

# POSLEDICE POTRESA NA KAMNITIH ZIDANIH HIŠAH: KAJ SMO SE NAUČILI OD POTRESA

## Stone-Masonry Houses and the Earthquake: Lessons Learned from the Bovec Earthquake

Miha Tomaževič\*, Iztok Klemenc\*\*, Marjana Lutman\*\*

UDK 699.841

### Povzetek

12. aprila 1998 je Zgornje Posočje prizadel potres, katerega jakost je bila ocenjena z VII. do VIII. stopnjo po EMS lestvici. Čeprav se nobena hiša ni porušila, je bilo med potresom več kot 300 hiš tako poškodovanih, da niso bile več uporabne. Območje, ki so ga leta 1976 prizadeli potresi, je bilo pozneje delno obnovljeno, zato je potres leta 1998 omogočil analizo učinkovitosti metod za protipotresno utrjevanje, ki so bile uporabljene leta 1976. Ugotovljeno je bilo, da so hiše, pri katerih so bili ukrepi dosledno izpeljani, prestale potres na Bovškem brez poškodb. Na podlagi rezultatov terenskih preiskav potresne odpornosti neinjektiranega in z injektiranjem utrjenega kamnitega zidovja je bila analizirana potresna odpornost tipičnih hiš. S primerjavo ugotovljenih poškodb in izračunane potrebne odpornosti hiš je bila ocenjena velikost učinkovitega pospeška tal med potresom. Ugotovljeno je bilo, da ustrezno obnašanje kamnitih hiš med potresom pričakovane jakosti zagotavljata samo celovito obnašanje konstrukcije, ki se doseže s povezovanjem z vezmi, in utrditev kamnitega zidovja z injektiranjem.

### Abstract

On April 12, 1998, the region of Upper Posočje was struck by an earthquake with an estimated epicentral intensity of VII–VIII on the EMS scale. Although no building collapsed, 300 houses were severely damaged and found unusable. Since the same area suffered from Friuli earthquakes in 1976, the effectiveness of strengthening methods applied in 1976 is analyzed. On the basis of the results of in-situ lateral resistance tests of existing and cement-grouted masonry walls typical for the region, the seismic resistance of typical buildings was assessed. By correlating the observed degree of damage and seismic resistance of buildings, the values of effective ground accelerations developed during the 1998 earthquake were estimated. It was found that adequate seismic behaviour of stone-masonry buildings during earthquakes of expected intensity can be ensured by creating the structural integrity of buildings with the help of steel ties and simultaneously by strengthening the walls with cement grouting.

## Uvod

Potres, ki je 12. aprila 1998 prizadel Zgornje Posočje, po svoji jakosti ne spada med najmočnejše, ki jih lahko pri nas pričakujemo. Magnituda potresa  $M$  je bila ocenjena na 5,8, jakost potresa po novi evropski makroseizmični lestvici pa v nadzariščnem območju ni preseгла VII. do VIII. stopnje, čeprav so potres čutili na celotnem območju Slovenije, večjem delu Avstrije, v severni Italiji in celo na Bavarskem. Po novi evropski makroseizmični lestvici (EMS), ki se uveljavlja tudi pri nas, potres VII. stopnje že povzroči hude poškodbe na manjšem številu tradicionalno grajenih zidanih stavb, medtem ko so poškodbe med potresom VIII. stopnje v nekaterih primerih lahko celo zelo hude. Večina dobro grajenih stavb pa med potresi VII. in VIII. stopnje še ne bi smela utrpeti hujših poškodb.

V prvih dneh po potresu je posebna državna komisija, ki je za ugotavljanje uporabnosti po potresu poškodovanih objektov organizirala Uprava Republike Slovenije za zaščito in reševanje, na podlagi takojšnjih prijav lastnikov pregledala skoraj tisoč objektov, med katerimi so bili nekateri kulturno-zgodovinski spomeniki. Komisija je takoj po potresu načelno pregledala le hiše, v katerih so med potresom prebivali ljudje. 311 objektov je zaradi hujših poškodb uvrstila med začasno neuporabne in pri tem ugotovila, da sta bili dve tretjini poškodovani le v tolikšni meri, da je bila sanacija načelno ekonomsko še upravičena, medtem ko je bila preostala tretjina huje poškodovana (poročilo, 1998). Pri poznejšem ugotavljanju škode pa so bili zajeti vsi objekti, na katerih so bile prijavljene poškodbe, nastale tudi med popotresnimi sunki, tudi gospodarska poslopja. Ta ocena je pokazala, da bo treba med popotresno obnovo Posočja tako ali drugače popraviti več kot 3800 objektov (ocena, 1998).

Širše območje Posočja so leta 1976 prizadeli tudi potresi z nadzarišči v Furlaniji. Po dostopnih podatkih je bilo po vrsti treh potresov maja in septembra poškodovanih 6175 objektov, med njimi 1709 tako, da jih je bilo treba porušiti in zgraditi na novo, medtem ko je bilo 4476 saniranih in protipotresno utrjenih (Ladava, 1982).

