Procjena potresne ugroženosti grada Ivanca mjerenjem mikroseizmičkog nemira

Sanković, Vedran

Master's thesis / Diplomski rad

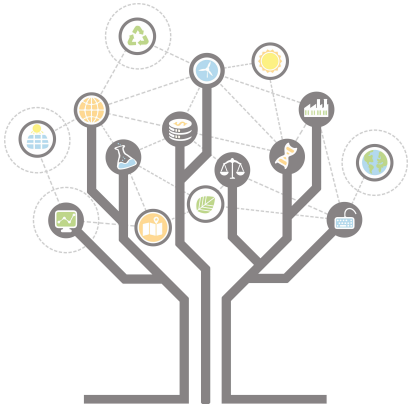
2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:555439

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Procjena potresne ugroženosti grada Ivanca mjerenjem mikroseizmičkog nemira

Sanković, Vedran

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:555439

Rights / Prava: In copyright

Download date / Datum preuzimanja: **2020-10-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

VEDRAN SANKOVIĆ

PROCJENA POTRESNE UGROŽENOSTI GRADA IVANCA MJERENJEM MIKROSEIZMIČKOG NEMIRA

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

PROCJENA POTRESNE UGROŽENOSTI GRADA IVANCA MJERENJEM MIKROSEIZMIČKOG NEMIRA

DIPLOMSKI RAD

KANDIDAT:
Vedran Sanković, univ.bacc.ing.amb.

MENTOR:
Doc.dr.sc. Mario Gazdek

VARAŽDIN, 2018.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

Procjena potresne ugroženosti grada Ivanca mjerenjem mikroseizmičkog nemira

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom doc.dr.sc. Maria Gazdeka.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljeni način, odnosno prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovanoj ustanovi.

U Varaždinu, 3. srpnja 2018.

Vedran Sanković
(Ime i prezime)

Vedran Sanković
(Vlastoručni potpis)

Zahvala

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Mariu Gazdeku na savjetima i vodstvu prilikom izrade diplomskog rada kao i Davoru Stanku, mag.phys. na pomoći prilikom mjerenja, analize i interpretacije rezultata koji su prikazani u ovom radu. Zahvalio bih se i kolegi Ivanu Slukanu, univ.bacc.ing.amb. na pomoći prilikom mjerenja i obrade podataka kao i svojoj obitelji na financijskoj i moralnoj podršci te razumijevanju tijekom cijelog razdoblja moga studija.

Vedran Sanković

SAŽETAK RADA:

Ime i prezime: Vedran Sanković

Naslov rada: Procjena potresne ugroženosti grada Ivanca mjerenjem mikroseizmičkog nemira

Suvremeni koncept gradnje te sve veći interes društva za očuvanjem graditeljske baštine i povijesnih građevina, primjenu HVSR (engl. Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) metode mjerenja i analize mikrovibracija čini važnom istraživačkom metodom. HVSR je neinvazivna geofizička metoda koja se najčešće koristi za seizmičko mikrozoniranje, odnosno za procjenu potresne ugroženosti na temelju osnovne frekvencije tla i amplifikacije. S obzirom na relativno visoki seizmički hazard Ivanečkog kraja, geološku prošlost, povijesno zabilježenu seizmičnost i geografski položaj, metoda mjerenja mikroseizmičkog nemira, HVSR metoda je izabrana kao primjerena u svrhu izrade podloge za preliminarnu fazu seizmičke mikrozonacije grada Ivanca.

Radi detekcije potencijalno ugroženih zona grada Ivanca zbog moguće pojave rezonancije temeljno tlo – građevina prilikom potresa, istražena je šira okolica grada i njegov centar. Rezultati prostornog mjerenja pokazuju varijacije osnovne frekvencije tla (1.34 – 16.22 Hz), amplituda HVSR vrhova (1.75 – 5.45) i debljine sedimenata (4.70 – 54.35 m). Na temelju rezultata mjerenja izrađene su karte izo-frekvencija i izo-amplituda. Daljnjom obradom podataka izrađena je karta debljine sedimenata kao i karte HVSR amplituda s izdvojenim frekvencijama za karakteristične visine građevine, na kojima su prikazana područja veće ugroženosti za karakteristične građevine.

Učinci amplifikacije seizmičkog djelovanja, zbog inženjersko – geoloških specifičnosti temeljnog tla na pojedinoj lokaciji, mogu značajno doprinijeti strukturnim oštećenjima zgrada, ali i na drugim inženjerskim konstrukcijama. Rezultati ovog istraživanja važni su da bi se u budućnosti spriječila ili smanjila strukturna šteta, te očuvali ljudski životi u slučaju potresa koji se ne mogu predvidjeti.

KLJUČNE RIJEČI:

HVSR metoda, osnovna frekvencija tla, amplifikacija tla, lokalni uvjeti tla, seizmičko mikrozoniranje

SUMMARY

Name and surname: Vedran Sanković

Title of graduate thesis: Estimation of seismic vulnerability of the Ivanec city using microseismic noise measurements

Modern construction concept and the growing interest of society for the preservation of architectural heritage and historic buildings make HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) an important research method. HVSR is non-invasive geophysical method mostly used for seismic microzonation and estimation of seismic vulnerability by the fundamental frequency and the amplification of the soil. Considering the relatively high seismic hazard of Ivanec area, its geological past, historically recorded seismicity and geographic position, HVSR method was chosen, as appropriate, for creating a base of the first seismic microzonation of Ivanec city.

For the purpose of detecting potentially endangered areas of the Ivanec city, due to the possible occurrence of soil – structure resonance during the earthquake, the wider surrounding of the city and downtown area were explored. The spatial measurement results show variations in the basic fundamental frequency (1.34 - 16.22 Hz), HVSR peak amplitude (1.75 - 5.45) and sediment thickness (4.70 - 54.35 m). Based on the measurement results, the maps of iso frequencies and iso amplitudes were created. Further processing of data produced a map of sediment thickness as well as maps of HVSR amplitude with separate frequencies for the characteristic height of buildings, showing areas of greater vulnerability for characteristic structures.

Amplification of seismic activity on particular location can significantly enlarge the building and other engineering constructions damages due to local site effects. The results of this research are important for the future prevention and reduction of structural damage and human lives preservation in case of earthquakes which cannot be predicted.

KEYWORDS:

HVSR method, fundamental frequency, amplification, local site effects, seismic microzonation

SADRŽAJ:

1. Uvod 1

1.1. Utjecaj lokalnog tla na razinu oštećenja od potresa 2
1.2. Područje grada Ivanca 3
1.3. Cilj i plan rada 4

2. Geološka i seizmološka obilježja Ivanca i ivanečkog područja 5

2.1. Geološka obilježja 5
2.2. Seizmološka obilježja 7

3. HVSR metoda 10

3.1. Tromino uređaj za HVSR mjerenja 10
3.2. Tehnički zahtjevi mjerenja 12
3.3. Analiza podataka mjerenja na lokacijama 13
3.4. Interpretacija HVSR podataka 17
3.5. Pregled HVSR istraživanja značajnih za procjenu potresne ugroženosti grada Ivanca 21

4. HVSR mjerenja grada Ivanca 23

5. Rezultati i diskusija 25

5.1. Vrste i oblici HVSR krivulja 25
5.2. Kartografski prikaz rezultata 28

6. Karta potresne ugroženosti grada Ivanca 33

7. Zaključak 38

Popis literature 39

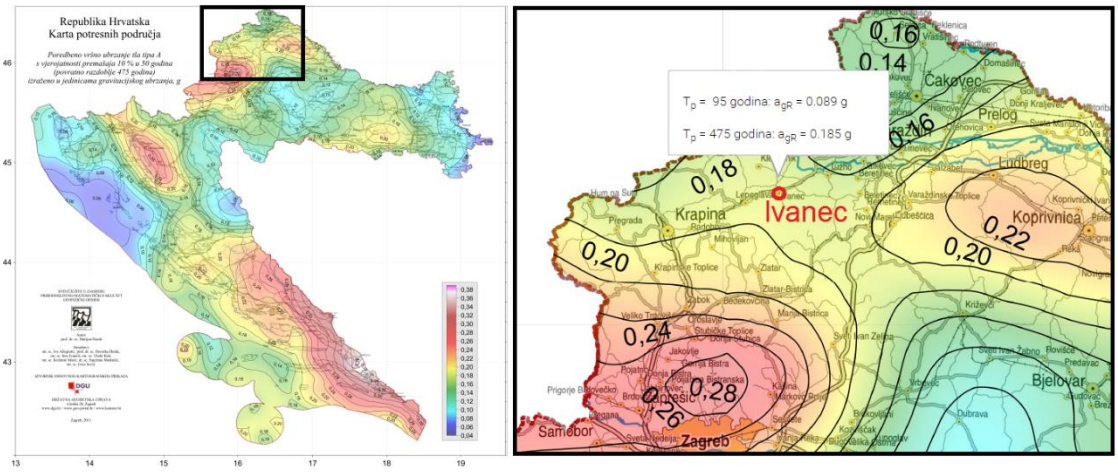
Popis slika 42

popis tablica 43

1. UVOD

Svakih nekoliko mjeseci negdje se u svijetu pojave razorni potresi. Bez obzira na činjenicu da se oni ne mogu predvidjeti, jedini pouzdan način smanjivanja vjerojatnosti gubitaka ljudskih života i nastanka materijalnih šteta je odgovarajuće urbano i prostorno planiranje te korištenje određenih pravila gradnje. Za postizanje tih ciljeva potrebno je poznavati određena fizičko – mehanička svojstva temeljnog tla ili stijene, kao što su rezonantna frekvencija i krutost.

U posljednjih 200 godina grad Ivanec je podrhtavao od nekoliko jačih potresa magnitude M > 4 po Richteru. Povijesno gledano, u zadnjih 500 godina područje Ivanečkog kraja podrhtavalo je i od nekoliko bliskih potresa magnitude M > 6. Gledano sa strane procjene seizmičkog hazarda Ivanečkog kraja, horizontalno vršno ubrzanja tla tipa A (a_{gR}) za povratna razdoblja od Tp = 95 i 475 godina izraženih u jedinicama gravitacijskog ubrzanja iznosi 0.089 g i 0.185 g, Slika 1. (Karte potresnih područja RH, aplikacija Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu).



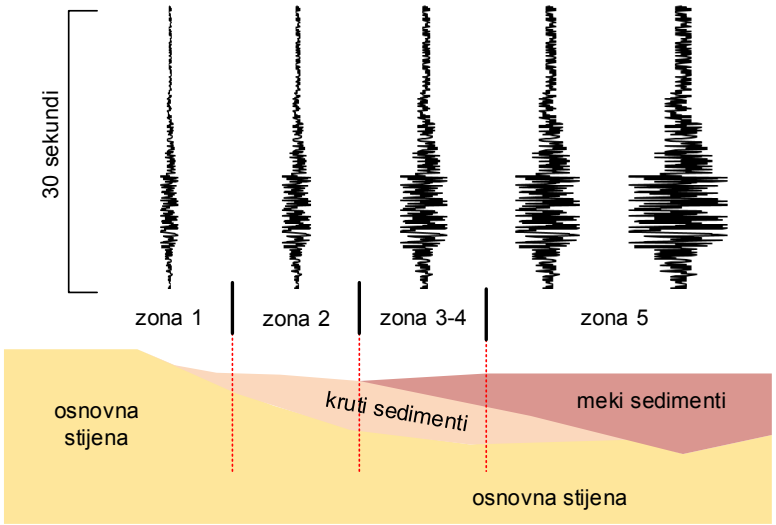
Slika 1. Poredbeno vršno ubrzanje tla tipa A s vjerojatnosti premašaja 10 % u 50 godina za povratno razdoblje 475 godina izraženo u jedinicama gravitacijskog ubrzanja g (Karte potresnih područja Republike Hrvatske su sastavni dio Nacionalnog dodatka HRN EN 1998-1:2011/NA: 2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade).

Za procjenu potresne ugroženosti grada Ivanca primijenjena je HVSR metoda (engl. Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio). To je suvremena neinvazivna geofizička metoda koja se uglavnom koristi za seizmičko mikrozoniranje, odnosno za procjenu osnovne frekvencije tla i određivanje razine amplifikacije mjerenjem seizmičkog šuma (mikronemir

ili mikrovibracije). Navedeni dinamički parametri uključuju lokalne utjecaje tla i smatraju se iznimno važnim za procjenu potresne ugroženosti.

1.1. UTJECAJ LOKALNOG TLA NA RAZINU OŠTEĆENJA OD POTRESA

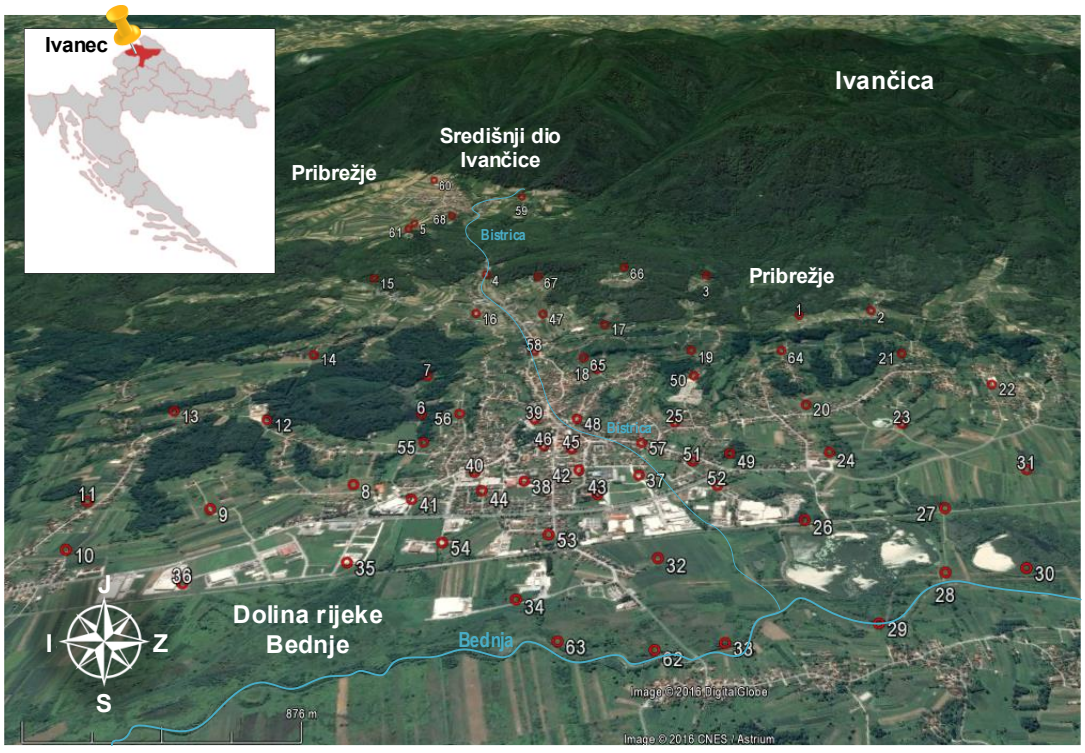
Svojstva i stanja lokalnih geoloških površinskih i potpovršinskih formacija i struktura imaju važan utjecaj na seizmičko gibanje tla, odnosno na moguća oštećenja građevina uzrokovana potresom. Razorni potresi (primjerice 1999. Izmit (Kocaeli), Turska; 1995. Kobe, Japan; 1994. Northridge, Kalifornija, SAD; 1989. Loma Prieta, Kalifornija, SAD; 1985.; Mexico City, Meksiko; 1983. Coalinga, Kalifornija, SAD) su potvrdili da je utjecaj lokalnog tla veoma bitan faktor u raspodjeli oštećenja od potresa u odnosu na posljedice koje dolaze od samog žarišta potresa i rasprostiranja potresnih valova (Reiter, 1990). Općenito, lokalni utjecaji tla se mogu definirati kao modificiranje atributa upadnog seizmičkog valnog polja (amplituda, frekvencija, duljina trajanja) zbog specifičnih fizičko – mehaničkih svojstava slojeva tla i površinske topografije (Aki i Richards, 2009; Pitilakis, 2007). Pri tome dolazi do povećanja, odnosno amplificiranja (engl. amplification) seizmičke pobude od osnovne stijene (engl. bedrock) do površine tla (engl. surface ground), odnosno pojam „amplifikacija lokalnog tla“ označava porast amplitude seizmičkog vala pri propagaciji kroz površinske geološke formacije i strukture, Slika 2. Zbog toga je procjena specifičnih uvjeta lokalnog tla veoma važna za određivanje svojstava gibanja površinskih slojeva uslijed djelovanja potresa.



Slika 2. Lokalna svojstva tla – primjer amplifikacije seizmičke pobude od osnovne stijene do površine (prema Seville i Metcalfe, 2005).

1.2. PODRUČJE GRADA IVANCA

Grad Ivanec se nalazi u južnom dijelu mikroregije Gornje porječje rijeke Bednje, u zapadnom dijelu Varaždinske županije na sjeveru Hrvatske. Zauzima sjeverne padine središnjeg dijela planine Ivančice, pripadajuće pribrežje i dio doline rijeke Bednje, Slika 3. Padine su dosta strme pa potok Bistrica, koji teče kroz grad, ima gotovo brdske značajke. Ivanec je mali grad s tek nešto više od 5000 stanovnika, ali njegovo šire područje obuhvaća 29 naselja s još 10 000 stanovnika. Društveno i gospodarski grad je od nekada bio zanimljiva i poticajna sredina (prva pekara i prva samoposluga) radno intenzivne industrije (drvoprerađivačka, metaloprerađivačka, prerada mesa, proizvodnja obuće, tekstilna industrija) (Web portal grada Ivanca). Danas postoji dvjestotinjak tvrtki s gotovo tri tisuće zaposlenih, raznovrsni obrti i poslovne zone, što je očito bilo presudno da grad zauzme čelno mjesto liste među deset europskih malih gradova perspektivnih za ekonomska ulaganja (The Financial Times, 2016). Područje grada Ivanca se nalazi između dva značajna europska cestovna pravca: Zagreb – Varaždin – Budimpešta i Zagreb – Krapina – Maribor – Graz. Magistralna cesta Varaždin – Ivanec – Sv. Križ Začretje spaja ta dva prometna pravca i daje prometnu važnost gradu.



