



RAZISKAVE KRAJEVNEGA VPLIVA MEHKIH SEDIMENTOV NA POTRESNO NIHANJE TAL NA OBMOČJU LJUBLJANE Z METODO MIKROTREMORJEV

STUDY OF THE SITE EFFECTS OF SOFT SEDIMENTS ON SEISMIC GROUND MOTION IN THE LJUBLJANA AREA USING MICROTREMOR METHOD

Andrej Gosar, Janez Rošar*

Povzetek

Ljubljana se nahaja na enem od treh območij v Sloveniji z največjo potresno nevarnostjo, obenem pa je to tudi najgostejše poseljeno območje Slovenije. Vpliv kvartarnih sedimentov na potresno nihanje tal lahko pričakujemo na celotnem mestnem območju, ki se nahaja v do 200 m globokem sedimentnem bazenu. Še posebno velik vpliv pa pričakujemo v južnem delu Ljubljane, ker je ta zgrajen na zelo mehkih jezerskih sedimentih. Zaradi pomanjkanja vrtin, geofizikalnih in seizmoloških podatkov, so obstoječe potresne mikrorajonizacije Ljubljane dokaj nezanesljive. Za oceno lastne frekvence sedimentov smo izvedli študijo z metodo spektralnega razmerja med vodoravno in navpično komponento (HVSR) zapisa mikrotremorjev. Meritve na prostem površju smo izvedli v 200 x 200 metrov gosti mreži točk (1.223 meritev) na 45 km² velikem območju. Analizirali smo eksperimentalne pogoje, ki lahko vplivajo na kvaliteto podatkov, kot je močan veter in zasičenje tal z vodo. Na celotnem južnem delu mesta smo dobili zelo jasne vrhove v spektralnem razmerju, medtem ko je bil odziv v severnem delu mesta v splošnem manjši zaradi manjšega impedančnega kontrasta med prodrom in skalno podlago. Karta lastnih frekvenc je pokazala njihovo porazdelitev v razponu 0,9–10 Hz. V južnem delu mesta je korelacija med frekvenco sedimentov in njihovo debelino, znano iz geofizikalnih podatkov in redkih vrtin, dobra. Povprečna amplituda HVSR vrhov je znatno višja v južnem ($6,7 \pm 2,4$) kot v severnem delu ($4,0 \pm 2,0$) mesta, kar kaže na visok impedančni kontrast med jezerskimi sedimenti in skalno podlago. Podatke o lastni frekvenci sedimentov smo uporabili za ugotavljanje nevarnosti resonance med tlemi in stavbami, v katerih so bile prav tako izvedene meritve mikrotremorjev, ki so opisane v posebnem članku (Šket Motnikar in drugi, 2010).

Uvod

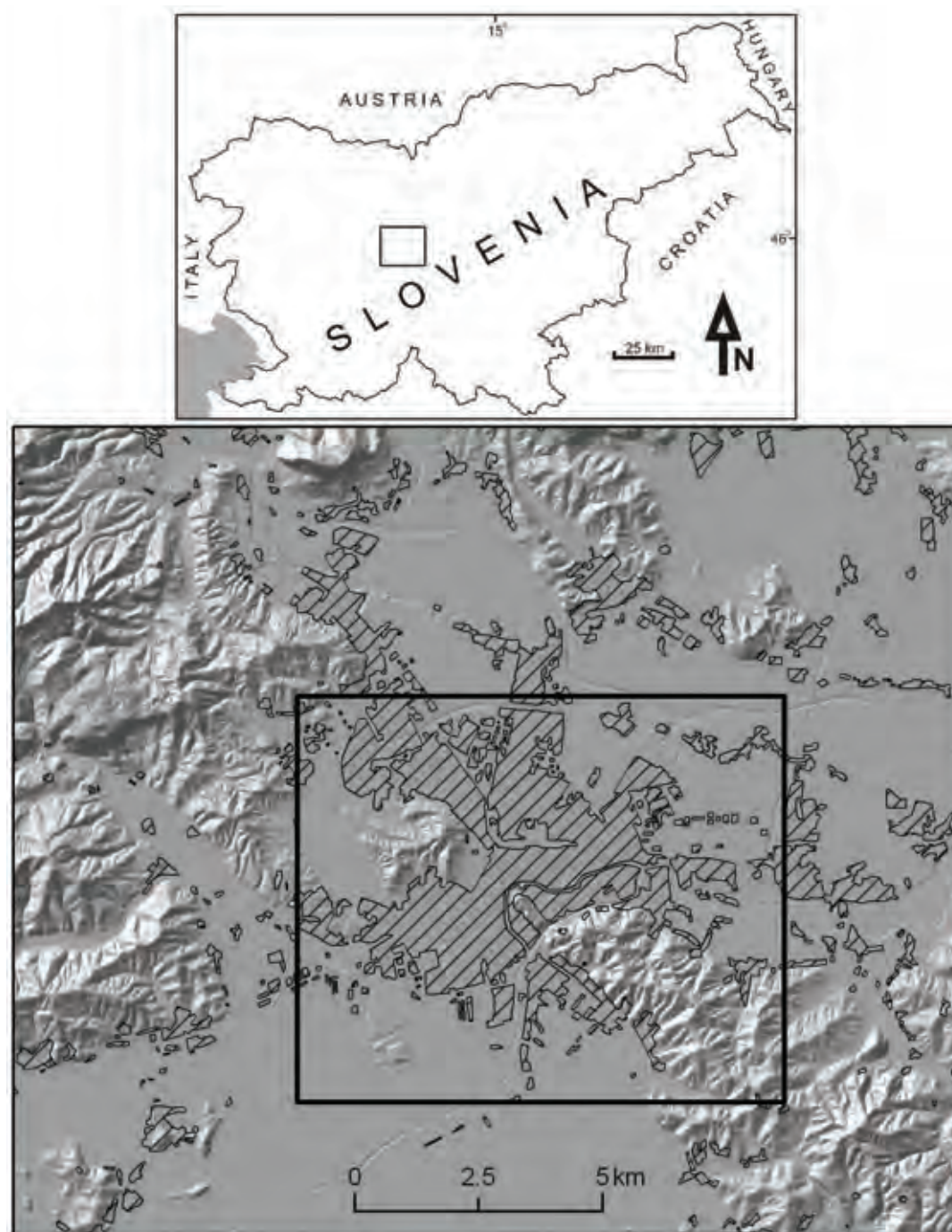
Ljubljana se nahaja v plitvem sedimentnem bazenu, zapolnjenem s kvartarnimi sedimenti (slika 1). Širše območje Ljubljane je med potresno najbolj dejavnimi v Sloveniji (slika 2), čeprav v zadnjih 45 letih tu ni bilo potresov, ki bi povzročili poškodbe stavb. Zadnji tak potres se je zgodil leta 1963 na območju Litije ($M=4,9$) in je v Ljubljani dosegel intenziteto VI–VII stopnje po MSK

* Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta

Abstract

The city of Ljubljana is located in one among the three areas with the highest seismic hazard in Slovenia, being the one most densely populated. Site effects due to Quaternary sediments, which fill up to 200 m deep basin, are characteristic for the whole city area and can be especially strong in the southern part of Ljubljana, which is built on very soft lacustrine deposits. Existing microzonation studies of the city are inadequate, since there is a lack of borehole, geophysical and earthquake data. The microtremor horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSR) method was therefore applied to a 200 m dense grid of free-field measurements over an area of 45 km² (1,223 measured points) in order to assess the fundamental frequency of the sediments. Experimental conditions which can influence data quality, such as strong wind and water saturation of soil, were analysed. Very clear HVSR peaks were obtained in the entire southern part of the city, whereas in the northern part the site response is in general lower, due to lower impedance contrast of gravel with the bedrock. The iso-frequency map of sediments shows a distribution in the range of 0.9–10 Hz. In the southern part of Ljubljana, sediment frequency correlates well with the thickness of soft sediments known from geophysical investigations and sparse drilling. Average amplitude of the HVSR peaks is considerably higher in the southern part (6.7 ± 2.4) than in the northern part (4.0 ± 2.0) of the city, indicating a high impedance contrast of lacustrine sediments with the bedrock. Soil fundamental frequency data was used to determine the danger of soil-structure resonance, taking into account microtremor measurements performed in buildings, which are described in a separate paper (Šket Motnikar et al., 2010).