Tudi po svetu se redkokdaj zgodi, da isto območje prizadene dva potresa v razmeroma kratkem obdobju 22 let. Še redkeje pa se zgodi, da so ponovnemu potresu izpostavljene sanirane oziroma protipotresno utrjene stavbe. Posledice potresov leta 1976 sicer niso bile posebno hude na območju, kjer je bilo največ škode leta 1998. Na območju, ki ga je potres prizadel leta 1998, zato niti ni bilo veliko stavb, ki bi bile zelo poškodovane leta 1976 in pozneje utrjene v skladu z vsemi, takrat priporočenimi ukrepi. Kljub temu so posledice ponovljenega potresa leta 1998 lepa priložnost za analizo učinkovitosti leta 1976 priporočenih ukrepov za protipotresno utrditev. Ti ukrepi se namreč z večjimi ali manjšimi spremembami uporabljajo še danes.

Ponovljeni potres je tudi lepa priložnost, da raziščemo razloge za slabo obnašanje objektov, ugotovimo nekatere napake, narejene po letu 1976, in se poskušamo ponavljanju napak izogniti med sedanjo popotresno obnovo. Na pobudo Zavoda za gradbeništvo Slovenije (ZAG) je bil zato že takoj po potresu pripravljen predlog programa raziskovalnega projekta z naslovom Vpliv potresa 12. aprila 1998 na Bovškem na stavbe, ljudi in okolje, pri katerem poleg ZAG sodelujeta še Geografski inštitut Antona Melika pri Znanstveno-raziskovalnem centru SAZU in Oddelek za psihologijo Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani. Projekt poteka v okviru ciljnega raziskovalnega programa Varstvo pred naravnimi in drugimi nesrečami, financirajo ga pa ministrstva za obrambo, znanost in tehnologijo ter okolje in prostor. V

\* prof. dr., Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana, Dimičeva 12

\*\* mag., Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana, Dimičeva 12

tem prispevku bomo predstavili nekaj ugotovitev raziskav potresne odpornosti kamnitih zidanih hiš na prizadetem območju.

## Tipologija stavb in poškodbe po potresu

Večina hiš v Posočju je sezidana iz neobdelanega kamna. Kakovost zidovja je praviloma slaba: tipičen zid je sezidan iz dveh zunanjih slojev, v katerih so večji kamni, vmes pa je zasutje iz manjših kosov kamna in odpadnega drobirja. Vežni kamni, ki povezujejo oba sloja zidu, so redki. Za zidanje je uporabljena malta, v kateri je le malo apna. Kakovost zidovja javnih objektov v mestih je boljša kot kakovost zidovja hiš na podeželju. Kakovost zidovja je slabša tudi pri tistih hišah, ki so bile med prvo svetovno vojno porušene in po njej ponovno sezidane. Hiše imajo ponavadi največ dve do tri nadstropja. Stropi in okenske preklade so tradicionalno leseni, vendar so jih lastniki v nekaterih primerih med poznejšo adaptacijo zamenjali z masivnimi. Zidne vezi so bile le pri manjšem številu hiš vgrajene šele po letu 1976. Leseno ostrešje je prekrito z opečnimi strešniki, ki so včasih položeni v malto. Temeljev takšne hiše ponavadi nimajo, temeljni zid pa je sezidan slabše kot zidovje nad terenom.

Veliko število votlin in nepovezanost posameznih slojev sta bila osnovna razloga za razslojevanje in razpadanje kamnitega zidovja, neustrezna povezanost zidovja pa za ločevanje zidov na navpičnih stikih in ob vogalih, pa tudi za porušitev zidov, pravokotnih na smer delovanja potresa.



Slika 1. Bovec: delno porušen zatrep tipične kamnite hiše (foto: M. Tomažević)

Figure 1. Bovec: partially collapsed gable wall of a typical stone-masonry house (photo: M. Tomažević)

Poškodbe kamnitih hiš lahko razvrstimo v naslednje značilne kategorije:

- vodoravne razpoke vzdolž stikov med zidovi in stropi, razpoke vzdolž zazidanih vratnih in okenskih odprtin
- navpične razpoke v vogalih in stičiščih zidov, ločevanje zidov, porušitev zatrepov
- razpoke v nosilnih zidovih, izpadanje delov zidov, s katerim so bile zazidane odprtine, izpadanje zidovja v območju preklad in v vogalih
- hude poškodbe zidov, delna porušitev vogalov, razpadanje, oziroma razslojevanje zidovja.

Nekaj primerov poškodb je predstavljenih na slikah 1, 2 in 3. Na podlagi analize poškodb lahko ugotovimo, da so bile vzrok slabega obnašanja med potresom naslednje glavne pomanjkljivosti:

- nezadostna povezanost zidov konstrukcije, kar je povzročilo ločevanje zidov ob vogalih in na stikih, pa tudi porušitev zatrepov ali zidov, pravokotnih na delovanje potresnih sil
- neustrezna zasnova konstrukcije, predvsem neenakomerna razporeditev zidov v tlorisu, pa tudi po višini stavbe, premajhno razmerje med površino zidov in etažno tlorisno površino, to je povzročilo koncentracijo poškodb in delno ali celotno porušitev stavbe
- slaba kakovost oziroma premajhna odpornost zidovja, ki je bila razlog za nastanek razpok, razpadanje zidovja in porušitev.