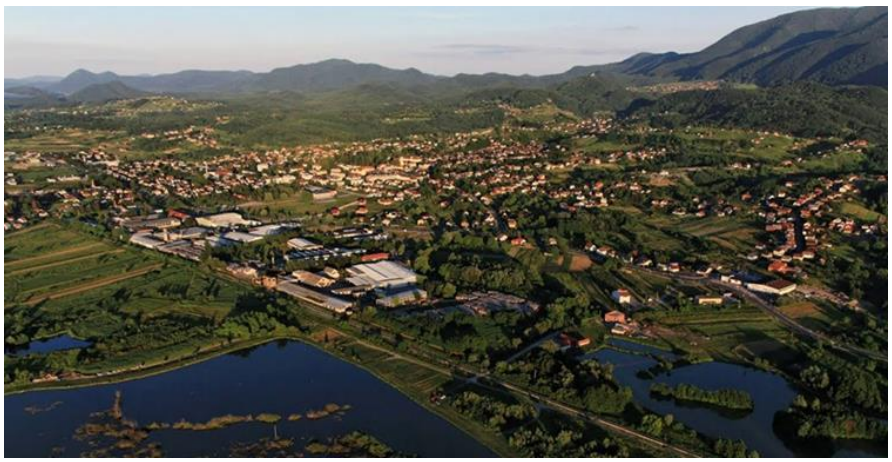
Slika 3. Smještaj grada Ivanca u odnosu na rijeku Bednju i planinu Ivančicu. Situacijski položaj točaka HVSR mjerenja (Podloga iz geopreglednika Google Earth).

1.3. CILJ I PLAN RADA

Kombinacijom geološko – geofizičko – geotehničkog istraživanja mogu se definirati parametri potrebni za protupotresnu gradnju (aseizmička gradnja) kao i parametri za procjenu rizika oštećenja objekata od potresa. S obzirom na relativno visoki seizmički hazard Ivanečkog kraja, geološku prošlost, povijesno zabilježenu seizmičnost i geografski položaj, metoda mjerenja mikroseizmičkog nemira, odnosno HVSR metoda izabrana je kao primjerena s ciljem izrade podloge, odnosno prve faze seizmičke mikrozonacije grada Ivanca. HVSR metodom se određuju seizmički parametri tla (osnovna frekvencija i amplifikacija), koji se mogu koristiti prilikom projektiranja inženjerskih konstrukcija (stambene i poslovne zgrade veće katnosti, industrijske zgrade i objekti, hidrotehničke konstrukcije na rijeci Bednji, sanacijski zahvati bivših ugljenokopa i drugo) radi povećanja njihove otpornosti na potrese. Na temelju tih parametara je moguće preciznije definiranje granica zona maksimalnih visina građevina primjerice u Prostornom planu uređenja grada Ivanca.

Područje grada Ivanca idealan je poligon za istraživanje potresne ugroženosti HVSR metodom, jer ga definira spoj aluvijalnog područja i prijelazne zone prema planini Ivančici, Slika 4.

Osim geografskih, geoloških i seizmičkih obilježja, za procjenu ugroženosti života ljudi i materijalnih dobara uzet je u obzir i gospodarski te društveni kontekst grada. U istraživanje su također bili uključeni uži centar grada te industrijska zona, kao područja najveće gustoće naseljenosti i potencijalne gradnje. Istraživanje se provelo u cilju izrade podloge za prvu seizmičku mikrozonaciju grada Ivanca, odnosno zoniranja područja prema rezonantnim frekvencijama koje su važne za protupotresnu gradnju.



Slika 4. Grad Ivanec i okolica u podnožju Ivančice (Belcar, 2013).

2. GEOLOŠKA I SEIZMOLOŠKA OBILJEŽJA IVANCA I IVANEČKOG PODRUČJA

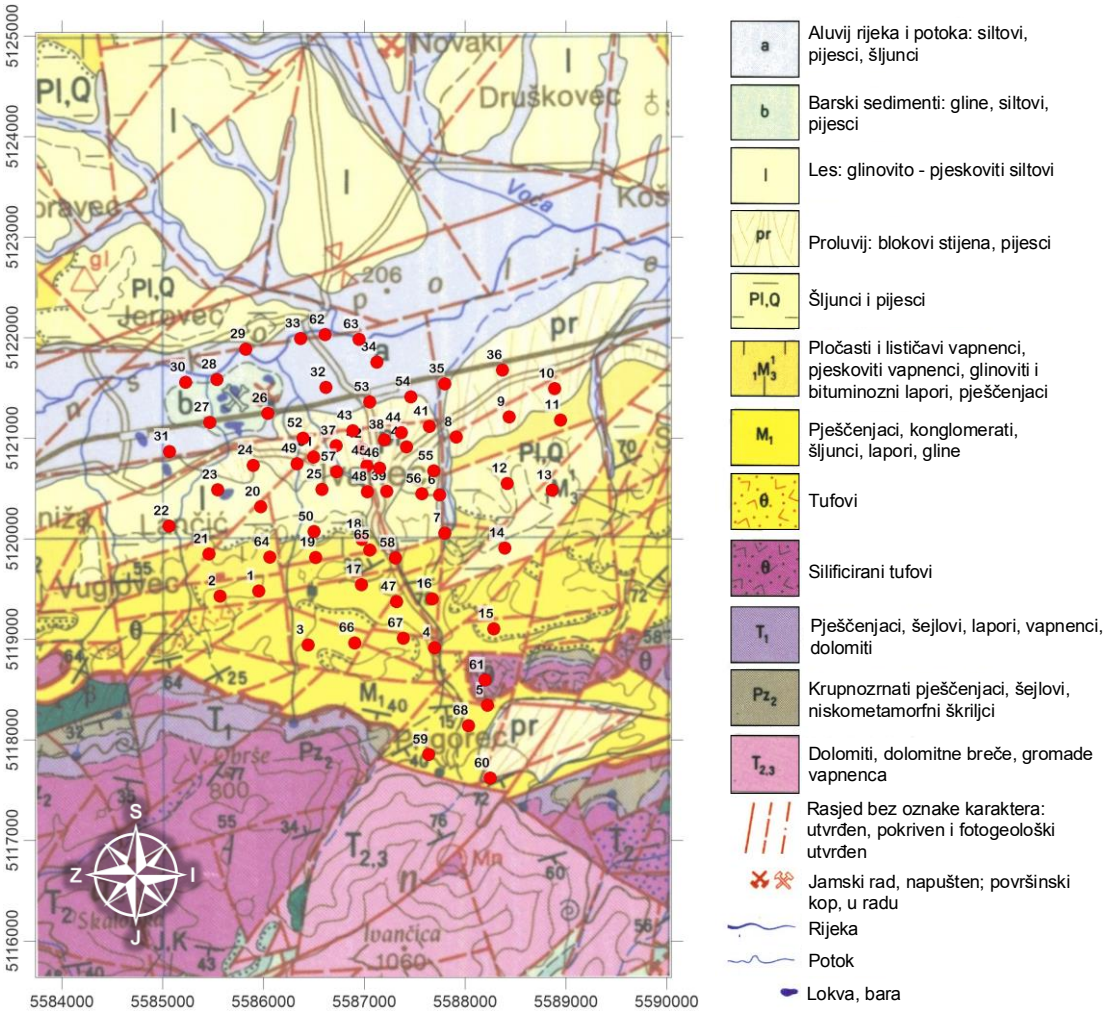
Intenzitet potresa, nastala šteta i duljina trajanja gibanja tla uzrokovanog potresom uglavnom ovisi o geološkim, tektonskim i geomorfološkim obilježjima okoline. Brojni su istraživači potvrdili da su kvalitetne informacije o tim obilježjima često presudne za procjenu razine ugroženosti od potresa. U suvremenom pristupu istraživanjima ti se podaci ne smatraju kao dodatni elementi, već se nastoje ugraditi u integrirani geo-inženjerski model.

2.1. GEOLOŠKA OBILJEŽJA

Postanak ivanečkog kraja i planine Ivančice vezan je za geološko formiranje područja sjeverne Hrvatske. Na tom području pojavljuju se stijene gornjeg paleozoika, trijasa, krede, tercijara i kvartara, što znači da su najstarije nastale prije 240 milijuna godina, a najmlađe nastaju i danas. U tom ogromnom vremenskom razdoblju ivanečki kraj najvećim je dijelom bio prekriven morem, a s njime i čitava sjeverna Hrvatska. Tijekom geoloških razdoblja ovo je područje bilo izloženo velikim promjenama uzrokovanim tektonskim pokretima koji su u ovom području bili vrlo jaki, a ponekad i popraćeni vulkanskom aktivnošću. Nastale su i velike količine sedimentnih stijena, kroz koje su se u tri navrata probili eruptivi koji su borali i rasjedali stijene tektonskim pokretima. Prilikom svakog okopnjavanja dolazilo je i do jake erozije te su starije stijene služile za izgradnju mlađih (Šimunić, 1997).

Najstarije stijene na području Ivanca su klastiti iz razdoblja gornjeg paleozoika i donjeg trijasa. Protežu se duž sjevernih padina Ivančice između Prigorca i Očure, a nastale su u priobalnom području tadašnjeg plitkog mora. U tom velikom vremenskom razdoblju nataložene su debele naslage sedimentnih stijena, čija se debljina procjenjuje na više tisuća metara. Za vrijeme srednjeg i gornjeg trijasa dominiraju plitkovodni karbonati, čiji je postanak vezan uz priobalnu sedimentaciju koja je bila pod stalnim utjecajem plime i oseke. To su dolomiti u koje su ponekad uloženi svijetlosivi vapnenci (Šimunić, 1997). Tijekom srednjeg trijasa nastaju i silificirani tufovi koji čine brežuljak Sv. Duh (Kraš, 2016), Slika 5. (lokacija 61). Ta stijena je nastala litifikacijom velikih količina vulkanskog pepela koji je izbijao na površinu duž pukotine u litosferi.

U miocenu su se pojavila jaka unutrašnja pomicanja, a more je ponovno prekrilo čitavo područje. Naslage donjeg miocena danas izbijaju na površinu u obliku dosta uske zone koja okružuje Ivančicu. U njima prevladavaju pijesci, vapnenci, pješčenjaci, konglomerati, šljunci, pjeskoviti i glinoviti lapori i gline. U posljednjem odsjeku formacije gornji miocen nastale su bogate naslage fosilnih sedimenata, pa su kod Ivanca i Ladanja stvoreni slojevi ugljena koji su se eksploatirali u ugljenokopima krajem 19. stoljeća, Slika 5. (lokacije 27 – 30). Ležišta lignita vezana su uz tzv. Lepoglavsko – ivanečku sinklinalu, gdje se tijekom gornjeg panona odvijala sedimentacija pijeska, gline, pjeskovitih lapora i na kraju lignita (Šimunić, 1997). Može se pretpostaviti da se ove naslage nastavljaju i prema sjeveru, gdje su prekrivene mlađim sedimentima.



Slika 5. Lokacije HVSR mjerenja označene na isječku Osnovne geološke karte OGK, L 33-69 Varaždin (Geološki zavod Zagreb, 1971-1978, autori: Šimunić, Pikija i Hećimović). Prikazani koordinatni sustav je Gauß-Krügerov pravokutni koji se uz standardni sustav (širina i duljina izražena u stupnjevima) koristi na geološkim kartama radi izražavanja koordinata u (kilo)metrima.

Na početku kvartara dolazi do izdizanja terena i ponovno se javljaju snažna unutrašnja pomicanja koja izazivaju nabiranje i rasjede. U tom procesu počelo je izdizanje Ivančice, Kalnika i Ravne gore. S novonastalih planina bujice rijeka su nanosile materijale u tadašnja jezera u kojima se odvijala sedimentacija klastičnog materijala. Prilikom transporta došlo je do separacije materijala te su se uz Ivančicu i Ravnu goru taložili šljunci, a u središnjim dijelovima pijesci i gline (Kraš, 2016). Od tih naslaga danas se najčešće ističu kvarcni pijesak i glina kod Jerovca, Slika 5. (lokacija 29). Radi se o sloju debljine 20 metara, a unutar njega pojavljuju se leće i proslojci šljunka. Kasnije sve te naslage ispresijecaju potoci i tako nastaju niski brežuljci i humlje, specifična obilježja Hrvatskog zagorja.

Unutar kvartara, pleistocenu pripada sitnozrnati, glinoviti pijesak, koji je za vrijeme oledbi vjetar prenosio u sjeverne krajeve Hrvatske. Taj sediment se u literaturi naziva prapor ili les. Danas je ostao sačuvan samo na mjestima koja nisu bila izložena jakoj eroziji. U većim količinama ima ga na najnižim obroncima između Lepoglave i Ivanca. Kvarcni pijesci eksploatiraju se na području Jerovca, gdje predstavljaju erozioni ostatak plio – pleistocenskih naslaga (Šimunić, 1986). Najmlađem holocenu pripadaju šljunci, pijesci i gline koji su taloženi u dolini rijeke Bednje i njezinih pritoka, Slika 5. Ovi sedimenti nastali su rastrožbom starijih stijena i nakupljanjem tog materijala u riječnim dolinama.

Na sjevernim padinama Ivančice otkrivene su i velike količine sivih i tamnosivih dolomitnih breča. To su tektonske breče, nastale drobljenjem dolomita i njihovim naknadnim povezivanjem. Ispresijecane su mnogobrojnim pukotinama koje su zapunjene rekristaliziranim dolomitom i kalcitom (Šimunić, 2006).

2.2. SEIZMOLOŠKA OBILJEŽJA

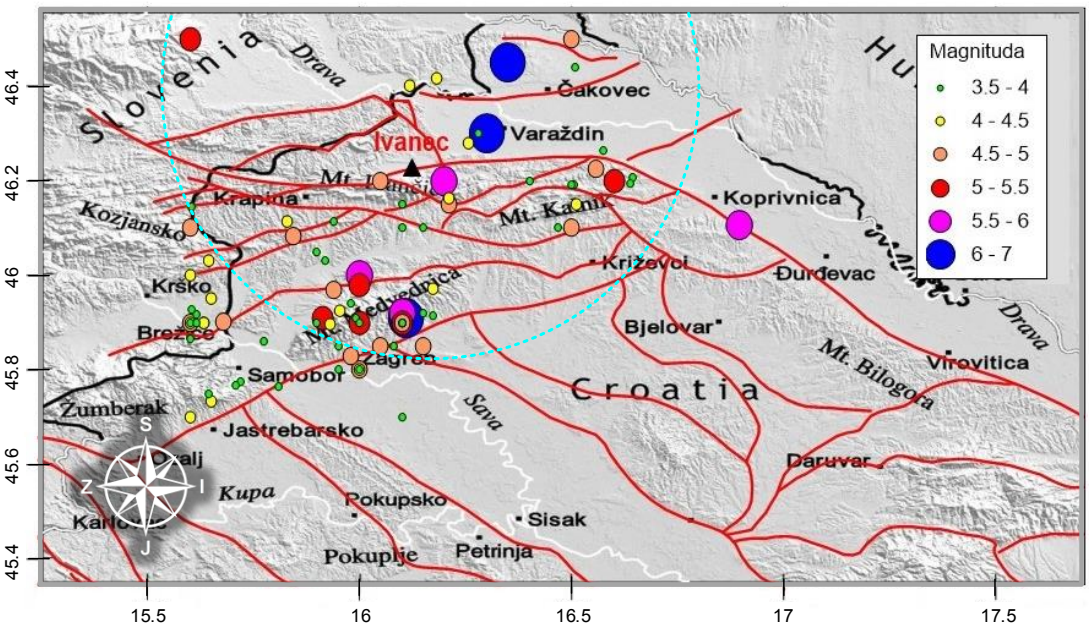
Seizmičnost sjeverne Hrvatske je određena pomoću opisa potresa iz povijesti te njihovim ponovnim analiziranjem i pozicioniranjem s obzirom na seizmograme potresa koji se javljaju nakon 1908. godine. Zapisi seizmografa su se koristili kao reference i markeri za analizu ranijih potresa prije instrumentalnih mjerenja. Osnovno seizmološko obilježje je: umjerena seizmičnost s rijetkim pojavama snažnijih potresa što je značajka unutar-tektonske seizmičnosti (Herak, D. i sur., 2009).

Tektonski, sjeverna Hrvatska leži na granici zona između Alpa, Dinarida i Panonskog bazena. Nalazi se na trostrukom spoju između transkurentnih rasjeda Perijadrana, Balatona i Drave. Ti su rasjedi imali važnu ulogu u tektonici neogena i kvartara u ovom području. Sukladno tome zabilježena je i postepena promjena bora i navlaka s

usmjerenjem SI – JZ (Tomljenović i Csontos, 2001). Herak, D. i sur., (2009) kao seizmološka obilježja ovog područja navode seizmogena rasjedanja reversnih rasjeda u smjeru I – Z prema SZ – JI s uranjanjem J – JZ. To odgovara rasjedima s gotovo jednakom orijentacijom i gibanjem duž sjevernog ruba Kalničkog gorja, Slika 6.

U sjevernoj Hrvatskoj morfološki je izolirano nekoliko i do 1000 metara visokih planina izgrađenih od stijena iz razdoblja Mezozoika koje izbijaju iz neogenih i kvartarnih sedimenata Panonskog bazena. Najveće su Ivančica, Medvednica i Žumberačko gorje i one diktiraju seizmološki režim tog područja.

U krugu od 50 km od grada Ivanca zabilježen je velik broj potresa različite jakosti u razdoblju od 1459. do 2016. godine, Slika 6. Epicentralno područje Ivančica – Kalnik – Ludbreg – Koprivnica je doživjelo umjerenu seizmičnost s makroseizmičkom jakošću do VII° MC (Mercalli – Calcani – Seberg) što odgovara rasponu magnitude od 5.0 do 5.5 po Richteru.



Slika 6. Karta središnje i sjeverne Hrvatske s označenim epicentrima potresa od 1459. do 2016. godine s magnitudama od 3.5 do 7 po Richterovoj skali u krugu od 50 km od Ivanca (osobna komunikacija: Ivančić, Markušić 2017; Herak, D. i sur., 2009). Crvenim linijama su označeni rasjedi (Ivančić i sur., 2006).

Današnja seizmičnost pokazuje značajnu aktivnost epicentralnog područja Varaždin – Ivančica – Kozjansko (Herak, D. i sur., 2009) te postoje samo vrlo dvojbeni podaci o povijesnim potresima (primjerice: 1459. potres blizu Varaždina, Io = IX °MCS, bio je magnitude 6.74 po Richteru, potres nedaleko od Čakovca 1738. s magnitudom od M =

6.02 po Richteru te potres nedaleko od Zagreba s magnitudom M = 6.18 po Richteru). Najveći broj potresa najvjerojatnije se javljao tijekom formiranja planine Ivančice u geološkoj prošlosti. Ivanečki je kraj tada podrhtavao neusporedivo jače od najjačih potresa koji su registrirani primjerice u svibnju 1926. (M = 4.94) ili rujnu 1990. godine (M = 5.0) s epicentrom nedaleko od Zagreba (Kraš, 2016).

