

Promjena dinamičkih svojstava dvorca Trakošćan poslije zagrebačkog i petrinjskog potresa iz 2020. godine

Majurec, Anja

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:217:652233>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-30**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Anja Majurec

PROMJENA DINAMIČKIH SVOJSTAVA DVORCA
TRAKOŠĆAN POSLIJE ZAGREBAČKOG I
PETRINJSKOG POTRESA IZ 2020. GODINE

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA
SMJER: SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

Anja Majurec

Diplomski rad

**Promjena dinamičkih svojstava dvorca Trakošćan
poslije zagrebačkog i petrinjskog potresa iz 2020.
godine**

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Davor Stanko

Suvoditeljica diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Snježana Markušić

Zagreb, 2024.

Zahvaljujem voditelju diplomskog rada doc. dr. sc. Davoru Stanku i suvoditeljici izv. prof. dr. sc. Snježani Markušić na pomoći pri odabiru teme i izradi diplomskog rada. Hvala Vam na podršci, odličnoj komunikaciji i spremnosti odgovoriti na svako moje pitanje. Diplomski rad je izrađen u sklopu istraživačkog projekta "Procjena seizmičkog rizika građevina kulturne baštine u Hrvatskoj (IP-2020-02-3531)" voditeljice izv. prof. dr. sc. Snježane Markušić, financiranog od strane Hrvatske zaklade za znanost.

Zahvaljujem djelatnicima dvorca Trakošćan koji su nam omogućili provedbu potrebnih mjerenja.

Hvala mojim roditeljima koji su bili oslonac ovih godina, vjerovali u mene, bili strpljivi i puni razumijevanja.

Ovaj rad posvećujem mom bratu Svenu. Nadam se da si ponosan na svoju mlađu sestru.

Sažetak

Dvorac Trakošćan izgrađen je krajem 13. stoljeća kao osmatračka utvrda u obrambenom sustavu sjeverozapadne Hrvatske te je dio kulturne baštine Republike Hrvatske. Od 16. stoljeća pa sve do 2000. godine dvorac je nekoliko puta bio renoviran i nadograđivan. Zagrebački potres 22. ožujka 2020. godine, lokalne magnitude $M_L=5.5$, s epicentrom 7 kilometara sjeveroistočno od centra Zagreba i potres kod Petrinje 29. prosinca 2020. godine, lokalne magnitude $M_L=6.2$, uzrokovali su oštećenja na dvorcu Trakošćan. Cilj je diplomskog rada mjerenje ambijentalnih vibracija duž visine dvorca Trakošćan te usporedba dobivenih rezultata s mjerenjima provedenim prije potresa 2016. godine. Dinamička svojstva dvorca Trakošćan izračunata su uz pomoć neinvazivne metode omjera horizontalnog i vertikalnog spektra ambijentalnih vibracija, tj. HVSR metode (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Potvrđeno je smanjenje vlastite frekvencije tornja dvorca, drugog i prvog kata, na što su ukazivale pukotine na zidovima nastale nakon potresa 2020. godine. Dvorac Trakošćan nema zadovoljavajuću krutost i post-potresnu deformabilnost te iz tog razloga ne uspijeva odgovoriti adekvatno na seizmičku pobudu. Također, uspoređene su vlastite frekvencije drugog kata dvorca s frekvencijama lokalnog tla, izmjerenim oko dvorca, te je uočeno njihovo poklapanje, što može biti indikator potencijalne rezonancije tlo-dvorac. Ovaj rad može biti poticaj za instalaciju akcelerometara za kontinuirano mjerenje ambijentalnih vibracija i potencijalnih potresa unutar dvorca Trakošćan kako bi se omogućilo kontinuirano praćenje dinamičkih svojstava samog dvorca.

Ključne riječi: dvorac Trakošćan, zagrebački potres, potres kod Petrinje, ambijentalne vibracije, HVSR metoda.

Changes in the dynamic properties of the Trakošćan Castle after the Zagreb and Petrinja earthquakes in 2020

Abstract

Trakošćan Castle was built at the end of the 13th century as an observation fort in the defense system of northwestern Croatia. The cultural heritage of the Trakošćan Castle is protected as historical entity by the Republic of Croatia. From the 16th century until the year 2000, the Castle was renovated and upgraded several times. The Zagreb earthquake on 22 March 2020 of local magnitude $M_L=5.5$, with an epicenter 7 kilometers northeast of the city centre and the Petrinja earthquake on 29 December 2020 of local magnitude $M_L=6.2$, caused damage to Trakošćan Castle. The aim of the thesis was to measure ambient vibrations along the height of the Trakošćan Castle and compare to pre-earthquakes measurements from 2016. The dynamic properties of the Trakošćan Castle were calculated using horizontal to vertical spectral ratio method (HVSr). The decrease in natural frequency of the Castle's tower, second and first floor was revealed. The natural frequencies of the Castle's second floor were compared with the frequencies measured around the Castle and imply the existence of possible soil-structure resonance. The Trakošćan Castle doesn't have satisfactory rigidity and post-earthquake deformability and for this reason it can't respond properly to seismic excitation. This work can be an incentive to install accelerometers for continuous ambient vibrations measurements and potential earthquakes inside the Trakošćan Castle in order to enable continuous monitoring of the dynamic properties of Castle.

Keywords: Castle Trakošćan, Zagreb earthquake, Petrinja earthquake, ambient vibration measurements, HVSr method.

Sadržaj

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Uvod | 1 |
| 2 | Dvorac Trakošćan | 3 |
| 2.1 | Geografski položaj dvorca | 3 |
| 2.2 | Povijest dvorca | 4 |
| 2.3 | Seizmičnost područja oko dvorca | 5 |
| 2.3.1 | Zagrebački potres 22. ožujka 2020. godine | 8 |
| 2.3.2 | Potres kod Petrinje 29. prosinca 2020. godine | 11 |
| 3 | Dinamička svojstva građevine | 14 |
| 3.1 | Lokalni uvjeti tla | 17 |
| 3.2 | Amplifikacijski spektar $AMP(\omega)$ | 19 |
| 4 | Mikroseizmički nemir | 24 |
| 4.1 | HVSR metoda | 24 |
| 4.1.1 | Povijesni pregled | 25 |
| 4.1.2 | Primjena HVSR metode | 26 |
| 5 | Podaci i metode | 28 |
| 5.1 | Mjerni uređaj Tromino Engy | 28 |
| 5.2 | Analiza mikroseizmičkog nemira u programu Grilla | 28 |
| 5.3 | Mjerenja ambijentalnih vibracija u dvorcu Trakošćan | 30 |
| 6 | Rezultati | 35 |
| 6.1 | Toranj | 35 |
| 6.2 | 1. kat | 37 |
| 6.3 | 2. kat | 39 |
| 7 | Diskusija | 43 |
| 8 | Zaključak | 51 |
| 9 | Literatura | 53 |

1 Uvod

Dvorac Trakošćan jedan je od najposjećenijih dvoraca u Republici Hrvatskoj te dio kulturne baštine, smješten na području Varaždinske županije. Izgrađen je krajem 13. stoljeća na vrhu hridi, okružen šumama koje ga čine izoliranim u krajoliku Hrvatskog zagorja (Smiljanić, 2023). Dvorac je izgrađen kao osmatračka utvrda u obrambenom sustavu sjeverozapadne Hrvatske s obzirom na povoljan položaj između Ptuja i bednjanske doline. Potres 16. ožujka 1982. godine, lokalne magnitude $M_L=4.5$, s epicentrom 20 kilometara od dvorca, u podnožju gore Ivanščice, uzrokovao je oštećenja na tornju dvorca i na drugom katu. Nakon toga uslijedila je renovacija i nadogradnja samog dvorca do kraja 2000. godine (Pintarić, 2006).

Zagrebački potres, 22. ožujka 2020. godine, lokalne magnitude $M_L=5.5$, s epicentrom 7 kilometara sjeveroistočno od centra Zagreba i potres u Petrinji, 29. prosinca 2020. godine, lokalne magnitude $M_L=6.2$, uzrokovali su ozbiljna oštećenja na dvorcu Trakošćan. U radu Markušić i sur. (2021) procijenjena je šteta u dvorcu nakon potresa. Za sve pukotine na vanjskim i unutarnjim zidovima, nastale nakon potresa, zapisana je duljina, širina, usmjerenje i položaj u dvorcu.

Kao posljedica potresa, strukturni elementi kod povijesnih građevina nisu više čvrsto povezani kao prije trešnje te se stvaraju mikropukotine u zidovima. Rezultati rada Celebi i sur. (2009) pokazuju da starije građevine, koje su oštećene u potresu, imaju niže vlastite frekvencije u odnosu na frekvencije prije potresa. Razlog je tomu smanjenje krutosti, odnosno struktura same građevine postaje mekša. U radu Letečki i sur. (2021) za simulaciju zagrebačkog potresa 22. ožujka 2020. godine (kasnije i za potres u Petrinji 29. prosinca 2020. godine) korišten je 3D model brzina i gustoća za područje središnje Hrvatske. Prikazan je utjecaj unutrašnje građe Zemlje i svojstva tla nekog područja na rasprostiranje potresnih valova. Rezultati pokazuju da u dolinama i nizinama valovi ostaju zarobljeni u mekšim sedimentnim naslagama, između površine i stijenske mase u podlozi te iz tog razloga dolazi do produljenog trajanja trešnje i povećanja amplitude valova. Također, na nekim dijelovima dolazi do kanaliziranja potresnih valova, čime se povećava jačina trešnje. U slučaju dvorca Trakošćan, koji se smjestio na brežuljku u čijem se podnožju nalaze aluvijalne naslage rijeke Bednje (Stanko i sur., 2016), potresni valovi ostaju zarobljeni u mekšim naslagama te se amplituda valova povećava, odnosno dolazi do kanaliziranja energije iz aluvija u brdo. Iz tog razloga, trešnja uzrokovana potresima u Zagrebu i Petrinji bila je produljena i pojačana u tom području te je uzrokovala oštećenja na samom dvorcu, iako se dvorac nalazi relativno daleko od epicentra potresa. Produljenje trešnje i smanjenje krutosti strukture može dovesti do velikih oštećenja, u nekim slučajevima i urušavanja građevine, osobito ako se frekvencija potresa izjednači s frekvencijom same građevine (Markušić i sur., 2021).

Cilj i motivacija diplomskog rada je mjerenje ambijentalnih vibracija duž visine dvorca Trakošćan nakon dva potresa, zagrebačkog potresa i potresa u Petrinji 2020. godine te usporedba s mjerenjima prije potresa, 2016. godine (Markušić i sur., 2021; Stanko i sur., 2016). Mjerenje ambijentalnih vibracija prije i poslije potresa, posebice u povijesnim građevinama poput dvorca Trakošćan, može pomoći u otkrivanju novih pukotina na zidu i kritičnih točaka dvorca. U radu Markušić i sur. (2021) uspoređena su mjerenja ambijentalnih vibracija prije (2016) i poslije potresa (2021), na kritičnim točkama dvorca, tornju i dvije pozicije na drugom katu. Rezultati pokazuju da su se frekvencije na tri kritične točke smanjile u odnosu na frekvencije prije potresa. Navedeno smanjenje

ukazuje na plastičnu deformaciju, odnosno postojanje pukotina na nosivim zidovima dvorca. Potencijalna rezonancija između frekvencija u dvorcu i frekvencija dobivenih mjerenjem mikroseizmičkog nemira u neposrednoj blizini dvorca Trakošćan može biti jedan od razloga nastalih oštećenja na zidovima. U radu Stanko i sur. (2016) provedena su mjerenja ambijentalnih vibracija izvan dvorca te u samom dvorcu Trakošćan nakon potresa 1982. godine. Usporedbom frekvencija zaključeno je da se vjerojatnost rezonancije tlo-građevina može opisati kao umjerena ili niska. Oštećenja nakon potresa nastala su zbog utjecaja lokalnog tla i loše konstrukcije te kasnije renovacije tornja dvorca.

U ovom su radu uspoređene vrijednosti vlastitih frekvencija drugog kata dvorca Trakošćan s mjerenjima provedenima 2016. godine u podnožju dvorca, na području aluvijalnih naslaga rijeke Bednje, te su uočeni mogući uvjeti za rezonanciju građevina-tlo. Prilikom određivanja vlastite frekvencije građevine korištena je neinvazivna HVSR metoda (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Nakamura i sur. (1999, 2000) opisali su određivanje vlastite frekvencije Kosog tornja u Pisi i Rimskog koloseuma iz mjerenja ambijentalnih vibracija pomoću HVSR metode.

2 Dvorac Trakošćan

2.1 Geografski položaj dvorca

Dvorac Trakošćan nalazi se na geografskim koordinatama 46.25917°N i 15.95000°E, u općini Bednja koja se nalazi u Varaždinskoj županiji. Udaljen je 12 kilometara sjeveroistočno od Krapine, a od Varaždina 30 kilometara jugozapadno. Izgrađen je na vrhu hridi, na nadmorskoj visini od 250 metara, kako je opisano u radu Smiljanić (2023). Smješten je na aluvijalnim naslagama rijeke Bednje, između gore Ivanščice, najviše gore Hrvatskog zagorja, i Ravne gore koja je ujedno i najsjevernija gora Hrvatskog zagorja.

S obzirom da je izgrađen na vrhu hridi, zbog svoje izoliranosti i okruženosti šumom, postao je osmatračka utvrda u obrambenom sustavu sjeverozapadne Hrvatske. Služio je kao utvrda za nadzor puta između Ptuja u Republici Sloveniji i bednjanske doline.

Dvor Trakošćan sastoji se od dvorca, građevina uz dvorac, park-šume s jezerom i perivoja (Slika 2.1).



Slika 2.1: Litografija trakošćanskog perivoja šezdesetih godina 19. stoljeća (L. Czerny). (izvor: web-stranica muzejske ustanove Dvor Trakošćan.)

Park-šuma je proglašena 1995. godine zaštićenim prirodnim područjem. Proteže se od jugozapadne do sjeveroistočne strane dvorca i prostire na oko 487 hektara. Park-šuma je jedan od najljepših parkova te je primjer romantičarskog perivoja iz 19. stoljeća. Do danas je očuvana gotovo u izvornom obliku (Slika 2.2). Osim autohtonih vrsta hrasta kitnjaka i običnog graba posađene su i egzotične vrste drveća, uvezene iz drugih zemalja.



Slika 2.2: Park-šuma dvorca Trakošćan očuvana gotovo u izvornom obliku. (izvor: web-stranica muzejske ustanove Dvor Trakošćan.)

U okviru romantičarske obnove dvorca Trakošćan izgrađena je brana sredinom 19. stoljeća te je nastala umjetna akumulacija, Trakošćansko jezero. Površine je 17 hektara te mu je najveća dubina oko 2.5 metra. Temperatura vode ljeti doseže i 22° C. U zimi se površina jezera zaleduje. Trakošćansko jezero prima vodu iz potoka Čemernica i ostalih potoka koji se slijevaju niz obronke okolnog gorja. Od samog nastanka jezero ima dvije funkcije: gospodarsku i estetsku. Kao ribnjak služi za sportski ribolov, a svojim izgledom upotpunjuje romantičarsku sliku perivoja. Voda iz jezera, iza brane, utječe u rijeku Bednju. Oko Trakošćanskog jezera uređena je poučna staza *Put vila* duga pet kilometara. (Stranice muzejske ustanove Dvor Trakošćan, (2023). [Internet], raspoloživo na: <https://trakoscan.hr/park-suma/>)

2.2 Povijest dvorca

Dvorac Trakošćan izgrađen je krajem 13. stoljeća kao osmatračka utvrda u obrambenom sustavu sjeverozapadne Hrvatske. Služio je za nadzor puta od Ptuja u Republici Sloveniji do bednjanske doline (Smiljanić, 2023). O podrijetlu imena postoje dvije legende. Prva govori da je dvorac Trakošćan dobio ime po tračkoj utvrđi (*arx Thacorum*) koja je postojala i u doba antike. Prema drugoj predaji, ime je dobio po vitezovima Drachenstein koji su gospodarili tim krajem u ranom srednjem vijeku. Ime Trakošćan prvi put se spominje 1334. godine u popisu župa (*ecclesia de Tracustian*). Središnji dio s dvorištem i tornjem smatra se najstarijim dijelom dvorca, kako je navedeno u radu Smiljanić (2023). U darovnici kralja Sigismunda, 1399. godine, prvi se put spominje Trakošćan kao osmatračka utvrda.

Od kraja 14. stoljeća vlasnici dvorca postaju grofovi Celjski, pod čijom vlasti je i cijela Zagorska grofovija. Također, nema zapisa o vlasnicima prije grofova Celjski. Nakon raspada Zagorske grofovije i nestanka loze grofova Celjski, njihovi su se posjedi raspodijelili između nekoliko gospodara. Kroz povijest, dvorac Trakošćan pripadao je vojskovođi Janu Vitovcu, Ivanišu Korvinu i njegovom podbanu Ivanu Gyulayu. Nakon izumiranja obitelji Gyulay dvorac Trakošćan, 1566. godine, postaje vlasništvo države. Kralj Maksimilijan II. Habsburgovac, kao nagradu za učinjene usluge, dvorac Trakoš-

čan, 1584. dodjeljuje obitelji Drašković. Dvorac je punih 400 godina bio u njihovom vlasništvu te su se prema njemu odnosili s "pažnjom dobrog domaćina" (Pintarić, 2006). Braća Ivan II i Petar Drašković 1592. godine sagradili su kulu što potvrđuje grb i natpis obitelji.

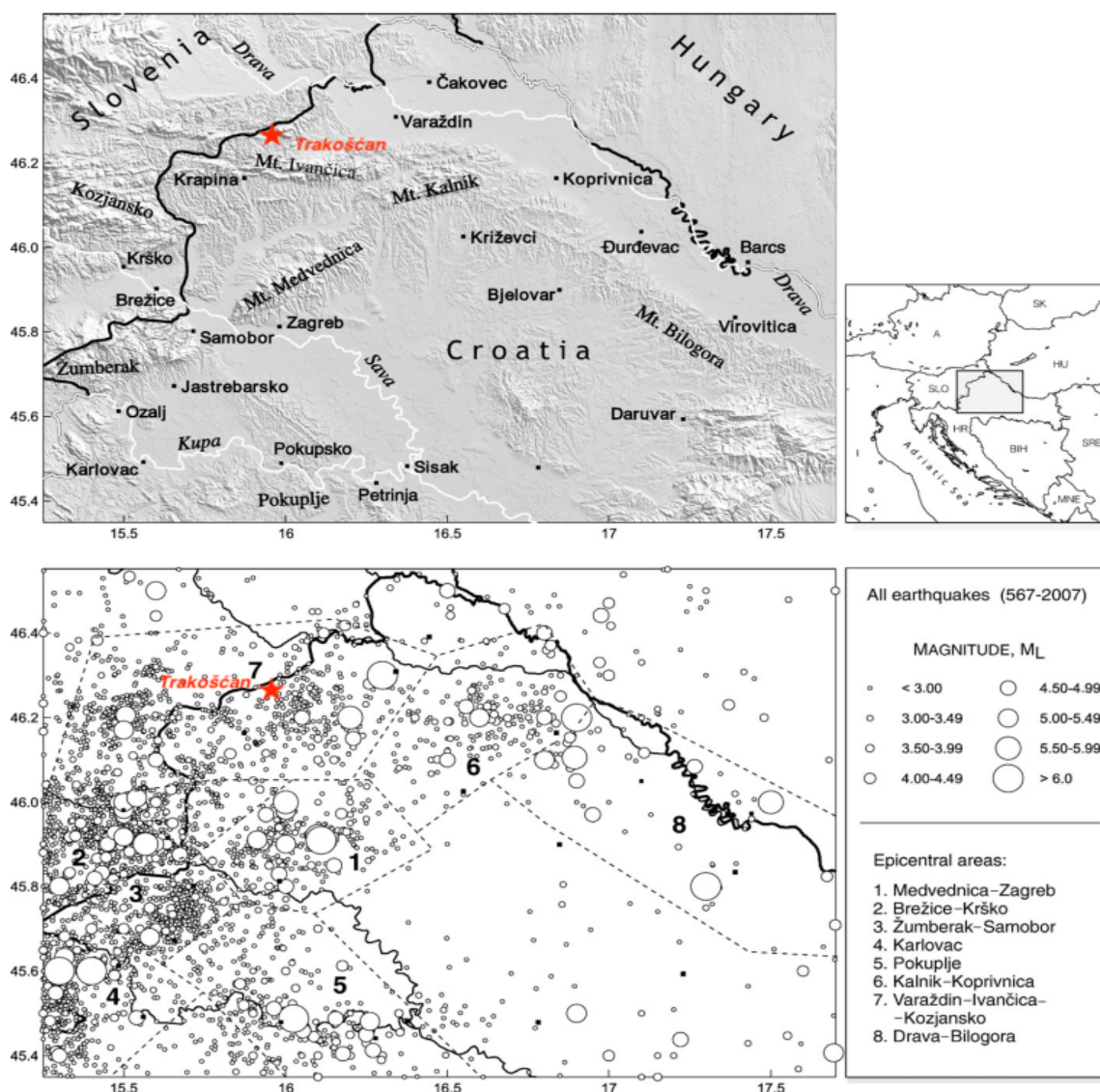
O izvornom obliku dvorca nema zapisa, ali se zna da je dvorac prvi put nadogradila obitelj Gyulay. Zapadnu kulu, koja je ujedno imala i obrambenu funkciju, sagradila je obitelj Drašković. Sredinom 19. stoljeća, nakon što je dvorac prethodno bio napušten, podmaršal grof Juraj VI Drašković, Trakošćan obnavlja u rezidencijalni dvorac, a šumu i jezero koji ga okružuju u romantičarski perivoj. 1944. godine obitelj Drašković napušta Trakošćan i odlazi u Austriju te dvorac postaje vlasništvo države.

