

RAZISKAVE RESONANCE MED TLEMI IN STAVBAMI V BOVŠKI KOTLINI Z METODO MIKROTREMORJEV

Soil-structure resonance study in the Bovec basin using the microtremor method

Andrej Gosar* UDK 550.344.094.016 (497.4)

Povzetek Abstract

Lokalna geološka zgradba ima velik vpliv na potresno nihanje tal, ki se poveča ob prehodu potresnih valov iz trše skalne podlage v mehkeše usedline na površju. Ojačenje je največje v območju lastne frekvence usedlin, ki je odvisna od njihove debeline in od hitrosti strižnega valovanja. Tudi brez poznavanja teh dveh parametrov lahko lastno frekvenco usedlin učinkovito določimo z analizo majhnih vibracij tal, tako imenovanimi mikrotremorji. Z meritvami mikrotremorjev v stavbah ocenimo njihovo osnovno frekvenco nihanja v dveh glavnih smereh in s tem območje povečane ranljivosti. S primerjavo frekvenc lahko opredelimo, ali je nevarnost resonance med tlemi in stavbami, ki je pogost razlog za njihove večje poškodbe. V Bovški kotlini, ki sta jo prizadela potresa leta 1998 in leta 2004, smo resonančne učinke raziskali s 124 meritvami mikrotremorjev na 7 km² velikem območju in z meritvami v 20 stavbah. Frekvenčno območje povečane ranljivosti prevladujočih stavb je med 7 in 11 Hz. To območje se prekriva z lastno frekvenco usedlin med 6 in 12 Hz, ki prevladuje na karti meritev na prostem površju. Nevarnost resonance med tlemi in stavbami je v večjem delu Bovške kotline zato velika in je zagotovo prispevala k večjim poškodbam stavb. Velike razlike v lastni frekvenci so posledica zelo raznovrstne sestave ledeniških in rečnih usedlin, ki zapolnjujejo kotlino.

Local geological structure has a major influence on seismic ground motion. The amplitude of seismic waves increases when they pass from hard bedrock to soft sediments at the surface. Amplification is highest at the fundamental frequency of sediments, which depends on their thickness and on shear-wave velocity. Even without knowing these two parameters, the fundamental frequency can be efficiently derived by analysis of small ground vibrations known as microtremors. By measurements taken inside buildings, the main building frequencies in two principal directions and, consequently, the range of increased vulnerability, are determined. Comparison of frequencies allows identification of the danger of soil-structure resonance, which is a frequent reason for damage enhancement. In the Bovec basin, which has been struck by earthquakes in 1998 and 2004, the resonance effects were studied by 124 free-field measurements in an area of 7 km² and by measurements inside 20 buildings. The prevalent frequency range of increased vulnerability for buildings is 7-11 Hz. This range overlaps with fundamental frequency range of 6-12 Hz, which prevails in the map of free-field measurements. This indicates that the danger of soil-structure resonance is considerable in the area and has enhanced the damage to buildings. The observed great variability of the fundamental frequency is caused by very heterogeneous glacial and fluvial deposits in the basin.

Uvod

Značilnost potresov leta 1998 in 2004 v Krnskem pogorju so bile razmeroma hude poškodbe stavb, predvsem pa so bile presenetljive velike razlike v poškodbah med naselji, ki so bila podobno oddaljena od nadžarišča potresa. V Bovcu so bile razlike v stopnji poškodb med posameznimi deli mesta precejšnje. Pri razlagi tega pojava seveda najprej pomislimo na različno potresno ranljivost posameznih stavb (Tomažević in drugi, 2005; Godec in drugi, 2006), ki je zagotovo prispevala svoj delež. Drugi pomemben dejavnik, ki ima lahko velik vpliv na potresno

nihanje tal in ga lahko precej poveča, je lokalna geološka zgradba. Poškodbe stavb so še posebej velike, če pride do resonance nihanja tal in stavb. Ob deseti obletnici potresa, ki se je zgodil 12. aprila 1998 v Posočju, je zato priložnost, da pregledamo te vplive v Bovški kotlini, ki je zapolnjena z zelo raznovrstnimi ledeniški in rečnimi usedlinami. Pri raziskavah resonance med tlemi in stavbami smo uporabili metodo mikrotremorjev.

Predhodne raziskave

Na karti potresne nevarnosti Slovenije, ki podaja potresno intenziteto z lestvico MSK (Ribarič, 1987), je Bovška kotlina v območju VIII. stopnje, na karti projektnega pospeška tal (Lapajne in drugi, 2001) pa v območju pospeška 0,225 g.

* doc. dr., Ministrstvo za okolje in prostor RS, ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana, andrej.gosar@gov.si

Karta potresne intenzitete je izdelana za povprečna tla na območju ocene posamezne vrednosti intenzitete (v danem primeru na območju VIII. stopnje v Bovški kotlini), karta projektnega pospeška pa za trdna tla na celotnem ozemlju Slovenije. Ribičič in drugi (2000) so za uporabo s prvo karto izdelali karto mikrorajonizacije Bovške kotline v merilu 1: 10.000, na kateri so opredelili tri kategorije tal in jim pripisali podstopnje intenzitete VIII. Pri tem so uporabili geološko in geotehnično karto ter podatke iz plitvih geotehničnih vrtin, izvrtanih po potresu leta 1998. Geološka karta Bovške kotline (Buser, 1986; Jurkovšek, 1986; Bavec in drugi, 2004) je prikazana na sliki 1. V 1. kategoriji so karbonatne kamnine, iz katerih je zgrajeno obrobje kotline. V 2. kategoriji so fliš in rečne usedline (prod) večje debeline, v 3. pa ledeniške usedline, jezerska kreda in rečne usedline manjše debeline raznovrstne sestave. Primerjava s porazdelitvijo poškodovanih stavb ob potresu 1998 (Ribičič in drugi, 2000) je pokazala, da lahko tla celotnega območja Bovca in Čezsoče uvrstimo v 3. kategorijo, tla večjega dela območja Kal-Koritnice pa v 2. kategorijo. Velikih opaženih razlik v stopnji poškodb stavb predvsem v različnih predelih Bovca pa s potresno mikrorajonizacijo, ki temelji predvsem na površinskih geoloških podatkih, ni mogoče v celoti pojasniti.

