

# REZULTATI RAZISKAV O VPLIVIH LOKALNE GEOLOŠKE ZGRADBE NA POŠKODBE OBJEKTOV

## Studies of the Impact of Local Geological Structure on Damage to Buildings

Andrej Gosar\* UDK 551.2:550.34(497)\*1998\*

### Povzetek

V Zgornjem Posočju, ki ga je 12. aprila 1998 prizadel potres ( $M_{WA} = 6,0$ ), smo raziskali vpliv lokalne geološke zgradbe na ojačenje nihanja tal in posledično na poškodbe zgradb. Uporabili smo Nakamuraovo metodo analize seizmičnega nemira in enodimenzionalno modeliranje na podlagi rezultatov geofizikalnih raziskav (refrakcijska seizmika, meritve seizmične hitrosti v vrtninah in geoelektrično sondiranje). Velike razlike pri stopnji poškodb lahko pripišemo predvsem razlikam pri debelini in fizikalnih lastnostih precej heterogenih kvartarnih sedimentov. V Bovcu sta obe metodi pokazali bistveno večje ojačenje v frekvenčnem območju ranljivosti zgradb (1–10 Hz) v Mali vasi kot v srednjem delu mesta, kar se ujema z razporeditvijo poškodb. V Mali vasi je bil verjetno pomemben vpliv dvojne resonance lokalnih tal in pretežno dvonadstropnih hiš pri frekvenci okoli 6 Hz. V Koritnici so znatne razlike pri ojačenju med vzhodnim robom vasi, ki leži na karbonatni podlagi in srednjim delom, ki leži na glaciofluvialnih nanosih. V Čezsoči, ki leži na okoli 20 m debelih fluvialnih nanosih, je ojačenje v frekvenčnem območju 1–10 Hz med 2 in 4. V Plužni, ki leži na flišu prekritem s tanjšo preperino, je bilo ojačenje v območju ranljivosti zgradb majhno. V Spodnjih Drežniških Ravnah, ki so bile ob potresu med najbolj poškodovanimi, ima funkcija ojačenja dva izrazita vrha pri 2 in 10,5 Hz. V Drežnici, kjer so bile poškodbe le manjše, pa je raven ojačenja v tem območju nizka.

### Abstract

In Zgornje Posočje, which was struck by an  $M_{WA}=6.0$  earthquake on 12 April 1998, the effect of the local geology on ground motion amplification and damage to buildings was studied. Nakamura's method of microtremor analysis and one-dimensional modelling based on the results of geophysical investigations (seismic refraction method, seismic velocity measurements in boreholes and DC electrical sounding) were employed. Great differences in damage could be related to variations in the thickness and in physical properties of rather heterogeneous Quaternary deposits. In Bovec, both methods showed a significantly higher amplification in the frequency range of building vulnerability (1–10 Hz) in Mala vas than in the central part of the town. This is in agreement with the distribution of damage. In Mala vas, the influence of the double-resonance effect of local soil and mainly two-storey houses at a frequency around 6 Hz might have had an important influence. In Koritnica a substantial difference in amplification was observed between the eastern rim of the village, built on carbonate bedrock, and the central part of the village lying on glaciofluvial deposits. In Čezsoča, where the thickness of fluvial deposits is above 20 m, amplifications between 2 and 4 in a frequency range of 1–10 Hz were obtained. In Plužna, which is located on flysch rock covered with a thin layer of soil, the amplification in the range of building vulnerability was low. In Spodnje Drežniške Ravne, one of the most damaged villages, the amplification function has two distinctive peaks at 2 and 10.5 Hz. In Drežnica, where only small damages were reported, the amplification level in the same frequency range is low.