Godine 1953. osnovan je muzej, u kojemu treba istaknuti vitešku sobu, lovačku sobu, zbirku oružja te brojne portrete koji prikazuju preko deset generacija obitelji Drašković. Danas je dvorac Trakošćan dio kulturno-povijesne baštine i jedan od najposjećenijih dvoraca Republike Hrvatske. (Stranice muzejske ustanove Dvor Trakošćan, (2023). [Internet], raspoloživo na: <https://trakoscan.hr/povijest-2/>)

2.3 Seizmičnost područja oko dvorca

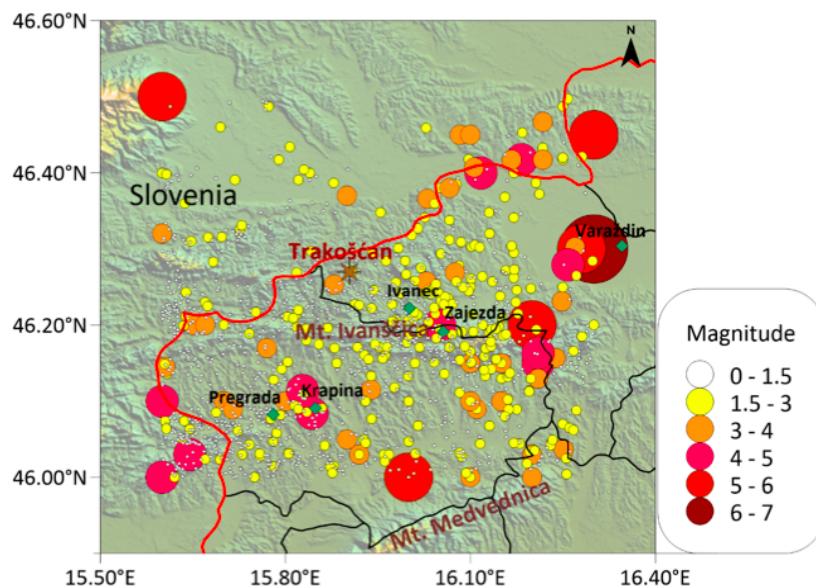
Na području Republike Hrvatske bilježenje potresa, odnosno seizmičke aktivnosti, provode Seizmološka služba i Geofizički zavod pri Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Hrvatski katalog potresa (engl. *Croatian Earthquake Catalog, CEC*), u nadopunjenoj verziji, prvo opisanoj u Herak i sur. (1996), sadrži podatke o povijesnim i instrumentalno zabilježenim potresima od 373. god. pr. Kr. Uz podatke o koordinatama žarišta i magnitudi, u katalogu se navodi i vrijeme nastanka potresa te intenzitet. Od 1908. godine, početkom instrumentalne ere u seizmologiji, lokacije i vrijeme nastanka potresa određuju se na temelju analize zapisa seizmografa. Također, uz mikroseizmičke analize, provodi se i makroseizmičko istraživanje nakon svakog potresa koji možemo osjetiti. Opisuje se utjecaj potresa na građevine, okoliš i ljude. Iz tih podataka moguće je procijeniti intenzitet potresa I na nekom području. Europskoj makroseizmičkoj ljestvici (*EMS*) prethodila je Mercalli-Cancani-Seibergova ljestvica (*MCS*) od 12 stupnjeva pomoću koje se izražava intenzitet potresa.

Jedno od tri seizmički aktivna područja je i sjeverozapadna Hrvatska. U radu Herak i sur. (2009) seizmičnost sjeverozapadne Hrvatske opisana je kao umjerena, s rijetkom pojavom snažnih potresa (Slika 2.3). Za opis seizmičnosti korišteni su povijesni zapisi te ponovno analizirani potresi nakon 1908. godine. Sjeverozapadna Hrvatska smjestila se između istočnih Alpi, sjeverozapadnih Dinarida i jugozapadnog dijela Pannonskog bazena, odnosno na spoju između Periadrijatskog, Balatonskog i Dravskog transkurentnog rasjeda, važnih u opisu tektonike (neogena i kvartara) na ovom području (Tomljenović i Csontos, 2001). Za razmatranje seizmičnosti područja oko dvorca Trakošćan važna su područja šest i sedam (Kalnik-Koprivnica i Varaždin-Ivanščica-Kozjansko) označena na Slici 2.3. Seizmičnost područja Kalnik-Koprivnica opisana je kao umjerena s makroseizmičkim intenzitetom do VII stupnjeva na *MCS* ljestvici. U radu Herak i sur. (2009) izdvojena su dva potresa, prvi 20. prosinca 1883. godine i drugi 1. lipnja 1993. godine koja su se dogodila u blizini grada Koprivnice. Potres koji se dogodio 1993. godine osjetio se na području sjeverozapadne Hrvatske, zapadnim dijelovima Slovenije i na graničnom dijelu između Mađarske i Austrije. Žarišni mehanizam potresa ukazuje na rasjed s reversnim pomakom i smjerom pružanja I-Z.



Slika 2.3: Gornja slika: topografska karta sjeverozapadne Hrvatske. Promatrano područje označeno je sivim pravokutnikom na karti Republike Hrvatske i susjednih zemalja (desno). Donja slika: prostorna razdioba epicentara potresa (567-2007) iz Hrvatskog kataloga potresa za područje sjeverozapadne Hrvatske koja je podijeljena na osam manjih cjelina omeđenih sivom isprekidanom linijom. Nazivi pojedinih cjelina navedeni su u legendi s desne strane. Crvenom zvijezdom označena je lokacija dvorca Trakošćan. (izvor: Herak i sur., 2009)

Na Slici 2.4 prikazana je prostorna raspodjela epicentara potresa u blizini dvorca Trakošćan, zajedno s pripadajućim magnitudama. Kako je navedeno u radu Markušić i sur. (2021), 92% od ukupnog broja potresa koji su se dogodili do 2019. godine, bili su potresi magnitude manje ili jednake 2.5. Također, zaključeno je da su lokacije jačih potresa raspoređene u smjeru JZ-SI.



Slika 2.4: Prostorna raspodjela epicentara potresa u blizini dvorca Trakošćan, zajedno s pripadajućim magnitudama od 373. god pr. Kr. do 2019. godine izrađena na temelju Hrvatskog kataloga potresa. (izvor: Markušić i sur., 2021)

Jak potres 1459. godine na području Varaždin-Ivanščica-Kozjansko, s epicentrom kod grada Varaždina i intenzitetom IX na *MCS* ljestvici, prvi je zapis u Hrvatskom katalogu potresa u blizini dvorca Trakošćan. Važno je naglasiti kako se radi o vrlo nepouzdanom povijesnom podatku (Herak i sur., 2009). Nakon toga, uslijedila su dva jaka potresa 1836. godine u podnožju gore Ivanščice te potres 1838. godine na području Međimurja i Zalske županije u Republici Mađarskoj (Herak i sur., 1996). Kako je navedeno u Markušić i sur. (2021), potresi su uzrokovali urušavanje pojedinih dimnjaka, pukotine na zidovima, pa čak i zamućenje i uzburkanost rijeke Mure. Također, u razdoblju nakon 1905. godine postoje zapisi o četiri potresa, magnitude veće od 4.5. Prvi je bio 1905. godine, magnitude 4.7, druga dva 1925. i 1967. godine, magnitude 4.6, s epicentrom 40 km ZJZ od Ivanca te 8 km JJZ od Krapine. Posljednji potres, s epicentrom u podnožju gore Ivanščice, magnitude 4.5, dogodio se 1982. godine.

U radu Dasović i sur. (2020) ova se područja opisuju kompresijskim režimom tektonske napetosti s pružanjem *P*-osi (osi najvećeg tektonskog tlaka) u smjeru S-J pri čemu su aktivni rasjedi s reversnim pomakom i smjerom pružanja I-Z, odnosno SI-JZ.

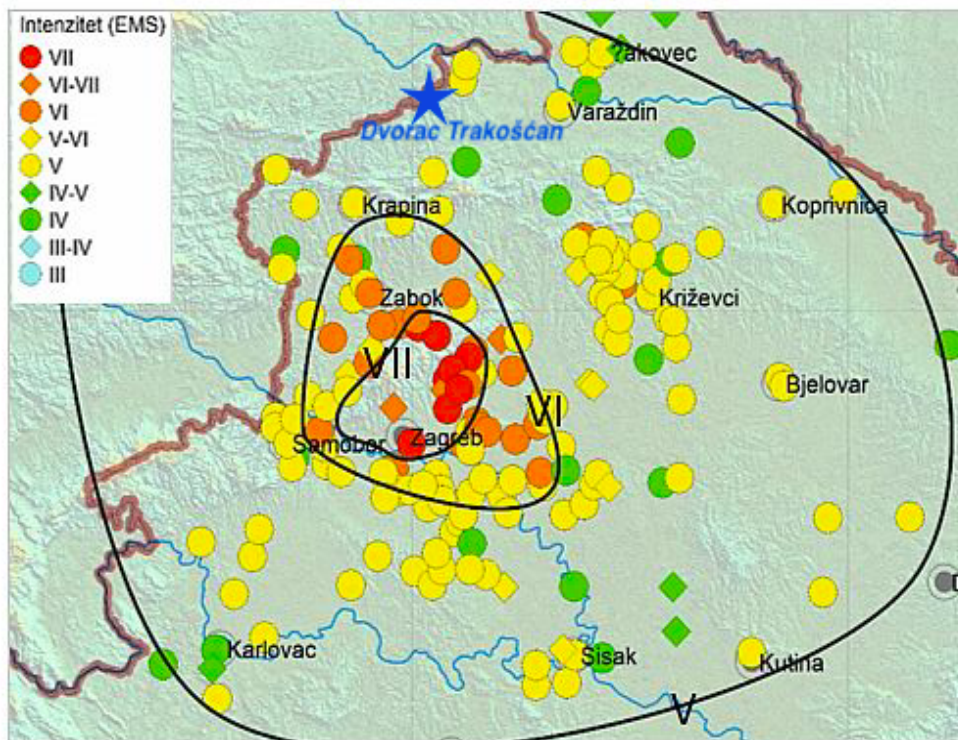
S obzirom na oštećenja na dvorcu Trakošćan uzrokovana potresima 2020. godine na području Zagreba i Petrinje, važno je razmotriti ne samo potrese u blizini dvorca, već i na većim udaljenostima. Na Slici 2.5 obilježene su lokacije epicentara zagrebačkog potresa i potresa kod Petrinje 2020. godine te lokacija dvorca Trakošćan.



Slika 2.5: Prikaz lokacija epicentara zagrebačkog potresa i potresa kod Petrinje 2020. godine (plava zvijezda) i dvorca Trakošćan (crveni krug) na karti Republike Hrvatske.

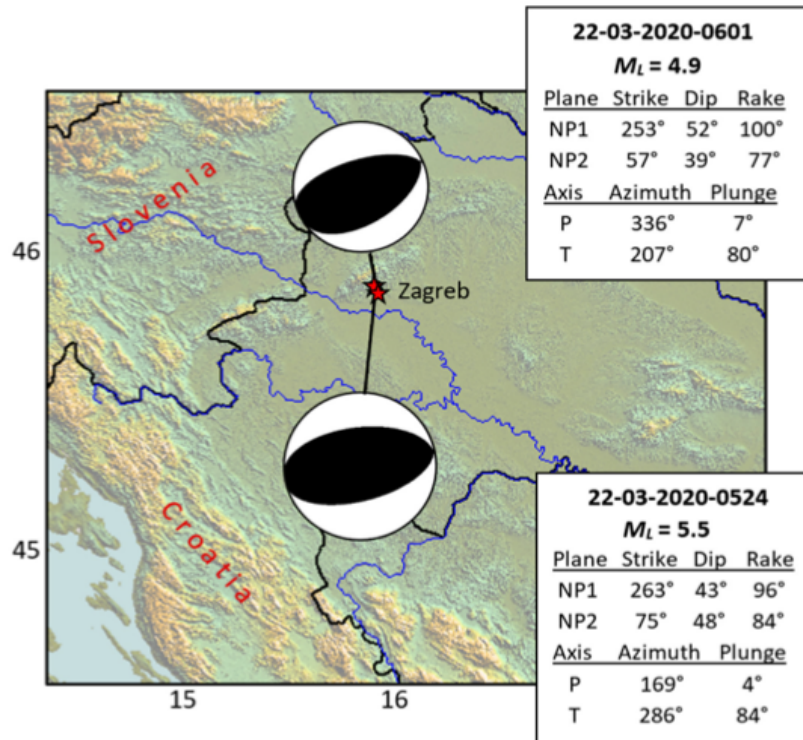
2.3.1 Zagrebački potres 22. ožujka 2020. godine

Potres magnitude $M_L=5.5$ u 6 sati i 24 minute po lokalnom vremenu pogodio je glavni grad Zagreb i šire zagrebačko područje (Markušić i sur., 2020). Epicentar potresa bio je na području Markuševca i Čučerja, odnosno 7 km sjeveroistočno od centra grada. Dubina žarišta iznosila je oko 10 km te se potres opisuje kao plitki. Intenzitet potresa u epicentru procijenjen je na VII stupnjeva po *EMS* ljestvici što ga klasificira kao štetan potres jer uzrokuje velika oštećenja na građevinama. Epicentar potresa udaljen je od dvorca Trakošćan 40 km. Seizmografi Seizmološke službe zabilježili su oko 3500 naknadnih potresa do kraja 2021. godine. Najjači naknadni potres magnitude $M_L=4.9$ dogodio se isti dan, u 7 sati i 1 minutu po lokalnom vremenu (izvješće *Dvije godine od zagrebačkog potresa* Seizmološke službe pri Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu). Intenzitet glavnog potresa na području oko dvorca Trakošćan procijenjen je na V stupnjeva po *EMS* ljestvici (Markušić i sur., 2021). Na Slici 2.6 prikazana je prostorna raspodjela procijenjenih intenziteta prema *EMS* ljestvici za zagrebački potres 22. ožujka 2020. godine.



Slika 2.6: Prostorna raspodjela procijenjenih intenziteta prema EMS ljestvici za zagrebački potres 22. ožujka 2020. godine ($M_L=5.5$). Dvorac Trakošćan označen je plavom zvijezdom. (izvor: izvješće *Dvije godine od zagrebačkog potresa* Seizmološke službe pri Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu)

Žarišni mehanizmi potresa (engl. *Earthquake focal mechanism*) su dijagrami u stereografskoj projekciji koji pokazuju orijentaciju i tip rasjeda na kojem se dogodio potres te orijentaciju glavnih osi tektonskih naprezanja u žarišnom prostoru. U radu Markušić i sur. (2020) su izračunati žarišni mehanizmi za glavni zagrebački potres i za najjači naknadni potres (Slika 2.7). Oba potresa su se dogodila na reversnom rasjedu. Jedna rasjedna ploha glavnog potresa je nagnuta 43° u smjeru J-JI, a druga rasjedna ploha je nagnuta 48° u smjeru S-SZ. U slučaju najjačeg naknadnog potresa jedna je rasjedna ploha nagnuta 52° u smjeru J-JI, dok je druga rasjedna ploha nagnuta 39° u smjeru S-SZ. P -os (os najvećeg tektonskog tlaka) je bila horizontalna, odnosno u smjeru JJI-SSZ, dok je T -os (os najvećeg vlaka) gotovo vertikalna. Usporedbom žarišnih mehanizama i geološke građe Medvednice, može se pretpostaviti da je seizmogeni izvor za glavni i najjači naknadni potres zagrebačke serije potresa reversni rasjed, odnosno reversni rasjedi koji pripadaju seizmogenoj zoni Sjevernog rubnog medvedničkog rasjeda (Dasović i sur., 2020).



Slika 2.7: Žarišni mehanizmi za glavni ($M_L=5.5$) i najjači naknadni potres ($M_L=4.9$) zagrebačke serije potresa iz ožujka 2020. godine. Žarišne sfere prikazane su u stereografskoj projekciji. (izvor: Markušić i sur., 2020)

Glavni potres je uzrokovao veliku materijalnu štetu na brojnim kulturno-povijesnim građevinama u središtu grada, ali i na ostalim objektima, ponajviše stambenim zgradama izgrađenim u prvoj polovici 20. stoljeća. U epicentralnom području, u mjestima Markuševac, Čučerje, Kašina, Vidovec, Popovec i u Podsljemenskoj zoni, uništene su brojne obiteljske kuće te su ljudi bili primorani iseliti iz svojih domova.

Zagrebačka je katedrala u potresu ostala bez kamenog vrha na južnom tornju (Slika 2.8). Srušen je dio zvonika, na čijem vrhu se nalazio pozlaćeni križ. Na sreću, prilikom pada kamenih dijelova nitko nije ozlijeđen. Unutar Katedrale bilo je puno žbuke i komada kamenih elemenata koji su otpali te većih pukotina na svodovima.

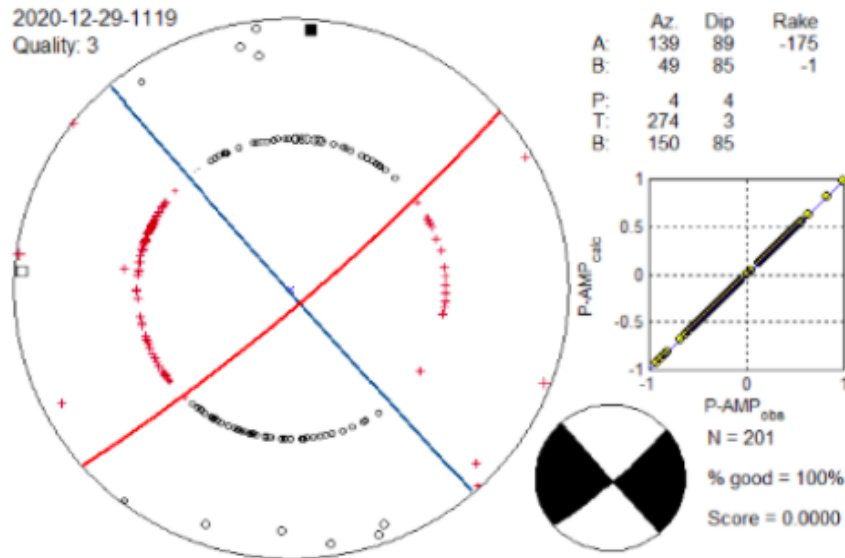


Slika 2.8: Oštećenje južnog tornja Zagrebačke katedrale u potresu koji je pogodio Zagreb 22. ožujka 2020. godine u 6 sati i 24 minute po lokalnom vremenu. (izvor: *Detaljno izvješće o oštećenjima Zagrebačke katedrale*, katedrala.hr)

2.3.2 Potres kod Petrinje 29. prosinca 2020. godine

Razoran potres 29. prosinca 2020. godine, magnitude $M_L=6.4$, u 12 sati i 19 minuta po lokalnom vremenu pogodio je okolicu Petrinje (Markušić i sur., 2021). Dubina glavnog potresa iznosila je 6-7 km. Potres se osjetio na području cijele Hrvatske, ali i Bosne i Hercegovine, sjeverozapadnom dijelu Srbije, zapadnom dijelu Mađarske, jugozapadnom dijelu Slovačke, dijelu južne Austrije, Slovenije i području sjeveroistočne Italije. Intenzitet potresa u epicentru iznosio je VIII stupnjeva *EMS* ljestvice. To ga klasificira kao jako štetan potres. Zgrade mogu pretrpjeti velika oštećenja ili se djelomično urušiti, dimnjaci padaju, a na zidovima se pojavljuju velike pukotine. Glavnom potresu prethodio je potres magnitude $M_L=5$, dan ranije, 28. prosinca 2020. godine, u 6 sati i 28 minuta, s epicentrom 6 km JZ od Petrinje. Nakon glavnog potresa uslijedio je niz slabijih potresa, od kojih su neki bili magnitude 4-4.8 (Herak i Herak, 2023). U razdoblju između 28. prosinca 2020. godine i 29. ožujka 2021. godine locirano je 9350 potresa (Osvrt *Veliki petrinjski potres-godinu dana poslije* Geofizičkog zavoda Andrije Mohorovičića i Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu). Većina epicentara se nalazila uz Petrinjski rasjed smjera pružanja SZ-JI, duž Hrastovačke gore.

