

SMERNICE ZA KAKOVOSTNO IZVEDBO UTRJEVANJA ZIDOV STAVBNE DEDIŠČINE S SISTEMATIČNIM INJEKTIRANJEM

GUIDELINES ENSURING QUALITY IN CASE OF STRENGTHENING HERITAGE BUILDINGS WALLS BY MEANS OF GROUT INJECTION

mag. Mojmir Uranjek, univ. dipl. inž. grad.

Gradbeni Inštitut ZRMK, Center za materiale in konstrukcije,
Dimičeva 12, Ljubljana

prof. dr. Roko Žarnić, univ. dipl. inž. grad.

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

doc. dr. Vlatko Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij,
Jamova cesta 2, Ljubljana

Znanstveni članek

UDK: 69.059.3:693.1/.2

Povzetek | Velik del zidov stavbne dediščine v Sloveniji je grajen iz kamna ali mešanice kamna in opeke. Masivnejši zidovi so največkrat grajeni trislojno, z zunanjima slojema iz delno oblikovanih ali klesanih kamnov in vmesnim delom, ki ga tvorijo ostanki in manjši kamni, tanjši zidovi pa so običajno grajeni dvoslojno. Učinkovita tehnika za izboljšanje mehanskih lastnosti takšnih zidov je utrjevanje s postopkom sistematičnega injektiranja. Nepoznavanje morfologije in stanja zidov, nekompatibilnost obstoječih materialov in materialov, ki jih nameravamo vgraditi, ter napake pri izvedbi so lahko vzrok za nekakovostno izvedbo injektiranja ali celo poškodbe zidu. Namen raziskovalnega dela, predstavljenega v članku, je prispevati k vzpostavitvi metodologije dela in kriterijev za doseganje kakovostne izvedbe sistematičnega injektiranja zidov stavbne dediščine. Na osnovi rezultatov obsežnih laboratorijskih preiskav, pregleda dostopne novejšje literature ter sodelovanja s konservatorji in proizvajalci injekcijskih mešanic so definirani kemijski in mehansko-fizikalni kriteriji za izbiro optimalne mešanice za injektiranje. Opisani so vzroki za napake pri sistematičnem injektiranju in podana navodila za zagotavljanje kakovostne izvedbe injektiranja.

Summary | A large part of heritage buildings walls in Slovenia is built with stones or a mixture of stones and bricks. Thicker walls are usually constructed in three layers, with the outer layers made of roughly shaped stones and the inner core of leftovers and smaller stones, while thinner walls mainly have only two layers. An efficient technique for the improvement of mechanical properties of such walls is strengthening by means of grout injection. A lack of knowledge of morphology, the incompatibility of existing and applied materials and errors during the application of grout injection can lead to inadequate quality of grout injection and can even cause damages in the walls. The main objective of the paper is to contribute to the development of work methodology and to criteria for achieving the required quality.

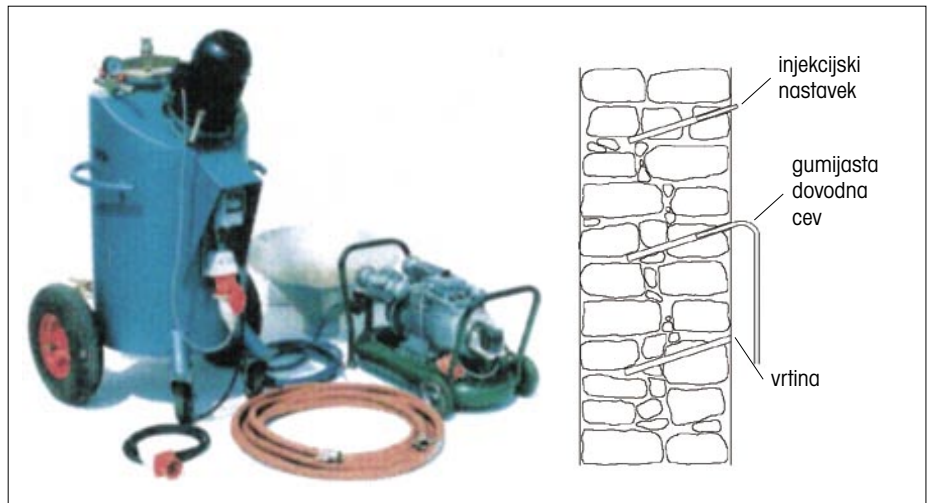
Based on the results of extensive laboratory tests, literature survey and collaboration with conservators and producers of grouts, chemical and mechanical-physical criteria for selecting optimal grouts are given. A list of causes leading to errors and inadequate quality of grout injection are described and also the guidelines for ensuring the quality of grout injection are given.

1 • UVOD

Velik del zidov stavbne dediščine v Sloveniji je grajen iz kamna ali mešanice kamna in opeke. Zaradi neustrezne povezanosti posameznih kamnov, votlin in nekakovostne malte nosilnost takšnih zidov, predvsem v primeru horizontalnih obremenitev, običajno ni zadostna. Mehanske lastnosti kamnitih ali mešanih kamnito-opečnih zidov z določeno votlikavostjo je mogoče izboljšati z utrditvijo s postopkom sistematičnega injektiranja. Bistvo metode je vtiskovanje injekcijske mešanice (zmes vode, veziva in dodatkov) v delno votel zid, s čimer po strditvi materiala dosežemo ustrezno povezanost med posameznimi kamni in sloji zidu. Če je to potrebno oziroma dovoljeno s strani restavratorskih in konservatorskih služb, se v prvi fazi z zidov odstranijo poškodovane in odstopajoče omete. V tem primeru se površina zidu obdela s cementnim obrizgom, da preprečimo iztekanje injekcijske mešanice. V primeru, da so ometi obdelani s freskami, ki jih je treba ohraniti, je mogoča izvedba podpornega opaža ali snemanje freske in njihova ponovna namestitvev. Sledi vrtnanje poševnih vrtnin v približnem rastru 50 cm z zamikom med vrstami do globine 2/3 debeline zidu, v katere se vgradijo kovinski injekcijski nastavki. Do maksimalne debeline zidov 1 m izvajamo

injektiranje enostransko, pri debelejših zidovih pa obojestransko. Injekcijska mešanica se v zidove uvaja preko gumijastih dovodnih cevi, ki jih preko navoja pritrdimo na kovinske cevke, in sicer pod pritiskom $p = 2-3$ bara. Injektiranje poteka od spodaj navzgor, pri čemer se, ko na sosednjem nastavku pride do iztekanja mešanice, nastavek zamaši.