## Uvod

Potres z nadžariščem v Krnskem pogorju ( $M_{WA} = 6,0$ ), ki je 12. aprila 1998 prizadel Zgornje Posočje, je povzročil največ škode v Drežniških Ravnah, Magozdu, Bovcu, Kalu–Koritnici, Čezsoči in Lepeni. Največja intenziteta je bila ocenjena na VII. do VIII. stopnjo po evropski potresni lestvici (EMS-98) (Zupančič in sod., 1999). Ena glavnih značilnosti tega potresa je bila velika razlika pri stopnji poškodovanosti zgradb na majhnih razdaljah, torej na podobni oddaljenosti od žarišča potresa. To je le delno posledica različne potresne odpornosti objektov, saj je način gradnje na širšem območju podoben. Vzroke je treba zato iskati predvsem v različnem ojačenju nihanja tal zaradi lokalnih geoloških pogojev. Najbolj izrazita razlika pri stopnji poškodovanosti je bila v Bovcu, kjer so tudi novejša zgradbe v Mali vasi utrpeli bistveno hujše poškodbe kot starejše hiše v preostalih predelih mesta.

## Vrednotenje vpliva lokalne geološke zgradbe

Vpliv lokalne geološke zgradbe na učinke potresa (ang. »site effects«) je že dolgo znan pojav, ki pa se je v preteklosti vrednotil predvsem kvalitativno kot ocena prirastka intenzitete glede na izbrano referenčno kamnino (Borcherd, 1970). Ta način se uporablja predvsem pri seizmični mikrorajonizaciji. Glavni dejavniki, ki se pri vrednotenju upoštevajo, so: razlika pri akustični impedanci med sedimenti in kamnino v podlagi, nivo podzemne vode in pojav resonance v tleh. Prirastki intenzitete se ocenjujejo s pomočjo empiričnih enačb (Atakan, 1995).

V Zgornjem Posočju pred velikonočnim potresom še ni bila opravljena seizmična mikrorajonizacija, ki bi obsegala dodatne terenske raziskave. Narejena pa je bila podrobnejša rajonizacija za potrebe civilne zaščite (Vidrih in sod., 1991). Temeljila je na obstoječih geoloških kartah. Dobro je razme-

\* dr., Ministrstvo za okolje in prostor, Uprava Republike Slovenije za geofiziko, Pot na Golovec 25, Ljubljana

jila obsežnejša območja z različno kvaliteto tal, ni pa seveda mogla predvideti podrobnejših razlik pri učinkih, ki so bile značilne za potres 12. aprila 1998 (Ribičič in Vidrih, 1999).

Medtem ko z opisanimi metodami le ocenjujemo prirastek intenzitete, nam kvantitativne metode omogočajo neposredno merjenje ali modeliranje ojačenja nihanja tal. Uporabljajo se predvsem trije pristopi (Atakan, 1995; Gosar in Živčič, 1998):

- primerjava spektrov zapisov potresov na različnih tleh
- razmerje spektrov horizontalne in vertikalne komponente na isti lokaciji za meritve mikroseizmičnega nemira (mikrotremorje) ali za zapise potresov
- modeliranje.

Pomembna je uporaba različnih komplementarnih metod, saj samo z empiričnimi seizmološkimi metodami navadno vzrokov ne moremo pojasniti, analitične metode (modeliranje) pa so omejene s slabim poznavanjem globinske zgradbe in fizikalnih parametrov.

V Zgornjem Posočju smo v sodelovanju z inštitutom ISMES iz Bergama (Italija) kmalu po potresu opravili meritve in analize seizmičnega nemira. Sledile se obsežnejše geofizikalne raziskave, ki so bile podlaga za enodimenzionalno modeliranje ojačenja nihanja tal. Te raziskave so bile opravljene delno v okviru projekta geoloških in geotehničnih raziskav za podporo sanacije objektov, ki ga je koordiniral Gradbeni inštitut-ZRMK (Ribičič, 1998), delno pa v okviru projekta geoloških in geofizikalnih raziskav potresnega območja Uprave RS za geofiziko (Gosar in sod., 1999). V obeh primerih je geofizikalne meritve opravil Oddelek za geofiziko Inštituta za geologijo, geotehniko in geofiziko (sedaj Geoinženiring), financiralo pa jih je Ministrstvo za okolje in prostor.