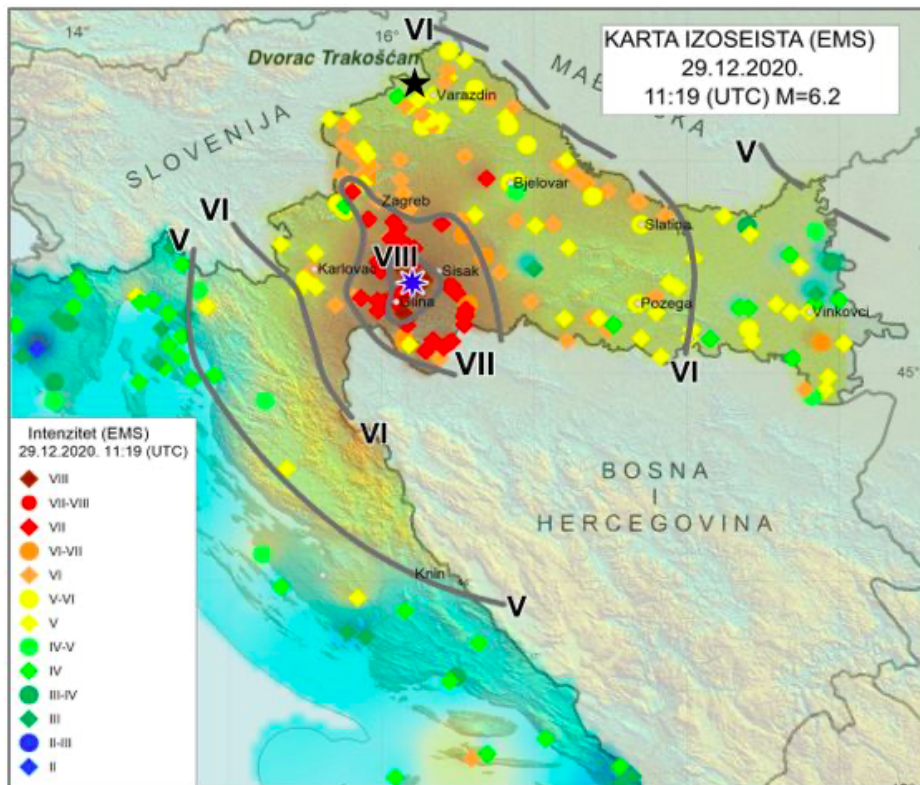
Uz pomoć žarišnog mehanizma glavnog potresa 29. prosinca 2020. godine (Slika 2.9) zaključeno je da je uzrok glavnog i većine naknadnih potresa subvertikalni rasjed smjera pružanja SZ-JI s horizontalnim desnim pomakom (Baize i sur., 2022; Osvrt *Veliki petrinjski potres-godinu dana poslije* Geofizičkog zavoda Andrije Mohorovičića i Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu). Također, duž rasjedne plohe, jugozapadno rasjedno krilo pomaknulo se prema sjeverozapadu, a sjeveroistočno prema jugoistoku.



Slika 2.9: Žarišni mehanizam glavnog petrinjskog potresa 29. prosinca 2020. godine, $M_L=6.2$. Na donjoj žarišnoj sferi u stereografskoj projekciji prikazane su orijentacije prvog pomaka P-vala. Crveni križić predstavlja prvi pomak tla prema gore (kompresija), a bijeli kružić prvi pomak tla prema dolje (dilatacija). Plavom linijom je označen rasjed na kojem se dogodio potres sa smjerom pružanja SZ-JI (desni rasjed). (izvor: Osvrt *Veliki petrinjski potres-godinu dana poslije* Geofizičkog zavoda Andrije Mohorovičića i Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu)

Većina oštećenih građevina bila je izgrađena od nearmiranog betona i opeke koji su izgubili svojstva tijekom vremena. U poslijeratnoj obnovi, građevine su uglavnom bile sanirane, ali ne i obnovljene. Nažalost, tako sanirani objekti pri ovako jakom potresu pretrpjeli su velika oštećenja ili čak urušavanje. Većina stanovništva, iz šireg epicentralnog područja, bila je evakuirana na sigurne lokacije izvan područja zahvaćenog potresom (Atalić i sur., 2023).

Dvorac Trakošćan udaljen je 90 km od epicentra glavnog potresa te je na tom području intenzitet potresa procijenjen na V-VI stupnjeva *EMS* ljestvice (Slika 2.10).



Slika 2.10: Prostorna razdioba procijenjenih intenziteta prema EMS ljestvici za potres kod Petrinje 29. prosinca 2020. godine ($M_L=6.2$). Dvorac Trakošćan označen je crnom zvijezdom. (izvor: izvješće *Godina dana od razornog potresa kod Petrinje* Seizmološke službe pri Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu)

U širem epicentralnom području uočeni su sekundarni učinci potresa, kao što su likvefakcija, pukotine na prometnicama, klizišta i urušne vrtače (Pollak i sur., 2021). Najveća urušna vrtača nalazi se u selu Mečenčani, promjera je 20 metara, a dubine oko 12 metara (Slika 2.11).



Slika 2.11: Najveća urušna vrtača u selu Mečenčani. Promjer vrtače iznosi 20 metara, a dubina oko 12 metara. (izvor: Pollak i sur., 2021)

3 Dinamička svojstva građevine

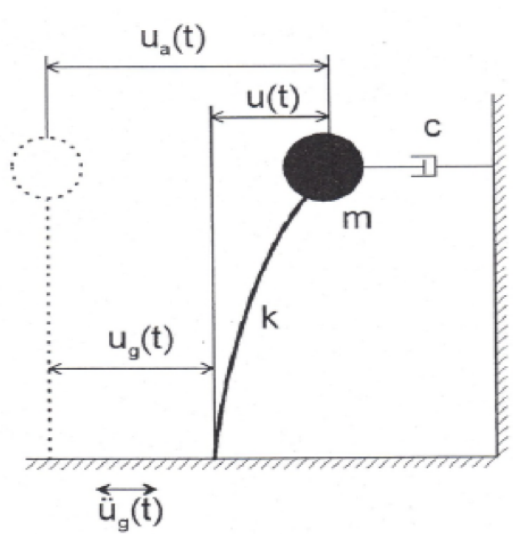
Svaka građevina ima svoju vlastitu frekvenciju (ili period) opisanu izrazom:

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.1)$$

gdje je f frekvencija, a T period građevine. Vlastitu frekvenciju građevine i omjer mirenja osnovnog i viših modova prisilnih oscilacija nazivamo dinamičkim svojstvima građevine. Vlastita frekvencija je svojstvo uz pomoć kojeg možemo procijeniti "odgovor" građevine na vanjsku pobudu, odnosno potres. Građevina se može opisati jednodimenzionalnim harmoničkim oscilatorom uz vanjsku pobudu, u našem slučaju mikroseizmičkim nemirom. Tvrdnja vrijedi uz pretpostavku linearnog elastičnog sustava. Prema Begović i sur. (2012) odziv harmoničkog oscilatora na vanjsku pobudu je rezultat rješavanja obične diferencijalne jednadžbe harmoničkog oscilatora:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3.2)$$

gdje je m masa oscilatora, c koeficijent mirenja, k krutost promatranog sustava, u relativan pomak mase oscilatora, a u_g pomak tla u odnosu na neku referentnu točku. Ukupni pomak sustava $u_a(t)$ sastoji se od pomaka tla $u_g(t)$ gdje se cijeli sustav pomiče iz početnog položaja u novi položaj i pomaka $u(t)$ uslijed deformacije (Slika 3.1).



Slika 3.1: Shematski prikaz ukupnog pomaka sustava $u_a(t)$ koji se sastoji od pomaka tla $u_g(t)$ gdje se cijeli sustav pomiče iz početnog položaja u novi položaj i pomaka $u(t)$ uslijed deformacije. (izvor: Herak i sur., 2009)

Sila inercije $m\ddot{u}_a$ proporcionalna je apsolutnom ubrzanju, sila prigušenja $c\dot{u}$ proporcionalna je relativnoj brzini, a elastična sila (sila naprezanja) ku je proporcionalna relativnom pomaku. Podijelimo li jednadžbu (3.2) s masom oscilatora m dobivamo:

$$\ddot{u}(t) + 2\zeta\omega_0\dot{u}(t) + \omega_0^2u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (3.3)$$

gdje su ζ i ω dinamički parametri sustava. ζ je bezdimenzionalna veličina (izražena u %) kojom opisujemo omjer mirenja, odnosno:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}, \quad (3.4)$$

a ω_0 je vlastita kružna frekvencija slobodnog oscilatora opisana izrazom:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (3.5)$$

Vlastiti period T harmoničkog oscilatora definiran je izrazom:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (3.6)$$

Metodom varijacije konstanti rješavamo običnu diferencijalnu jednadžbu harmoničkog oscilatora (3.2). Najprije rješavamo homogenu jednadžbu:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_0\dot{u} + \omega_0^2u = 0 \quad (3.7)$$

za koju pretpostavljamo rješenje oblika:

$$u = e^{\gamma t}. \quad (3.8)$$

Izraz $u(t)$ smo pojednostavili pisanjem u . Uvrstimo li izraz (3.8) u jednadžbu (3.7) i riješimo jednadžbu po γ dobivamo sljedeće:

$$\gamma_{1,2} = \omega_0(-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}). \quad (3.9)$$

Možemo zaključiti da će gibanje harmoničkog oscilatora ovisiti o međusobnom odnosu vlastite frekvencije ω_0 i koeficijenta mirenja ζ . Kako je navedeno u Begović i sur. (2012), ako koeficijent mirenja ζ poprima vrijednost iz skupa $[0,1)$ harmonički oscilator je podkritički miren i sustav ima dva kompleksno-konjugirana rješenja. Pomak takvog oscilatora definiran je izrazom:

$$u_h(t) = A_1e^{-(\zeta\omega_0 - i\omega_d)t} + B_1e^{-(\zeta\omega_0 + i\omega_d)t} \quad (3.10)$$

gdje je $\omega_d = \omega_0\sqrt{1 - \zeta^2}$ vlastita kružna frekvencija sustava, a A_1 i B_1 su konstante koje određujemo iz rubnih uvjeta. Nadalje, ako je $\zeta=1$ jednadžba (3.7) ima jedno realno rješenje i oscilator je kritički miren. Pomak takvog oscilatora definiran je izrazom:

$$u_h(t) = (A_1 + B_1t)e^{-\omega_0 t}. \quad (3.11)$$

Treći slučaj, u kojemu je $\zeta > 1$, jednadžba (3.7) ima dva realna rješenja i oscilator je nadkritički miren. Pomak takvog oscilatora je:

$$u_h(t) = A_1e^{(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_0 t} + B_1e^{(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_0 t}. \quad (3.12)$$

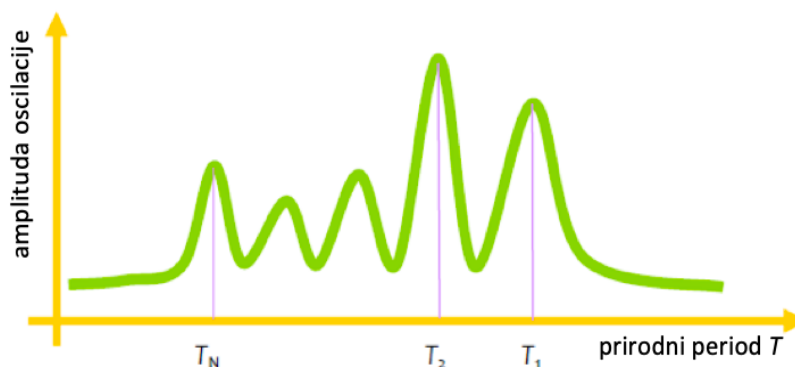
U slučaju podkritičkog mirenja oscilator se giba harmonički, odnosno postoje oscilacije, dok u slučajevima kritičkog i nadkritičkog mirenja, amplituda oscilatora trne bez oscilacija, i to brže kod kritičkog nego kod nadkritičkog mirenja. Dakle, može se zaključiti da je rješenje homogene jednadžbe (3.7) upravo pomak nastao uslijed podkritičkog mirenja (3.10).

Prilikom rješavanja nehomogene jednadžbe, izraz za pomak kod podkritičkog mirenja (3.10) uvrštavamo u jednadžbu (3.3) kako bismo dobili izraze za funkcije vremena $A_1(t)$ i $B_1(t)$. Ukupno rješenje harmoničkog oscilatora uz djelovanje vanjske pobude $\ddot{u}_g(t)$ je:

$$u(t) = \frac{-1}{\omega_d} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\zeta\omega_0(t-\tau)} \sin[\omega_d(t-\tau)] \quad (3.13)$$

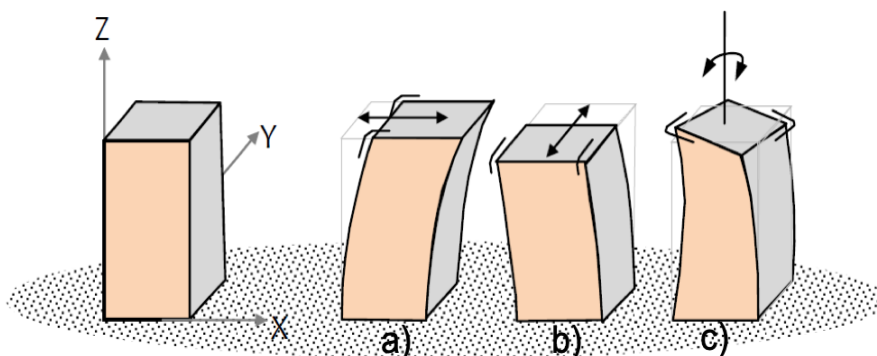
gdje je τ period.

Tijekom razmatranja vlastite frekvencije osciliranja građevine, razlikujemo tri vlastita (osnovna) moda osciliranja (X, Y, Z smjer). Osnovni (prirodni) mod je najmanja frekvencija, odnosno najveći period, f_1 (T_1). Periode viših modova označavamo s T_2 do T_N . U teoriji, građevina može imati N modova osciliranja. Na Slici 3.2 prikazana je ovisnost amplitude oscilacija o vlastitom periodu.



Slika 3.2: Grafički prikaz ovisnosti amplitude oscilacija o vlastitom periodu. Osnovni (prirodni) mod najmanja je prirodna frekvencija, odnosno najveći period. (izvor: Murty i sur., 2012)

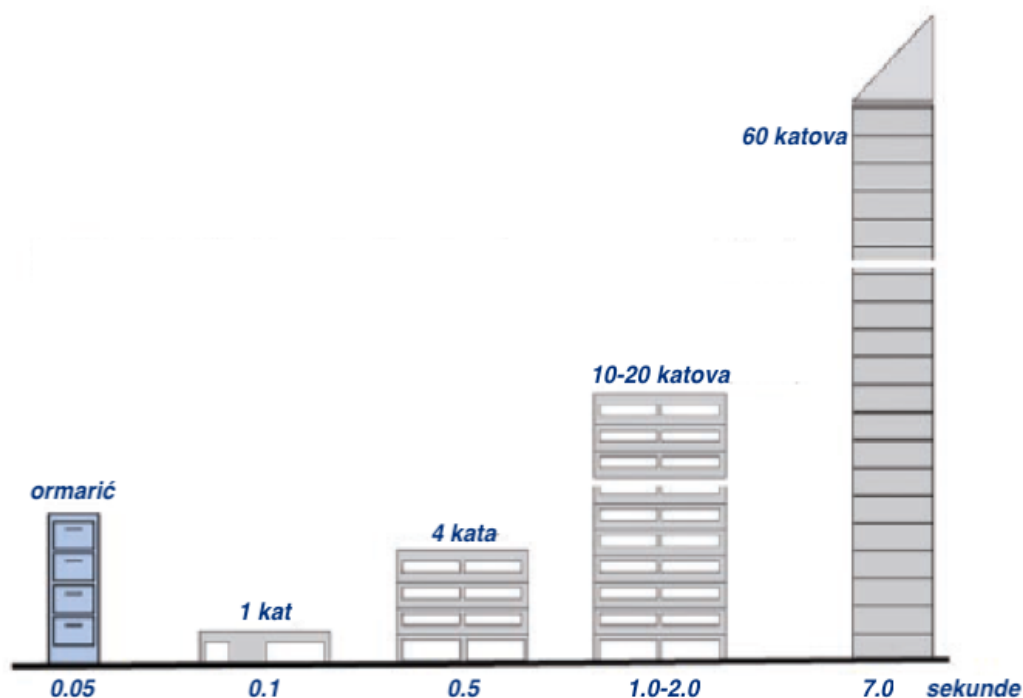
Tri osnovna moda su translacijski modovi duž X i Y osi te rotacijski (torzijski) mod oko osi Z (Slika 3.3). Građevine pravilnog oblika imaju tri osnovna moda, dok građevine nepravilnog oblika imaju tri osnovna moda i više modova. Viši modovi uzrokuju deformaciju građevine u određenom smjeru i određenoj točki te ovise o geometriji građevine, svojstvima građevnih materijala i spojevima strukturnih elemenata.



Slika 3.3: Shematski prikaz tri osnovna moda: a) translacijski mod duž osi X, b) translacijski mod duž osi Y i c) rotacijski (torzijski) mod oko osi Z. (izvor: Murty i sur., 2012)

Visoke građevine imaju nisku vlastitu frekvenciju i dugi period, dok niske građevine imaju visoku vlastitu frekvenciju i kratki period (Slika 3.4). Na vlastitu frekvenciju osciliranja građevine utjecat će i sama masa građevine, prigušenje, krutost, ali i visina građevine. Povećamo li visinu građevine, povećat će se i masa, dok će se frekvencija osciliranja građevine i njezina krutost istovremeno smanjiti. Krutost definiramo kao sposobnost komponente ili skupa komponenti da se odupre deformaciji kada dođe do pomicanja uslijed potresa. Na masu i krutost građevine utječu i drugi čimbenici kao

što su: broj katova, materijal od kojeg je izgrađena, (ne)pravilnost tlocrta pojedinih katova, strukturni/nestrukturni elementi, pozicija i usmjerenost građevine te prisutnost ljudi ili namještaja.



Slika 3.4: Prikaz ovisnosti vlastitog perioda o visini građevine. (izvor: Arnold i sur., 2006)

Također, prilikom određivanja vlastite frekvencije ne smijemo zanemariti utjecaj temperature okoline, vlažnosti zraka, brzine vjetra, oborine, ali i ljudski faktor. Vlastita frekvencija, odnosno period, razlikuju se od građevine do građevine, ali ovisi i o zemlji podrijetla zbog različitih stilova gradnje, vrste lokalnog tla, projektiranja i protupotresnih zakona (Zailac, 2015).