Čeprav si projektanti, izvajalci in nadzorniki lahko do določene mere pomagajo z internimi navodili (Janežič in sod., 1998) in izkušnjami, so pogoste napake in nekakovostno izvedena dela znak, da je tehnična regulativa tudi na tem področju neizogibno potrebna. Namen raziskovalnega dela, predstavljenega v članku, je prispevati k vzpostavitvi metodologije dela in kriterijev za doseganje kakovostne izvedbe sistematičnega injektiranja zidov stavbne dediščine.



Slika 1 • Z leve: naprava za sistematično injektiranje, izvedba vrtnin in namestitvev injekcijskih nastavkov v zidu

2 • VRSTE KAMNITIH IN KAMNITO-OPEČNIH ZIDOV

Zidovi enostavnih stavb na podeželju so običajno sezidani dvoslojno iz kamnov, ki jih je bilo mogoče dobiti v neposredni okolici naselij. Velikokrat so bili za gradnjo uporabljeni kamni iz bližnjih rečnih strug. Največkrat so zidarji kamne vgradili v zid brez posebne obdelave, delno obdelani so zgolj posamezni kamni. Pri trislojnih zidovih sta zunanja zidna sloja grajena iz večjih kamnov, vmesni sloj pa največkrat tvorijo ostanki, nastali pri obdelavi kamnov za zunanja sloja, malta in drobir, včasih pa je v

jedru takšnih zidov mogoče najti tudi zemljo, slamo in lesene dele. Povezovalni kamni med posameznimi sloji zidu so redki. V Posočju ter na Kozjanskem in Gorenjskem sta bila pri gradnji večinoma uporabljena apnenec in peščenjak, pojavlja pa se tudi skrilavec. Zidovi pomembnejših stavb v mestnih ali vaških jedrih so običajno grajeni kakovostneje. Pravilno ali delno klesan kamen je sicer uporabljen redkeje, če že, je to v primeru sakralnih ali drugih pomembnejših objektov.

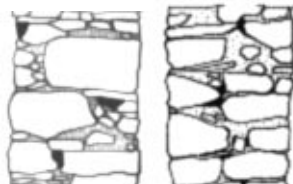
Ponekod so iz klesanega kamna grajeni zgolj vogali, drugi deli zidu so pozidani iz neobdelanega ali grobo obdelanega kamnja. V starem mestnem jedru Ljubljane sta bila za gradnjo kamnitih zidov običajno uporabljena sljudnat kremenov peščenjak in apnenec, za gradnjo kamnito-opečnih zidov pa poleg kamna še opeka. Klasifikacije posameznih vrst zidov na območju Slovenije v dostopni literaturi nismo zasledili, zato povzemamo klasifikacijo dvo- in trislojnih zidov na področju sosednje Italije, ki so jo izdelali na Politehniku v Milanu (Binda in sod., 2001). Večino prereзов zidov, prikazanih na sliki 2, smo zasledili tudi na področju Slovenije.

DVOSLOJNI ZID

Dva sloja brez povezave



Povezava slojev s prekrivanjem posameznih kamnov



Povezava slojev z dolgimi kamni po celotnem prerezu zidu



TRISLOJNI ZID

Zunanja sloja iz klesanega kamna in vmesni sloj različnih širin iz drobirja in manjših kamnov



Zunanja sloja iz neobdelanega kamna in vmesni sloj iz drobirja in manjših kamnov



Slika 2 • Razvrstitev prerezov dvo- in trislojnih zidov (Binda in sod., 2001)

3 • VZROKI ZA NAPAKE PRI SISTEMATIČNEM INJEKTIRANJU

Nepoznavanje morfologije zidu, nekompatibilnost obstoječih materialov in materialov, ki jih vgrajujemo pri utrjevanju, nepoznavanje vlažnosti zidu in napake pri izvedbi lahko vodijo do neakovostne izvedbe sistematičnega injektiranja ali celo do poškodb zidu, ki ga utrjujemo. V nadaljevanju so opisani najpogostejši vzroki za napake in neakovostno izvedbo sistematičnega injektiranja.

3.1 Nepoznavanje morfologije zidov

Posledica nepoznavanja morfologije zidu je lahko izbira neustrezne oziroma neučinkovite metode utrditve, v praksi pa se je zaradi tega večkrat dogajalo, da so večje količine injekcijske mešanice iztekale v območje temeljev, namesto da bi prišlo do enakomerne zapolnitve votlin v zidu. Sistematično injektiranje ni ustrezen poseg pri zidovih s prispevkom votlin, manjšim od 4 % (Penazzi in sod., 2001), oziroma pri zidovih, kjer je celotno jedro zapolnjeno z drobirjem, zemljo in vezivom. Pri takšnih neinjektabilnih zidovih je treba pristopiti k primernejšim metodam utrditve.

3.2 Nekompatibilnost novovgrajenih materialov z obstoječimi

Med obstoječimi materiali in materiali, ki jih vgrajujemo pri utrjevanju zidu s sistematičnim injektiranjem, lahko v splošnem pride do kemijske in/ali mehansko-fizikalne nekompatibilnosti. Injekcijska mešanica bi morala imeti ustrezne lastnosti in biti kompatibilna (kemijsko in fizikalno) z materiali zidu (Valuzzi in sod., 2002). Nekompatibilnost novovgrajenih materialov z obstoječimi lahko vodi do propadanja obstoječih materialov ali celo poškodb konstrukcije zidu. Razlaga vzrokov za takšno propadanje sicer presega okvir tega članka, jo je pa mogoče najti v dostopni znanstveni literaturi (Collepari, 1990).

3.3 Nepoznavanje vlažnosti zidov

Čezmerno vlažnost zidu je treba odpraviti, še preden pristopimo k utrditvi zidu s sistematičnim injektiranjem, saj lahko pomeni aplikacija sistematičnega injektiranja brez odpravljanja vzrokov in posledic vlage pospešeno napredovanje poškodb in destruktiven vpliv na zaključne sloje zidu (Uranjek, 2008).