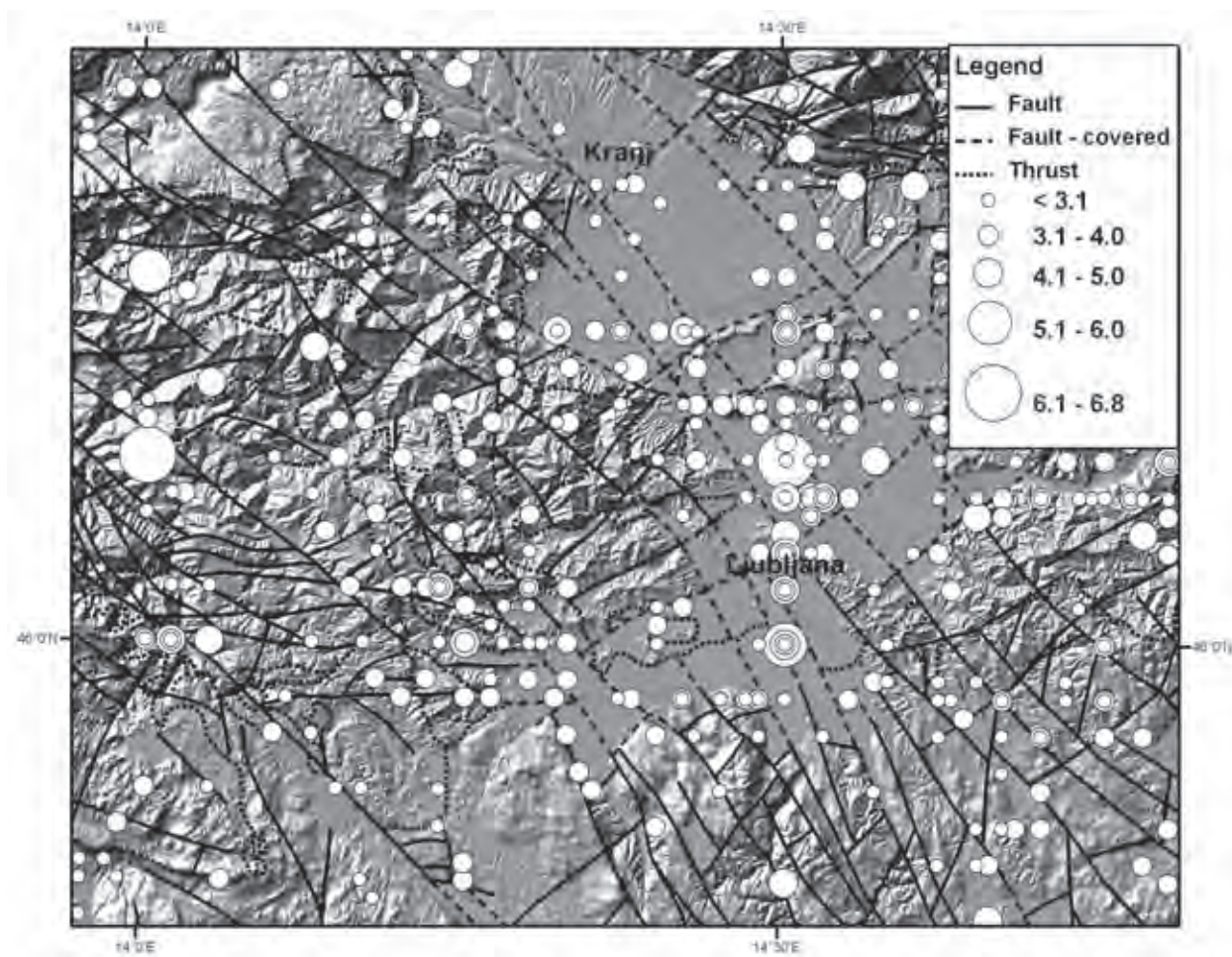




Slika 1. Senčen relief širšega območja Ljubljane. Pravokotnik označuje območje raziskav z mikrotremorji. Šrafirano je urbano območje mesta Ljubljana.

Figure 1. Shaded relief of the Ljubljana basin. A rectangle indicates microtremor study area. Cross-hatched is the urbane area of Ljubljana.

lestvici. Največ poškodb je povzročil veliki ljubljanski potres leta 1895 ($M=6,1$), ki je imel največjo intenziteto VIII-IX po MSK lestvici (Ribarič, 1982). Najmočnejši zgodovinski potres v Sloveniji (Idrijski potres, $M=6,8$) pa je imel nadžarišče približno 30 km zahodno od Ljubljane, vendar njegova lokacija ni zanesljiva in potresni učinki na območju Ljubljane neznani. Na karti potresne nevarnosti Slovenije za povratno dobo 475 let (Lapajne in drugi, 2001) se Ljubljana nahaja v območju s projektnim pospeškom $0,25\text{ g}$. To je tudi najgostejše poseljeno območje v Sloveniji z več kot 300.000 prebivalci in številnimi pomembnimi industrijskimi in transportnimi objekti, kar je potrebno upoštevati v vsaki študiji za oceno potresne ogroženosti.



Slika 2. Seizmičnost širšega območja Ljubljane z generaliziranimi tektonskimi elementi (po Grad in Ferjančič, 1974; Premru, 1982).

Figure 2. Seismicity of wider Ljubljana region with generalized tectonic elements (after Grad and Ferjančič, 1974; Premru, 1982).

Vplive kvartarnih sedimentov na potresno nihanje tal lahko pričakujemo na območju celotnega mesta, še posebej velike pa v južnem delu Ljubljane, ki je zgrajen na zelo mehkih jezerskih sedimentih Ljubljanskega barja. Severni del mesta je zgrajen na ledeniško-rečnih nanosih reke Save, ki imajo boljše geotehnične značilnosti.

Na območju Ljubljane smo izvedli obsežne meritve z metodo spektralnih razmerij med vodoravnima in navpično komponento (HVSR) mikrotremorjev za določitev lastne frekvence sedimentov (Gosar in drugi, 2010). Izdelane karte dopolnjujejo obstoječo potresno mikrorajonizacijo Ljubljane in so osnova za oceno nevarnosti resonance med tlemi in stavbami v primeru potresa.