Predhodne raziskave z mikrotremorji in modeliranjem na podlagi rezultatov geofizikalnih raziskav po potresu 1998 (Gosar, 1999; Gosar in drugi, 2001) so pokazale, da so razlike v lastni frekvenci usedlin in v ojačenju potresnega nihanja tal v Bovški kotlini velike. Ugotovljene razlike med Malo vasjo in osrednjim delom Bovca ter med dvema deloma Kal-Koritnice se dobro ujemajo z razlikami v stopnji poškodb in kažejo, da so bile v nekaterih predelih poškodbe verjetno večje zaradi resonančnih učinkov med tlemi in stavbami. Na podlagi teh rezultatov smo se odločili za sistematične raziskave celotne Bovške kotline. Raziskave smo izvedli v okviru dveh mednarodnih projektov: NATO Znanost za mir: Ocenjevanje lokalnega ojačenja potresnega nihanja tal in ranljivosti objektov (Gosar, 2007a) ter Interreg IIIB Alpski prostor: Potresna nevarnost v alpskih dolinah.

Metoda mikrotremorjev

Med metodami za ocenjevanje vpliva lokalne geološke zgradbe na potresno nihanje tal se je v zadnjem desetletju uveljavila metoda mikrotremorjev (Mucciarelli in Gallipoli, 2001; Bonnefoy-Claudet in drugi, 2006; Gosar, 2007a), ki temelji na meritvah majhnih vibracij tal naravnega in umetnega izvora. Spektralno razmerje med zapisom mikrotremorjev na vodoravni in navpični komponenti (HVSRR – Horizontal to Vertical Spectral Ratio) poda lastno frekvenco usedlin, odloženih na skalni podlagi. Metoda mikrotremorjev ima številne prednosti pred drugimi metodami raziskav lokalnih učinkov, ki zahtevajo dolgotrajno opazovanje potresov in analizo njihovih spektralnih razmerij ali pa obsežne in drage geofizikalne raziskave ter vrtnanje za določitev hitrostne zgradbe strižnih valov v globini ter modeliranje (Bard,

1999). Predvsem na območjih, kjer se lastnosti usedlin ali njihova debelina zelo spreminjajo, je z drugimi metodami skoraj nemogoče zagotoviti dovolj gosto mrežo raziskav, da bi bili rezultati reprezentativni. Pomanjkljivost metode mikrotremorjev je, da ne podaja celotnega spektra, v katerem pride do ojačenja potresnega nihanja tal, ampak le osnovno resonančno frekvenco. Prav tako ta metoda ne poda dejanske amplitude ojačenja.

Pozneje se je uporaba mikrotremorjev razširila tudi na meritve v stavbah, kjer ocenjujemo njihovo osnovno frekvenco nihanja v vzdolžni in prečni smeri in tako določimo območje povečane ranljivosti (Gallipoli in drugi, 2004). S primerjavo lastne frekvence usedlin in zgradb lahko kvantitativno ocenimo nevarnost resonance med tlemi in stavbo ob potresu, ki pogosto povzroči večje poškodbe.

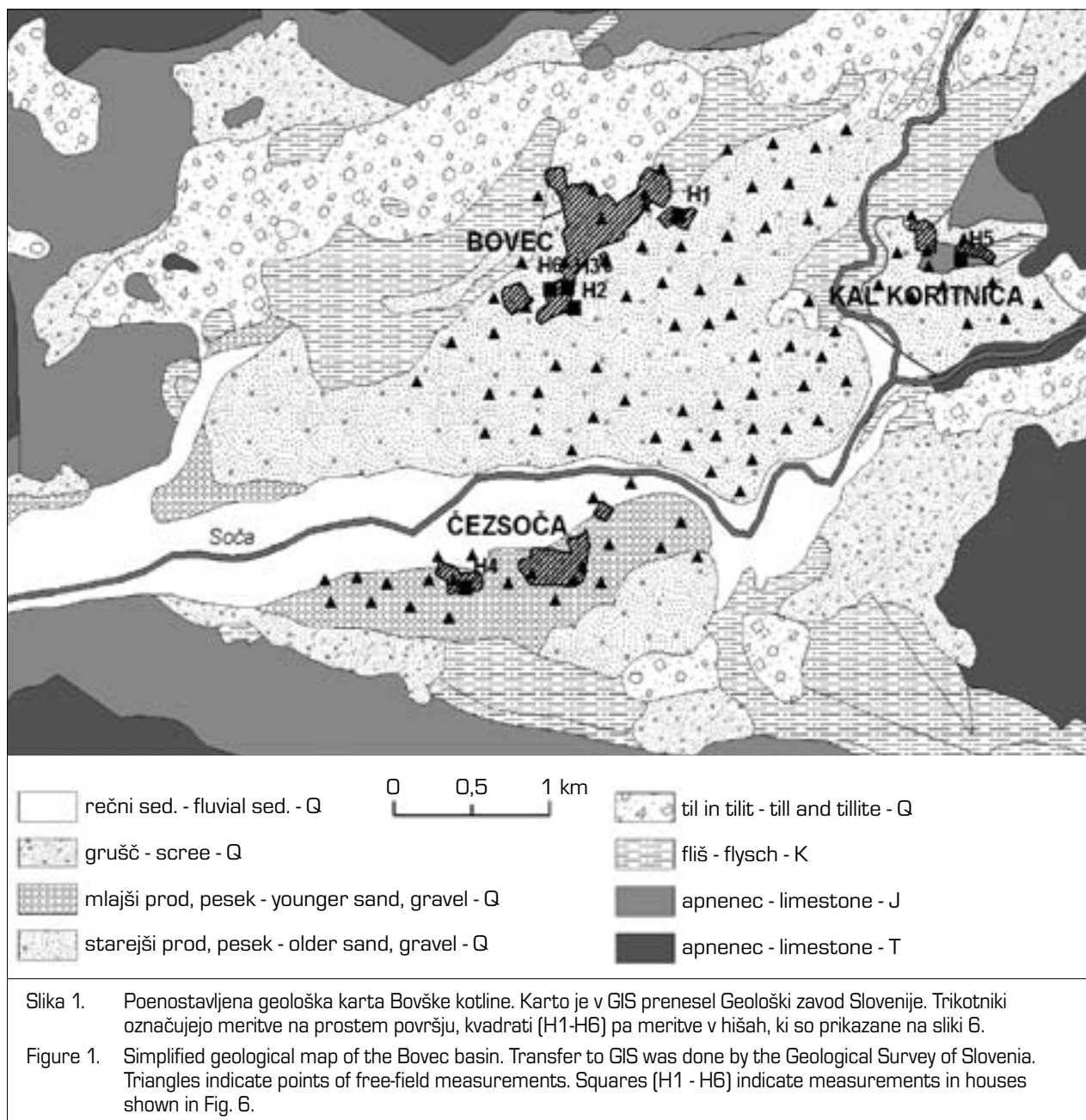
Raziskave z mikrotremorji v Bovški kotlini