3.4 Napake med izvedbo

Pri nadziranju utrditvenih posegov v sklopu popotresne obnove leta 2004 v Posočju smo ugotovili, da se nekatere napake pogosto pojavljajo. V nadaljevanju navajamo napake, ki lahko vodijo do neakovostne izvedbe sistematičnega injektiranja:

- Neustrezna priprava injekcijske mešanice – izvajalci z namenom čim boljše zapolnitve votlin in razpok v zidu pogosto povišujejo delež vode, ki ga predpisuje proizvajalec. S tem se sicer izboljša pretočnost mešanice, vendar lahko po drugi strani pride do segregacije in povečanega izločanja vode, zmanjša pa se tudi sposobnost adhezije takšne mešanice s kamni in malto.
- Prekinitev delovnega procesa – če je delovni proces prekinjen in se mešanje ustavi, lahko pride do strjevanja injekcijske mešanice in posledično zmanjšanja obdelavnosti in pretočnosti.
- Neustrezna priprava zidu pred injektiranjem – parametri, ki jih je treba upoštevati pred začetkom injektiranja in vplivajo na kakovost izvedenih del, so pravilna razporeditev, naklon in globina vrtin ter količina vode, ki jo porabimo za omočenje zidu.

- Neustrezen delovni pritisk – višji pritisk pomeni kakovostnejšo penetracijo injekcijske mešanice v votline in razpoke v zidu, vendar lahko povzroči poškodbe ometa ali celo zunanjih slojev zidu.
- Nepravilen potek injektiranja – z injektiranjem zmeraj začnemo na nastavkih, vgra-

jenih v spodnjem delu zidu, in s postopnim prestavljanjem injektirne cevi na višje vgrajene nastavke. Injektiranja nikdar ne izvajamo od zgoraj navzdol, saj bi v tem primeru strjujoča se mešanica zapirala votline v zidu in tako preprečila prodiranje v nižje območje zidu.

- Delno injektiranje – poškodbe zidov objektov, ki so bili s sistematičnim injektiranjem utrjeni le delno in nato ponovno izpostavljeni potresni obtežbi, kažejo, da injektiranje zgolj posameznih delov zidu, kot na primer križanj in vogalov zidov ter območij vgradnje protipotresnih jeklenih vezi, ni ustrezna rešitev.

4 • LABORATORIJSKE PREISKAVE

V okviru laboratorijskih preiskav smo analizirali devet injekcijskih mešanic, ki so dobavljive na slovenskem tržišču. Čeprav nam proizvajalci niso razkrili točne komponentne sestave mešanic, je bila iz priloženih tehničnih listov razvidna vrsta uporabljenega veziva. Mešanice, izdelane na osnovi hidravličnega apna in pucolanov, smo označili z AP1, AP2, AP3 in AP4, apneno-cementne mešanice z dodanimi pucolani ali brez njih pa z AC1, AC2 in AC3 in cementni mešanici z oznakama C1 in C2.

Laboratorijske preiskave so bile razdeljene v štiri sklope. V prvem sklopu je bila analizirana vsebnost potencialno škodljivih snovi. V drugem in tretjem sklopu so bile analizirane lastnosti mešanic v svežem in strjenem stanju. V zadnjem, četrtem sklopu so bile izvedene preiskave cilindričnih preskušancev, ki so ponazarjali z injektiranjem utrjeno kamnito jedro zidu. Za analiziranje lastnosti mešanic so bili uporabljeni standardi za beton, malto in verzija standardov za kable za prednapenjanje iz leta 1996 (EN 445 do EN 447) s prilagoditvami, kjer je bilo to potrebno. Mešanice so bile na podlagi kemijskih, fizikalnih in mehanskih kriterijev, definiranih na osnovi pregleda dostopne literature ter sodelovanja s konservatorji in proizvajalci, razvrščene v tri kakovostne razrede. Razred A pomeni mešanico visoke kakovosti, razred B mešanico srednje kakovosti in razred C mešanico nizke kakovosti.

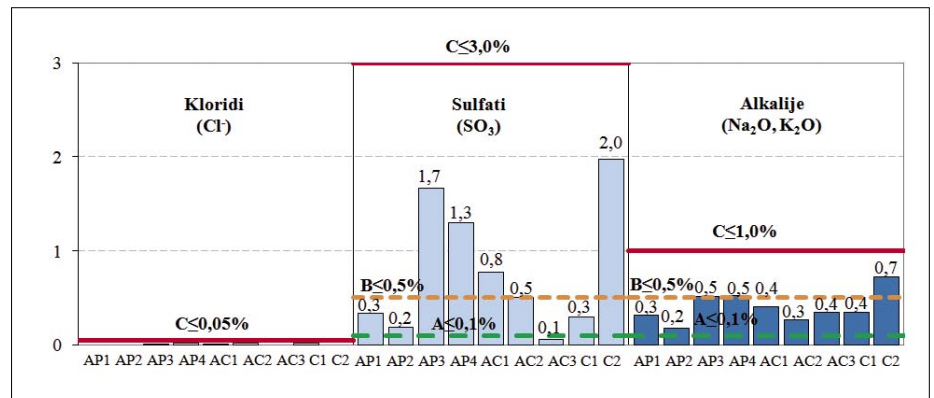
4.1 Suha injekcijska mešanica

V prvem sklopu laboratorijskih preiskav je bila analizirana vsebnost potencialno škodljivih snovi v suhi mešanici, ki bi v povezavi z drugimi parametri lahko povzročile poškodbe zaključnih slojev zidu in poslikav. V skladu s standardom SIST EN 196-2 (2005) je bila analizirana vsebnost kloridov, sulfatov in alkalij. Povečana vsebnost kloridov v injekcijski mešanici bi lahko bila problematična predvsem takrat, ko so v kamnitih zidovih, ki jih

injektiramo, že vgrajeni jekleni elementi, na primer protipotresne vezi ali natezne vezi obokov. Standard EN 447 (1996), ki obravnava injekcijske mešanice za prednapete kable, omejuje vsebnost kloridov na 0,1 % mase. Sulfati imajo lahko v določenih okoliščinah (Collepari, 1990) škodljiv vpliv na obstoječe materiale v zidu, saj lahko ob prisotnosti vlage pride do tvorbe škodljivih produktov, kot sta etringit in taumazit. Visoka vsebnost alkalij je problematična zaradi pojava eflorescence in možnosti alkalno-silikatne ali alkalno-karbonatne reakcije. Van Rickstal (2000) priporoča, da se za pripravo injekcijskih mešanic uporabljajo cementi z manj kot