Temelji načelno niso bili vzrok za slabo obnašanje stavb. To je bilo včasih pripisati neustreznim tlom, kjer so se seizmični vplivi ojačili, ali pa so se tla med potresom porušila (zdrsi brežin).



Slika 2. Drežniške Ravne: poškodovan vogal in razpadel kamniti zid v območju preklade (foto: M. Tomažević)

Figure 2. Drežniške Ravne: damage to corner and disintegrated stone-masonry wall in the lintel zone (photo: M. Tomažević)



Slika 3. Drežniške Ravne: strizne razpoke v zidovju kamnite hiše, kjer so bili leseni stropi zamenjani z armiranobetonskimi ploščami, zidovje pa ni bilo injektirano (foto: M. Tomažević)

Figure 3. Drežniške Ravne: shear cracks in stone-masonry walls of a house whose wooden floors had been replaced with reinforced-concrete slabs, but the walls had not been cement-grouted (photo: M. Tomažević)

## Ukrepi za utrditev hiš po potresu 1976 in njihova učinkovitost med potresom 1998

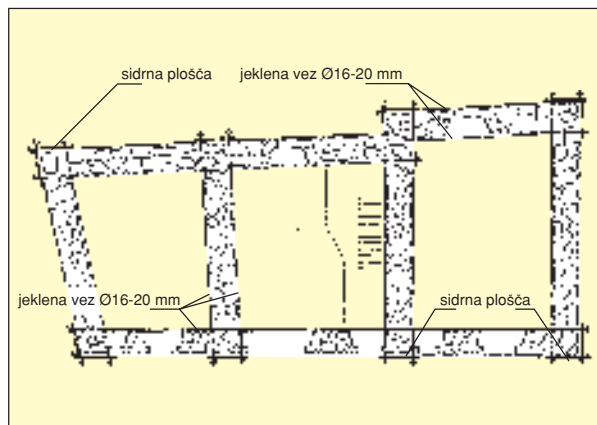
Ukrepi in priporočila za protipotresno utrjevanje hiš, ki so jih poškodovali potresi leta 1976 in ki jih je na podlagi izkušenj in eksperimentalnih raziskav pripravil takratni Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij (Boštjančič in sod., 1976, Turnšek in sod., 1978), uveljavil pa Sekretariat za urbanizem (Ladava, 1982), so temeljili na izpolnjevanju naslednjih tehničnih meril:

- zidovi morajo biti ustrezno povezani; povezovalni ukrepi morajo zagotoviti delovanje stropov kot togih diafragm v svoji ravnini, zato morajo biti stropi utrjeni in dobro sidrani v zidovje, s čimer se preprečijo čezmerne vibracije zidov pravokotno na ravnino
- konstrukcijski zidovi morajo biti enakomerno razporejeni v obeh pravokotnih smereh stavbe; število zidov in njihova odpornost morata zagotoviti prevzem pričakovanih potresnih sil; če je za zagotavljanje potresne odpornosti treba vgraditi dodatne elemente, je treba poskrbeti za njihovo enakomerno razporeditev po tlorisu in višini stavbe; izogibati se je torzijskim vplivom, ki nastanejo zaradi koncentracije togosti in nosilnosti v posameznem delu stavbe
- temelji morajo biti sposobni prevzeti in prenesti povečane obremenitve, nastale zaradi povečane nosilnosti zidov, v temeljna tla.

Ta merila in priporočila so bila skupaj z opisom tehničnih rešitev z uradnim dokumentom, ki ga je izdala vlada dežele Furlanije–Julijske Krajine, po potresih leta 1976 uveljavljena tudi v Italiji (Raccomandazioni, 1977).

Za zagotovitev celovitosti konstrukcije in sodelovanja zidov med potresom se leseni stropi bodisi zamenjajo z monolitnimi ploščami, sidranimi v podporno zidovje, bodisi se zidovje poveže z jeklenimi zidnimi vezmi, leseni stropniki pa sidrajo v zidove in dodatno utrdijo z diagonalnimi vezmi – predvsem pri velikih razpetinah. Jeklne vezi se praviloma vgradijo na obeh straneh zidov, navadno tik pod stropom (slika 4). Za povezovanje se uporablja navadno betonsko jeklo, katerega dimenzije in potrebnost število palic se načelno določijo z računom, sicer pa se upoštevajo izkustvena pravila. Palice vezi imajo na koncih vrezane navoje, tako da se po vstavitvi z maticami sidrajo na jeklene podložne plošče, vgrajene na vogalih in ob stikih zidov.

Za utrjevanje kamnitega in mešanega kamnito-opečnega zidovja je bilo doslej najbolj ustrezno sistematično injektiranje s cementno-silikatno mešanico. Injekcijska masa, ki zapolni votline v kamnitem zidovju, po strjevanju poveže dele zidu v monolitno strukturo, prepreči razpadanje in zagotovi monolitno delovanje zidu med potresom in tako poveča potresno odpornost.