## Meritve mikroseizmičnega nemira

Povezanost spektralnih lastnosti mikrotremorjev (nizkoamplitudne oscilacije tal naravnega ali umetnega izvora) z lokalno geološko zgradbo je znana že okoli tri desetletja. Sprva so pri študiju uporabljali spektre horizontalnih komponent, vendar se je pokazalo, da je težko ločiti vpliv lokalnih tal od vpliva seizmičnega vira. Nakamura (1989) je predlagal metodo, ki temelji na spektralnem razmerju horizontalne (H) in vertikalne (V) komponente. Metoda temelji na dveh predpostavkah: (1) da predstavljajo seizmični nemir predvsem Rayleighovi valovi in (2) da lokalna tla ne vplivajo na vertikalno komponento zapisa. Teoretične študije so pokazale, da je: (1) frekvenca osnovnega vrha na spektralnem razmerju H/V odvisna od lokalnih tal in neodvisna od lastnosti vira in (2) da je amplituda odvisna tako od lokalnih tal kot od oddaljenosti vira (Mucciarelli, 1998). Znani problemi Nakamurove metode so: (1) da vpliv vira ni dovolj znan, (2) da je težko ločiti seizmični nemir od inštrumentalnega šuma in (3) občutljivost za nekatere vrste motenj (predvsem veter). Pri tem je zanimivo, da teoretično ozadje metode še ni povsem pojasnjeno, čeprav le redki dvomijo o njeni uspešnosti v praksi. V literaturi jo zato večinoma uvrščajo med empirične metode. Nakamurova metoda je torej bolj zanesljiva pri določanju frekvenčnih območij z zvečanim ojačenjem (vrhov v funkciji ojačenja) kot pri opredelitvi njegove amplitude.

V Zgornjem Posočju smo opravili meritve nemira v sodelovanju z dr. Mucciarellijem iz ISMES na desetih lokacijah. Uspešne so bile na osmih lokacijah (Bovec – center, Bovec – Mala vas, Čezsoča, Plužna, Kal–Koritnica (dve lokaciji), Spodnje Drežniške Ravne in Drežnica), na dveh lokacijah pa so bile zaradi vetrovnosti neuspešne (slika 1). Uporabljali smo trikomponentni seizmograf, ki so ga razvili posebej za tovrstne meritve na ISMES. Sestoji iz seizmometra

Lennartz 3D Lite (1 Hz), zajemalne enote PRAXS-10 (24-bitna) in računalnika (slika 2). Zmanjšanje inštrumentalnega šuma je ključno za uspešne meritve nizkoamplitudnega nemira. Zunanji kabli so običajno glavni vir motenj, zato je pri tem seizmografu vsa oprema integrirana v skupno ohišje. Tudi računalnik med meritvami ne uporablja nobenih gibljivih sklopov, kot so ventilator ali diski. Meritve so bile opravljene v prvih dveh tednih po glavnem potresu, da smo poleg mikroseizmičnega nemira zapisali tudi več šibkih popotresnih sunkov, katerih število s časom praviloma pomenjuje. Na vsaki lokaciji smo opravili do deset enominutnih meritev, vzorčevanih s frekvenco 125 Hz. Programska oprema omogoča avtomatsko analizo z Nakamurovo metodo takoj po končanih meritvah. Sestoji iz pasovnoprepustnega filtriranja v območju 0,1 do 20 Hz in Fourierjeve transformacije za 25 predefiniраниh frekvenc v območju 0,1 do 20 Hz. Funkcijo ojačenja poda aritmetična sredina razmerij H/V vseh meritev (Mucciarelli in Monachesi, 1999).



Slika 1. Karta Zgornjega Posočja z raziskanima območjema: Bovška kotlina, Drežniški kot  
Figure 1. Map of Zgornje Posočje with position of investigated locations: Bovška kotlina, Drežniški kot.

