

29/9/2025
401-1/2024-110

POROČILO

Preiskave s kladivom (*sonic test*) in izvedba
injektiranja poskusnih polj na delu rimskega
zidu na Mirju

(Preliminarno poročilo)

Naročnik: Mestna občina Ljubljana, Slovenija

Naročilnica: N407-24-0131

Predstojnik katedre:

Prof. dr. Vlatko Bosiljkov

Dekanja:

Prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov

Poročilo pripravili: Vlatko Bosiljkov, David Antolinc, Tilen Turk in Franci Čepon

SPLOŠNI PODATKI

KRAJ / LOKACIJA:	Ljubljana
PREDMET (IME DELA):	Rimski zid
EŠD	22658
DATACIJA / AVTOR:	Rimska doba, 20. stol., 1913, 1927-1956 Walter Schmidt (arhitekt; 1913), Jože Plečnik (arhitekt; 1927-1956)
VRSTA DEDIŠČINE:	Arheološka najdišča
LASTNIK:	MOL
PRISTOJNA STROKOVNA ORGANIZACIJA:	ZVKDS Ljubljana
PREISKAVE OPRAVIL(-i):	prof.dr. Vlatko Bosiljkov, udig. doc. dr. David Antolinc, udig. dr. Tilen Turk, mag. inž. kem. inž. Franci Čepon, dig. Gras d.o.o. – izvajalec injektiranja
POROČILO O PREISKAVI PRIPRAVIL(-i):	prof.dr. Vlatko Bosiljkov, udig. doc. dr. David Antolinc, udig. dr. Tilen Turk, mag. inž. kem. inž. Franci Čepon, dig.

Vsebina

1	UVOD	5
2	NALOGA.....	5
3	NEDESTRUKTIVNE PREISKAVE – METODA S KLADIVOM.....	5
3.1	Merilna oprema	7
3.1.1	Kladivo	7
3.1.2	Pospeškometer.....	8
3.1.3	Sistem za zajemanje podatkov	9
3.1.4	Zapisi rezultatov meritev	9
4	INJEKTIRANJE	10
4.1	Injekcijska masa	11
5	PRESKUSNA POLJA.....	13
5.1	Nedestruktivne preiskave	15
5.1.1	ZID A	15
5.1.2	ZID B.....	15
5.1.3	ZID C.....	16
5.1.4	ZID D	16
5.1.5	ZID E.....	17
5.1.6	ZID F	17
5.2	Injektiranje	18
5.2.1	ZID A	18
5.2.2	ZID C.....	20
6	REZULTATI PREISKAV Z METODO KLADIVA	22
6.1	Pred injektiranjem	22
6.1.1	ZID A	22
6.1.2	ZID B.....	23
6.1.3	ZID C.....	24
6.1.4	ZID D	25
6.1.5	ZID E.....	26
6.1.6	ZID F	27
6.2	Po injektiranju	28
6.2.1	ZID A	28

6.2.2	ZID C.....	29
7	SKLEP.....	30
8	VIRI	32

1 UVOD

V sklopu nadaljevanja raziskovalnega dela na rimskem zidu smo na povabilo Mestne Občine Ljubljana, oddelka za kulturo (MOL) pristopili fazi določanja učinkovite metode utrjevanja obstoječega rimskega zidu na Mirju. Delo je bilo koordinirano s strani Katedre za preskušanje materialov in konstrukcij UL FGG (KPMK). Pri sprejemanju odločitev so še sodelovali predstavniki ZVKDS, MGML, RC in MOL-a. Injektiranje zidov je opravil Gras d.o.o..

2 NALOGA

Rimski zid na Mirju je votlikav in kot smo že pokazali v prejšnjem poročilu (2) v primeru potresa zelo ranljiv. Tradicionalno se pri nas utrjujejo tovrstni zidovi z metodo injektiranja. Glede na obseg celotnega obzidja bi to bila dokaj draga zadeva. Iz tega razloga smo nalogi pristopili najprej s preliminarnimi preiskavami zidovine z nedestruktivnimi metodami (metoda s kladivom) kako bi najprej določili najbolj votle dele obzidja. Nato bi dva polja zidu poskusno injektirali ter z nedestruktivnimi preiskavami ugotavljali učinkovitost injektiranja. Na ta način bi dosegli dva poglobitna cilja te naloge:

- Ugotoviti ali so zidovi injektibilni in
- Pridobiti zanesljivo metodo za določanje votlikavosti masivnih zidov.

Namen naloge je določiti primerne dele zidu za izbrano metodo utrjevanja (injektiranje) za kar smo morali najprej preskusiti več različnih polj vzdolž zidu. Kot referenčne vrednosti dobro zapolnjenega zidu smo vzeli rezultate meritev na ostankih severnega dela zidu ob Kongresnem trgu (sedanji Lidl, nekdanji Šumi) – Severna emonska vrata.

V sklopu prejšnjih raziskav povzetih v našem poročilu – Materialne in konstrukcijske raziskave Rimskega zidu s predlogi za konstrukcijsko sanacijo (P 401-1/2022-66) z dne 22/1/2023 tovrstnih preiskav nismo opravili, ker v tistem času nismo imeli opreme na voljo. Takrat smo za diagnosticiranje votlin uporabili georadar, ki z anteno od 2,5GHz ima penetracijo le do 0,35m v globino, kar je bistveno premalo za oceno učinkovitosti injektiranja po celotni debelini rimskega zidu (izmera 2,2-2,4m).

V okviru projektne naloge smo opravili naslednja dela:

- do začetka julija 2025 zaključeno s kalibriranjem nove preskuševalne opreme v laboratoriju in naredili poskusne preiskave s kladivom na zidovih iz polne opeke in betona,
- 4/7/2025 – koordinacijski sestanek na terenu s predstavniki ZVKDS, MGML, RC in MOL,
- 12-13/8/2025 – izvedba nedestruktivnih preiskav na zidovih pred injektiranjem,
- 20/8/2025 – 1. koordinacijski sestanek v prostorih KPMK,
- 5/9/2025 – 2. koordinacijski sestanek in končna določitev injekcijske mase (KPMK),
- 22-23/9/2025 – injektiranje poskusnih polj in
- 29/9/2025 – izvedba nedestruktivnih preiskav na zidovih po injektiranju.

3 NEDESTRUKTIVNE PREISKAVE – METODA S KLADIVOM

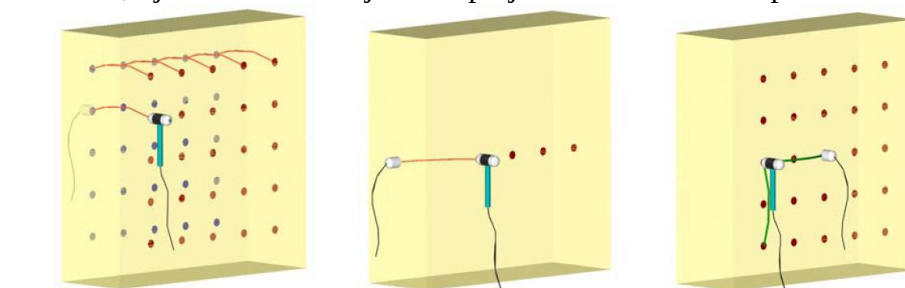
Metoda s kladivom temelji na določitvi hitrosti longitudinalnega primarnega p-valovanja, ki je funkcija gostote in elastičnih lastnosti materiala. Gre za enostavno metodo, ki se v gradbeništvo že vrsto let uporablja za oceno povezanosti materialne strukture, določitev globine razpok in izračun mehanskih

karakteristik (elastičnega modula in enosne tlačne trdnosti) na podlagi hitrosti. Naprave, ki temeljijo na merjenju amplitude in faze valovanja, omogočajo poleg omenjenega tudi določitev debeline materialov in mest delaminacij.

Pri metodi gre za točkovno meritev časa, ki je potreben, da zvočni impulz prepotuje določeno razdaljo. Impulz ustvarimo z instrumentalnim kladivcem, z elektrodinamično ali pnevmatično napravo. Na podlagi tega je izračunana hitrost, ki je primerjana z znano referenčno vrednostjo. Hitrosti, ki znatno odstopajo od referenčne hitrosti, kažejo na prisotnost območij razpok ter delaminacij. Le-to se odraža v daljšem času potovanja ali v celoti preprečenemu prehodu potujočega valovanja. Manjša odstopanja izračunane hitrosti od referenčne vrednosti se lahko pripišejo spremembam elastičnega modula in služijo za interpretacijo trdnostnih karakteristik. Podatek o trdnosti dobimo na podlagi merjenja hitrosti v mediju s konstanto gostoto, kar velja le za redke konstrukcijske materiale, zaradi česar je verodostojnost izračuna vprašljiva.