Zbog dostupnosti detaljnijih informacija posebno su zanimljivi potresi koji su se dogodili 1938. i 1982. godine. O potresu 27. ožujka 1938. s epicentrom nedaleko od Koprivnice (Slika 6.), postoji detaljan i slikovit opis njegove jačine i posljedica koje je uzrokovao na području Ivanca. Članak je objavljen u listu Varaždinske novosti. Opis potresa glasi: *„Ivanec i cijela okolica potresli su se u nedjelju u 12,28 sati od žestokog potresa zemlje. Bila su dva udara: jedan vertikalni u trajanju od 45 sekundi i jedan valoviti od tri sekunde. Potresu je prethodila mukla podzemna tutnjava, a smjer je bio od juga prema sjeveru. Potres je došao do nas iz bilogorskog područja. Potres se ponovio 4. travnja 1938. ali slabije jačine i trajanja 23 sek. Iste godine potresi su zahvatili Ivanec 11. i 12. listopada, kada je zabilježeno osam pomicanja tla. Uz podzemnu tutnjavu popucali zidovi i porušili se dimnjaci.“* (Kraš, 2016). Takav opis daje dovoljno informacija o kretanju potresa na tom području, a one mogu poslužiti kod analiziranja ostalih potresa u okolici grada Ivanca.

Za područje Ivanca važan je bio i potres iz 16. ožujka 1982. godine s epicentrom ispod planine Ivančice. Magnituda potresa iznosila je M = 4.5. Uzrokovao je znatna oštećenja, posebice na zgradi Srednje škole Ivanec, koja je zahtijevala obnovu pa je pritom izgrađeni i novi dio škole. Nakon prvih obavijesti o posljedicama potresa, kako o epicentru tako i na rubovima njegovih amplituda, Regionalni zavod za zaštitu spomenika kulture u Zagrebu je već 18. ožujka uputio prvu ekipu na područja općine Ivanec, Novi Marof i Zlatar Bistrica (Lučić, 1982). Oštećenja su se pojavila i 20 km od epicentra kod dvorca Trakošćan. Kula dvorca kao i pod drugog kata bili su oštećeni potresom. U svom istraživanju Stanko i sur. (2016) su potvrdili da je veći dio energije ovog potresa bio usmjeren duž aluvija korita rijeke Bednje od planine Ivančice prema dvorcu Trakošćan. U užem području Ivanca dogodila su se još tri značajnija potresa magnitude veće od 4 po Richteru i to potres 12. studenog 1836. magnitude M = 5.66 po Richteru, 29 svibnja 1905. magnitude M = 4.66 po Richteru te potres 11. lipnja 1973. magnitude M = 4 po Richteru. Podrhtavanje šireg područja oko Ivanca i ovdje pokazuje da unutrašnjost Zemlje nikad ne miruje. Velika je vjerojatnost da je uzrok tome aktivni rasjed koji se pruža uz planinu Ivančicu (Stanko i sur., 2016).

3. HVSR METODA

HVSR (eng. Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) je brza i relativno jednostavna geofizička metoda za istraživanje odziva tla, stijena ili inženjerskih konstrukcija na dinamičko djelovanje. To je seizmička metoda kojom se određuje vlastita ili rezonantna frekvencija i faktor amplifikacije mjerenjem mikrovibracija. Mikrovibracije kao dinamičko djelovanje podrazumijevaju kratkotrajno podrhtavanje slabog intenziteta (mikropotresi) uzrokovano prirodnim i/ili umjetnim izvorima (primjerice: vjetar, oceanski valovi, udaljeni potresi, ciklone i anticiklone, promet, industrijski strojevi) (SESAME, 2004). Mikropotresi su stalno prisutne pojave, a mogu se mjeriti na temeljnom tlu, temeljnoj stijeni, u zgradama, na nasipima, branama i na drugim građevinskim objektima.

HVSR doslovno znači omjer spektralnih odziva horizontalne i vertikalne komponente mikrovibracija, izmjerenih u nekoj točki istraživanja. Vrijednosti izmjerenog mikrotremora se potom koriste za određivanje seizmičkog odziva, izraženog pomoću osnovne/prirodne frekvencije (f_0) i amplifikacije (A_0) tla i/ili stijena pod površinom (SESAME, 2004). Ta se metoda uspješno koristi i za procjenu razine zaštite neke građevine od potresa, tako da se mjerenjem i analizom izdvoje seizmički osjetljive strukturne točke.

Kombinacijom geološko – geofizičko – geotehničkog istraživanja mogu se definirati parametri potrebni za protupotresnu gradnju (aseizmička gradnja), kao i parametri za procjenu potencijalnih rizika oštećenja objekata od potresa. Procjena lokalnih (fizičko – mehaničkih i inženjerskih) uvjeta tla vrlo je važna da bi se odredila svojstva gibanja površinskih slojeva tla pod djelovanjem potresa. Gibanje tla uslijed djelovanja seizmičkih valova na površini Zemlje ovisi o fizičko – mehaničkim značajkama geoloških formacija kroz koje se ti valovi šire (Stanko i sur., 2016). Pri tome dolazi do povećanja seizmičke pobude od osnovne stijene do površine tla.

3.1. TROMINO UREĐAJ ZA HVSR MJERENJA

Seizmički mikronemir na nekoj lokaciji može značajno varirati. No, rezultati mjerenja pokazuju da se podjela spektra između horizontalnih i vertikalnih komponentni (upravo omjer H/V) normalizira tako da se utjecaj izvora eliminira, a odaziv tla se poboljšava pa omjer tih komponenti ostaje u suštini konstantan. HVSR je pasivna seizmička metoda koja ne zahtijeva poseban seizmički izvor, već se mjere mikrovibracije „iz okoline“, odnosno seizmički šum. Za mjerenje se koristi sustav s vrlo osjetljivim seizmometrima, geofonima za mjerenje brzina i akcelerometrima za mjerenje ubrzanja. Mjeri se u tri glavna, međusobno okomita smjera: horizontalni S – J, horizontalni I – Z i vertikalni. To

omogućuje određivanje rezonantnih frekvencija zgrada i tla pasivno i brzo, bez ikakvih utjecaja na tlo ili zgradu.

Tromino 3G je visoko osjetljiv seizmometar dizajniran za snimanje pozadinskih seizmičkih događaja (mikropotresa), Slika 7. Njime se primarno mjeri osnovna ili rezonantna frekvencija tla, pri čemu se koristi spektralni omjer H/V horizontalne i vertikalne komponente (SESAME, 2004). Postoje velike varijacije u amplitudama (vrijednostima H/V omjera), koje su funkcija intenziteta seizmičkog šuma, no spektralni omjer u srži ostaje netaknut te je vezan za profil i svojstva lokalnog tla. Tromino se može koristiti i za seizmičku refrakciju i MASW uz upotrebu s bežičnog trigera radi seizmičkog profiliranja neke lokacije (stratificiranje vrsta i debljina pojedinih geoloških slojeva).

Glavna tehnička svojstva Tromino 3G (Micromed S.p.A., Mogliano Veneto, Italija) uređaja su:

- 3 kanala za mjerenje brzine s podesivim dinamičkim rasponom
- 3 kanala za mjerenje akceleracije
- radni opseg 0.1 – 2048 Hz na svim kanalima
- 1 kanal za spajanje eksternog trigera za MASW/refrakciju
- ugrađeni GSP prijamnik s unutarnjom i/ili vanjskom antenom za pozicioniranje i sinkronizaciju više uređaja
- ugrađeni radio odašiljač/prijamnik za sinkronizaciju više uređaja u unutarnjim i vanjskim prostorima te uključivanje i/ili prijenos alarma (ako se pojavi signal iznad postavljenog praga).



Slika 7. Uređaj za HVSR mjerenja: Tromino Micromed S.p.A., Mogliano Veneto, Italy.

3.2. TEHNIČKI ZAHTJEVI MJERENJA

Na kvalitetu i pouzdanost rezultata utječu različiti uvjeti i parametri mjerenja. U gradovima antropogena buka može biti vrlo velika, a teško je i pronaći pogodnu lokaciju (prirodno tlo) za postavljanje uređaja. Mjerenja se zbog toga najčešće provode na asfaltu, betonu ili drugim umjetnim podlogama. Na rezultate također utječe i blizina okolnih zgrada različitih dimenzija, a mjerenja se ne provode uvijek u isto vrijeme i pri istim vremenskim uvjetima. Prisutnost podzemne infrastrukture (vodovodi, kanalizacija i druge vrste cjevovoda) je često nepoznata. Osjetljivost mjerenja (engl. gain) se mora podesiti do maksimalne vrijednosti kod koje signal ostaje nepromijenjen (pojačavanje signala bez izobličenja).

Trajanje mjerenja veže se uz najnižu očekivanu frekvenciju. Na primjer, ako se želi odrediti rezonantna frekvencija sedimentnog sloja debljine 300 metara, očekuju se frekvencije oko 0.5 Hz koje daju period od 2 sekunde (Izraz (1) – poglavlje 3.4.). Očito je da trajanje mjerenja u tom slučaju treba biti barem 2 sekunde. U praksi, za dobivanje pouzdanih rezultata, trajanje mjerenja treba biti dovoljno dugo da obuhvati 10 ponavljanja najduljeg očekivanog perioda. U navedenom primjeru to znači 20 sekundi. Nadalje, budući da se radi o ekstrakciji informacija iz seizmičkog šuma, očekuju se pojave fluktuacija rezultata s vremenom. To se može prikladno kontrolirati s uzorkovanjem od N uzoraka od po 20 sekundi, tako da rezultati mjerenja postanu statistički značajni (Magnon, 2013). U uobičajenoj praksi N može biti 30 – 50, što znači da je ukupno trajanje jednog mjerenja 10-15 minuta. Mjerenja u zgradama su mnogo stabilnija od snimanja u tlima pa je za takve aplikacije dovoljno mjerenja u trajanju od 5 – 6 minuta.

Za osiguravanje dobrog kontakta između uređaja i tla, uređaj se postavlja direktno na tlo, osim u posebnim slučajevima (npr. strma padina). Asfaltna ili betonska podloga ne utječe na HVSR frekvencije, iako se mogu primijetiti blage smetnje u rasponu od 7 do 8 Hz koje ipak ne utječu na oblik HVSR krivulje. Trava sama po sebi ne utječe na rezultate mjerenja, no može predstavljati smetnju kod niveliranja uređaja i ostvarivanja dobrog kontakta s tlom. Zato se preporuča uklanjanje visoke trave ukoliko je prisutna na lokaciji mjerenja. Potrebno je izbjegavati postavljanje uređaja na poljoprivredne ili druge meke površine, kao što su blato, oranice ili sintetici kojima se pokrivaju npr. sportski tereni. Treba izbjegavati i snimanje na vrlo zasićenom tlu, npr. nakon obilne kiše.

Šljunak i veće frakcije mogu spriječiti dobar kontakt uređaja s tlom, što kao rezultat daje vrlo poremećenu HVSR krivulju. Potrebno je pomaknuti uređaj nekoliko metara na drugu

vrstu tla ili ukloniti površinski sloj šljunka ako je moguće. Snimanje na snijegu ili ledu utječe na rezultate. U takvim slučajevima, snijeg mora biti zbijen, te se uređaj postavlja na metalnu ili drvenu podlogu da bi se priječili pomaci senzora uslijed kontaktnog topljenja ispod uređaja. Također je potrebno obratiti pažnju da vanjska temperatura nije niža od radne temperature uređaja (Magnon, 2013).

Snimanja u blizini zgrada, drveća i slično, mogu utjecati na rezultate. Postoje jasna zapažanja da pomaci takvih objekata pod djelovanjem vjetra izazivaju jake smetnje niskih frekvencija. Nažalost, nije moguće odrediti minimalnu udaljenost lokacije mjerenja od zgrada ili drveća gdje je utjecaj zanemariv, jer ona ovisi i o mnogo drugih vanjskih faktora (dimenzije i oblik zgrade, brzina vjetra, tip tla i slično).

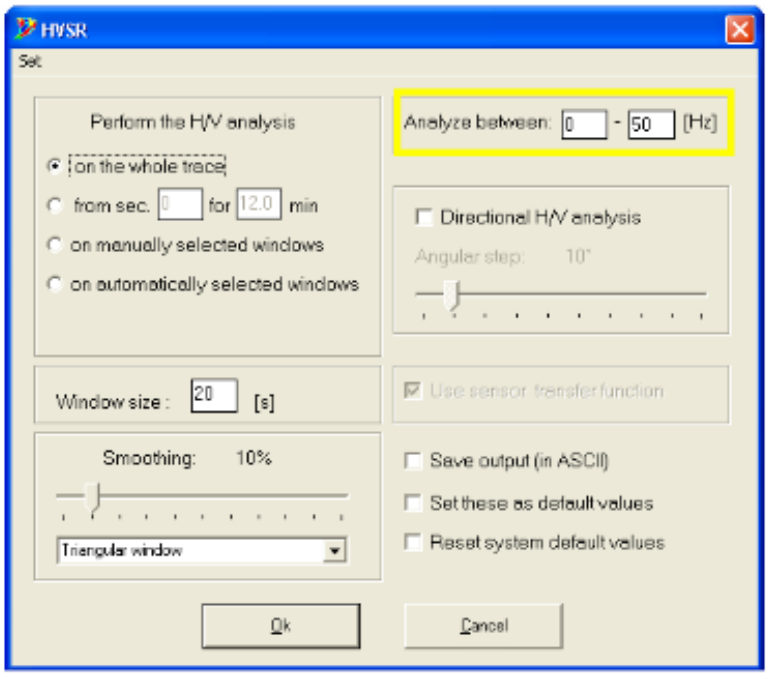
Od vremenskih uvjeta vjetar ima najveći utjecaj na rezultate snimanja, stoga se ne preporuča snimanje za vjetrovitih dana. Čak i manje brzine vjetra (od 5 m/s) predstavljaju značajne smetnje, dajući niske frekvencije (ispod 1 Hz) koje nisu povezane s lokalnim uvjetima tla. Potrebno je izbjegavati snimanja za vrijeme jakih kiša, dok slabije kiše ne utječu značajnije na rezultate. Niski tlak zraka podiže niže frekvencije što može utjecati na oblik HVSR krivulje (Magnon, 2013).

Sve vrste kratkotrajnih lokalnih izvora smetnji (pješaci, promet i slično) mogu utjecati na mjerenja. Utjecaj ovisi o udaljenosti od takvih izvora, njihovom intenzitetu, vrsti tla. Visokonaponski vodovi ne utječu na rezultate mjerenja.

Također je potrebno izbjegavati snimanja u blizini radnih strojeva i industrijskih postrojenja, iako je takve smetnje u nekim slučajevima moguće izolirati i ukloniti u kasnijoj obradi podataka mjerenja.

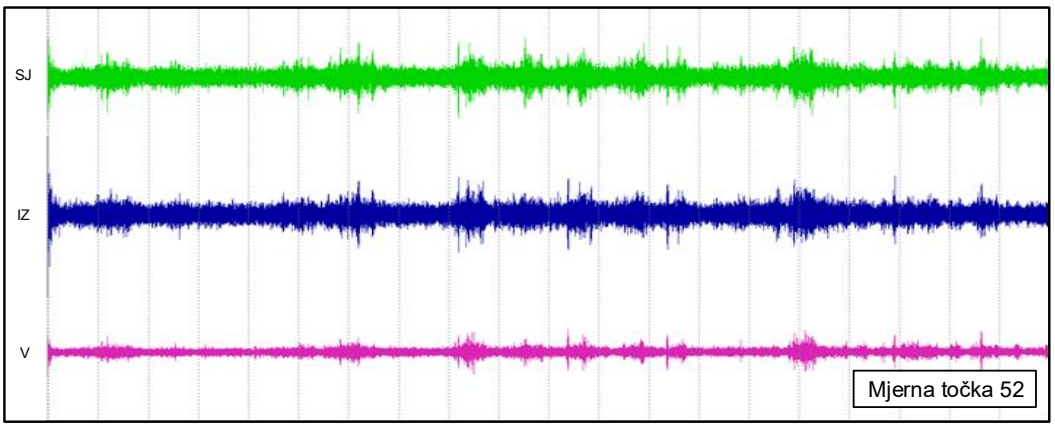
3.3. ANALIZA PODATAKA MJERENJA NA LOKACIJAMA

Za analizu i obradu podataka HVSR mjerenja te određivanje H/V spektra koristio se računalni program Grilla rel. 6.5 (Micromed S.p.A., Mogliano Veneto, Italy), Slika 8. Spektralna analiza se provodila na cijelom zapisu mjerenja (seizmički trag mikronemira) u rasponu frekvencija od 0 do 50 Hz.

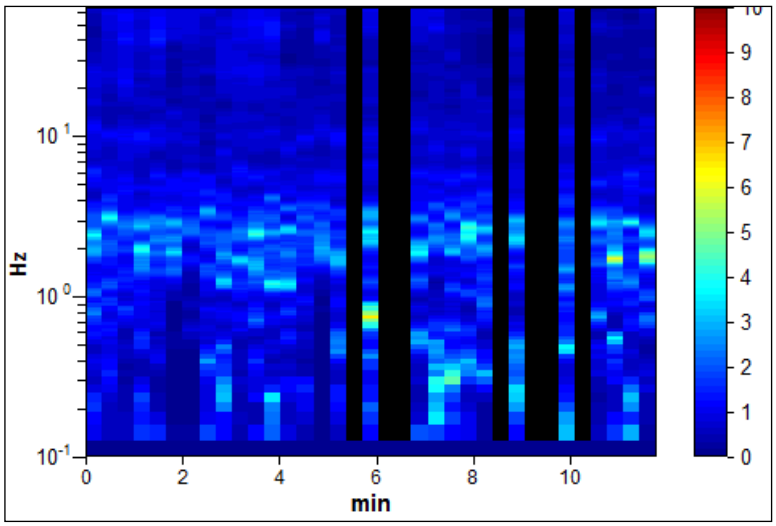


Slika 8. HVSR analiza u programu Grilla r. 6.5 (Micromed S.p.A., Mogliano Veneto, Italy).

Mikroseizmički nemir tla na pojedinoj lokaciji je registriran u vremenskoj domeni, a potom je razdijeljen u vremenske sekvence (prozore) duljine 20 sekundi, Slika 9. Nakon toga su uklonjene one sekvence koje su tijekom mjerenja bile kontaminirane jakim tranzijentima (utjecaj vjetra, pješaka, vozila, strojeva i slično), Slika 10.