3.1 Lokalni uvjeti tla

Ukupno valno polje zabilježeno seizmografom ovisit će o obliku funkcije izvora u žarištu potresa, strukturi i vrsti sredstva kroz koje seizmički val putuje i lokalnom utjecaju podloge ispod instrumenta. Seizmogram potresa je konvolucija četiri utjecaja opisana sljedećim izrazom:

$$U(f) = S(f)P(f)L(f)I(f) \quad (3.14)$$

gdje je $S(f)$ funkcija izvora (engl. *source function*) koja opisuje sam potres i procese u njegovom žarištu, $P(f)$ propagacijski faktor koji opisuje djelovanje sredstva na seizmički val koji kroz njega putuje, $L(f)$ lokalni učinak tla (engl. *site effects*), a $I(f)$ odziv instrumenta na gibanje površine koji ovisi o konstrukciji samog instrumenta. Lokalne uvjete tla najlakše određujemo u odnosu na preostala tri učinka zbog mogućnosti izvođenja mjerenja i pristupačnosti. To su pojave koje proučava seizmologija, dinamika tla, strukturna dinamika, geologija i geotehnika. Možemo ih podijeliti u dvije kategorije. Izravni lokalni učinci uzrokovani su podrhtavanjem tla, rezultiraju (de)amplifikacijom valova i ovisi o frekvenciji, a posljedica su postojanja rastresitih i rahlih površinskih

slojeva i površinske topografije. Neizravni lokalni učinci su oštećenja tla čija je posljedica slom tla, odnosno likvefakcija i nestabilnost na kosini. Izravni i neizravni lokalni učinci tla imaju značajan utjecaj na građevine. Zbog utjecaja lokalnog tla na građevinama, veću štetu ponekad uzrokuju potresi koji su se dogodili na udaljenoj lokaciji. Prolaskom seizmičkih valova kroz slojeve tla, od osnovne stijene do površine, doći će do amplifikacije ili povećanja amplitude seizmičkih valova. Do amplifikacije dolazi zbog dva razloga. Prvi je razlog konverzija kinetičke energije valova u potencijalnu energiju zbog znatnog usporavanja seizmičkih valova pri površini. Drugi je razlog konstruktivna interferencija reflektiranih (odbijenih) valova s upadnim valom. Faktori o kojima ovisi amplifikacija su mekoća tla, definirana brzinom S-valova, debljina naslaga sedimenata i frekvencija tla. Prema Panzera i sur. (2013) vlastita frekvencija f_0 definirana je izrazom:

$$f_0 = \frac{V_s}{4h} \quad (3.15)$$

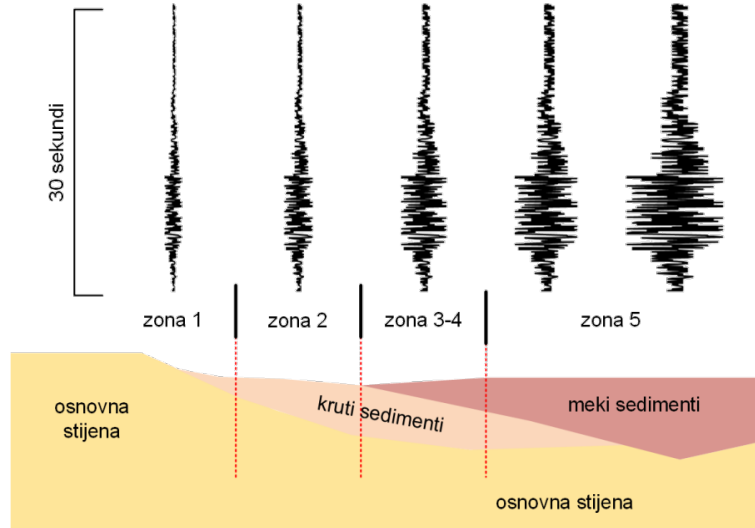
gdje je V_s brzina transverzalnih valova u m/s, čija je frekvencija ujedno i najviše amplificirana, a h je debljina sloja u metrima. Na rasprostiranje seizmičkih valova od njihovog izvora do površine, utječu i tipologija i geometrija površinskih naslaga sedimenata, topografske i morfološke karakteristike, razina podzemnih voda, prisutnost diskontinuiteta i rasjednih zona te šupljine (Panzera i sur., 2013).

U radu Parolai (2012) provedeno je istraživanje utjecaja topografije na brdu Little Red Hill na Novom Zelandu. Zaključeno je da na vrhu brda seizmički valovi imaju veće amplitude. Takvo ponašanje može se objasniti fokusiranjem energije. Seizmički valovi konstruktivno interferiraju zbog male razlike u fazi. Amplifikacija η je najveća za valne duljine koje odgovaraju poluširini brda, odnosno:

$$\eta = \frac{2L}{\lambda} \quad (3.16)$$

gdje L širina brda (grebena), a λ valna duljina. Do amplifikacije dolazi i u kanjonima, a najveća je na njegovim rubovima za valne duljine seizmičkih valova koje su jednake ili manje dimenziji kanjona. Isto vrijedi i za kosine, najveća amplifikacija je na gornjem rubu.

Dvorac Trakošćan je izgrađen na aluvijalnim naslagama rijeke Bednje. Slojevi blizu površine sastoje se najčešće od gline, šljunčanog konglomerata i pješčenjaka, dok su dublji slojevi građeni od lapora i dolomitnog vapnenca (Stanko i sur., 2016). Zbog toga će seizmički valovi koji putuju kroz naslage mekih i rahlih sedimenata imati niske frekvencije, odnosno velike amplitude seizmičkih valova, dok će valovi koji prolaze samo kroz osnovnu stijenu imati manje amplitude (Slika 3.5). Glavna posljedica amplifikacije potresnog gibanja tla je rezonancija. Rezonancija je pojava koja se događa kada se poklope frekvencije gibanja tla i građevine.



Slika 3.5: Prikaz amplifikacije seizmičkih valova od osnovne stijene do površine tla. (modificirano prema Seville i sur., 2015)

Važnost određivanja lokalnih uvjeta tla određenog područja iznimno je važna u protupotresnom inženjerstvu kako bi se odredila potencijalna opasnost od mogućih oštećenja prilikom potresa koja bi mogla ugroziti ljudsku sigurnost.

3.2 Amplifikacijski spektar $AMP(\omega)$

Fizikalna i geološka svojstva terena na kojemu se građevina nalazi, utječu na amplitude seizmičkih valova, koje će, kako smo ranije spomenuli, biti veće na mekanom, rastresitom tlu nego na čvrstoj stijeni. Pretpostavimo strukturu sastavljenu od N vodoravnih, elastičnih i homogenih slojeva nad poluprostorom ($N+1$). Svaki sloj ima svoju debljinu H_j , gustoću ρ_j i definirana je brzina propagacije seizmičkih valova c_j kroz taj sloj. U Kartezijevom sustavu z_j -os je orijentirana prema dolje. Promatramo harmonijski SH (transverzalni) val amplitude a_{N+1} koji dolazi iz poluprostora:

$$y\left(t + \frac{z_N}{c_{N+1}}\right) = a_{N+1} e^{i\omega\left(t + \frac{z_N}{c_{N+1}}\right)} \quad (3.17)$$

gdje je ω frekvencija vala. Prema Begović i sur. (2012) pretpostavka o okomitom upadu vala vrijedi iz razloga što ne dolazi do konverzije valova i sve tri vrste valova (P-, SV- i SH-valovi) se šire neovisno jedan o drugom. U slučaju kada bi val upadao pod nekim kutem, a gornji slojevi imali manju brzinu c_j , tada bi se seizmički valovi lomili prema okomici i okomito se transmitirali kroz slojeve. Pomak u j -tom sloju određuje jednodimenzionalna valna jednadžba:

$$\frac{\partial^2 v_j(z_j, t)}{\partial t^2} = c_j^2(\omega) \frac{\partial^2 v_j(z_j, t)}{\partial z_j^2}, \quad -H < z_j \leq 0, \quad j = 1, \dots, N. \quad (3.18)$$

Prema Begović i sur. (2012) rješenje ove jednadžbe je superpozicija pomaka a_j prema gore i pomaka b_j prema dolje:

$$v_j(z_j, t) = a_j e^{i(\omega t + k_j z_j)} + b_j e^{i(\omega t - k_j z_j)}, \quad k_j = \frac{\omega}{c_j}. \quad (3.19)$$

Amplitude a_j i b_j se određuju iz rubnih uvjeta za pomak i napetost na granicama. Gledamo 1. sloj, odnosno slobodnu površinu na $z_1 = -H_1$. Napetost na slobodnoj

površini je nula:

$$p_{zy}|_{z_1=-H_1} = 0, \quad \mu_j \left(\frac{\partial v_j}{\partial z_j} + \frac{\partial \omega_j}{\partial y_j} \right) \Big|_{j=1} = 0 \quad (3.20)$$

gdje je μ_j modul smicanja u j -tom sloju. Rješenje glasi:

$$b_1 = a_1 e^{-2ik_1 H_1} = a_1 e^{-2is_1} \quad (3.21)$$

gdje smo uveli pokratu $s_j = k_j H_j$, $j=1, \dots, N$. Drugi rubni uvjet je kontinuiranost na granicama sredstva ($v_j = v_{j+1}$) gdje uz primjenu $z_j = 0$, odnosno $z_{j+1} = -H_{j+1}$ dobivamo sljedeću relaciju:

$$a_j + b_j = a_{j+1} e^{-is_{j+1}} + b_{j+1} e^{is_{j+1}}. \quad (3.22)$$

Općeniti rubni uvjet za napetost na granicama slojeva glasi:

$$p_{zy,j-1} = p_{zy,j} \Big|_{z_{j-1}=0, z_j=-H_j}, \quad p_{zy,j} = \mu_j \frac{\partial v_j}{\partial z_j}. \quad (3.23)$$

Rješavanjem prethodne jednadžbe i korištenjem modula smicanja $\mu_j = \rho_j c_j^2$ dobivamo sljedeću jednadžbu:

$$\frac{\rho_{j-1} c_{j-1}}{\rho_j c_j} (a_{j-1} - b_{j-1}) = a_j e^{-is_j} - b_j e^{-is_j}. \quad (3.24)$$

Pomoću prethodnog izraza možemo definirati izraz za relativnu seizmičku impedanciju:

$$\alpha_{j-1} = \frac{\rho_{j-1} c_{j-1}}{\rho_j c_j}, \quad (3.25)$$

definiranu kao omjer umnoška gustoće ρ i brzine seizmičkih valova c u plićem i dubljem sloju. Nadalje, jednadžbu (3.24) sada zapisujemo kao:

$$\alpha_{j-1} (a_{j-1} - b_{j-1}) = a_j e^{-is_j} - b_j e^{-is_j}. \quad (3.26)$$

Oduzimanjem jednadžbe (3.26) od jednadžbe (3.22) te nakon toga njihovim zbrajanjem dobivamo izraze za amplitude upadnog i reflektiranog vala:

$$b_j = \frac{1}{2} [(1 - \alpha_{j-1})a_{j-1} + (1 + \alpha_{j-1})b_{j-1}] e^{-is_j}, \quad (3.27)$$

$$a_j = \frac{1}{2} [(1 + \alpha_{j-1})a_{j-1} + (1 - \alpha_{j-1})b_{j-1}] e^{is_j}. \quad (3.28)$$

Prethodne jednadžbe zapisujemo u matričnom obliku:

$$\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1 + \alpha_{j-1})e^{is_j} & (1 - \alpha_{j-1})e^{is_j} \\ (1 - \alpha_{j-1})e^{-is_j} & (1 + \alpha_{j-1})e^{-is_j} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{j-1} \\ b_{j-1} \end{bmatrix}. \quad (3.29)$$

Definiramo matrice S_j i $2T_{j-1}$ na sljedeći način:

$$S_j = \begin{bmatrix} e^{is_j} & 0 \\ 0 & e^{-is_j} \end{bmatrix}, \quad 2T_{j-1} = \begin{bmatrix} 1 + \alpha_{j-1} & 1 - \alpha_{j-1} \\ 1 - \alpha_{j-1} & 1 + \alpha_{j-1} \end{bmatrix}. \quad (3.30)$$

Prethodne izraze uvrstimo u izraz (3.29) te dobivamo:

$$\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} = S_j T_{j-1} \begin{bmatrix} a_{j-1} \\ b_{j-1} \end{bmatrix}. \quad (3.31)$$

Nadalje, uvrstimo li rubni uvjet na vrhu poluprostora ($z_N=0$) u jednađbe (3.22) i (3.26) dobivamo:

$$\begin{aligned} a_N + b_N &= a_{N+1} + b_{N+1} \\ \alpha_N(a_N - b_N) &= a_{N+1} - b_{N+1}, \end{aligned} \quad (3.32)$$

odnosno:

$$\begin{bmatrix} a_{N+1} \\ b_{N+1} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \alpha_N & 1 - \alpha_N \\ 1 - \alpha_N & 1 + \alpha_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_N \\ b_N \end{bmatrix} = T_N \begin{bmatrix} a_N \\ b_N \end{bmatrix}. \quad (3.33)$$

Pomak u koordinatnom sustavu najdonjeg sloja definiramo kao:

$$v_{N+1} = a_{N+1}e^{i(\omega t + k_{N+1}z_N)} + b_{N+1}e^{i(\omega t - k_{N+1}z_N)}. \quad (3.34)$$

Općenito vrijedi:

$$\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} = S_j T_{j-1} S_{j-1} T_{j-2} \dots S_2 T_1 \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix}. \quad (3.35)$$

Primijenimo li izraze (3.21) i (3.30) na prethodni izraz dobivamo:

$$\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} = a_1 e^{-is_1} S_1 \left[\prod_{k=1}^{j-1} T_k S_k \right] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3.36)$$

Onda vrijedi sljedeće:

$$\begin{bmatrix} x_j + iy_j \\ x_j + iy_j \end{bmatrix} = \left[\prod_{k=1}^{j-1} T_k S_k \right] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

gdje se veličine s crticom odnose na reflektirani val. Pretpostavimo li $j=N$ i uvrstimo li jednađbu (3.37) u jednađbu (3.33) dobivamo:

$$a_{N+1} = a_1 e^{-is_1} (x_{N+1} + iy_{N+1}) \quad (3.38)$$

čime smo izrazili amplitudu u poluprostoru amplitudom na površini. Kako bismo procijenili kako će se amplituda vala povećati prilikom prolaska kroz određene slojeve, pretpostavit ćemo da je $a_{N+1}=1$ i promatrati koliko je povećanje amplitude vala na površini. Uvrstimo jednađbu (3.38) u jednađbu (3.36), odnosno:

$$\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} = \frac{a_{N+1}}{x_{N+1} + iy_{N+1}} S_j \begin{bmatrix} x_j + iy_j \\ x_j + iy_j \end{bmatrix}. \quad (3.39)$$

Nadalje, pomak na površini ($z_1=-H_1$) je:

$$v_1 = a_1 e^{i(\omega t - k_1 H_1)} + b_1 e^{i(\omega t + k_1 H_1)} = 2a_1 e^{i\omega t} e^{-is_1}. \quad (3.40)$$

Uvrstimo li (3.38) u prethodnu jednađbu dobivamo:

$$v_1 = \frac{2}{(x_{N+1}^2 + y_{N+1}^2)^{1/2}} a_{N+1} e^{i(\omega t - \arctg \frac{y_{N+1}}{x_{N+1}})} \quad (3.41)$$

gdje smo koristili $x + iy = r e^{i\phi}$. Iz jednađbe (3.41) može se izračunati gibanje površine ovog modela uzrokovano harmonijskom pobudom. Promotrimo slučaj kada nad poluprostorom nema niti jednog sloja, odnosno pretpostavimo li iznad poluprostora beskonačno tanki sloj gustoće 0:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} = \{\rho_1 = 0\} = 0 \\ s_1 &= k_1 H_1 = \{H_1 \rightarrow 0\} = 0. \end{aligned} \quad (3.42)$$

Korištenjem prethodnih izraza i jednadžbe (3.37) dobivamo:

$$\begin{bmatrix} x_2 + iy_2 \\ x_2' + iy_2' \end{bmatrix} = T_1 S_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.43)$$

odnosno $x_2 = x_2' = 1$ i $y_2 = y_2' = 0$. Uvrstimo li dobiveno u jednadžbu (3.41) dobivamo pomak na površini:

$$v_1 = 2a_2 e^{i(\omega t - \arctg \frac{y_1}{x_1})} = 2a_2 e^{i\omega t}. \quad (3.44)$$

Zaključujemo da površina oscilira dvostrukom amplitudom a_2 zbog konstruktivne interferencije upadnog vala i vala reflektiranog od slobodne površine. Sada možemo definirati amplifikacijski spektar:

$$AMP(\omega) = \frac{1}{(x_{N+1}^2 + y_{N+1}^2)^{1/2}} = \frac{a_1}{a_{N+1}}. \quad (3.45)$$

Amplifikacijski spektar $AMP(\omega)$ pokazuje koliko puta više će oscilirati slobodna površina slojevitog poluprostora od amplitude pri frekvenciji ω kojom bi oscilirala da ne postoji niti jedan sloj (iznad poluprostora).

Jednadžbu (3.37) zapišemo u obliku rekurzivne formule:

$$\begin{bmatrix} x_{j+1} + iy_{j+1} \\ x_{j+1}' + iy_{j+1}' \end{bmatrix} = T_j S_j \begin{bmatrix} x_j + iy_j \\ x_j' + iy_j' \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

odnosno:

$$\begin{aligned} 2x_{j+1} &= (x_j + \alpha_j x_j + x_j' - \alpha_j x_j') \cos(s_j) + (-y_j - \alpha_j y_j + y_j' - \alpha_j y_j') \sin(s_j) \\ 2y_{j+1} &= (y_j + \alpha_j y_j + y_j' - \alpha_j y_j') \cos(s_j) + (x_j + \alpha_j x_j - x_j' + \alpha_j x_j') \sin(s_j) \\ 2x_{j+1}' &= (x_j - \alpha_j x_j + x_j' + \alpha_j x_j') \cos(s_j) + (-y_j + \alpha_j y_j + y_j' + \alpha_j y_j') \sin(s_j) \\ 2y_{j+1}' &= (y_j - \alpha_j y_j + y_j' + \alpha_j y_j') \cos(s_j) + (x_j - \alpha_j x_j - x_j' - \alpha_j x_j') \sin(s_j). \end{aligned} \quad (3.47)$$

Ako je $j=1$ i $x_1 = x_1' = 1$, $y_1 = y_1' = 0$ onda uvrštavanjem tih izraza u (3.47) dobivamo:

$$x_2 = x_2', \quad y_2 = -y_2'. \quad (3.48)$$

Matematičkom indukcijom se zaključuje da prethodni izraz vrijedi i za $j=1, \dots, N$. Uvrstimo li izraz (3.48) u (3.47) dobivamo:

$$\begin{aligned} x_{j+1} &= x_j \cos(s_j) - y_j \sin(s_j) \\ y_{j+1} &= \alpha_j (x_j \sin(s_j) + y_j \cos(s_j)). \end{aligned} \quad (3.49)$$

Jednadžbe (3.49) omogućavaju izračun amplifikacijskog spektra $AMP(\omega)$. Kako bismo izračunali amplifikacijski spektar $AMP(\omega)$ važno je poznavati građu podzemlja, i to barem do nivoa osnovne stijene, jer na toj dubini nemamo nekonsolidiranih materijala s malom brzinom rasprostiranja prostornih valova. Kako je opisano jednadžbom (3.45) amplifikacijski spektar $AMP(\omega)$ pokazuje koliko je povećanje amplitude prostornih valova (P- i S-valova) površine u odnosu na osnovnu stijenu:

$$\begin{aligned} AMP_P(f) &= \frac{a_{P,s}}{a_{P,b}} \\ AMP_S(f) &= \frac{a_{S,s}}{a_{S,b}} \end{aligned} \quad (3.50)$$

gdje je s oznaka za slobodnu površinu (engl. *surface*), a b oznaka za osnovnu stijenu (engl. *bedrock*). Istraživanjima je dokazano da su amplitude P- i S- valova na osnovnoj stijeni jednake te zbog toga možemo definirati HVSR kao omjer spektara horizontalne komponente gibanja tla $a_{S,s}$ i vertikalne komponente $a_{P,s}$ zabilježene na površini tla:

$$HVSR(f) = \frac{AMP_S(f)}{AMP_P(f)} = \frac{a_{S,s}(f)}{a_{P,s}(f)}. \quad (3.51)$$

Metoda se temelji na pretpostavci da je brzina rasprostiranja P-valova puno veća od brzine S-valova što uzrokuje više vlastite frekvencije tla za P- nego za S-valove, odnosno ravni spektar P-valova na nižim frekvencijama.

4 Mikrosezmički nemir

Mikroseizmički nemir je stalno podrhtavanje tla Zemlje. Razlikuju se dvije vrste izvora koje ga uzrokuju. Prirodni izvori su vjetar, promjene tlaka uzrokovane ciklonom i anticiklonom ili udaranje morskih valova o obalu. Umjetni izvor uzrokovan je ljudskom aktivnošću. U velikim je gradovima to promet ili industrijski strojevi. Daleke izvore definiramo kao relativno niske frekvencije (0.1 do < 1 Hz) prirodnog porijekla (engl. *microtremor*), dok su visoke frekvencije (0.5 do > 10 Hz) uzrokovane ljudskom aktivnošću te ih definiramo kao bliske izvore (SESAME 2004).

Mjerenje mikroseizmičkog nemira koristan je alat za određivanje dinamičkih svojstava građevina, vlastite frekvencije i omjera mirenja. Naročito kod kulturno-povijesnih građevina, poput dvorca Trakošćan, važno je odrediti dinamička svojstva kako bismo dobili uvid u trenutno stanje građevine, odnosno njezin stupanj ugroženosti uslijed mogućeg potresa (Begović i sur., 2012; Fiaschi i sur., 2012). Također, mjerenja možemo provesti prije i nakon potresa kako bismo otkrili nova oštećenja (pukotine na zidu), odnosno smanjenje krutosti koja je glavni razlog "mekše" strukture građevine (Markušić i sur., 2021). Strukturna oštećenja građevine očitovat će se u smanjenju vlastite frekvencije građevine na određenim kritičnim točkama objekta nakon potresa (Gallipoli i sur., 2004). Također, usporedbom mjerenja mikroseizmičkog nemira unutar građevine i njezinoj neposrednoj blizini može se na vrijeme otkriti moguća rezonancija tlo-građevina koja često dovodi do velikih oštećenja, pa čak i urušavanja građevina. Pravovremeno otkrivanje promjena vlastite frekvencije građevine na kritičnim točkama te saniranje i ojačanje oštećene strukture, pridonosi očuvanju kulturne baštine i sigurnosti kulturno-povijesnih spomenika.