0,1 % mase alkalij. Pri uporabi potencialno reaktivnih agregatov za pripravo betona velja priporočilo, naj alkalije v cementu (kot Na₂O ekvivalent), ne presežejo 0,6 % mase (Zatler - Zupančič, 1994). V naši raziskavi je bila vsebnost kloridov za posamezne kakovostne razrede omejena na A ≤ 0,01 %, B ≤ 0,02 %, C ≤ 0,05 %, vsebnost sulfatov na A ≤ 0,1 %, B ≤ 0,5 %, C ≤ 3,0 % in vsebnost alkalij na A ≤ 0,1 %, B ≤ 0,5 %, C ≤ 1,0 %.

Vsebnost potencialno škodljivih snovi v mešanicah in omejitve za posamezne kakovostne razrede so prikazane na sliki 3. Vse mešanice so zadostile kriterijem kakovostnega razreda C, mešanice AP1, AP2, AC2, AC3 in C1 so zadostile kriterijem kakovostnega razreda B, nobena izmed analiziranih mešanic pa ni izpolnila kriterijev kakovostnega razreda A.



Slika 3 • Vsebnost kloridov (Cl), sulfatov (SO₃) in alkalij (Na₂O, K₂O) v masnih %

| | AP1 | AP2 | AP3 | AP4 | AC1 | AC2 | AC3 | C1 | C2 |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| v/v razmerje | 0,45 | 0,45 | 0,55 | 0,38 | 0,50 | 0,62 | 0,50 | 0,40 | 0,43 |
| prostorninska masa (kg/m ³) | 1599 | 1778 | 1563 | 1821 | 1673 | 1659 | 1712 | 1895 | 1856 |
| pretočnost (s) | 19,85/ 20,05 | 14,40/ 14,40 | 35,90/ 36,60 | 28,30/ 28,50 | 13,51/ 13,43 | 13,60/ 16,30 | 17,40/ 45,00 | 13,80/ 15,50 | 27,20/ 44,50 |
| izločanje vode (%) | 0,00 | 2,15 | 0,00 | 2,13 | 0,20 | 0,53 | 0,00 | 0,52 | 1,03 |
| vodozadržnost (%) | 95,2 | 89,5 | 96,7 | 92,3 | 94,1 | 88,7 | 89,0 | 86,2 | 86,1 |

Preglednica 1 • Lastnosti sveže injekcijske mešanice

4.2 Sveža injekcijska mešanica

Vse mešanice so bile pripravljene skladno z navodili proizvajalcev. Analizirane so bile lastnosti mešanic, ki vplivajo na obdelavnost, injektibilnost in posledično kakovost injektiranja. Prostorninska masa sveže mešanice je bila določena po standardu SIST EN 1015-6 (1999), pretočnost in izločanje vode po standardu EN 445 (1996), vodozadržnost pa v skladu s standardom PSIST prEN 1015-8 (2001).

Odločujoče lastnosti, na podlagi katerih so bile mešanice razvrščene v posamezne razrede, so bile v/v (vodovezivno) razmerje, pretočnost in izločanje vode. Valuzzi-jeva (Valuzzi et al., 2003) je v svojih raziskavah v/v razmerje omejila na $v/v = 0,60$ v izogib neugodnemu učinku na mehanske lastnosti strjene mešanice. Standard EN 447 (1996) kot maksimalno vrednost v/v razmerja navaja $v/v = 0,44$. V naših raziskavah smo kot maksimalno dopustno vrednost v/v razmerja upoštevali $v/v = 0,60$ z dovoljenim odstopanjem 10 % za vse kakovostne razrede. Valuzzi-jeva (Valuzzi et al., 2003) je kot maksimalen dopusten čas pretočnosti navedla vrednost 25–30 s. Standard EN 447 (1996) vrednost pretočnosti takoj po zamešanju in po preteku 30 min. omejuje na 25 s. Sami smo pri meritvah pretočnosti upoštevali dva kriterija. Za mešanice kakovostnega razreda A je bil zahtevan čas pretočnosti $t \leq 25$ s takoj po zamešanju in po preteku 30 min., hkrati pa med obema meritvama ni smelo priti do razlike, večje od 10 %. Za mešanice kakovostnega razreda B in C je bil zahtevan čas pretočnosti $t \leq 30$ s, razlika med obema meritvama pa ni smela presežati 15 %. Standard EN 447 (1996) omejuje izločanje vode na 2,0 % začetne prostornine mešanice po preteku 3 ur. Enak kriterij je uporabil Paillere (Paillere et al, 1992) v svojih raziskavah. V našem primeru je bila vrednost izločanja omejena na 2,0 % z dopustnim odstopanjem 10 % za vse kakovostne razrede.

Na osnovi kriterijev za svežo injekcijsko mešanico so bile mešanice AP1, AP2 in AC1 uvrščene v kakovostni razred A, mešanici AP4 in C1 v kakovostni razred B in mešanica AC2 v kakovostni razred C. Mešanice AP3, AC3 in C2 niso izpolnile postavljenih kriterijev.