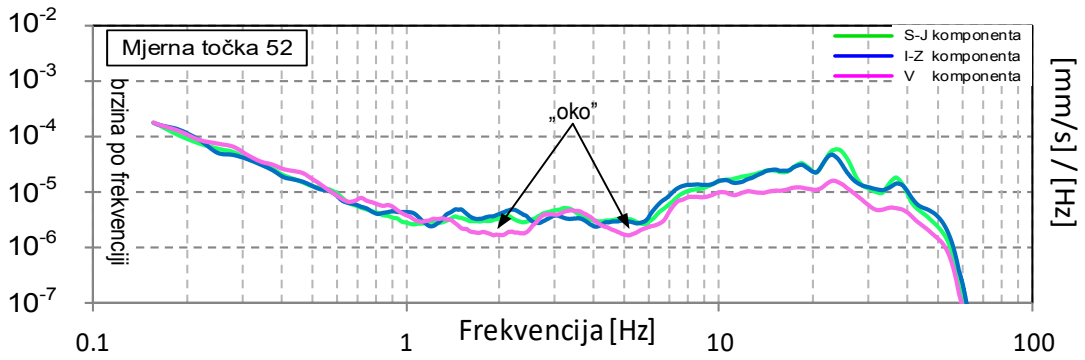


Slika 9. Primjer snimke mikroseizmičkog nemira u trajanju od 20 minuta. Prikazani su zapisi amplituda brzine mikrovibracija u vremenu za glavne komponente: horizontalna S – J (zelena boja), horizontalna I – Z (plava boja) i vertikalna (roza boja).



Slika 10. Postupak izoliranja (uklanjanja) vremenskih sekvenci kontaminiranih mjerenja. Legenda na slici (traka boja) označava broj N uzoraka određene frekvencije (Mjerna točka 52).

HVSR (H/V) spektri se za svaki prozor računaju kao omjer aritmetičkih sredina Fourierovih spektara dviju horizontalnih komponenti (S – J i – Z) te Fourierovog spektra vertikalne komponente (V), Slika 11. Sekvence se izabiru na temelju kriterija o očekivanoj razini frekvencijskog raspona. Primjerice, ako se ne očekuju osnovne frekvencije iznad 20 Hz, onda se isjeku oni prozori koji takve frekvencije sadrže (crne trake na Slici 10). H/V vrhovi stratigrafskog podrijetla karakterizirani su lokalnim minimumom u V komponenti, a odsutni na vodoravnim komponentama, što dovodi do strukture spektra u obliku „oka“. Na taj način se osigurava vjerodostojnost HVSR krivulje.



Slika 11. Fourierov amplitudni spektar svake pojedine komponente. Omjerom aritmetičke sredine horizontalnih komponenti i vertikalne komponente je definiram HVSR spektar (HVSR krivulje), odnosno H/V amplituda po frekvenciji.

Radi utvrđivanja korektnosti rezultata potrebno je provjeriti da li dobivena rezonantna frekvencija tla zadovoljava statističke kriterije prema SESAME (2004) uputama koje su prikazane u Tablici 1.

Tablica 1. Statistički kriteriji korektnosti HVSR krivulje, SESAME (2004)

Kriteriji korektnosti HVSR krivulje	
Sva tri osnovna kriterija moraju biti zadovoljena.	
1	**$f_0 > 10 / L_w$**
2	**$n_c(f_0) > 200$**
3	**$\sigma_A(f) < 2$** za **$0.5f_0 < f < 2f_0$** ako je **$f_0 > 0.5$Hz** **$\sigma_A(f) < 3$** za **$0.5f_0 < f < 2f_0$** ako je **$f_0 < 0.5$Hz**
Kriteriji za jasno definiran HVSR vrh	
Treba biti zadovoljeno 5 od navedenih 6 kriterija. Ne odnosi se na mjerena na osnovnoj stijeni.	
1	Postoji **f^-** u intervalu **$[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$**
2	Postoji **f^+** u intervalu **$[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$**
3	**$A_0 > 2$**
4	**$f_{vrh}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$**
5	**$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$**
6	**$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$**

L_w	širina vremenske sekvence / prozora
n_w	broj sekvenci u analizi
$n_c = L_w n_w f_0$	broj značajnih ciklusa
f	trenutna frekvencija
f_0	H/V osnovna frekvencija
σ_f	standardna devijacija H/V osnovne frekvencije
$\varepsilon(f_0)$	prag za uvjet stabilnosti $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V vršna amplituda pri frekvenciji f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V amplitude krivulje pri frekvenciji f
f^-	frekvencija između $f_0/4$ i f_0 za koju vrijedi uvjet $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frekvencija između f_0 i $4f_0$ za koju vrijedi uvjet $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standardna devijacija za $A_{H/V}(f)$; $\sigma_A(f)$ je faktor s kojim se srednja vrijednost $A_{H/V}(f)$ krivulje treba pomnožiti ili podijeliti
$\sigma_{logH/V}(f)$	standardna devijacija za log $A_{H/V}(f)$ krivulju
$\theta(f_0)$	prag za uvjet stabilnosti $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Kriteriji korektnosti HVSR krivulje odnose se na sljedeće:

i) Prva tri kriterija se odnose na relativnu duljinu vremenskih sekvenci (prozora). Sekvence se smatraju funkcijama frekvencije rezonantnog vrha f_0. Sva tri kriterija moraju biti zadovoljena.

ii) Ostalih 6 kriterija odnose se na statističku značajnost frekvencije rezonantnog vrha. Poželjno je da što više kriterija bude zadovoljeno, No čak i ako neki kriteriji nisu zadovoljeni, to ne mora nužno značiti da HVSR krivulja predstavlja pogrešnu interpretaciju. Tih šest dodatnih kriterija ne treba biti zadovoljeno ako se mjeri neposredno na osnovnoj stijeni.

3.4. INTERPRETACIJA HVSR PODATAKA

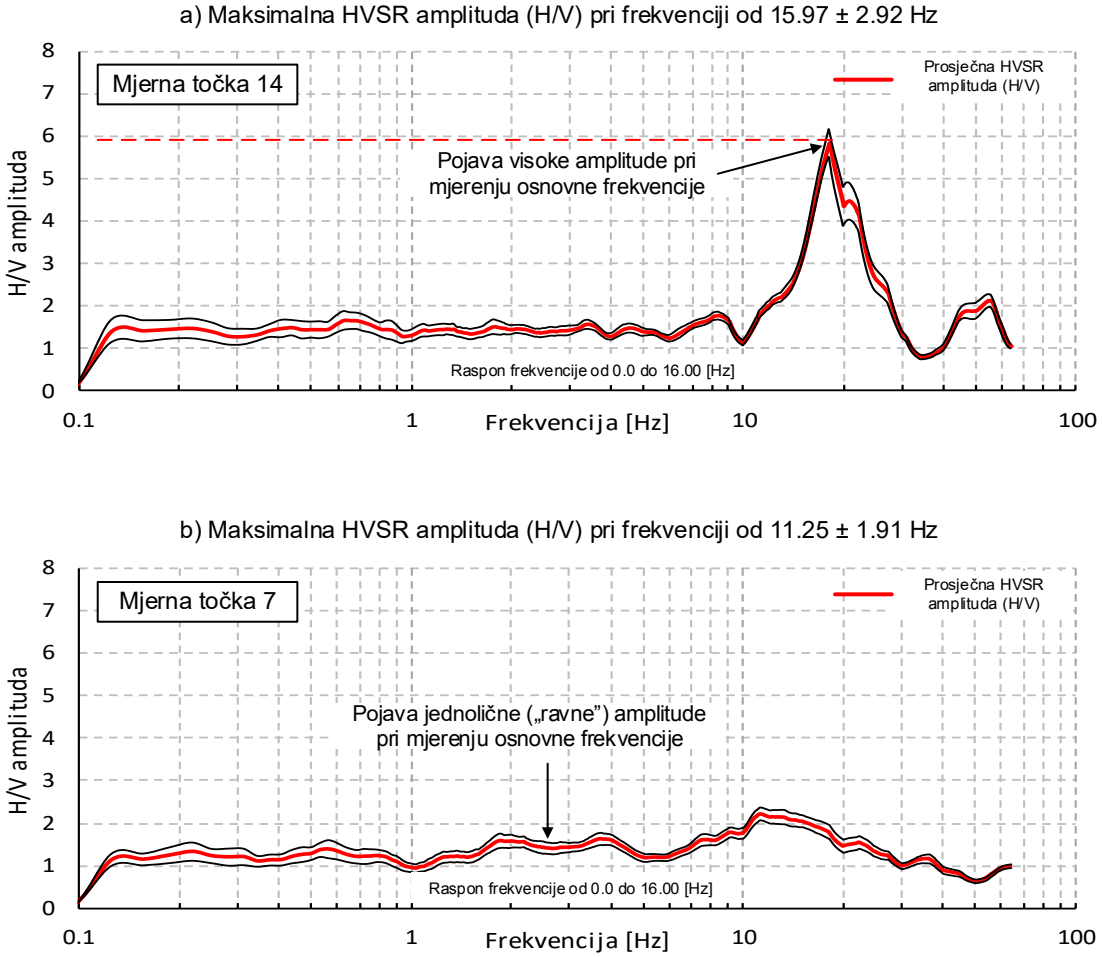
Izmjereni podaci na terenu: osnovna frekvencija tla, parametri amplifikacije, raspodjela brzine posmičnih valova, procijenjena dubina do osnovne stijene i usmjerena djelovanja gibanja tla se potom analiziraju s inženjersko-geološkim i geotehničkim modelima promatranog područja, uspoređuju se s topografskim strukturama i smjerom propagacije.

Seizmički odziv tla je povezan s debljinom sedimenata (H) i brzinom posmičnih valova (V_S), a izražava se pomoću prirodne/osnovne frekvencije (f_0) i amplifikacije (A_0) sedimenata (SESAME, 2004.). Osnovna frekvencija je niska za deblje naslage iznimno mekih sedimenata i visoka za vrlo tanke (plitke) slojeve. Pojam „amplifikacija lokalnog tla“ se odnosi na porast amplitude seizmičkog vala pri propagaciji kroz površinske geološke formacije i strukture. Amplitude HVSR vrhova (A_0) su povezane s kontrastom impedancije između osnovne stijene i svih slojeva iznad osnovne. Također su povezane s lateralnom heterogenošću, prigušenjem u sedimentima te sa svojstvima valnog polja seizmičkog događaja. (Seizmička impedancija je produkt brzine seizmičkog vala V i ρ gustoće geomedija kroz kojeg se val širi).

Rezultat analize svakog pojedinog mjerenja mikroseizmičkog nemira je HVSR krivulja iz koje se može izdvojiti rezonantna frekvencija na nekoj lokaciji (vrh HVSR amplitude).

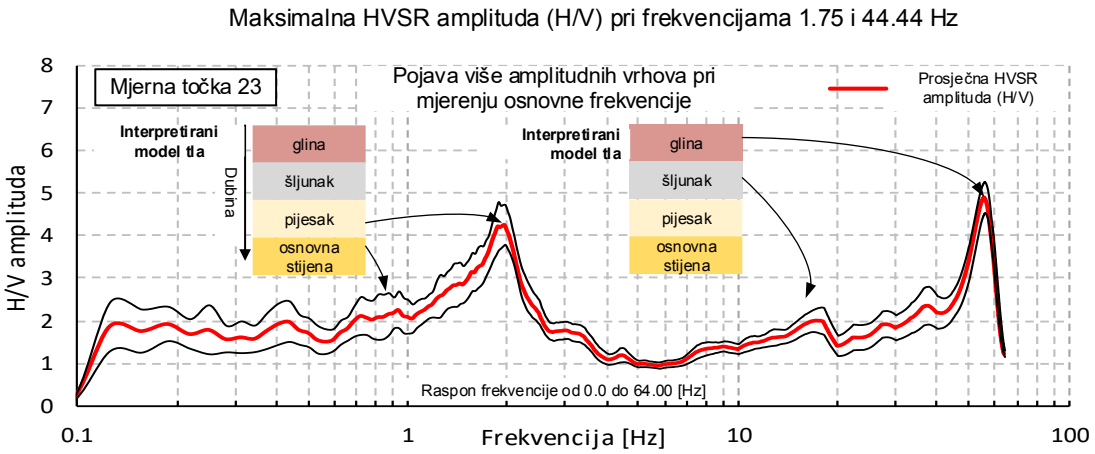
Mala vrijednost amplitude HVSR krivulje je povezana s malim kontrastom seizmičke impedancije između sedimenata (formacija tla i/ili stijena u kojima se temelji) veće krutosti i svježe osnovne stijene. Analogno, visoka vrijednost amplitude ukazuje na znatan kontrast na granici osnovne stijene i mekših sedimenata (manje krutosti). U seizmičkom smislu, sedimenti veće krutosti imaju veće brzine V_S posmičnih S valova,

dok mekši sedimenti maju manje brzine V_S. Slika 12. a) prikazuje odziv s visokom HVSR amplitudom osnovne frekvencije, svojstven geološkoj situaciji u kojoj se sedimenti male krutosti nalaze iznad osnovne stijene pa je kontrast impedancije na njihovoj granici znatan. Slika 12. b) prikazuje „ravnu“ HVSR krivulju pa nije moguće jasno odrediti kontrast impedancije. Iz toga se može zaključiti da se od granice s osnovnom stijenom do površine pružaju sedimenti visoke krutosti, (Leyton i sur., 2013).



Slika 12. Primjeri HVSR krivulja: a) visoka amplituda osnovne frekvencije tla; b) „ravna“ HVSR krivulja (prema Leyton i sur., 2013).

U slučajevima kada se pojavljuje više vrhova na HVSR krivulji, vrh s najnižom frekvencijom je temeljni, odnosno odgovara kontaktu osnovne stijene i svih sedimenata iznad nje. Ostale granice slojeva također daju amplifikacije na određenim frekvencijama, pa kao posljedica nastaju i „njihovi“ vrhovi na HVSR krivulji, Slika 13. (Magnon, 2013).

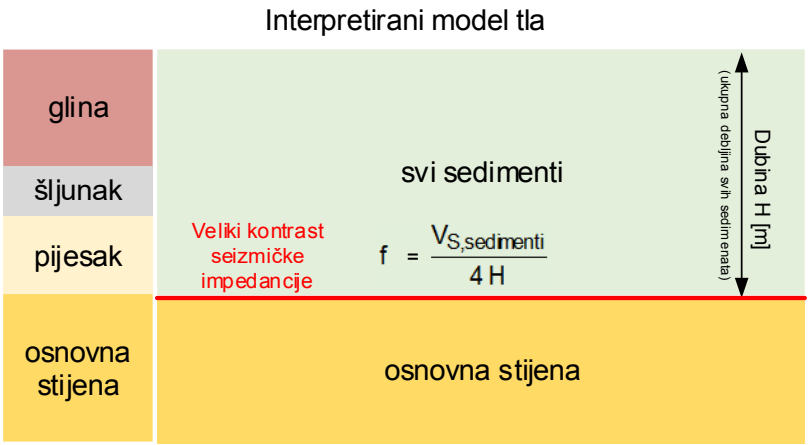


Slika 13. Primjer HVSR krivulje s više vrhova koji označavaju različite geološke granice (prema Magnon, 2013).

Postoji jednostavan izraz (1) koji povezuje rezonantnu frekvenciju f_0, debljinu sloja H i brzinu posmičnih valova V_s u sedimentnom paketu iznad osnovne stijene:

$$f_0 = \frac{V_S}{4\,H} \qquad (1)$$

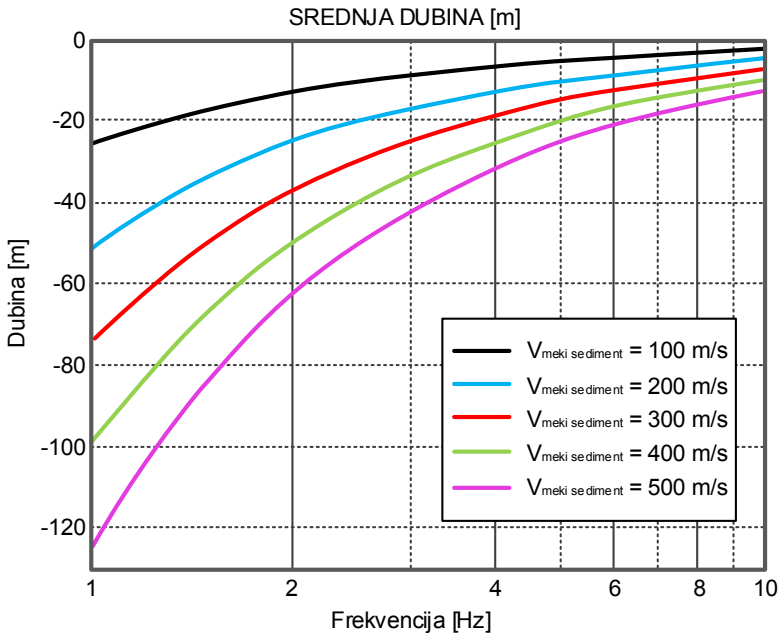
Koncept interpretacije tog eksperimentalnog izraza prikazuje Slika 14. Prikazana je osnovna obrada rezultata u slučaju krivulje s jednim H/V vrhom.



Slika 14. Interpretacija rezonantne frekvencije f_0 na kontaktu osnovne stijene i sedimentnog paketa. Dubina sedimenta H se može odrediti ako je poznata brzina V_S iz MASW mjerenja ili iz refrakcijske seizmike.

Debljina H sedimentnog paketa se može procijeniti na temelju eksperimentalno definiranih krivulja, Slika 15. Iz HVSR krivulje se odredi vlastita ili rezonantna frekvencija f_0 (energija mikrovibracija se amplificira/pojačava upravo pri toj frekvenciji), a potom se

dubina H očita u točki presjeka s krivuljom promjene brzine V_S. Pri tome se brzina posmičnih valova u mekim sedimentima (tla) najčešće iskustveno pretpostavlja.



Slika 15. Dijagram promjene debljine H sedimenata iznad osnovne stijene ovisno o rezonantnoj frekvenciji f_0 za konstantne brzine posmičnih valova V_S. Osnovni interpretacijski model je dvoslojni, pa postoji samo jedna granica, odnosno kontakt osnovne stijene i nadsloja. U tom slučaju je debljina sedimenata upravo jednaka dubini H na kojoj se nalazi granica (Magnon, 2013).

Iz brojnih MASW i refrakcijskih mjerenja, kojima se određuju brzine V_S posmičnih valova po dubini (V_S seizmički profili tla), mogu se izdvojiti brzine za pojedine vrste tla koje smatramo mekim sedimentima (kriterij je prag brzine $V_S \leq 500$ m/s), Tablica 2.