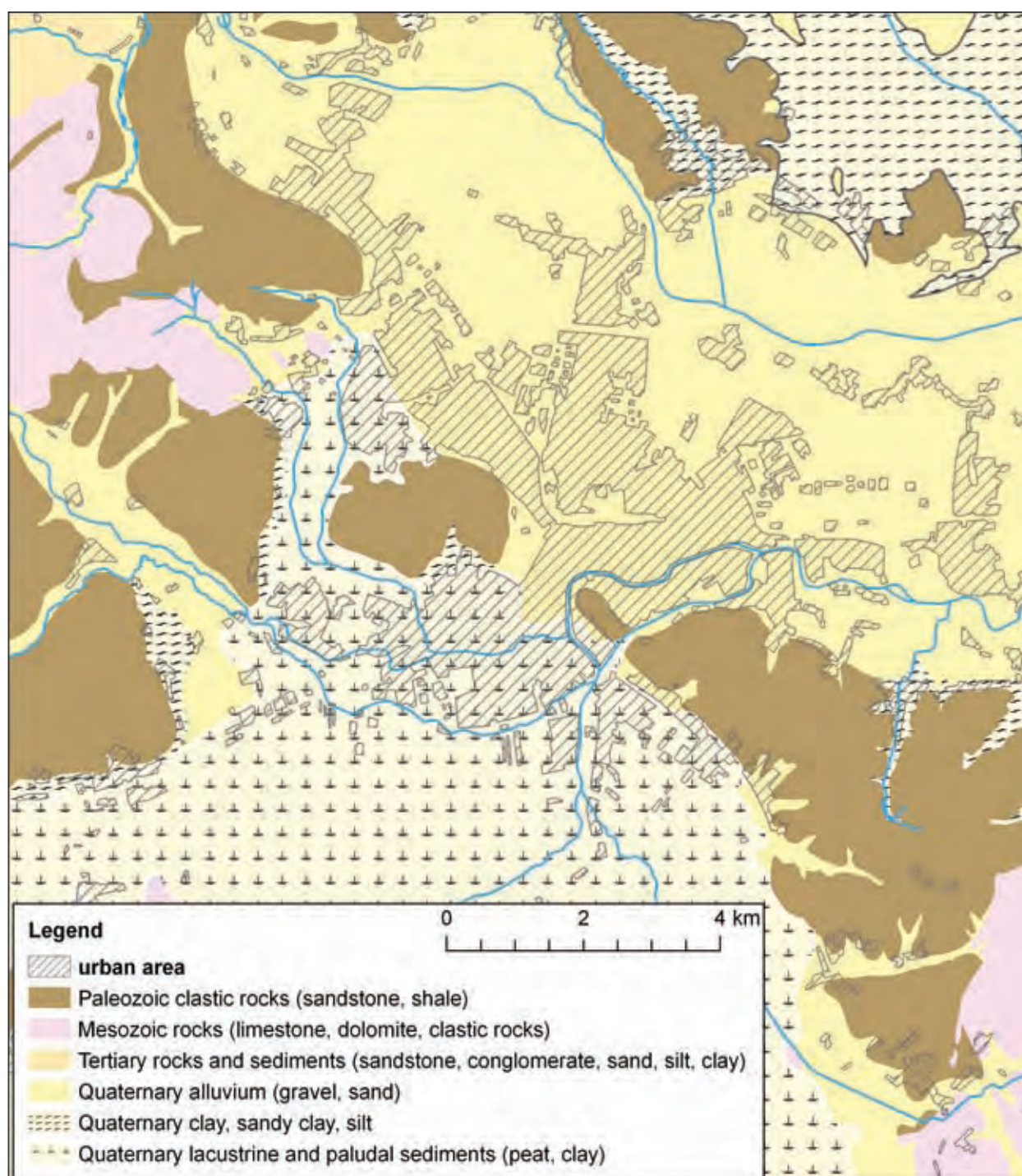
Geološka zgradba

Geološka zgradba območja Ljubljane je prikazana na sliki 3. V podlagi se nahajajo deloma karbonski in permski peščenjaki, konglomerati in laporji, deloma pa triasni in jurski apnenci in dolomiti (Mencej, 1989). Vse te kamnine izdanzajo v gričevju, ki obrobja sedimentni bazen. Ta je nastal predvsem z ugrezanjem vzdolž številnih prelomov, ki je bilo največje v srednjem in zgornjem pleistocenu.

Severni del bazena (Ljubljansko polje) je zapolnjen s pleistocenskimi in holocenskimi ledeniško-rečnimi nanosi reke Save, ki so do 100 m debeli. Sestavlja jih predvsem karbonatni prod, v

katerem so plasti ali leče konglomerata (Grad in Ferjančič, 1974; Premru, 1982). Relief podlage ni zelo razgiban, vendar je vrtin ali podatkov geofizikalnih raziskav razmeroma malo.

Južni del bazena (Ljubljansko barje) je zapolnjen z jezerskimi in rečnimi nanosi, ki so precej heterogeni. Sestavljajo jih glina, prod, pesek, melj, jezerska kreda in šota (Grad in Ferjančič, 1974; Mencej 1989). Površinska plast je zelo mehka. Topografija skalne podlage je zaradi diferencialnega pogrezanja precej razgibana, globina do nje je od 0 do 200 m.



Slika 3. Poenostavljena geološka karta območja Ljubljane (po Grad in Ferjančič, 1974; Premru, 1982)

Figure 3. Simplified geological map of Ljubljana area (after Grad and Ferjančič, 1974; Premru, 1982).

Dosedanje mikrorajonizacije

Vpliv mehkih sedimentov na porazdelitev poškodb so zaznali že ob velikem ljubljanskem potresu leta 1895 (Suess, 1896). V takratnem času je imela Ljubljana 1.400 stavb, 10% je bilo tako poškodovanih, da so jih morali porušiti (Ribarič, 1994).

Prvo potresno mikrorajonizacijo so izdelali na podlagi osnovne geološke karte, podatkov iz geotehničnih vrtin in seizmičnih refrakcijskih meritev s P-valovi na 441 lokacijah (Lapajne, 1970). Prirastke tal po MSK lestvici so izračunali po metodi Medvedeva (1965). Karta potresne mikrorajonizacije je bila izdana leta 1971 (AGO, ZRMK, GZ, 1971). Kasneje so jo uporabili skupaj s karto potresne nevarnosti Slovenije za povratno dobo 500 let, ki podaja intenzitete po MSK lestvici (Ribarič, 1987), na kateri se Ljubljana nahaja v območju intenzitete VIII. Po tej mikrorajonizaciji se intenziteta zaradi vpliva mehkih sedimentov lahko poveča za do 1,5 stopnje na območju Ljubljanskega barja in do ene stopnje v severnem delu Ljubljane. Skoraj povsem enako karto potresne mikrorajonizacije so predstavili tudi v študiji potresne ogroženosti Ljubljanskih občin (Vidrih in drugi, 1991).

Po pripravi nove karte potresne nevarnosti (Lapajne in drugi, 2001), ki podaja projektni pospešek tal, je nastala potreba po novi mikrorajonizaciji, ki bi temeljila na standardu Evrokod 8 (CEN, 2004; SIST EN 1998-1:2005) in bi podajala faktorje tal. Prvo tako karto, ki pa je temeljila le na obstoječih podatkih, so pripravili Zupančič in drugi (2004). Pri tem so uporabili za klasifikacijo tal geološko karto in grobo oceno hitrosti S-valovanja na podlagi obstoječih hitrosti P-valovanja. Na tej karti (slika 4) je večina severnega dela Ljubljane uvrščena v vrsto tla C, manjši del pa v vrsto tal D. V južnem delu mesta je bila večina Ljubljanskega barja uvrščena v vrsto S1, za katero je bil na podlagi nekaterih meritev hitrosti S-valovanja določen faktor tal 2,55. Za ostale vrste tal so faktorji tal v Evrokod 8 naslednji: C – 1,15, D – 1,35 in E – 1,4. Faktor za vrsto tal E je bil kasneje v slovenskem dodatku k standardu spremenjen v 1,7 (SIST EN 1998-1:2005/oA101:2005).

Metoda mikrotremorjev

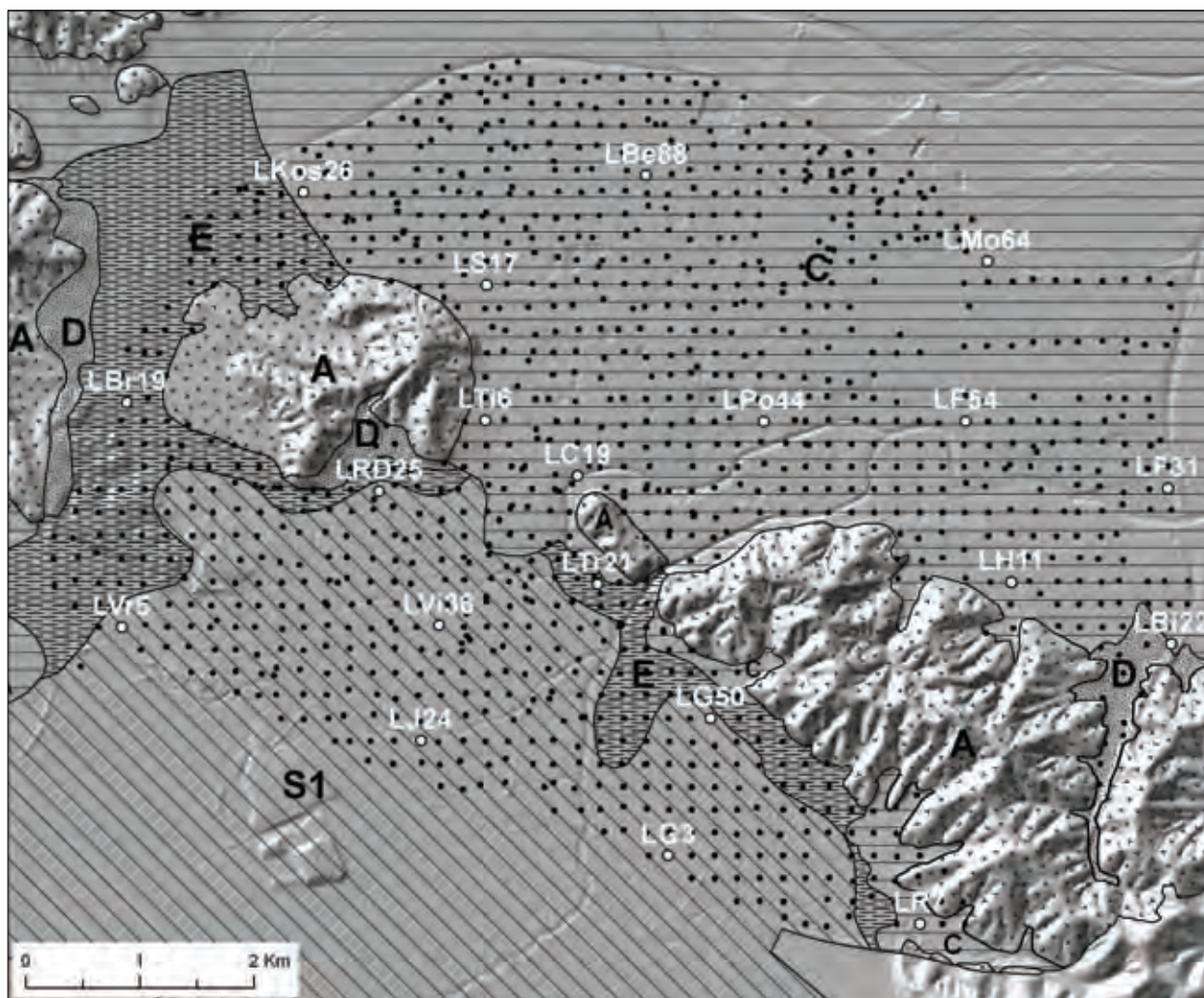
V zadnjem desetletju se je metoda spektralnega razmerja med vodoravnima in navpično komponento (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio - HVSR) mikrotremorjev široko uveljavila pri raziskavah vpliva lokalne geološke zgradbe na potresno nihanje tal in pri potresni mikrorajonizaciji (Bard, 1999). Kljub temu teoretično ozadje metode še ni enoznačno pojasnjeno, saj obstajajo različne razlage, ki so še predmet raziskovanj. Nakamura (2000) zagovarja razlago resonance strižnega valovanja v mehkih sedimentih, po kateri v mikrotremorjih torej prevladuje prostorsko valovanje, medtem ko naj bi bil prispevek površinskega valovanja zanemarljiv. Bolj široko sprejeta (Bard, 1999; Bonnefoy-Claudet in drugi, 2006) je razlaga, po kateri v mikrotremorjih prevladuje površinsko valovanje, spektralno razmerje (HVSR) pa odraža eliptičnost Rayleighjevega valovanja, ki je frekvenčno odvisno. HVSR ima izrazit vrh pri lastni frekvenci paketa sedimentov, če obstaja velik impedančni kontrast med njimi in skalno podlago. Kritike te metode so se v preteklosti nanašale predvsem na to, da ni bilo standardiziranih postopkov meritev in obdelave podatkov (Mucciarelli in Gallipoli, 2001), kar se je popravilo z izdelavo priporočil v okviru evropskega projekta SESAME (SESAME, 2004). Danes je široko sprejeto, da vrh v spektralnem razmerju odraža lastno frekvenco sedimentov. Amplituda tega vrha je odvisna predvsem od impedančnega kontrasta med sedimenti in skalno podlago, a je ne moremo uporabiti kot kvantitativno oceno ojačenja potresnega nihanja tal. Metoda mikrotremorjev tudi ne podaja ocene celotnega frekvenčnega območja, v katerem pride do ojačenja potresnega nihanja tal. Glavna njena prednost je, da podaja resonančno frekvenco sedimentov, ne da bi poznali njihovo debelino in hitrost strižnega valovanja. Meritve mikrotremorjev so razmeroma preproste, hitre in poceni. Zato je mogoče raziskave izvesti v mnogo bolj gosti mreži merskih točk kot s katero koli drugo metodo, ki temelji na geofizikalnih raziskavah, vrtanju ali registraciji potresov. Poznavanje debeline in/ali hitrosti strižnega valovanja in primerjave rezultatov mikrotremorjev z rezultati drugih metod ali dejanskih učinkov potresov lahko znatno izboljša zanesljivost interpretacije podatkov mikrotremorjev (Bard, 1999).