Nedostatak primjene metode koja uključuje mjerenje mikroseizmičkog nemira je ovisnost mjerenja o području na kojem se obavlja, ali i vremenu mjerenja. Provođenjem mjerenja u većim gradovima treba obratiti pažnju na vrijeme, odnosno preporuča se mjerenja obaviti po noći, kada je utjecaj čovjeka manji. Iz tog razloga su mjerenja ambijentalnih vibracija na dvorcu Trakošćan provedena radnim danom u kasnim večernjim satima kako prisutnost posjetitelja ne bi utjecala na rezultate. Ako su lokacije blizu obale, onda treba obratiti pažnju na utjecaj morskih valova ili rijeka, a u zimskom periodu godine treba pripaziti na snježni pokrov koji može utjecati na prigušenje određenih vlastitih frekvencija (Erceg, 2019). Također, u radu Mucciarelli i sur. (2001) zaključeno je da vjetar utječe na pouzdanost HVSR analize.

4.1 HVSR metoda

Omjer horizontalne i vertikalne komponente spektra, tzv. HVSR (engl. *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*) seizmička je metoda koja koristi mjerenja ambijentalnih vibracija za izračunavanje vlastite frekvencije građevine/tla i faktora amplifikacije, važnih parametara u protupotresnom inženjerstvu (Nakamura i Takizawa, 1989; Herak i sur., 2011). Ova je metoda zbog svog neinvazivnog utjecaja na okoliš te svoje brzine i jednostavnosti stekla primjenu u istraživanjima kulturno-povijesnih spomenika. Relativno pristupačna cijena instrumenata potrebnih za rad kao i jednostavnost analize podataka utjecali su na popularnost metode u posljednja dva desetljeća.

4.1.1 Povijesni pregled

Mikroseizmički nemir uzrokuje valno polje koje opisujemo pomoću prostornih (longitudinalnih, transverzalnih) i površinskih (Rayleighevih, Loveovih) valova. Nogoshi i Igarashi (1971) prvi su put u svom radu objasnili omjer horizontalne i vertikalne komponente (H/V) spektra pomoću Rayleighevih valova te zaključili da valno polje koje uzrokuje mikroseizmički nemir opisujemo isključivo Rayleighevim valovima. U primjerima koje su naveli, jasno je vidljivo da na maksimumu amplitude H/V omjera Rayleighevih valova, energija Rayleighevih valova je mala, približno jednaka nuli. Maksimalna energija Rayleighevih valova postignuta je na minimumu amplitude H/V omjera. Iz tog razloga zaključeno je da maksimum H/V krivulje, odnosno frekvencija na kojoj se javlja najveće pojačanje ne može biti opisana Rayleighevim valovima.

Nakamura i Takizaw (1989) omjer horizontalne i vertikalne komponente (H/V) spektra objašnjavaju uz pomoć višestruke refrakcije SH-valova (S-valovi polarizirani u horizontalnoj ravnini). Također, smatraju da je energija Rayleighevih valova jednaka nuli za maksimalnu amplitudu H/V krivulje, i obrnuto. U radu su definirali i HVSR kao omjer amplitude Fourierovog spektra horizontalne i vertikalne komponente mikroseizmičkog nemira, odnosno:

$$A(f) = HVSR(f) = \frac{\sqrt{F_{NS}(f) \cdot F_{EW}(f)}}{F_V}. \quad (4.1)$$

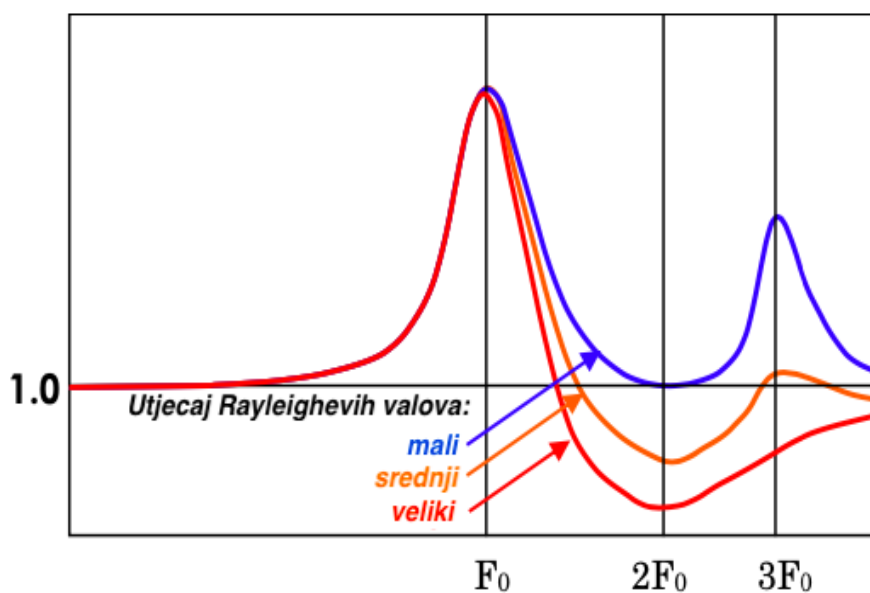
Amplituda $A(f)$ je ovisna o vlastitoj frekvenciji osciliranja sedimenta tla i pokazuje koliko je povećanje amplitude titranja površinskog vala u odnosu na osnovnu stijenu. Ovisno o geološkoj strukturi (debljina sedimenta, dubina od osnovne stijene), amplituda podrhtavanja tla za vrijeme potresa se može povećati ili smanjiti (Seismological Facility for the Advancement of Geoscience. [Internet], raspoloživo na: https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/buildings_bedrock_effects_of_amplification_liquefaction).

Pod pretpostavkom da se mikroseizmički nemir sastoji od površinskih valova, Bard (1999) u svom radu pokazuje povezanost između eliptičnosti Rayleighevih valova i omjera horizontalne i vertikalne komponente (H/V) spektra jer se vertikalna komponenta uglavnom sastoji od Rayleighevih valova.

Nakamura (2000) iznosi svoje neslaganje s prethodnom pretpostavkom iz razloga što se do zaključka došlo isključivo usporedbom H/V omjera mikroseizmičkog nemira i H/V omjera osnovnih modova Rayleighevih valova.

Kao glavni nedostatak Nakamurine metode, u radu Mucciarelli i sur. (2001), navodi se netočnost određivanja amplifikacije seizmičke pobude.

Nakamura (2008) opisuje ovisnost omjera horizontalne i vertikalne komponente (H/V) spektra o frekvenciji i udjelu Rayleighevih valova (Slika 4.1). Prvi maksimum u blizini F_0 nastaje pretežito zbog S-valova. Prvi minimum u blizini $2F_0$ uzrokovan je Rayleighevim valovima. Također, oko F_0 nema energije Rayleighevih valova te su krivulje disperzije nestabilne. Nadalje, utjecaj Rayleighevih valova raste od F_0 prema $2F_0$. Zaključeno je da je omjer horizontalne i vertikalne komponente (H/V) spektra mikroseizmičkog nemira, ali i jakih podrhtavanja tla, koristan alat u izračunu vlastite frekvencije i pripadnog amplifikacijskog faktora.



Slika 4.1: Prikaz ovisnosti omjera horizontalne i vertikalne komponente (H/V) spektra o frekvenciji i udjelu Rayleighevih valova. Plavom bojom je označen najmanji utjecaj Rayleighevih valova, dok je crvenom označen najveći utjecaj Rayleighevih valova. Maksimum oko F_0 nastaje zbog S-valova i Rayleighevi valovi nemaju energiju (krivulje disperzije su nestabilne). Minimum oko $2F_0$ uzrokuju Rayleighevi valovi. (izvor: Nakamura, 2008)

U radu Bonnefoy-Claudet i sur. (2008) valno polje koje uzrokuje mikroseizmički nemir sastavljeno je od prostornih, ali i površinskih valova. Definicija valnog polja mikroseizmičkog nemira i danas je tema mnogih debata znanstvenika.

4.1.2 Primjena HVSR metode

Posljednja tri desetljeća HVSR metoda, odnosno metoda omjera horizontalne i vertikalne komponente spektra mikroseizmičkog nemira, najčešće je korištena za određivanje odziva tla (rezonantne frekvencije) i faktora amplifikacije (Begović i sur., 2012; Castellaro i sur., 2016; Fiaschi i sur., 2012; Herak, 2011; Herak i sur., 2010; Mucciarelli i sur., 2011). Također, HVSR metoda koristi se za seizmičko mikrozoniranje velikih gradova zbog neinvazivnog djelovanja na okoliš te svoje brzine i jednostavnosti. Seizmička mikrozonacija je postupak u kojemu potresno osjetljivo područje podijelimo na zone s obzirom na geološka i geofizička obilježja (Uglešić, 2021). HVSR metodu možemo primijeniti i prilikom istraživanja sedimentacijskih bazena gdje procjenjujemo ovisnost rezonantnih frekvencija o dubini bazena. U kombinaciji s geoelektričnom tomografijom može se koristiti u istraživanju klizišta (Gallipoli i sur., 2000).

U radu Fiaschi i sur. (2012) provedena su mjerenja mikroseizmičkog nemira na području Bazilike Svetog Groba zbog potresa duž rasjeda Mrtvog mora koji predstavljaju značajnu seizmičku opasnost za grad Jeruzalem. Mjerenja su korištena u svrhu procjene odziva tla budući da se Bazilika nalazi na aluvijalnim naslagama. Istraživanje nije pokazalo moguću amplifikaciju lokalnog aluvijalnog tla s obzirom na vlastite frekvencije Bazilike.

Castellaro i sur. (2016) su proveli mjerenja mikroseizmičkog nemira instrumentom Tromino (MoHo) u blizini Eiffelovog tornja i na tri visine tornja (55 m, 116 m i 270

m). Korištena je HVSR metoda te su izračunate pripadne frekvencije kako bi se provjerila mogućnost rezonancije tlo-građevina. Rezultati ukazuju na prvi mod savijanja s frekvencijom od 0.32 Hz. Ovakav mod može uzrokovati pomak od 40% mase Eiffelovog tornja u horizontalnoj ravnini. Sljedećih pet modova (redom: mod smicanja, torzijski mod, mod smicanja, mod smicanja i torzijski mod) uzrokovali bi pomak 5-7% mase Eiffelovog tornja u horizontalnoj ravnini. Analiza mjerenja mikroseizmičkog nemira provedena u neposrednoj blizini Eiffelovog tornja, ukazuje na frekvenciju od 2 Hz. Rezonancija tlo-građevina moguća je tek na šestom modu (torzijskom) čija je frekvencija 2.1 Hz. S obzirom da se centar mase i centar krutosti Eiffelovog tornja ne podudaraju, uz translacijsko gibanje, toranj će se gibati i torzijski, čak i ako je ulazno gibanje čisto translacijsko. Uz HVSR analizu mjerenja mikroseizmičkog nemira u radu je provedeno i teorijsko modeliranje, odnosno metoda konačnih elemenata (engl. *finite element method*), kako bi se empirijska mjerenja usporedila s teorijskim modelom.

U radu Herak i sur. (2010) provedena su mjerenja ambijentalnih vibracija na 99 lokacija na području grada Stona u tri razdoblja (svibanj 2006. godine, rujan 2006. godine i listopad 2008. godine). Frekvencije dobivene HVSR analizom provedenih mjerenja ukazuju na frekvencije između 2.5 Hz i 4 Hz. Navedene frekvencije uspoređene su s frekvencijama dobivenim teorijskom analizom prostornih/površinskih valova te je utvrđeno njihovo poklapanje.

Begović i sur. (2012) su istražili potresnu ugroženost nekoliko povijesno važnih građevina u Zagrebu (The Regent Esplanade, DHMZ, Katedrala, Rektorat Sveučilišta u Zagrebu, muzej Mimara, Hrvatsko narodno kazalište) i njihova dinamička svojstva. Mjerenja ambijentalnih vibracija Tromino uređajem, provedena su ispred građevine te unutar uz nosive zidove po vertikalnom profilu kako bi se ispitala moguća rezonancija tlo-građevina. Rezultati su pokazali da najveću mogućnost rezonancije tlo-građevina imaju Katedrala i Hrvatsko narodno kazalište. Također, ukazano je na ranjivost povijesnih građevina u gradu Zagrebu te potrebu za strukturnim ojačanjem prilikom slijedeće renovacije.

5 Podaci i metode

5.1 Mjerni uređaj Tromino Engy

Za potrebe ovog rada mjerenja su izvršena instrumentom Tromino Engy (Micromed, Italy) koji je primjenu pronašao u inženjerskoj seizmologiji, ali i u geologiji. Koristi se za seizmičku mikrozonaciju, pasivnu seizmičku stratigrafiju, određivanje V_{s30} iz ograničene H/V krivulje te u našem slučaju za mjerenje ambijentalnih vibracija unutar građevina. Tromino Engy je prijenosni instrument mase oko 1 kg, dimenzija 10x14x8 cm (širina x visina x debljina) te ima ugrađenu Li-ion bateriju (Slika 5.1). U slučaju vremenski duljih mjerenja može se, umjesto baterije, koristiti AC punjač. U kućištu sadrži trokomponentni visoko-osjetljivi seizmograf s deset kanala. Od toga, tri kanala za mjerenje slabih ambijentalnih vibracija ± 1.2 mm/s, tri kanala za mjerenje jakih ambijentalnih vibracija ± 50 mm/s, tri kanala za mjerenje akceleracija tla $\pm 2g$ i jedan analogni kanal za trigger (MASW, refrakcija). Frekvencije uzorkovanja mogu biti u rasponu od 0.1 do 1024 Hz na svim kanalima s A/D pretvornikom. Također, sadrži i GPS prijemnik te raspolaže RAM memorijom od 2 GB. Važno je napomenuti da Tromino pravilno radi pri temperaturama zraka od -10°C do 70°C te da dobro podnosi vlagu (Erceg, 2019).

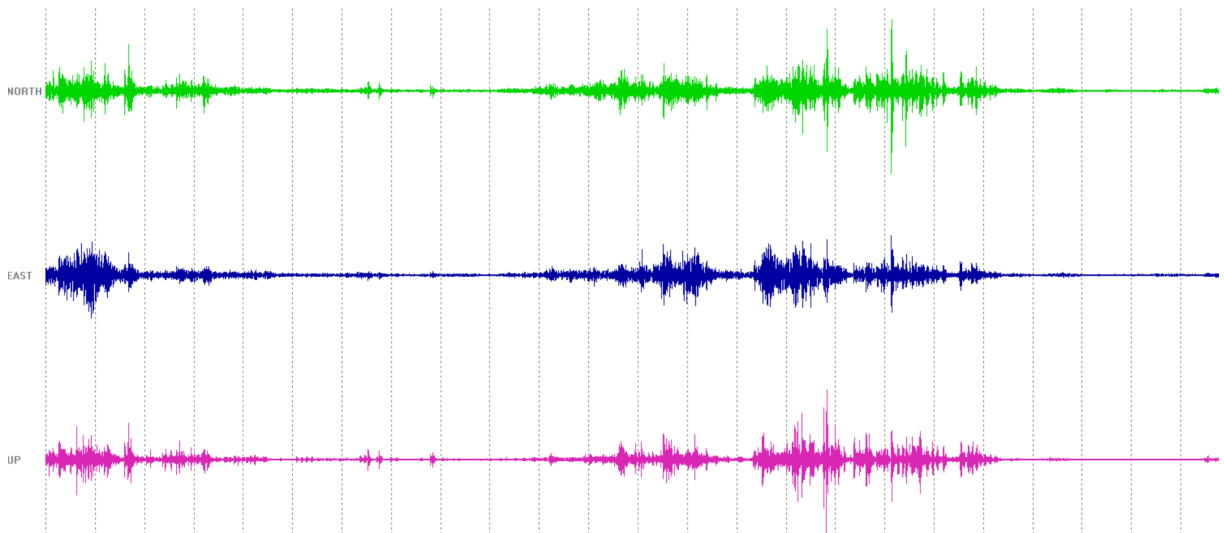
Mjerenja u dvorcu Trakošćan su za potrebe ovoga rada izvršena 28. veljače 2023. godine između 17:00 i 21:00 sat, kako prisutnost posjetitelja ne bi utjecala na rezultate. Svako mjerenje trajalo je 12 minuta s uzorkovanjem od 128 Hz. Usmjerenje je uređaja na svakom katu bilo duž sjeverne osi dvorca. Mjerenja su izvršena uz nosive zidove po vertikalnom profilu (SESAME 2004).



Slika 5.1: Prikaz Tromino Engy instrumenta (Micromed, Italij)

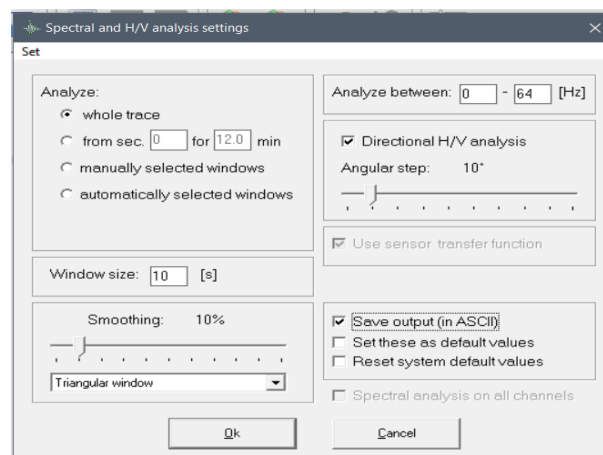
5.2 Analiza mikroseizmičkog nemira u programu Grilla

Nakon provedenih mjerenja, podaci se prebacuju s instrumenta na računalo pomoću programskog paketa Grilla (Micromed) kako bismo izračunali HVSR spektre. Na Slici 5.2 prikazan je izmjereni vremenski niz mikroseizmičkog nemira od 12 minuta po komponentama NS, EW (horizontalne) i V (vertikalna) na lokaciji na 2. katu u dvorcu Trakošćan.



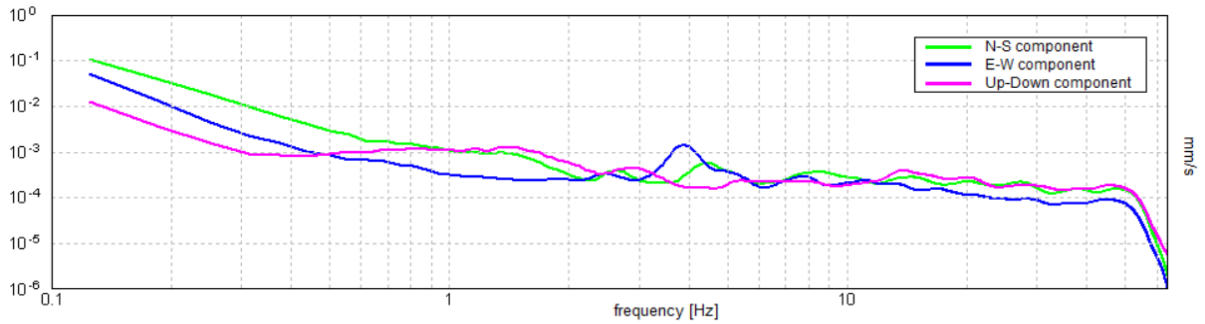
Slika 5.2: Prikaz vremenskog niza mikroseizmičkog nemira od 12 minuta (komponente: NS, EW, V) izmjerenog Trominom na jednoj od lokacija na 2. katu dvorca Trakošćan.

Svaki je niz podijeljen na prozore (engl. *window size*) od 10 sekundi te je provedena usmjerena HVSR analiza koja se pohranjuje u obliku ASCII koda na računalo (Slika 5.3).



Slika 5.3: Prikaz prozora za postavke i analizu u programu Grilla.

HVSR spektar, za svaki pojedini prozor, računamo kao omjer srednjaka Fourierovih spektara dviju horizontalnih komponenti (NS, EW) i Fourierovog spektra vertikalne komponente (V). Na Slici 5.4 prikazan je Fourierov amplitudni spektar za dvije horizontalne komponente (NS, EW) i vertikalnu komponentu (V).