Tablica 2. Brzine V_S posmičnih valova u mekim sedimentima (tlima) (Magnon, 2013)

Tlo	**V_s [m/s]**
Glina	100 – 180
Pijesak	180 – 250
Šljunak	250 – 500

3.5. PREGLED HVSR ISTRAŽIVANJA ZNAČAJNIH ZA PROCJENU POTRESNE UGROŽENOSTI GRADA IVANCA

Mnoga su istraživanja pokazala da HVSR metoda daje dobru procjenu osnovne/prirodne frekvencije tla (npr. Mucciarelli i Gallipoli, 2001). Postoji jaka veza između površinske geologije i mikroseizmičkog nemira (HVSR mjerenja) čak i u kompleksnim geološkim strukturama (Bard, 1998; Leyton i sur., 2013; Panzera i sur., 2013). U posljednja tri desetljeća HVSR metodologija mjerenja mikroseizmičkog nemira se koristila u brojnim istraživanjima za procjenu lokalnog seizmičkog odziva tla izraženog kroz osnovnu frekvenciju i amplifikaciju tla.

Na području Republike Hrvatske provedeno je razmjerno mnogo mjerenja primjenom HVSR metode. U sjevernoj Hrvatskoj mjerio se odziv tla u gradu Varaždinu, a HVSR mjerenja za potrebu procjene seizmičke osjetljivosti su provedena u dvorcu Trakošćan i njegovoj okolini (Stanko i sur., 2017; Stanko i sur., 2016). Mjerenja u Varaždinu su provedena radi određivanja lokalnih uvjeta tla, a rezultati su uspoređeni s geološkim istraživanjima, litološkim profilima, istražnim i eksploatacijskim bušotinama te MASW mjerenjima (engl. Multichannel Analysis of Surface Waves, višekanalna analiza površinskih valova).

Također je određena i osnovna frekvencija zgrada različitih visina da bi se procijenila potencijalna opasnost od nastanka rezonancije između građevine i tla. U Trakošćanu se HVSR koristio kao neinvazivna i nerazorna metoda za procjenu odziva tla i analizu seizmičke osjetljivosti povijesno važnog dvorca. Mjerenje seizmičkog nemira i frekvencije odziva konstrukcije dvorca provedeno je radi detekcije potencijalno slabih točaka cjelokupne građevine i analize mehanizma oštećenja koja su nastala za vrijeme potresa 1982. godine. Brojna i opsežna mjerenja su provedena u podsljemenskoj zoni grada Zagreba (Herak, 2011) u svrhu mikrozonacije tog područja, kao i mjerenja u seizmički najaktivnijem dubrovačkom području, u gradovima Dubrovniku i Stonu (Herak, M. i sur., 2009).

HVSR metoda se vrlo često koristi i u susjednoj Sloveniji. Gosar i Martinec (2008) su je primijenili na području južne Slovenije, u seizmički najaktivnijoj pokrajini Ilirska Bistrica. Metoda je izabrana radi proučavanja utjecaja površinskih geoloških formacija na gibanje tla te zbog procjene opasnosti od pojave rezonancije između objekata i tla.

Danas je HVSR potvrđena i važna istraživačka metoda koja se sve češće koristi i u inženjerskoj praksi, jer daje vrijedne informacije neophodne za projektiranje, sanaciju i praćenje ponašanja inženjerskih konstrukcija i zahvata u okolišu. Posebna joj je prednost

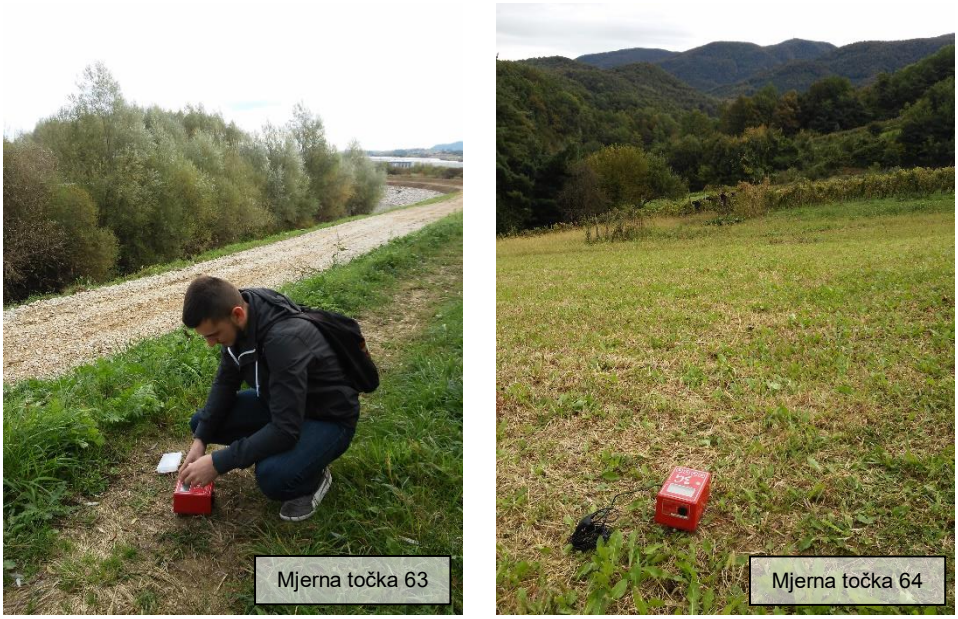
ekonomska isplativost i rezultati na temelju kojih se mogu donositi pravovremene i kvalitetne gospodarske odluke. Projekt SESAME (2004) je okupio brojne radove, dokumente i smjernice u pogledu mjerenja i provedbe te metode.

O teorijskoj osnovi metode još se uvijek raspravlja i ponuđena su različita tumačenja. Objašnjenje temeljeno na rezonanciji posmičnih S valova u slojevima mekših sedimenata s malim i zanemarivim utjecajima površinskih valova naziva se „body waves“ (Nakamura, 1989). Za razliku od volumnih valova, ipak je šire prihvaćen koncept „surface waves“ kojim se objašnjava povezanost HVSR s eliptičnošću Rayleighevih (površinskih) valova koji su ovisni o frekvenciji (Bard, 1999; Bonnefoy-Claudet i sur., 2006).

Iako se čini prihvaćenim da HVSR vrhovi pouzdano određuju (barem) frekvenciju temeljnog tla, još uvijek nije potpuno jasno kako treba interpretirati HVSR amplitude i kako povezati spektar s amplifikacijom tla (Herak, M. i sur., 2009).

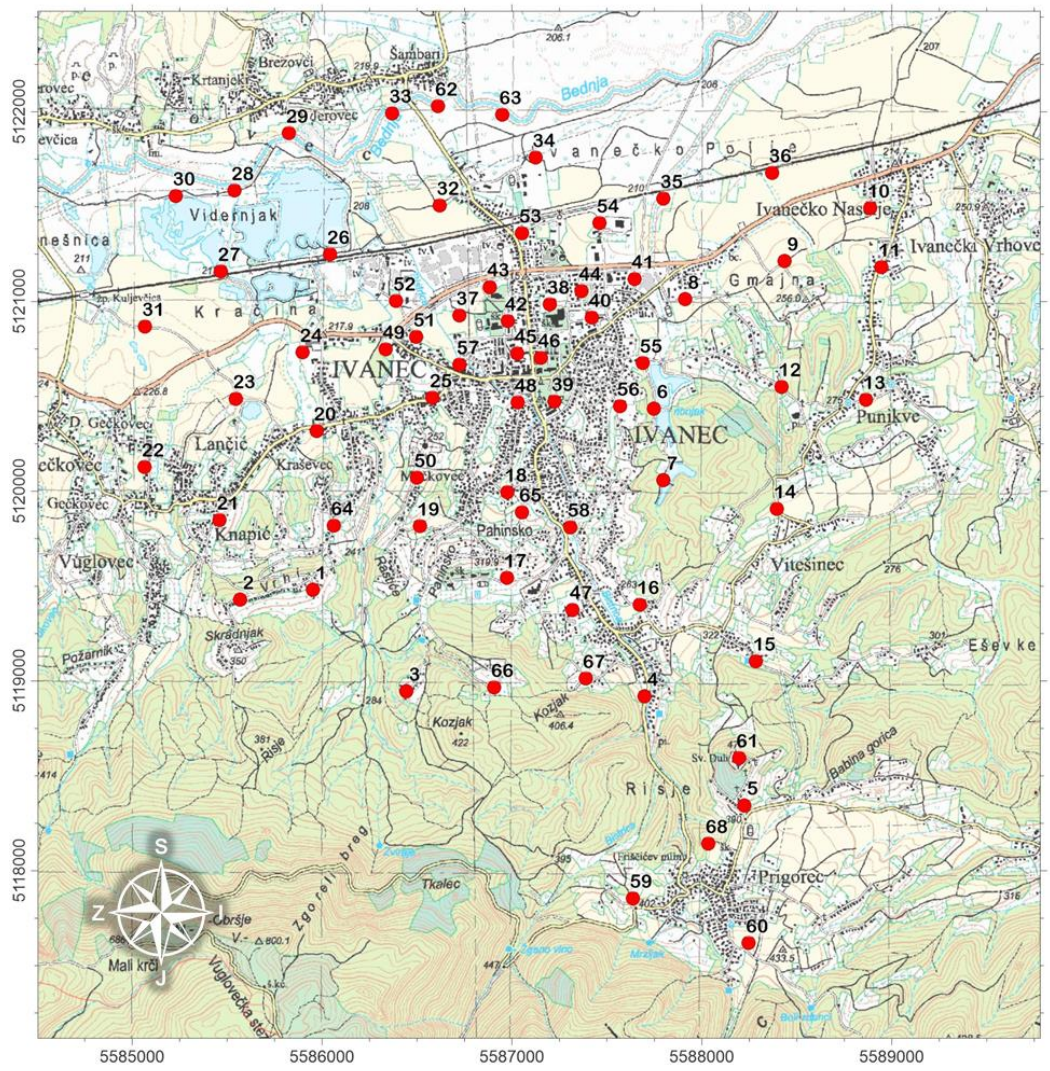
4. HVSR MJERENJA GRADA IVANCA

Provedba mjerenja organizirana je za kraj lipnja i početak srpnja 2016. godine u ukupnom trajanju od 7 dana. Planirana su mjerenja u fazama, radi progušćivanja mreže točaka i poboljšavanja rezultata. U prvoj je fazi obuhvaćeno dvadesetak točaka u dolini rijeke Bednje, sjeverno od grada. Druga faza uključila je dvadesetak točaka na sjevernim padinama i pribrežju Ivančice, Slika 16., dok su u trećoj fazi obavljena mjerenja u samom gradu. Većina mjerenja radila se danju, osim nekoliko mjerenja u središtu grada bliže prometnicama i ostalim umjetnim izvorima mikrovibracija. Ona su izvedena noću kako bi se smanjio utjecaj umjetnih vibracija na rezultate. Najveća gustoća mjerenih lokacija bila je u samom centru grada i ostalim područjima veće gustoće naseljenosti, zbog najvećeg broja zgrada i potencijalno najvećih šteta koje mogu nastati kao posljedica potresa.



Slika 16. Mjerenje mikroseizmičkog nemira u dolini rijeke Bednje (lijevo) i na pribrežju planine Ivančice (desno).

Na širem području grada Ivanca provedeno je 68 mjerenja mikroseizmičkog nemira na površini od 11.2 km^2, Slika 17. Veća gustoća mjerenja, odnosno broj mjerenja po površini, daje pouzdanije rezultate i više kriterija za korektnu interpretaciju mjerenja. Tromino uređaj se postavljao izravno na površinu izvornog tla (ili stijene). Umjetne asfaltne i betonske plohe su se izbjegavale da bi se osigurao dobar kontakt između uređaja i tla. Uređaj se horizontalno nivelirao i orijentirao prema geografskom sjeveru. Sva mjerenja su trajala 20 minuta s frekvencijom uzorkovanja 128 Hz.



Slika 17. Topografska karta Ivanca s označenim lokacijama HVSR mjerenja. Prikazani koordinatni sustav je Gauß-Krügerov pravokutni koji se uz standardni sustav (širina i duljina izražena u stupnjevima) koristi na geološkim kartama radi izražavanja koordinata u (kilo)metrima.

Najveći broj mjerenja je izveden oko užeg gradskog područja u kojem se nalaze brojne očuvane starije kuće, novije obiteljske kuće visine do 2 kata te zgrade od 2 do 5 kata. Ostala mjerenja su izvedena na širem području grada Ivanca u smjeru Ivančice. U tom području dominiraju obiteljske kuće i vinogradi. Manji dio mjerenja je izveden u industrijskoj zoni na sjeveru grada u aluviju rijeke Bednje.

5. REZULTATI I DISKUSIJA

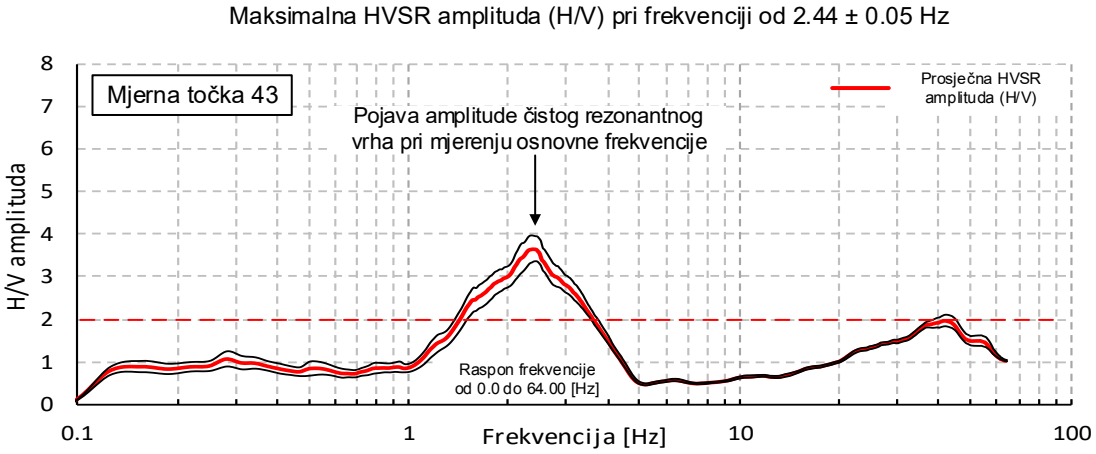
Nakon provedenih mjerenja dobiveni podaci obrađuju se prema postupku navedenom u trećem poglavlju. U obradi se dobivaju HVSR krivulje koje se kasnije interpretiraju, a rezultati se prikazuju u obliku karata osnovne frekvencije i debljine sedimenata te u konačnici karata amplitude iz koje se mogu odrediti potencijalno seizmički opasna područja.

5.1. VRSTE I OBLICI HVSR KRIVULJA

Pojedino mjerenje mikroseizmičkog nemira se obradilo prema opisanom protokolu, a rezultat te analize je HVSR krivulja iz koje se može izdvojiti rezonantna frekvencija na nekoj lokaciji (vrh HVSR amplitude).

Čisti rezonantni vrh

Osnovna (prirodna ili rezonantna) frekvencija tla f_0 izmjerena u nekoj točki se može jasno odrediti ako na HVSR krivulji postoji jasno uočljiv vrh (izolirani maksimum amplitude s većim nagibima porasta i pada vrijednosti), Slika 18. Pri tome se pretpostavlja da je rezultat mjerenja posljedica mikronemira i da su svi vanjski nepoželjni izvori isključeni.



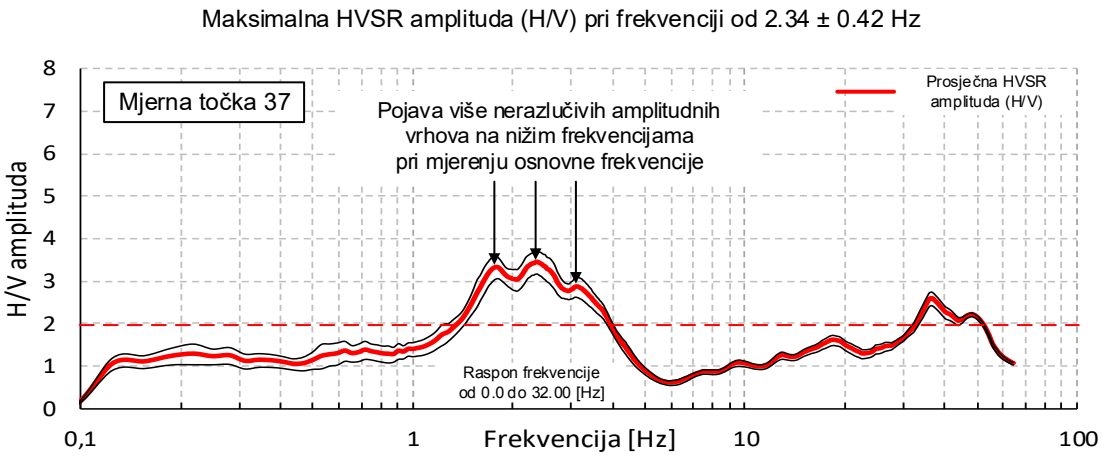
Slika 18. Čisti rezonantni vrh na HVSR krivulji.

