

# Mjerenje osnovne frekvencije okoliša i zgrade Geofizičkog odsjeka

---

Erceg, Petra

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:635152>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-15**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Petra Erceg

Mjerenje osnovne frekvencije okoliša i zgrade  
Geofizičkog odsjeka

Diplomski rad

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

SMJER: SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

**Petra Erceg**

Diplomski rad

**Mjerenje osnovne frekvencije okoliša  
i zgrade Geofizičkog odsjeka**

Voditelj diplomskog rada: dr. sc. Ivica Sović, v. pred.

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2019.

Bože sačuvaj da bih se ičim ponosio osim križem Gospodina našega Isusa Krista po kojem je meni svijet raspet i ja svijetu!

*Gal 6,14*

Hvala mentoru dr. sc. Ivici Soviću, svim profesorima i asistentima Geofizičkog odsjeka.



## Sažetak

Sigurnost građevina uvjetovana je između ostalog i svojstvima tla na kojima je temeljena. Bitno je poznavati osnovne frekvencije titranja zgrade i tla da bi se mogla izračunati amplifikacija prilikom potresa kako bi se osigurala sigurnost ljudi i smanjila potencijalna šteta. Osim toga, korisno je znati do koje se udaljenosti mogu izmjeriti oscilacije koje stvara zgrada jer se, u slučaju potresa, zgrade ponašaju kao harmonički oscilatori koji produžuju trajanje seizmičkog signala. U svrhu ovog diplomskog rada mjereno je mikroseizmički nemir u zgradi Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu i njezinom okolišu. Potvrđene su otprije poznate osnovne frekvencije zgrade odsjeka:  $4.2 \text{ Hz}$  (longitudinalni, uzdužni smjer),  $5.5 \text{ Hz}$  (transverzalni, poprečni smjer) te torzijski mod frekvencije  $6.2 \text{ Hz}$ . Iz razlike amplituda horizontalnih komponenata spektra u smjeru dulje osi zgrade i normalno na taj smjer određeno je na kojoj se udaljenosti osjeća utjecaj zgrade na okoliš. Tlo na kojemu je sagrađena zgrada sastoji se od slojeva sivozelene gline i morena što ukazuje na teorijsku mogućnost amplifikacije u gornjim slojevima. Istraživanjem nije pokazana znatnija mogućnost amplifikacije potresnih valova u tlu u okolici zgrade Geofizičkog odsjeka.

Ključne riječi: mikroseizmički nemir, HVSR, amplifikacija, Geofizički odsjek

# Measurement of the fundamental frequency of the environment and building of the Department of Geophysics

## Abstract

The softness of the surface ground and the thickness of surface sediments have been observed as two important local geological factors that affect the level of earthquake shaking. Their local variations can lead to spatial seismic intensity differences and may have influence in building damage level and a significant earthquake damage distribution even in the cases of moderate earthquakes. It has been shown that there are three fundamental modes of the building and how much the building effects the environment while using Horizontal to spectral ratio (HVSr) method with *Tromino* measurements. The fundamental modes of the building are 4.2, 5.5. and 6.2  $Hz$ . In this work it is shown that there is no significant correlation between fundamental frequencies of the soil and the building and there is no need to be concerned about amplification of seismic waves.

Keywords: Site effects, Ambient vibrations, Soil-structure interaction, HVSr method

# Sadržaj

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Uvod</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Dinamička svojstva tla i zgrada</b>                            | <b>3</b>  |
| 2.1      | Amplifikacija seizmičkih valova u površinskim slojevima . . . . . | 4         |
| 2.2      | Utjecaj površinske topografije . . . . .                          | 4         |
| <b>3</b> | <b>HVSR metoda</b>  | <b>6</b>  |
| 3.1      | Mikroseizmički nemir . . . . .                                    | 6         |
| 3.2      | Povijesni pregled i objašnjenje HVSR metode . . . . .             | 6         |
| 3.3      | Primjena HVSR metode . . . . .                                    | 11        |
| 3.4      | Seizmički rizik i hazard . . . . .                                | 11        |
| <b>4</b> | <b>O zgradi Geofizičkog odsjeka i njezinom okolišu</b>            | <b>15</b> |
| 4.1      | Prethodna mjerenja na zgradi . . . . .                            | 21        |
| <b>5</b> | <b>Metoda</b>   | <b>22</b> |
| 5.1      | Mjerni uređaj i program za obradu podataka . . . . .              | 22        |
| 5.2      | Opis mjerenja . . . . .   | 23        |
| <b>6</b> | <b>Mjerenja i rezultati</b>                                       | <b>26</b> |
| <b>7</b> | <b>Zaključak</b>  | <b>39</b> |

# 1 Uvod

Zgrade imaju svoj osnovni period (mod) titranja. Tlo također ima vlastitu frekvenciju titranja i sposobnost rezonancije i amplifikacije seizmičkih valova. Čvrsta podloga ima veće vlastite frekvencije titranja u odnosu na mekše sedimente. Ako period titranja tla odgovara osnovnoj frekvenciji zgrade, doći će do rezonantnog prijenosa energije potresa s tla na zgradu pa će oštećenja biti veća. Krutost i debljina sloja površinskog tla smatraju se najvažnijim lokalnim geološkim faktorima koji utječu na jačinu trešnje. Zbog lokalnih promjena debljina i krutosti površinskih slojeva mijenja se i intenzitet potresa čak i na relativno malom području što može imati velik utjecaj na oštećenje građevina i kod umjerenih potresa.

Za procjenu dinamičkih svojstava tla, što uključuje osnovnu frekvenciju i amplifikacijske faktore, koriste se tradicionalne metode kao što su seizmička refleksija, refrakcija te bušotinska mjerenja (npr. Šumanovac, 2012). Ove metode su poprilično skupe i pomoću njih nije uvijek moguće odrediti brzinu S-valova u dubljim slojevima. Također, teško ih je koristiti u gradskim sredinama. Alternativa ovim metodama su metode kojima se mjere brzine površinskih valova. U ovisnosti o izvoru, postoje aktivne i pasivne metode. Kada se umjetno proizvode seizmički valovi radi se o aktivnim seizmičkim metodama, dok pasivne seizmičke metode koriste mikroseizmički nemir. Jedna od pasivnih metoda je *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) metoda koja je korištena u ovom diplomskom radu. Metoda počiva na pretpostavci da se vertikalna komponenta gibanja tla amplificira manje od horizontalnih u plitkim slojevima te da dolazi do višestrukih refleksija S-valova u površinskom sloju nad poluprostorom. Metoda je u Japanu poznata od ranih 1950.-ih, a posebno postaje prepoznata nakon Nakamurinog članka 1989. godine (Nakamura i Samizo, 1989), po kojemu je dobila ime "Nakamura metoda" (engl. *Nakamura technique*). Vrlo brzo se počela koristiti diljem svijeta u svrhu određivanja dinamičkih parametara tla i struktura zbog svoje jednostavnosti i niske cijene istraživanja.

Na zgradi Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu vidljiva su oštećenja i pukotine u konstrukciji te se nameće pitanje njezine sigurnosti. Zgrada je izgrađena na različitim vrstama tla: istočni dio zgrade ukopan je tri metra u suho tlo dok je zapadni dio zgrade temeljen na vodom saturiranom tlu. To znači da tlo ima različite vlastite frekvencije koje mogu djelovati rezonantno na samu zgradu

na način da pojedini dijelovi zgrade titraju različitim frekvencijama.

Cilj ovog diplomskog rada je odrediti vlastite frekvencije zgrade Geofizičkog odsjeka i izračunati amplifikaciju tla te pomoću HVSR metode procijeniti koja je strana zgrade ugroženija za vrijeme potresa s obzirom na podlogu na kojoj je zgrada temeljena. Mjerenjem nemira na raznim udaljenostima od zgrade procijenit će se udaljenost na kojoj se osjeti utjecaj vlastitih oscilacija zgrade. U radu Herak i Herak (2009.) opisana su mjerenja na zgradi Geofizičkog odsjeka koja su trajala 19 mjeseci. U okviru tog projekta izvedena su mjerenja osnovnih frekvencija zgrade u samoj zgradi te nisu napravljena mjerenja na otvorenom (engl. *freefield*), što je u ovom radu učinjeno.

## 2 Dinamička svojstva tla i zgrada

Veza između amplifikacije tla i razine štete utvrđena je nakon više jakih potresa (magnituda  $M_w > 7.0$ ) te se danas intenzivno rade analize ovisnosti struktura tla i visokih zgrada. Najpoznatiji primjer amplifikacije seizmičkih valova zasigurno je potres jačine  $M_s = 8.1$  koji se dogodio 19. rujna 1985. na meksičkoj pacifičkoj obali, oko 400 km udaljen od Ciudad de Mexica u kojem se u potpunosti srušilo 412 zgrada (Wirgin i Bard, 1996). Tako snažno djelovanje potresa na velikoj epicentralnoj udaljenosti je posljedica lokalne geologije Ciudad de Mexica koji se jednim dijelom nalazi na 40 m debelom sloju rahlog jezerskog sedimenta. Prosječna brzina S-valova je oko  $800 \text{ m/s}$  pa su zgrade s pet do petnaest katova bile posebno izložene oštećenjima jer je osnovni vlastiti period sloja bio oko  $2 \text{ s}$  ( $0.5 \text{ Hz}$ ) što je blisko vlastitim periodima takvih zgrada (Parolai, 2012). Lokalni učinci su procesi, odnosno pojave povećanja amplitude vala, promjene frekvencije, rezonantno titranje i sl., koje proučavaju seizmologija, geotehnika i geologija. Lokalni učinci dijele se na izravne i neizravne. Izravni učinci su pojačanje i prigušenje seizmičkih valova i ovise o frekvenciji. Posljedica su postojanja površinskih slojeva u kojima su brzina S-valova i modul smicanja manji nego u poluprostoru ispod njih (Parolai, 2012). Neizravni učinci tla su oni koji nastaju zbog mehaničkog popuštanja tla, primjerice likvefakcija, odroni, klizanje. Bitno je naglasiti i lokalne učinke tsunamija kod kojih oblik obale i topografija terena mogu dodatno amplificirati valove tsunamija.

U velikim urbanim sredinama, osim međusobnog utjecaja zgrade i tla, važno je promatrati i utjecaj zgrada jedne na drugu. Wirgin i Bard (1996.) su na primjeru Mexico Cityja ukazali na mogućnost utjecaja zgrada jedne na drugu u krugu od jednog kilometra. Pokazali su da visoke zgrade građene na mekom tlu mogu značajno utjecati na distribuciju, amplitudu i trajanje gibanja tla i objekata u svojoj blizini te prouzročiti povećanje štete (Wirgin i Bard, 1996).

## 2.1 Amplifikacija seizmičkih valova u površinskim slojevima

Amplitude seizmičkih valova na osnovnoj stijeni manje su od onih na mekim tlima. Mekani slojevi sedimenta na čvrstoj osnovnoj stijeni povećat će amplitudu seizmičkih valova odgovarajuće frekvencije na samoj površini tla i do nekoliko puta (Parolai, 2012). Za jednostavan jednodimenzionalni model sloja nad poluprostorom vrijedi (Parolai, 2012.):

$$T_s = \frac{4H}{v_s} \quad (2.1)$$

pri čemu je  $T_s$  vlastiti period u sekundama,  $H$  debljina sloja u metrima, a  $v_s$  brzina valova u  $m/s$ . Postoji niz empiričkih metoda kojima se može procijeniti vlastiti period, odnosno frekvencija, površinske strukture tla. Pristupi procjeni lokalnog učinka se razlikuju, a mogu se određivati proučavajući seizmogramе potresa ili seizmičkog nemira. U ovom radu korištena je HVSR metoda omjera horizontalnog i vertikalnog spektra brzina koja se temelji na mjerenju seizmičkog nemira unutar zgrade i na otvorenom (engl. *freefield*) kako bi se odredile rezonantne frekvencije zgrade i okoliša i moguća amplifikacija. Danas se smatra da su lokalni učinci podloge značajniji kod malih i umjerenih potresa, osobito za veće frekvencije (Parolai, 2012).

## 2.2 Utjecaj površinske topografije

Istraživanja su pokazala da su amplitude seizmičkih valova veće na vrhovima brda ili blizu litica, što je izraženo na horizontalnoj komponenti seizmograma (Parolai, 2012). Ponašanje se može objasniti fokusiranjem energije: pri vrhu brda seizmički valovi konstruktivno interferiraju zbog vrlo malene razlike u fazi. Amplifikacija će biti najveća za valne duljine koje odgovaraju poluširini uzvisine:

$$\eta = \frac{2L}{\lambda} \quad (2.2)$$

Do amplifikacije dolazi i u kanjonima, a najveća je na rubovima za valne duljine koje su slične ili manje od dimenzija istog (Parolai, 2012). Buech i sur. (2010.) su proveli istraživanje učinka topografije na brežuljku Little Red Hill, na Novom Zelandu. U tom radu greben čini osnovna stijena sastavljena od izrazito tvrdih pješčenjaka, a u podnožju je zaravan glacijalnih depozita. Sedam mjernih instrumenata postavljeno je uzduž linije brežuljka i u samom podnožju u dužini od 210  $m$ . Ukupno je

obrađeno 313 regionalnih i teleseizmičkih potresa unutar četiri mjeseca istraživanja. Istraživanje je pokazalo da su pomaci tla na postaji koja se nalazila na vrhu brežuljka pokazali amplifikaciju vala za 1100% u usporedbi s postajom u podnožju brežuljka. I druga mjerenja u tom istraživanju potvrdila su tezu da se najveća amplifikacija događa upravo na najvišoj postaji (Buech i sur., 2010). Autori su pokazali da se dobro poznati mehanizam pojačanja titranja visinom na građevinama može na većoj skali primjeniti i na planine. Za inženjerske potrebe koriste se spektri odziva (engl. *response spectra*) pomaka, brzine i ubrzanja. U praksi se najviše koriste spektri ubrzanja. Spektar odziva može se definirati kao skup odgovora sustava na pobudu u obliku akcelerograma potresa (Reiter, 1990).



## 3 HVSR metoda

### 3.1 Mikroseizmički nemir

Mikroseizmički nemir definiramo kao stalno podrhtavanje tla Zemlje uzrokovano prirodnim ili umjetnim izvorima. Prirodni izvori nemira su atmosferske pojave (vjetar, promjene tlaka zbog nailaska ciklona i anticiklona), vodotokovi, morski valovi i slično. Umjetni izvori nemira potječu od ljudske aktivnosti. To su, primjerice, promet (poglavito u urbanim sredinama), industrijski strojevi i transformatori, radovi u okolišu. Relativno niske frekvencije ( $0,1$  do  $< 10$  Hz) su prirodnog podrijetla i nazivamo ih daleki izvori (engl. *microseismic*). Više frekvencije ( $0,5$  do  $10$  Hz) potječu od ljudske aktivnosti i nazivamo ih bliski izvori (engl. *microtremor*) (npr. Stanko, 2015). Istraživanja pomoću mikroseizmičkog nemira u prednosti su nad drugim metodama zbog toga što su brza, jednostavna te nisu štetna za okoliš. Također, instrumenti su relativno jeftini, a analiza podataka jednostavna. Mikroseizmički nemir uvelike ovisi o lokaciji. Naime, urbane sredine očekivano imaju veći nemir i kod mjernih postaja bitno je obratiti pažnju na vrijeme u kojima su mjerenja obavljena. Primjerice, očekivano je da je nemir u gradovima manji za vrijeme godišnjih odmora (npr. srpanj, kolovoz) te u vrijeme noći. Također, veća razina nemira u urbanim sredinama očekuje se u jutarnjim i kasnim popodnevnim satima radnim danima. Na postajama koje su locirane blizu obale gdje nemir uglavnom potječe od valova ili pak vjetra i vodenih tokova, bitno je obratiti pažnju na doba godine te klimatske uvjete. Primjerice, u zimskim mjesecima kada je prisutan snježni pokrov očekivano je prigušenje određenih frekvencija, a ljeti će se pojavljivati ljetne oluje. Jednako tako, u zimskim uvjetima periodi oceanskih valova su nešto duži nego ljeti (Demuth, 2016).