Pri preiskavi morata biti oddajnik in sprejemnik mehansko povezana s površino preiskovanega materiala. Glede na lego oddajnika in sprejemnika ločimo tri tipe preiskav:

- direktne meritve, kjer sta oddajnik in sprejemnik v liniji na nasprotnih straneh preiskovanega predmeta,
- delno direktne meritve, kjer sta oddajnik in sprejemnik drug na drugega postavljena pod drugačnim kotom in je pot signala diagonalna,
- indirektno meritve, kjer sta tako oddajnik in sprejemnik na isti strani preiskovanega predmeta.

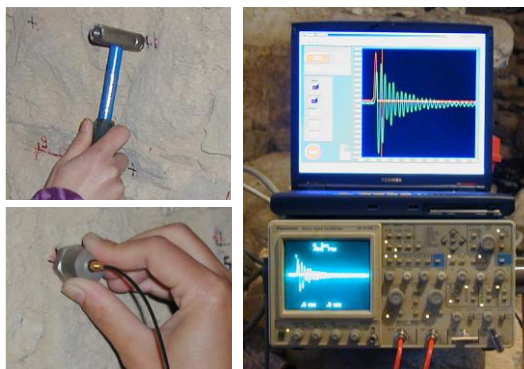


- Slika 1: Načini merjenja pri metodi s kladivom

Jakost signala indirektnih meritev znaša le 1–2 % signala direktnih meritev, zato so priporočene direktne meritve, kjer je le to mogoče. Preiskava se običajno izvaja na vnaprej pripravljeni mreži točk.

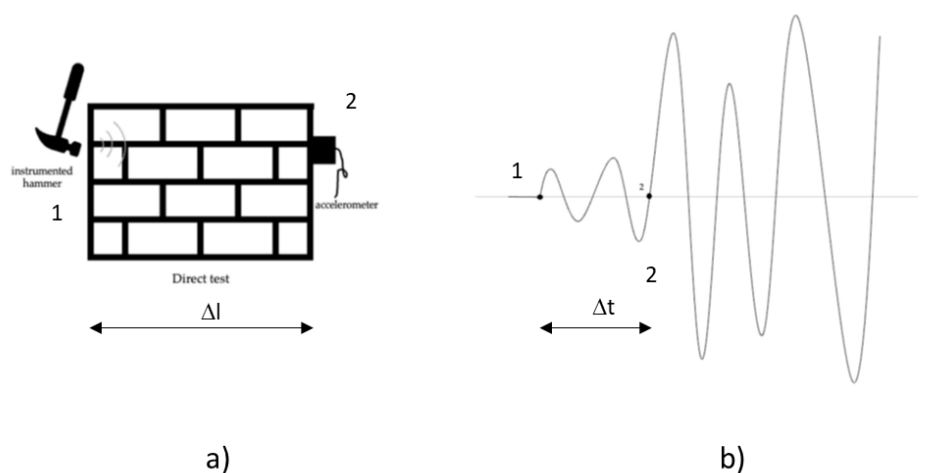
Glavna omejitev metode je pojav večjega števila razpok, območij zadržane vlage ali večjih votlin, saj postane zaradi njih zvočno valovanje moteno in točkovne meritve niso povsem zanesljive.

Merilna oprema za preiskavo s kladivom sestoji iz oddajnika in sprejemnika, sistema za zajemanje podatkov ter računalna z LCD zaslonom za prikaz prejetega valovanja, ki ga zajemamo v digitalni obliki.



Slika 2: Merilna oprema za opravljanje meritev s kladivom in osciloskopom prvič uporabljena v Sloveniji v okviru On-site projekta (1)

V našem primeru smo izvajali direktne meritve s tem, da smo najprej izmerili debelino zidu na preskusnem mestu (Δl) ter na vsaki posamezni točki merili zamik/čas signala (širjenja mehanskega valovanja) od kladiva do pospeškometra (Δt). Na osnovi izmerjenih količin smo določili hitrost valovanja $v = \Delta l / \Delta t$.



Slika 3: Določanje hitrosti na preskusnem mestu

3.1 Merilna oprema

3.1.1 Kladivo

Za potrebe izvajanja preiskav na rimskem zidu smo mogli naročiti in kalibrirati večji bat, ki bi bil bolj primeren za masivne obrambne zidove. Uporabili smo bat proizvajalca Dytran model 5803A (Slika 4).



Slika 4: Udarno kladivo Dytran model 5803A

Dytran model 5803A je udarno kladivo IEPE, ki se uporablja za vzbujanje večjih konstrukcijskih sklopov z izmerjeno udarno silo za namene določanja njihovega dinamičnega obnašanja. Impulz se uporablja za določanje frekvenc konstrukcije, pomembnega parametra za identifikacijo dinamičnega odziva, pa tudi za določanje homogenosti posameznih elementov. Z občutljivostjo 1 mV/lbf in razpoložljivim merilnim območjem 5000 lbf je model 5803A največji od Dytranovih kladiv s težo glave 12 funtov in je dobavljen s štirimi zamenljivimi udarnimi konicami. Električna povezava se doseže prek BNC vtičnice, ki se nahaja na koncu ročaja kladiva. Zasnova impulznega kladiva Dytran IEPE vključuje poseben piezoelektrični dinamometer s kompenzacijo pospeška v glavi kladiva na udarni površini, kar zagotavlja gladek frekvenčni spekter brez anomalij.

3.1.2 Pospeškometer

Pospeškometer je bil enakega proizvajalca kot sistema za zajemanje podatkov – Dewesofta. Uporabljen je model IOLITEi-3xMEMS-ACC-8g, ki omogoča meritve pospeškov v vseh treh smeri.



Slika 5: Pospeškometer IOLITEi-3xMEMS-ACC-8g

3.1.3 Sistem za zajemanje podatkov

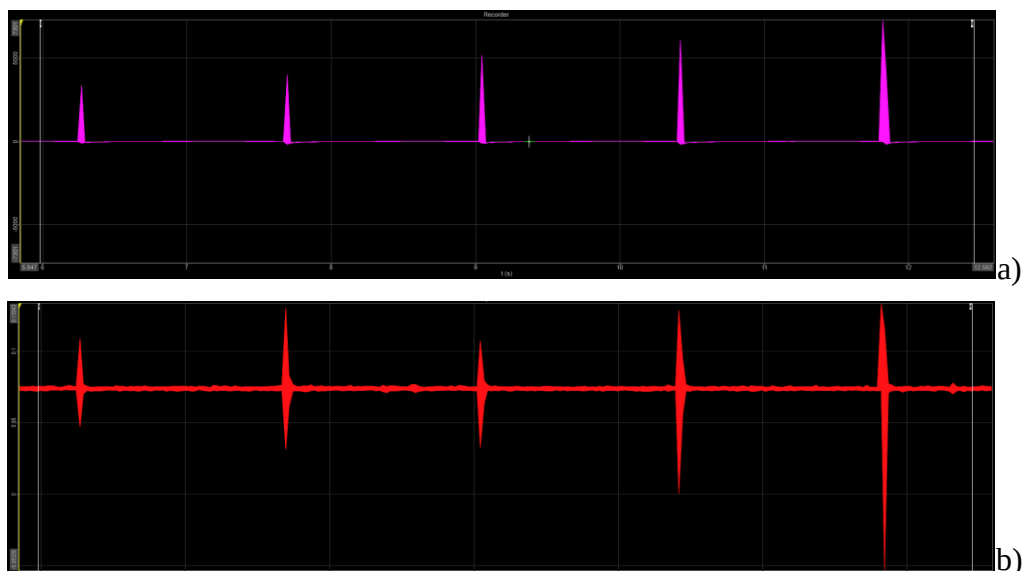
Sistem za zajemanje podatkov je plod domačega znanja in je narejen v Trbovjah. Za potrebe meritvi na rimskem zidu smo morali dodatno izboljšati določene komponente. Največji problem predstavlja frekvenca zajemanja meritvi, ker so časi izjemno majhni (nekaj μs).



Slika 6: Sistem za zajemanje podatkov

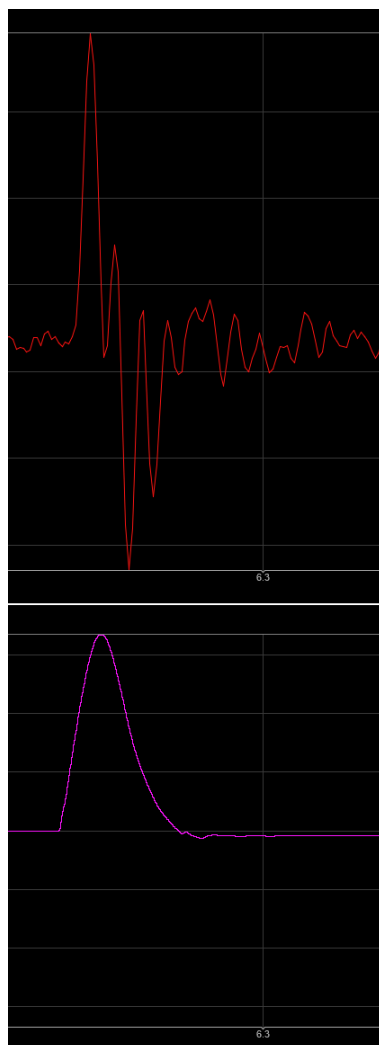
3.1.4 Zapisi rezultatov meritev

Uporabljena oprema omogoča zapis rezultatov v digitalni obliki. Karakteristični zapisi za posamezno točko so podani v sliki (Slika 7).



