucolanski aktivnim materijalom. Pucolanski materijali Pozz1 i Pozz2 mogu se svrstati među materijale s nižom pucolanskom aktivnošću nego što je to slučaj kod pucolanskog materijala Pozz3.

Mehaničke karakteristike pripremljenih uzoraka morta

Uzorci morta DM1, DM2 i DM3 pripremljeni su miješanjem veziva, agregata i pucolanskog materijala u omjerima koji su prikazani u tablici 2. Nakon pohranjivanja u kalupe, kalupi s uzorcima spremljeni su u vlažnu prostoriju ($90 \pm 1\%$ relativne vlažnosti, temperatura = 20 ± 1 °C) [11]. Uzorci su nakon 24 sata izvađeni iz kalupa te prolaze kroz postupak njege u vremenu od 3, 7 i 28 dana, u gore spomenutim uvjetima. Njihove vrijednosti čvrstoće na savijanje određene su nakon njege. Rezultati čvrstoće na savijanje (tablica 5.) pokazuju da su vrijednosti čvrstoće na savijanje uzoraka koji sadrže

drobljenu staru ciglu (Pozz3) više od vrijednosti termički obrađenih uzoraka s lokalnom glinom (Pozz1 i Pozz2).

Tablica 5. Rezultati čvrstoće na savijanje za projektirane uzorke morta DM1, DM2 i DM3 [MPa]

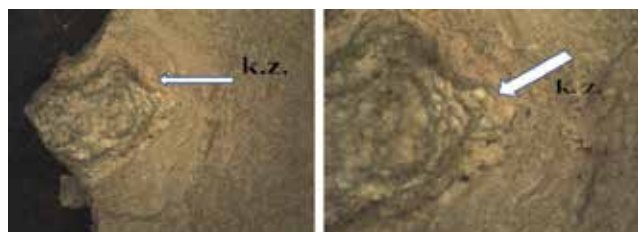
Vrijeme	DM1	DM2	DM3
3 dana	0.05	0.09	0.15
7 dana	0.46	0.28	0.26
28 dana	0.73	0.35	0.99

Ocjena kompatibilnosti uzoraka jedan je od osnovnih aspekata na kojima se bazira projektiranje sanacijskog morta. Uzimajući u obzir dobivene rezultate, provedena je kontrola kompatibilnosti i to spajanjem starih i novih materijala, kako bi se ocijenilo njihovo uzajamno djelovanje i kohezija.

Na temelju postupka karbonizacije/hidratacije stvorena je kontaktna zona između dviju vrsta materijala, odlomaka starog morta i novoprojektiranih mješavina morta, slika 6. Morfologija tih zona analizirana je stereooptičkim mikroskopom, slika 7.



Slika 6. Fotografije ocjene kompatibilnosti; stari mort TB M1 (središnji dio uzorka) i nove periferne zone projektiranih morta: a) DM 1; b) DM 2; c) DM3



Slika 7. Razvoj kontaktne zone *(k.z.) između uzorka starog morta TBM1 i novoprojektiranog morta DM 3 formiranog pomoću pucolanskog materijala Pozz3

Morfološka analiza kontaktnih zona pokazuje da se nastalo područje odlikuje zadovoljavajućim estetskim izgledom (nema pukotina) samo u slučaju morta DM 3, koji je izrađen na bazi pucolanskog materijala Pozz3. S obzirom na sastav ovog uzorka morta (prisutnost stare drobljene cigle), moglo se i očekivati nastanak materijala dobrih hidrauličkih svojstava [12]. Ta su očekivanja i dokazana postignutim rezultatima (tablice 3. do 5. i slika 7.). Očito je da se po tim karakteristikama uzorak morta DM3 razlikuje od DM1 i DM2 kao potencijalni završni mort za nanošenje u zonu poda donžonske kule.

2.4. Ugradnja na samom mjestu i odabir konačnog sastava novoprojektiranih mortova

Ponekad laboratorijska ispitivanja ne odgovaraju u potpunosti stvarnom stanju na mjestu ugradnje, a to može uzrokovati brojne probleme. Osim kemijske kompatibilnosti starih i novih materijala, novi materijali trebaju udovoljiti i brojnim konzervatorskim zahtjevima. U tom su kontekstu izrađena četiri dodatna sastava uzoraka morta, M1-M4 (tablica 6.). Jedan uzorak je predstavljao osnovni mort – M1, a preostala tri uzorka (M2, M3 i M4) bili su završni podni mortovi sličnog sastava. Težinski omjer veziva i agregata u pripremljenom uzorku iznosio je 1:3 (kao i kod DM3), osim kod morta M1 gdje je taj omjer iznosio 1:5. Kao vezivo se za sve pripremljene mortove koristilo tradicionalno gašeno vapno, dok je porijeklo lomljene cigle bilo isto kao i kod laboratorijskih uzoraka (veličina zrna ispod 300 mm). Kao agregati su se u novoprojektiranim mortovima Ms koristili mramor i prosijani riječni pijesak (iz Dunava).