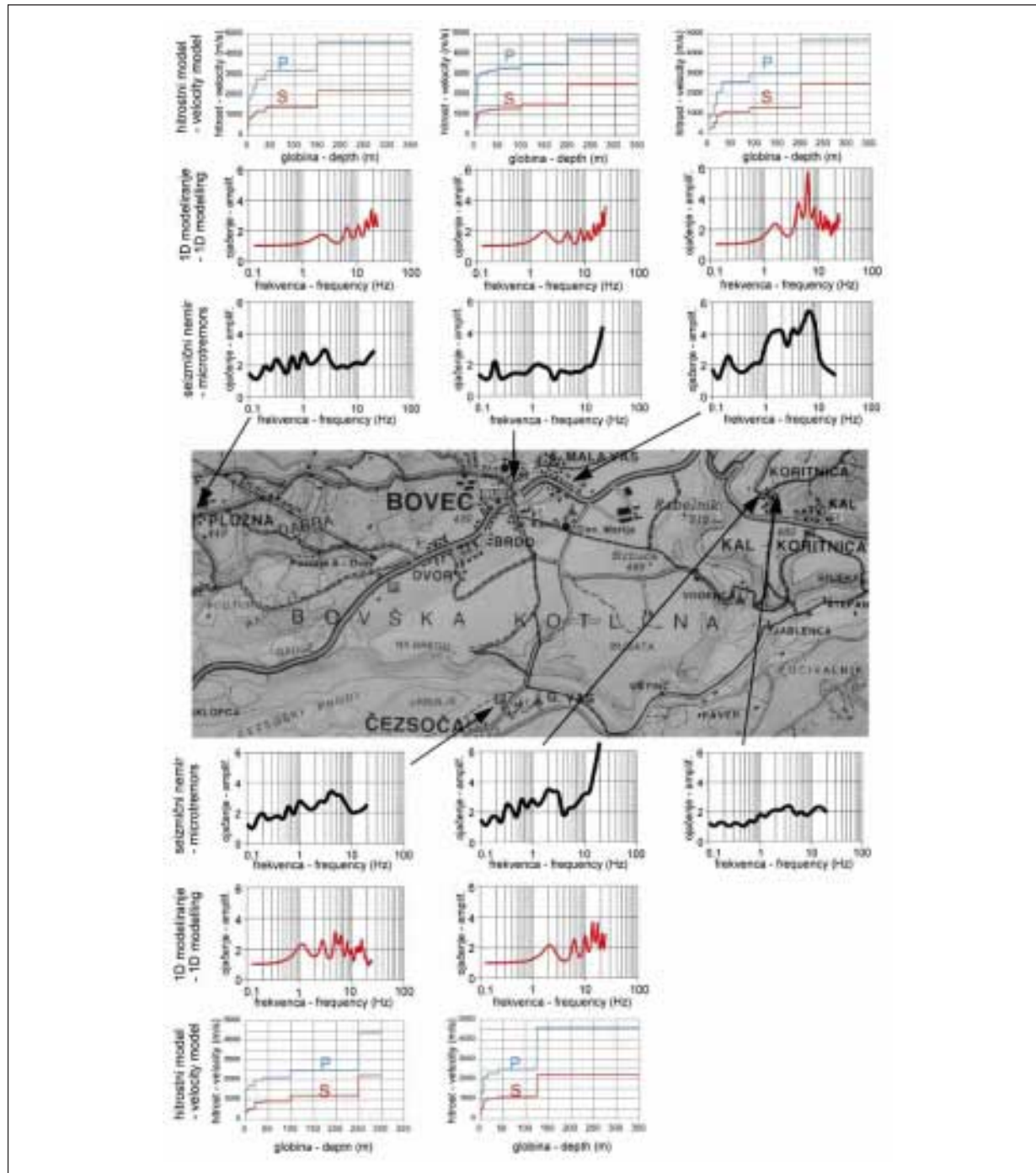


Slika 2. Seizmograf, uporabljen za meritve seizmičnega nemira  
Figure 2. Seismograph used for microtremor measurements.

## Geofizikalne raziskave in modeliranje

Geofizikalne raziskave so obsegale refrakcijske seizmične meritve s P in S-valovi na petnajstih lokacijah, meritve hitrosti seizmičnih valov v šestih vrtnah globine do 20 m ter pet globljih in 30 plitvejših geoelektričnih sond (metoda navidezne specifične upornosti) (Stopar, 1998; Stopar in Car, 1998). Z refrakcijsko seizmiko in meritvami v vrtni smo določili hitrostni model v vrhnjih 20 do 30 m, opredelitev