### 3.2 Povijesni pregled i objašnjenje HVSR metode

Pioniri u korištenju mikroseizmičkog nemira u svrhu određivanja amplifikacije tla su Japanci (Kanai, 1954). Iako je HVSR metoda u praksi vrlo brzo zaživjela nakon Nakamurinog članka (Nakamura i Samizo, 1989) došlo je do velikih polemika prilikom pokušaja objašnjenja prirode nemira. Kanai (1983) je pretpostavio da se nemir sastoji uglavnom od SV-valova. S njim se ne slaže Aki (Aki, 1957), ali i mnogi drugi (Nogoshi i Igarashi, 1970, 1971; Udwardia i Trifunac, 1973, Chouet i sur., 1998)

koji su pokazali da je mikrosezmički nemir sadrži i površinske valove. Pokrenuta su mnoga dugoročna mjerenja na stalnim postajama u Japanu kako bi se istražila pouzdanost i stabilnost izvora kratkoperiodičkih i dugoperiodičkih mikrosezmičkog nemira (Bard, 1999). Na različitim mjernim postajama pronađeni su konzistentni zaključci o izvorima nemira u određenim frekvencijskim pojasima (Bard, 1999):

- na frekvencijama ispod  $0,3 \text{ Hz}$  mikrosezmički nemiri potječu od oceanskih valova na velikim udaljenostima, a odgovarajuća amplituda spektra stabilna je tokom nekoliko sati i dokazano korelira sa meteorološkim uvjetima na velikoj skali.
- za frekvencije između  $0,3 \text{ Hz}$  i  $1 \text{ Hz}$  mikrosezmički nemir osim oceanskih valova uzrokuje i vjetar, a stabilnost je značajno manja.
- iznad  $1 \text{ Hz}$  nemir je uzrokovan ljudskom aktivnošću i ovisi o lokaciji mjerne postaje (urbano/nenaseljeno područje, prometnice).

Metoda omjera horizontalnog i vertikalnog spektra mikrosezmičkog nemira, tzv. HVSR metoda (engl. *Horizontal-to-Vertical Spectral ratio*) jednostavna je metoda za određivanje odziva tla, tj. rezonantne frekvencije tla i faktora amplifikacije (Nakamura i Samizo, 1989; Bard, 1999; Mucciarelli i Gallipoli i sur., 2001; Gosar i sur., 2007; Herak i sur., 2011). Metoda se koristi za brzu procjenu odziva lokalnog tla i spada u pasivne seizmičke metode. Računanje omjera horizontalne i vertikalne komponente (H/V) spektra na jednoj mjernoj postaji su prvi predložili Nogoshi i Igarashi 1971. godine. Pokazali su vezu eliptičnosti Rayleighevih valova s H/V omjerom te ukazali na povezanost između najniže frekvencije na kojoj je maksimum H/V omjera i osnovne frekvencije područja na kojoj se vrši mjerenje. Detaljnije objašnjenje daje Nakamura (Nakamura i Samizo, 1989) koji je popularizirao metodu. Zbog toga što se odnosi samo na S-valove, metoda je dobila ime "*Quasi-Transfer Spectrum*" (QTS) te su je drugi istraživači dugo dovodili u pitanje zbog polukvalitativnog teorijskog objašnjenja. Originalni rad (Nakamura i Samizo, 1989) objavljen je na japanskom jeziku te se kroz desetljeće u mnogim člancima pojavljivala ista kritika da, iako dobro prognozira rezonantnu frekvenciju tla, nije u mogućnosti točno procijeniti amplifikaciju (Mucciarelli i Gallipoli, 2001). Nakamura se s detaljnijim opisom metode i njezinih poteškoća oglasio 2000. godine na engleskom jeziku, a 2008. je dao i dopunu u "*On the H/V Spectrum*". Parolai i sur. (2000) predstavili su model koji uzima u

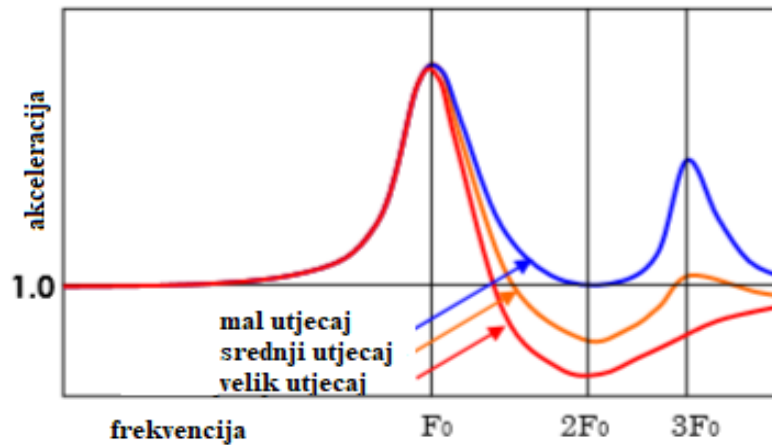
obzir različite faze prostornih valova. U većini radova se smatra da valovi koji tvore nemir imaju svojstva Rayleighevih površinskih valova (Field i Jacob, 1993, 1995; Lachet i Bard, 1994). Arai i Tokimatsu (2000) uz njih uključuju i Loveove valove. Ako se mikroseizmički nemir sastoji uglavnom od površinskih valova, tada dolazi do promjene u eliptičnosti Rayleighevih valova: na površini dulja poluos elipse paralelna je s površinom dok je u dubini normalna na površinu (Bard, 1999). Do ovih je zaključaka Bard došao na temelju sličnosti rezultata omjera H/V za mikroseizmičke nemire i omjera H/V za osnovne modove Rayleighevih valova, no Nakamura tvrdi da se samo iz sličnosti grafova ne može izvući ovakav zaključak. Nakamura (1989, 2000) ukazuje na to da je energija Rayleighevog vala gotovo jednaka nuli na frekvenciji maksimuma omjera H/V te da maksimum postiže na višim frekvencijama. Kada je omjer impedancije sloja i poluprostora veći od 2,5, Rayleighevi valovi ne utječu na maksimum H/V omjera, ali za manje utječu. Za impedancije veće od 2, omjer H/V Rayleighevog vala se naglo povećava. Na taj se način pokazalo nemogućim odrediti omjer impedancija iz šiljaka H/V-a Rayleighevih valova te je Nakamura zaključio da je H/V šiljak uzrokovan sa SH- valovima i da se ne može objasniti Rayleighevim valovima. Sve ovo vodi zaključku da je mikroseizmički nemir mnogo kompliciraniji i da ga zapravo čini kombinacija i prostornih i površinskih valova (Bonney-Claudet i sur., 2006). Čitav niz znanstvenika na različite načine je pokušavao doći do odgovora na pitanje koje valove koristi HVSR metoda. Odgovor se ni danas ne zna, ali se zadovoljavamo činjenicom da metoda daje zadovoljavajuću procjenu elastičnog ponašanja tla.

Nakamura (1989) je definirao rezonantni amplitudni maksimum HVSR-a  $A(f)$  kao spektralni omjer horizontalnih komponenti ( $F_{NS}$  i  $F_{EW}$ ) i vertikalne komponente ( $F_V$ ):

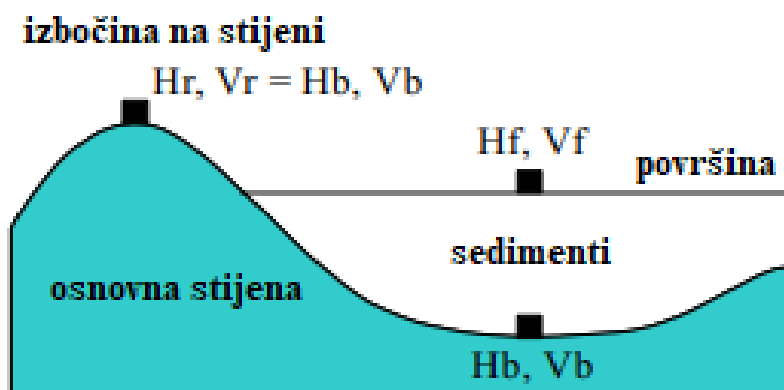
$$A(f) = HVSR(f) = \frac{\sqrt{F_{NS}(f) \times F_{EW}(f)}}{F_V(f)} \quad (3.1)$$

Amplituda  $A(f)$  je ovisna o vlastitoj frekvenciji osciliranja tla te pokazuje kolika je amplifikacija amplitude titranja površinskog tla u odnosu na osnovnu stijenu (engl. *bedrock*). Amplituda je ovisna o impedanciji (umnošku brzine i gustoće) tla između osnovne stijene i površinskih sedimenata. Na temelju mjerenja mikroseizmičkog nemira može se odrediti odziv lokalnog tla iskazan preko vlastite frekvencije tla  $f_0$  i

spektralne amplitude  $HVSR(f) = A(f)$ . Na slici 3.1 prikazan je utjecaj Rayleighevih valova na omjer spektara H/V prema Nakamuri (2000). Potvrđeno je da je omjer H/V dobra procjena osnovne frekvencije  $F_0$  i amplifikacijskog faktora kako za mikroseizmičke nemire tako i za jake potrese.



Slika 3.1: Utjecaj Rayleighevih valova na omjer H/V spektara u ovisnosti o frekvenciji. Prvi šiljak na frekvenciji  $F_0$  nastaje zbog S-valova. Minimum oko frekvencije  $2F_0$  uzrokuju Rayleighevi valovi. U okolici  $F_0$  Rayleighevi valovi praktički nemaju energiju pa su krivulje disperzije nestabilne. Utjecaj Rayleighevih valova raste od  $F_0$  i dosežu prvi šiljak na  $3F_0$ . Prema Nakamura, 2008.



Slika 3.2: Shematski prikaz sedimentacijskog bazena: horizontalni spektar na površinskom sloju sedimentacijskog bazena  $H_f$ , vertikalni spektar  $V_f$  na površinskom sloju sedimentacijskog bazena.  $H_r$  i  $V_r$  su horizontalni i vertikalni spektri osnovne stijene na vrhu stijenske izbočine i iznosom su jednaki  $H_b$  i  $V_b$  horizontalnom i vertikalnom spektru osnovne stijene na dnu bazena. Prema Nakamura, 2000.

Na slici 3.2 prikazana je geološka struktura sedimentacijskog bazena pomoću koje je Nakamura objasnio HVSR metodu. Ako uzimamo u obzir da je mikroseizmički nemir sastavljen od Rayleighevih i ostalih valova, tada horizontalni ( $H_f$ ) i vertikalni ( $V_f$ ) spektar na površinskom sloju sedimentacijskog bazena iznose:

$$H_f = A_h * H_b + H_s \quad (3.2)$$

$$V_f = A_v * V_b + V_s \quad (3.3)$$

Oznakama  $A_h$  i  $A_v$  označeni su amplifikacijski faktori horizontalnih i vertikalnih gibanja vertikalno usmjerenog prostornog vala, a  $*$  označava konvoluciju.  $H_b$  i  $V_b$  su spektri horizontalnog i vertikalnog pomaka u osnovnoj stijeni ispod sedimentacijskog bazena.  $H_s$  i  $V_s$  su horizontalni i vertikalni spektri Rayleighevih valova. Tada su  $T_h$  i  $T_v$  amplifikacijski faktori horizontalnog i vertikalnog gibanja osnovne stijene ispod sedimentacijskog bazena. Obzirom da se ne može izravnim mjerenjem doći do vrijednosti  $H_b$  i  $V_b$  osnovne stijene na dnu sedimentacijskog bazena, smatra se da su jednake  $H_r$  i  $V_r$  osnovne stijene na površini čije se vrijednosti mogu utvrditi, pa slijedi:

$$T_h = H_f/H_b \quad (3.4)$$

$$T_v = V_f/V_b \quad (3.5)$$

U sedimentima u kojima je brzina P-valova tri do četiri puta veća od brzine S-valova, vertikalna komponenta se ne može amplificirati ( $A_v = 1$ ) u istom frekvencijskom pojasu u kojem se horizontalna komponenta amplificira. Ukoliko nema utjecaja Rayleighevih valova, tada je  $V_f \cong V_b$ . Ako učinak Rayleighevih valova gledamo kao  $V_f/V_b (= T_v)$ , horizontalnu amplifikaciju  $T_h^*$  možemo pisati kao:

$$T_h^* = T_h/T_v = \frac{T_h}{T_v} = \frac{\frac{H_f}{V_f}}{\frac{H_b}{V_b}} = \frac{QTS}{\frac{H_b}{V_b}} = \frac{[A_h + \frac{H_s}{H_b}]}{[A_v + \frac{V_s}{V_b}]} \quad (3.6)$$

gdje je

$$QTS = \frac{H_f}{V_f} = \frac{A_h \cdot H_b + H_s}{A_v \cdot V_b + V_s} = \frac{H_b}{V_b} \cdot \frac{[A_h + \frac{H_s}{H_b}]}{[A_v + \frac{V_s}{V_b}]} \quad (3.7)$$

U jednadžbi 3.7 omjer  $H_b/V_b \cong 1$ . Ukoliko ne postoji utjecaj Rayleighevih valova, slijedi da je  $QTS = A_h/A_v$ . Ako je utjecaj Rayleighevih valova velik, dominira drugi član jednadžbe i  $QTS = H_s/V_s$  te je najniži šiljak omjera  $H_s/V_s$  je skoro jednak najnižoj osnovnoj frekvenciji  $F_0$  od  $A_h$ . QTS ("Quasi-Transfer Spectrum") pokazuje stabilan šiljak na frekvenciji  $F_0$ . Čak i kada je utjecaj Rayleighevih valova velik,  $V_s$  postaje malen (što rezultira šiljkom  $H_s/V_s$ ) u okolini osnovne frekvencije prvog reda uslijed višestrukih refleksija horizontalnih gibanja. Ako je mikroseizmički nemir sedi-

mentacijskog bazena  $V_b$  relativno velik u odnosu na Rayleigheve valove,  $QTS = A_h$ . Ukratko, QTS prikazuje osnovnu (vlastitu) frekvenciju prvog reda osciliranja sloja koje nastaje zbog višestrukih refleksija SH-valova na površinskom sloju što rezultira amplifikacijom, bez obzira na stupanj utjecaja Rayleighevih valova.