4.3 Strjena injekcijska mešanica

Kamnite in kamnito opečne zidove utrjujemo s sistematičnim injektiranjem, da bi dosegli ustrezno povezanost posameznih kamnov in slojev po strditvi injekcijske mešanice in tako izboljšali mehanske lastnosti injektiranega

| | AP1 | AP2 | AP3 | AP4 | AC1 | AC2 | AC3 | C1 | C2 |
|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| sprememba prostornine (%) | 12,8 | 3,7 | 1,2 | 5,2 | 0,9 | 0,6 | 0,0 | 1,2 | 0,0 |
| c.o.v. (%) | 6 % | 1 % | 8 % | 3 % | 16 % | 18 % | 133 % | 26 % | 130 % |
| prostorninska masa (kg/m ³) | 1373 | 1400 | 1356 | 1620 | 1467 | 1361 | 1518 | 1815 | 1683 |
| c.o.v. (%) | 3 % | 0,1 % | 1,2 % | 0,7 % | 0,6 % | 0,4 % | 0,5 % | 0,4 % | 1 % |
| upogibna trdnost (MPa) | 1,3 | 2,0 | 0,4 | 0,6 | 6,3 | 2,8 | 3,1 | 4,4 | 4,4 |
| c.o.v. (%) | 21 % | 3 % | 24 % | 32 % | 10 % | 8 % | 7 % | 14 % | – |
| tlačna trdnost (MPa) | 11,2 | 2,0 | 12,4 | 12,5 | 23,7 | 21,7 | 26,9 | 52,3 | 47,0 |
| c.o.v. (%) | 5 % | 2 % | 2 % | 5 % | 6 % | 5 % | 3 % | 6 % | 2 % |
| cepilna natezna trdnost (MPa) | – | 0,3 | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 1,4 | 1,3 | 1,4 | 1,6 |
| c.o.v. (%) | – | 4 % | 26 % | 25 % | 5 % | 18 % | 6 % | 12 % | 20 % |
| kapilarni srk* (kg/m ²) | 25,9 | 37,5 | 15,7 | 19,2 | 27,1 | 26,1 | 23,1 | 13,0 | 8,8 |

*vrednosti so izmerjene pri starosti 28 dni

Preglednica 1 • Lastnosti strjene injekcijske mešanice pri starosti 90 dni

zidu. Pri tem so pomembne lastnosti strjene injekcijske mešanice, kot so sprememba prostornine, prostorninska masa, koeficient kapilarnega vpivanja vode ter upogibna, tlačna in cepilna natezna trdnost. Sprememba prostornine je bila izmerjena skladno z metodo, opisano v standardu EN 445 (1996), prostorninska masa v skladu s SIST EN 1015-10 (2001), koeficient kapilarnega vpivanja vode v skladu s SIST EN 1015-18 (2004), upogibna in tlačna trdnost z upoštevanjem določil SIST EN 1015-11 (2001) in cepilna natezna trdnost po postopku, opisanem v SIST EN 12390-6 (2001).

Standard EN 447 (1996) dovoljuje spremembo prostornine v intervalu od $-1,0$ % do $5,0$ %. V našem primeru smo spremembo prostornine omejili od $-0,3$ % do $0,3$ % za kakovostni razred A, od $-0,6$ % do $0,6$ % za kakovostni razred B in od $-1,0$ % do $1,0$ % za kakovostni razred C. Maksimalne vrednosti kapilarnega srka za posamezne kakovostne razrede smo postavili na $A \leq 10$ kg/m², $B \leq 20$ kg/m² and $C \leq 30$ kg/m². Pri upogibni in tlačni trdnosti smo kriterije povzeli po Miltiadoujevi (Miltiadou et al, 2007). Za vse kakovostne razrede A, B in C je morala biti upogibna trdnost večja od $f_{ig} \geq 2,00$ MPa, tlačna trdnost pa večja od $f_{og} \geq 6,00$ MPa. Pri cepilni natezni trdnosti smo upoštevali kriterij $f_{ig} \geq 0,80$ MPa za vse kakovostne razrede.

Na osnovi postavljenih kriterijev za strjeno injekcijsko mešanico je bila mešanica C2 uvrščena v kakovostni razred A, mešanici AC1

in AC2 v kakovostni razred C, druge mešanice pa niso zadostile kriterijem.

4.4 Ocena analiziranih injekcijskih mešanic

Upoštevajoč, da je bila vsaki izmed izvedenih preiskav suhe, sveže in strjene mešanice pripisana enaka utež, so samo tri mešanice zadostile postavljenim zahtevam. To so mešanice AC1, AC2 in C1, ki so se uvrstile v kakovostni razred C. Pri mešanici AC1 smo dobre rezultate dosegli pri preiskavah suhe in sveže mešanice. Mešanica AC1 je bila tudi zelo dobro obdelavna in je posledično dosegla najboljši rezultat pri preiskavi pretočnosti. Mešanica AC2 je sicer zadostila kriterijem, postavljenim za kakovostni razred B pri preiskavah suhe mešanice, in kriterijem kakovostnega razreda C pri preiskavah strjene mešanice, vendar je zgolj pogojno zadostila kriterijem za pretočnost v okviru preiskav sveže mešanice, saj se je čas pretočnosti med obema meritvama povečal za več kot 15 %. Mešanica C1 je dosegla dobre rezultate pri večini opravljenih preiskav. Pri preiskavah v suhem in svežem stanju se je sicer uvrstila v kakovostni razred B, vendar so končno uvrstitev v kakovostni razred C pogojevali rezultati preiskav strjene mešanice. Mešanica C2 je pogojno izpolnila zahteve kakovostnega razreda C, če upoštevamo, da je pretočnost parameter, ki ga je mogoče kontrolirati s postrežno kontrolo proizvodnje in dodatkov – v tem primeru najverjetneje kakovosti dodane sadre, ki se cementu dodaja kot regulator vezanja.



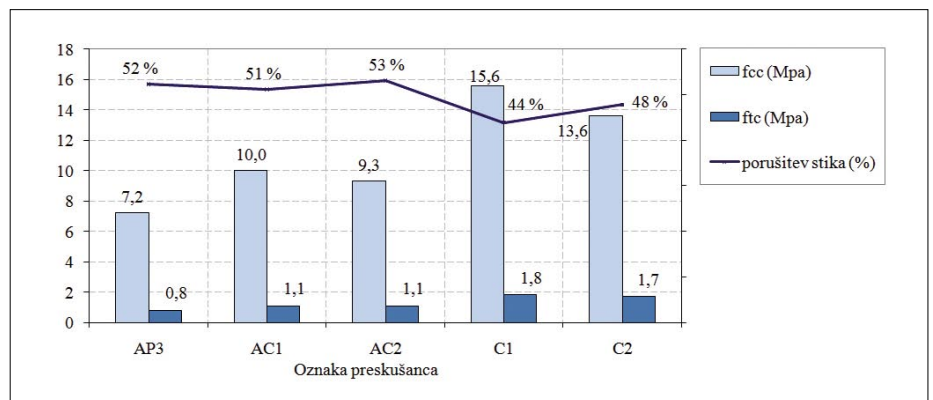
Slika 4 • Z leve: preskušanci, pripravljeni za injektiranje, injektiranje preskušanca, tlačna preiskava, cepilna natezna preiskava