Slika 7: Prikazovanje rezultatov za kladivo a) in pospeškometer b) po posamezni točki

V povečavi diagrami so podani kot prikazano na sliki (Slika 8).



Slika 8: Posamezna meritev v povečavi za pospeškometer (zgoraj) in kladivo (spodaj)

4 INJEKTIRANJE

Mehanske lastnosti kamnitih in mešanih kamnito-opečnih zidov z določeno votlikavostjo je mogoče izboljšati z utrditvijo s postopkom sistematičnega injektiranja. Bistvo metode je vtiskovanje tekoče suspenzije (cementne, apnene ali polimerne) v delno votel zid, s čimer po strditvi materiala dosežemo ustrezno povezanost (homogenost) med posameznimi kamni in sloji zidu.

Kakovost metode se, poleg tega da izboljšamo trdnostne karakteristike zidu, kaže tudi v tem, da se izognemo neželjenim posegom na zunanjih, vidnih delih zidu, kar je bistvenega pomena pri utrjevanju kulturnozgodovinskih objektov.

Pred začetkom injektiranja so potrebna ustrezna pripravljalna dela. V prvi fazi se, če je to potrebno, iz zidov odstrani poškodovane in odstopajoče omete. Sledi vrtanje poševnih vrtn v približnem rastru 50 cm, z zamikom med vrstami, do globine $\frac{2}{3}$ širine zidu (v našem primeru so vrtnine znašale cca 80cm z vsake strani). Pri tem je potrebno paziti, da se vrtnine izvajajo v območju spojníc gradnikov zidu. V pripravljene vrtnine se s hitrovezočo malto vgradi injekcijske nastavke - kovinske cevke. Da preprečimo

iztekanje injekcijske mešanice iz površine zidu, pred pričetkom postopka zid, če je treba, obdelamo z grobim cementnim obrizgom. Zid se preko vgrajenih nastavkov običajno predhodno omoči, s čimer želimo doseči navlaženje notranjosti zidu in izpiranje prašnih delcev ter nečistoče. Injekcijska mešanica se v zidove uvaja z gumijastimi dovodnimi cevmi, 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, slednjega zamaši. Izvajalci količino vtisnjene mešanice običajno kontrolirajo s porabo suhega veziva na 1 m^3 zidu. Izkušnje kažejo, da je ta $60-100\text{ kg/m}^3$ pri manj poroznih zidovih in $120-150\text{ kg/m}^3$ pri močno poroznih zidovih. Običajno se zidove do debeline 1 metra injektira enostransko, debelejše zidove pa obojestransko.



Slika 9: Izvedba vrtin in namestitvev injekcijskih nastavkov v zidu

4.1 Injekcijska masa

Izvajalec del Gras d.o.o. je ponudil dve vrsti injekcijske mase. Na koordinacijskem sestanku dne 5/9/2025 je sprejeta odločitev, da v tej fazi preiskav najbolj ustreza injekcijska masa proizvajalca Röfix (Slika 10).



Slika 10: Izbrana mešanica

Injekcijska masa je zmes anorganskega veziva, polnila in neškodljivih primesi. Karakteristike injekcijske mase so podane v spodnji preglednici.

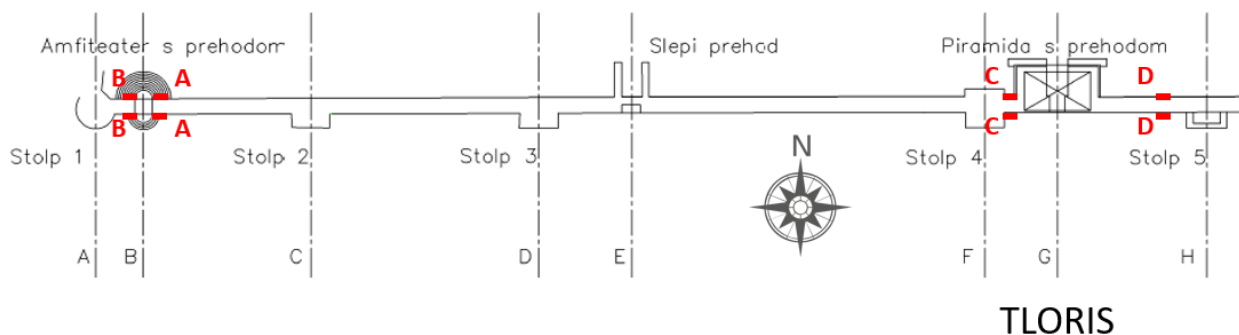
Preglednica 4-1: Podatki o sestavinah injekcijske mase

Nevarne sestavine		
CAS: 65997-15-1 EINECS: 266-043-4 REACH: 1	Opeka iz portlandskega cementa Sestavljajo ga: 12168-85-3 Trikalci- cijev silikat (45 - 70%); 10034-77-2 Dikalcijev sili- kat (5 - 25%); 12042- 78-3 Trikalcijev aluminat (0 - 10%); 12612-16-7 Kalcijev aluminatni silikat (0 - 10%) Eye Dam. 1, H318; Skin Irrit. 2, H315; Skin Sens. 1B, H317; STOT SE 3, H335 Specifične mejne koncentracije: Skin Irrit. 2; H315: C $\geq$ 1 % Eye Dam. 1; H318: C $\geq$ 1 %	$\geq 20 - \leq 25\%$
CAS: 85117-09-5 EINECS: 285-561-1 REACH: 01-2119475523-36	Naravno hidravlično apno Sestavljajo ga: 1305-62-0 Kalci- jev dihidroksid (15 - 65%); 10034-77-2 Dikalcijev sili- kat (10 - 45%); 1317- 65-3 Apnenec (Kalcijev karbonat) (10 - 40%) Eye Dam. 1, H318; Skin Irrit. 2, H315; STOT SE 3, H335 Specifične mejne koncentracije: Skin Irrit. 2; H315: C $\geq$ 1 % Eye Dam. 1; H318: C $\geq$ 1 %	2,5 - 5%
Drugo Sestavine (>20%)		
CAS: 1317-65-3 EINECS: 215-279-6 REACH: 1	Apnenec (Kalcijev karbonat) Sestavljajo ga: 471-34-1 Kalcijev karbonat (> 90%); 16389-88-1 Kalcij/Magnezij karbonat (0 - 10%); 14808-60-7 Kremen (SiO ₂) (0 - 10%); 37244-96-5 Glinenec (0 - 5%); 12001-26-2 Sljuda - Kalijev aluminijev silikat (0 - 5%)	50 - < 100%

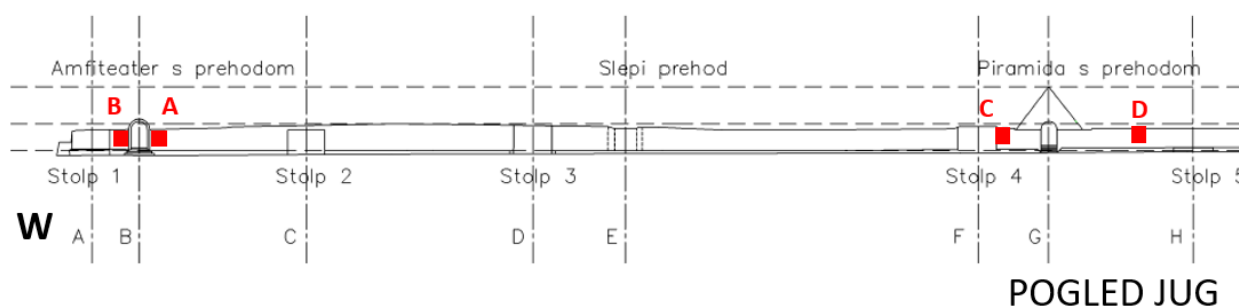
Prvotna ocena izvajalca injektiranja Gras d.o.o. je bila do 100 kg na 1 m³ zidovine.

5 PRESKUSNA POLJA

V cilju določanja referenčnih vrednosti za hitrosti dobljene z metodo s kladivom smo na štirih mestih izvajali preiskave na rimskem zidu na Mirju ter dve preiskavi na lokaciji Severnih Emonskih vrat. Slednje lokacije so izbrane, ker je razvidna morfologija zidu (polno zapolnjen zid) in bi nam prav te vrednosti lahko poslužile kot referenčne vrednosti za dobro injektiran zid.