Metoda mikrotremorjev se je kasneje razširila še na določanje glavnih lastnih frekvenc nihanja stavb (Mucciarelli in drugi, 2001; Gallipoli in drugi, 2004a) in raziskave resonance med tlemi in objekti. Povečanje učinkov zaradi resonance med tlemi in objekti so z metodo mikrotremorjev proučevali za potres Umbria-Marche (Mucciarelli in Monachesi, 1998; Natale in Nunziata, 2004), potres v Solunu (Panou in drugi, 2005), potres v Molise (Gallipoli in drugi, 2004b), v Bovški kotlini za potresa v Zgornjem Posočju (Gosar, 2007) in na območju Ilirske Bistrice (Gosar in Martinec, 2009).

Meritve mikrotremorjev in njihova analiza

Pri meritvah smo uporabljali šest prenosnih seizmografov Tromino (Micromed, 2005), ki jih sestavljajo trije med seboj pravokotni elektrodinamični hitrostni senzorji, GPS sprejemnik, digitalizator in zajemalna enota s spominsko kartico. Vsi deli so integrirani v skupnem ohišju, kar zmanjšuje elektronski in mehanski šum, ki je sicer pogost zaradi kablov, ki povezujejo posamezne komponente. V frekvenčnem območju 0,1-10 Hz je lastni šum seizmografa mnogo manjši od tistega, ki ga podaja standardni model seizmičnega nemira Zemlje.

Znotraj avtocestnega obroča ljubljanske obvoznice smo raziskali 45,5 km² veliko območje v mreži točk gostote približno 200 x 200 m (slika 4). Skupno smo opravili 1.223 meritev, kar pomeni



Slika 4. Potresna mikrorajonizacija Ljubljane z vrstami tal po Evrokod 8 (po Zupančič in drugi, 2004). Točke označujejo meritve mikrotremorjev, točke z imenom pa primere meritev, ki so prikazani na slikah 5 in 6.

Figure 4. Seismic microzonation of Ljubljana according to Eurocode 8 ground types (after Zupančič et al., 2004). Dots indicate points of microtremor measurements; labelled dots are examples of measurements shown in Figures 5 and 6.

v povprečju 26,9 merskih točk na km². Za načrtovanje mreže točk in kasnejši izris kart smo uporabili programsko orodje GIS. Lokacije meritev smo pazljivo izbrali, da smo se kolikor je bilo le mogoče izognili drevesom, zgradbam, podzemnim objektom in komunikacijam ter vplivu prometa. V gosto naseljenem območju to seveda ni bilo povsod mogoče. V nekaterih industrijskih conah pa meritve sploh niso bile mogoče. Da smo dosegli dober stik seizmografa s tlemi, smo uporabili dolge konice, privite v njegovo dno. Na vsaki točki smo s frekvenco vzorčevanja 128 Hz merili potresni nemir 20 minut, kar omogoča zanesljivo spektralno analizo do vsaj 0,5 Hz na spodnjem robu frekvenčnega območja (SESAME, 2004).

Glavne težave pri meritvah je povzročal visok nivo šuma zaradi prometa in industrije ter podzemni objekti in komunikacije. V splošnem so bili pogoji slabši v severnem delu mesta, kjer so večja industrijska območja in številnejše podzemne komunikacije. Za to območje je značilno tudi, da ponekod ni bilo zaznati jasne lastne frekvence. Domnevamo, da bi bil lahko razlog v prisotnosti plasti ali leč konglomerata znotraj proda, ki zakrije glavni impedančni kontrast s skalno podlago.

Analizo spektralnih razmerij smo izvedli po naslednjem postopku. Posnete seizmogramе smo pregledali, da bi ugotovili morebitne napake v meritvah in močnejše prehodne motnje. Vsak seizmogram smo nato razdelili v 30-sekundna okna, za katera smo izračunali amplitudne spektre v frekvenčnem območju 0,5-64 Hz z uporabo trikotnega okna in 5 % glajenja. Podatke smo popravili tudi za prenosno funkcijo senzorja. Sledil je izračun spektralnega razmerja kot povprečja amplitudnega spektra obeh vodoravnih komponent deljenih z navpično komponento (HVSR) za vsako okno posebej. Na barvnem prikazu HVSR funkcij vseh 40-ih oken smo identificirali okna z močnejšimi prehodnimi motnjami in jih izločili iz nadaljnjega izračuna. Na koncu smo izračunali povprečno HVSR funkcijo za vsa okna s pripadajočim 95 % intervalom zaupanja.