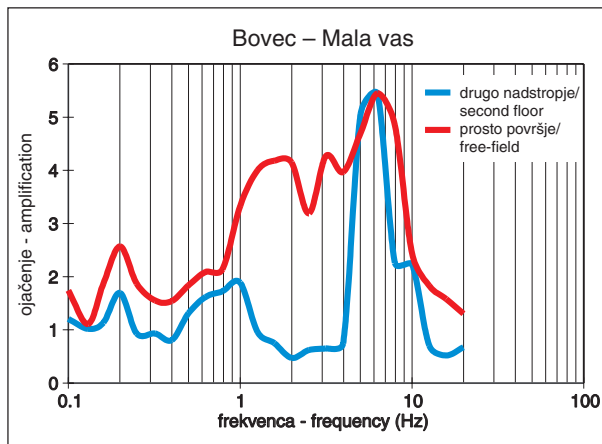
specifičnih električnih upornosti pa je olajšala litološko identifikacijo plasti. Vzoredna uporaba dveh metod je omogočila, da smo znotraj iste geološke enote (npr. znotraj glacialnih ali fluvialnih sedimentov) ugotovili geofizikalno heterogeno zgradbo. Z globokim geoelektričnim sondiranjem smo ocenili globino do karbonatne podlage fliša vzdolž profila Mala vas – Čezsoča. Ojačenja nihanja tal med referenčno podlago in površino horizontalno plastovitega modela sedimentov (enodimenzionalno modeliranje) smo modelirali s programom SHAKE91 (Idriss in Sun, 1992). Program izračuna odziv za strižne valove, ki potujejo v ver-



Slika 3. Funkcije ojačenja nihanja tal za šest lokacij v Bovški kotlini, dobljene z meritvami nemira in modeliranjem  
Figure 3. Ground motion amplification functions for six locations in Bovška kotlina obtained from microtremor measurements and modelling.



tikalni smeri. Vsaka plast je opredeljena s hitrostjo S-valov, debelino, gostoto, dušenjem in elastičnimi parametri. Tipičen model je sestavljalo 15 do 17 plasti, ki smo jim opredelili debelino in hitrost S-valov, njihovo gostoto, dušenje in elastične parametre pa smo privzeli. Z večjim številom plasti smo simulirali gradient v do 250 m debeli plasti fliša.



Slika 4. Primerjava med spektrom odziva tipične dvanadstropne hiše v Bovcu – Mali vasi in ojačenjem na prostem površju

Figure 4. Comparison between the response spectrum of a typical two-storey house in Bovec-Mala vas and the free-field amplification.

## Rezultati raziskav

Geološke in geofizikalne raziskave so pokazale, da leži večji del Bovca na precej heterogenih peščeno-prodnatih, glinenih in gruščnatih sedimentih (til). Kljub temu pa razlik pri stopnji poškodb ni možno pripisati izrazitim litološkim spremembam v površinski plasti, temveč predvsem razlikam pri debelini in fizikalnih lastnostih celotnih kvartarnih sedimentov. Zaradi slabšega poznavanja debeline fliša njegov vpliv ni tako jasen. Analiza seizmičnega nemira po Nakamurovi metodi je dala bistveno večje ojačenje (do 6) v območju med 1 in 10 Hz (območje ranljivosti običajnih zgradb) v Mali vasi kot v središču Bovca (do 2) (slika 3). Modeliranje je pokazalo, da lahko večje ojačenje pripišemo večji debelini kvartarnih sedimentov (16 do 30 m) in 3 do 4 m debeli nizkohitrostni površinski plasti gline. V srednjem delu Bovca so namreč peščeni in gruščnati sedimenti debeli le 3 do 6 m. Izmerjene hitrosti S-valov v kvartarnih sedimentih so med 250 in 550 m/s, v flišu pa 900 do 1300 m/s (Gosar in sod., 1999). Pri razlaganju vrednosti amplitude ojačenja se moramo zavedati omejitev Nakamurove metode, ki je uspešnejša pri določitvi frekvenčnega območja povečanega ojačenja.