4.5 Preiskave kamna

Pri preiskavah smo uporabili dve vrsti kamna, ki sta bili najpogosteje zastopani pri gradnji stavb na ruralnih območjih Slovenije – apnenec in peščenjak. Na kockah z robom 7 cm smo opravili preiskave tlačne trdnosti in kapilarnega srka. V primeru apnenca je povprečna tlačna trdnost, iz vrednotena skladno s SIST EN 772-11 (2000), znašala $f_{cl} = 120$ MPa, v primeru peščenjaka pa $f_{cs} = 209$ MPa. Koeficient kapilarnega srka za obe vrsti kamna je bil določen z upoštevanjem določil standarda SIST EN 772-11. Po prvih 3 urah testa je kapilarni srk apnenca znašal $193,5 \text{ g/m}^2$, v primeru peščenjaka pa je bila izmerjena nekoliko nižja vrednost, in sicer $157,1 \text{ g/m}^2$. Po približno 11,5 ure preiskave se je situacija obrnila: kapilarni srk apnenca se je stabiliziral, medtem ko je kapilarni srk peščenjaka še zmeraj strmo naraščal. Končne vrednosti kapilarnega srka po 28 dneh so se v primeru apnenca ustalile na $328,7 \text{ g/m}^2$, v primeru peščenjaka pa na $834,9 \text{ g/m}^2$. Rezultati so pokazali, da je bila začetna stopnja kapilarnega srka višja v primeru apnenca, medtem ko je bila končna vrednost kapilarnega srka po pričakovanju višja v primeru peščenjaka.

4.6 Preiskave cilindričnih preskušancev

Pri gradnji večslojnih kamnitih zidov so zidarji navadno zapolnili prostor med zunanjsima slojema z ostanki, preostalimi pri oblikovanju kamnov za gradnjo zunanjih slojev zidu. Da bi ponazorili kamnito jedro takšnega zidu, so bili pripravljene cilindrični preskušanci premera 15 cm in višine 30 cm. Cilindri so bili postopno polnjeni z apnencem in peščenjakom. Posamezni vzorec je bil v povprečju sestavljen iz 37 % mase frakcije 45/63 mm in frakcije 32/45 mm, 25 % mase frakcije 16/32 mm in 1 % mase frakcije 8/16 mm. Da so bili



Slika 5 • Povprečna tlačna in cepilna natezna trdnost cilindričnih preskušancev ter % porušitve po stiku med injekcijsko mešanico in kamni pri cepilni natezni preiskavi

preskušanci medsebojno dobro primerljivi, so pokazali rezultati izmerjene votlikavosti, ki je v povprečju znašala od 31,4 % do 32,5 %. Cilindri so bili injektirani z mešanici AC1, AC2, C1 in C2, ki so izpolnile kriterije, postavljene v prvih treh sklopih preiskav. Da bi ovrednotili obnašanje cilindra, injektiranega z mešanico iz hidravličnega apna in pucolanov, smo eno serijo cilindrov zainjektirali tudi z mešanico AP3. Za vsako izmed mešanice je bilo pripravljenih 6 preskušancev: 3 za preiskavo tlačne in 3 za preiskavo cepilne natezne trdnosti. Pri starosti 90 dni so bili preskušanci podvrženi tlačni preiskavi po SIST EN 12930-3 (2002) in cepilni natezni preiskavi v skladu s SIST EN 12930-6. Na sliki 5 so prikazani rezultati tlačne in cepilne natezne trdnosti cilindrov, injektiranih z mešanici AP3, AC1, AC2, C1 in C2. Tlačne in cepilne natezne trdnosti cilindrov, injektiranih s cementnima mešanici C1 in C2, so bile po pričakovanju najvišje, in sicer od 36 do 68 % višje od tistih, injektiranih z apneno-cementnima mešanici AC1 in AC2, ter od 89 do 125 % višje od cilindrov, injektiranih z mešanico AP3. Vrednosti tlačnih

in cepilnih nateznih trdnosti cilindrov, injektiranih z mešanici AC1 in AC2, so bile višje od cilindrov, injektiranih z mešanico AP3 od 29 do 39 %. Po zaključeni preiskavi cepilne natezne trdnosti so bili porušeni preskušanci pregledani, pri čemer je bilo ugotovljeno, da površina kamnov predstavlja približno 68 % in površina injekcijske mešanice približno 32 % celotnega prereza. Ugotovljeno je bilo, da je prevladujoči način porušitve porušitev stika med kamni in injekcijsko mešanico ne glede na vrsto uporabljene mešanice. V primeru cilindrov, injektiranih s cementnima mešanici AP3, AC1 in AC2, je porušitev po stiku zajemala 51 do 53 % celotnega prereza, v primeru cilindrov, injektiranih s cementnima mešanici C1 in C2, je bila v primeru injektiranja s cementnima mešanici dosežena nekoliko boljša adhezija med kamni in mešanico, kar kažejo tudi rezultati cepilne natezne trdnosti. Analiza prerezov kaže, da ima dosežena stopnja adhezije med kamni in mešanico prevladujoč vpliv na cepilno natezno trdnost preskušanca ne glede na vrsto uporabljene mešanice.

5 • NAVODILA ZA KAKOVOSTNO IZVEDBO SISTEMATIČNEGA INJEKTIRANJA

Da bi zagotovili kakovostno izvedbo sistematičnega injektiranja, so ključnega pomena predhodne preiskave, tako za ugotavljanje morfologije in mehanskih lastnosti zidu kot tudi poznavanje sestave in mehansko-fizikalnih lastnosti injekcijske mešanice. V nadaljevanju navajamo nekaj osnovnih navodil za učinkovito izvedbo sistematičnega injektiranja.