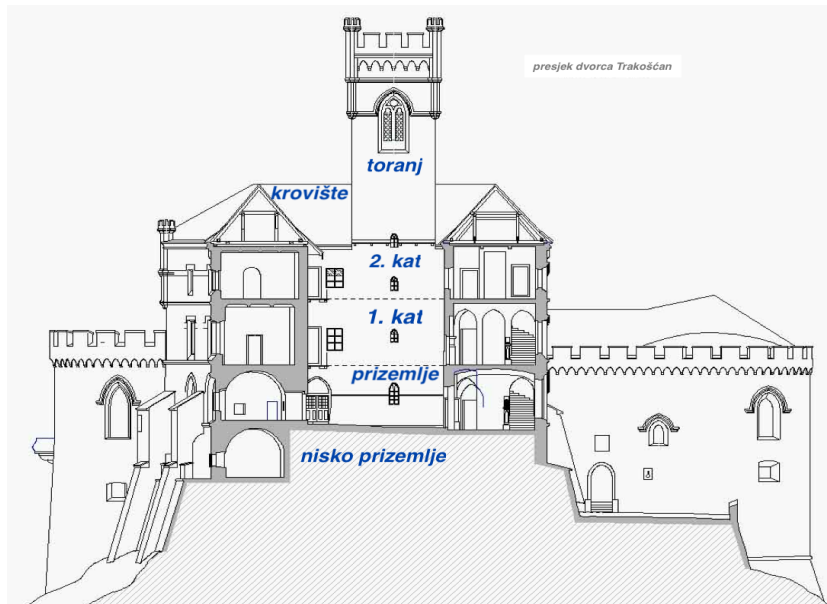
Slika 5.4: Fourierov amplitudni spektar za dvije horizontalne komponente (NS, EW) i vertikalnu komponentu (V).

Nakon provedene analize u programu Grilla i pohrane podataka u obliku ASCII koda, podaci se dalje obrađuju u programskom jeziku Python, odnosno u Jupyter Notebook-u.

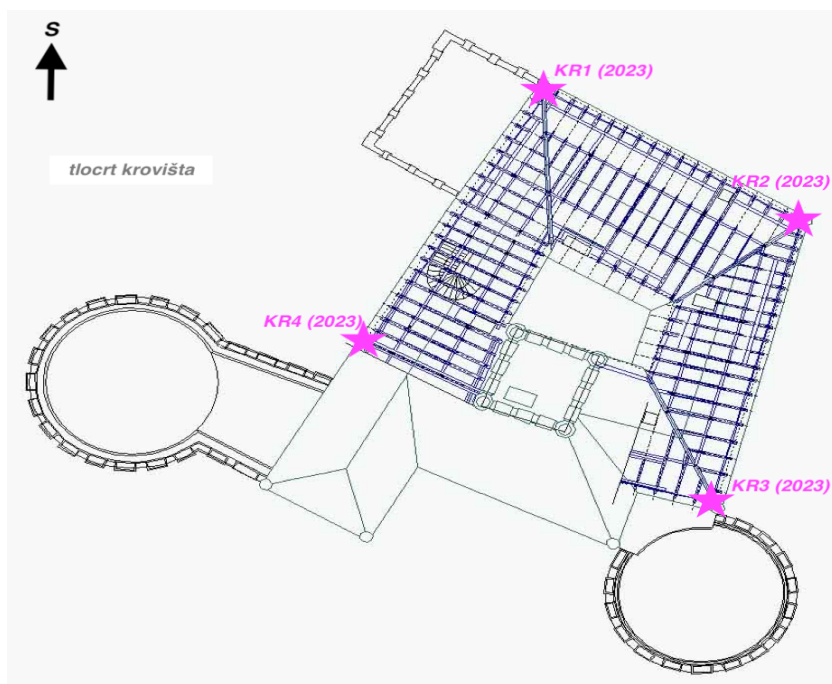
5.3 Mjerenja ambijentalnih vibracija u dvorcu Trakošćan

Mjerenja ambijentalnih vibracija u dvorcu Trakošćan izvršena su na tornju, krovu, drugom katu, prvom katu, prizemlju i u niskom prizemlju. Na Slici 5.5 prikazan je presjek dvorca Trakošćan s označenim katovima.

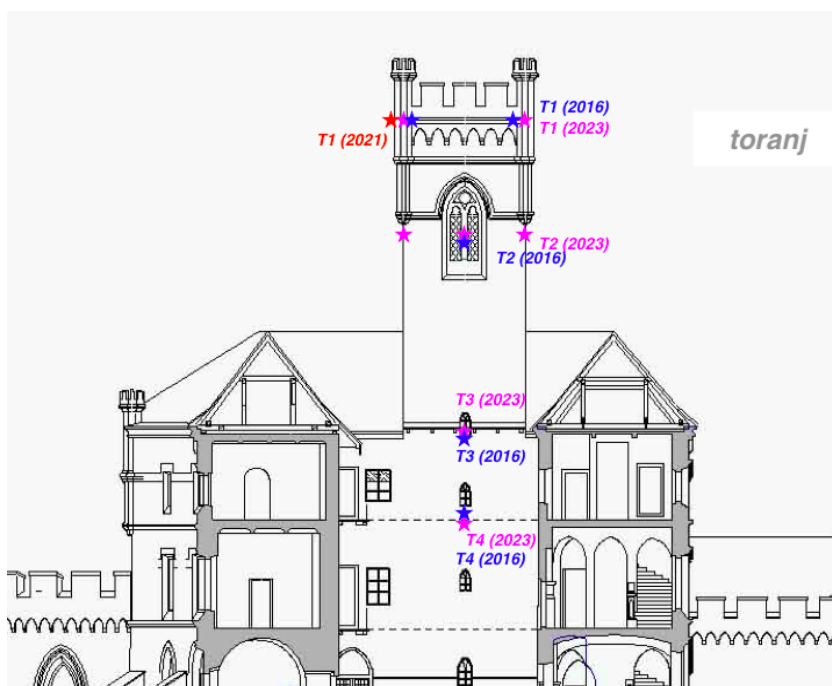
U krovu, 2023. godine, provedena su četiri mjerenja, po jedno u svakom uglu (Slika 5.6). Nadalje, u tornju dvorca Trakošćan, na četiri lokacije, provedena su mjerenja 2016. godine i 2023. godine (Slika 5.7), dok je na najvišoj lokaciji mjerenje ambijentalnih vibracija provedeno i 2021. godine nakon potresa u Zagrebu i Petrinji (Markušić i sur., 2021).



Slika 5.5: Presjek dvorca Trakošćan s označenim katovima na kojima su provedena mjerenja mikroseizmičkog nemira. (izvor: ustupljeno od strane uprave dvorca Trakošćan)



Slika 5.6: Prikaz lokacija mjerenja ambijentalnih vibracija u krovu dvorca Trakošćan 2023. godine. Ružičastim zvijezdama označene su lokacije mjerenja 2023. godine. (izvor: ustupljeno od strane uprave dvorca Trakošćan)

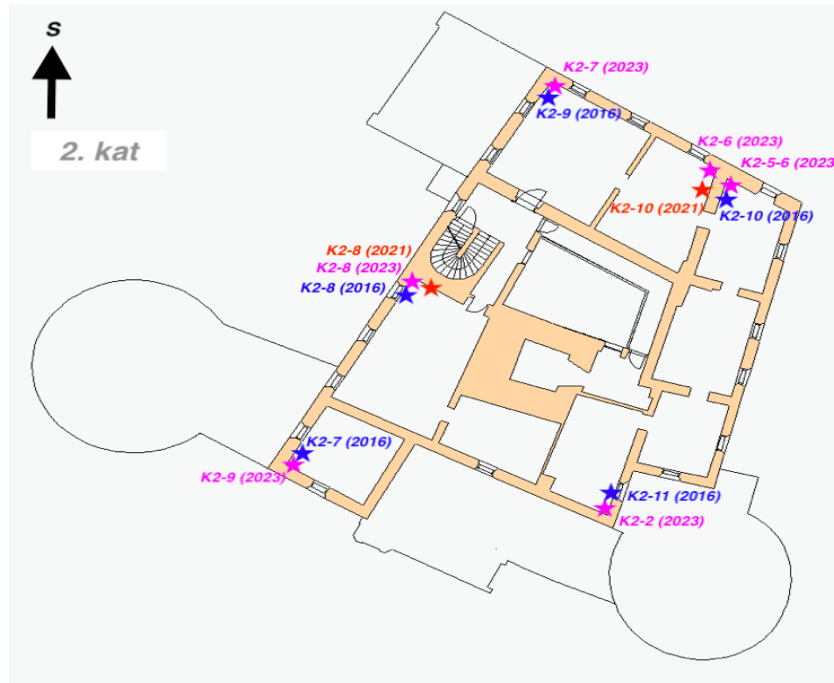


Slika 5.7: Prikaz lokacija mjerenja ambijentalnih vibracija u tornju dvorca Trakošćan 2016., 2021. i 2023. godine. Ružičastim zvijezdama označene su lokacije mjerenja 2023. godine, plavim zvijezdama mjerenja 2016. godine, a crvenom zvijezdom mjerenje iz 2021. godine. (izvor: ustupljeno od strane uprave dvorca Trakošćan)

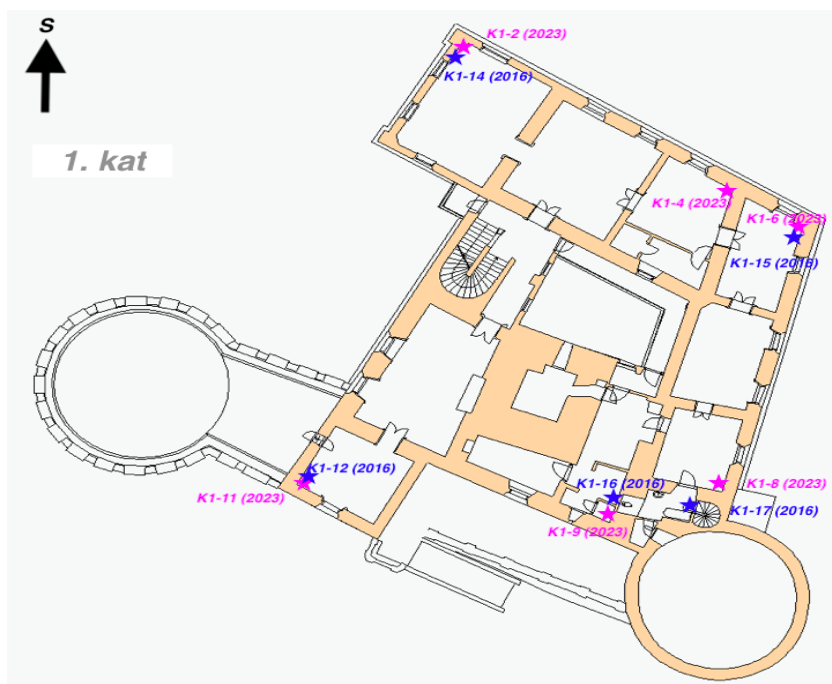
Na drugom katu izvršeno je šest mjerenja 2023. godine, pet mjerenja 2016. godine i dva mjerenja iz 2021. godine, nakon potresa u Zagrebu i Petrinji (Slika 5.8). Na

prvom katu dvorca provedeno je šest mjerenja ambijentalnih vibracija 2023. godine i pet mjerenja 2016. godine (Slika 5.9).

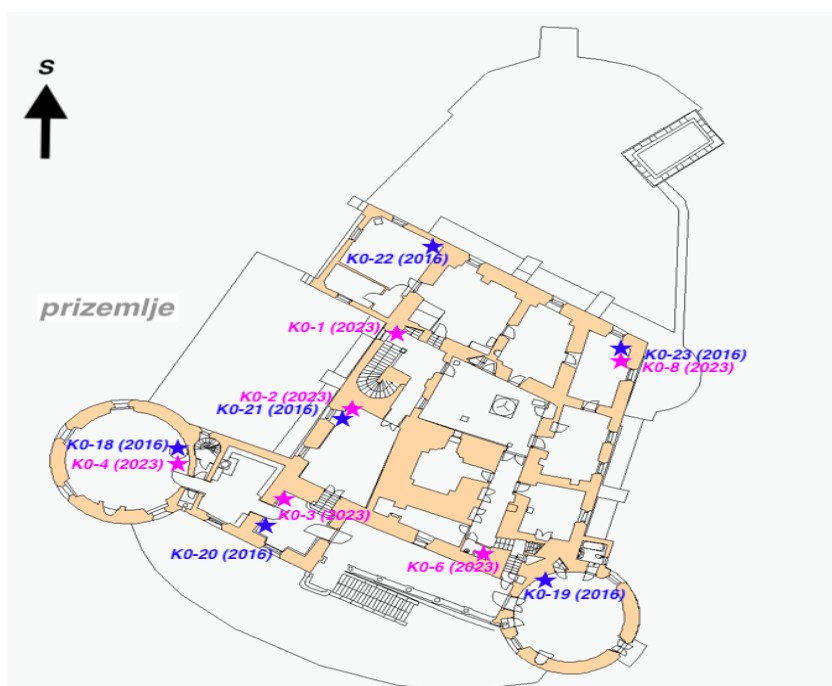
Nadalje, u prizemlju dvorca izvršeno je šest mjerenja 2023. godine i šest mjerenja iz 2016. godine (Slika 5.10). Naposljetku, u niskom prizemlju provedeno je pet mjerenja 2023. godine i pet mjerenja 2016. godine (Slika 5.11).



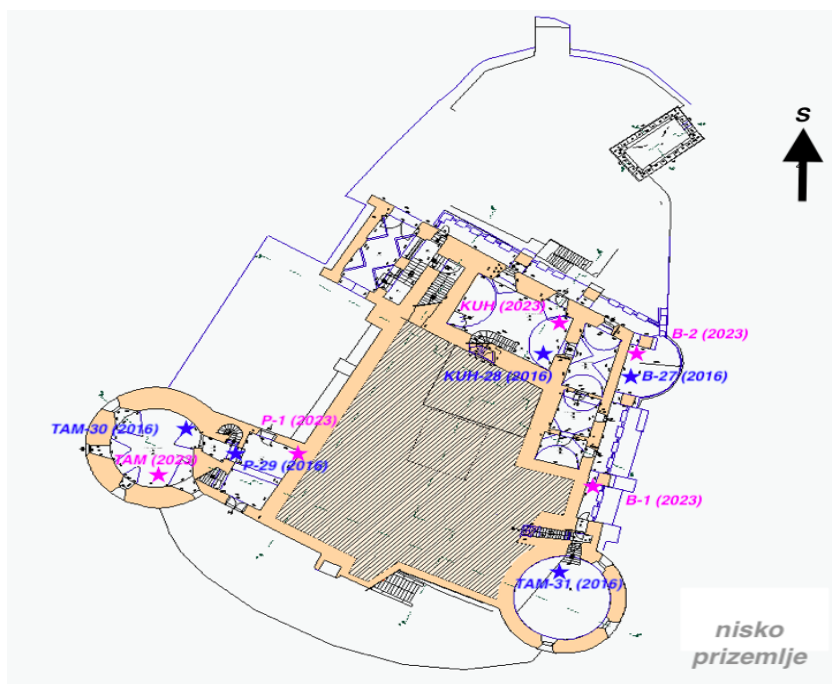
Slika 5.8: Prikaz lokacija mjerenja ambijentalnih vibracija na drugom katu dvorca Trakošćan 2016. i 2023. godine. Ružičastim zvijezdama označene su lokacije mjerenja 2023. godine, plavim zvijezdama mjerenja 2016. godine i crvenim zvijezdama mjerenja iz 2021. godine nakon potresa u Zagrebu i Petrinji. (izvor: ustupljeno od strane uprave dvorca Trakošćan)



Slika 5.9: Prikaz lokacija mjerenja ambijentalnih vibracija na prvom katu dvorca Trakošćan 2016. i 2023. godine. Ružičastim zvijezdama označene su lokacije mjerenja 2023. godine, plavim zvijezdama mjerenja 2016. godine. (izvor: ustupljeno od strane uprave dvorca Trakošćan)



Slika 5.10: Prikaz lokacija mjerenja ambijentalnih vibracija u prizemlju dvorca Trakošćan 2016. i 2023. godine. Ružičastim zvijezdama označene su lokacije mjerenja 2023. godine i plavim zvijezdama mjerenja 2016. godine. (izvor: ustupljeno od strane uprave dvorca Trakošćan)



Slika 5.11: Prikaz lokacija mjerenja ambijentalnih vibracija u niskom prizemlju dvorca Trakošćan 2016. i 2023. godine. Ružičastim zvijezdama označene su lokacije mjerenja 2023. godine i plavim zvijezdama mjerenja 2016. godine. (izvor: ustupljeno od strane uprave dvorca Trakošćan)

6 Rezultati

Mjerenja mikroseizmičkog nemira na lokacijama oko dvorca i u tornju, 2016. godine, omogućila su izračun lokalnog odziva tla u okolici dvorca Trakošćan, ali i procjenu seizmičke ugroženosti same građevine (Stanko i sur., 2016). Početkom 2021. godine, nakon zagrebačkog potresa 22. ožujka 2020. godine i potresa u Petrinji 29. prosinca 2020. godine, provedena su mjerenje ambijentalnih vibracija unutar dvorca, u tornju (kao i 2016. godine) i na dvije lokacije na drugom katu. Za obje serije mjerenja korišten je instrument Tromino Engy (Micromed, Italy). Svako mjerenje trajalo je deset minuta s frekvencijom uzorkovanja 128 Hz. Instrument je bio orijentiran u smjeru duže osi dvorca Trakošćan, koja se skoro poklapa sa sjevernim usmjerenjem. Ispitivanja su provedena uz nosive zidove po vertikalnom profilu.

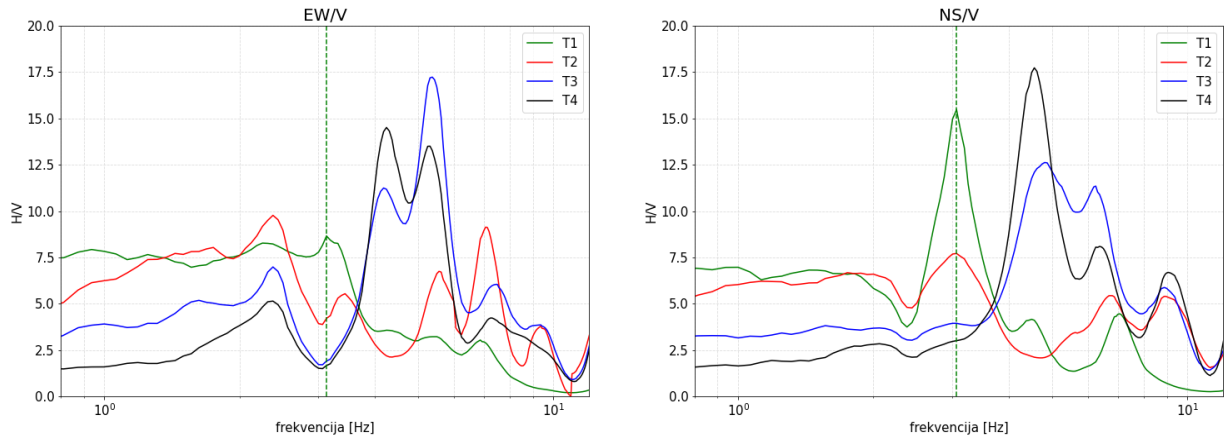
Usporedbom usmjerene HVSR analize mjerenja mikroseizmičkih nemira 2016., 2021. i 2023. godine, za horizontalne komponente (EW/V, NS/V) opisati će se dinamičko ponašanje dvorca Trakošćan. Analizom horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) umjesto usrednjenog omjera horizontalne i vertikalne komponente spektra H/V utvrditi ćemo koja komponenta više doprinosi usrednjenom omjeru H/V te u kojem će smjeru osnovna frekvencija biti polarizirana (Stanko i sur., 2016).