Raziskave v Bovški kotlini so obsegale meritve na prostem površju za določitev lastne frekvence usedlin in meritve v dvajsetih izbranih stavbah (Gosar, 2007b). Izvedli smo jih s šestimi seizmografi Tromino (Micromed), ki so bili razviti posebej za meritve mikrotremorjev in so sestavljeni iz trikomponentnega elektrodinamičnega senzorja, registra-torja in napajalne baterije, vgrajenimi v skupno ohišje.

Meritve na prostem površju

Meritve smo izvedli na 7 km² velikem območju v mreži točk gostote okoli 200 m x 200 m (slika 1). To območje se ujema z raztezanjem kvartarnih usedlin (slika 2) in obsega tri naselja, poškodovana ob potresih leta 1998 in 2004: Bovec, Čezsoča in Kal-Koritnica. Meritve smo izvedli na skupno 124 točkah, ki so bile izbrane tako, da smo se čimbolj izognili vplivu seizmičnega nemira (npr. nihajoča drevesa) in izrazitim topografskim oblikam (npr. robovi teras). Največ seizmičnega nemira je bilo na območju Čezsoče, kjer je potekalo obnavljanje poškodovanih stavb in na območju industrijske cone Bovca. Na vsaki točki so meritve trajale dvajset minut, kar omogoča analizo do spodnje meje frekvence okoli 0,5 Hz (SESAME, 2004).

Podatke smo obdelali s programom Grilla s postopkom, ki ga priporočajo smernice, izdelane v okviru evropskega projekta SESAME (SESAME, 2004). Celotni zapis smo razdelili v 40 oken dolžine po 30 sekund in izločili vsa okna z močnejšimi kratkotrajnejšimi motnjami. Nato smo izračunali amplitudne spektre in spektralno razmerje geometrijskega povprečja obeh vodoravnih komponent z navpično komponento. Povprečna krivulja spektralnega razmerja za vsa upoštevana okna s 95 % intervalom zaupanja je končni rezultat. Frekvenca, pri kateri ima krivulja vrh, ustreza lastni frekvenci usedlin do prvega izrazitega kontrasta v strižni hitrosti seizmičnih valov, ki predstavlja mejo s tršimi kamninami.



Slika 3 kaže značilne primere krivulj spektralnega razmerja. Na 104 točkah je bilo mogoče zanesljivo določiti frekvenco spektralnega vrha, pri drugih 20 meritvah pa zaradi različnih razlogov (neizrazit vrh, več vrhov, motnje) to ni bilo mogoče. Na podlagi uspešnih meritev smo izrisali karto lastne frekvence usedlin (slika 4), ki kaže velik razpon vrednosti med 3 in 22 Hz. Večina raziskanega območja (Bovška terasa, Čezsoča, Kal-Koritnica) je v območju med 6 in 12 Hz (B33, B92, B118, B145 na sliki 3), ki so na karti označeni z odtenki rdeče barve. Nižje frekvence (3-6 Hz) so značilne za obrobje kotline (B22, B171, B56), kjer izdajajo flišne kamnine. Zelo visoke frekvence (18-22 Hz) smo ugotovili na dveh območjih. V osrednjem delu Bovca jih lahko povežemo z zelo tanko plastjo tila (morena) in peščenega peska, ki prekriva flišno podlago. Na JV robu karte (B117, B124) jih lahko razložimo s plitvo ležečo plastjo konglomerata, ki je sicer vidna le v strmi steni nad Sočo (slika 5).

Domneva ob začetku raziskave, da naj bi meritve mikrotremorjev pokazale najizrazitejši kontrast v seizmični hitrosti med kvartarnimi usedlinami in flišno podlago, se je izkazala za napačno. Pričakovali smo namreč, da bodo najnižje frekvence v osrednjem delu kotline, kjer so usedline najdebelejše, proti obrobju pa naj bi se z njihovim tanjšanjem ustrezno zviševale. Dobili pa smo drugačen rezultat. Razlog je velika raznovrstnost kvartarnih usedlin (slika 1), ki so deloma ledeniške (til in tilit) deloma rečne (pesek, prod, konglomerat). Kaže, da sprjetost teh usedlin v konglomerat in tilit (sprijeta morena) toliko spremeni njihove geomehanske lastnosti, da v stiku z nesprjetimi usedlinami (pesek, prod, til) predstavljajo dovolj izrazito hitrostno mejo, da se ta kot najpljetejši hitrostni kontrast odrazi v spektralnem razmerju mikrotremorjev. Prisotnost konglomerata ali tilita v usedlinah ima torej velik vpliv na njihovo lastno frekvenco. Karta lastne frekvence (slika 4) zato ne odraža celotne



Slika 2. Bovška kotlina in seizmograf za meritve mikrotremorjev.