Za grobo oceno lastne frekvence ene same plasti lahko uporabimo enačbo  $f = Vs/4h$ , kjer je  $f$  frekvenca osnovnega moda,  $Vs$  hitrost S-valov in  $h$  debelina plasti. Pri  $Vs = 1000$  m/s in  $h = 250$  m dobimo  $f = 1$  Hz, pri  $Vs = 300$  m/s in  $h = 7,5$  m pa  $f = 10$  Hz. Pri analizi vpliva lokalne geološke zgradbe se torej ne smemo omejiti le na nekaj vrhnjih metrov, ki so predmet večine raziskav, saj na območje ranljivosti običajnih zgradb (1 do 10 Hz) vpliva kar nekaj sto metrov debela plast sedimentov. Na poškodbe ob potresu vpliva seveda tudi kvaliteta samih temeljnih tal in njej primerne izvedba temeljenja, vendar to ne sodi med učinke ojačenja nihanja tal ob potresu, ki jih tu obravnavamo.

Primerjalne meritve seizmičnega nemira med prsto površino tal in drugim nadstropjem močno poškodovane dvanadstropne hiše v Mali vasi so pokazale, da ima dinamični odziv zgradbe izrazit vrh pri 6 Hz, kar je zelo blizu vrhu v

funkciji ojačenja tal (slika 4). Dvojna resonanca (lokalnih tal in zgradbe) je verjetno imela pomemben vpliv in lahko pojasni razmeroma hude poškodbe v Mali vasi. Za izpeljavo zanesljivejših sklepov, bi bilo v sodelovanju z gradbenimi strokovnjaki potrebno opraviti več meritev, ki takoj po potresu iz varnostnih razlogov niso bile možne.

V Koritnici so meritve seizmičnega nemira pokazale znatno razliko pri ojačenju med vzhodnim robom vasi, ki leži na karbonatni podlagi in je utrpel le manjše poškodbe, in njenim srednjim delom, ki leži na 3 do 10 m debelih glaciofluvialnih peščeno-prodnatih nanosih. Tu je bila večina hiš zelo poškodovanih. Precej raven spekter z ojačenjem med 2 in 4 v frekvenčnem območju 1–10 Hz smo dobili v Čezsoči, kjer je debelina nesprijetega proda in peska večja od 20 m, pod njo pa je fliš neznanne debeline. V Plužni, ki leži na flišu, pokritem s tanjšo preperino, je bilo ojačenje zaradi lokalnih tal pod 10 Hz majhno, kar se ujema s tem, da poškodba ni bilo (slika 3).

V Drežniškem kotu so bile posledice potresa najhujše v Spodnjih Drežniških Ravnah in Magozdu, v manj kot 2 km oddaljeni Drežnici pa so bile bistveno manjše. Meritve nemira v Spodnjih Drežniških Ravnah so pokazale veliko ojačenje (do 6) z dvema vrhoma pri frekvenci 2 Hz in med 10 in 11 Hz (slika 5). Nizkohitrostni sedimenti (predvsem til) debeline do 10 m, ugotovljeni z vrtnjem in refrakcijsko seizmiko, so pri modeliranju prav tako pokazali izrazit vrh med 10 in 11 Hz. Globlji podatki niso bili na voljo, zato smo debelino fliša lahko le ocenili na okoli 70 m in pri modeliranju z uporabo nižje hitrosti S-valov (700 m/s) kot v Bovški kotlini dobili vrh pri 2 Hz, ki se ujema z meritvami nemira. Nižja hitrost je verjetna zaradi večje heterogenosti fliša. V Drežnici so meritve nemira pokazale majhno ojačenje v območju med 1 in 10 Hz, nenavaden pa je izrazit vrh (do 8) pri 0,2 Hz, ki ga lahko povzroči le zelo debela plast sedimentov, vendar merska napaka ni izključena (slika 5). To je frekvenca, pri kateri običajne zgradbe niso ranljive.