Slika 11: Pozicije za izvedbo nedestruktivnih preiskav na rimskem zidu na Mirju v tlorisu



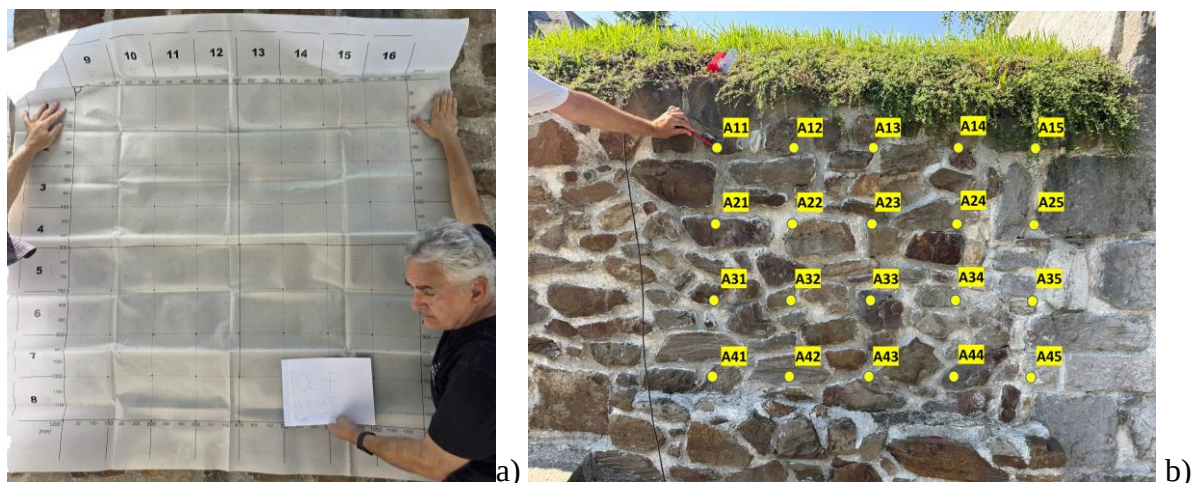
Slika 12: Pozicije za izvedbo nedestruktivnih preiskav na rimskem zidu na Mirju v pogledu s ceste

Pozicije A, B in C smo izbrali kot najslabše pozicije na zidu. Tam smo ob izvedbi prejšnjih preiskavah z georadarjem zaznali največjo votlikavost do globine 35cm. Pozicijo D smo izbrali kot primer solidno zapolnjenega zidu. Tekstura na poziciji D ustreza prevladujoči teksturi na vzhodnem delu rimeskega zidu na Mirju.

Na vsakem merskem mestu smo najprej označili poskusno polje, ki ga tvori matrika 5x4 točk. Med posameznimi točkami je razdalja 30 cm, kar pomeni, da so poskusna polja imela izmere 1,2x0,9 m².

Priprava in izgled matrike za poskusno polje A je podan na sliki (Slika 13).

Na vsaki posamezni merski točki v matriki smo izpeljali po pet preiskav (udarcev). Pri določanju referenčne vrednosti za posamezno točko smo pri vrednotenju rezultatov izločili minimalno in maksimalno vrednost. Povprečja in standardne deviacije rezultatov za posamezno točko smo nato prikazali v tabelični in grafični podobi.



Slika 13: Priprava za merska mesta a) in matrika preskuševalnih mest po posamezni poziciji

Na Severnih emonskih vratih smo preskušali dve poziciji – spodnjo, kjer je zid nekoliko širši in vsebuje originalno sredico (pozicija E) ter zgornjo z novejšo sredico iz 70-tih let prejšnjega stoletja (pozicija F).

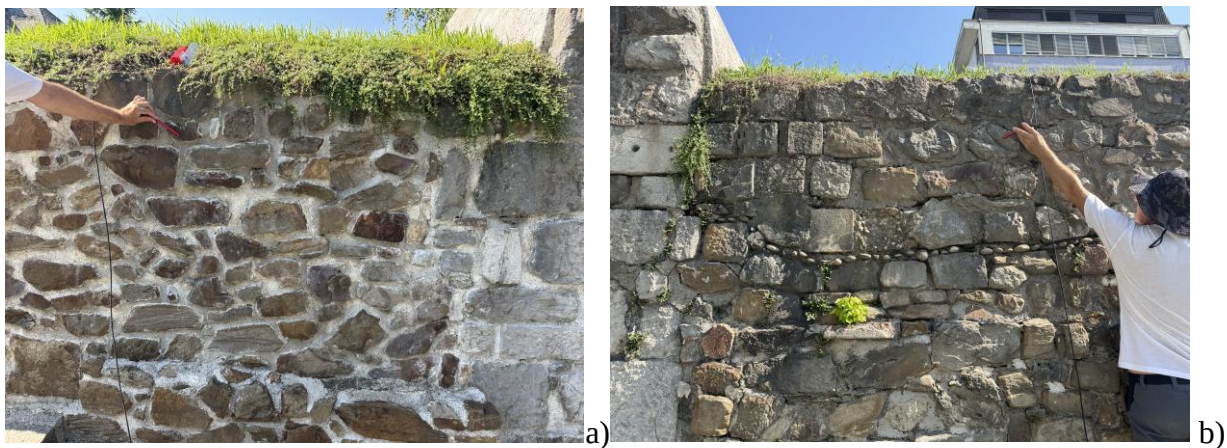


Slika 14: Preskusna mesta na poziciji Severnih emonskih vrat.

5.1 Nedestruktivne preiskave

5.1.1 ZID A

Pozicija se nahaja med stolpoma 1 in 2 oziroma na odseku B-C in sicer ob desni strani prehoda skozi Atrij gledajoč z južne strani. Zaradi višinske razlike smo preiskave naredili v zgornjem delu zidu.



Slika 15: Pozicija ZID A

5.1.2 ZID B

Pozicija se nahaja med stolpoma 1 in 2 oziroma na odseku A-B in sicer ob levi strani prehoda skozi Atrij gledajoč z južne strani. Zaradi višinske razlike smo preiskave naredili v zgornjem delu zidu.



Slika 16: Pozicija ZID B

5.1.3 ZID C

Pozicija se nahaja med stolpom št.4 in Piramido s preходом oziroma na odseku F-G in sicer ob desni strani Piramide gledajoč s severne strani. Zaradi višinske razlike smo preiskave naredili v zgornjem delu zidu.



Slika 17: Pozicija ZID C

5.1.4 ZID D

Pozicija se nahaja med Piramido s preходом in Stolpom 5 na odseku G-H. Na tem mestu ocenjujemo, da zid ima uniformno strukturo ter da ustreza splošnem stanju zidovine na odseku G-O. Preiskave smo naredili v zgornjem delu zidu.



Slika 18: Pozicija ZID D

5.1.5 ZID E

Pozicija se nahaja na ločenem delu emonskega obzidja – Severna emonska vrata. Preskušali smo spodnji del zidu, kjer je v morfologiji zidu razvidno originalno polnilo (sredica).



Slika 19: Pozicija ZID E

5.1.6 ZID F

Pozicija se nahaja na ločenem delu emonskega obzidja – Severna emonska vrata. Preskušali smo zgornji del zidu, kjer je v morfologiji zidu razvidna sredica v prevladujoči meri narejena s cementnim vezivom.



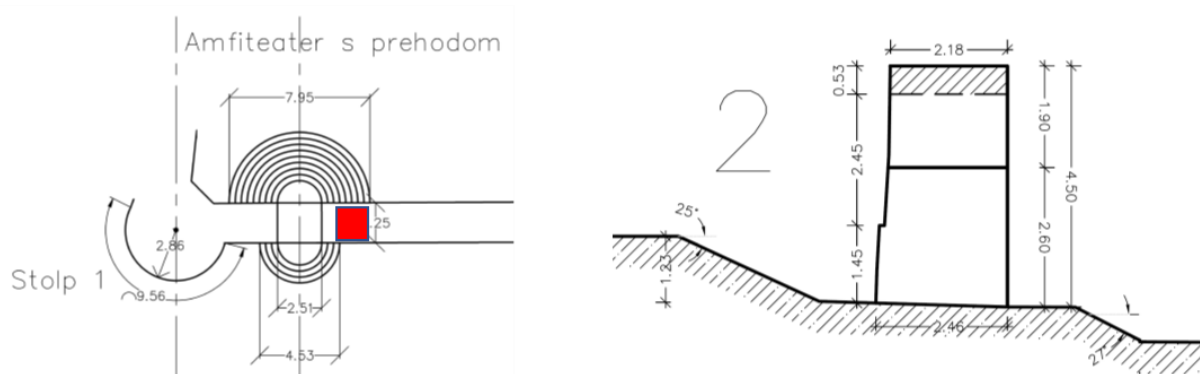
Slika 20: Pozicija ZID E

5.2 Injektiranje

Glede na že dogovorjeno količino preskusnih polj smo se na osnovi rezultatov preskusov s kladivom ter na osnovi prejšnjih rezultatov z GPR (2) odločili za dva preskusna mesta in sicer poziciji ZID A in ZID C. Injektiranje je potekalo obojestransko. Cevi so bile izvrtane do globine cca. 80cm.

5.2.1 ZID A

Pozicija se nahaja med stolpoma 1 in 2 oziroma na odseku B-C in sicer ob desni strani prehoda skozi Atrij gledajoč z južne strani. Zaradi višinske razlike nedestruktivne preiskave smo lahko izvajali le v zgornjem delu zidu. Injektiranje v širini 2m pa je narejeno po celotni višini zidu.