### **3.3 Primjena HVSR metode**

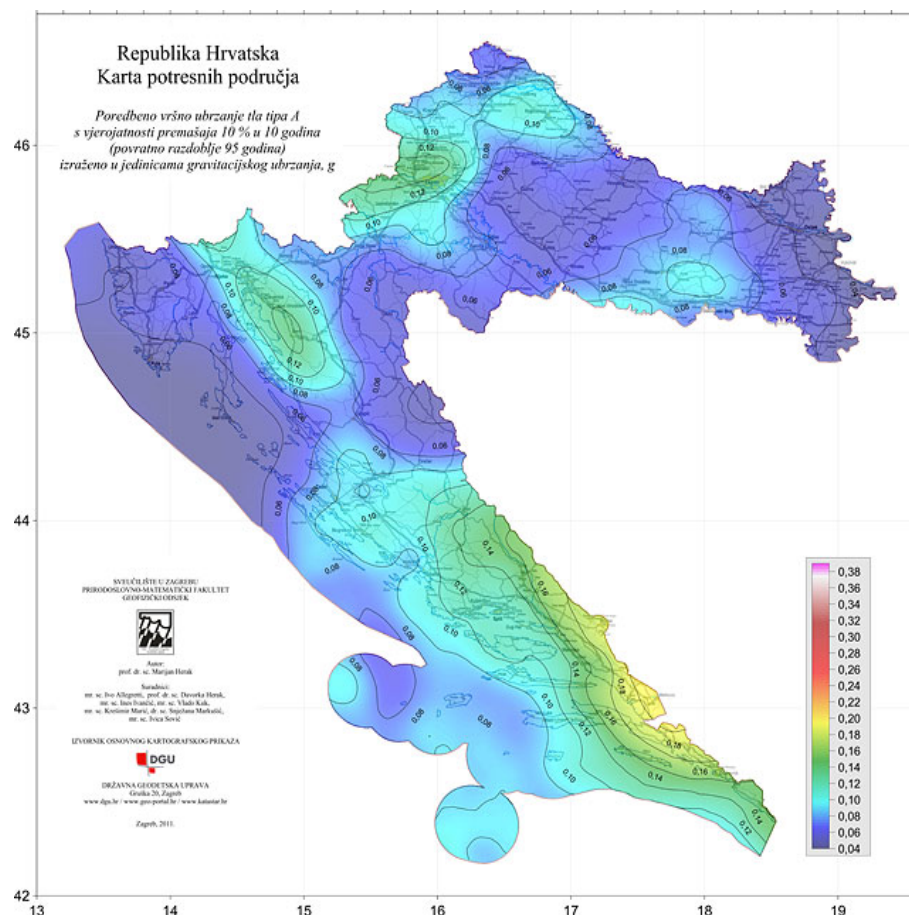
Seizmičko mikrozoniranje je proces procjene odgovora slojeva tla na potres. HVSR metoda koristi se za mikrozoniranje, poglavito u urbanim sredinama jer brzo pruža zadovoljavajuće rezultate i vrlo je jeftina. Ostale primjene metode odnose se na istraživanja sedimentacijskih bazena, tj. procjene varijacija rezonantnih frekvencija u odnosu na dubinu bazena. U kombinaciji s drugim geofizičkim metodama koristi se i u istraživanjima klizišta (Gallipoli i sur., 2000). Ipak, većina znanstvenika HVSR metodu smatra prikladnom prvenstveno za određivanje osnovne frekvencije zgrada jer nije potrebno ponavljati mjerenja na svakom katu (Nakamura, 2000). Stanko i sur. (2015) koristili su mjerenja mikroseizmičkog nemira u procjeni odziva tla na području grada Varaždina. Usporedili su rezultate mjerenja s postojećim bušotinama u gradu i izvan grada te uočili jaku povezanost između geološke strukture i izmjerenih frekvencija i amplifikacija lokalnog aluvijalnog tla.

### **3.4 Seizmički rizik i hazard**

Seizmički hazard ili potresna opasnost govori o vjerojatnosti da se neki iznos odabranog parametra trešnje tla premaši u zadanom razdoblju (Herak, 2016). Parametri s kojima je uglavnom opisana jakost potresa su maksimalna horizontalna akceleracija tla ( $a_{max}, [\%g]$ ) i intezitet potresa ( $I_{max}, [^\circ MCS]$ ). Hazard se računa na temelju podataka o seizmičnosti (katalozi potresa). Seizmički rizik je procjena mogućih socijalnih i ekonomskih posljedica potresa na nekoj lokaciji. Procjenjuje se na temelju seizmičkog hazarda, mikrozoniranja terena što uključuje i računanje amplifikacijskog faktora i procjene stanja građevinskih objekata. Osim destruktivnog djelovanja valova potresa na građevine, pri procjeni seizmičkog rizika treba uzeti u obzir i druge geološke, hidrogeološke i hidrološke pojave kao što su likvefakcija, klizišta ili tsunami. Postoje dva pristupa za računanje seizmičkog hazarda: deterministički, koji uzima u obzir samo stvarne scenarije i probabilistički, koji uzima u obzir više scena-

rija. Iako su pristupi različiti, međusobno su komplementarni i postoje poveznice. U praksi se za procjenu potresne opasnosti za određenu lokaciju ili građevinu najčešće koriste determinističke procjene, a ako su u pitanju veće zone onda se koriste probabilističke procjene.

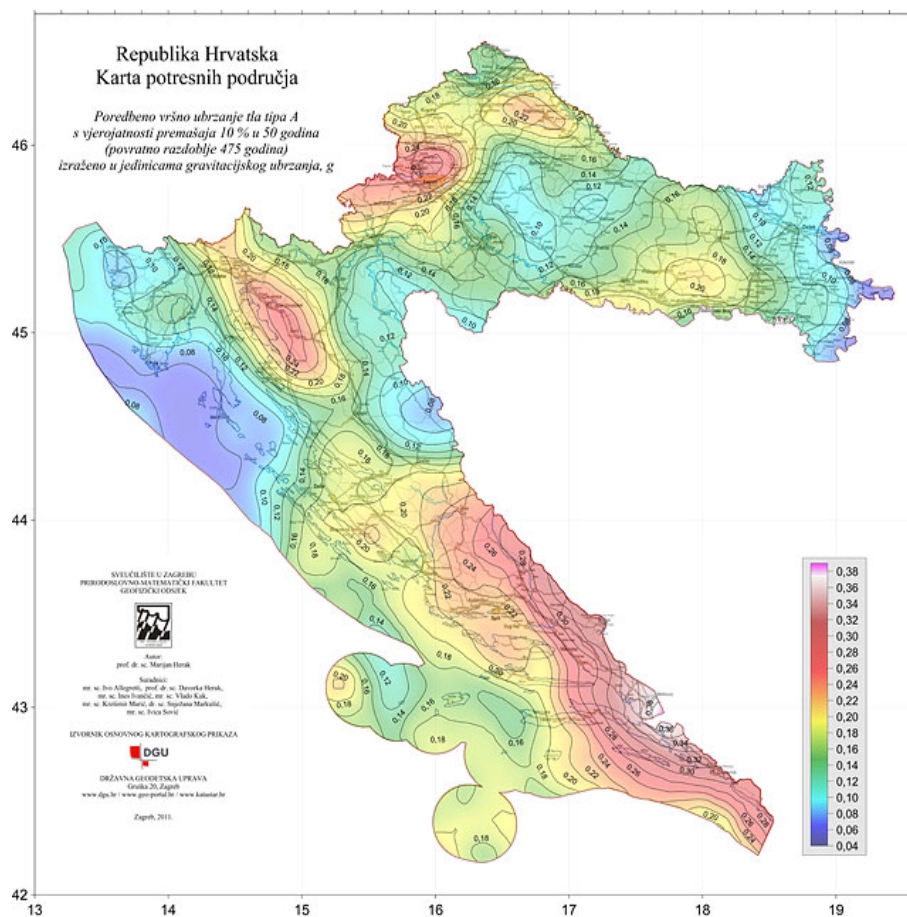
Prvu znanstvenu vjerojatnosnu procjenu potresne opasnosti u Hrvatskoj dao je Andrija Mohorovičić (1909) u radu "Djelovanje potresa na zgrade". Nakon njega, kartu potresne opasnosti za cijeli Balkan daje UNESCO (1974.), a 1987. se na Geofizičkom odsjeku PMF-a izrađuje prva karta potresne opasnosti za Hrvatsku. Budući da je karta trebala zadovoljavati nove norme nakon ulaska u Europsku uniju, na Zavodu je 2011. godine izrađena nova, modernija karta koja je 2012. uvrštena u Nacionalni dodatak Eurokodu-8 (slika 3.3, slika 3.4).



Slika 3.3: Karta potresnih područja Republike Hrvatske za povratno razdoblje od 95 godina (preuzeto s <http://seizkarta.gfz.hr/karta.php>)

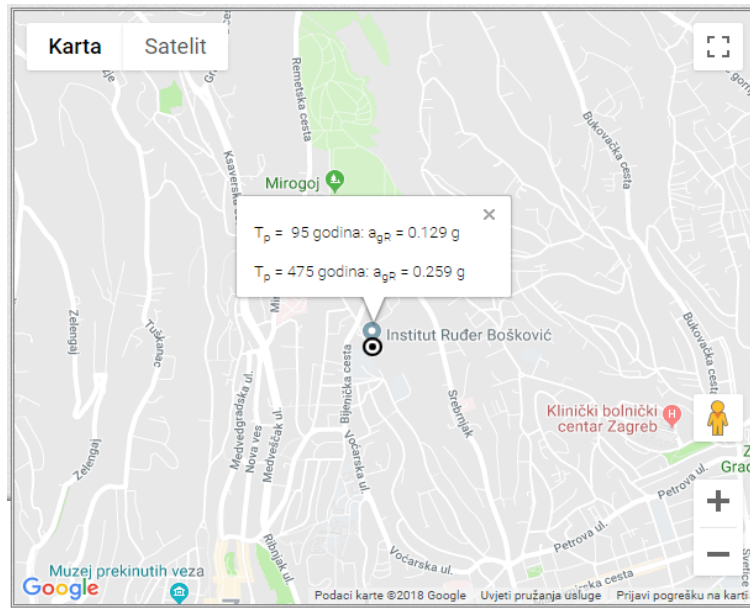
Seizmički hazard je u Eurokodu-8 izražen samo jednim parametrom; referentnom horizontalnom akceleracijom tla  $a_{gR}$  za referentno povratno razdoblje. Preporučeno

referentno povratno razdoblje je 475 godina, što odgovara desetpostotnoj vjerojatnosti prekoračenja u 50 godina u Poissonovoj raspodjeli. Vrijednost  $a_{gR}$  je akceleracija na osnovnoj stijeni te se mora množiti s amplifikacijskim faktorom slojeva iznad osnovne stijene (Kvasnička i sur., 2011). Podaci o seizmičkom hazardu za područje Hrvatske (i grad Zagreb) navedeni u radu Herak (2011) te na slikama 3.3, 3.4 i 3.5 odnose se na osnovnu stijenu. U nastavku rada analizirano je što se događa u slojevima iznad osnovne stijene, odnosno postoji li mogućnost amplifikacije potresnih valova u površinskim slojevima koja bi mogla rezonirati s objektom te ugroziti stabilnost zgrade Geofizičkog odsjeka.



Slika 3.4: (Karta potresnih područja Republike Hrvatske za povratno razdoblje od 475 godina (preuzeto s [http : //seizkarta.gfz.hr/karta.php](http://seizkarta.gfz.hr/karta.php))

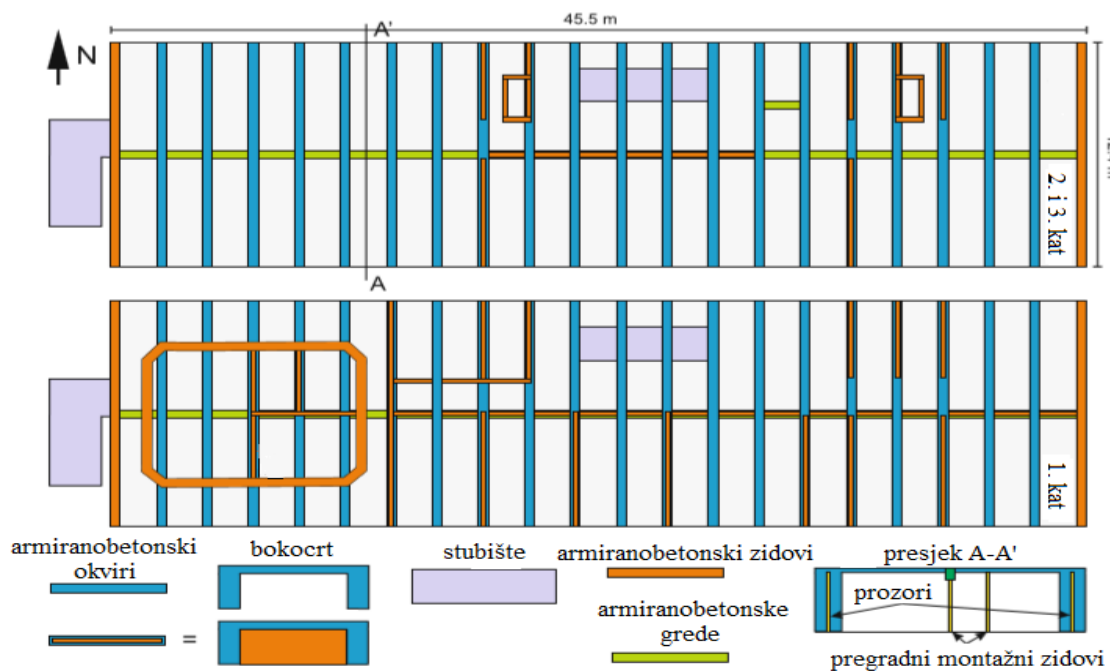




Slika 3.5: Vršno ubrzanje tla na lokaciji zgrade Geofizičkog odsjeka PMF-a u Zagrebu

## 4 O zgradi Geofizičkog odsjeka i njezinom okolišu

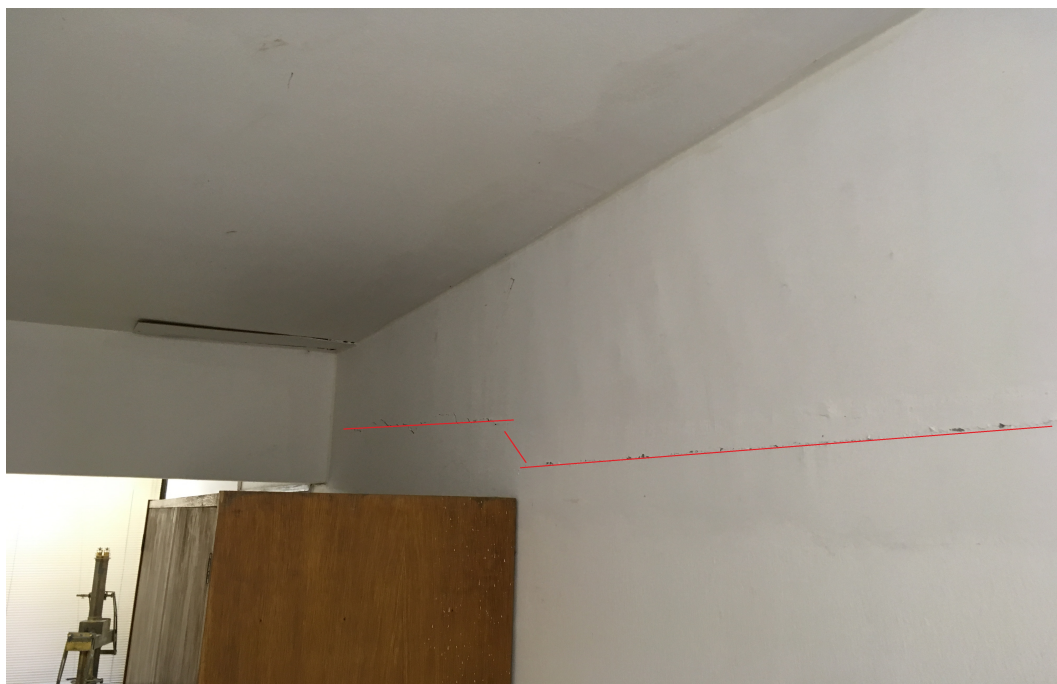
Zgrada Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu nalazi se na adresi Horvatovac 95, na geografskim koordinatama  $45.83^\circ$  N  $15.99^\circ$  E. Iako je gradnja započela u 70-ima, ova trokatnica je završena 1982. godine, a 1996. je na originalnu konstrukciju nadograđen treći kat. Dimenzije zgrade su 45.5 m x 12.4 m (Herak i Herak, 2009) i orijentirana je istok-zapad. Konstrukcija se sastoji od 20 armiranobetonskih režnjeva postavljenih paralelno u smjeru sjever-jug te istočne i zapadne fasade (slika 4.1). Cijelom dužinom zgrade po sredini (smjer istok-zapad) se protežu nosive grede. Očito je da je krutost zgrade puno veća u smjeru sjever-jug. U prizemlju zapadnog dijela zgrade nalazi se osmerokutna prostorija od armiranog betona u kojoj su seizmografi. Na polovici sjeverne strane zgrade nalaze se stube. Težište zgrade pomaknuto je prema zapadu u odnosu na geometrijsku sredinu građevine. Razlog tome je osmerokutna prostorija od armiranog betona u njezinom podrumu.