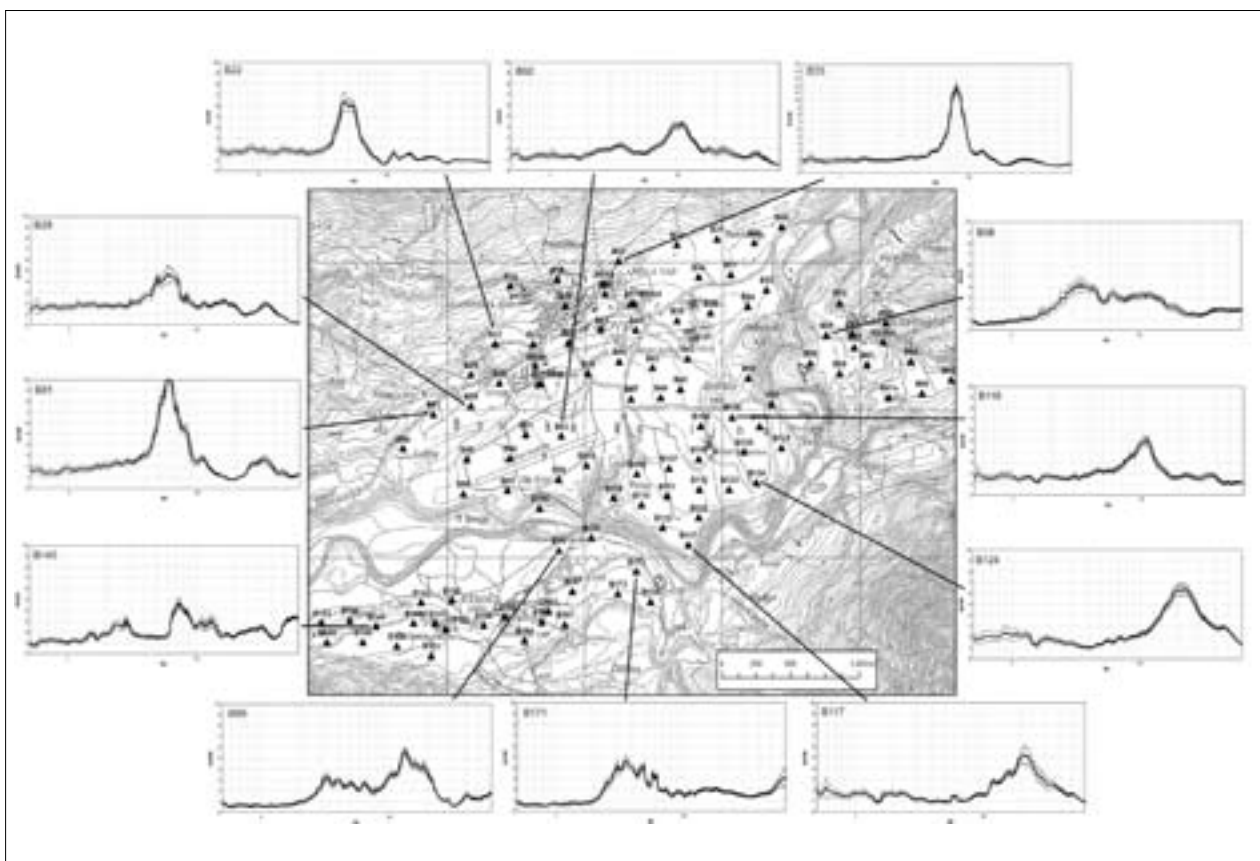
Figure 2. Bovec basin and seismograph for microtremor measurements.

debeline kvartarnih usedlin, ki je po rezultatih geoelektričnih raziskav v profilu med Bovcem in Čezsočo od 0 m na obrobju do 100 m v osrednjem delu Bovške kotline [Gosar in drugi, 2001].

Ker v osrednjem delu Bovške kotline ni globokih vrtin, ne poznamo razprostranjenosti sprijetih usedlin. Zaradi dokaj šibke zlepljenosti tudi z geoelektričnim sondiranjem