6.1 Toranj

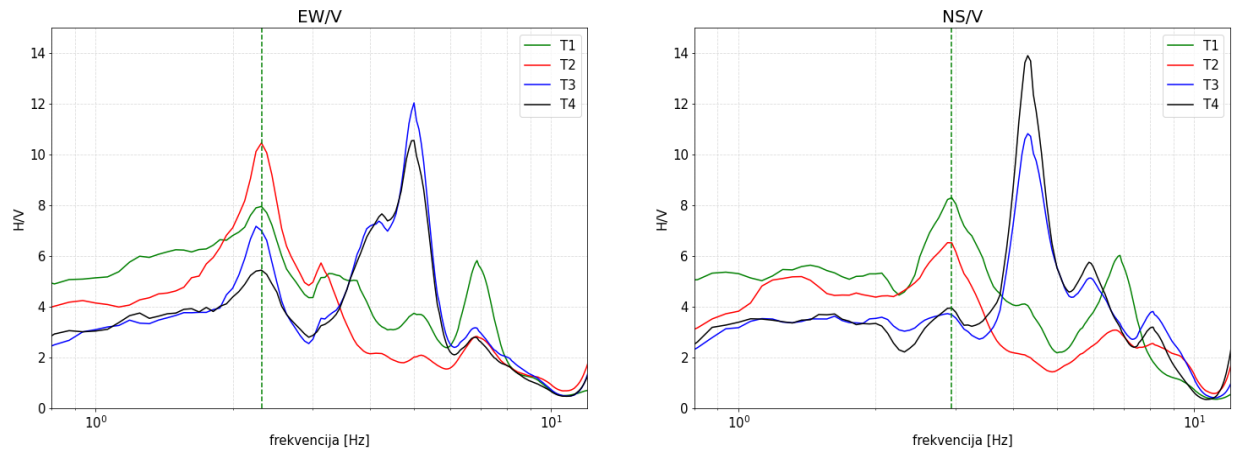
Na Slikama 6.1 i 6.2 prikazane su ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2016., 2021. i 2023. godine na visinama (od najviše do najniže točke) tornja dvorca: T1, T2, T3 i T4 (Slika 5.7). Također, vertikalnom zelenom crtom označena je vlastita frekvencija na visini T1 (najviša točka u tornju dvorca Trakošćan). U Tablici 1 prikazane su vlastite frekvencije na pojedinim visinama unutar tornja. Vidimo da su za obje horizontalne komponente (EW/V, NS/V) iz mjerenja 2023. godine, na visinama T1 i T2, frekvencije približno jednake (2.31 Hz, odnosno 2.94 Hz i 2.88 Hz). Na visinama T3 i T4 (2023) frekvencije su jednake za obje horizontalne komponente (5 Hz, odnosno 4.31 Hz). Razlika frekvencija na visinama T1 i T2 od visina T3 i T4 nije uzrokovana konstrukcijom tornja (Slika 5.7) već konstrukcijom dvorca. Na Slici 6.3 prikazana je ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenoj usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2016., 2021. i 2023. godine na visini T1 (najviša točka u tornju dvorca Trakošćan). Iz Tablice 1 i Slike 6.3 može se uočiti da se frekvencija horizontalnih komponenti 2023. godine smanjila (ili ostala jednaka) u odnosu na frekvencije dobivene mjerenjima 2016. i 2021. godine. Također, isti trend smanjenja frekvencija 2023. godine u odnosu na 2016. godinu, vidljiv je i na visini T2 i T3 za obje horizontalne komponente.

Tablica 1: Vlastite frekvencije izračunate usmjerenom HVSR metodom iz mjerenja ambijentalnih vibracija u tornju dvorca Trakošćan.

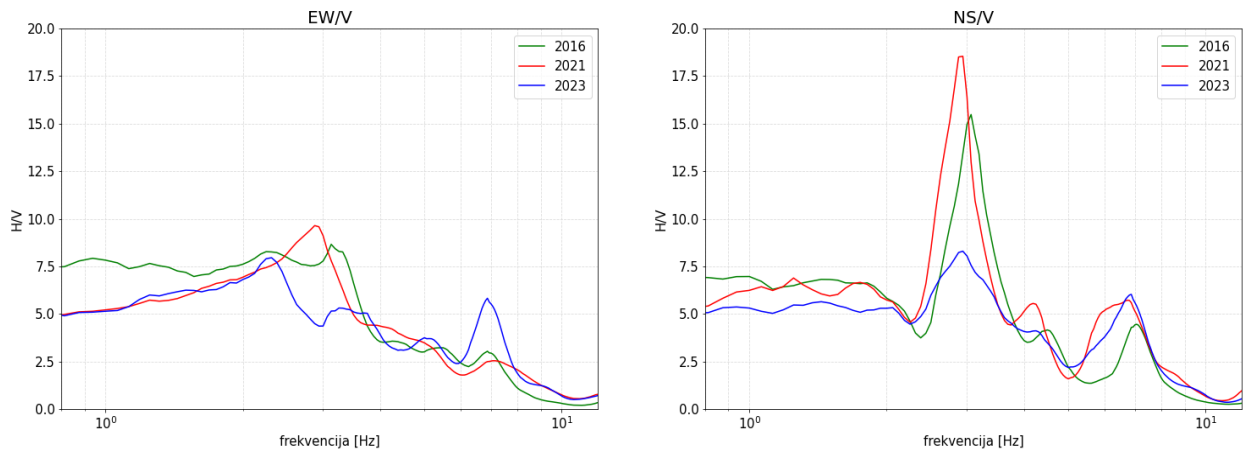
| TORANJ | | | | | | |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | EW/V | | | NS/V | | |
| | 2016 | 2021 | 2023 | 2016 | 2021 | 2023 |
| T1 | 3.13 Hz | 2.88 Hz | 2.31 Hz | 3.06 Hz | 2.94 Hz | 2.94 Hz |
| T2 | 2.38 Hz | - | 2.31 Hz | 3.06 Hz | - | 2.88 Hz |
| T3 | 5.38 Hz | - | 5 Hz | 4.81 Hz | - | 4.31 Hz |
| T4 | 4.25 Hz | - | 5 Hz | 4.56 Hz | - | 4.31 Hz |



Slika 6.1: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2016. godine na visinama T1, T2, T3 i T4 u tornju dvorca Trakošćan. Vertikalnom zelenom crtom označena je vlastita frekvencija na visini T1.



Slika 6.2: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2023. godine na visinama T1, T2, T3 i T4 u tornju dvorca Trakošćan. Vertikalnom zelenom linijom označena je vlastita frekvencija na visini T1.



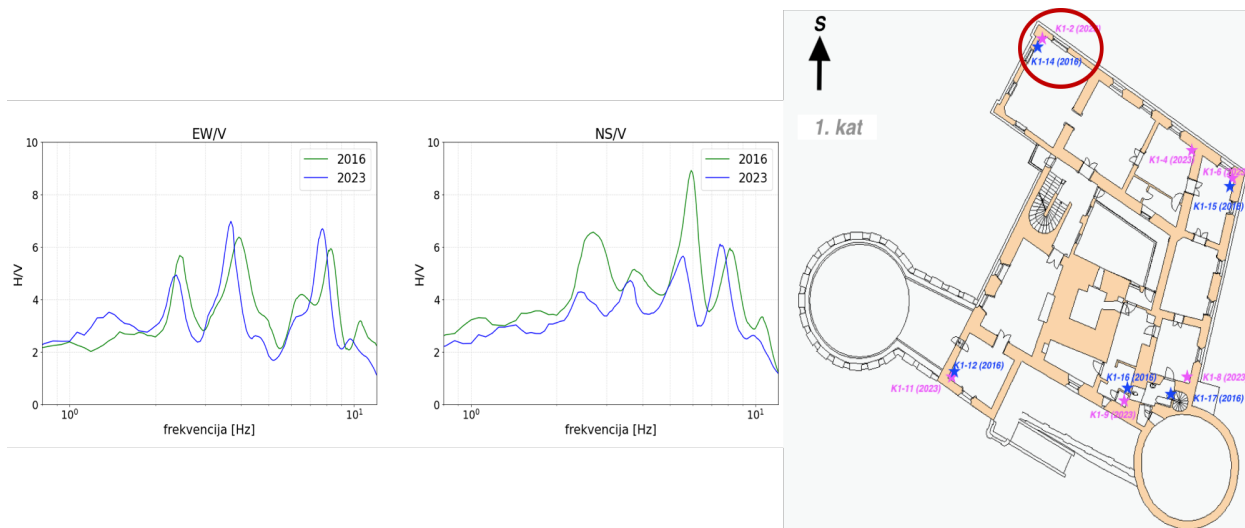
Slika 6.3: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2016., 2021. i 2023. godine na visini T1 (najviša točka tornja dvorca Trakošćan).

6.2 1. kat

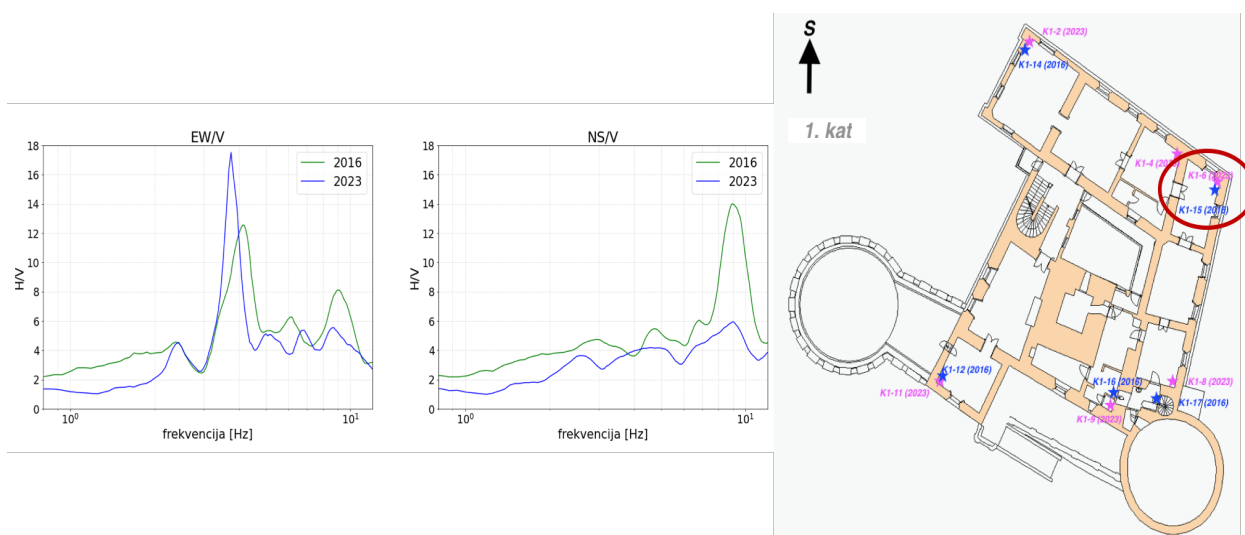
Na isti način kao i u tornju dvorca Trakošćan, na tri lokacije provedena je usporedba frekvencija horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) usmjerene HVSR analize (Slike 6.4, 6.5, 6.6) iz mjerenja 2016. i 2023. godine. U Tablici 2 upisane su lokacije, godina mjerenja ambijentalnih vibracija i vlastite frekvencije pojedine horizontalne komponente radi lakšeg otkrivanja smanjenja vlastite frekvencije između 2016. i 2023. godine. Vidljivo je smanjenje frekvencije na lokacijama K1-2 (2023), i K1-6 (2023) za komponentu EW/V, dok frekvencija ostaje ista ili se smanjuje za komponentu NS/V na lokacijama K1-6 (2023) i K1-9 (2023).

Tablica 2: Vlastite frekvencije izračunate usmjerenom HVSR metodom iz mjerenja ambijentalnih vibracija na 1. katu dvorca Trakošćan.

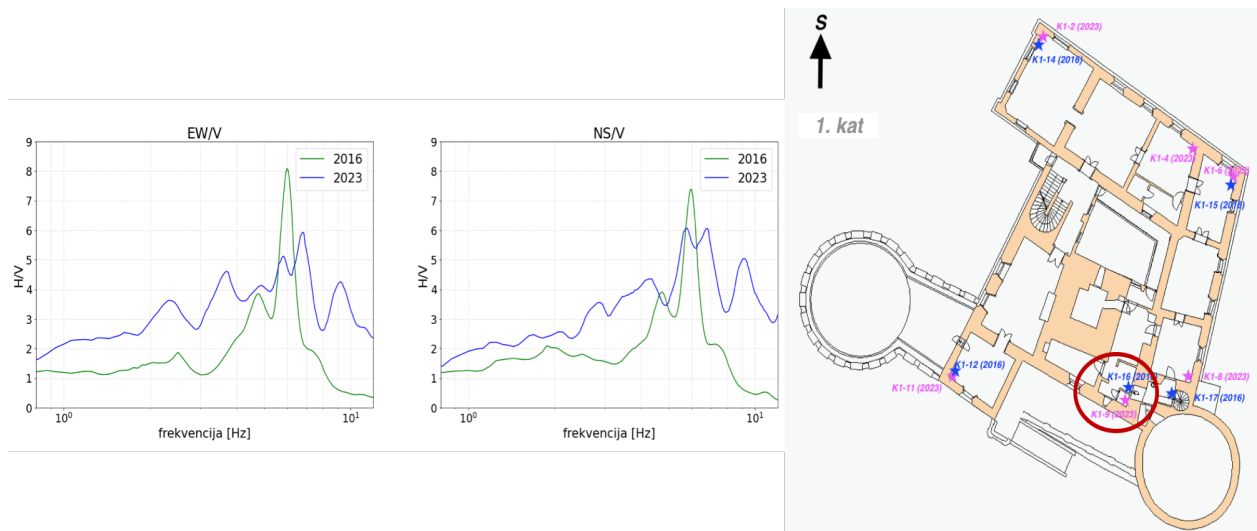
| 1.KAT | | |
|---------------------|---------|---------|
| | EW/V | NS/V |
| K1-14 (2016) | 3.94 Hz | 5.94 Hz |
| K1-2 (2023) | 3.69 Hz | 7.5 Hz |
| K1-15 (2016) | 4.13 Hz | 9 Hz |
| K1-6 (2023) | 3.75 Hz | 9 Hz |
| K1-17 (2016) | 6 Hz | 6 Hz |
| K1-9 (2023) | 6.81 Hz | 5.75 Hz |



Slika 6.4: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija na lokaciji K1-2 (2023), odnosno K1-14 (2016) na 1. katu. Crvenom oznakom obilježene su lokacije K1-2 (2023) i K1-14 (2016) na prvom katu dvorca Trakošćan.



Slika 6.5: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2016. i 2023. godine na lokaciji K1-6 (2023), odnosno K1-15 (2016) na 1. katu. Crvenom oznakom obilježene su lokacije K1-6 (2023) i K1-15 (2016) na prvom katu dvorca Trakošćan.



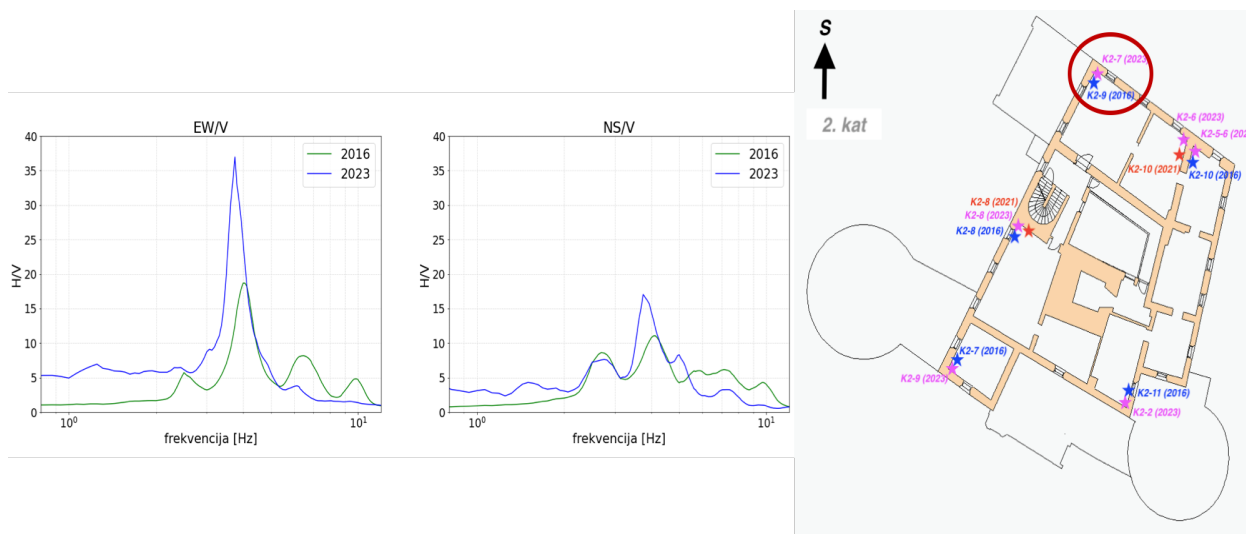
Slika 6.6: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2016. i 2023. godine na lokaciji K1-9 (2023), odnosno K1-16 (2016) na 1. katu. Crvenom oznakom obilježene su lokacije K1-9 (2023) i K1-16 (2016) na prvom kata dvorca Trakošćan.

6.3 2. kat

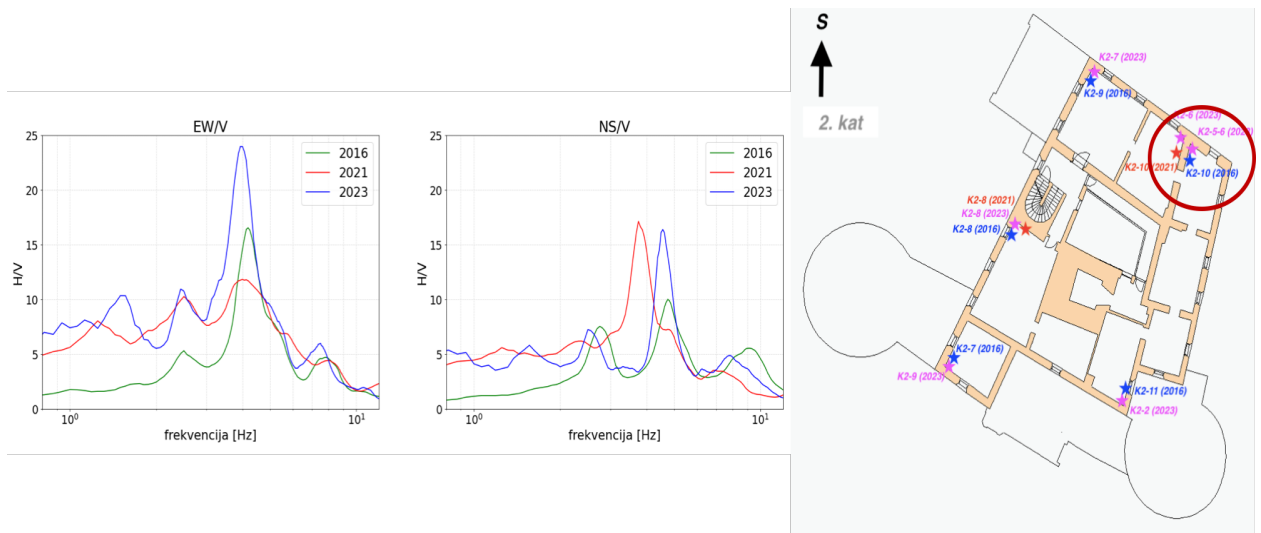
Na Slikama 6.7, 6.8, 6.9 i 6.10 prikazane su ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvencijama dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja mikroseizmičkog nemira na četiri lokacije na 2. katu dvorca Trakošćan. U Tablici 3 navedene su i vrijednosti frekvencija pojedinih horizontalnih komponenti zajedno s lokacijom mjerene točke te pripadnom godinom mjerenja. Zaključujemo da su se frekvencije obje horizontalne komponente na lokacijama K2-7, K2-5-6 i K2-9 (2023) smanjile u odnosu na frekvencije dobivene iz mjerenja 2016. godine. Također, može se primijetiti da je amplituda NS/V krivulje za sve tri lokacije manja od amplitude EW/V komponente. Mjerenja iz 2016. i 2023. godine dopunjena su mjerenjem iz 2021. godine (Markušić i sur., 2021) na lokacijama K2-8 i K2-10 (Slika 5.9). Za EW/V komponentu imamo kontinuirano smanjenje frekvencije od 2016. do 2023. godine za lokaciju K2-5-6, dok frekvencija NS/V komponente prvo opada između 2016. i 2021. godine te raste između 2021. i 2023. godine. Za lokaciju K2-8 uočavamo opadanje frekvencije obje komponente za razdoblje od 2016. do 2021. godine, dok kod komponente EW/V vidimo porast frekvencije u 2023. godini i stagnaciju vrijednosti frekvencije za komponentu NS/V u 2023. godini.

Tablica 3: Vlastite frekvencije izračunate HVSR metodom iz mjerenja ambijentalnih vibracija na 2. katu dvorca Trakošćan.