Slika 4.1: Tlocrt zgrade Geofizičkog odsjeka s legendom (prema Herak i Herak, 2009)

Istočni i zapadni kraj zgrade temeljeni su na različitim tipovima tla. Poznato je da se na zapadnom kraju zgrade procjeđivala voda te je tlo bilo saturirano. Istočni kraj zgrade je ukopan 3 m u brdo. Zbog uočene razlike u tipu tla, pa time i osnovnoj frekvenciji, očekuju se različite amplifikacije tla na zapadnom i istočnom kraju zgrade.

Na zgradi Geofizičkog odsjeka uočene su pukotine na konstrukciji za koje se može pretpostaviti da su posljedice slijeganja zapadnog kraja zgrade temeljenog na saturiranom tlu. Postavlja se pitanje ponaša li se zgrada kao kompaktna cjelina budući da postoje pukotine koje ukazuju na mogući poprečni lom ili titra kao dva odvojena objekta. Oštećenja prikazana na slikama 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 su motivacija za određivanje osnovnih frekvencija titranja zgrade te računanje amplifikacije tla u njejoj okolini.



Slika 4.2: Pukotine u podrumu zgrade Geofizičkog odsjeka; zbog slabe vidljivosti, pukotina je označena crvenim linijama.



Slika 4.3: Pukotine u prizemlju zgrade Geofizičkog odsjeka, površinski zatvorene uslijed reparacije.



Slika 4.4: Pukotine u podrumu zgrade Geofizičkog odsjeka, ispred prostorije 115, površinski zatvorene uslijed reparacije.



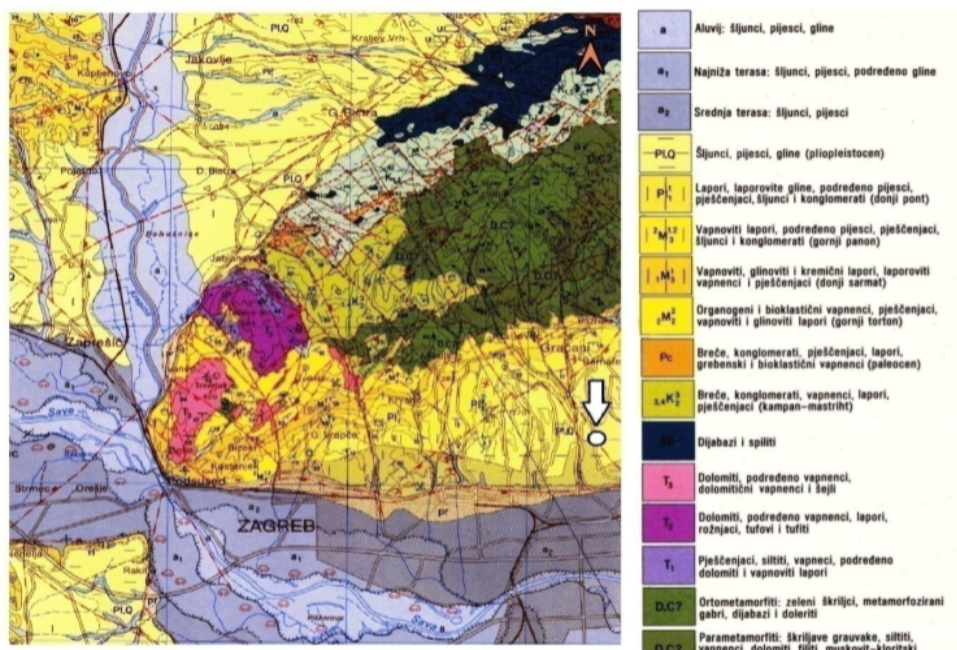


Slika 4.5: Pukotine u prizemlju zgrade Geofizičkog odsjeka u prostoriji 115, površinski zatvorene uslijed reparacije.

Zgrada je sagrađena na centralnom dijelu takozvane "Zagrebačke terase" koja se nalazi na južnim padinama planine Medvednice i obuhvaća područje od Vrapča preko Sv. Duha do Šalate (Pilar, 1877, Gorjanović-Kramberger, 1908). Medvednicu izgrađuju sedimentne, metamorfne i magmatske stijene paleozojske, mezozojske, paleogenske i neogenske starosti, a okolno područje izgrađuju kvartarni sedimenti (Slika 4.7). Medvednicu i ostatak zagrebačkog područja oblikovali su vrlo složeni geološki procesi. Početkom 2017. godine na gradilištu budućih novih zgrada Biološkog, Geološkog i Geografskog odsjeka (BGG) Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu obavljena su geomehanička ispitivanja i istražna bušenja u svrhu pronalaska geotermalnih voda (Karzić, 2017). U sklopu istraživanja bušeno je pet bušotina (slika 4.6) od kojih je u ovom radu korištena samo jedna, na slici 4.6 označena crvenom bojom, zato što je to jedina bušotina čija je jezgra do sada u potpunosti analizirana. Uzorci jezgre iz te bušotine ukazuju na to da se na samoj površini nalaze slojevi gline, a zatim sloj morene debljine 1 m. Ispod gornjeg sloja morene do dubine od 7 m je sivozelena glina, a zatim ponovno 1.5 m debeo sloj morene. Do 27 m javljaju se glineni slojevi te zatim ponovno sloj morene debeo 17m (T. Marjanac, 2018, osobna komunikacija). Uočavamo da se radi o "sendviču" morena i glinenih slojeva. Morena je sastavljena od 30% subglacijalne jezerske gline i 70% stijenske mase.



Slika 4.6: Satelitska snimka područja Zagrebačke terase i okolici zgrade BGG s označenim položajem bušotina. Crvenom bojom označena je bušotina čija je jezgra opisana do dubine od 44 m (T. Marjanac, 2018).



Slika 4.7: Isječak Osnovne geološke karte SFRJ, list Zagreb. Bijeli krug označava položaj zgrade Geofizičkog odsjeka (preuzeto i prilagođeno iz Šikić i sur., 1972).

## **4.1 Prethodna mjerenja na zgradi**

Prva mjerenja kojima su određeni dinamički parametri zgrade Geofizičkog odsjeka napravljena su 2008. Jedini rad u kojem su objavljena mjerenja slobodnih oscilacija zgrade Geofizičkog odsjeka objavljen je 2009. godine (Herak i Herak, 2009). Osim tog publiciranog mjerenja nemira unutar zgrade, nije više bilo mjerenja, osim mjerenja koja su se obavljala zbog testiranja opreme. U tim se mjerenjima jasno vide vlastite frekvencije zgrade na  $4.3 \text{ Hz}$  (longitudinalni, uzdužni smjer) i  $5.5 \text{ Hz}$  (transverzalni, poprečni smjer). U travnju 2018. godine izvršena su mjerenja na ukupno 48 točaka unutar zgrade koja su izvršili djelatnici Građevinarskog fakulteta u Zagrebu. Rezultati njihovih mjerenja potvrdili su prethodno navedene vlastite frekvencije zgrade. Na temelju ovih mjerenja definirani su, osim dinamičkih parametara, modalni oblici (za osnovni translacijski mod duž uzdužnog i poprečnog smjera zgrade te torzijski mod), čime je dobiven uvid u dinamiku zgrade (S. Prevolnik, 2018, osobna komunikacija).



## 5 Metoda

U ovom su radu predstavljeni rezultati mjerenja mikroseizmičkog nemira unutar i izvan zgrade Geofizičkog odsjeka PMF-a u Zagrebu. Pomoću programa *Grilla* izračunati su spektri brzina triju komponenta nemira te HVSR spektar (Nakamura i Samizo, 1989). Nemir je mjeren na nekoliko različitih položaja unutar zgrade kako bi se provjerilo ponaša li se zgrada kao kompaktna cjelina budući da postoje pukotine koje ukazuju na mogući poprečni lom. Iz spektara brzina određene su vlastite frekvencije zgrade i uspoređene s HVSR spektrima.

### 5.1 Mjerni uređaj i program za obradu podataka

Mjerenja su izvršena instrumentom *Tromino* (Micromed, Italija) digitalnim tromografom, serijski broj uređaja 27. Radi se o prijenosnom instrumentu mase 1.1 kg i dimenzija  $10 \times 14 \times 7.7 \text{ cm}$  s ugrađenom baterijom. Kućište sadrži tri ortogonalna elektrodinamička senzora visoke rezolucije. Bilježi signal  $< 0.5 \mu V$  u frekvencijama uzorkovanja od 128 Hz. Podaci se spremaju u binarne datoteke kojima se pristupa pomoću programa *Grilla*. Uređaj podatke sprema u particije te je potrebno ručno zapisati broj particije i položaj na kojem je mjerenje odrađeno. Prije početka mjerenja, *Tromino* je potrebno iznivelirati pomoću male vodene vage na vrhu. *Tromino* dobro podnosi temperature u rasponu od  $-10^{\circ}C$  do  $70^{\circ}C$  i vlagu, ali je bitno napomenuti da, ukoliko je izložen Sunčevu zračenju, dolazi do zagrijavanja nožica na kojima stoji te može doći do nakrivljanja. Chandler i Liverly (2014) tvrde da vjetar brzine preko  $4,5 \text{ m/s}$  počinje interferirati s rezultatima te da ga je bitno odmaknuti od visokih objekata i stabala koje bi vjetar mogao značajno potaknuti na titranje. *Grilla* je interaktivan program prilagođen korisnicima i kompatibilan s *Windows 98/2000/NT/XP*. Prijenos podataka s uređaja vrlo je jednostavan: uređaj se kablom spoji na računalo, a *Grilla* samostalno generira grafove nakon što napravi *de-trending* podataka. Na slici 5.1 prikazan je mjerni uređaj postavljen na keramičku pločicu i izniveliran pomoću tri nožice na vijak. U slučajevima direktnog Sunčevog zračenja, uređaj je bio pokriven kartonskom kutijom pri čemu se pazilo da kutija i *Tromino* nisu u izravnom kontaktu.

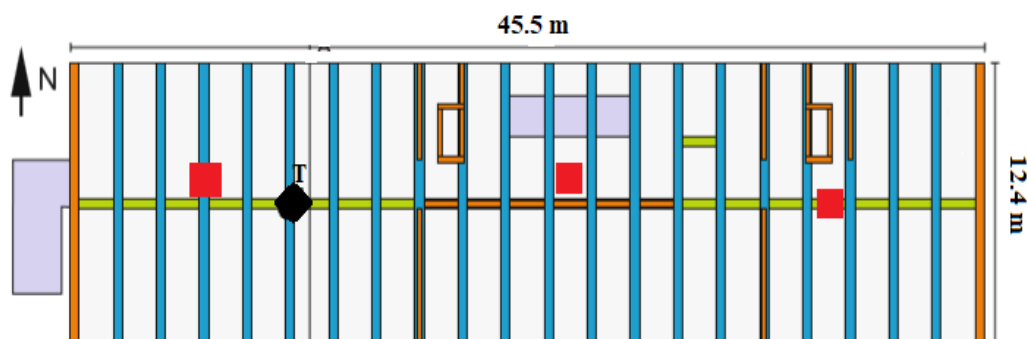


Slika 5.1: Tromino, uređaj za mjerenje seizmičkog nemira

## 5.2 Opis mjerenja

Mjerenja su vršena u zgradi Geofizičkog odsjeka u tri vruća i sunčana dana sredinom rujna 2018. godine na tri razine (podrum, prizemlje i prvi kat) u tri mjerene točke na svakoj etaži. Mjerenja na otvorenom izvedena su na sjevernoj (šest mjernih točaka) i južnoj strani zgrade (osam mjernih točaka). Sva mjerenja u unutrašnjosti zgrade izvedena su na istom položaju: istočni kraj zgrade, sredina zgrade (kod stubišta) te zapadni kraj zgrade. Uređaj je postavljan u smjeru istoka, odnosno u smjeru duže osi zgrade. Na slici 5.2 prikazan je položaj uređaja unutar zgrade, a na slici 5.4 vanjskih mjerenja te su u tablici 5.3 označena imena i koordinate točaka mjerenja. Sva mjerenja su obavljena istim uređajem, Tromino 27 (vlasništvo Geofizičkog odsjeka) zbog usporedivosti i homogenosti. Osnovni period titranja tla na nekoj udaljenosti od zgrade je pod utjecajem same zgrade. Zbog toga je mjereno nemir na različitim udaljenostima od zgrade da bi se procijenilo do koje udaljenosti zgrada utječe na osnovnu frekvenciju tla. Gueguen i sur. (2000) i Mucciarelli i sur. (2003) pokazali su da se osnovna frekvencija zgrade može detektirati na mjerenjima na otvorenom (engl. *freefield*) za vrijeme potresa što znači da se zgrada ponaša kao harmonički oscilator koji se istitrava nakon potresa i može doprinjeti oštećenju susjednih zgrada. Važno je naglasiti da su sva mjerenja izvođena pri istim vremenskim uvjetima. Neka mjerenja izvođena su u hladu, a neka na osunčanim dijelovima livade te je bilo potrebno

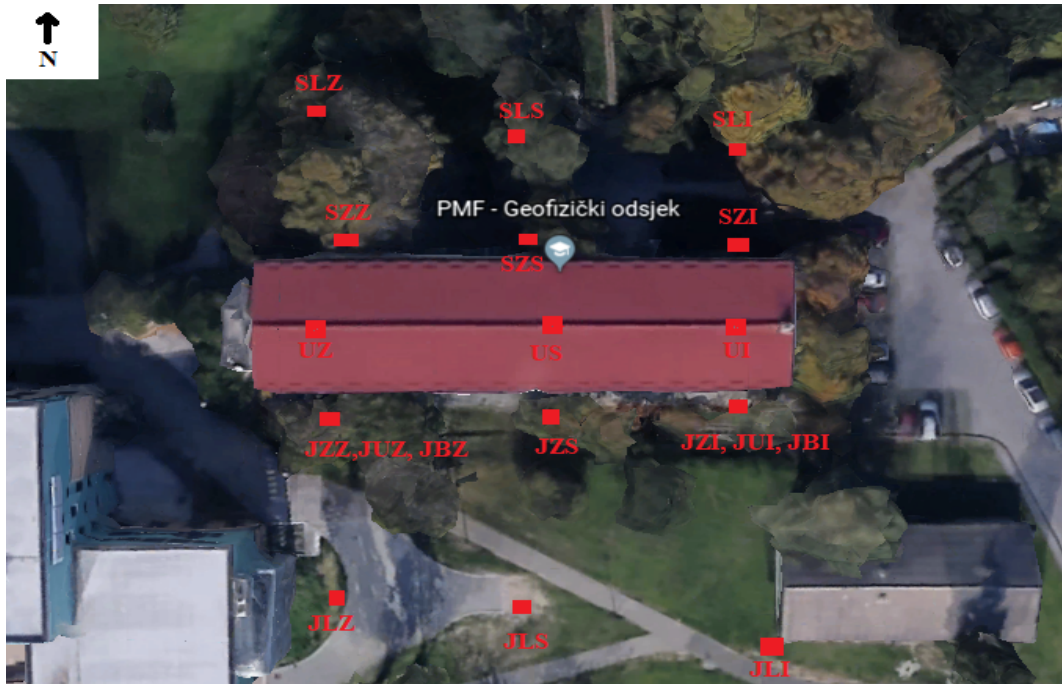
zaštiti uređaj od izravnog Sunčevog zračenja kartonskom kutijom. To su mjerenja u mjernim točkama: SLS, JZI, JZS, JLI, JLS, JLZ, JUI, JBI (slika 5.3).