Više rezonantnih vrhova

i) Niz oštrih vrhova HVSR krivulje se često pojavljuje u urbanim sredinama, posebno ako je izvor cikličko dinamičko djelovanje nekog stroja ili industrijskog pogona (turbine, generatori, ventilatori i slično). Uvijek postoji mogućnosti da da frekvencije tih vrhova

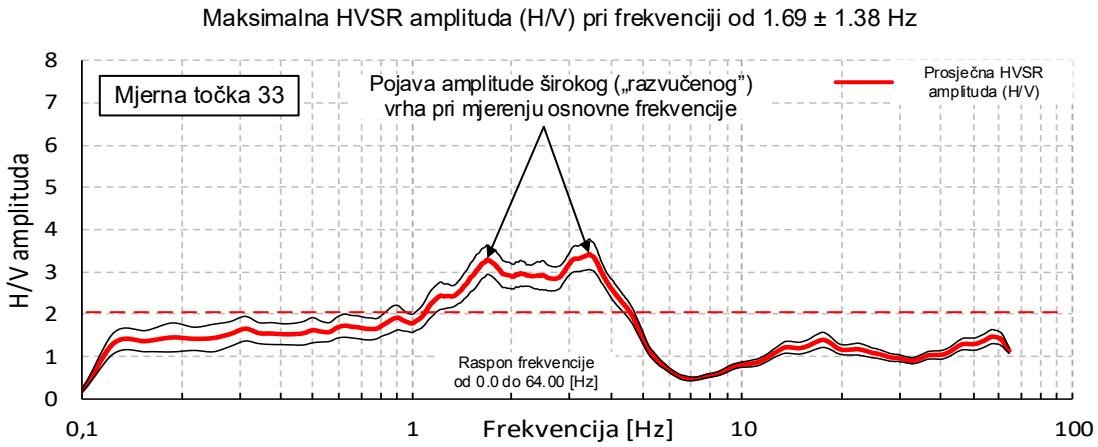
koincidiraju ili su bliske osnovnoj frekvenciji lokalnog tla, koju se zapravo i namjerava odrediti. U tom slučaju je potrebno obaviti mjerenja u vremenu kada ti strojevi nisu u pogonu ili se u kasnijoj obradi podataka primjenom određenih filtera moraju eliminirati njihovi utjecaji (kada je takvo filtriranje moguće).

ii) Pojava više uzastopnih vrhova male amplitude na nižim frekvencijama može biti posljedica različitih utjecaja: djelovanje vjetra, blizina zgrade ili drveća, loš kontakta uređaja i tla, vlažno tlo nakon obilne kiše, promet ili neki drugi antropogeni niskofrekventni izvori, Slika 19. U takvim se slučajevima izvode dodatna mjerenja. Identifikacija izvora registriranih frekvencija i izoliranje stvarne osnovne frekvencije tla se provodi na temelju prethodnih informacija o geološkom ili geotehničkom profilu tla na lokaciji mjerenja. Na krutim sedimentima i stijenama niskofrekventne nejasne vrhove najvjerojatnije generiraju vanjski neželjeni izvori. Isti se oblik HVSR krivulje može pojaviti kada na osnovnoj stijeni (ili na sedimentima niske osnovne frekvencije) leže vrlo meki i debeli slojevi površinske serije ili se radi o tankom paketu slojeva znatnije krutosti (općenito manje od krutosti osnovne stijene) (SESAME, 2004).



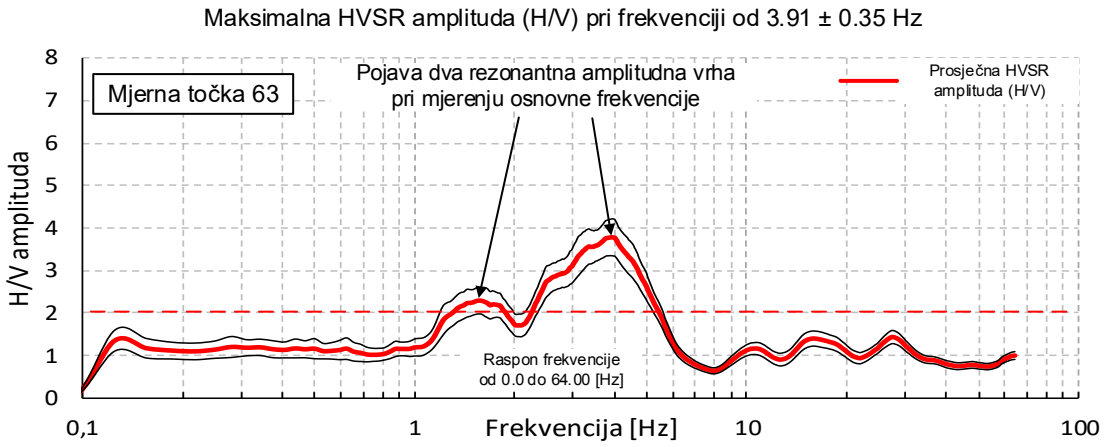
Slika 19. Više niskofrekventnih vrhova HVSR amplitude.

iii) Široki vrh ili više vrhova na HVSR krivulji je također neželjena pojava u mjerenjima, Slika 20. Takve se anomalne pojave mogu minimizirati jedino u fazi obrade, kada se nastoji ukloniti smetnje koje su ih očito proizvele.



Slika 20. Široki rezonantni vrh HVSR amplitude.

iv) Pojava dva vrha je redovita u slučajevima kada postoji velika razlika impedancija na dvjema granicama, Slika 21. Pretpostavlja se da postoje tri sloja (dvije granice) koja se međusobno znatno razlikuju po krutosti (znatna razlika V_S brzina). Svaki vrh predstavlja osnovnu frekvenciju pojedinog sloja iznad osnovne stijene. Radi utvrđivanja korektnosti takve interpretacije, potrebno je analizirati geološke značajke lokacije, odnosno mogućnost pojave: mekih plitkih naslaga, krućeg međusloja ili osnovne stijene s vrlo velikom V_S brzinom (SESAME, 2004). Nakon što se usvoji primjeren inženjersko – geološki model potrebna je reinterpretacija mjerenja s drugačijim parametrima

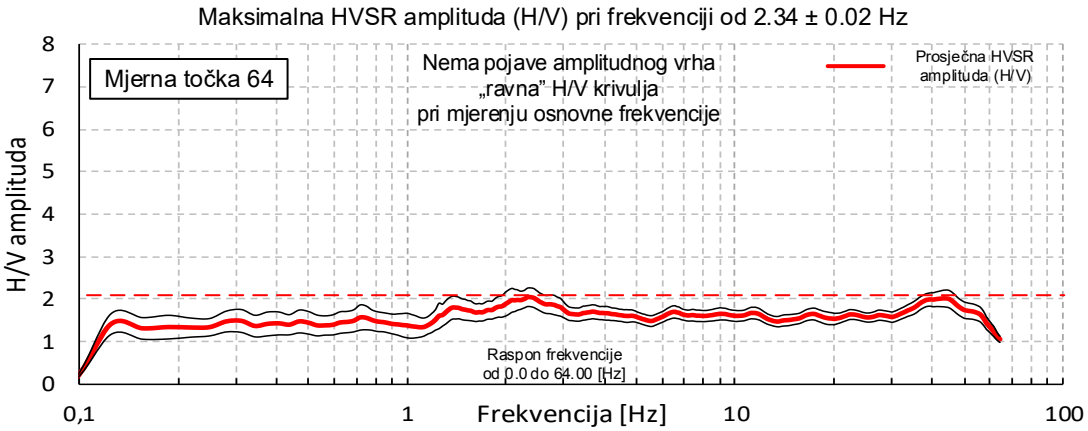


Slika 21. Dva rezonantna vrha na HVSR krivulji.

Ravna HVSR krivulja

Vrlo je vjerojatno da u slučaju ravne HVSR krivulje (bez uočljivih vrhova), ne postoji dostatna razlika u impedancijama slojeva u kontaktu, Slika 22. To ne mora nužno značiti da ne dolazi do amplifikacije na toj mjernoj lokaciji, jer ona može biti vrlo mala po iznosu.

Iz prakse je ustanovljeno da se krivulja na nestjenovitim lokacijama (tlima) pojavljuje u samo 5% mjerenja, što znači da je takav oblik krivulje svojstven odzivu čvrsto referentnog tla, odnosno stijene.



Slika 22. Ravna HVSR krivulja.

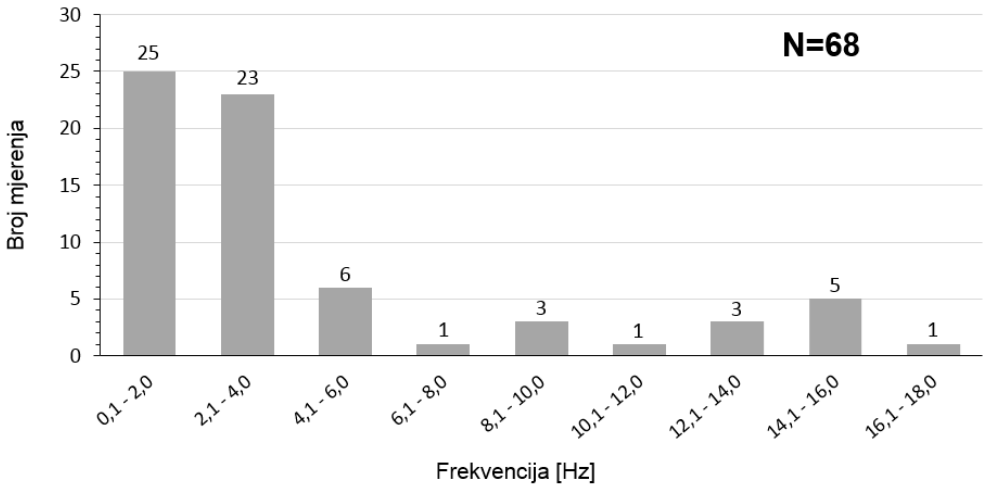
5.2. KARTOGRAFSKI PRIKAZ REZULTATA

Rezultati seizmičkog mikrozoniranja primjenom HVSR metode na području grada Ivanca su prikazani trima konturnim kartama: izolinije frekvencija oblikuju zone istih osnovnih frekvencija tla, izolinije amplituda omeđuju zone jednakih HVSR amplituda, a izolinije debljina prikazuju područja istih debljina sedimenata. Za izradu konturnih dijagrama izolinija se koristio programski paket *Surfer ver. 8 (Golden Software Inc.)*, odnosno metoda interpolacije *Najbliži susjed*. Osnovni parametar za izradu konturnih karata su bile frekvencije i amplitude HVSR vrhova koji su nedvosmisleno identificirani kao relevantni odzivi osnovne stijene, odnosno odzivi s granica različitih seizmičkih impedancija. Karta izo-debljina sedimenata je izrađena s pretpostavkom da je brzina V_S posmičnih valova u osnovnoj stijeni 500 m/s, u trošnim stijenama (glinovito – pjeskovitim naslagama, laporima i konglomeratima) V_S=300 m/s, a u mekim sedimentima (prahovi, pijesci i šljunci) V_S=250 m/s, Slika 15.

Analizom je ustanovljeno da su vrijednosti osnovne frekvencije sedimenata ivanečkog područja u rasponu od 1.34 do 16.22 Hz. Prema raspodjeli izmjerenih frekvencija, najviše mjerenja (58) je bilo u intervalu od 0.1 do 4.0 Hz, što čini 85% ukupnog broja mjerenja, Slika 23. S obzirom na prostornu distribuciju vrijednosti osnovnih frekvencija, uočeno je da se na aluvijalnom području uz rijeku Bednju redovito pojavljuju niske frekvencije u rasponu od 1.34 Hz do oko 4.0 Hz, Slika 24. a). Niske frekvencije su pokazatelj debljih

sedimenata i/ili iznimno mekih slojeva koji su sedimentirani na ovom visinski najnižem ivanečkom području. Područje nižih frekvencija se prostire i dalje u smjeru rijeke Bednje, ali i zadire u središnji dio grada Ivanca. U zonu niže frekvencije spada i područje jezera između Ivanca i Jerovca (Slika 24., mjerne točke 26 – 30), kao i industrijska zona Ivanec koja se nalazi na sjeveroistoku (Slika 24., mjerne točke 35 i 36).

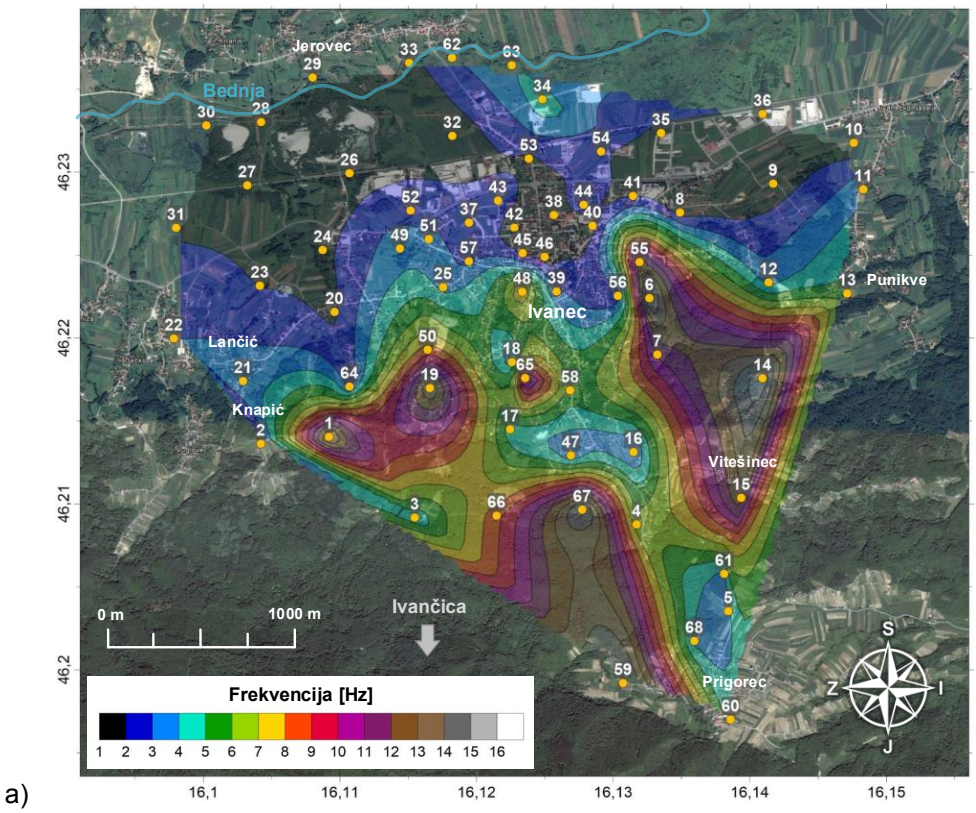
Rezonantna frekvencija se postepeno povećava u pravcu sjevera prema Jerovcu i južno prema planini Ivančici. Porast se bilježi s obje strane potoka Bistrice koji se teče od Prigorca prema Ivancu. Očito je da dolina rijeke Bednje predstavlja zonu frekvencijskog minimuma. Južnije područje, bliže planini Ivančici, ima više frekvencije. Vrijednosti tih frekvencija su između 5 Hz i 16 Hz i ukazuju na manju debljinu sedimenta, odnosno na manju dubinu do osnovne stijene.

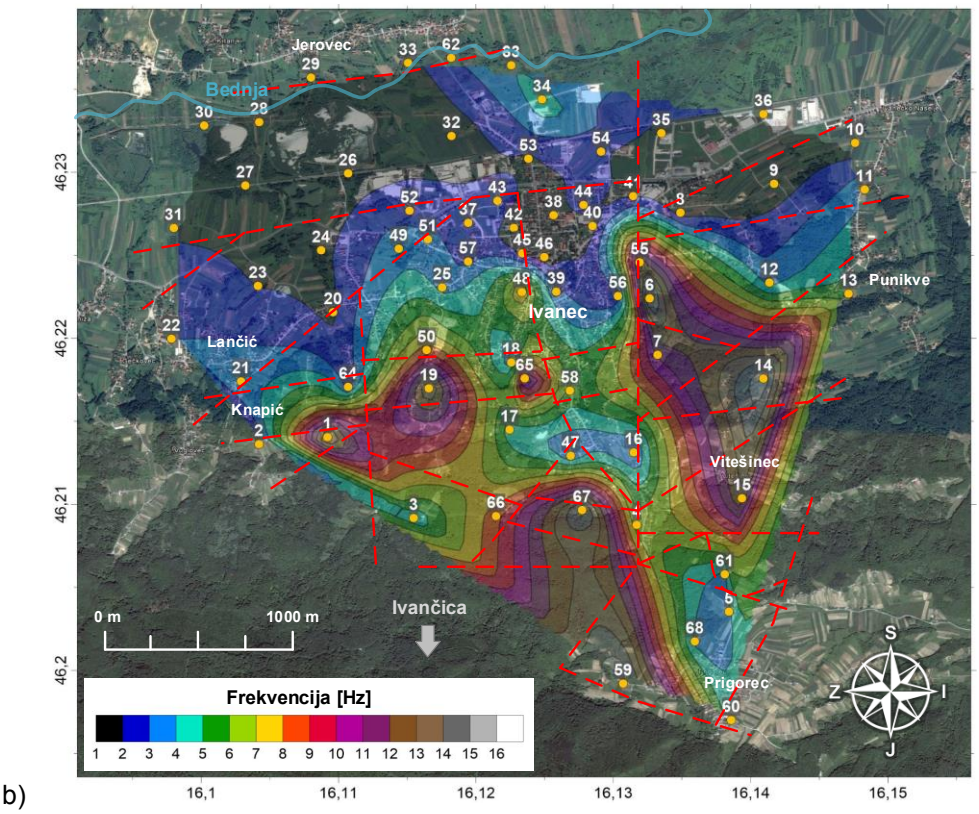


Slika 23. Raspodjela frekvencija u odnosu na ukupni broj mjerenja.

Karta osnovnih frekvencija

Zanimljivo je da se izolinije osnovnih frekvencija vrlo dobro slažu s položajima ucrtanih rasjeda na geološkoj karti, Slika 24. b). Mreža pokrivenih rasjeda je preuzeta s osnovne geološke karte, Slika 5. Linije pružanja rasjeda omeđuju prostor i formiraju blokove kojima se može pripisati dominantna frekvencija. Konture izo-frekvencija se često poklapaju s rasjednim zonama, što bi moglo ukazivati na značaj i dominaciju te zone u seizmičkom smislu. Razvidno je da su rezultati mikroseizmičkog nemira povezani s geološkim značajkama promatranog područja. To ne iznenađuje, jer se podudaraju s mjerenjima provedenim na području sjeverne Hrvatske, na području grada Varaždina (Stanko i sur., 2017) i dvorca Trakošćan (Stanko i sur., 2016).





Slika 24. Karta osnovnih frekvencija sedimenata na području grada Ivanca: a) konture osnovnih frekvencija projicirane na satelitsku snimku područja, b) konture osnovnih frekvencija s označenim rasjedima s osnovne geološke karte. Žutim krugovima označeno 68 lokacija HVSR mjerenja.

Osim toga, izolinije frekvencija vrlo jasno markiraju područje i rubove Lepoglavsko – ivanečke sinklinale s mekim sedimentima (pijesci, gline, pjeskoviti lapori i lignita) u dolini Bednje, kao i zonu krućih sedimenata (konglomerati, vapnenci, pješčenjaci, šljunci, pjeskoviti i glinoviti lapori) koja se prostire po bokovima Ivančice prema njenom središnjem dijelu. Također se može primijetiti „klin“ mekših sedimenata koji se proteže od doline Bednje, preko središnjeg dijela grada u pravcu Prigorca.

HVSR metoda može poslužiti kao dobra provjera geoloških karata ili za detekciju novih rasjeda ukoliko su mjerenja površinski dovoljno gusta kako bi se preciznije mogle uočiti anomalije u dobivenim rezultatima.