Slika 4. Razporeditev zidnih vezi v tlorisu tipične kamnite hiše

Figure 4. Distribution of steel ties in the ground plan of a typical stone-masonry house

Osnovni podatki o učinkovitosti povezave zidov z jeklenimi vezmi so bili pridobljeni z raziskavami že pred potresi leta 1976 (Boštjančič in sod., 1976). Učinkovitost povezovanja so potrdile tudi novejša raziskave (Tomažević in sod., 1993): prosto podprti leseni stropi stavb z nepovezanim zidovjem ne preprečujejo ločevanja zidov, če pa se z vezmi zagotovi celovito obnašanje konstrukcije, se poveča njena potresna odpornost, še bolj pa sposobnost disipacije energije.

Med potresi leta 1976 so bile opravljene tudi indikativne raziskave, s katerimi so bile določene mehanske lastnosti injektiranega zidovja in ugotovljena stopnja povečanja odpornosti (Turnšek in sod., 1978). V letih po potresu v Posočju smo z laboratorijskimi in terenskimi preiskavami doma in v tujini dobili nove podatke (Tomažević in Sheppard, 1982, Bettio in sod., 1993, Vintzileou in Tassios, 1995). Tipične vrednosti natezne trdnosti zidu  $f_t$ , ki določa strižno odpornost, so v preglednici 1. Stopnja povečanja je odvisna od kakovosti osnovnega zidu. Če je ta slab, je stopnja povečanja visoka, če pa je zidovje dobre kakovosti, povečanje ni tako izrazito.

Učinkovitost leta 1976 predlaganih ukrepov se je še istega leta potrdila na primeru hiše v Bardu (Lusevera) v Beneški Sloveniji. Hiša, ki je bila po majskem potresu leta 1976 zelo poškodovana, je, ustrezno povezana in utrjena, ostala v ponovljenih septembrskih potresih enake jakosti nepoškodovana. Učinkovitost teh ukrepov pa je dokazal tudi potres na Bovškem leta 1998, saj so ga hiše, ki so bile dosledno utrjene po priporočilih, prestale brez poškodb (slika 5). V primerih, ko so bili ukrepi le delni, so se hiše obnašale tako, kot da sploh ne bi bile utrjene.

Največkrat so lastniki hiš med poznejšo obnovo zamenjali le lesene stropne, kamnitega zidovja niso utrdili, pri zamenjavi stropov pa niso poskrbeli za ustrezno naleganje in sidranje novih armiranobetonskih plošč. V takšnih primerih je med potresom toga plošča prestrigla zunanji sloj zidu pod ležiščem (slika 6). V hujših primerih ga je tudi porinila navzven, kar je predvsem v vogalih povzročilo razslojevanje in odpadanje zunanjega sloja zidu. V primerih, ko so bile plošče ustrezno sidrane, pa nosilnost zidovja ni bila zadostna: v zidovih so v vseh nadstropjih nastale strizne razpoke, kar je

**Preglednica 1. Natezna trdnost ft različnih vrst neinjektiranega in injektiranega kamnitega tidovja**  
**Table 1. Tensile strength ft of different existing and cement-grouted stone-masonry walls**

vrsta zidovja	neinjektirano	injektirano
dvoslojni zid, neobdelan kamen, apnena malta z blatnim peskom	0,02 MPa	0,12 MPa
dvoslojni zid, neobdelan kamen, apnena malta s čistim peskom	0,10 MPa	0,25 MPa
neobdelan kamen, mešan zid, apnena malta s čistim peskom	0,14 MPa	0,19 MPa



*Slika 5. Smast: hiša, ki je bila ustrezno utrjena po letu 1976, po potresu leta 1998 ni bila poškodovana (foto: M. Tomažević)*

*Figure 5. Smast: an adequately strengthened house in 1976 did not suffer damage during the 1998 earthquake (photo: M. Tomažević)*



*Slika 6. Bovec: vodoravna razpoka, nastala zaradi monolitne stropne plošče (foto: M. Tomažević)*

*Figure 6. Bovec: horizontal crack caused by reinforced-concrete slab (photo: M. Tomažević)*

dokaz za to, da so plošče sicer imele povezovalno vlogo in zagotovile celovito obnašanje konstrukcije, zidovje pa ni bilo dovolj močno, da bi prevzelo nastale potresne sile (slika 3).

Tudi takrat, ko je bilo kamnito zidovje le delno injektirano, obnašanje ni bilo ustrezno. Lokalno zainjektirani deli zidov so zaradi svoje togosti med potresom v okoliškem zidovju povzročili celo hujše poškodbe, kot če zidovje sploh ne bi bilo injektirano.

## Potresna odpornost kamnitih hiš na Bovškem in učinkovitost injektiranja zidov

Osnovna naloga raziskav je bila ugotoviti razloge za nastanek poškodb stavb in preveriti učinkovitost utrditvenih ukrepov, predvsem injektiranja, s katerimi naj se med obnovo po potresu prizadetega območja stavbam zagotovi ustrezno potresno odpornost. Izkazalo se je, da je za kakršnokoli resnejšo analizo potresne odpornosti stavb treba ugotoviti dejanske vrednosti mehanskih lastnosti zidovja, pogled na rezultate, predstavljene v preglednici 1, pa kaže, da se lastnosti zidovja po različnih območjih zelo spreminjajo. Na podlagi ugotovitev eksperimentalnih raziskav in računskih analiz smo želeli tudi oceniti velikost potresnih sil, ki so 12. aprila 1998 delovale na stavbe.