Slika 5.2: Tlocrt zgrade Geofizičkog odsjeka PMF-a s označenim točkama mjerenja i procjenom položaja težišta (prema Herak, 2009).

| LOKACIJA I<br>PODLOGA        | MJERNA TOČKA |         | GEOGRAFSKA KOORDINATA |
|------------------------------|--------------|---------|-----------------------|
| Podrum, prvi i drugi<br>kat  | UI1,2,3      | Istok   | 45°49'37"N 15°59'13"E |
|                              | US1,2,3      | Sredina | 45°49'37"N 15°59'12"E |
|                              | UZ1,2,3      | Zapad   | 45°49'37"N 15°59'12"E |
| Sjeverna strana uz<br>zgradu | SZI          | Istok   | 45°49'37"N 15°59'13"E |
|                              | SZS          | Sredina | 45°49'37"N 15°59'12"E |
|                              | SZZ          | Zapad   | 45°49'37"N 15°59'11"E |
| Sjeverna strana<br>livada    | SLI          | Istok   | 45°49'38"N 15°59'13"E |
|                              | SLS          | Sredina | 45°49'38"N 15°59'12"E |
|                              | SLZ          | Zapad   | 45°49'38"N 15°59'11"E |
| Južna strana uz<br>zgradu    | JZI          | Istok   | 45°49'37"N 15°59'13"E |
|                              | JZS          | Sredina | 45°49'37"N 15°59'12"E |
|                              | JZZ          | Zapad   | 45°49'37"N 15°59'11"E |
| Južna strana livada          | JLI          | Istok   | 45°49'36"N 15°59'14"E |
|                              | JLS          | Sredina | 45°49'36"N 15°59'12"E |
|                              | JLZ          | Zapad   | 45°49'36"N 15°59'11"E |
| Južna strana<br>ukopano      | JUI          | Istok   | 45°49'37"N 15°59'13"E |
|                              | JUZ          | Zapad   | 45°49'37"N 15°59'12"E |
| Južna strana beton           | JBI          | Istok   | 45°49'37"N 15°59'13"E |
|                              | JBZ          | Zapad   | 45°49'37"N 15°59'12"E |

Slika 5.3: Mjerne točke: oznake i geografske koordinate.



Slika 5.4: Položaj mjernih točaka.

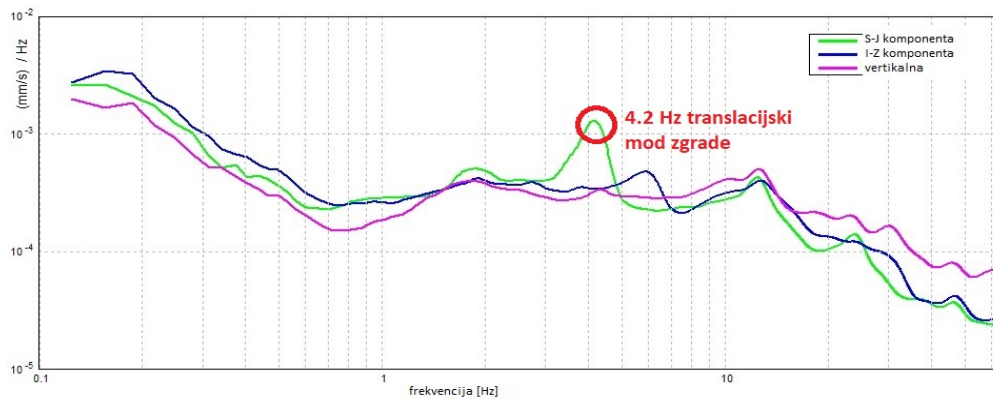
## 6 Mjerenja i rezultati

Ukupno su izvršena 23 mjerenja: devet unutar zgrade i 14 u njenom okolišu. Mjerne točke, njihove geografske koordinate i oznake koje će se koristiti u nastavku rada pri referiranju na pojedinu mjernu točku nalaze se na slici 5.3.

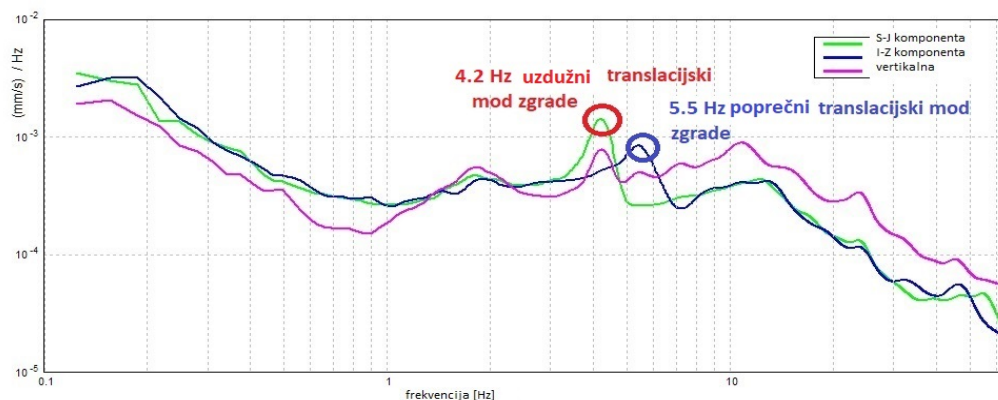
Iz mjerenja u zgradi određena su dva translacijska i jedan rotacijski mod. Frekvencije modova su:  $4.2 \text{ Hz}$  (vidljiv na komponenti gibanja S-J na slikama 6.1, 6.2),  $5.5 \text{ Hz}$  za translacijske (vidljiv na komponenti gibanja I-Z na slici 6.2) i  $6.2 \text{ Hz}$  za rotacijski mod (vidljiv na komponenti gibanja I-Z na slici 6.1). Uočavamo da je rotacijski mod vidljiv samo na mjerenju na istočnom kraju zgrade, a da ga mjerenja zapadne strane ne bilježe. Razlog tome je što se težište zgrade ne nalazi u njezinom geometrijskom središtu već je pomaknuto prema zapadu. Pomak težišta uzrokuje veće amplitude rotacijskog moda na istočnoj strani zgrade. Izvršena su i mjerenja u sredini zgrade, ali nisu prikazana jer su nas zanimale samo krajnje točke.

Budući da zgrada stalno oscilira, izmjeren je doseg tih oscilacija izvan zgrade. Zbog toga je mjeren nemir na tri profila poprečno na zgradu. Profili su prolazili kroz istočni i zapadni kraj zgrade te kroz sredinu. Na svakom profilu bile su četiri mjerne točke udaljene sjeverno od zgrade  $1.7 \text{ m}$  i  $12 \text{ m}$ , a južno  $6 \text{ m}$  i  $24 \text{ m}$ . Provjereno je vide li se ekstremi spektara na vlastitim frekvencijama zgrade. Na istočnom profilu (mjerne točke SLI, SZI, JZI, JLI) mjerne točke SZI i JZI udaljene  $3 \text{ m}$  od zgrade imaju uočljive ekstreme na  $4.2 \text{ Hz}$  što odgovara poprečnom translacijskom modu u smjeru sjever-jug (slike 6.5, 6.6). Na mjernoj točki JLI udaljenoj  $24 \text{ m}$  južno od zgrade maksimum je vrlo slabo uočljiv (slika 6.4), dok je na spektru točke SLI koja je na  $12 \text{ m}$  sjeverno od zgrade (slika 6.3) ekstrem na frekvenciji  $4.2 \text{ Hz}$  ima istu amplitudu kao i na  $24 \text{ m}$ .

## MJERENJA U ZGRADI



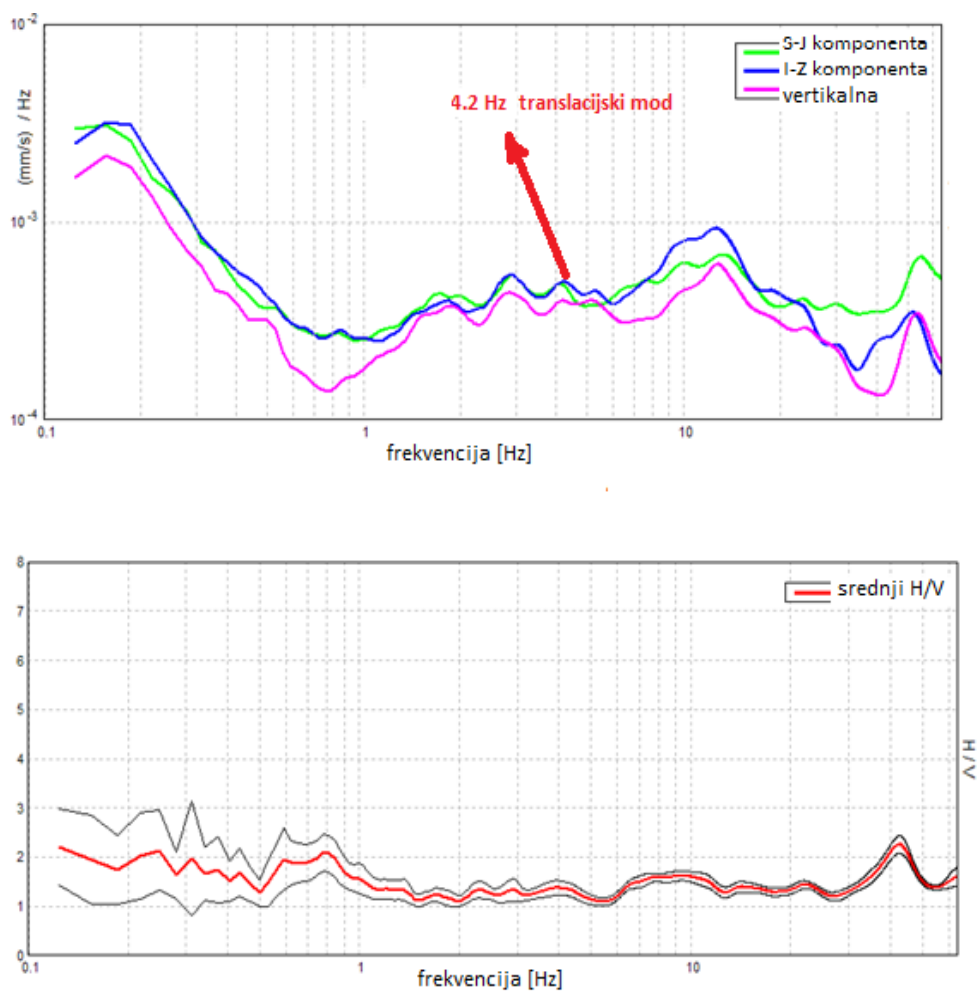
Slika 6.1: Spektar brzina. Mjerna točka UI1: komponente gibanja S-J, I-Z i vertikalna. Ekstrem u spektru komponente S-J na  $4.2\text{ Hz}$ . Ekstrem u spektru komponente I-Z na  $6.2\text{ Hz}$ .



Slika 6.2: Spektar brzina. Mjerna točka UZ1: komponente gibanja S-J, I-Z i vertikalna. Ekstrem u spektru komponente S-J na  $4.2\text{ Hz}$ . Ekstrem u spektru komponente I-Z na  $5.5\text{ Hz}$ .

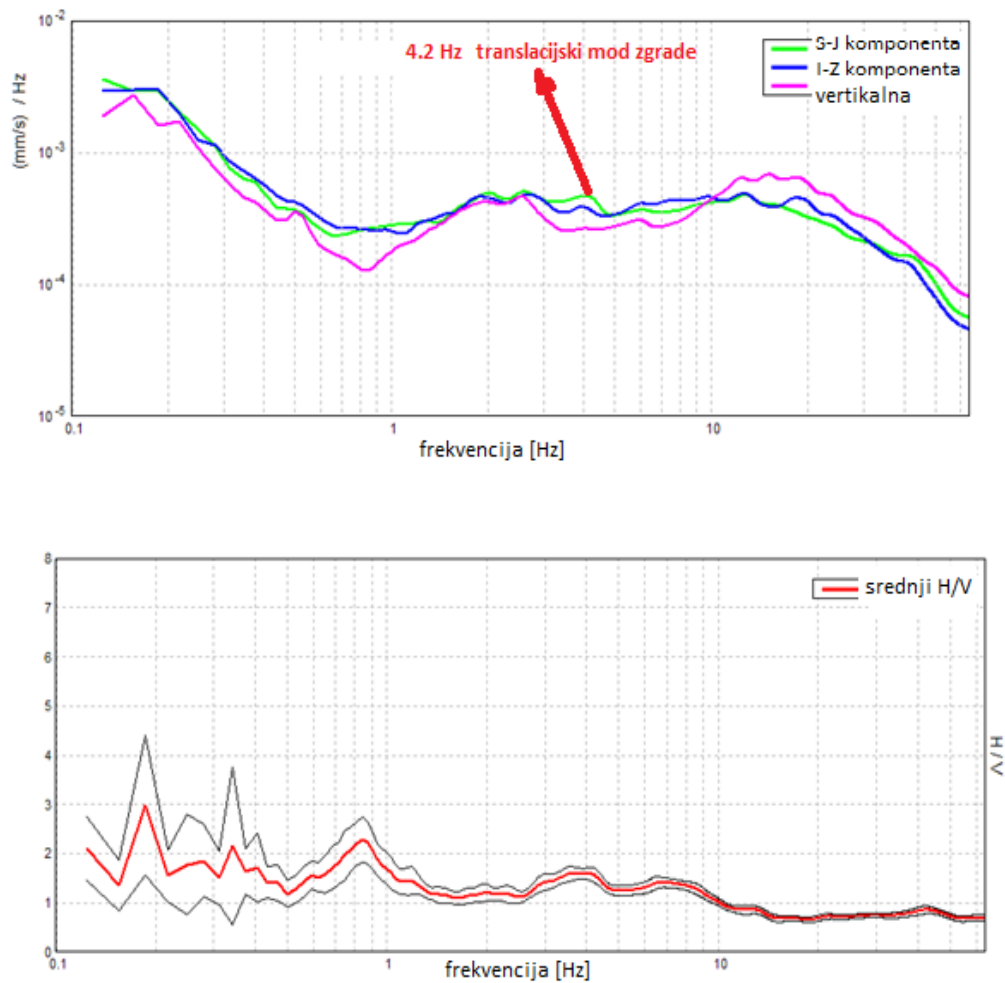
Ekstrem u spektru komponente S-J na  $4.2\text{ Hz}$  prikazan na slici 6.1 odgovara uzdužnom translacijskom modu zgrade, dok ekstrem u spektru I-Z na  $6.2\text{ Hz}$  odgovara rotacijskom modu zgrade. Na slici 6.2, ekstrem u spektru komponente S-J na  $4.2\text{ Hz}$  odgovara prvom, poprečnom, translacijskom modu zgrade, dok ekstrem u spektru komponente I-Z na  $5.5\text{ Hz}$  odgovara drugom, poprečnom translacijskom modu zgrade.