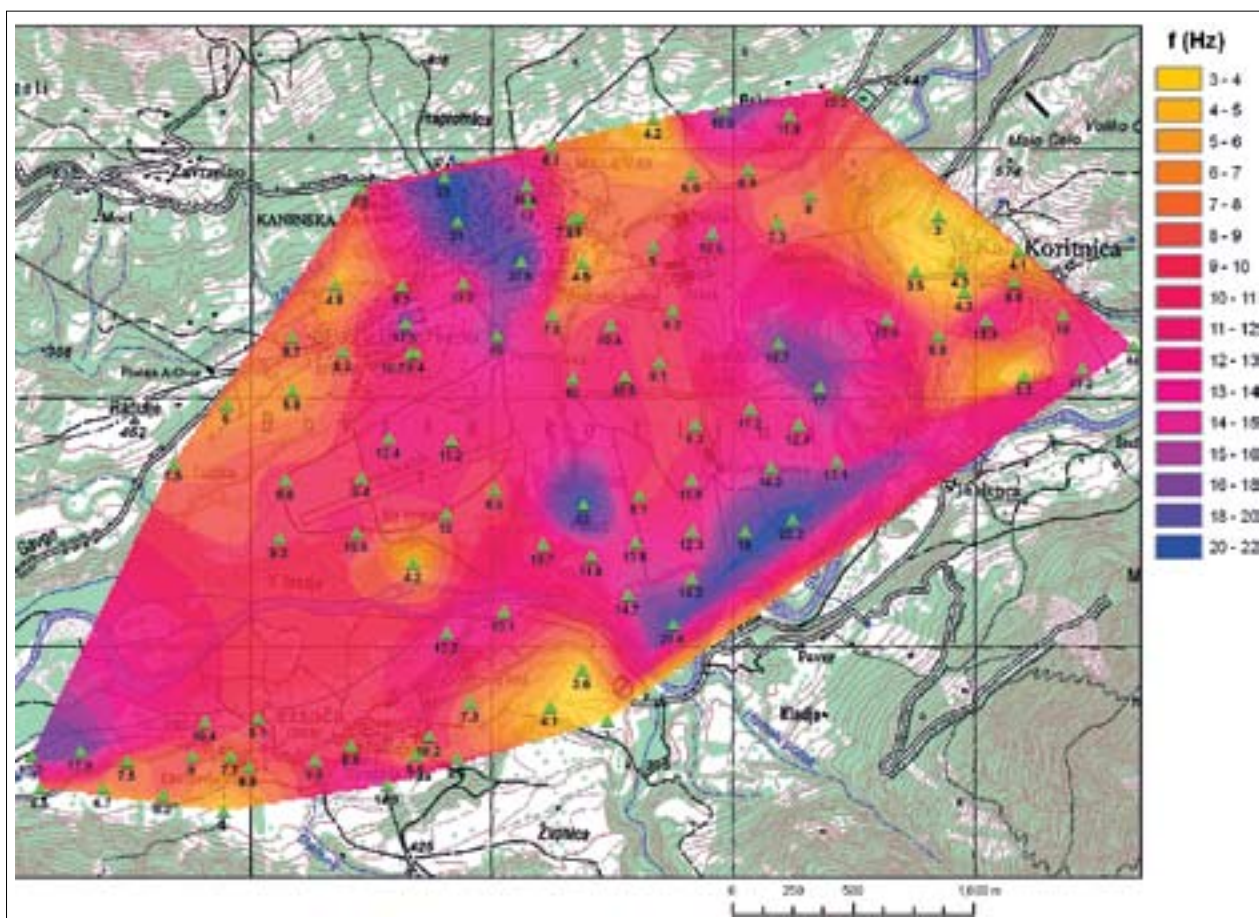
nismo mogli ločiti peščenega proda od slabo vezanega konglomerata [Gosar in drugi, 2001]. Morebitne geofizikalne raziskave ovira tudi dejstvo, da so vložki konglomerata in tilita izrazito nepravilnih oblik in ne tvorijo plasti, ki bi se raztezale preko celotne kotline. Glede na spreminjanje lastne frekvence lahko sklepamo le, da zgornja meja konglomerata vpada od JV (točki B117, B124 na sliki 3), kjer se nahaja v globini, manjši od 10 m (slika 5), proti S in SZ.

Poleg lastne frekvence smo analizirali tudi amplitude vrhov spektralnega razmerja mikrotremorjev. Amplituda je po teoriji odvisna predvsem od hitrostnega kontrasta, analize pa so pokazale, da ni dejavnik ojačenja potresnih valov. Primerjave z metodo referenčne točke so pokazale, da je amplituda na splošno manjša od dejanskega ojačenja [SESAME, 2004]. Zato lahko vršno amplitudo le v res dobrih pogojih uporabimo za grobo oceno spodnje meje ojačenja. Analize meritev v Bovški kotlini so pokazale, da so amplitude v širokem razponu med 2 in 12 in da se zaradi raznovrstnosti usedlin zelo spreminjajo tudi na majhnih razdaljah. Na točkah B29 in B81 (slika 3), ki sta med seboj oddaljeni le 200 m, sta npr. ugotovljeni skoraj enaki lastni frekvenci (6,0 in 6,2 Hz), pripadajoča vrhova pa imata zelo različni amplitudi (4,5 in 11). Na podlagi gornjih ugotovitev menimo, da v Bovški kotlini vršne amplitude spektralnega razmerja mikrotremorjev ne moremo uporabiti za oceno dejanskega ojačenja potresnih valov.



Slika 3. Značilni primeri krivulj spektralnega razmerja mikrotremorjev v Bovški kotlini.

Figure 3. Typical examples of microtremor spectral ratio curves from the Bovec basin.



Slika 4. Karta lastne frekvence usedlin, izdelana na podlagi meritev mikrotremorjev. Trikotniki označujejo meritve, številke pa lastno frekvenco.

Figure 4. Map of the fundamental frequency of sediments from microtremor data. Triangles indicate points of measurements. Numbers indicate fundamental frequencies.