Na podlagi izkušenj smo ugotovili, da laboratorijske preiskave zidov, sezidanih v laboratoriju, niso vedno zanesljive, čeprav se s predhodnimi kemijskimi in mehanskimi raziskavami ugotovijo sestava in trdnostne lastnosti malte in kamna – zato se mehanske lastnosti zidovja ugotavljajo s preiskavami na terenu. V ta namen se v zidu, primernem za preiskavo, z žaganjem oddvoji vzorec ustreznih dimenzij, ki se ga opremi z merilnimi inštrumenti in obremenjuje z vodoravno silo, ki ponazarja delovanje potresa. S hidravličnim batom se zidu vsiljuje vodoravni pomik, kar omogoča, da se stanje zidu spremlja še potem, ko se njegova nosilnost zaradi nastanka poškodb zmanjša. Sila oziroma vsiljeni pomik se stopenjsko, z vmesnimi razbremenitvami, povečuje vse do nastanka hujših poškodb, zaradi katerih se objekt že lahko poruši. Tipično zasnovane preiskave in tipično stanje zidu po preiskavi predstavljata sliki 7 in 8.

Zaradi pomislekov lastnikov hiš preiskav na zidovju tipičnih stanovanjskih hiš v najbolj prizadetem območju (Drežniške Ravne, Magozd) ni bilo mogoče opraviti, pač pa v kraju Kal–Koritnica, kjer so bile posledice potresa tudi sorazmerno hude (Kal–Koritnica 47, stavba A). Več podatkov je bilo možno dobiti na javnih stavbah, kjer je bilo preiskano zidovje dveh objektov (osnovna šola Soča, stavba B, in policijska postaja Bovec, stavba C). Za ugotovitev učinka injektiranja sta bila v vsaki stavbi preiskana po dva zidova: eden ni bil injektiran, drugi pa je bil pred preiskavo utrjen z injektiranjem. Zidova v stavbi A sta bila preiskana kot navpični konzoli, vodoravno obremenjeni na vrhu. Ker nista prenašala nobene navpične obtežbe, ju je bilo treba pred preiskavo obremeniti z dodatno navpično silo. V primeru stavb B in C so bili zidovi zgoraj in spodaj vpeti v zidovje. Vodoravna sila je delovala na sredini višine zidov, ker pa so bili zidovi obremenjeni s svojo težo in stropi nad njimi, obremenjevanje z dodatno navpično silo ni bilo potrebno.

S podatki, pridobljenimi v preiskavah, je možno analizirati stanje, pa tudi preveriti potresno odpornost kamnitih hiš v fazi projektiranja prenove. Kot je bilo pričakovati, so se vsi preiskani zidovi porušili zaradi strigov. Po teoriji strižne odpornosti zidu je natezna trdnost  $f_t$  definirana kot glavna natezna napetost, ki nastane v zidu, idealiziranem kot ela-



Slika 7. Zasnova preiskave tipičnega kamnitega zidu (foto: M. Tomažević)

Figure 7. Disposition of an in-situ lateral resistance test of a stone-masonry wall (photo: M. Tomažević)



Slika 8. Razpoke v injektiranem kamnitem zidu pri doseženem mejnem stanju porušitve (foto: I. Klemenc)

Figure 8. Crack pattern in a tested cement-grouted wall in ultimate state (photo: I. Klemenc)

stičen, homogen in izotropnem element, pri doseženi maksimalni odpornosti (Turnšek in Čačovič, 1971):

$$f_t = \sqrt{\left(\frac{\sigma_o}{2}\right)^2 + (b\tau_{H_{\max}})^2} - \frac{\sigma_o}{2}$$

kjer je  $\sigma_o$  tlačna napetost v vodoravnem prerezu zidu zaradi navpične obtežbe,  $H_{\max}$  povprečna strižna napetost v vodoravnem prerezu zidu pri doseženi maksimalni odpornosti  $H_{\max}$  in  $b$  količnik porazdelitve strižnih napetosti, odvisen od dimenzij zidu in razmerja med navpično in vodoravno obtežbo pri doseženi maksimalni nosilnosti.

Dimenzije preiskanih zidov in rezultati preiskav so zbrani v preglednici 2, kjer je predstavljeno tudi razmerje med nosilnostjo zidu pred injektiranjem in po njem. Tipične odvisnosti med vodoravno silo in pomiki, dobljene s preiskavo neinjektiranega in injektiranega zidu, predstavlja slika 9. Kot kažejo rezultati v preglednici in diagrami, se natezna trdnost kamnitega zidovja, ki določa strižno odpornost zidu, z injektiranjem bistveno poveča, poveča pa se tudi togost zidu. Povečanje togosti zidu po injektiranju opozarja, da je treba injektirati enakomerno po celi tlorsni površini stavbe, sicer se lahko zaradi povečane togosti posameznega zidu pojavijo spremembe pri porazdelitvi potresnih sil na zidove in s tem neugoden torzijski vpliv med potresom.