Rezultati in interpretacija

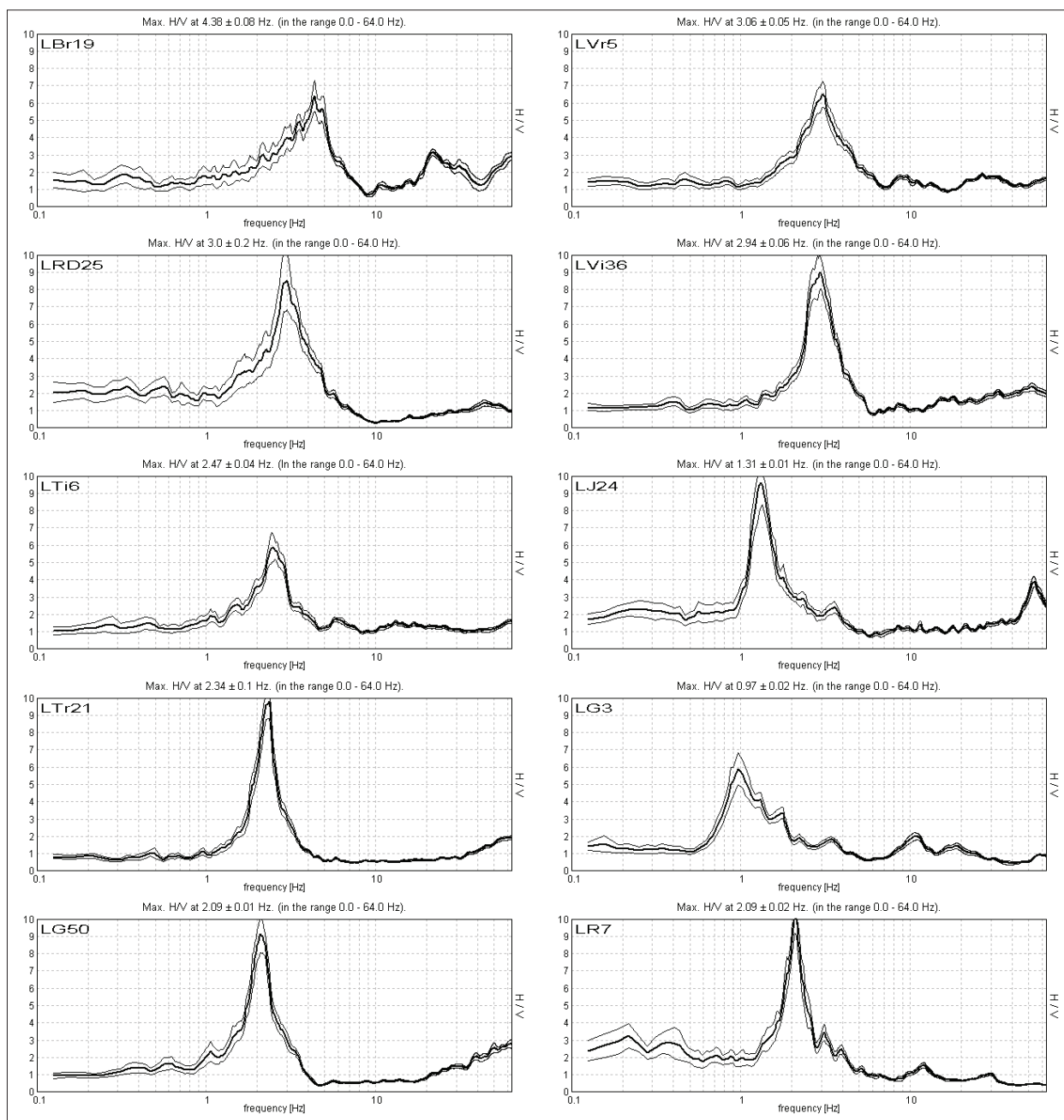
Analize spektralnih razmerij (HVSR) so pokazale, da večina meritev izpolnjuje kriterije, ki so jih opredelili v okviru evropskega projekta SESAME (SESAME, 2004). Trije od teh kriterijev o zanesljivosti HVSR krivulje temeljijo na razmerju med frekvenco vrha in dolžino okna, številu značilnih ciklov in standardnem odklonu amplitude vrha. Naslednjih šest kriterijev za jasen vrh temelji na razmerju med amplitudo vrha in nivojem HVSR krivulje drugod in na standardnem odklonu frekvence vrha in njene amplitude (amplituda se mora na obeh straneh hitro zmanjševati). Pri meritvah na območju Ljubljane so bili glavni razlogi za neizpolnjevanje teh kriterijev: a) visok nivo motenj, b) dva ali več vrhov v spektru ali c) prenizka amplituda vrha.

Zelo jasne vrhove v spektralnem razmerju smo dobili v celotnem južnem delu mesta (slika 5). Visoke amplitude HVSR vrhov kažejo na močan impedančni kontrast med sedimenti in skalno podlago. Časovna stabilnost signala je bila v splošnem dobra, kar se odraža v ozkem območju 95 % intervala zaupanja povprečne krivulje. V severnem delu mesta je bila večina meritev prav tako dobra (slika 6), čeprav je odziv v splošnem manjši zaradi manjšega impedančnega kontrasta proda s skalno podlago. V tem delu so bila tudi nekatera območja, za katere so bile značilne zelo nizke amplitude HVSR krivulje ali celo njena ploskost. Spričo navedenega je bila povprečna amplituda HVSR vrha znatno večja v južnem delu ($6,7 \pm 2,4$) kot v severnem delu ($4,0 \pm 2,0$) mesta (slika 7).

V južnem delu mesta (slika 5) je v spektralnem razmerju večinoma viden oster vrh, ki je dokaj simetričen (LRD25, LTr21, LG50, Lvi36 in LJ24). Pogosto se pojavlja tudi asimetričen vrh s sekundarnim vrhom pri višji frekvenci, kot je frekvenca glavnega vrha (LG3 in LR7). V severnem delu mesta (slika 6) so ostri enojni vrhovi manj pogosti (LH11). Bolj pogosta so spektralna razmerja z dodatnimi vrhovi pri višjih frekvencah, ki pa so večinoma dobro ločeni od glavnega vrha (LC19, LF31 in LBi22). Ti dodatni vrhovi kažejo na bolj zapleteno strukturo, ki ne obsega le glavnega impedančnega kontrasta s podlago, ampak na dodatne impedančne meje znotraj heterogenih sedimentov. Vrednosti HVSR manjše od 1 v širokem frekvenčnem območju, ki so vidne v nekaterih meritvah (LTr21 in LG50 na sliki 5 ter LMo64 na sliki 6) lahko kažejo na hitrostno inverzijo

znotraj sedimentov. Če je HVSR manjši od 1 samo v ozkem frekvenčnem območju pri približno dvojni glavni rezonanci (LRD25 na sliki 5 in LH11 na sliki 6), pa je to posledica učinka eliptičnosti Rayleighjevega valovanja (Fäh in drugi, 2001). Le v redkih primerih se stranski vrh pojavi pri frekvenci, nižji od frekvence glavnega vrha. Zato je dokaj zanesljivo, da pri večini meritev glavni vrh v HVSR krivulji ustreza najmočnejšemu impedančnemu kontrastu med sedimenti in podlago.

Razlogi za majhno amplitudo vrha ali celo popolnoma plosko spektralno razmerje (npr. LPo44 in LF54 na sliki 6) v nekaterih predelih na severu in severovzhodu raziskanega območja niso povsem jasni. Možen razlog je lahko prisotnost konglomerata znotraj peščeno-prodnega zasipa,