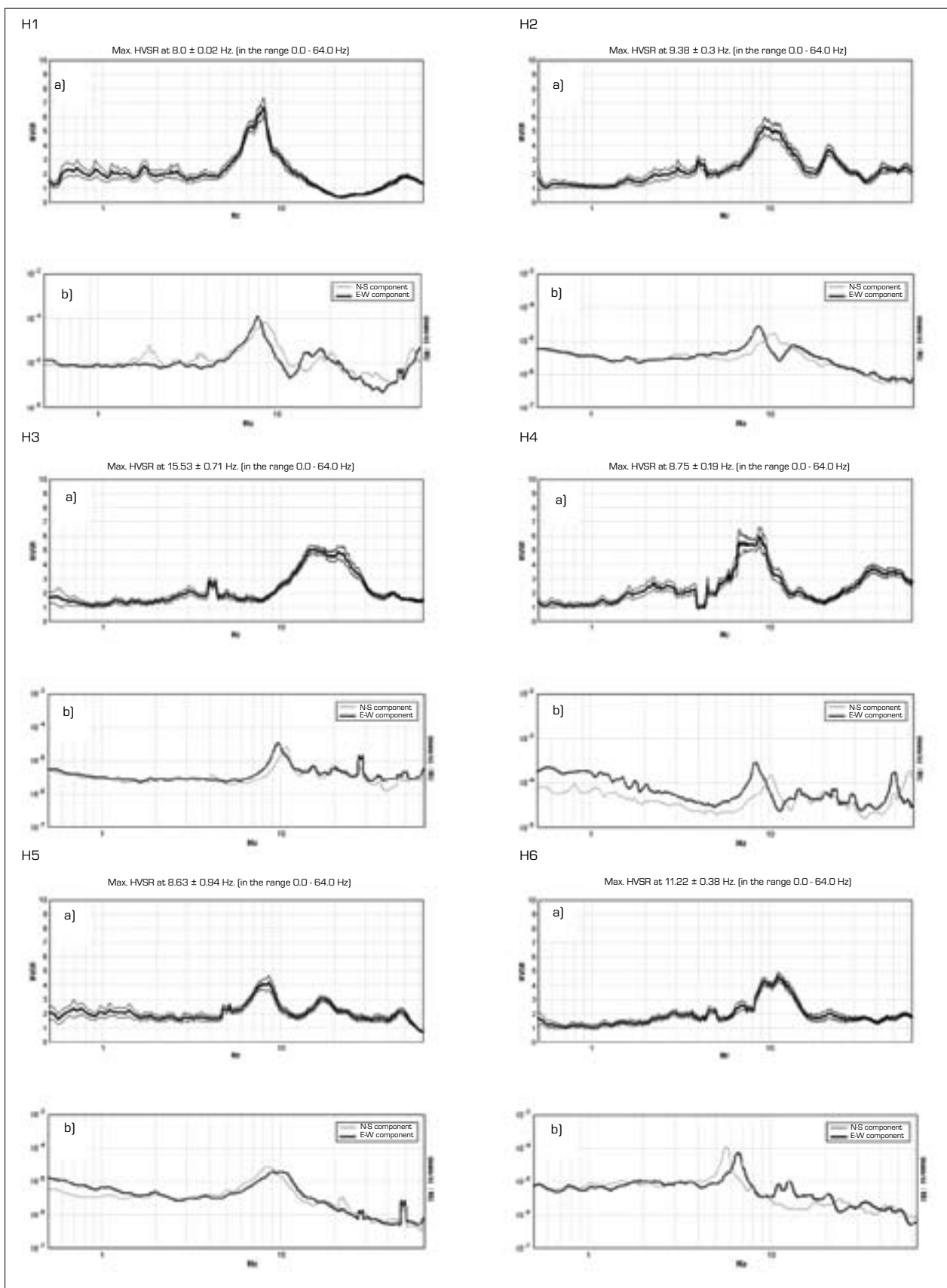
Meritve v stavbah

Osnovne frekvence nihanja stavbe so odvisne predvsem od njene višine (št. etaž). V Bovški kotlini prevladujejo dvonadstropne hiše, nekaj pa je tudi večnadstropnih stavb. Starejše stavbe imajo večinoma kamnito zidovje, novejše pa opečnato (Tomažević in drugi, 2005; Godec in drugi, 2006). Z metodo mikrotremorjev smo raziskali dvajset stavb v Bovcu, Čezsoči in Kal-Koritnici. Enajst stavb je dvonadstropnih, šest trinadstropnih in tri štirinadstropne. Meritve smo izvedli v vseh etažah stavbe, in sicer v bližini masnega središča etaže. Vodoravni komponenti senzorja sta bili usmerjeni v vzdolžni in prečni smeri stavbe. Posamezna meritev je trajala deset minut, kar omogoča analizo do spodnje meje frekvence okoli 1,0 Hz (SESAME, 2004). Obdelava podatkov je potekala podobno kakor pri meritvah na prostem površju. Za oceno osnovnih frekvenc nihanja stavbe v vzdolžni in prečni smeri smo uporabili predvsem amplitudne spektre zapisov na obeh vodoravnih komponentah za meritve v najvišji etaži. Meritve v različnih etažah iste stavbe so dale enake rezultate glede frekvenc nihanja, le odziv se je z višino ustrezno povečeval. Dodatno smo analizirali tudi razmerje spektrov zapisov med najvišjo etažo in



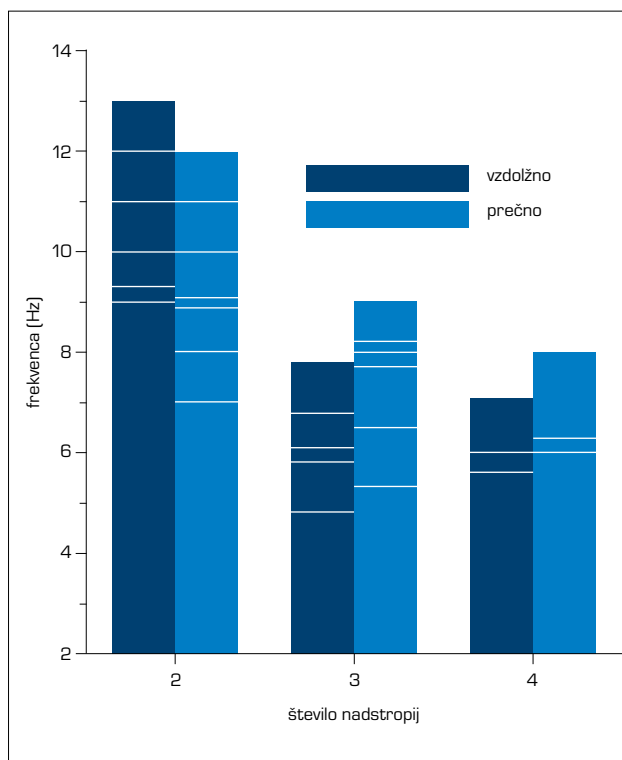
Slika 5. Plasti konglomerata v Bovški terasi imajo velik vpliv na lastno frekvenco usedlin, ker predstavljajo plitvo ležeč kontrast seizmične hitrosti.