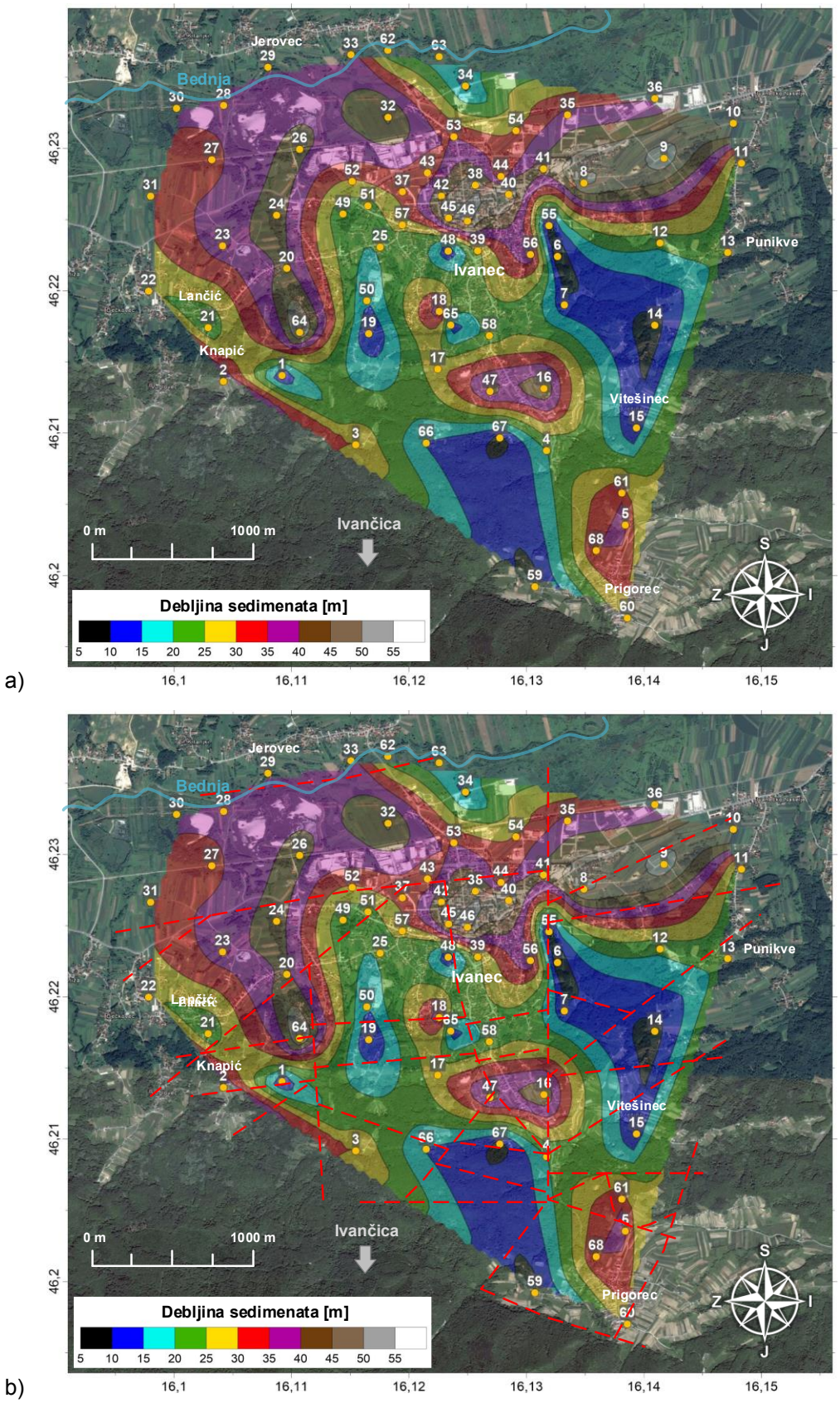
Karta debljina sedimenata

Karta debljine sedimenata prikazuje raspodjelu debljine paketa sedimentnih naslaga iznad osnovne stijene, odnosno dubine do svježe nerastrošene stijenske mase na području grada Ivanca, Slika 25. Debljina sedimenata varira u rasponu od 5 do 55 m.

Za proračun debljina se koristio izraz (1) i vrijednosti brzina posmičnih valova iz Tablice 1 (Poglavlje 3.4.). Za meke sedimente u dolini rijeke Bednje je usvojena brzina V_S=250 m/s (prahovi, pijesci i šljunci). Za središnje prijelazno područje od riječnog aluvija do ivanečkog pribrežja je usvojena brzina V_S=300 m/s, jer prevladavaju glinovito – pjeskovite i laporovite serije te konglomerati i trošne stijene. Za najjužnije područje uz Ivančicu, gdje se očekuju manje trošne stijene, odnosno lapori, vapnenci i dolomiti, usvojena je brzina V_S=500 m/s.

Dobiveni rezultati se mogu koristiti za projektiranje temelja viših građevina u cilju postizanja veće otpornosti građevina na seizmička djelovanja.

Iz karte se može uočiti da se najveće dubine do osnovne stijene dosežu istočno uz obalu rijeke Bednje, kod ivanečkih jezera te u središnjem i zapadnom dijelu grada (~25 do 55 m). Sedimenti velikih debljina se nalaze i uz potok Bistricu prema Prigorcu. Manje debljine sedimenata pokrivaju obronke Ivančice, a njihova debljina opada s udaljavanjem od potoka u pravcu SI – JZ. Manje debljine (do 20 m) uglavnom prate reljef brežuljaka, odnosno njihovih vrhova i obronaka. Karta dubina odgovara morfologiji terena istraživanog područja pa se može zaključiti da reljef tog prostora prati paloreljef i da je karta osnovnih frekvencija korektno definirana.



Slika 25. Karta debljina sedimenata na području grada Ivanca: a) konture debljina su projicirane na satelitsku snimku područja, b) konture debljina s označenim rasjedima s osnovne geološke karte. Žutim krugovima je označeno 68 lokacija HVSR mjerenja.

6. KARTA POTRESNE UGROŽENOSTI GRADA IVANCA

Općenito se može zaključiti da su HVSR amplitude na području grada Ivanca usko vezane za lokalne uvjete tla, prvenstveno za meke aluvijalne sedimente rijeke Bednje (srednje do visoke amplitude), odnosno za kruće naslage pribrežja Ivančici (niske amplitude). Karte HVSR amplituda kojima se procjenjuje potencijal potresne ugroženosti građevina mogu koristiti kao preporuka prilikom temeljenja i gradnje novih građevina određenih visina i određivanja maksimalnih visina građevina koje su definirane u Prostornom planu uređenja. Na taj način rezultati ovog istraživanja mogu se smatrati kao podloga za prvo seizmičko mikrozoniranje grada Ivanca koje je važno kako bi se u budućnosti spriječila ili smanjila strukturna šteta, te očuvali ljudski životi u slučaju potresa koji se ne mogu predvidjeti.

Karta izolinija vrhova HVSR amplituda na području grada Ivanca ukazuje na moguće postojanje triju seizmičkih zona, Slika 26. a):

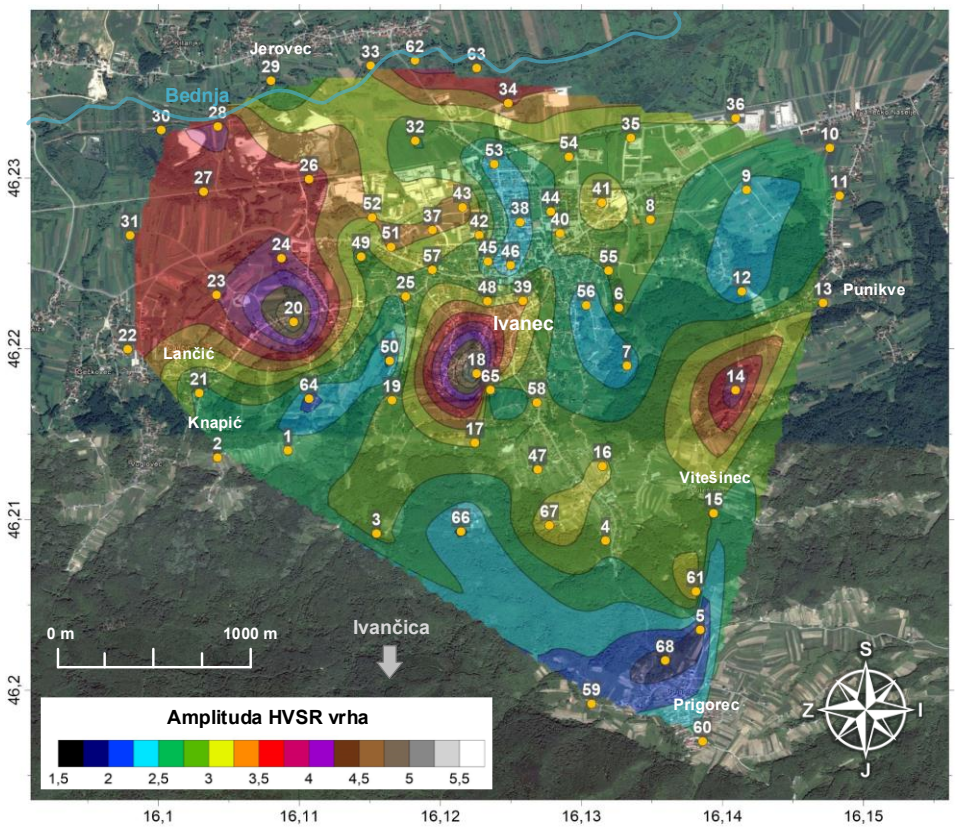
1. zona, HVSR amplituda < 2.5 (niske vrijednosti)
2. zona, HVSR amplituda 2.5 – 4 (srednje vrijednosti)
3. zona, HVSR amplituda > 4 (visoke vrijednosti).

Kategorizacija vrijednosti amplitude (niska, srednja i visoka) je definirana relativno, odnosno s obzirom na rezultate ovog istraživanja pa se ne može primijeniti općenito.

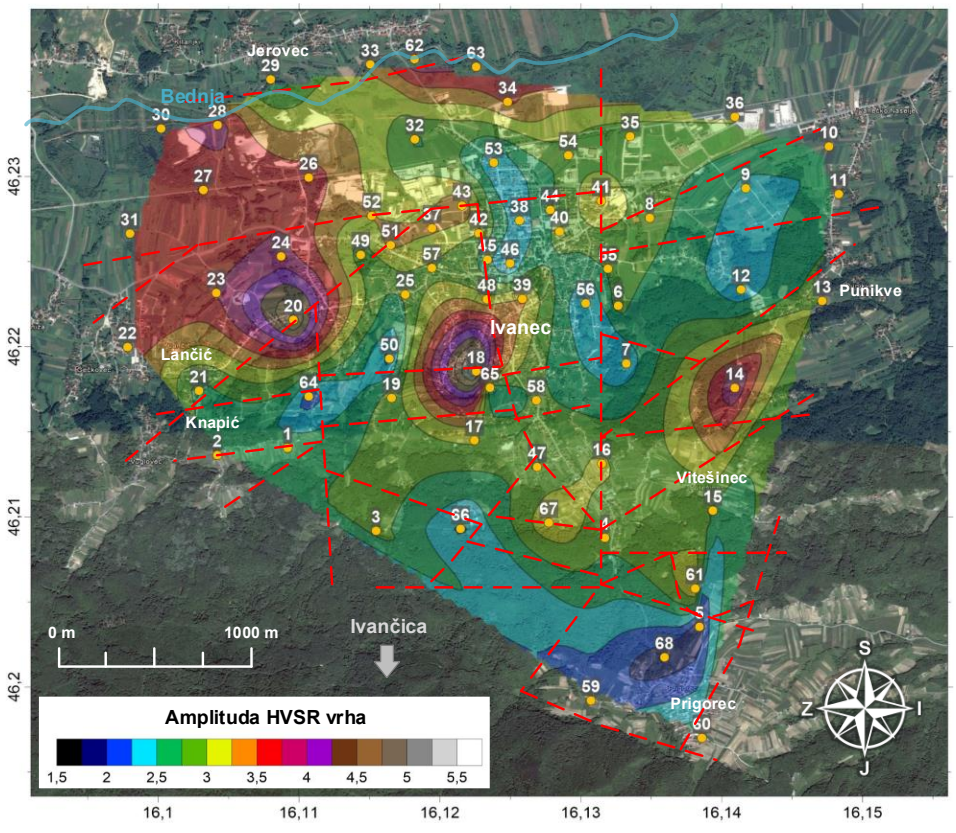
Najveće vrijednosti amplitude se pojavljuju u četiri međusobno razdvojena područja. Tumačenje njihovih pojava je uglavnom složeno, no redovito je vezano za znatne razlike u impedancijama osnovne stijene i nadslojeva.

Na sjevernoj strani visoke vrijednosti HVSR amplitude se pojavljuju na lokacijama 62 i 63 u neposrednoj blizini rijeke Bednje. U riječnim dolinama se uglavnom ne očekuju površinski sedimenti veće krutosti pa manja krutost takvih slojeva može biti uzrok većih amplituda.

Visoke vrijednosti amplitude se javljaju i na cijelom sjevero-zapadnom dijelu Ivanca, na području jezera i južnije prema naselju Lančić. U ovom se području nalaze jezera nastala nakon podzemne eksploatacije lignita pa se može pretpostaviti značajan utjecaj mreže hodnika i okana nekadašnjih kopova ugljena. Voda kao medij kroz koji se ne šire posmični valovi očito također ima značajan utjecaj.



a)



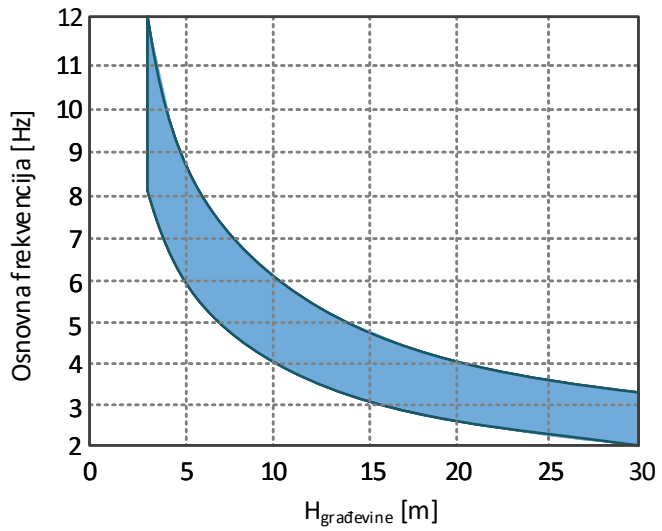
b)

Slika 26. Karta HVSR amplituda sedimenata na području grada Ivanca: a) konture amplituda projicirane na satelitsku snimku područja, b) konture amplituda s označenim rasjedima s osnovne geološke karte. Žutim krugovima je označeno 68 lokacija HVSR mjerenja.

Posebno se ističu i tri lokacije, odnosno visoke amplitude na mjernim točkama 14, 18 i 20. Ta se mjerna mjesta nalaze u neposrednoj blizini rasjeda ili u unutar znatno poremećenih rasjednih zona, Slika 26. b). Diskontinuiranost takvih područja može znatno izmijeniti impedancijske kontraste pa visoke amplitude nisu neočekivane pojave. Najniže amplitude u rasponu od 1.75 do 2.5 se javljaju na istočnom dijelu grada i na područjima bliže Ivančici, prema naselju Prigorec. One ukazuju na manju razliku impedancije između površinskih sedimenata i osnovne stijene.

Karte izolinija osnovnih frekvencija i HVSR amplituda ukazuju na potencijalnu seizmičku ugroženost pojedinih zona istraživanog područja. Ugroženost se procjenjuje prema potencijalu pojave rezonancije tlo – građevina za vrijeme potresa, ukoliko je vlastita frekvencija građevine bliska vlastitoj frekvenciji tla. Usporedbom izmjerenih vlastitih frekvencija zgrade i tla na kojem je temeljena, može se procijeniti razina ugroženosti. U kombinaciji s velikom amplitudom (amplifikacijom) čak i slabiji potresi mogu uzrokovati velike štete.

Slika 27. prikazuje raspon osnovnih frekvencija građevine tipične konstrukcije s obzirom na njenu visinu. Osnovna frekvencija zgrade od 2 kata je približno 8 Hz (prosječna visina do vijenca je oko 5 m). Takvih je kuća u gradu i okolici Ivanca najviše stradalo u potresima 1973. i 1982. godine (Lučić, 1982), upravo zbog pojave rezonancije građevina – tlo. Nešto niže frekvencije od oko 6 Hz svojstvene su za zgrade od 3 ili 4 kata. I takve su zgrade također pretrpjele oštećenja u spomenutim potresima.



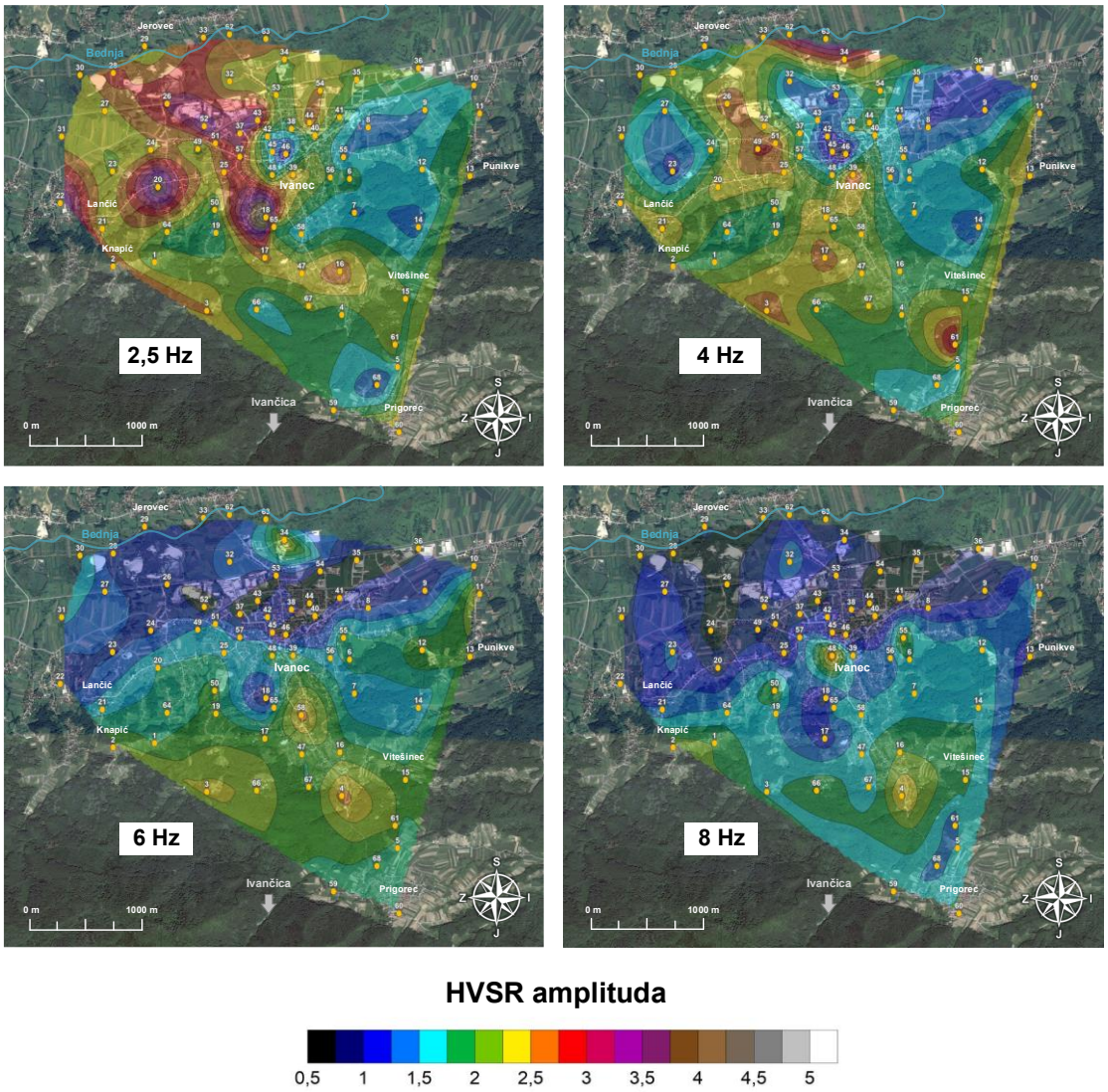
Slika 27. Raspon osnovnih frekvencija građevine tipične konstrukcije s obzirom na njenu visinu (Magnon, 2013).