## PROFIL ISTOK



Slika 6.3: Spektar brzina i HVSr. Mjerna točka SLI: komponente gibanja S-J, I-Z i vertikalna. Ekstrem u spektru komponente S-J na 4.2 Hz slabo uočljiv.

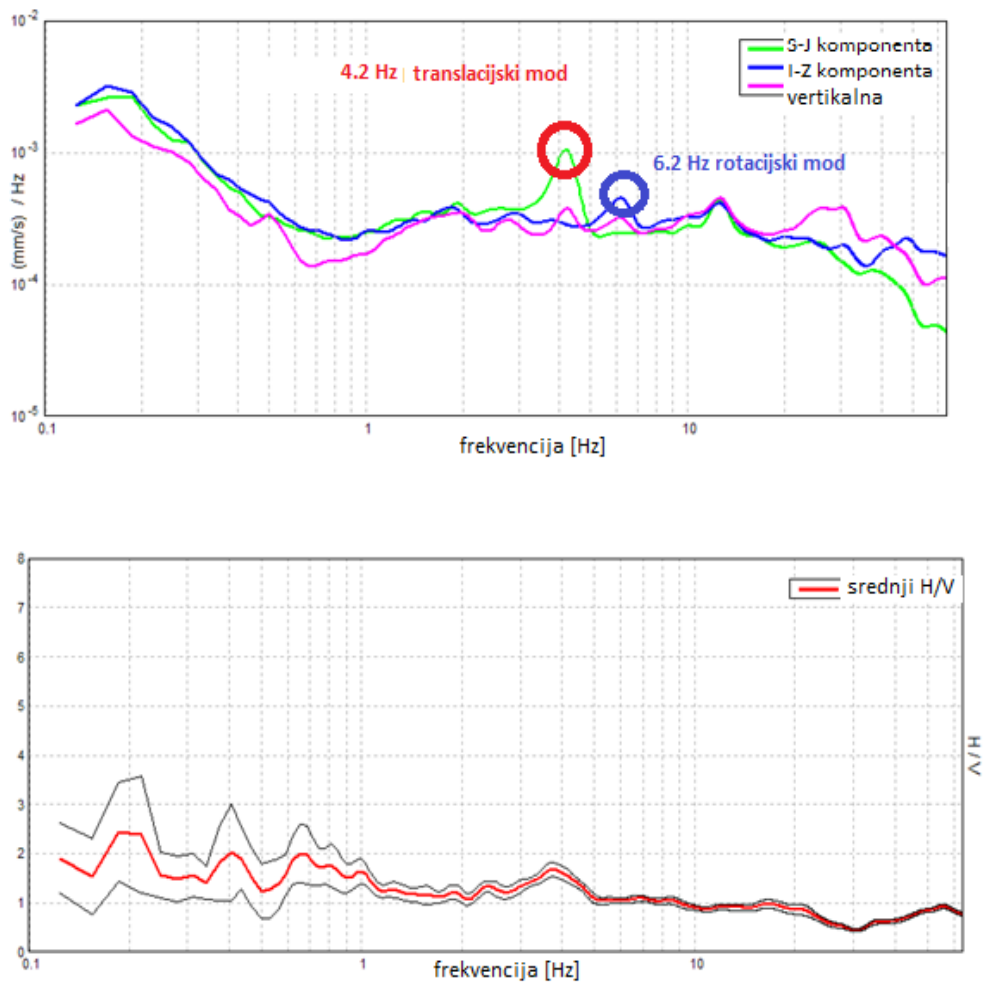




Slika 6.4: Spektar brzina i HVSR. Mjerna točka JLI: komponente gibanja S-J, I-Z i vertikalna. Ekstrem u spektru komponente S-J na 4.2 Hz slabo uočljiv.

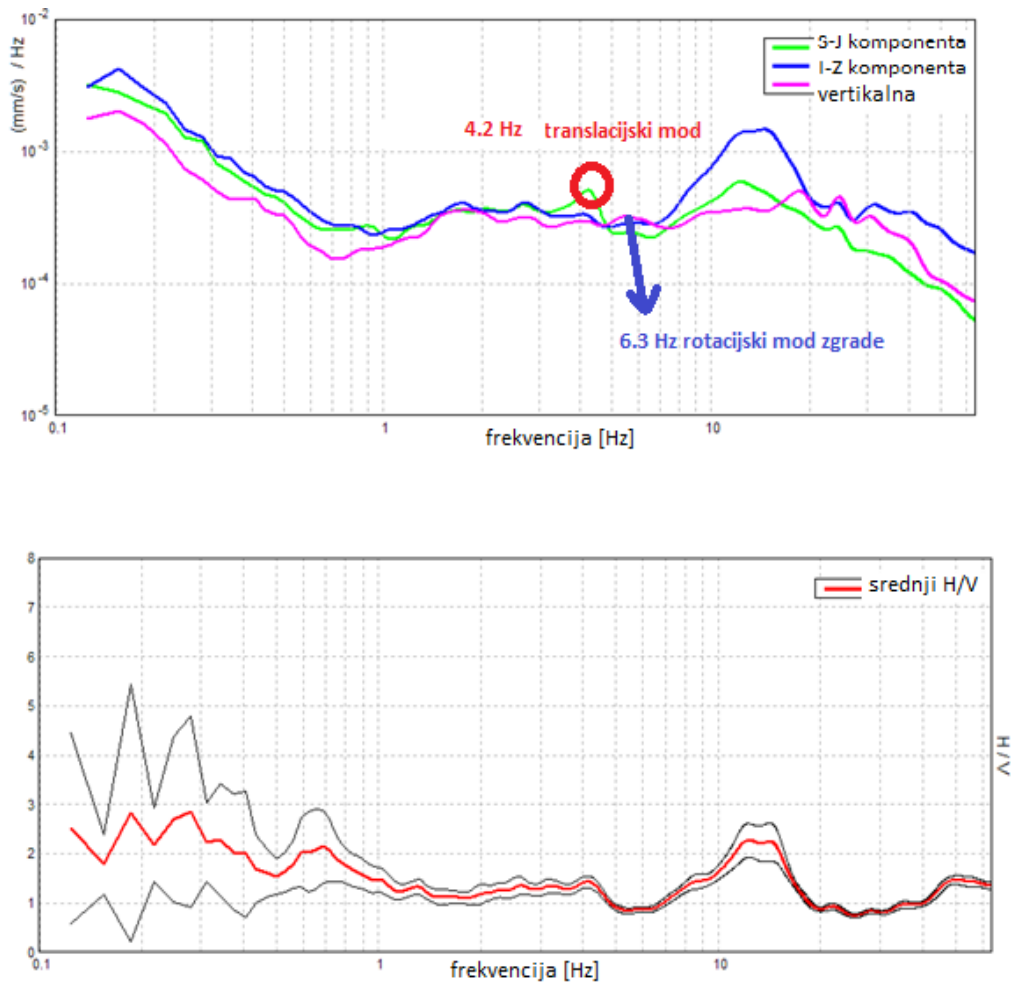
Ekstrem u spektru komponente S-J (uzdužni translacijski mod zgrade) na 4.2 Hz na slici 6.3 je slabo uočljiv (jednako na mjernoj točki JLI) te je amplitudom jednak mjerenju točke JLI. HVSR na frekvencijama titranja zgrade ne pokazuje mogućnost amplifikacije: na 4.2 Hz iznosi 1.2, na 5.5 Hz iznosi 1, a na 6.3 Hz  $HVSR = 1.5$  za mjernu točku SLI te 1.7 za mod 4.2 Hz te 1.5 za mod 6.2 Hz na mjernoj točki JLI.





Slika 6.5: Spektar brzina i HVSR. Mjerna točka SZI: komponente gibanja S-J, I-Z i vertikalna. Ekstrem u spektru komponente S-J na  $4.2\text{ Hz}$  te ekstrem u spektru komponente I-Z na  $6.2\text{ Hz}$ . Ekstrem HVSR-a nalazi se na frekvenciji od  $3.8\text{ Hz}$ .

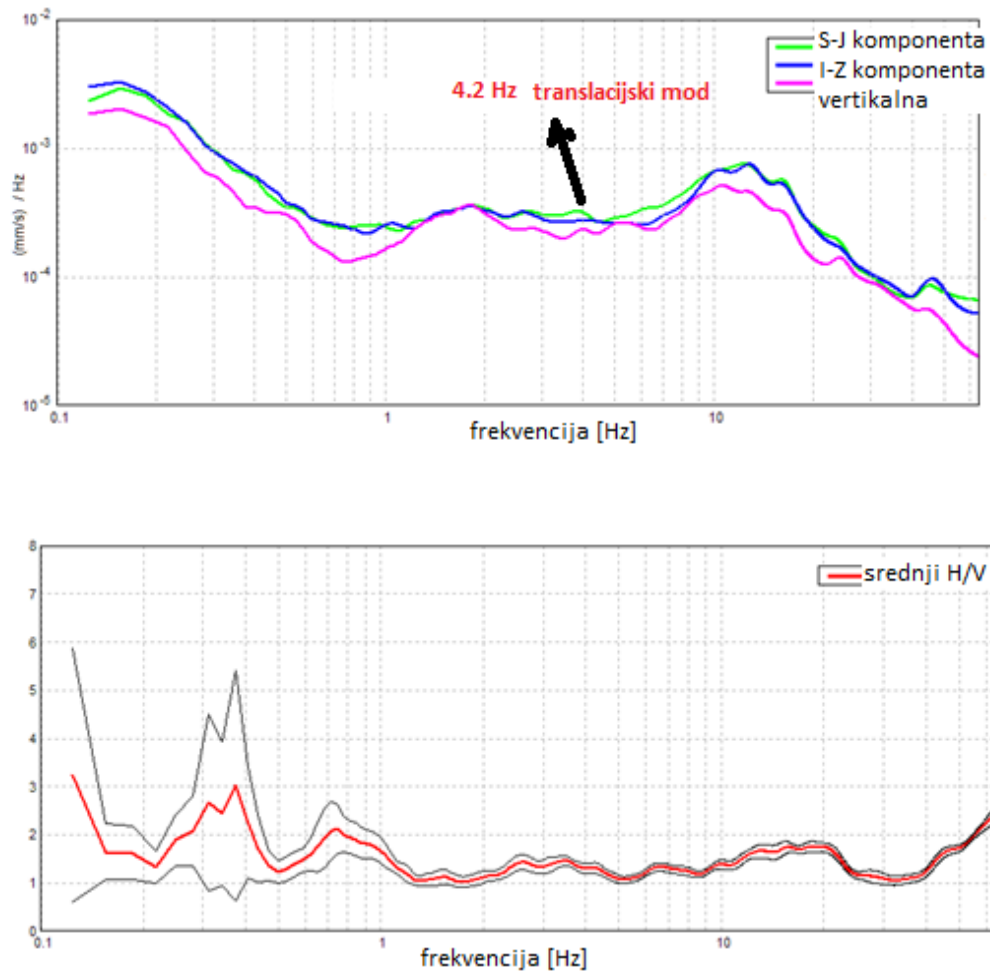
Na slici 6.5 ekstrem u spektru komponente S-J na  $4.2\text{ Hz}$  odgovara uzdužnom translacijskom modu zgrade, a ekstrem u spektru komponente I-Z na  $6.2\text{ Hz}$  rotacijskom modu. Ekstrem HVSRa nalazi se na frekvenciji od  $3.8\text{ Hz}$  što je manje od frekvencije titranja zgrade te ne postoji opasnost od amplifikacije. Uočeno je da je rotacijski mod zgrade zabilježen samo na istočnoj mjernoj točki zbog ranije spomenutog pomaka težišta zgrade prema zapadu.



Slika 6.6: Spektar brzina i HVSR. Mjerna točka JZI: komponente gibanja S-J, I-Z i vertikalna. Ekstrem u spektru komponente S-J na  $4.2 \text{ Hz}$  te slabo uočljiv ekstrem u spektru vertikalne komponente na  $6.3 \text{ Hz}$ . Na frekvenciji  $4.2 \text{ Hz}$  HVSR iznosi 1.2.