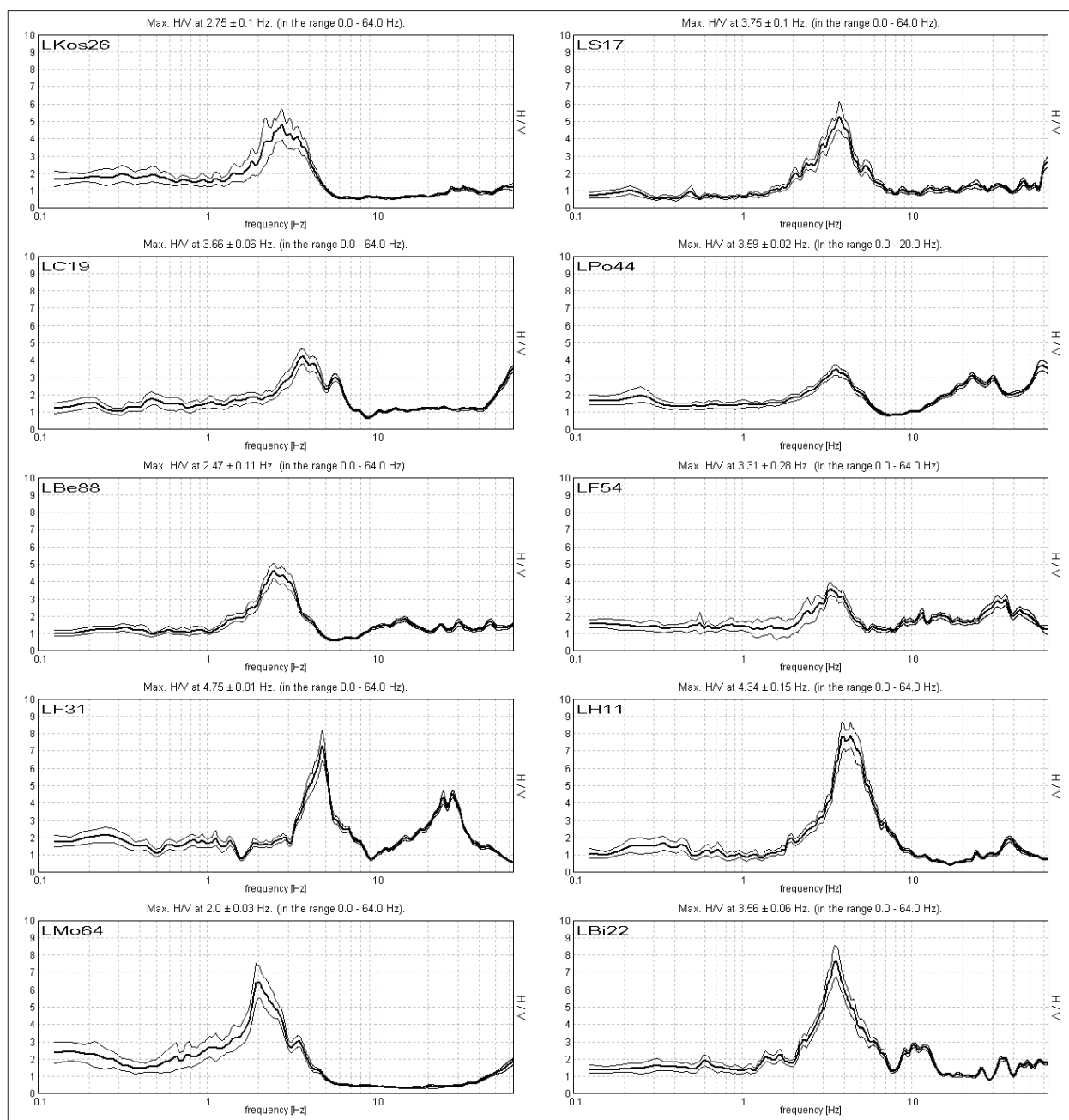


Slika 5. Izbrane meritve mikrotremorjev (HVSR analiza) iz južnega dela Ljubljane. Tanke črte predstavljajo 95 % interval zaupanja.

Figure 5. Selected microtremor measurements (HVSR analyses) from the southern part of Ljubljana. Thin lines represent 95 % confidence interval.

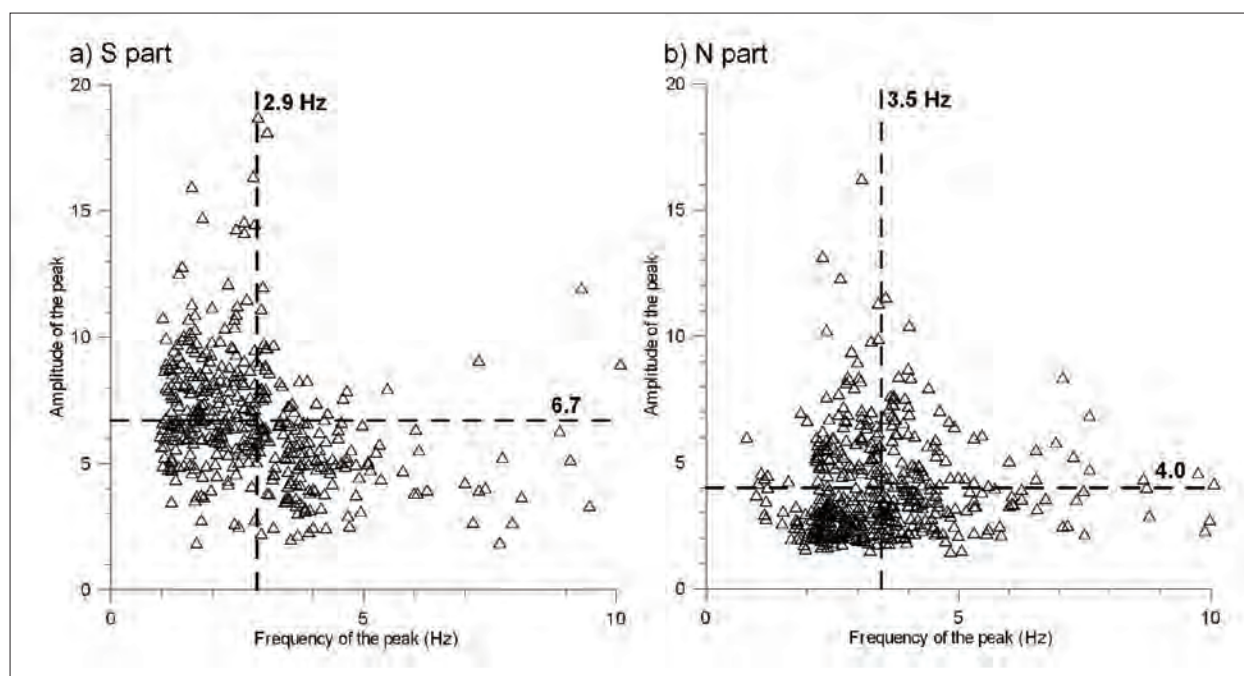
ki je značilen za to območje, vendar njegovega obsega ne poznamo zaradi preredkih vrtn. Slabo sprijet konglomerat domnevno zmanjšuje ali zakrije glavni impedančni kontrast na meji med nevezanimi sedimenti in skalno podlago. Po drugi strani je na tem območju nekaj večjih industrijskih con, kjer niso izključene obsežnejše podzemne komunikacije, ki lahko vplivajo na meritve.

Eksperimentalni pogoji meritev mikrotremorjev lahko znatno vplivajo na kvaliteto in zanesljivost podatkov (Chatelain in drugi, 2008; Mucciarelli in drugi, 2005). To se je pokazalo tudi pri naših raziskavah. Zato smo ponovili meritve na nekaterih lokacijah, kjer so prve meritve potresnega nemira dale slabe rezultate. Dva primera ponovljenih meritev sta prikazana na sliki 8. Na točki LRD20 smo prve meritve izvedli ob močnem vetru. Izrazite motnje so zato dominirale



Slika 6. Izbrane meritve mikrotremorjev (HVSR analiza) iz severnega dela Ljubljane. Tanke črte predstavljajo 95 % interval zaupanja.

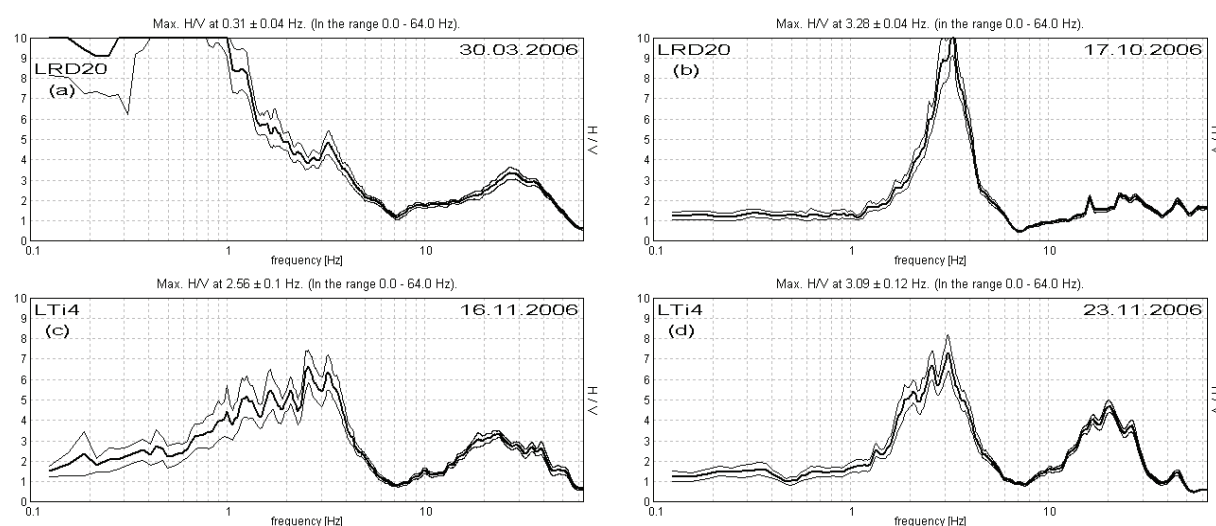
Figure 6. Selected microtremor measurements (HVSR analyses) from the northern part of Ljubljana. Thin lines represent 95 % confidence interval.



Slika 7. Diagram odvisnosti amplitude od frekvence vrhov HVSR krivulj za vse meritve mikrotremorjev v južnem (a) in severnem (b) delu Ljubljane. Povprečne vrednosti so prikazane črtkano.