## Sklep

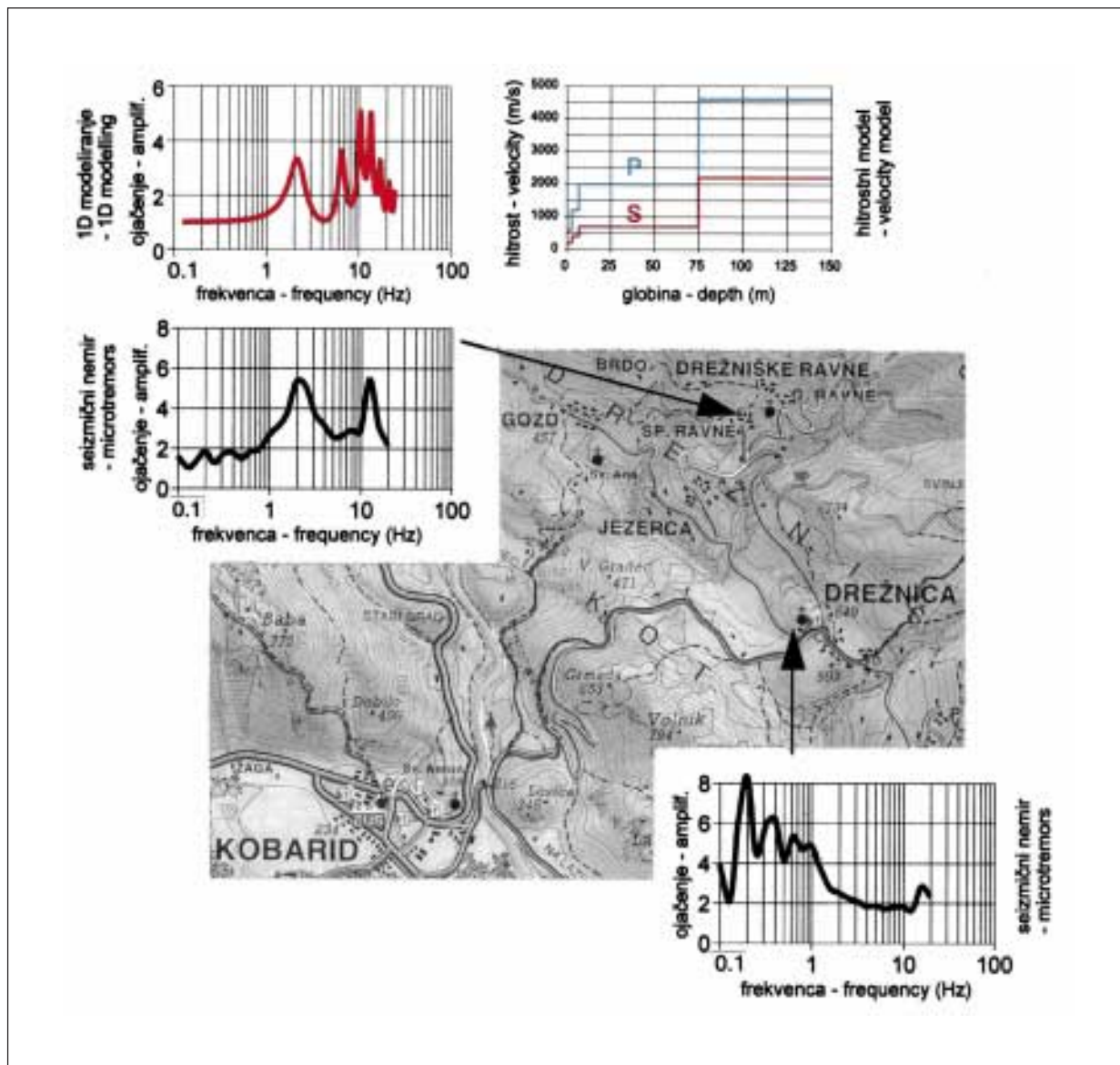
Debelina kvartarnih sedimentov v Bovški kotlini in Drežniškem kotu vpliva pri hitrostih S-valov, ki jih je dala refrakcijska seizmika, predvsem na spekter ojačenja v frekvenčnem območju 5 do 10 Hz. Na del spektra med 1 in 5 Hz tako vpliva debelejša skladovnica predvsem flišnih kamnin oziroma globina do karbonatne podlage. To smo v Bovški kotlini na podlagi nekaterih globokih geoelektričnih sond lahko le ocenili na okoli 250 m, v osrednjem delu pa je še večja. Na ojačenje potresnih valov v sedimentnih bazenih, kjer je izrazit kontrast med akustično impedanco sedimentov in podlago vpliva tudi oblika bazena, zato bi bilo v Bovški kotlini smiselno opraviti dvodimenzionalno modeliranje. Poznavanje reliefa podlage iz sedanjih geoloških in geofizikalnih podatkov pa je še preskromno, zato bi bilo treba pred tem opraviti obsežnejše geofizikalne raziskave, in sicer refleksijsko seizmično profiliranje in globoko geoelektrično sondiranje.