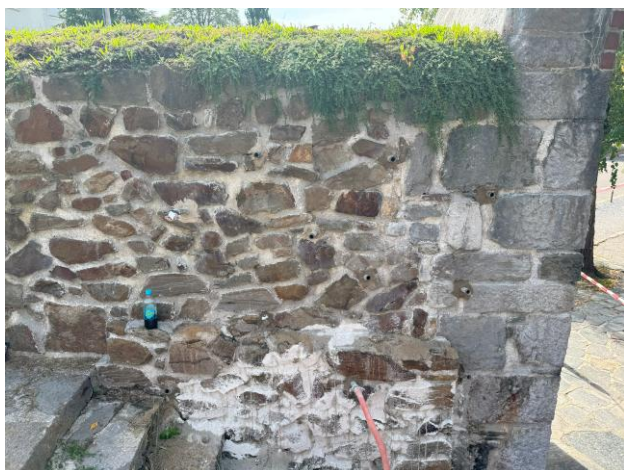
Slika 21: Pozicija injektiranja za ZID A

Volumen zidu predvidenega za injektiranje je ocenjen na 20,9 m³. Ocenjena poraba za injektibilen zid naj bi znašala 100kg/m³. Vse skupaj je bilo porabljenih 13 vreč injekcijske mase in pripravljeno 13 mešalcev povprečnega volumna 80 litrov (povzeto v Preglednica 5-1).

Preglednica 5-1. Poraba materiala za ZID A

	Masa veziva	Število mešalcev	Injekcijska masa
	[kg]		[l]
Količine	1560	13	1040

Glede na ocenjen injektirani volumen zidu ocenjujemo porabo na 75kg/m^3 . Tukaj je treba poudariti da je za časa injektiranja bilo opaženo odtekanje injekcijske mase po votlinah vzdolž zidu kar je bilo razvidno na površini zidu po končanem injektiranju (južna stran). V nadaljevanju podajamo slike za časa in po injektiranju.



a) Severna stran za časa injektiranja



b) južna stran za časa injektiranja



c) Severna stran po injektiranju

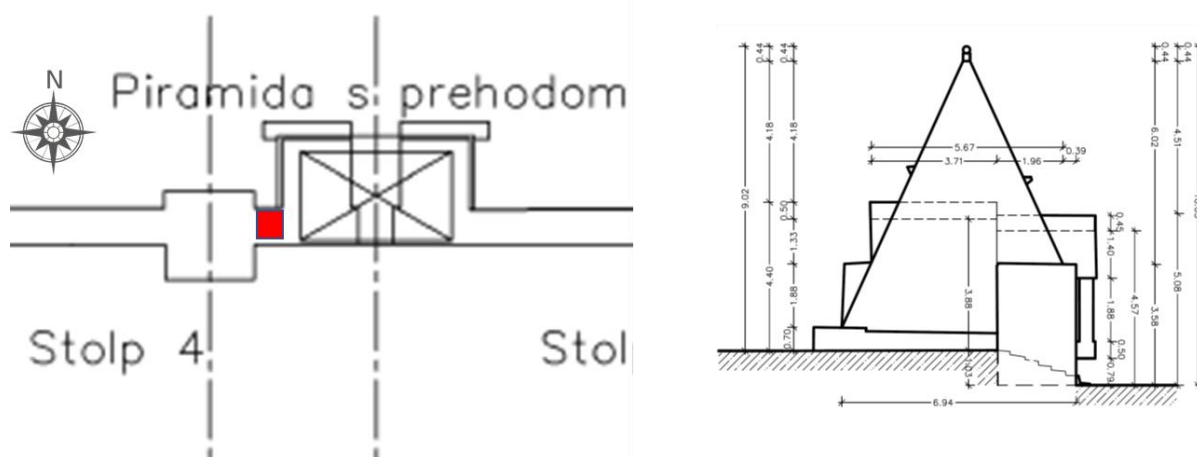


d) južna stran po injektiranju

Slika 22: ZID A za časa injektiranja in po končanem injektiranju

5.2.2 ZID C

Pozicija se nahaja med stolpom št.4 in Piramido s preходом oziroma na odseku F-G in sicer ob desni strani Piramide gledajoč s severne strani. Zaradi višinske razlike nedestruktivne preiskave smo lahko izvajali le v zgornjem delu zidu. Injektiranje v širini 2m pa je narejeno po celotni višini zidu.



Slika 23: Pozicija injektiranja za ZID C

Volumen zidu predvidenega za injektiranje je ocenjen na $16,5 \text{ m}^3$. Ocenjena poraba za injektibilen zid naj bi znašala 100 kg/m^3 . Vse skupaj je bilo porabljenih 14 vreč injekcijske mase in pripravljeno 14 mešalcev povprečnega volumna 80 litrov (povzeto v Preglednica 5-1).

Preglednica 5-2. Poraba materiala za ZID A

	Masa veziva	Število mešalcev	Injekcijska masa
	[kg]		[l]
Količine	1680	14	1120

Glede na ocenjen injektirani volumen zidu ocenjujemo porabo na 102 kg/m^3 . Za časa injektiranja je prihajalo do odtekanja mase po votlikavem zidu. Sledi mase so pritekale celo v Stolp 4 te na južni strani vse do Piramide. Na sliki (Slika 24-c) je razvidno odtekanje injekcijske mase do Piramide. Lice zida rdeče označeno je že odstopilo in smo že v prejšnjem poročilu (2) opozorili, da je to najbolj nevaren del zidu.

V nadaljevanju podajamo slike za časa in po injektiranju.



a) Severna stran za časa injektiranja



b) južna stran za časa injektiranja



du

c) Južna stran po injektiranju

Slika 24: ZID C za časa injektiranja in po končanem injektiranju

6 REZULTATI PREISKAV Z METODO KLADIVA

6.1 Pred injektiranjem

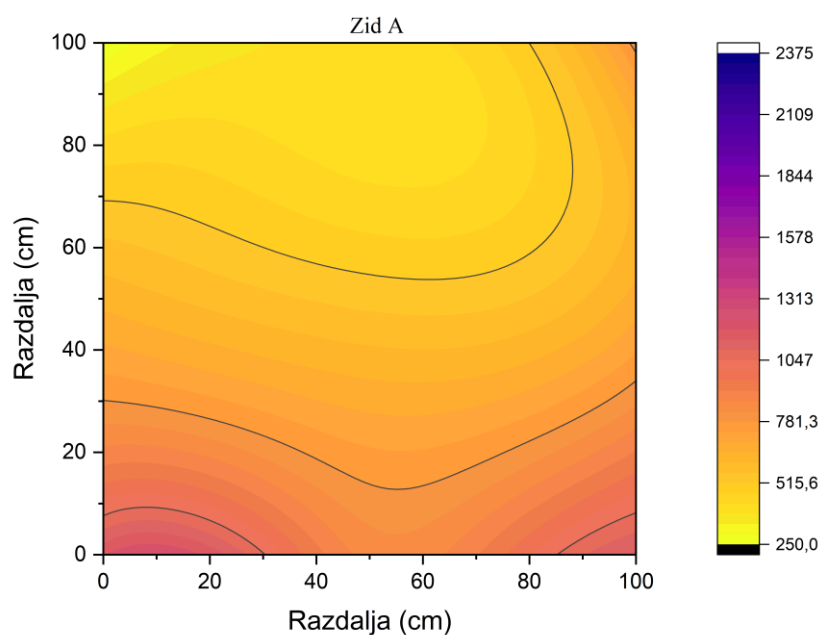
Za vsako preskusno mesto so podane najprej srednje vrednosti hitrosti. Tabelarično so podane povprečne vrednosti v posamezni točki za hitrosti (mm/s) in njihove standardne deviacije dobljene ob upoštevanju treh srednjih rezultatov. Na koncu podajamo grafični prikaz homogenosti zidov po poskusnem polju.

6.1.1 ZID A

Srednja vrednost hitrosti za celotno polje je znašala 683 mm/s s C.O.V 39%.