Objekti visine 10 – 15 m imaju osnovne frekvencije 4 – 5 Hz, a zgrade visoke 30 m (približno 10 katova) imaju frekvenciju od oko 2.5 Hz. Kod objekata takvih visina postoji opasnost pojavljivanja visokih HVSR amplituda, pa je potencijal nastanka šteta uzrokovanih potresom znatan (Herak, M. i sur., 2009).

Da bi se procijenio potencijal ugroženosti (veličina ugroženog područja) zbog pojave visokih amplituda seizmičkog djelovanja na neku zgradu, izdvojene su HVSR amplitude za pojedine specifične frekvencije zgrade. Stupanj oštećenja zgrade je naravno veći ukoliko su osnovne frekvencije zgrade i temeljnog tla vrlo bliske (pojava rezonancije). Za istraživano područje grada Ivanca izdvojene su amplitude za 8, 6, 4 i 2.5 Hz što odgovara zgradama visine od 2 do 10 katova, Slika 28. Može se zaključiti sljedeće:

1. Uže gradsko područje nije pogodno za izgradnju objekata visine veće od 15 m, odnosno višekatnih stambenih zgrada, zbog relativno visoke HVSR amplitude i moguće pojave rezonancije tlo – građevina. (HVSR amplituda za 2.5 Hz).
2. Uže gradsko područje pokazuje relativno nisku opasnost pojave rezonancije tlo – građevina za obiteljske kuće i stambene zgrade visine do najviše 4 kata. (HVSR amplituda za 6 Hz).
3. Šire gradsko područje prema Ivančici pokazuje relativno jednoliku raspodjelu vrijednosti HVSR amplitude (1.5 – 2.5) za sve razmatrane frekvencije. Iz toga se može zaključiti da su objekti visine obiteljskih kuća (6 - 8 Hz) u relativnoj opasnosti od pojave rezonancije tlo – građevina.
4. Za šire gradsko područje se kao referentnim mogu smatrati HVSR amplitude ≤ 2. To znači da se s promjenom visine objekta mijenja i područje za sigurniju gradnju.

Jedan od glavnih izazova u području potresnog inženjerstva je procjena dinamičkog odziva tla u zoni podrhtavanja. Taj se problem obično odnosi na analizu odziva specifične lokacije ili studiju amplifikacije tla. Za dinamičku analizu odziva tla postoje različite teorije, poput linearne, ekvivalentne linearne i nelinearne, od kojih svaka ima svoje prednosti i ograničenja. Na temelju provedenih HVSR mjerenja detektirane su opasne zone u kojima se mogu izvršiti detaljnija istraživanja i procjena nelinearne analize odziva tla na seizmičku pobudu. Upravo ta analiza planirana je kao sljedeći korak za cjelovitu procjenu seizmičke ugroženosti grada Ivanca.



Slika 28. Karte HVSR amplituda izdvojenim za frekvencije 2.5, 4, 6 i 8 Hz.

Ovi rezultati mogu uvelike pomoći u prostornom planiranju grada Ivanca s obzirom na visinu građevine, te se preporučuju daljnja geotehničko – geofizička istraživanja radi detaljnijeg seizmičkog mikrozoniranja, odnosno izrade karte seizmičke mikrozonacije.

5. ZAKLJUČAK

Potresi većih magnituda koji su se u zadnjih nekoliko desetljeća dogodili u svijetu potaknuli su razvoj istraživanja na području prevencije njihovog razornog djelovanja. Takvi su se potresi pojavljivali i u našem području, stoga je za ublažavanje njihovih posljedica bitno poznavati lokalne uvjete tla. Pri tom se koriste različite metode, kojima se prvenstveno određuju osnovna frekvencija tla i njezina amplifikacija. Ukoliko je osnovna frekvencija tla bliska frekvenciji građevine, može doći do pojave rezonancije tlo – građevina te do nastanka šteta. Za određivanje tih parametara, HVSR se, kao brza, neinvazivna i relativno jeftina geofizička metoda, pokazala pogodnom u ovom istraživanju.

Grad Ivanec i njegovo šire područje čine različiti geomorfološki oblici, stoga je takav poligon zanimljiv za istraživanje HVSR metodom. Dodatni razlog su značajniji potresi koji su se dogodili 1836., 1938. i 1982. godine te činjenica da se time povećava opasnost ponovne pojave potresa sličnih magnituda.

Za potrebe izrade ovog rada napravljena su HVSR mjerenja mikrovibracija na 68 lokacija, koje uključuju aluvij rijeke Bednje, uže područje grada Ivanca te okolno pribrežje prema Ivančici. Rezultati prostornog mjerenja pokazuju varijacije osnovne frekvencije tla (1.34 – 16.22 Hz), amplituda HVSR vrhova (1.75 – 5.45) i debljine sedimenata (4.70 – 54.35 m). Veće vrijednosti frekvencija pojavljuju se u južom dijelu grada te u pribrežju prema Ivančici gdje prevladavaju krući sedimenti, a manje vrijednosti frekvencija pojavljuju se kod mekih sedimenata u aluvijalnom području rijeke Bednje. Na temelju rezultata izrađene su karte izo-frekvencija (Slika 24.) i izo-amplituda (Slika 26.). Daljnjom obradom podataka izrađena je i karta debljine sedimenata (Slika 25.) koja pokazuje povećanje debljine sedimenata od pribrežja Ivančice prema aluvijalnom području rijeke Bednje.

Kao zaključak, dane su karte HVSR amplituda s izdvojenim frekvencijama za karakteristične visine građevina (Slika 28.) s kojima se procjenjuje potencijal njihove potresne ugroženosti. One se mogu koristiti kao preporuka prilikom temeljenja i gradnje građevina određenih visina i određivanja maksimalnih visina građevina koje su definirane u Prostornom planu uređenja. Rezultati ovog istraživanja mogu se smatrati kao podloga za prvo seizmičko mikrozoniranje grada Ivanca koje je važno kako bi se u budućnosti spriječila ili smanjila strukturna šteta, te očuvali ljudski životi u slučaju potresa koji se ne mogu predvidjeti.

POPIS LITERATURE

Aki, K. i Richards, P. (2009). Quantitative seismology. 1st ed. Sausalito: *University Science Books*

Bard, P.-Y. (1998). Microtremor Measurements: A tool for site effect estimation? State-of-the-art paper, *Proc. of 2nd International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic motion* - ESG'98, Yokohama, Japan.

Belcar, K. (2013). *Fotografija grada Ivanca*. [Fotografija] Dostupno na: http://www.panoramio.com/photo/100567514?source=wapi&referrer=kh.google.com [Pristupljeno 30.3.2017].

Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., Bard, P.-Y. (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review. *Earth-Science Reviews*, 79, pp 205 – 227.

Del Monaco F., Tallini M., De Rose C., Durante F. (2013) HVNSR survey in historical downtown L'Aquila (central Italy): site resonance properties vs. subsoil model. *Eng Geol*. 158: pp 34 – 47.

Gosar, A. (2012). Determination of masonry building fundamental frequencies in five Slovenian towns by microtremor excitation and implications for seismic risk assessment. *Natural Hazards*, 62: pp 1059 – 1079.

Gosar, A. i Martinec, M. (2008). Microtremor HVSR Study of Site Effects in the Ilirska Bistrica Town Area (S. Slovenia). *Journal of Earthquake Engineering*, 13, pp. 50 – 67.

Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation. (2004). 1st ed. European Commission – Research General Directorate: SESAME European research project, Co-ordinator: Pierre-Yves Bard.

Herak, D., Herak, M. i Tomljenović, B. (2009). Seismicity and earthquake focal mechanisms in North-Western Croatia. *Tectonophysics*, 465(1 – 4), pp. 212 – 220.

Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Kuk, K., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S. i Stipčević, J. (2009). HVSR of ambient noise in Ston (Croatia): comparison with theoretical spectra and with the damage distribution after the 1996 Ston-Slano earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8, pp. 483 – 499.

Herak, M. (2011). Overview of recent ambient noise measurements in Croatia in free-field and in buildings. *Geofizika*, 28, pp. 21 – 40.

Ivančić, I., Herak, D., Markušić, S., Sović, I. i Herak, M. (2006). Seismicity of Croatia in the period 2002-2005. *Geofizika*, 23.2, pp. 87 – 103.

Karte potresnih područja republike Hrvatske, Dostupno na: http://seizkarta.gfz.hr [Pristupljeno 30. 3. 2018].

Kraš, M. (2016.). Ivanečka bibliografija [Elektronička građa]. *Geološki postanak ivanečkog kraja*. Dostupno na: http://www.ivanecka-bibliografija.com/sites/default/files /knjiga/html/poglavlje01.html [Pristupljeno 30. 3. 2017].

Leyton, F., Ruiz, S., Sepúlveda, S., Contreras, J., Rebolledo, S. i Astroza, M. (2013). Microtremors' HVSR and its correlation with surface geology and damage observed after the 2010 Maule earthquake (Mw 8.8) at Talca and Curicó, Central Chile. *Engineering Geology*, 161, pp. 26 – 33.

Lučić, B. (1982). Spomenici kulture i potres od 16. ožujka 1982. u Hrvatskom Zagorju. Informatica museologica, 13(1-2), 36-37. Preuzeto s https://hrcak.srce.hr/146040

Magnon, J. (2013.). *Applications of TROMINO®: HVSR and more*. MOHO Science & Technology. Dostupno na: https://www.aseg.org.au/sites/default/files/02_Jeremy _Magnon.pdf [Pristupljeno 26. 11. 2016].

Malez, M. (1952). Minerali i stijene Ivančice. *Naše planine*, 4, pp. 7 – 8.

Moisidi, M., Vallianatos, F., Soupios, P., Kershaw, S. (2012). Spatial spectral variations of microtremors and electrical resistivity tomography surveys for fault determination in southwestern Crete, Greece. *J Geophys Eng* 9:pp 261 – 270.

Mucciarelli, M. and Gallipoli, M. R. (2001). A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, Vol. 42, pp. 255 – 266.

Nakamura, Y. (1989). A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. *QR of RTRI*, 30(1), pp. 25 – 33.

Panzera, F., Lombardo, G., D'Amico, S. i Galea, P. (2013). Speedy techniques to evaluate seismic site effects in particular geomor-phologic conditions: faults, cavities, landslides and topographic irregularities (chapter 5). InTech pp 102 – 138.

Pitilakis, K. D. (Ed.). (2007). Earthquake Geotechnical Engineering. 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering-Invited Lectures, *Springer Netherlands*.

Reiter, L. (1990). Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights, *Columbia University Press*, New York.

Seville, E. i Metcalfe, J. (2005). Developing a hazard risk assessment Framework for the New Zealand State Highway Network. Land Transport New Zealand Research Report 276. 80 pp.

Stanko, D., Markušić, S., Strelec, S. i Gazdek, M. (2016). Seismic response and vulnerability of historical Trakošćan Castle, Croatia using HVSR method. *Environmental Earth Sciences*, 75(5).

Stanko, D., Markušić, S., Strelec, S. i Gazdek, M. (2017). HVSR analysis of seismic site effects and soil-structure resonance in Varaždin city (North Croatia). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, pp. 666 – 677.

Šimunić, A. (1986). Geološka građa okolice Lepoglave i osvrt na pojave mineralnih sirovina. *Zavod za znanstveni rad Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti*, 1, pp. 19 – 32.

Šimunić, A. (1997). Geološka osnova mineralnih sirovina ivanečkog kraja. *Zbornik 600 godina Ivanca, Ivanec,* pp. 105 – 111.

Šimunić, A. (2006). *Geološke osobitosti Hrvatskog zagorja.* [online] Dosutpno na: https://bib.irb.hr/datoteka/291105.GEOLOKE_OSOBITOSTI_HRVATSKOG_ZAGORJA_-2.doc [26 stu. 2016].

The Financial Times, European Cities and Regions of the Future 2016/17, fDi Magazine, 2016. Dostupno na: http://www.fdiintelligence.com/Rankings/European-Cities-and-Regions-of-the-Future-2016-17?ct=true [Pristupljeno 30.3.2017.].

Tomljenović, B. i Csontos, L. (2001). Neogene–Quaternary structures in the border zone between Alps, Dinarides and Pannonian Basin (Hrvatsko zagorje and Karlovac Basins, Croatia). *International Journal of Earth Sciences*, 90(3), pp. 560 – 578.

Web portal grada Ivanca, Dostupno na: http://www.ivanec.hr/20-o-ivancu [Pristupljeno 30. 3. 2018].

POPIS SLIKA

Slika 1. Poredbeno vršno ubrzanje tla tipa A s vjerojatnosti premašaja 10 % u 50 godina za povratno razdoblje 475 godina izraženo u jedinicama gravitacijskog ubrzanja g (Karte potresnih područja Republike Hrvatske) 1
Slika 2. Lokalna svojstva tla – primjer amplifikacije seizmičke pobude od osnovne stijene do površine (prema Seville i Metcalfe, 2005)..... 2
Slika 3. Smještaj grada Ivanca u odnosu na rijeku Bednju i planinu Ivančicu. Situacijski položaj točaka HVSR mjerenja (Podloga iz programa Google Earth) 3
Slika 4. Grad Ivanec i okolica u podnožju Ivančice (Belcar, 2013)..... 4
Slika 5. Lokacije HVSR mjerenja označene na isječku Osnovne geološke karte OGK, L 33-69 Varaždin (Geološki zavod Zagreb 1971-1978, autori: Šimunić, Pikija, Hećimović)..... 6
Slika 6. Karta središnje i sjeverne Hrvatske s označenim epicentrima potresa od 1459. do 2016. godine s magnitudama od 3.5 do 7 po Richterovoj skali u krugu od 50 km od Ivanca (osobna komunikacija: Ivančić i Markušić, 2017; Herak, D. i sur., 2009). Crvenim linijama su označeni rasjedi (Ivančić i sur., 2006)..... 8
Slika 7. Uređaj za HVSR mjerenja: Tromino Micromed S.p.A., Mogliano Veneto, Italy. 11
Slika 8. HVSR analiza u programu Grilla r. 6.5 (Micromed S.p.A., Mogliano Veneto, Italy)..... 14
Slika 9. Primjer snimke mikroseizmičkog nemira u trajanju od 20 minuta 14
Slika 10. Postupak izoliranja (uklanjanja) vremenskih sekvenci kontaminiranih mjerenja. Legenda na slici (traka boja) označava broj N uzoraka određene frekvencije 15
Slika 11. Fourierov amplitudni spektar svake pojedine komponente. Omjerom aritmetičke sredine horizontalnih komponenti i vertikalne komponente je definiram HVSR spektar, odnosno H/V amplituda po frekvenciji..... 15
Slika 12. Primjeri HVSR krivulja: a) visoka amplituda osnovne frekvencije tla; b) „ravna“ HVSR krivulja 18
Slika 13. Primjer HVSR krivulje s više vrhova koji označavaju različite geološke granice 19
Slika 14. Interpretacija rezonantne frekvencije f_0 na kontaktu osnovne stijene i sedimentnog paketa..... 19
Slika 15. Dijagram promjene debljine H sedimenata iznad osnovne stijene ovisno o rezonantnoj frekvenciji f_0 za konstantne brzine posmičnih valova V_S (Magnon, 2013) 20

Slika 16. Mjerenje mikroseizmičkog nemira u dolini rijeke Bednje (lijevo) i na pribrežju planine Ivančice (desno) 23
Slika 17. Topografska karta Ivanca s označenim lokacijama HVSR mjerenja 24
Slika 18. Čisti rezonantni vrh na HVSR krivulji 25
Slika 19. Više niskofrekventnih vrhova HVSR amplitude 26
Slika 20. Široki rezonantni vrh HVSR amplitude 27
Slika 21. Dva rezonantna vrha na HVSR krivulji 27
Slika 22. Ravna HVSR krivulja 28
Slika 23. Raspodjela frekvencija u odnosu na ukupni broj mjerenja 29
Slika 24. Karta osnovnih frekvencija sedimenata na području grada Ivanca: a) konture osnovnih frekvencija projicirane na satelitsku snimku područja, b) konture osnovnih frekvencija s označenim rasjedima s osnovne geološke karte 30
Slika 25. Karta debljina sedimenata na području grada Ivanca: a) konture debljina su projicirane na satelitsku snimku područja, b) konture debljina s označenim rasjedima s osnovne geološke karte 32
Slika 26. Karta HVSR amplituda sedimenata na području grada Ivanca: a) konture amplituda projicirane na satelitsku snimku područja, b) konture amplituda s označenim rasjedima s osnovne geološke karte 34
Slika 27. Raspon osnovnih frekvencija građevine tipične konstrukcije s obzirom na njenu visinu (Magnon, 2013) 35
Slika 28. Karte HVSR amplituda izdvojenim za frekvencije 2.5, 4, 6 i 8 Hz 37

POPIS TABLICA

Tablica 1. Statistički kriteriji korektnosti HVSR krivulje, SESAME (2004) 16
Tablica 2. Brzine V_S posmičnih valova u mekim sedimentima (tlima) (Magnon, 2013) 20