5.1 Ocena morfologije, injektabilnosti in mehanskih lastnosti zidu

Za oceno morfologije, injektabilnosti in mehanskih lastnosti zidu je mogoče uporabiti različne metode preiskav. V splošnem ločimo nedestruktivne preiskave (NDT), delno destruktivne preiskave (DDT) in destruktivne preiskave (DT), pri čemer lahko zanesljive rezultate, ki so potrebni za uspešno obnovo oziroma rekonstrukcijo objekta, dobimo le s kombinacijo dveh ali več metod ((Bosiljkov, 2006), (Binda in sod., 2006)). NDT-preiskave – kot so na primer georadarske (GPR) meritve, metoda s kladivom (sonic test), metoda z jeklenimi blazinami (flat jack) – lahko izvajamo na širšem območju, medtem ko se DDT-preiskave, kot so površinsko in globinsko sondiranje ter vrtnanje jeder, običajno izvaja lokalno. Da bi zagotovili kompatibilnost med obstoječimi materiali in materiali, s katerimi nameravamo zid utrditi, so kemijsko-mineraloške in fizikalno-mehanske preiskave osnovnih gradnikov zidu, kot so kamni, opeke, malta in omet, ključnega pomena.

5.2 Ocena lastnosti injekcijskih mešanic

Namen utrjevanja kamnitih in kamito-opečnih zidov z določeno votlikavostjo je izboljšati mehanske lastnosti zidov z uporabo injekcijskih mešanic, ki bodo kompatibilne z obstoječimi materiali. Da bi to dosegli, je treba definirati ustrezne kriterije za suho, svežo in strjeno

mešanico ter hkrati upoštevati lastnosti obstoječih materialov in morfologijo zidu, ki ga nameravamo utrditi.

5.3 Omejitev vlažnosti zidov

Omejitev vlažnosti oziroma preprečevanje dostopa vodi ter kapilarnega dviga v zidu so bistvenega pomena ter je predvsem pri utrjevanju stavbne dediščine, kjer običajno varujemo zaključne sloje zidu, obvezen poseg. Voda deluje kot transportni medij in omogoča prenos škodljivih snovi po zidu, hkrati pa aktivno sodeluje pri kemijskih reakcijah, ki povzročajo degradacijo. Neposreden dostop vode je mogoče omejiti z izvedbo drenaž in odvodnjavanja ter izvedbo hidrofobnih ometov. Kapilarni dvig je mogoče učinkovito preprečiti z izvedbo hidroizolacijske bariere in sistematičnega injektiranja z mešanicami s hidrofobnimi dodatki.

5.4 Izvajalski ukrepi

Da bi zagotovili kakovostno izvedbo sistematičnega injektiranja, je potrebno izvesti izvajalske ukrepe, ki jih podajamo v nadaljevanju:

- Testna polja, ki se izvedejo na določenih delih zidov v objektu, nam skupaj z informacijami, pridobljenimi z NDT- in DDT-preiskavami, omogočajo določitev ustreznih pritiskov injektiranja, določitev ustrezne globine in rastra vrtni, določitev količine vode, potrebne za omočenje zidu, ter nam dajo informacijo o porabi injekcijske mešanice.
- V primeru prisotnosti nečistoč, prahu in močno porozne površine gradnikov zidu je potrebno omočenje zidu. Omočenja po drugi strani ne izvajamo pri zidovih, kjer se zaradi lastnosti obstoječih materialov in substanc pričakuje, da bi prisotnost vode lahko vodila do kemijskih reakcij, ki bi povzročile degra-

dacijo obstoječih materialov in poškodbe zaključnih slojev.

- Kontrola lastnosti sveže mešanice (v/v razmerje, pretočnost, izločanje vode) kot tudi strjene mešanice (sprememba prostornine, prostorninska masa, upogibna, tlačna in cepilna natezna trdnost).
- Učinkovitost sistematičnega injektiranja mora biti spremljana z ustreznimi metodami (kontrola porabe, georadarske meritve, metoda s kladivom).
- Pravilno zaporedje del je zelo pomembno za zagotavljanje celovite in enakomerne zapoljenosti votlin v zidu. Z injektiranjem se vedno prične od spodaj navzgor, s sprotnim zapiranjem nastavkov, iz katerih začne injekcijska mešanica iztekati.
- Pri injektiranju nekakovostno grajenih zidov z velikim deležem medsebojno povezanih votlin so še posebej takrat, ko imamo opravka z visokimi zidovi brez vmesnih medetažnih konstrukcij (dvorane ali stolpi), potrebni dodatni ukrepi. V takem primeru je treba injektiranje izvajati postopno v segmentih, da se preprečijo poškodbe zaradi sočasnega delovanja hidrostatičnega pritiska sveže mešanice in pritiska pri injektiranju.

5.5 Varovanje zaključnih slojev

Pri utrjevanju zidov kulturne dediščine se pogosto pojavi problem varovanja zaključnih slojev, še posebej, če so prisotne freske in druge poslikave. V smislu izvajalskih ukrepov za preprečevanje poškodb so mogoči naslednji pristopi:

- Izvedba podpornega opaža (običajno lesenega), katerega funkcija je podpiranje ometa in s tem preprečitev odpadanja zaradi pritiskov pri injektiranju. Med opažem in ometom se namesti penasta guma (ali drug primeren material), ki zagotovi enakomerno podprtje ometa in ga obvaruje pred poškodbami in odrgninami.
- Snemanje freske in njena ponovna namestitve po zaključenem injektiranju.

novejše literature ter sodelovanja s konservatorji in proizvajalci injekcijskih mešanic so bili definirani kemijski in mehansko-fizikalni kriteriji za izbiro optimalne mešanice za injektiranje. Na podlagi podanih kriterijev je analizirane mešanice mogoče razvrstiti v tri kakovostne razrede. Razred A pomeni mešanico visoke kakovosti, razred B mešanico srednje kakovosti in razred C mešanico nizke kakovosti. Pri apliciranju kri-

6 • SKLEP

Ugotovitve in cilje, dosežene v okviru predstavljenega raziskovalnega dela, lahko povzamemo kot:

- Nabor vzrokov za napake in nekakovostno izvedbo sistematičnega injektiranja, kot so nepoznavanje morfologije zidov, nekompati-

bilnost vgrajenih materialov z obstoječimi, nepoznavanje vlažnosti zidov in napake pri izvedbi injektiranja.