Figure 5. Conglomerat layers inside the Bovec terrace have a great influence on the fundamental frequency of sediments, because they represent a shallow contrast in seismic velocity.



Slika 6. Primerjava meritev mikrotremorjev na prostem površju in v stavbah za šest hiš v Bovški kotlini. Za vsako hišo: a) spektralno razmerje meritev na prostem površju, b) amplitudni spekter vodoravnih komponent za meritve v najvišjem nadstropju.

Figure 6. Comparison of microtremor measurements at free-field and in buildings for six houses in the Bovec basin. For each building: a) free-field spectral ratio, b) amplitude spectra of horizontal components for measurements at highest floor.



Slika 7. Diagram odvisnosti glavnih frekvenc stavbe od njene višine (št. nadstropij) za dvajset raziskanih stavb: enajst dvonadstropnih, šest trinadstropnih in tri štirinadstropne.

Figure 7. Graph of the building main frequency vs. height (no. of storeys) for 20 examined buildings: 11 two-storey, 6 three-storey and 3 four-storey buildings.

prilličjem in usmerjenost mikrotremorjev s korakom 100. Vse tri metode so dale primerljive rezultate. Za vse izmerjene stavbe je bilo mogoče določiti tudi obe glavni frekvenci nihanja. V bližini stavbe, vendar dovolj daleč, da smo se izognili njenemu vplivu, smo izvedli tudi meritve na prostem površju, ki so omogočale primerjavo za oceno nevarnosti resonance med tlemi in stavbo.

Slika 6 kaže rezultate analiz za šest stavb, tri na območju Brda v Bovcu, po ena pa na območju Male vasi v Bovcu, Čezsoče in Kala-Koritnice. Njihove lokacije so prikazane na sliki 1. Stavbe H1-H5 so dvonadstropne, H6 pa je trinadstropna. Za vsako stavbo sta prikazana dva diagrama: a) spektralno razmerje meritev na prostem površju, b) amplitudni spekter obeh vodoravnih komponent za meritve v najvišjem nadstropju. Komponenta »N-S« ustreza vzdolžni, komponenta »E-W« pa prečni smeri stavbe.

Pri dvonadstropni stavbi v Mali vasi (H1), ki je bila precej poškodovana ob obeh potresih, so meritve na prostem površju (8,0 Hz) in v stavbi (7,6 in 8,7 Hz) pokazale spektralne vrhove pri zelo podobnih frekvencah. To kaže, da je verjetnost, da je prišlo do resonance med tlemi in stavbo, velika. Pri potresu 1998 je bila ocenjena intenziteta v Mali vasi za celo

stopnjo višja (VII EMS-98) kakor v drugih delih Bovca (VI EMS-98). Na območju Brda smo ugotovili, da se razmere precej spremenijo na relativno majhni razdalji. To je sicer splošna značilnost Bovca, kjer je geološka zgradba precej pestra, saj leži mesto deloma na ledeniških, deloma pa na rečnih usedlinah spremenljive debeline. Pri dveh dvonadstropnih hišah, ki sta oddaljeni le 100 m, smo pri prvi (H2) ugotovili verjetnost resonance, pri drugi (H3) pa ne, saj je lastna frekvenca tal pri H2 9,3 Hz, pri H3 pa 17,5 Hz, medtem ko sta osnovni frekvenci obeh stavb podobni (9-10 Hz). To se ujema s stopnjo poškodb ob obeh potresih. Trinadstropna stavba na tem območju (H6) ima nižji osnovni frekvenci (5,8 in 6,6 Hz), zato ob lastni frekvenci tal (11,2 Hz) možnosti za resonanco skoraj ni. V Čezsoči so bile nekatere stavbe leta 2004 bolj poškodovane kakor leta 1998, kar pa še ni pojasnjeno in je lahko povezano z nekoliko drugačnim mehanizmom pretrga ob Ravenskem prelomu in s tem drugačnim sevanjem potresnih valov iz žarišča potresa. Primer dvonadstropne hiše (H4) kaže, da so verjetni tudi resonančni učinki med tlemi in stavbami, saj se lastne frekvence tal (8,0 Hz) in stavbe (8,5 in 10,2 Hz) malo razlikujejo. V delu Kala-Koritnice (H5), ki je bil poškodovan ob obeh potresih, je primerjava lastne frekvence usedlin (8,6 Hz) in stavbe (8,3 in 8,8 Hz) pokazala, da je verjetnost, da so bile poškodbe večje zaradi resonance med tlemi in objekti, velika.

Prispevek raziskav vpliva resonance med tlemi in stavbami z mikrotremorji je predvsem ta, da omogoča z relativno preprostimi meritvami oceno obeh glavnih frekvenc nihanja. Za vseh dvajset izmerjenih stavb v Bovški kotlini sta vzdolžna in prečna frekvenca v odvisnosti od števila nadstropij prikazani na diagramu na sliki 7. Razlika v vzdolžni in prečni frekvenci je razmeroma majhna (0,5-2 Hz). Dvonadstropne hiše, ki prevladujejo, imajo frekvenco v razponu od 7–13 Hz, tri- in štirinadstropne stavbe pa v razponu od 5–9 Hz. Med tri- in štirinadstropnimi stavbami ni značilne razlike. Pri nadaljnji oceni vpliva resonance bi bila za posamezne objekte potrebna še podrobnejša analiza načina gradnje, ranljivosti in dinamičnega odziva na potresno obtežbo, kar pa presega namen tega članka.