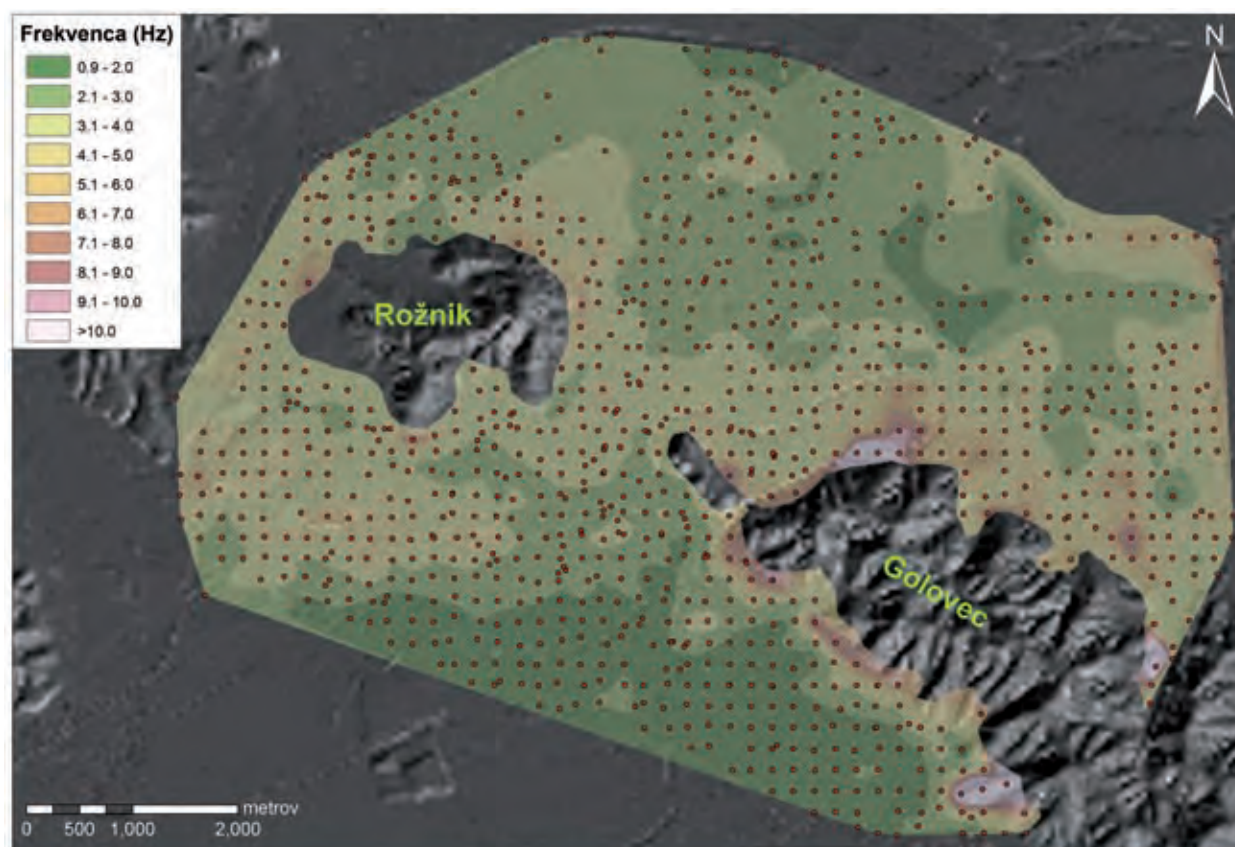
Figure 7. Amplitude vs. frequency graph of HVSR peaks for all microtremor measurements in the southern (a) and northern (b) part of Ljubljana. Average values are shown with dashed lines.

v amplitudnem spektru pod 2 Hz, kar je povzročilo neuporabno spektralno razmerje (slika 8a). Ponovljene meritve ob brezvetrju pa so pokazale jasen vrh HVSR krivulje (slika 8b). Prva meritev na točki LTi4 je bila opravljena kmalu po nekajdnevni deževju, ko so bila tla nasičena z vodo. To je lahko vplivalo na spoj seizmografa s tlemi, kot nakazuje več vrhov HVSR krivulje (slika 8c). Analiza spektrov posameznih komponent ni pokazala, da bi bile lahko vir teh vrhov antropogene prehodne motnje. Teden dni kasneje, ko so bila tla suha, smo meritve ponovili in dobili precej bolj jasno HVSR krivuljo (slika 8d).



Slika 8. Vpliv eksperimentalnih pogojev na meritve mikrotremorjev. LRD20 (a) meritve v močnem vetru, (b) meritve v brezvetrju. LTi4 (c) meritve, ko so bila tla nasičena z vodo po nekajdnevni dežju, (d) meritve na suhih tleh.

Figure 8. Influence of experimental conditions on microtremor measurements. LRD20 a) measurements during strong wind, b) measurements during no wind. LTi4 c) soil saturated with water after few days of rainfall, d) measurements on dry soil.



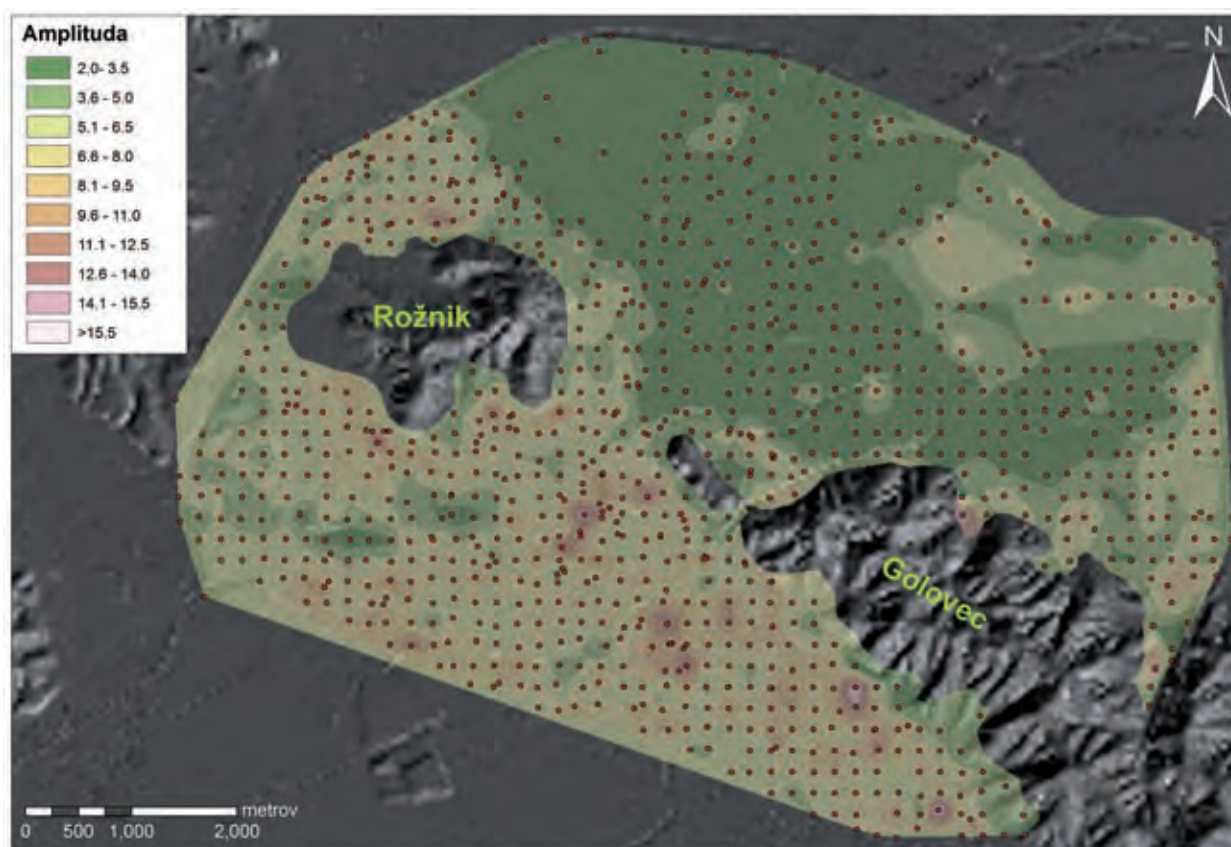
Slika 9. Karta resonančne frekvence sedimentov izdelana na podlagi meritev na prostem površju.

Figure 9. Map of sediments' resonance frequency derived from free-field microtremor data.

Na podlagi meritev na 999 točkah, ki so dale dovolj jasne vrhove v spektralnem razmerju, da smo lahko opredelili resonančno frekvenco sedimentov, smo izrisali dve karti: karto lastnih frekvenc sedimentov (slika 9) in karto amplitud vrhov HVSR krivulj (slika 10).