Za pridobitev podatkov o potresni odpornosti tipičnih kamnitih hiš na območju, ki ga je prizadel potres, je bilo na podlagi podatkov, dobljenih z raziskavami, analizirano nekaj tipičnih stavb. Uporabljena je bila uveljavljena metoda mejnih stanj in vsiljenih pomikov (push-over analysis), ki smo jo že pred leti razvili na ZAG. Rezultate računa za stavbe z neinjektiranimi zidovi in stavbe z injektiranim zidovjem predstavlja preglednica 3. Potresna odpornost je predstavljena v brezdimenzijski obliki s količnikom potresne odpornosti CSR, tj. z razmerjem med dejansko odpornostjo  $H_u$  in težo stavbe  $W$ , za obe pravokotni smeri stavbe.

Z upoštevanjem odvisnosti med računskim pospeškom tal  $a_g$  in potresno odpornostjo stavbe, izraženo z mejnim količnikom prečne sile v pritličju  $BSC_u$ , tj. z razmerjem med težo stavbe in odpornostjo, lahko na podlagi izračunane odpornosti stavbe in nastalih poškodb ocenimo, kakšna je bila velikost učinkovitih pospeškov tal med potresom. V oceni upoštevamo odvisnost, ki jo določa standard Eurocode 8 (Eurocode 8, 1994):

$$BSC_u = \frac{a_g S \beta_o}{q}$$

Če predpostavimo, da je vrednost parametra tal  $S = 1.0$ , da je maksimalna normalizirana spektralna vrednost  $\beta_o = 2.5$  konstantna v intervalu lastnih period nihanja stavbe med  $T = 0.1$  s in  $T = 0.4$  s (kar vsekakor velja za obravnavane zidane stavbe) in da je vrednost faktorja obnašanja konstrukcije  $q = 1.5$  za navadne zidane stavbe, lahko vrednosti mejnega količnika prečne sile v pritličju, naštetih v preglednici 3, uporabimo tudi za oceno vrednosti računskih oziroma učinkovitih pospeškov tal  $a_g$ , pri katerih stavbe dosežejo mejno stanje porušitve. Rezultati te analize so predstavljeni v preglednici 4.

Če upoštevamo navedene predpostavke in analiziramo rezultate iz preglednice 4, lahko sklepamo, da vrednosti učinkovitih pospeškov tal med potresom 12. aprila 1998 niso presegle vrednosti 0,15 g, kar je nekoliko manj, kot je vrednost računskega pospeška tal, ki ga zahteva Eurocode 8 za preverjanje potresne odpornosti konstrukcij na območjih, kjer lahko pričakujemo potrese VIII. stopnje jakosti po EMS lestvici ( $a_g = 0.2$  g). Žal na Bovškem nimamo zapisov gibanja tal med potresom 12. aprila 1998, ki bi potrdili sklep oziroma na podlagi katerih bi lahko preverili vrednosti spektralnega ojačanja  $\beta_o$  in faktorja redukcije sil  $q$  za tovrstne konstrukcije. Čeprav so izračunane vrednosti  $a_g$  razmeroma

**Preglednica 2. Dimenzije preiskanih zidov in ugotovitve preiskav**  
**Table 2. Dimensions of tested walls and test results**

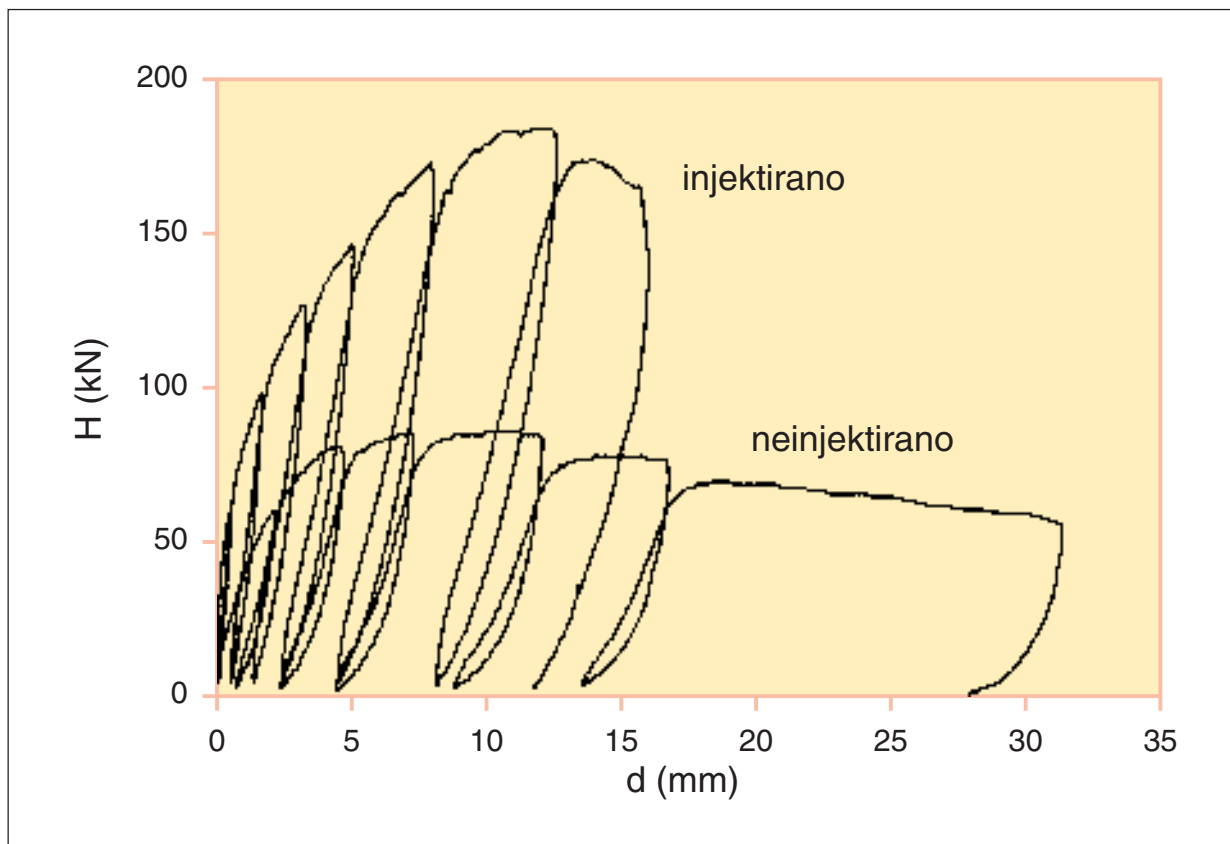
stavba	zid	l x d x h (m)	$\sigma_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	G (MPa)	neinj. /inj.
A*	neinjekt.	0,98 x 0,52 x 1,63	0,54	0,06	84	1,83
A*	injektiran	1,00 x 0,52 x 1,60	0,65	0,11	174	
B	neinjekt.	1,00 x 0,65 x 2,54	0,20	0,06	181	2,83
B	injektiran	1,00 x 0,65 x 2,52	0,19	0,17	337	
C	neinjekt.	0,98 x 0,64 x 2,51	0,18	0,10	151	2,20
C	injektiran	1,03 x 0,66 x 2,50	0,23	0,22	470	