Tablica 6. Sastav uzoraka morta Ms pripremljenih za ugradnju na samom mjestu

Ispitni uzorci	M1	M2	M3	M4
Gašeno vapno	1	1	1	1
Pijesak	2	1,5	1	1
Drobljena cigla	-	0,5	0,5	1
Crveni mramor	2	0,5	0,5	0,5
Drobljeni crveni mramor	1	0,5	1	0,5

Osim kemijske, estetske, fizikalne ili mehaničke karakterizacije koja se obično obavlja pri projektiranju novih materijala, konzervatori se također trebaju baviti i pitanjem ugradljivosti [13]. Odgovarajuća ugradljivost kemijski kompatibilnog morta ne može se unaprijed predvidjeti niti jamčiti. Stoga se u tom smislu na gradilištu provodi jedno ili nekoliko ispitivanja ugradljivosti. U ovom je slučaju obavljeno nekoliko ispitivanja ugradljivosti i konzistencije pripremljenih mortova (tablica 6.). Pripremljeni uzorci morta položeni su na staklene pločice u obliku krnjeg stošca (pogače promjera oko 9 cm) nakon čega je provedeno manualno vibriranje da bi se ocijenila volumenska konzistencija [14]. Ti su koraci bili značajni za određivanje estetskih, adhezijskih i mehaničkih svojstava novoprojektiranih uzoraka M2, M3 i M4 koji su se trebali koristiti kao završni podni mortovi. Uzorak morta (M1) kod kojeg omjer veziva i agregata iznosi 1/5 planirao se koristiti kao osnovni mort koji bi se upotrijebio zajedno s uzorcima završnog morta M2-M4. Neke napomene o razlikama između nanesenih mortova M2-M4 dane su nakon dvadesetčetirisatnog sušenja u hladu, slika 8. U slučaju uzorka morta M2, površina je bila ispucana i hrapava s točkastim udubljenjima. Površina uzorka

morta M3 također je bila hrapava, ali je ta pojava bila manje intenziteta i s manje izbočina. Kod posljednjeg uzorka morta M4, na površini nije bilo vidljivih pukotina, tj. površina je bila glatka a i postignut je odgovarajući stupanj plastičnosti i prihvatljiv estetski izgled.



Slika 8. Ispitivanje ugradljivosti i konzistencije pripremljenih mortova

Uzimajući u obzir laboratorijske rezultate i rezultate dobivene ispitivanjem uzoraka morta na mjestu ugradnje, konačno je kao materijal za konzervatorsku obradu podnih površina u donžonskoj kuli odabran uzorak M4. Ovaj mort udovoljava brojnim zahtjevima kao što su: prihvatljivo vrijeme stvrdnjavanja i odgovarajuća adhezijska svojstva, estetska prihvatljivost (boja, tekstura, površinska obrada), sličnost s prvobitnim završnim mortom te dobra ugradljivost bez pojave pukotina u postupku otvrdnjavanja.

Nakon proizvodnje i odabira morta, obavljena je konzervatorska obrada podnih površina. Primijenjeni su sljedeći postupci: spojevi su brižljivo očišćeni (pranjem vodom te uklanjanjem svih nedovoljno učvršćenih dijelova cigle i morta) i na tako očišćenu površinu nanesen je mort M4, slika 9.



Slika 9. Izgled podne površine prije i poslije konzervatorske obrade [4]

2.5. Pregled nanesenog morta nakon konzervatorske obrade

Ponašanje nanesenog morta M4 u stvarnim uvjetima kontrolirano je četiri godine nakon ugradnje. Tretirana površina u donžonskoj kuli analizirana je pomoću stereooptičkog