Karta lastnih frekvenc (slika 9) kaže njihov razpon v območju 0,9-10 Hz. V južnem delu Ljubljane se lastna frekvenca dobro ujema s spremembami v debelini sedimentov, ki jo poznamo iz geofizikalnih raziskav in nekaterih vrtin. Debelina sedimentov v splošnem narašča proti jugu, lastna frekvenca pa upada v isti smeri. Povprečna lastna frekvenca v južnem delu Ljubljane je $2,9 \pm 1,5$ Hz (slika 7a). V severnem delu Ljubljane, ki je zapolnjen predvsem s prodom, v katerem so plasti in leče konglomerata, je korelacija med debelino sedimentov in lastno frekvenco manj značilna, čeprav je njihova debelina v splošnem manj spremenljiva kot v južnem delu. Vendar za to območje ni na voljo skoraj nič geofizikalnih podatkov, vrtine pa so zelo neenakomerno razporejene. Povprečna lastna frekvenca v severnem delu Ljubljane je $3,5 \pm 1,4$ Hz (slika 7b).

Karta amplitud vrhov HVSR krivulj (slika 10) kaže njihov razpon v območju 2-15, le na posameznih točkah so vrednosti višje. V severnem delu mesta je nekaj večjih območij, kjer so amplitude vrhov nizke (pod 3), predvsem v osrednjem delu. Možni razlogi za šibek odziv so opisani zgoraj. Povprečna amplituda HVSR vrhov v severnem delu Ljubljane je $4,0 \pm 2,0$ (slika 7b). V južnem delu je povprečna amplituda vseh vrhov ($6,7 \pm 2,4$) mnogo višja (slika 7a). Območje z visokimi amplitudami (nad 5), ki kažejo na velik impedančni kontrast med jezerskimi sedimenti in skalno podlago, se dobro ujema z območjem, klasificiranim kot vrsta tal S1 (slika 4) po Evrokod 8 v predhodni potresni mikrorajonizaciji (Zupančič in drugi, 2004). Vidi se tudi več izoliranih območij z zelo visokimi amplitudami (nad 10), vendar zanje nismo našli korelacije s površinsko geološko zgradbo ali debelino sedimentov.



Slika 10. Karta amplitud vrhov HVSR krivulj.

Figure 10. Map of microtremor HVSR peak amplitudes.

Zaključek

Raziskave z metodo mikrotremorjev na prostem površju na območju Ljubljane so podale dobre podatke o lastni frekvenci nevezanih sedimentov, odloženih na skalni podlagi. Pri tem se je potrdila prednost uporabljene metode, ki za oceno lastne frekvence ne zahteva poznavanja debeline sedimentov in hitrosti strižnega valovanja v njih. Če bi želeli v podobno gosti mreži točk (več kot tisoč meritev) uporabiti za oceno lastne frekvence numerično modeliranje, bi to zahtevalo zelo obsežne, dolgotrajne in drage geofizikalne raziskave ter raziskovalno vrtanje. Metoda mikrotremorjev omogoča tudi učinkovito določitev vzdolžne in prečne lastne frekvence nihanja stavb. Na območju Ljubljane so bile tovrstne meritve opravljene v več kot 200 stavbah (Šket Motnikar in drugi, 2010). Ti rezultati so bili skupaj s podatki o lastni frekvenci sedimentov uporabljeni za ugotavljanje nevarnosti resonance med tlemi in stavbami, kar lahko pomembno prispeva k povečanju poškodb stavb v primeru potresa. Na podlagi meritev v številnih stavbah smo lahko opredelili tudi odnos med njihovo višino in lastno frekvenco. To pa omogoča oceno nevarnosti resonance za večino stavb na raziskanem območju Ljubljane, za katere poznamo višino in vrsto gradnje.

Literatura

- Astronomsko geofizikalni observatorij, Zavod za raziskavo materialov in Geološki zavod, 1971: Karta seizmične mikrorajonizacije Ljubljana, Ljubljana.
- Bard, P.Y. 1999: Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? In: Irikura, K., Kudo, K., Okada, H., Sasatami, T. (eds): The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Balkema, Rotterdam, 1251-1279.

- Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P.Y., Cotton, F., Moczo, 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.
- CEN 2004: Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization.
- Chatelain, J. L., Guillier, B., Cara, F., Duval, A.M., Atakan, K., Bard, P.Y. 2008: Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings. *Bull Earthq Eng* 6/1:33-74.
- Fäh, D., Kind, F., Giardini, D. 2001: A theoretical investigation of average H/V ratios. *Geophys J Int* 145:535-549.
- Gallipoli, M.R., Mucciarelli, M., Castro, R.R., Monachesi, G., Contri, P. 2004a: Structure, soil-structure response and effects of damage based on observations of horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremors. *Soil Dyn Earthq Eng* 24:487-495.
- Gallipoli, M.R., Mucciarelli, M., Eeri, M., Gallicchio, S., Tropeano, M., Lizza, C. 2004b: Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) measurements in the area damaged by the 2002 Molise, Italy, earthquake. *Earthq Spect* 20/1:81-93.
- Gosar, A. 2007: Microtremor HVSr study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes. *Eng geol* 91:178-193.
- Gosar, A., Martinec, M. 2009: Microtremor HVSr study of site effects in the Ilirska Bistrica town area (S Slovenia). *J Earthq Eng* 13:50-67.
- Gosar, A., Rošar, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P. 2010: Microtremor study of site effects and soil-structure resonance in the city of Ljubljana (central Slovenia). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8, 571-592.
- Grad, K., Ferjančič, L. 1974: Osnovna geološka karta 1: 100.000 – list Kranj. Geološki zavod Ljubljana.
- Medvedev, S.V. 1965: Inženjerska seizmologija. Gradjevinska knjiga, Beograd, 268 str.
- Mencej, Z. 1989: Prodni zasipi pod jezerskimi sedimenti Ljubljanskega barja. *Geologija* 31-32:517-553.
- Micromed, 2005: Tromino user manual. Micromed, Treviso.
- Mucciarelli, M., Monachesi, G. 1998: A quick survey of local amplifications and their correlation with damage observed during the Umbro-Marchesan (Italy) earthquake of September 26, 1997. *J Earthq Eng* 2/2:325-337.
- Mucciarelli, M., Gallipoli, M.R. 2001: A critical review of 10 years of microtremor HVSr technique. *Boll Geof Teor Appl* 42:255-266.
- Nakamura, Y. 2000: Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. 12WCEE, Auckland.
- Natale, M., Nunziata, C. 2004: Spectral amplification effects at Sellano, Central Italy, for the 1997-98 Umbria seismic sequence. *Nat Haz* 33:365-378.
- Lapajne, J. 1970: Potresna mikrorajonizacija Ljubljane – geofizikalne raziskave. Geološki zavod Ljubljana, 16. str.
- Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P. 2001: Karta projektnega pospeška tal Slovenije. Potresi v letu 1999:40-49.
- Panou, A.A., Theodulidis, N., Hatzidimitriou, P., Stylianidis, K., Papazachos, C.B. 2005: Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio for assessing site effects estimation and correlation with seismic damage distribution in urban environment: the case of city of Thessaloniki (Northern Greece). *Soil Dyn Earthq Eng* 25/4:261-274.
- Premru, U. 1982: Osnovna geološka karta 1: 100.000 – list Ljubljana. Geološki zavod Ljubljana.
- Ribarič, V. 1982: Seizmičnost Slovenije, katalog potresov 792 – 1981). Seizmološki zavod SR Slovenije, 649 str., Ljubljana
- Ribarič, V. 1987: Seizmološka karta Slovenije za povratno dobo 500 let. Seizmološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Ribarič, V. 1994: Potresi v Sloveniji. Slovenska matica, Ljubljana.
- SESAME, 2004: Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing and interpretation. http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Deliverables/Del-D23_HV_User_Guidelines.pdf. Accessed 15 Mar 2009.
- SIST EN 1998-1:2005, 2005: Evrokod 8 - Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij - 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, slovenski standard, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana. - Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, angl. standard, I.



- SIST EN 1998-1:2005/0A101:2005, 2005: Evrokod 8 - Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij - 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe - Nacionalni dodatek, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana.
- Suess, F.E. 1896: Das Erdbeben von Laibach am 14. April 1895. Jahrb K K Geol Reich, 46/3-4:412-890.
- Šket Motnikar B., Zupančič P., Mladenović B., Gosar A. 2010: Meritve potresnega nemira v stavbah Ljubljane, Potresi v letu 2009.
- Vidrih, R., Godec, M., Lapajne, J. 1991: Potresna ogroženost Slovenije. Seizmološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Zupančič, P., Šket-Motnikar, B., Gosar, A., Prosen, T. 2004: Karta potresne mikrorajonizacije Mestne občine Ljubljana. Potresi v letu 2002:32-54.