Preglednica 6-1. Rezultati v posamezni točki za pozicijo ZID A – pred injektiranjem

Pov.	st. dev.	Pov.	st. dev.	Pov.	st. dev.	Pov.	st. dev.	Pov.	st. dev.
1173,26 ±	25,16	1112,55 ±	48,50	851,82 ±	32,55	953,01 ±	62,87	1142,10 ±	36,74
753,50 ±	30,33	702,61 ±	28,41	654,99 ±	10,68	669,26 ±	16,86	786,97 ±	21,25
531,30 ±	20,64	494,54 ±	8,93	452,16 ±	5,01	468,66 ±	16,97	616,49 ±	17,91
251,46 ±	3,82	372,83 ±	18,26	399,38 ±	7,66	477,42 ±	22,65	805,24 ±	90,46



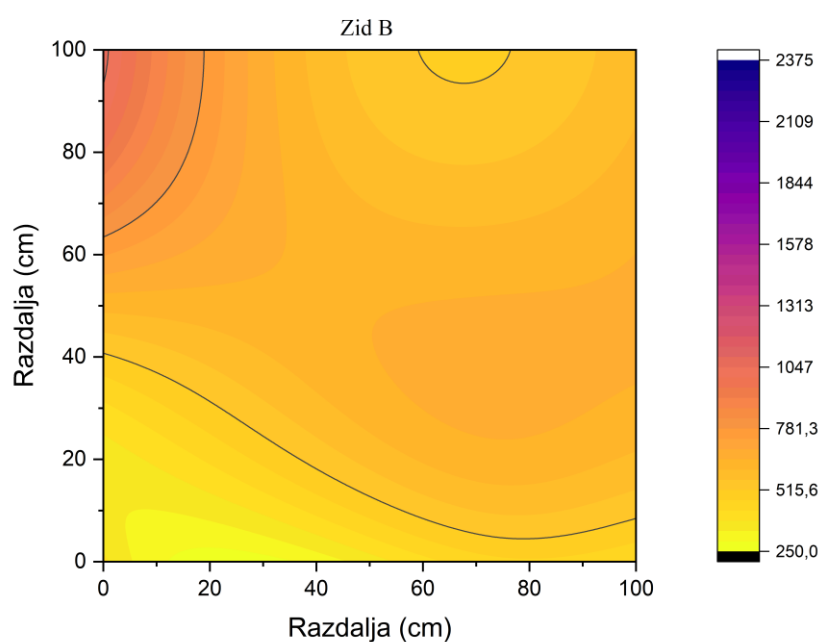
Slika 25: Srednje vrednosti hitrosti (mm/s) za preskusno polje ZID A – pred injektiranjem

6.1.2 ZID B

Srednja vrednost hitrosti za celotno polje je znašala 733 mm/s s C.O.V 42%.

Preglednica 6-2. Rezultati v posamezni točki za pozicijo ZID B

Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.
1316,33	±	92,96	836,58	±	20,33	1059,11	±	94,82	1535,71	±	74,14	1052,63	±	22,23
958,40	±	25,89	625,45	±	57,85	554,98	±	24,53	654,16	±	11,97	723,91	±	16,67
507,87	±	16,99	619,60	±	12,23	669,09	±	62,32	656,49	±	18,37	814,39	±	82,37
394,86	±	6,17	300,28	±	7,92	460,71	±	12,37	398,89	±	11,06	523,43	±	16,58



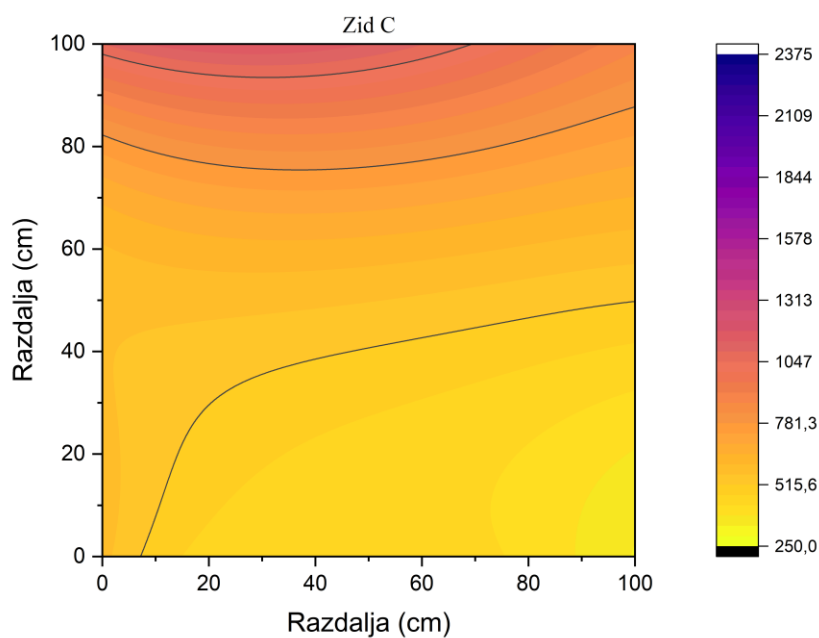
Slika 26: Srednje vrednosti hitrosti (mm/s) za preskusno polje ZID B

6.1.3 ZID C

Srednja vrednost hitrosti za celotno polje je znašala 752 mm/s s C.O.V 52%.

Preglednica 6-3. Rezultati v posamezni točki za pozicijo ZID C – pred injektiranjem

Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.
1677,07	±	209,58	1662,37	±	65,12	1321,04	±	76,27	949,23	±	31,50	850,92	±	33,66
753,50	±	56,92	837,66	±	34,33	778,99	±	23,36	708,17	±	13,77	847,29	±	30,27
563,32	±	9,07	523,54	±	12,63	489,38	±	34,00	452,39	±	46,34	461,70	±	8,05
576,41	±	10,10	429,36	±	34,81	428,29	±	27,86	291,86	±	4,15	438,78	±	21,60



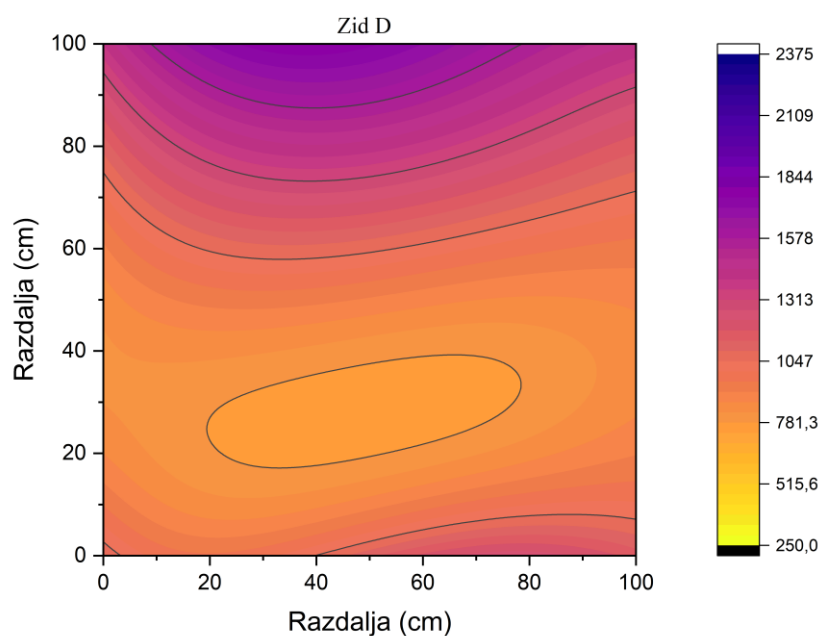
Slika 27: Srednje vrednosti hitrosti (mm/s) za preskusno polje ZID C – pred injektiranjem

6.1.4 ZID D

Srednja vrednost hitrosti za celotno polje je znašala 1180 mm/s s C.O.V 35%.

Preglednica 6-4. Rezultati v posamezni točki za pozicijo ZID D

Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.
1659,85	±	138,53	1893,77	±	57,33	1702,71	±	282,34	1737,14	±	234,37	1765,89	±	#####
1038,12	±	24,49	1348,45	±	38,14	1219,15	±	77,53	1042,86	±	17,71	1280,79	±	54,51
767,34	±	46,13	767,19	±	25,98	741,62	±	43,66	823,38	±	14,12	722,94	±	50,39
1018,02	±	30,19	967,88	±	48,13	1182,38	±	133,83	1008,62	±	98,59	915,71	±	62,63



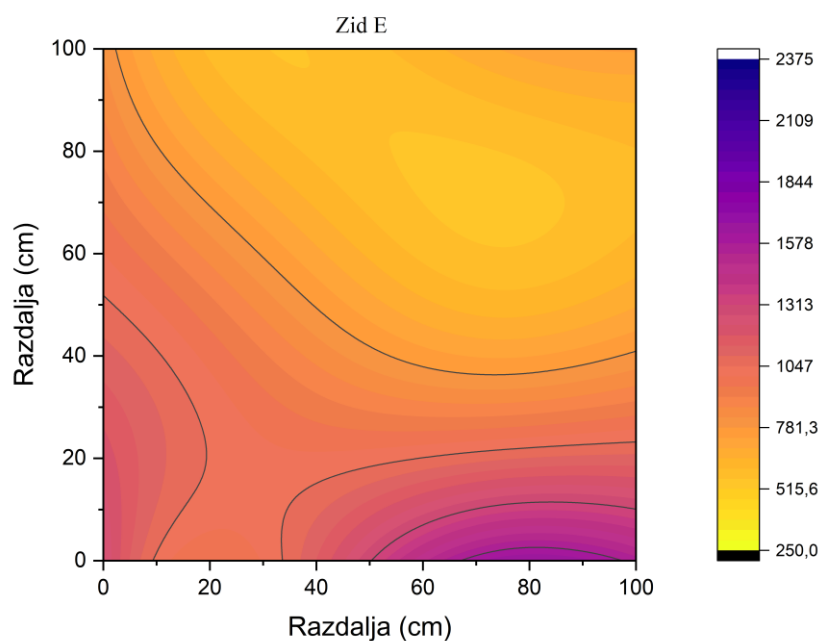
Slika 28: Srednje vrednosti hitrosti (mm/s) za preskusno polje ZID D

6.1.5 ZID E

Srednja vrednost hitrosti za celotno polje je znašala 913 mm/s s C.O.V 36%.