- Določitev kriterijev za suho, svežo in strjeno injekcijsko mešanico. Na osnovi rezultatov laboratorijskih preiskav, pregleda dostopne

terijev je treba upoštevati rezultate preiskav in-situ, ki nam razkrivajo stanje, morfologijo in lastnosti materialov, uporabljenih pri gradnji posameznega zidu.

- Preiskave cilindričnih preskušancev, ki ponazarjajo z injektiranjem utrjeno jedro večslojnega kamnitega zidu, so pokazale, da je bila pri injektiranju s cementnima

mešanicama C1 in C2 dosežena nekoliko boljša adhezija med kamni in mešanico kot pri injektiranju z mešanicami AP3, AC1 in AC2. Analiza rezultatov je pokazala tudi, da ima dosežena stopnja adhezije med kamni in mešanico prevladujoč vpliv na cepilno natezno trdnost preskušanca ne glede na vrsto uporabljene mešanice.

- Podana navodila za zagotavljanje kakovostne izvedbe sistematičnega injektiranja, in sicer za učinkovito oceno morfologije, injektabilnosti in mehanskih lastnosti zidu, oceno lastnosti injekcijskih mešanic, omejitev vlažnosti zidov, navedbo ukrepov pri izvedbi injektiranja ter navodila za varovanje zaključnih slojev.

7 • ZAHVALA

Raziskovalno delo, prikazano v prispevku, je sofinanciralo Ministrstvo za visoko šolstvo,

znanost in tehnologijo RS ter Evropska unija – Evropski socialni sklad preko Tehnološke

agencije Slovenije TIA. Vsem se najlepše zahvaljujemo.

8 • LITERATURA

- Binda, L., Bosiljkov, V., Saisi, A., Zanzi, L., Guidelines for the diagnostic investigation of historic buildings, Proceedings of the Seventh International Masonry Conference, Lonon 2006, Proceedings of the British Masonry Society, No. 10, Stoke on Trent: British Masonry Society, 2006.
- Binda, L., Saisi, A., State of the Art of Research on Historic Structures in Italy, 2001, dostopno na: http://www.arcchip.cz/w11/w11_binda.pdf (15. 8. 2008).
- Bosiljkov, V., Metode preskušanja zgodovinskih objektov, Gradbenik 7-8, str. 8–10, 2006.
- Collepari, M., Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings. Materials and Structures, No. 23, p. 81–102, 1990.
- EN 445, Grout for prestressing tendons – Test methods, str. 12, 1996.
- EN 446, Grout for prestressing tendons – Grouting procedures, str. 8, 1996.
- EN 447, Grout for prestressing tendons – Specification for common grout, str. 5, 1996.
- Janežič, I., Baumgartner, M., Kos, J., Bergant, M., Tehnične informacije o pomembnejših konstrukcijskih posegih za sanacijo pri potresu poškodovanih zidanih stavb, str. 18, 1998, dostopno na: <http://www.gi-zrmk.si/images/TC/3%20članek.pdf> (14. 7. 2010).
- Miltiadou, A., Kalagri, A., Delinikolas, N., Design of hydraulic grout and application methodology for stone masonry structures bearing mosaics and mural paintings: the case of the katholikon of Dafni Monastery, International Symposium: Studies on Historical Heritage, Antalya, Turkey, September 17–21, 2007. Istanbul, Yildiz Technical University, RCPHH: Istanbul, p. 649–656, 2007.
- Penazzi, D., Valluzzi, M. R., Saisi, A., Binda, L., Modena, C., Repair and strengthening of historic masonry buildings in seismic areas, Int. Congr. »More than Two Thousand Years in the History of Architecture Safeguarding the Structure of our Architectural Heritage«, Betlehem, Palestine, 2, Sec. 5, Betlehem, p. 1–6, 2001.
- PSIST prEN 1015-8:2001, Metode preskušanja zidarske malte – 8. del: Določanje zadrževanja vode sveže malte, str. 8, 2001.
- SIST EN 196-2:2005, Metode preskušanja cementa – 2. del: Kemijska analiza cementa, str. 50, 2005.
- SIST EN 772-11:2000, Metode preskušanja zidakov – 11. del: Ugotavljanje kapilarnega vpivanja vode betonskih zidakov ter zidakov iz umetnega in naravnega kamna in začetna stopnja vpivanja vode opečnih zidakov, str. 8, 2000.
- SIST EN 1015-6, Metode preskušanja zidarskih malt – 6. del: Ugotavljanje protorninske mase sveže malte, str. 9, 1999.
- SIST EN 1015-10, Metode preskušanja zidarskih malt – 10. del: Določevanje suhe prostorninske mase strjene malte, str. 7, 2001.
- SIST EN 1015-11, Metode preskušanja zidarskih malt – 11. del: Določevanje upogibne in tlačne trdnosti strjene malte, str. 12, 2001.
- SIST EN 1015-18, Metode preskušanja zidarskih malt – 18. del: Določevanje koeficienta kapilarnega vpivanja strjene malte, str. 8, 2004.
- SIST EN 12390-3, Preskušanje strjenega betona – 3. del: Tlačna trdnost preskušancev, str. 15, 2002.
- SIST EN 12390-6, Preskušanje strjenega betona – 6. del: Cepilna natezna trdnost strjenega betona, str. 10, 2001.
- Uranjek, M.: Problematika injektiranja zidov objektov kulturne dediščine, magistrsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, str. 164, 2008.
- Valluzzi, M. R., Binda, L., Modena, C., Experimental and analytical studies for the choice of repair techniques applied to historic buildings, Materials and Structures, Vol. 35, p. 285–292, June 2002.
- Van Rickstal, F., Grout injection of Masonry, scientific approach and modelling, Doctoral Dissertation, Leuven, Katholieke Univ. Leuven, 195 p, 2000.
- Vintzileou, E., Grouting of Three-Leaf Stone Masonry: Types of Grouts Mechanical Properties of Masonry before and after grouting, Structural analysis of Historical Constructions, p. 41–58, 2006.
- Zatler - Zupančič, B., Mladenovič, A., Alkalna reakcija v betonu, Informacije ZRMK Ljubljana 312, XXXV, 3–4–5, Ljubljana, str. 5, 1994.