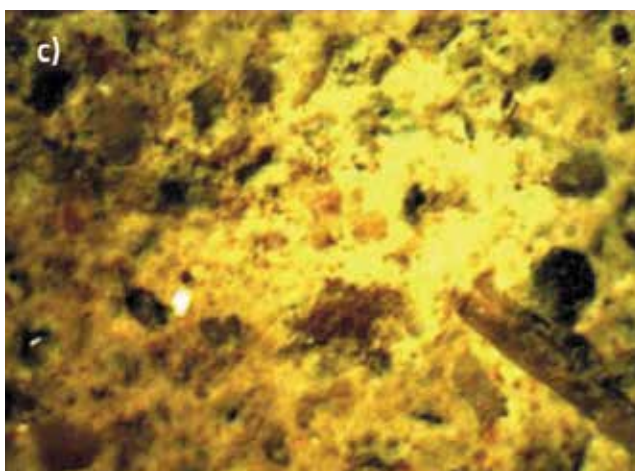
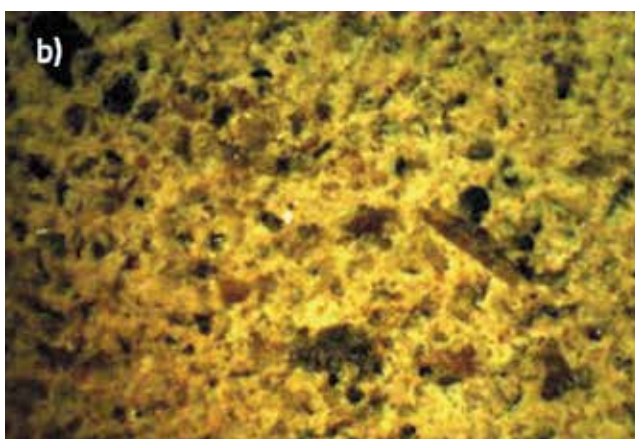
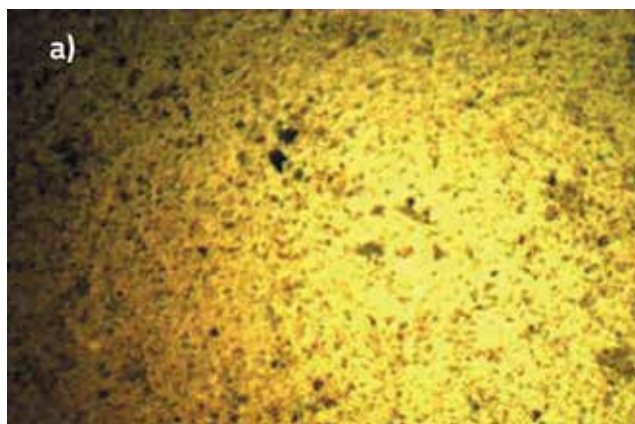
mikroskopa, slika 10. Ta se metoda smatra prikladnom za otkrivanje pukotina ili mikropukotina jer one izravno utječu na trajnost i estetski dojam nanesenog morta. Rezultati su prikazani na slici 11.



Slika 10. Analiza pomoću stereooptičkog mikroskopa

Stereooptički mikrografovi prikazani na slici 11 pokazuju da u zoni ugradnje nema vidljivih pukotina ili mikropukotina. Na osnovi tih rezultata može se zaključiti da je konzervatorska obrada provedena uspješno te da je ponašanje morta M4 prihvatljivo jer tijekom četiri godine nakon ugradnje nisu zabilježene nikakve anomalije.

Očekuje se nastavak suradnje između konzervatora i znanstvenika organiziranjem mobilnih timova za izobrazbu koji bi obavljali preliminarne dijagnoze primjenom nerazornih metoda. Uz to bi se po potrebi pružali i odgovarajući stručni savjeti, a sve s ciljem da se izbjegnu neprimjerene intervencije i gubitak materijala – koji je dokaz autentičnosti materijalnog nasljeđa [15, 16]. I na kraju, treba napomenuti da je autentičnost osnovni čimbenik koji određuje vjerodostojnost konzervatorskih zahvata. Kao što se navodi u Narinom dokumentu o autentičnosti: "odluke o autentičnosti mogu se povezati s vrijednošću raznovrsnih izvora informacija. Aspekti tih izvora mogu uključivati formu i projekt, materijale i supstancu, korištenje i funkciju, tradicije i tehnologije" [17].



Slika 11. Stereooptički mikrografovi morta M4 četiri godine nakon polaganja: a) povećanje x 6.5; b) povećanje x 25; c) povećanje x 45

3. Zaključak

Multidisciplinarni pristup u definiranju vrijednosti donžonske kule, te projektiranje i nanošenje novoprojektiranih materijala, samo su potvrda djelotvornosti dobro promišljene metodologije i kompetentnosti tima zaduženog za zaštitu kulturnog nasljeđa.

Ispitana je primjenljivost dvaju potencijalno iskoristivih pucolanskih materijala: lokalno dostupne gline i drobljene stare cigle. Rezultati ispitivanja pucolanske aktivnosti (volumetrijska metoda i električna provodljivost) pokazuju da se najvećom pucolanskom aktivnošću odlikuje drobljena stara cigla (Pozz3). Mort DM3 baziran na pucolanskom materijalu Pozz3 udovoljava zahtjevima kao što su povoljno vrijeme otvrdnjavanja, svojstva prionljivosti te kompatibilnost s autentičnim mortom očuvanim u malim fragmentima, estetska podobnost (u pogledu boje, teksture i površinske obrade) te dobra ugradljivost bez pojave

pukotina u postupku otvrdnjavanja. Sve podne površine donžonske kule tretirane su novoprojektiranim materijalom M4 i pritom je primjenjen tradicionalni postupak ugradnje. Četiri godine nakon polaganja morta ispitana su njegova svojstva pomoću stereomikroskopa. Nisu uočene nikakve pukotine ili mikropukotine. Dokazano je da se novoprojektirani mort odlikuje odgovarajućom mehaničkom otpornošću te da je relativno stabilan u mikroklimatskim uvjetima koji prevladavaju u donžonskoj kuli.