Preglednica 6-5. Rezultati v posamezni točki za pozicijo ZID E

Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.
776,09	±	57,22	634,10	±	12,67	946,32	±	112,98	1033,29	±	29,28	556,07	±	38,57
900,66	±	63,27	602,53	±	13,78	560,88	±	18,59	611,43	±	31,98	429,02	±	8,12
1110,07	±	63,51	871,00	±	73,40	731,18	±	42,61	834,11	±	61,39	745,30	±	41,26
1274,43	±	32,84	1098,46	±	7,76	1648,96	±	133,75	1427,29	±	42,69	1469,14	±	84,84



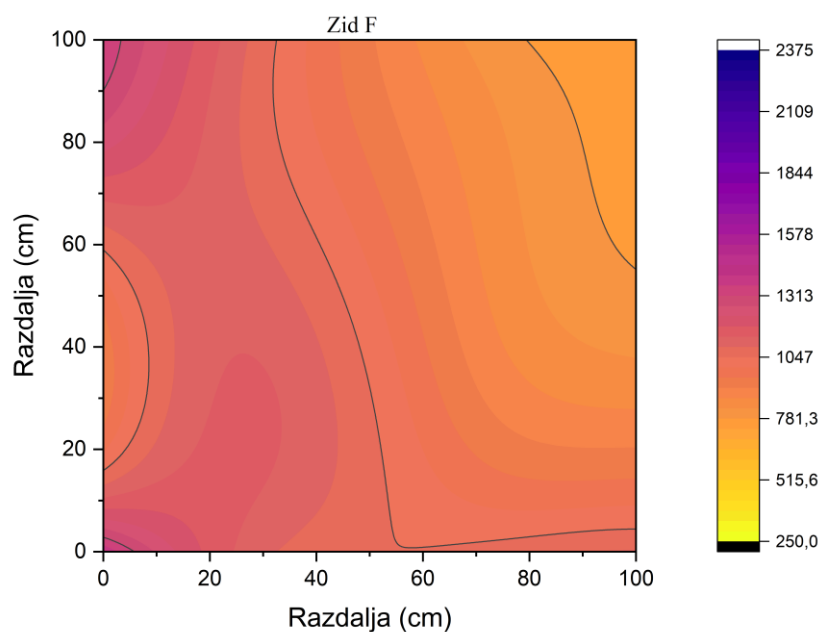
Slika 29: Srednje vrednosti hitrosti (mm/s) za preskusno polje ZID E

6.1.6 ZID F

Srednja vrednost hitrosti za celotno polje je znašala 976 mm/s s C.O.V 9%.

Preglednica 6-6. Rezultati v posamezni točki za pozicijo ZID F

Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.
1241,43	±	93,46	1060,01	±	55,92	717,76	±	19,95	816,24	±	27,29	1348,04	±	47,61
1240,77	±	17,56	1022,92	±	67,08	829,92	±	38,27	751,28	±	21,81	829,44	±	6,43
938,87	±	105,61	1108,23	±	43,91	872,21	±	36,74	810,44	±	40,33	620,03	±	61,03
1402,32	±	118,53	1074,02	±	37,35	1069,78	±	65,93	1076,37	±	48,03	694,97	±	19,43



Slika 30: Srednje vrednosti hitrosti (mm/s) za preskusno polje ZID F

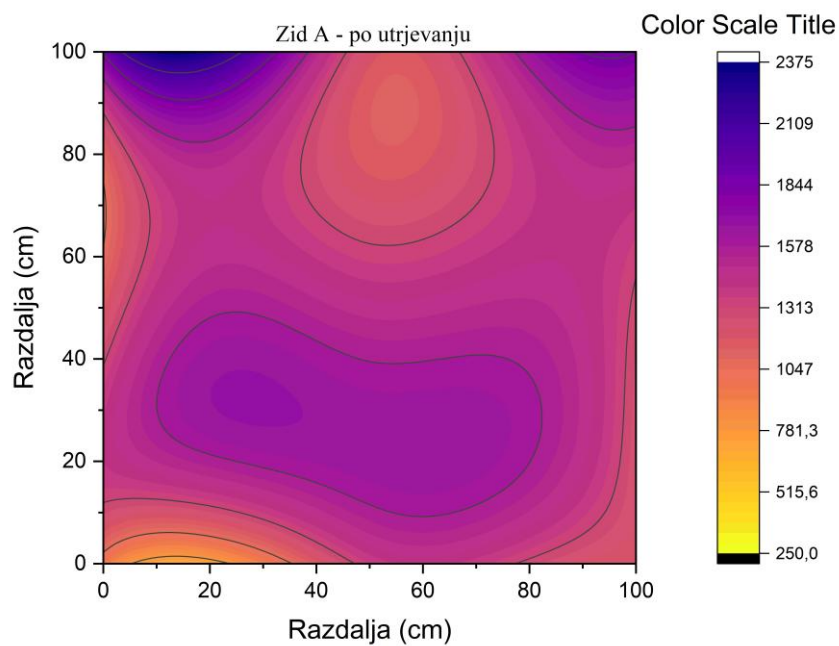
6.2 Po injektiranju

6.2.1 ZID A

Srednja vrednost hitrosti za celotno polje je znašala 1413 mm/s s C.O.V 18%.

Preglednica 6-7. Rezultati v posamezni točki za pozicijo ZID A – po injektiranju

Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.
1871,93	±	81,47	2146,05	±	136	1210,91	±	37,661	1518,062	±	30,57	1837,878	±	27,44
1025,87	±	57,14	1440,17	±	30,7	1265,436	±	37,235	1373,611	±	51,72	1376,244	±	44,66
1367,32	±	40,83	1679,37	±	102	1625,076	±	30,795	1615,771	±	90,44	1252,661	±	20,86
958,52	±	170	804,662	±	22,6	1355,711	±	111	1334,52	±	60,46	1199,293	±	27,18



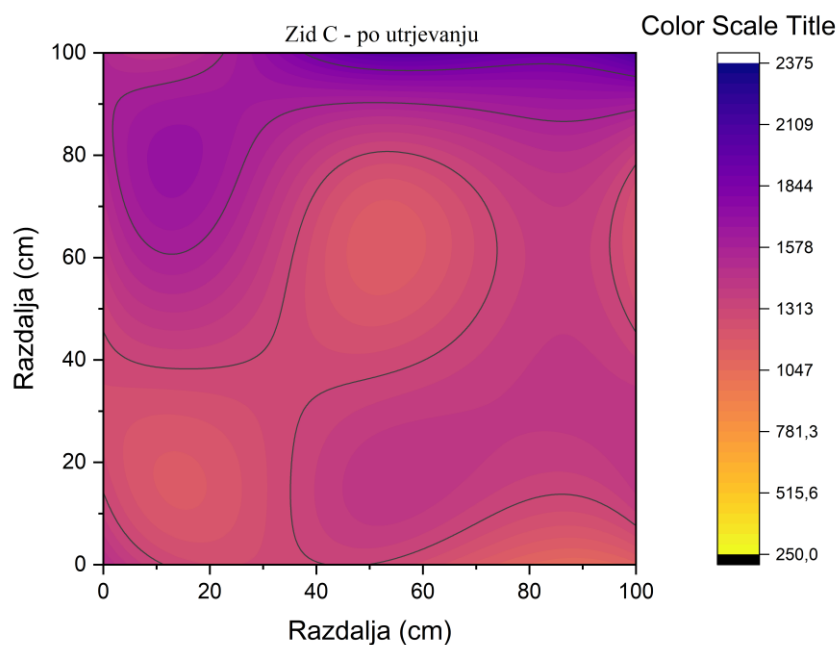
Slika 31: Srednje vrednosti hitrosti (mm/s) za preskusno polje ZID A – po injektiranju

6.2.2 ZID C

Srednja vrednost hitrosti za celotno polje je znašala 1444 mm/s s C.O.V 18%.