\* Opomba: zidovi, preiskani kot konzole

**Preglednica 3. Potresna odpornost neutrjenih in utrjenih kamnitih zidanih stavb, izražena s količnikom potresne odpornosti ( $CSR = H_u/W$ )**

**Table 3. Seismic resistance of existing and strengthened stone-masonry buildings in terms of coefficient of seismic resistance ( $CSR = H_u/W$ )**

stavba	število nadstropij	površina zidov (%)		$f_t$ (MPa)	neutrjene		$f_t$ (MPa)	utrjene	
		x-smer	y-smer		$CSR_x$	$CSR_y$		$CSR_x$	$CSR_y$
1	2	15,9	12,0	0,08	0,16	0,17	0,14	0,21	0,21
2	2	12,5	7,4	0,08	0,18	0,16	0,14	0,23	0,20
3	2	11,0	11,0	0,06	0,20	0,23	0,11	0,26	0,31
4	2	12,4	10,8	0,06	0,25	0,25	0,11	0,30	0,28
5	2	9,6	9,2	0,06	0,22	0,19	0,11	0,30	0,33
6	2	11,4	13,0	0,06	0,23	0,26	0,11	0,30	0,33



**Slika 9. Tipična odvisnost med silo in deformacijo, dobljena med preiskavo kamnitega zidu v neutrjenem in utrjenem stanju**  
**Figure 9. Typical lateral load – deformation relationships obtained by an in-situ lateral resistance test of an existing and cement-grouted stone-masonry wall**

majhne, ugotavljamo, da smo neustrezno obnašanje stavb lahko pričakovali, medtem ko ustrezno utrjene hiše med potresom še ne bi smele utrpeti hujših poškodb.

**Preglednica 4. Ocenjene vrednosti efektivnega pospeška tal  $ag$ , ki ga stavbe prevzamejo ( $v g = 9,81 ms^{-2}$ )**  
**Table 4. Building resistance in terms of estimated values of effective ground acceleration  $ag$  ( $g = 9,81 ms^{-2}$ )**

stavba	število nadstropij	neutrjene		utrjene	
		x-smer	y-smer	x-smer	y-smer
1	2	0,10	0,10	0,13	0,13
2	2	0,11	0,10	0,14	0,12
3	2	0,12	0,14	0,16	0,19
4	2	0,15	0,15	0,18	0,17
5	2	0,13	0,11	0,18	0,20
6	2	0,14	0,16	0,18	0,2

## Sklep

Analiza obnašanja kamnitih hiš med potresom 12. aprila 1998 je pokazala, da so hiše, ki so bile po potresih leta 1976 v celoti utrjene z upoštevanjem takrat pripravljenih tehničnih navodil, potres leta 1998 prestale brez poškodb ali pa so na njih nastale le manjše, nepomembne poškodbe. Potres leta 1998 pa je bil dovolj močan, da je na območju z največjo jakostjo povzročil hude poškodbe na hišah, ki sploh niso bile utrjenene, ali pa ukrepi za utrjevanje niso bili sistematično in v celoti izvedeni. Dejstvo, da delno opravljene ukrepi niso zagotovilo za ustrezno potresno odpornost, se je najbolj potrdilo na hišah, kjer so lastniki lesene stropne sicer zamenjali z masivnimi armiranobetonskimi ploščami, ki pa niso bile ustrezno podprte in sidrane oziroma povezane z nosilnim zidovjem, zidovje samo pa tudi ni bilo utrjeno s sistematičnim injektiranjem. V takšnih primerih je med potresom toga plošča porinila zunanji sloj zidu navzven in povzročila nastanek vodoravnih razpok tik pod njo, pa tudi razslojevanje zidov in razrivanje vogalov navzven.