Može se reći da pristup rješavanju konzervatorskog problema i dilema na prikazanom primjeru pripadaju području konzervatorske znanosti. Iskustva stečena u tijeku rada multidisciplinarnog tima, te napredne tehnike izrade materijala primijenjene na ovom projektu i na drugim kulturnim spomenicima, prikladno su objedinjene u šire istraživačke aktivnosti koje su se u međuvremenu razvile u hvalevrijednu međunarodnu suradnju.

LITERATURA

- [1] Rosario Veiga, M., Velosa, A., Magalhaes, A.: Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation, *Construction and building materials*, 23, pp. 318-327, 2009.
- [2] Provincial Institute for the Protection of Cultural Monuments, Petrovaradin, Ancient Bac and its Surroundings, illustrated guide and panoramic map. Bac: Fund Senturies of Bac, 2010.
- [3] Vujović, S.: "Integrativna zaštita prostorne kulturno-istorijske celine Tvrđava i podgrađe u Baču" / Integrated Protection of the Spatial Cultural Historical Complex of the Bač Fortress and its Suburb, u: *Urbana regeneracija zaštićenih ambijentalnih celina u kontekstu održivog razvoja – Podgrađe Tvrđave Bač* / Urban regeneration of protected ambients in the context of sustainable development – Bač Fortress Suburbium, Beograd: Arhitektonski fakultet, pp.108-142/ 338-361, 2011. <http://obavezni.digital.nb.rs/izdavac/af/publikacija/11> (5.3.2013.)
- [4] Provincial Institute for the Protection of Cultural Monuments, Petrovaradin, Donjon Tower conservation project, implemented by the Developmental Project of Integrative Protection of the Municipality of Bač "Centuries of Bač" 03-20/2006)
- [5] Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K.: Thermal analysis as a method of characterizing ancient ceramic technologies. *Thermochim Acta* 269, pp.743-53, 1995.
- [6] Tironia, A., Trezzaa, M.A., Scianb, A.N., Irassar, E.F.: Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays, *Cement and Concrete Composites*, 37, pp. 319-327, 2013
- [7] Pašalić, S., Vučetić, S., Zorić, D., Ducman, V., Ranogajec, J.: Pozzolanic mortars based on the waste building materials for the restoration of historical buildings, *CI&CEQ*, 18 (2,), pp. 147-154, 2012.
- [8] Balen, K.V., Papayianni, I., Hales, R.V., Waldum, A.: Indroction to requirements for and functions and properties of repair mortars, *RILEM TC 167-COM, Materials and structures*, 38, pp. 781-785, 2005.
- [9] Luxan, P., Madruga, F., Saavedra, J.: Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement, *Cement and concrete research*, 19, pp. 63-68, 1989.
- [10] Hong, S.S., et al.: Mechanical strength enhancement of lower hydraulicity cementitious solid wastes using anhydrite and pozzolanic materials, *Cement and Concrete Research*, 29, pp 215-221, 1999.
- [11] SRPS EN 196-7:2010. Methods of testing cement – Part 7: methods of taking and preparing samples of cement
- [12] Sabir, B.B., Wild, S., Bai, J.: Metakolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, *Cement and concrete research*, 23, pp. 441-454, 2001.
- [13] Moropoulou, A., Bakolas, A., Aggelakopoulou, E.: Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis, *Thermochimica Acta*, 420, pp. 135-140, 2004.
- [14] Binda, L., Baronio, G., Tiraboschi, C., Tedeschi, C.: Experimental research for the choice of adequate materials for the reconstruction of the Cathedral of Noto, *Construction and Building materials*, 17, pp. 629-639, 2003.
- [15] European standards, EN 459-2: 2001.
- [16] HEROMAT project, the coordinator Faculty of Technology University of Novi SAD - Protection of cultural heritage objects with multifunctional advanced materials, FP7 THEME [ENV-NMP.2011.3.2.1-1 NMP], <http://www.heromat.com>.
- [17] Nara Document on Authenticity, United Nations Educational, Cultural And Scientific Organization, Convention Concerning The Protection Of The World Cultural And Natural Heritage World Heritage Committee, Eighteenth session, Phuket, Thailand, 12-17 December 1994, www.unesco.org.