Iz opravljenih meritev izhaja, da je frekvenčno območje povečane ranljivosti stavb, ki prevladujejo v Bovški kotlini, med 7 in 11 Hz. To se prekriva z območjem lastne frekvence usedlin med 6 in 12 Hz, ki prevladuje na karti, izdelani na podlagi meritev na prostem površju (rdeči odtenki na sliki 4). Iz tega lahko sklenemo, da je v večjem delu Bovške kotline (več kakor 60 % celotnega raziskanega območja) nevarnost resonance med tlemi in stavbami razmeroma velika in da je zagotovo prispevala k večjim poškodbam. Območja v tem frekvenčnem območju se ujemajo z območji največjih poškodb pri obeh potresih, ki so obsegale Malo vas, del Brda, del osrednjega dela Bovca, Čezsočo in del Kala-Koritnice.

Sklepne misli

Metoda mikrotremorjev se je izkazala za učinkovito pri oceni lokalnih potresnih učinkov v primeru zapletene geološke zgradbe. Ta je značilna tudi za Bovško kotlino, ki jo zapolnjujejo zelo raznovrstne ledeniško-rečne usedline. Pokazalo se je, da lahko sprijete plasti (konglomerat, tilt), ki so v obliki nepravilnih teles znotraj peščenega proda ali tila, izrazito vplivajo na lastno frekvenco usedlin. Lego takih plasti je zaradi njihove nepravilne oblike in majhnega kontrasta električne upornosti težko raziskati z geofizikalnimi metodami. Slabo poznavanje oblike sedimentacijskega bazena, njegove notranje strukture in seizmičnih hitrosti preprečuje tudi uporabo numeričnih metod modeliranja potresnega nihanja tal. Zato so bile meritve mikrotremorjev v dovolj gosti mreži zelo koristne za količinsko potresno mikrorajonizacijo območja. Primerjava z rezultati meritev mikrotremorjev v stavbah, ki podajo njihove osnovne frekvence nihanja, je omogočila določitev območij nevarnosti resonančnih učinkov med tlemi in stavbami. Ker se frekvenčno območje, ki prevladuje na karti lastne frekvence usedlin Bovške kotline, v precejšnjem delu prekriva z lastnimi frekvencami nihanja prevladujočih stavb, je verjetnost, da je k obsegu in velikosti poškodb v potresih leta 1998 in 2004 pomembno prispevala resonanca med tlemi in stavbami, velika.

Zahvala

Avtor se zahvaljuje Mihi Lubiju, ki je sodeloval pri terenskih meritvah in analizi podatkov.

Viri in literatura

1. Bard, P. Y., 1999. Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? V: Irikura, K., Kudo, K., Okada, H., Sasatami, T. (ur.): The effects of surface geology on seismic motion. Balkema, 1251–1279.
2. Bavec, M., Tulaczyk, S. M., Mahan, S. M., Stock, G. M., 2004. Late Quaternary glaciation of the Upper Soča River Region (Southern Julian Alps, NW Slovenia). *Sedimentary Geology*, 165, 265–283.
3. Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P. Y., Cotton, F., Moczó, P., Kristek, J., Fäh, D., 2006. H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations. *Geophys. J. Int.*, 167, 827–837.
4. Buser, S., 1986. Osnovna geološka karta Jugoslavije 1: 100.000 – lista Tolmin in Videm. Geološki zavod Slovenije.
5. Gallipoli, M. R., Mucciarelli, M., Castro, R. R., Mochavesi, G., Contri, P., 2004. Structure, soil-structure response and effects of damage based on observations of horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremors. *Soil Dyn. Earth. Eng.*, 24, 487–495.
6. Godec, M., Šket-Motnikar, B., Vidrih, R., Zupančič, P., 2006. Pregled poškodb ob potresih leta 1998 in 2004 v zgornjem Posočju. *Ujma*, 20, 275–281.
7. Gosar, A., 1999. Rezultati raziskav o vplivih lokalne geološke zgradbe na poškodbe objektov. *Ujma*, 13, 102–106.
8. Gosar, A., Stopar, R., Car, M., Mucciarelli, M., 2001. The earthquake on 12 April, 1998 in Krn mountains (Slovenia): ground motion amplification study using microtremors and modelling based on geophysical data. *J. Appl. Geoph.*, 47/2, 153–167.
9. Gosar, A., 2007a. Mikrotremorji – metoda za ocenjevanje vpliva lokalne geološke zgradbe na potresno nihanje tal in ranljivosti objektov. *Ujma*, 21, 145–154.
10. Gosar, A., 2007b. Microtremor HVSR study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes. *Engineering geology*, 91, 178–193.
11. Jurkovšek, B., 1986. Osnovna geološka karta Jugoslavije 1 : 100.000 – lista Beljak in Ponteba. Geološki zavod Slovenije.
12. Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P., 2001. Potresna nevarnost Slovenije – karta projektnega pospeška tal. Uprava RS za geofiziko.
13. Mucciarelli, M., Gallipoli, M. R., 2001. A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 42, 255–266.
14. Ribarič, V. 1987. Seizmološka karta za povratno periodo 500 let. Zajednica za seizmologiju SFRJ, Beograd.
15. Ribičič, M., Vidrih, R., Godec, M., 2000. Seizmogeološki in geotehnični pogoji gradnje v zgornjem Posočju. *Geologija*, 43, 115–143.
16. SESAME 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing and interpretation, 62 pp., http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Delivables/Del-D23-HV_User_Guidelines.pdf
17. Tomažević, M., Lutman, M., Klemenc, I., Weiss, P., 2005. Obnašanje zidanih stavb med potresom v Bovcu 1