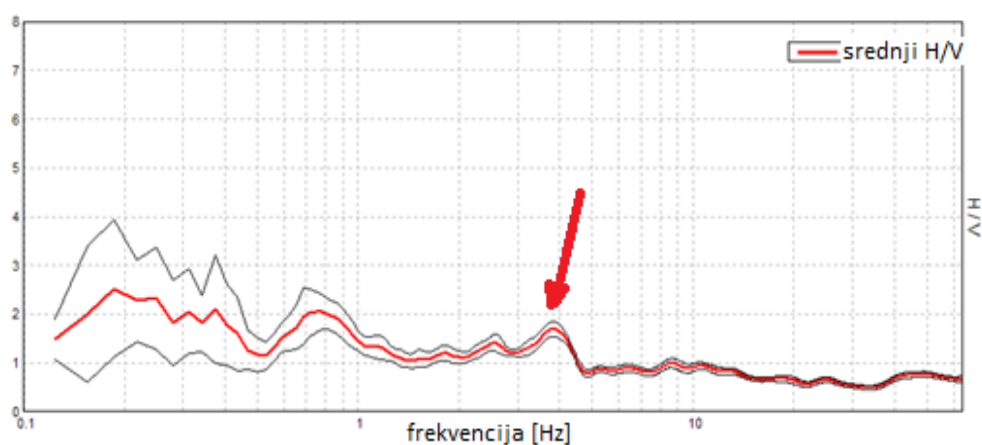
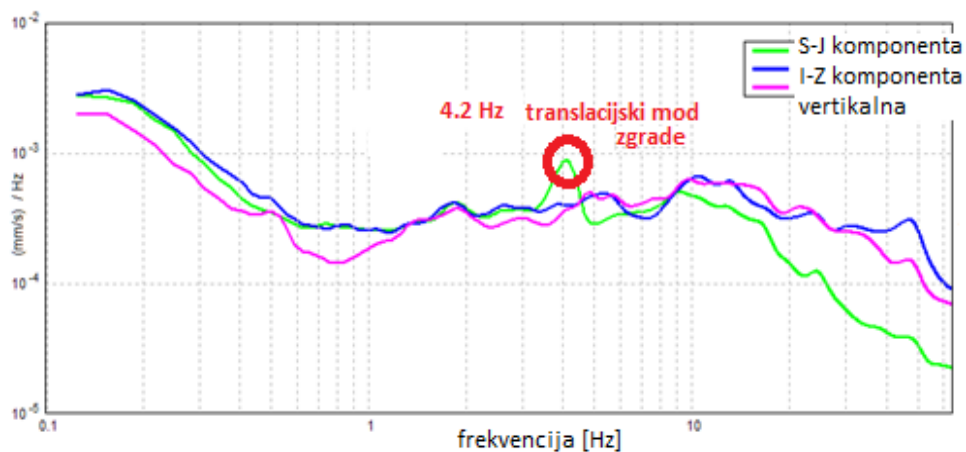
Na mjernoj točki JZI (slika 6.6) ekstrem u spektru komponente S-J ponovno se javlja na  $4.2 \text{ Hz}$  i odgovara uzdužnom translacijskom modu zgrade. Slabije uočljiv ekstrem u spektru vertikalne komponente na  $6.3 \text{ Hz}$  odgovara rotacijskom modu zgrade. Na frekvenciji  $4.2 \text{ Hz}$  HVSR iznosi 1.2 te ne ukazuje na mogućnost amplifikacije.

## PROFIL ZAPAD



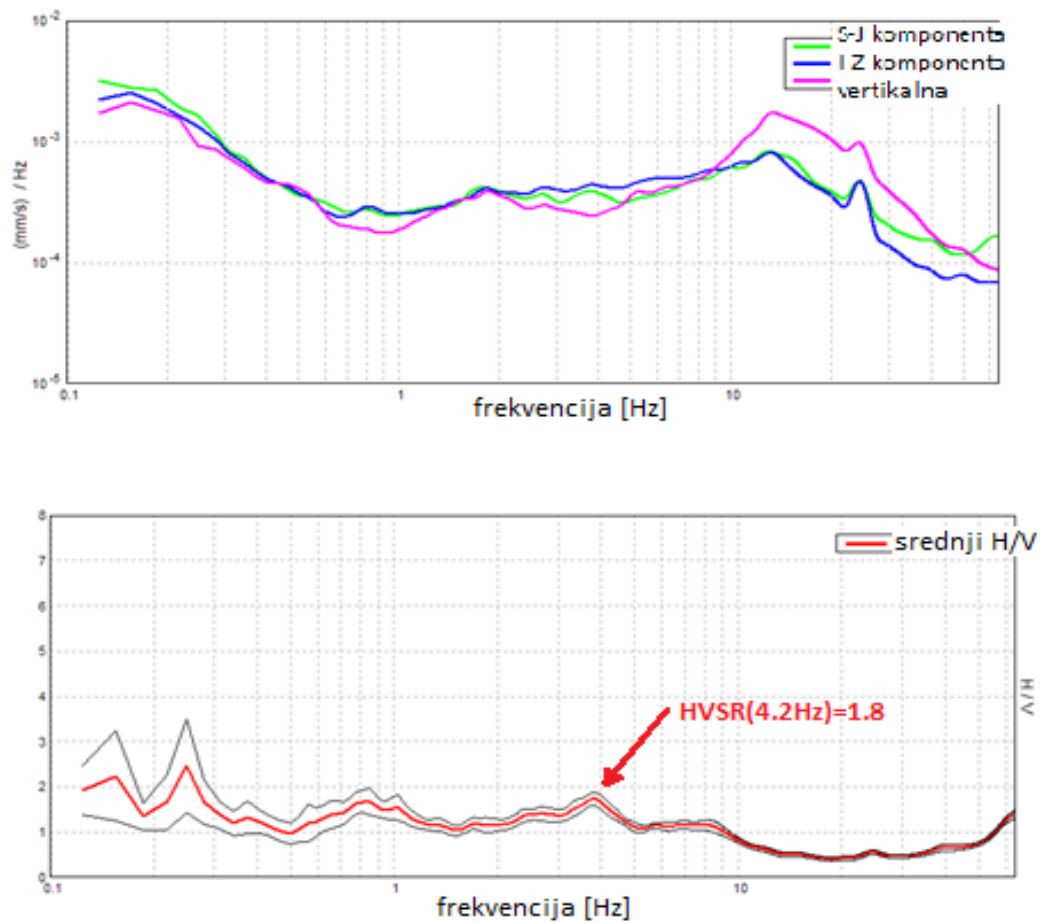
Slika 6.7: Spektar brzina i HVSR. Mjerna točka SLZ: komponente gibanja S-J, I-Z i vertikalna. Slabo vidljiv maksimum komponente S-J oko 4 Hz.

Na slici 6.7 maksimum komponente S-J oko 4 Hz je slabo uočljiv jer se mjerna točka nalazi na većoj udaljenosti od zgrade. HVSR nema ekstreme na frekvencijama titranja zgrade te ne ukazuje na mogućnost amplifikacije.



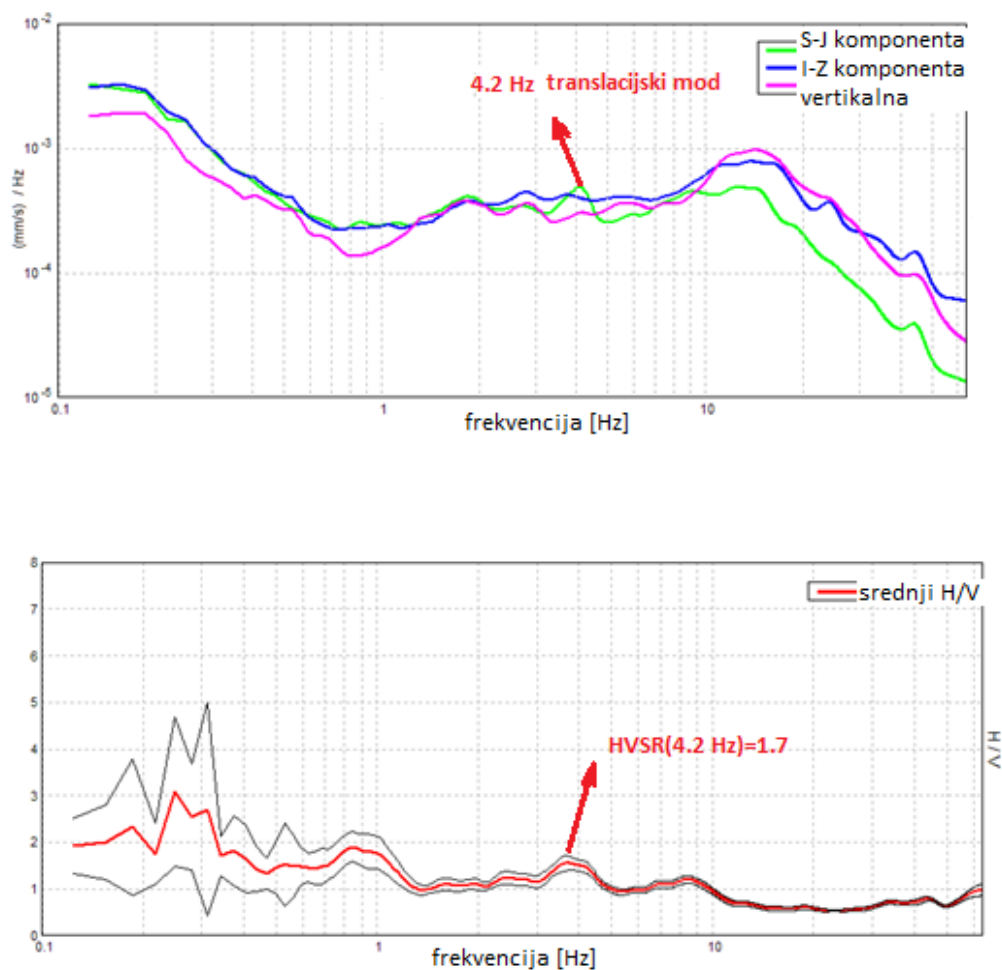
Slika 6.8: Spektar brzina i HVSR. Mjerna točka SZZ: komponente gibanja S-J, I-Z i vertikalna. Maksimum komponente S-J na  $4.2 \text{ Hz}$ . Ekstrem HVSR-a na  $4 \text{ Hz}$  iznosi 1.8.

Na slici 6.8 prikazana je mjerna točka SZZ na kojoj je ponovno slabo vidljiv maksimum komponente gibanja S-J na  $4.2 \text{ Hz}$  koji predstavlja uzdužni translacijski mod zgrade. Na toj frekvenciji ekstrem HVSR-a iznosi  $1.8 \text{ Hz}$  što ukazuje na malu mogućnost amplifikacije te moguću opasnost po stabilnost zgrade.



Slika 6.9: Spektar brzina i HVSr. Mjerna točka JLZ: komponente gibanja S-J, I-Z i vertikalna. Maksimum na 4.2 Hz nije izražen. Ekstrem HVSr-a na 4 Hz iznosi 1.8.

Mjerna točka JLZ nalazi se na većoj udaljenosti od zgrade odsjeka te na njoj nije jasno vidljiv nijedan od osnovnih modova zgrade. Ipak, ekstrem HVSr-a na frekvenciji oko 4 Hz iznosi 1.8 i ukazuje na malu mogućnost amplifikacije na frekvenciji titranja zgrade.



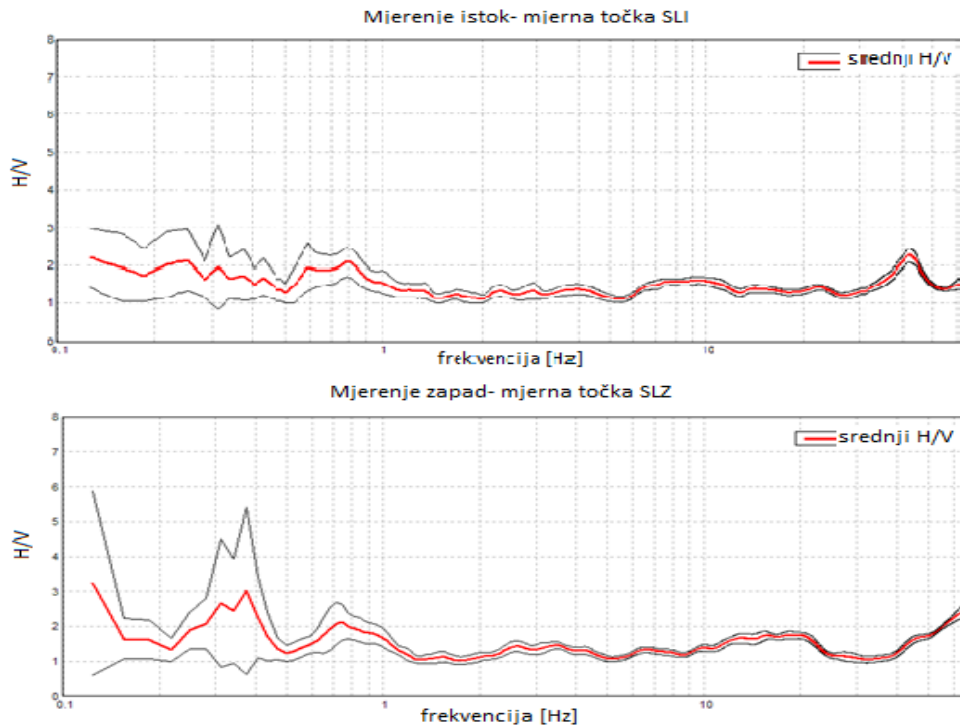
Slika 6.10: Spektar brzina i HVSr. Mjerna točka JZZ: komponente gibanja S-J, I-Z i vertikalna. Slabo vidljiv maksimum na 4.2 Hz. Ekstrem HVSr-a javlja se na nešto nižoj frekvenciji iznosi 1.7.

Slabije vidljiv maksimum na S-J komponenti gibanja mjerne točke JZZ (slika 6.10) na 4.2 Hz odgovara uzdužnom translacijskom modu zgrade. Na nešto nižoj frekvenciji javlja se i ekstrem HVSr-a iznosa 1.7 koji ukazuje na manju mogućnost amplifikacije tla na frekvencijama bliskim osnovnoj frekvenciji titranja zgrade.

Iz izračunatih spektara brzina i HVSr omjera na raznim udaljenostima uz istočni i zapadni rub zgrade Odsjeka tražena je udaljenost na kojoj slobodne oscilacije zgrade ne utječu na sami HVSr omjer. Grafovi jasno pokazuju kako amplitude HVSr-a opadaju udaljavanjem od zgrade, što je više uočljivo na zapadnom profilu (odnos HVSr-a mjernih točaka SLZ i SZZ, slika 6.7, 6.8). Maksimalni iznos HVSr-a je 1.8 što ukazuje na malu mogućnost amplifikacije.

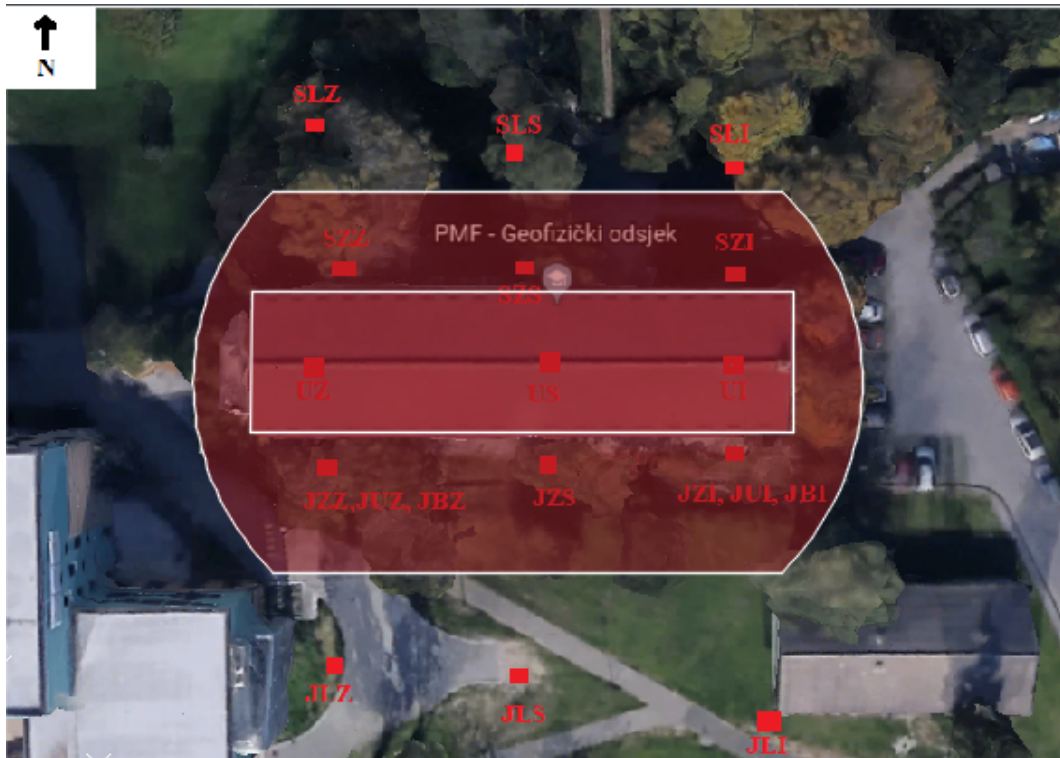
Na udaljenosti 24 m od zgrade za istočnu i zapadnu stranu zgrade, uočeno je da su amplitude HVSr-a približno jedan te da praktički nema utjecaja podloge na

zgradu na osnovnim frekvencijama zgrade (slika 6.11). Na ovim udaljenostima više se ne osjeća utjecaj zgrade na okolno tlo. Za potrebe ilustracije ovog slučaja (slika 6.12) uzeli smo udaljenost od 12 m za granicu utjecaja zgrade na tlo, u skladu sa zaključcima detaljnije analize profila (slika 6.13).