Za doseg dobrega obnašanja kamnitih zidanih hiš med potresom na območjih, kjer lahko pričakujemo računske (efektivne) pospeške tal v velikosti do 0,2 g (območja intenzitete VIII. stopnje po EMS-lestevici), moramo najprej zagotoviti celovitost obnašanja zidane konstrukcije s povezovanjem zidov z jeklenimi zidnimi vezmi in s sidranjem stropov v zidove. Rezultati eksperimentalnih raziskav potresne odpornosti kamnitega zidovja in učinkovitosti injektiranja pa tudi dokazujejo, da moramo na teh območjih z injektiranjem obvezno utrditi tudi samo zidovje, saj bo le na ustrezen način utrjeno sposobno prevzeti pričakovane potresne obremenitve.

Kadar lesene stropne zamenjamo z armiranobetonskimi ploščami, morajo biti plošče ustrezno podprte z notranjim nosilnim slojem zidu, z zunanjim slojem pa povezane z dovolj močnimi sidri oziroma mozniki. Ravno tako morajo biti plošče med seboj povezane v primeru, ko so podprte z notranjimi zidovi. Celovitost delovanja konstrukcije med potresom pa tudi po vgradnji masivnih plošč zagotavljajo šele jeklene vezi, položene na zunanji strani zidu.

Zamenjava lesenih stropov s togimi ploščami ni vedno potrebna – posebej še, kadar je zidovje dovolj močno, da prevzame pričakovane potresne sile. Takrat za ustrezno obnašanje med potresom zadošča že samo povezovanje zidovja z jeklenimi vezmi, kar zagotovi celovitost konstrukcije in skupno delovanje vseh zidov med potresom. Tako se v celoti izrabi vsa potresna odpornost, ki je na voljo. Največkrat pa leseni stropi lahko ostanejo tudi v hišah, kjer je potrebno po injektiranju utrditi zidovje, če so le dobro ohranjeni in dovolj močni ter togi za prevzem navpične obremenitve.

## Literatura

- Bettio, C., Gelmi, A., Modena, C., Rossi, P. P., 1993. Caratterizzazione meccanica consolidamento statico delle murature dei centri abitati di antica origine della provincia di Trento. V: Murature, Sicurezza, Recupero, Trento, Istituto Trentino Edilizia Abitativa, 154–184.
- Boštjančič, J., Sheppard, P., Terčelj, S., Turnšek, V., 1976. Use of a modeling approach in the analysis of the effects of repairs to earthquake-damaged stone-masonry buildings. Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata, Part 2, 19 (72), Udine, 1091–1116.
- Eurocode 8, 1994. Design provisions for earthquake resistance of structures. Part 1–1: General rules – seismic actions and general requirements for structures. ENV 1998–1–1: 1994, Brussels, Belgium, CEN.
- Ladava, A. 1982. Guidelines and procedures used to eliminate the impact of the earthquake in the Soča Valley. V: Jones, B. G., Tomažević, M. (urednika), Social and Economic Aspects of Earthquakes, Ljubljana–Ithaca, Institute for Testing and Research in Materials and Structures – Cornell University, 413–423.
- Ocena škode po potresu 12. 4. 1998 – poročilo o delu. 1998. Ministrstvo za okolje in prostor, www.sigov.si/mop/vsebina/zakoni/okolje/skoda.htm
- Poročilo o odpravljanju posledic potresa, ki je bil 12. aprila 1998 v severozahodni Sloveniji, 1998. Uprava RS za zaščito in reševanje, Ljubljana.
- Raccomandazioni per la riparazione strutturale degli edifici in muratura, 1977. DT 2, Legge Regionale 20 giugno 1977, Udine.
- Tomažević, M., P. Sheppard, 1982. The strengthening of stone-masonry buildings for revitalization in seismic regions. V: Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering, Vol. 5, Athens, 275–282.
- Tomažević, M., 1989. Some aspects of structural strengthening of historic buildings in urban and rural nuclei against earthquakes. European Earthquake Engineering, 3 (1), Patron, Bologna, 19–28.
- Tomažević, M., Lutman, M., Weiss, P., 1993. The seismic resistance of historical urban buildings and the interventions in their floor systems: an experimental study. The Masonry Soc. J., 12 (1), Boulder, The Masonry Soc., 77–86.
- Turnšek, V., Čačovič, F., 1971. Some experimental results on the strength of brick-masonry walls. V: Proceedings of the 2nd International Brick-masonry Conference, Stoke-on-Trent, 149–156.
- Turnšek, V., Terčelj, S., Sheppard, P., Tomažević, M., 1978. The seismic resistance of stone-masonry walls and buildings. V: Proceedings of the 6th European Conference on Earthquake Engineering, Vol. 3, Dubrovnik, 275–282.
- Vintzileou, E., Tassios, T. P., 1995. Three-leaf stone masonry strengthened by injecting cement grout. Journal of Structural Engineering, 121 (5), New York, ASCE, 848–856.