Preglednica 6-8. Rezultati v posamezni točki za pozicijo ZID C – po injektiranju

Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.	Pov.		st. dev.
1536,18	±	32,93	1617,33	±	43,4	2002,882	±	194,01	1936,785	±	180,6	2089,611	±	143,5
1453,18	±	91,78	1525,48	±	38,6	1158,799	±	37,44	1330,177	±	23,51	1209,722	±	57,25
1263,45	±	48,64	1275,19	±	30,4	1339,096	±	43,285	1400,837	±	67,77	1411,251	±	136,8
1497,30	±	41,85	1267,81	±	34	1311,201	±	20,989	1122,749	±	29,49	1121,006	±	72,84



Slika 32: Srednje vrednosti hitrosti (mm/s) za preskusno polje ZID C – po injektiranju

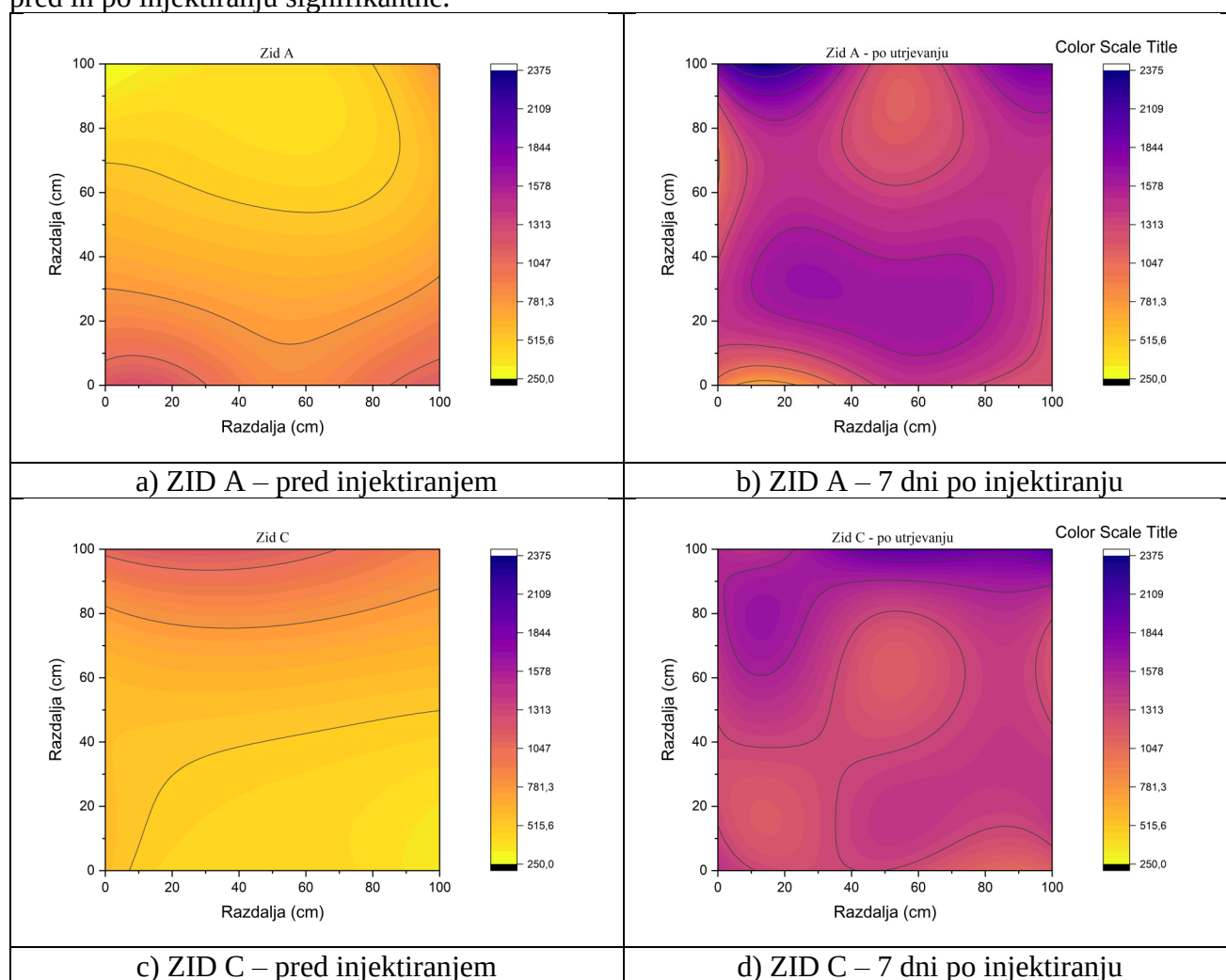
7 SKLEP

V okviru naloge smo si zadali naslednje cilje:

- Ugotoviti ali so zidovi injektibilni in
- Pridobiti zanesljivo metodo za določanje votlin pri masivnih zidovih.

Pri preskusnem mestu ZID A smo imeli porabo veziva 75 kg/m^3 , pri preskusnem mestu ZID C pa 102 kg/m^3 . Izkušnje kažejo, da je pri manj poroznih zidovih poraba znaša $60\text{-}100 \text{ kg/m}^3$ ter $120\text{-}150 \text{ kg/m}^3$ pri močno poroznih zidovih. Glede na te kriterije bi lahko rekli, da je rimski zid na preskušanih mestih manj porozen vendar še zmeraj injektibilen.

Vprašanje glede tovrstnega kriterija ocenjevanja je na mestu, če upoštevamo, da je prišlo do odtekanja injekcijske mase po povezanih votlinah v zidovini. Iz tega razloga za merodajno metodo je smiselno upoštevati rezultate dobljene z metodo kladiva. Vendar tukaj pa potrebujemo čas, da bi podali končno oceno glede učinkovitosti injektiranja. Preiskave, katere smo naredili po injektiranju, so bile prekmalu narejene (le 7 dni po injektiranju) in zaradi prisotnosti vlage nekoliko nezanesljive, vendar so razlike pred in po injektiranju signifikantne.



Slika 33: Povzetek rezultatov metode s kladivom glede učinkovitosti injektiranja – meritve po enem tednu

Ko primerjamo rezultate s kladivom po posameznih pozicijah ugotavljamo, da so pozicije A, B in C bistveno slabše (manjše hitrosti) kot pozicije D, E in F. To pomeni, da je vzhodni del rimskega zidu na Mirju v bistveno slabšem stanju.

Ko govorimo o neki »referenčni« vrednosti hitrosti prehoda dobre sestave zidu po posamezni poziciji, ne moremo mimo dejstva, da že v posameznem preskušanem polju imamo velika odstopanja rezultatov glede na posamezne preskušane točke. Tovrstna odstopanja pa so še večja, če upoštevamo povprečno referenčno vrednost hitrosti po posamezni poziciji (Preglednica 7-1). Zato je rezultate metode s kladivom smiselno vedno prikazovati v celotnem preskuševalnem polju (že zaradi orientacije kamnov lahko pride do večjih odstopanj).

Preglednica 7-1: Povprečne vrednosti za hitrosti in koeficient variacije za posamezna preskusna mesta

	ZID A	ZID B	ZID C	ZID D	ZID E	ZID F	ZID A in.	ZID C in.
[mm/s]	683	733	752	1180	913	976	1413	1444
C.O.V.	39%	42%	52%	35%	36%	9%	18%	18%

Na končno oceno glede učinkovitosti injektiranja je smiselno počakati še vsaj pol leta, ko bo injekcijska masa (na bazi apna) končno nekoliko vezala in ko bomo ponovili preiskave z metodo kladiva ter dobili bolj zanesljive rezultate. Končni rezultati bodo del zaključnega poročila.

V Ljubljani dne, 29/9/2025

prof. dr. Vlatko Bosiljkov, udig.

8 VIRI

1. BINDA, Luigia, ZANZI, Luigi, RODRIGUEZ SANTIAGO, Jesus, KNUPFER, Beatriz, JOHANSSON, Bernt, MODENA, Claudio, DA PORTO, Francesca, MARCHISIO, Mario, GRAVINA, Francesco, FALCI, Massimo, GALVEZ RUIS, Jaime Carlos, TOMAŽEVIČ, Miha, BOSILJKOV, Vlatko, HENNEN, Insa Christiane, LORENTE TOLEDO, D. Enrique, ZAJC, Andrej, DELLI PAOLI, Sandro, DRDÁCKÝ, Miloš, VALEK, Jan, MAIERHOFER, Christiane (urednik), KÖPP, Christian (urednik). **Onsiteformasonry project : On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings** : EUR 21696 EN. Brussels: European Commision, Directorate-General for Research, Directorate "Environment", 2006. 141 str., ilustr. ISBN 92-894-9601-0. [COBISS.SI-ID 1226855]
2. BOSILJKOV, Vlatko, PADOVNIK, Andreja, ANTOLINC, David, TURK, Tilen, ŠTUKOVNIK, Petra, ČEPON, Franci. **Materialne in konstrukcijske raziskave rimskega zidu s predlogi za konstrukcijsko sanacijo** : poročilo o nalogah in preiskavah v okviru projekta. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij, 2023. 110 str., pril., ilustr. [COBISS.SI-ID 141106435]
3. BOSILJKOV, Vlatko, TOMAŽEVIČ, Miha, BOHINC, Uroš, LESKOVAR, Iztok. On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings. Deliverable D10.2 & 10.4, **Report on the evaluation at pilot sites (Report for owners of historic buildings) : pilot site: Pišce / Slovenia : revised report**. Ljubljana: Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2004. 178 f., ilustr. <http://www.onsiteformasonry.bam.de>. [COBISS.SI-ID 1070951]