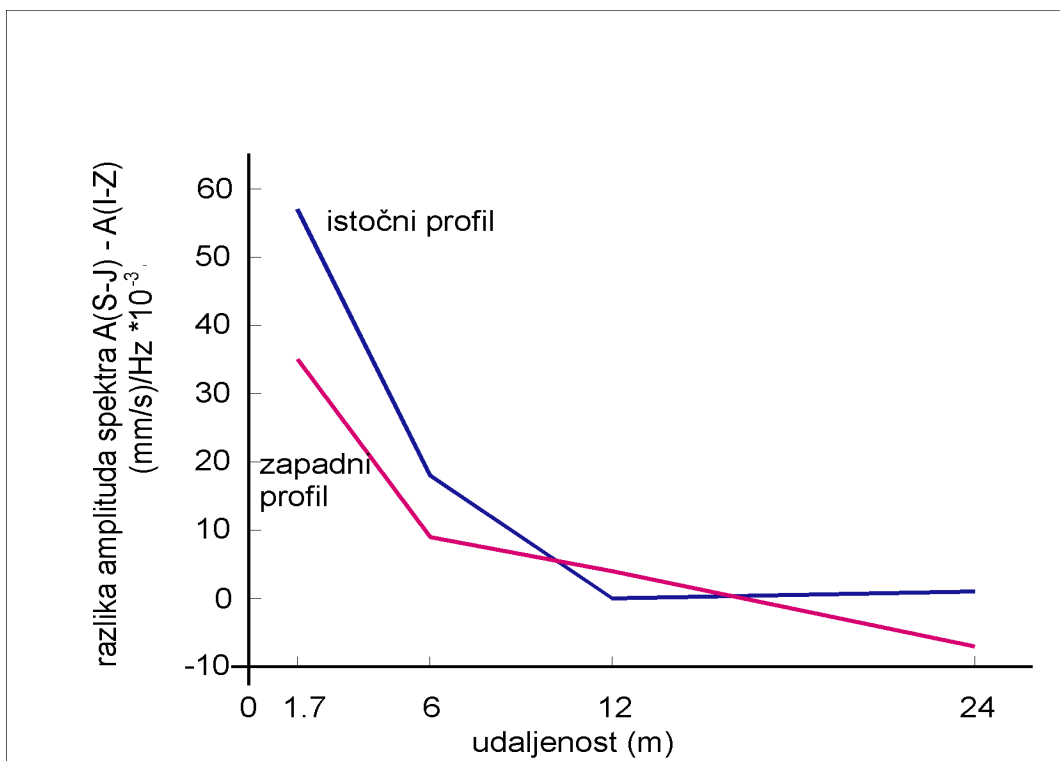


Slika 6.11: HVSR za istočnu i zapadnu stranu zgrade. Na osnovnim frekvencijama zgrade 4.2, 5.5 i 6.2 Hz vrijednosti HVSR-a su oko jedan što ne ukazuje na mogućnost amplifikacije.

Na slici 6.13 je prikazana detaljnija analiza profila istok i zapad s obzirom da je težište zgrade pomaknuto prema zapadu te da se veće amplitude vide na istočnom profilu.



Slika 6.12: Područje na kojem se osjeća utjecaj zgrade Geofizičkog odsjeka prikazano je crvenom ispunom.



Slika 6.13: Razlike amplituda horizontalnih komponenata u smjeru sjever-jug i istok-zapad (smjer pružanja zgrade) za profile istok i zapad. Na osi  $x$  označene su udaljenosti mjernih točaka od zgrade Odsjeka. Na osi  $y$  prikazane su relativne vrijednosti razlika amplituda spektara komponenti S-J i I-Z.



Uočeno je da su amplitude veće na istoku, ali i da brže trnu: utjecaj zgrade prestaje na 12 *m* udaljenosti gdje je vidljivo da je razlika amplituda spektara nula. Kod zapadnog profila razlika sporije trne pa se nula javlja malo kasnije, na cca 16 *m*, gdje se utjecaji na oba grafa i izjednače. Amplitude su veće na istočnoj strani zgrade iz razloga što mjerna točka, osim translacijskog moda zgrade, bilježi i rotacijski mod jer je težište zgrade pomaknuto prema zapadu. Na istočnoj strani su komponente S-J i I-Z jednake na udaljenosti od 12 *m*. Na oba grafa do prvih 6 *m* utjecaj drastično pada, a nakon 12 *m* više nije vidljiv.

Na spektrima brzina svih mjerenja javljaju se samo tri otprije poznate vlastite frekvencije zgrade što dovodi do zaključka da se zgrada ponaša kao cjelina, tj. da pukotine nisu dovele do razdvajanja zgrade u dva dijela kako je pretpostavljeno. Također, izračuni HVSR-a pokazali su da slojevi iznad osnovne stijene praktički ne amplificiraju valove koji dolaze na osnovnu stijenu jer su vrijednosti HVSR-a oko 1, osim na točkama SZZ i JLS gdje bilježi nešto veću vrijednost 1.8 te ukazuje na malu mogućnost amplifikacije. Ovim radom tako je prikazan dio procjene rizika za zgradu Geofizičkog odsjeka koji se odnosi na mogućnosti amplifikacije potresnih valova u površinskom dijelu iznad osnovne stijene te njihov prijenos na zgradu.

## 7 Zaključak

Istraživanjem je pokazano da zgrada Geofizičkog odsjeka PMF-a u Zagrebu ima tri osnovna moda titranja: dva translacijska i jedan rotacijski. Potvrđeni su već poznati modovi na frekvenciji oko  $4,2 \text{ Hz}$  i  $5,5 \text{ Hz}$  te je ustanovljen i torzijski mod na frekvenciji od  $6,2 \text{ Hz}$ . Jedna od pretpostavki je bila da je uslijed slijeganja zapadnog kraja zgrade došlo do pucanja objekta na dva dijela, no to u ovom radu nije potvrđeno. U ovom slučaju, zgrada Odsjeka za geofiziku nije ugrožena zbog moguće amplifikacije tla (slika 6.11) jer se vrijednosti izračunatih HVSR-ova kreću u vrijednostima oko 1. Nije preporučljivo raditi sva mjerenja samo u zgradi na različitim katovima, već su potrebna i vanjska mjerenja. Također, izuzetno je važno iskustvo mjeritelja kod odabira mjernih točaka u samoj zgradi u odnosu na njezino težište jer nisu svi modovi titranja zgrade vidljivi na jednoj mjernoj točki. Utjecaj zgrade na okoliš osjeti se do udaljenosti  $12 \text{ m}$ , stoga nije preporučeno raditi mjerenja na otvorenom na udaljenostima manjim od jedne visine zgrade oko koje mjerimo zbog utjecaja zgrade na mjerenja. Uočena je i razlika u amplitudi titranja na krajevima zgrade: istočni kraj pokazao je veće vrijednosti. U daljnjim istraživanjima moguće je temeljitije odrediti mogući utjecaj zgrade Geofizičkog odsjeka na zgradu Instituta za fiziku te zgradu Matematičkog odsjeka PMF-a i obratno. Ukoliko bi došlo do gradnje novih objekata u prostoru oko zgrade Odsjeka, preporuča se ponoviti mjerenja jer može doći do promjene u osnovnoj frekvenciji, kako zgrade, tako i tla u njenom okolišu.

## Literatura

- Arai, H.; Tokimatsu, K.: *S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum*, Bulletin of the Seismological Society of America, 2004.
- Bard, P.Y.: *Microtremor measurements: A tool for site effect estimation*, Balkema, Rotterdam, 1999.
- Bisch, P., Carvahlo, E., Degee, H., Fajfar, P., Fardis, M., Franchin, P., Kreslin, M., Pecker, A., Pinto, P., Plumier, A., Somja, H., Tsionis, G.: *Eurocode 8: Seismic Design of Buildings Worked examples*, JRC Scientific and Tehnical Reports, <http://www.jrc.ec.europa.eu/>, 2012.
- Buech, F.; Davies, T.R.; Pettinga, J.R.: *The Little Red Hill Seismic Experimental Study: Topographic Effects on Ground Motion at a Bedrock-Dominated Mountain Edifice*, Bulletin of the Seismological Society of America, 2010.
- Bonnefoy-Claudet, S.; Cotoon, F.; Bard, P.Y.: *The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review*, Earth-Science Reviews, 2006.
- Chandler, V.W., Lively, R.S.: *Evaluation of the horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSr) passive seismic method for estimating the thickness of Quaternary deposits in Minnesota and adjacent parts of Wisconsin*, Minnesota Geological Survey, 2014.
- Chouet, B.; De Luca, G.; Milana, G.; Dawson, P.; Martini, M.; Scarpa, R.: *Shallow velocity structure of Stromboli volcano, Italy, derived from small-aperture array measurements of Strombolian tremor*, Bulletin of the Seismological Society of America, 1998.
- Demuth, A.; Ottemoller, L.; Keers, H.: *Ambient noise levels and detection threshold in Norway*, Journal of Seismology, Springer, 2016.
- Elghazouli, A.Y.: *Seismic design of buildings to Eurocode 8*, Spoon Press New York, 2009.
- Field, E.H.; Jacob, K.: *The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise*, Geophysical Research Letters 20, 1993.
- Field, E.H.; Jacob, K.A.: *Comparison and test of various site-response estimation techniques including three are not reference-site dependent*, Bulletin of the Seismological Society of America, 1995.

Gallipoli, M.R.; Mucciareli, M; Arcieri, M.; Lapena, V.: *Stability of HVSR from earthquakes and microtremors*, XVIII Assembly of ESC, Lisbon, 2000.

Gallipoli, M.R.; Mucciareli, M; Castroc, R.R.; Monachesid, G.; Contrie, P.: *Structure, soil-structure response and effects of damage based on observations of horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremors*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24, 2004.

Gorjanović-Kramberger, D.: *Geologijska pregledna karta kraljevine Hrvatske Slavonije*, Tumač geologijskoj karti Zagreb (zona 22, col. XIV), 1-75., 1908.

Gosar, A.: *Microtremor HVSR study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes*, Engineering Geology, 2007.

Gueguen, P.; Bard, P.Y.; Oliveira, C.S.: *Experimental and numerical analysis of soil motion caused by free vibration of a building model*, Bulletin of the Seismological Society of America, 2000.

Herak, M.: *Interna skripta iz kolegija Inženjerska seizmologija*, Geofizički odsjek, Zagreb, 2016.

Herak, M.: *Hrvatska karta potresne opasnosti- kako je nastala i kako dalje?*, [http : //www.kartografija.hr/tl/files/Hkd/dogadja.ji/HKD2012MHerak.pdf](http://www.kartografija.hr/tl/files/Hkd/dogadja.ji/HKD2012MHerak.pdf), datum pristupa 2.10.2018.

Herak, M.; Herak, D.: *Continuous monitoring of dynamic parameters od the DGFMSM building (Zagreb, Croatia)*, Springer, 2009.

Herak, M.: *Overview of recent ambient noise measurements in Croatia in free-field and in buildings*, Geofizika, Zagreb, 2011.

Ivšić, T.: *Seizmičko geotehničko inženjerstvo*, Građevinski fakultet Zagreb, Geotehnika, <https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Predavanja2>, datum pristupa 23.9.2018.

Kanai, K.: *Engineering seismology*, Tokyo: University of Tokyo Press, Tokyo, 1983.

Kanai, K.; Osada, K.; Yoshizawa, S.: *Observational study of Earthquake Motion in the Depth of the Ground*, Earthquake Research Institute, 1954.

Karzić, D.: *Kvatarni sedimenti i njihov nastanak u središnjem dijelu "Zagrebačke terase"*, *Analiza jezgre s lokacije BGG Zgrade na Horvatovcu*, Diplomski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet Zagreb, Geološki odsjek, Zagreb, 2017.

Kraus, I.: *Spektri potresnog odziva plitko temeljenih konstrukcija na mekim tlima*, doktorski rad. Osijek, Građevinski fakultet, 2014.

Kvasnička, P.; Matešić, L.; Ivandić, K.: *Geotehical site classification and Croatian National Annex for Eurocode 8*, Geofizika, Zagreb, 2011.

Lachet, C.; Bard, P.Y.: *Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of the Nakamura's tehniqe*, Journal Physics of the Earth, 1994.

Mucciarelli, M.; Gallipoli, M.R.: *A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique*, Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata, 2001.

Mucciarelli, M.; Gallipoli, M.R.; Ponzo, F; Dolce, M.: *Seismic waves generated by oscillating building; analysis of relase test*, Soil Dynamic Engineering, 2003.

Nakamura, Y.; Samizo, M.: *Site effect evaluation of surface ground using strong motion records*, 20th JSCE Earthquake Symposium, (na japanskom) 1989.

Nakamura, Y.: *Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and it's applications*; The 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000.

Nakamura, Y.: *In the H/V spectrum; The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, 2008.

Nogoshi, M.; Igarashi, T.: *On the propagation characteristics of microtremors*, Journal of the Seismological Society of Japan, 1970.

Parolai, S.: *Investigation of site response in urban areas by using earthquake data and seismic noise*, New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2), Potsdam, 2012.

Pilar, Gj.: *Tragovi odledbe na podnožju Zagrebačke gore*, Rad Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti, Zagreb, 1877.

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

Satoh, T.; Kawase, H.; Matshusima, S.: *Differences between site characteristics obtained by microtremors, S-waves, P-waves and coda*, Bulletin of the Seismological Society of America, 2001.

Stanko, D.; Strelec, S.; Gazdek, M.; Filipović, A.; Kaniški, N.: *Procjena odziva tla mjerenjem mikroseizmičkog nemira u gradu Varaždinu*, Inženjerstvo okoliša, Varaždin, 2015.

Šumanovac, F. (2012): *Osnove geofizičkih istraživanja*. Rudarsko-geološko-

naftni fakultet, Zagreb.

Tromino data sheet: <http://www.tromino.it/download/trominodatasheet.pdf>, datum pristupa 24.9.2018.

Udwadia, F.E. ; Trifunac, M.D.: *Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California*, Bulletin of the Seismological Society of America, 1973.

Wirgin, A.; Bard, P.Y.: *Effects of Buildings on the Duration and Amplitude of Ground Motion in Mexico City*, Bulletin of Seismological Society of America, 1996.