Raziskave vpliva lokalne geološke zgradbe na ojačenje nihanja tal ob potresu z analizo seizmičnega nemira in enodimenzionalnim modeliranjem na podlagi rezultatov geofizikalnih raziskav v Zgornjem Posočju so pokazale funkcije ojačenja, ki se večinoma dobro ujemajo s stopnjo poškodb. Stroški izvedbe obeh metod so zmerni, zato bi ju bilo kot podporo projektiranju potresovarne gradnje koristno uporabljati pri kvantitativnem vrednotenju vpliva lokalne geološke zgradbe tudi na drugih potresno ogroženih območjih.

## Literatura

- Atakan, K., 1995. A review of the type of data and the techniques used in empirical estimation of local site response. Proc. Fifth International Conference on Seismic Zonation, Nice, Vol.2., 1451–1459.

2. Borcherd, R. D., 1970, Effects of Local Geology on Ground Motion near San Francisco Bay. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 60/1, 29–61.
3. Gosar, A., Živčič, M., 1998. Ojačenje nihanja tal zaradi lokalne geološke zgradbe na južnem obrobju Ljubljane (Rakova Jelša). *Potresi v Sloveniji v letu 1997*, URSG, 59–66.
4. Gosar, A., Stopar, R., Car, M., 1999. Geofizikalne raziskave lokalne geološke zgradbe in modeliranje ojačenja nihanja tal ob potresu 12. Aprila 1998 v Krnskem pogorju. *Geološki zbornik 14*, 14. Posvetovanje slovenskih geologov-povzetki referatov, 16–18.
5. Idriss, I. M., Sun, J. I., 1992. SHAKE91. A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. *Univ. of California, Davis*.
6. Mucciarelli, M., 1998. Reliability and applicability of Nakamura's technique using microtremors: and experimental approach, *Journ. of Earthq. Eng.*, 2/4, 625–638.
7. Mucciarelli, M., Monachesi, G., 1999. The Bovec (Slovenia) earthquake, April 1998: A preliminary correlation among damage, ground motion amplification and building frequencies, *Journ. of Earthq. Eng.*, 3/3, 317–327.
8. Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *QR Railway Tech. Res. Inst.*, 30/1, 25–33.
9. Ribičič, M., 1998. Analiza učinkov potresa v Posočju dne 12. 04.1998, Končno poročilo. *Gradbeni inštitut ZRMK*.
10. Ribičič, M., Vidrih, R., 1999. Seizmična mikrorajonizacija Posočja. *Geološki zbornik 14*, 14. Posvetovanje slovenskih geologov-povzetki referatov, 40–41.
11. Stopar, R., 1998. Preliminarne seizmične preiskave na širšem področju Bovca in Drežniških Ravneh. *Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko*, 18 str.
12. Stopar, R., Car, M., 1998. Geofizikalne raziskave za potrebe odprave posledic potresa v Posočju 1998. *Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko*, 30 str.
13. Vidrih, R., Godec, M., Lapajne, J., 1991. Potresna ogroženost Slovenije, občine Brežice, Idrija, Krško, Tolmin in Ljubljanske občine. *Seizmološki zavod R Slovenije in Republiški štab za civilno zaščito*, 214 str.
14. Zupančič, P., Ceci, I., Gosar, A., Poljak, M., Živčič, M., 1999. Nekatere seizmološke in geološke značilnosti potresa 12. aprila 1998 v Krnskem pogorju. *Geološki zbornik 14*, 14. Posvetovanje slovenskih geologov-povzetki referatov, 58–59.



Slika 5. Funkcije ojačenja nihanja tal v Drežniškem kotu, dobljene z meritvami nemira in modeliranjem.

Figure 5. Ground motion amplification functions for two locations in Drežniški kot obtained from microtremor measurements and modelling.