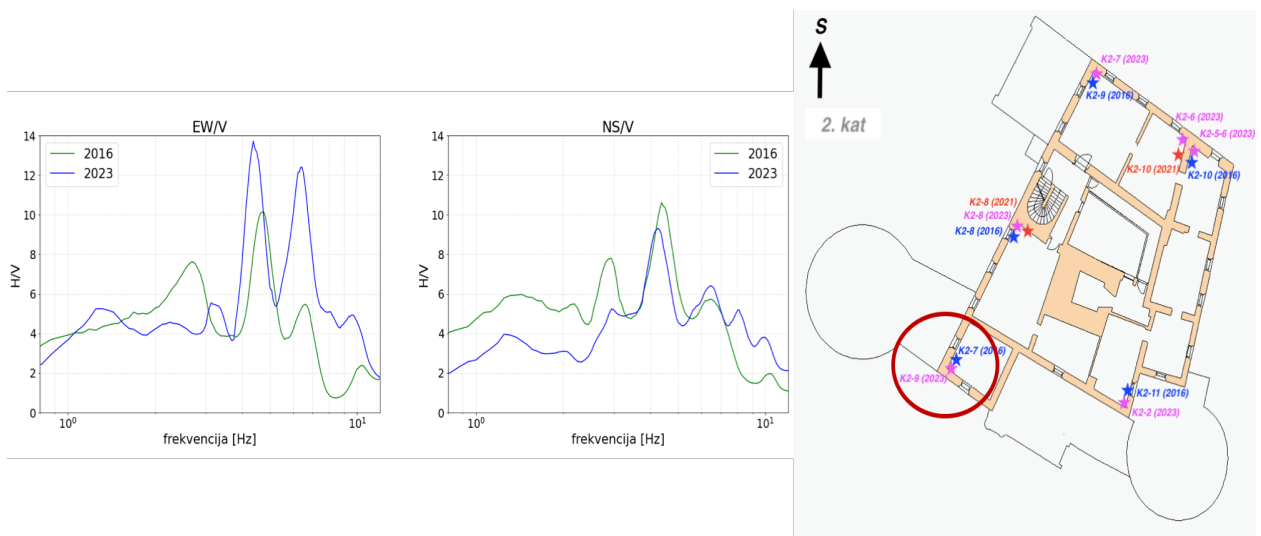
| | 2.KAT | |
|--------------------|---------|---------|
| | EW/V | NS/V |
| K2-9 (2016) | 4.06 Hz | 4.13 Hz |
| K2-7 (2023) | 3.75 Hz | 3.75 Hz |
| K2-10 (2016) | 4.19 Hz | 4.75 Hz |
| K2-10 (2021) | 4 Hz | 3.75 Hz |
| K2-5-6 (2023) | 3.94 Hz | 4.56 Hz |
| K2-7 (2016) | 4.69 Hz | 4.38 Hz |
| K2-9 (2023) | 4.38 Hz | 4.25 Hz |
| K2-8 (2016) | 2.5 Hz | 4.5 Hz |
| K2-8 (2021) | 0.31 Hz | 4.25 Hz |
| K2-8 (2023) | 4.06 Hz | 4.25 Hz |



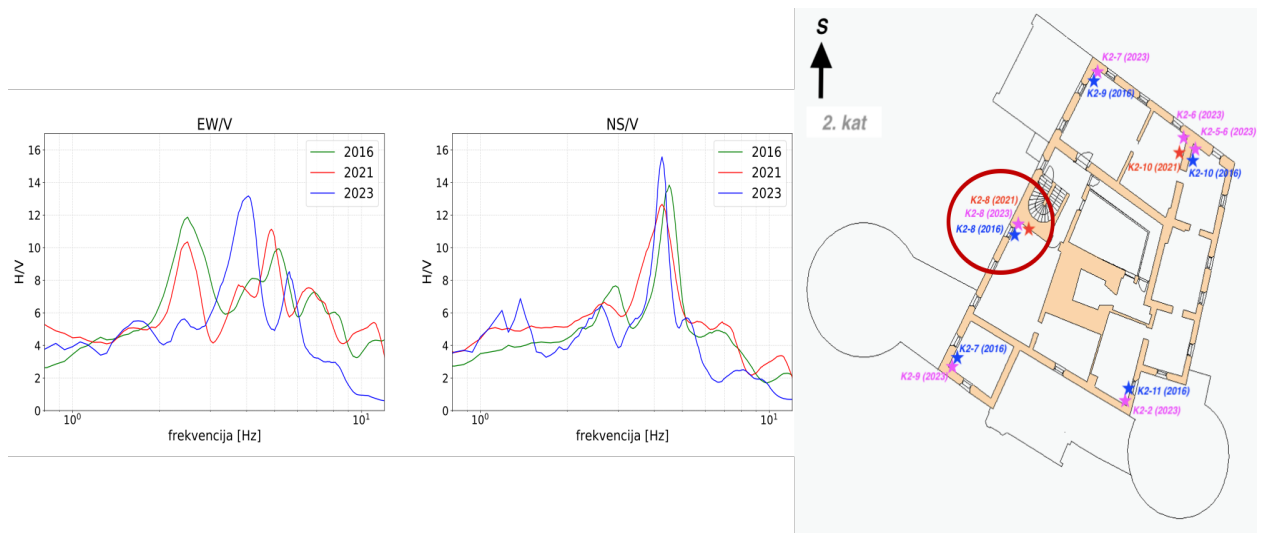
Slika 6.7: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija na lokaciji K2-7 (2023), odnosno K2-9 (2016) na 2. katu. Crvenom oznakom obilježene su lokacije K2-7 (2023) i K2-9 (2016) na drugom katu dvorca Trakošćan.



Slika 6.8: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2016., 2021. i 2023. godine na lokacijama K2-5-6 (2023), K2-10 (2016) i K2-10 (2021) na 2. katu. Crvenom oznakom obilježene su lokacije K2-5-6 (2023) i K2-10 (2016, 2021) na drugom katu dvorca Trakošćan.



Slika 6.9: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2016. i 2023. godine na lokaciji K2-9 (2023), odnosno K2-7 (2016) na 2. katu. Crvenom oznakom obilježene su lokacije K2-9 (2023) i K2-7 (2016) na drugom katu dvorca Trakošćan.



Slika 6.10: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2016. i 2023. godine na lokaciji K2-8 (2023, 2021, 2016) na 2. kat. Crvenom oznakom obilježene su lokacije K2-8 (2023, 2021, 2016) na drugom katu dvorca Trakošćan.

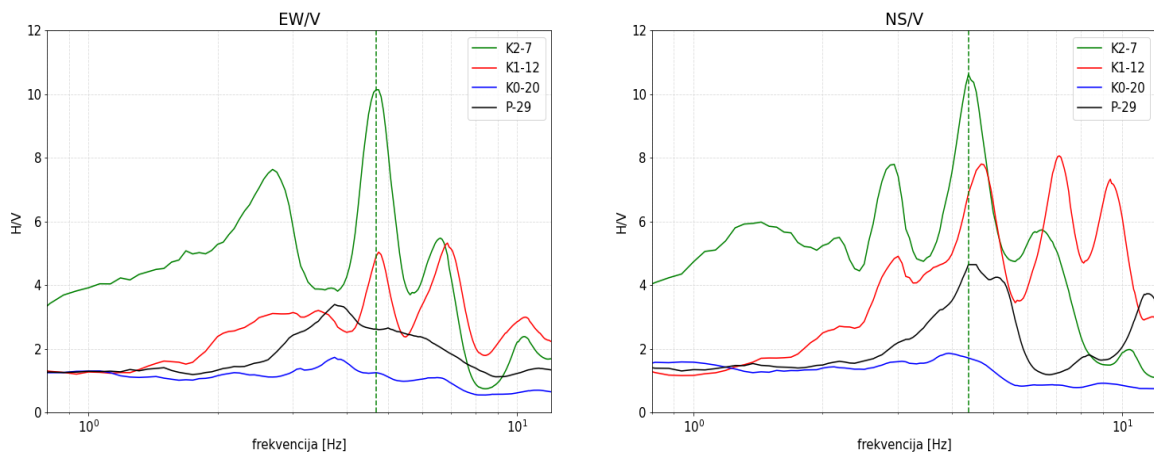
7 Diskusija

Toranj dvorca Trakošćan, prije rekonstrukcije, koja je trajala od 1840. do 1862. godine, bio je niži u odnosu na današnji. Naknadno, nakon rekonstrukcije, dodan je viši toranj na konstrukciju samoga dvorca zajedno s bakrenom kupolom koja je uklonjena 1961. godine. Glavni je problem nadogradnje ovoga tipa nedovoljno ojačanje konstrukcije (Stanko i sur., 2016). Nakon potresa 1982. godine, u kojemu je toranj bio oštećen, provedena je obnova i rekonstrukcija (Pintarić, 2006), ali i danas je toranj zatvoren za razgledavanje zbog sigurnosti posjetitelja. U ovom radu dokazali smo da određivanjem dinamičkih svojstava građevine na temelju mjerenja ambijentalnih vibracija, možemo bolje procijeniti potencijalne "slabe" točke promatrane strukture. U Tablici 1, na temelju ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji (Slike 6.1, 6.2), dobivenoj usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2016., 2021. i 2023. godine na visinama T1, T2, T3 i T4 (redom od najviše točke do najniže točke) u tornju dvorca Trakošćan, jasno je vidljiv pomak frekvencija na manje vrijednosti na visinama T1, T2 i T3 (EW/V, NS/V) te T4 (NS/V). Također, uočava se kako frekvencije imaju podjednake vrijednosti za položaje T1 i T2 (2023), koje su ujedno niže od vrijednosti frekvencija za T3 i T4 (2023). Rekonstrukcija tornja dvorca, odnosno nadogradnja tornja na vrh konstrukcije dvorca bez propisanog ojačanja, jedan je od razloga nejednakih frekvencija između položaja T1 (T2) i T3 (T4) na tornju. Zbog toga je frekvencija na položajima T3 i T4 veća (5 Hz) od frekvencije na položajima T1 i T2, odnosno bliža vrijednostima frekvencija same konstrukcije dvorca Trakošćan (1. i 2. kat).

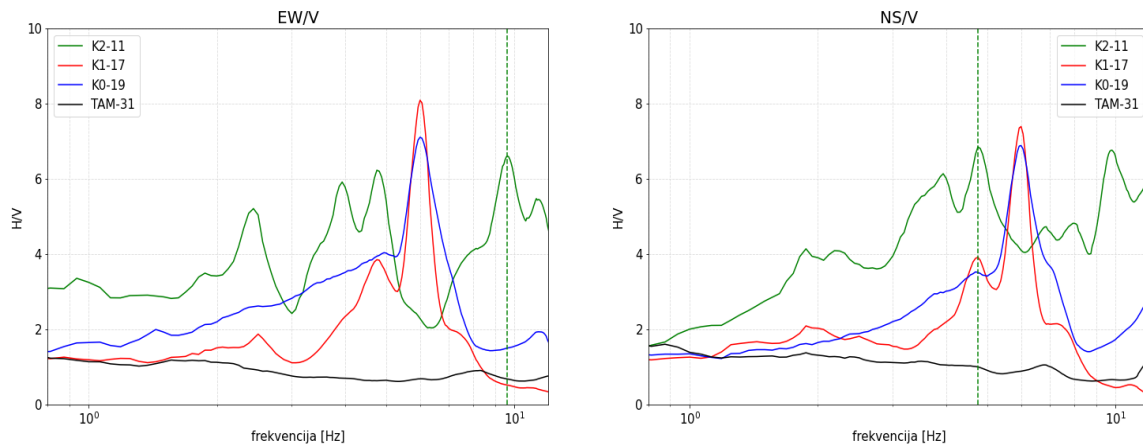
Nadalje, na 1. i 2. katu, usporedbom ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2016., 2021. i 2023. godine, vidljivo je smanjenje vlastite frekvencije na pojedinim lokacijama prikazanim na Slikama 6.4-6.10. Na promjenu vlastite frekvencije određene strukture, mogu utjecati prirodni izvori mikro seizmičkog nemira kao što su vjetar i promjena tlaka uzrokovana ciklonom/anticiklonom, ali i umjetni izvori poput ljudske aktivnosti i prometa. Jaka podrhtavanja tla, poput zagrebačkog potresa 22. ožujka 2020. godine i potresa u Petrinji 29. prosinca 2020. godine, mogu uzrokovati velike promjene u vrijednostima vlastitih frekvencija građevine. Smanjenje frekvencije u odnosu na vrijednosti prije potresa, ukazuju na oštećenja koja mogu biti vidljiva (pukotine na zidu), ali i ne moraju. Oštećenja koja ne vidimo, često dovode do smanjenja krutosti, odnosno sposobnosti komponente da se odupre deformaciji kada dođe do pomicanja uslijed potresa.

Na Slikama 7.1, 7.2, 7.3 i 7.4 prikazana je ovisnost horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom u programu Grilla za mjerenja ambijentalnih vibracija iz 2016. godine na četiri ugla po visini (2. kat, 1. kat, prizemlje i nisko prizemlje) dvorca Trakošćan. Isti postupak proveden je i za mjerenja iz 2023. godine, gdje su uključena i mjerenja na krovu dvorca (Slika 5.6) te je rezultat prikazan na Slikama 7.5, 7.6, 7.7 i 7.8. Na svakoj slici od 7.1 do 7.8 vertikalnom su crtom označene vlastite frekvencije krovišta (2023) i drugog kata (2016) dvorca Trakošćan. Zaključuje se da frekvencije na pojedinim uglovima dvorca, mjerene po visini 2023. godine imaju manje vrijednosti nego 2016. godine. S obzirom da su vanjski zidovi najjači dio svake građevine, smanjenje frekvencije u proteklom razdoblju ukazuje na promjenu dinamičkih svojstava građevine. Kod građevina simetričnog oblika, frekvencija ovisi o ukupnoj visini građevine te se ne mijenja na određenom katu

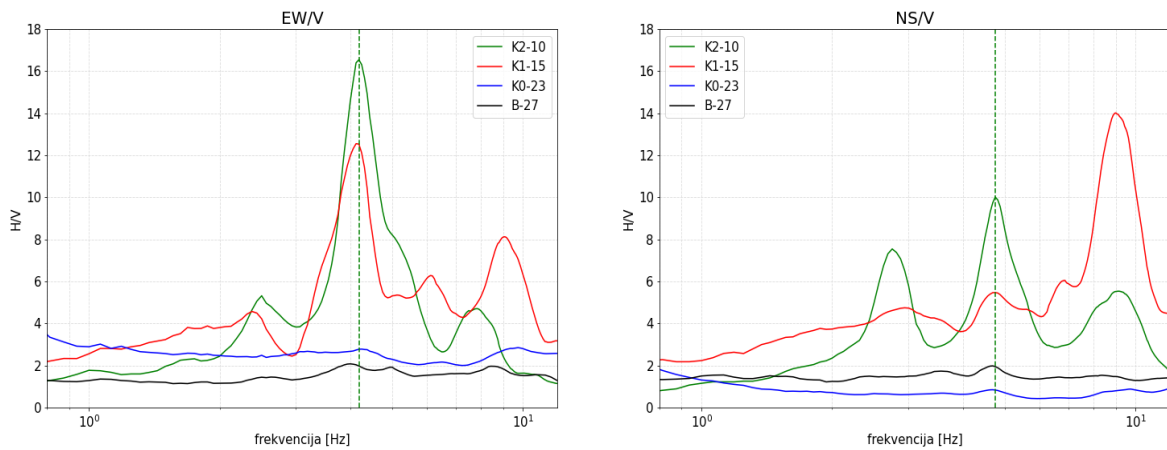
(Arnold i sur., 2006; Murty i sur., 2012). Dvorac Trakošćan nije simetrična građevina što potvrđuju i grafički prikazi na Slikama 7.2, 7.3, 7.5, 7.6 i 7.7. gdje frekvencija nije jednaka na krovu (2. kat dvorca) i ostalim (nižim) katovima, odnosno vidljiv je doprinos tornja dvorca koji ima frekvenciju oko 3 Hz, dok ostatak strukture ima frekvenciju oko 4.5 Hz. Dvorac Trakošćan je asimetrična građevina s dužom osi smjera pružanja SSI-JJZ, gdje je većina mase dvorca raspodijeljena u smjeru ZSZ-IJI (Stanko i sur., 2016), što je jasno vidljivo u višim modovima horizontalne komponente EW/V. Viši modovi ovise o geometriji same građevine, svojstvima građevnih materijala, ali i spojevima strukturnih elemenata (Arnold i sur., 2006; Murty i sur., 2012). Amplituda na vlastitoj frekvenciji je ovisna o visini mjerenja (katu) zbog fleksibilnosti građevine (prigušenju). Također, amplituda će biti najveća na vrhu određene građevine, u ovom slučaju u tornju dvorca Trakošćan. Na Slici 7.3 amplituda komponente NS/V za položaje K0-23 (prizemlje) i B-27 (nisko prizemlje) manja je od 2, a za položaj K0-23 (prizemlje) vrijednost amplitude EW/V komponente je između 2 i 4. Vrijednost amplitude EW/V komponente za položaj B-27 (nisko prizemlje) je manja od 2. Sve navedeno ukazuje da se radi o stjenovitoj podlozi, a dvorac Trakošćan ukopan je u hrid. Također, na Slici 7.5 amplituda obje komponente (EW/V, NS/V) za položaje K0-2 (prizemlje) i P1 (nisko prizemlje) ima vrijednosti oko 2 za razliku od vrijednosti amplituda na položajima KR1 (krovište), K2-9 (2. kat) i K1-12 (1. kat) koje su između 6 i 14.



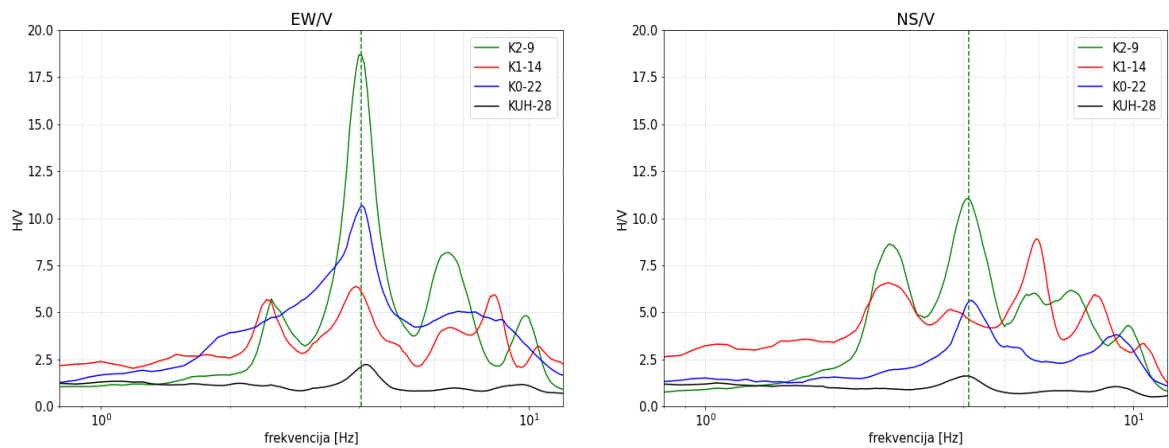
Slika 7.1: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2016. godine na četiri mjerne točke (K2-7, K1-12, K0-20, P-29) po visini u dvorcu Trakošćan. Zelenom vertikalnom crtom označena je vlastita frekvencija u točki K2-7. $H/V < 2$ ukazuje na stjenovitu podlogu.



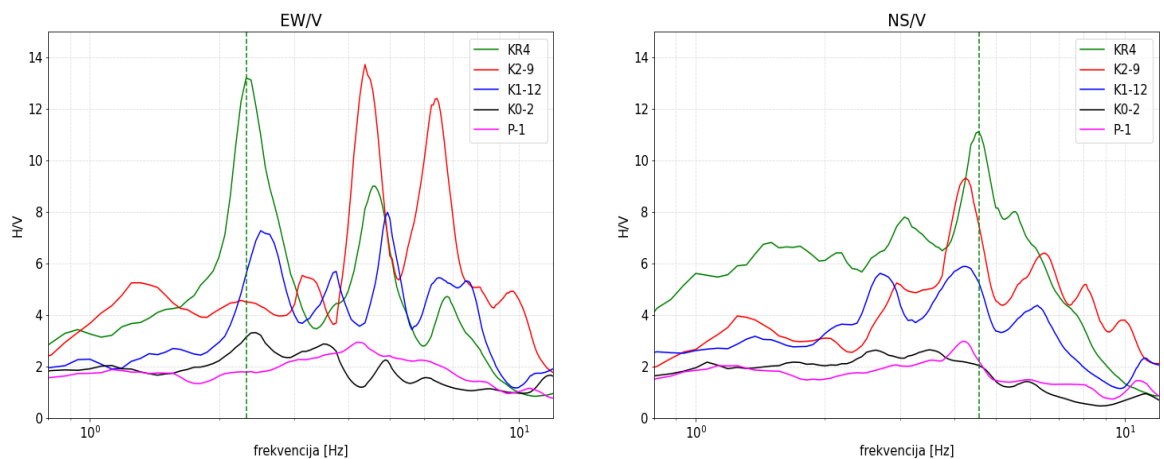
Slika 7.2: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2016. godine na četiri mjerne točke (K2-11, K1-17, K0-19, TAM-31) po visini u dvorcu Traškošćan. Zelenom vertikalnom crtom označena je vlastita frekvencija u točki K2-11. $H/V < 2$ ukazuje na stjenovitu podlogu.



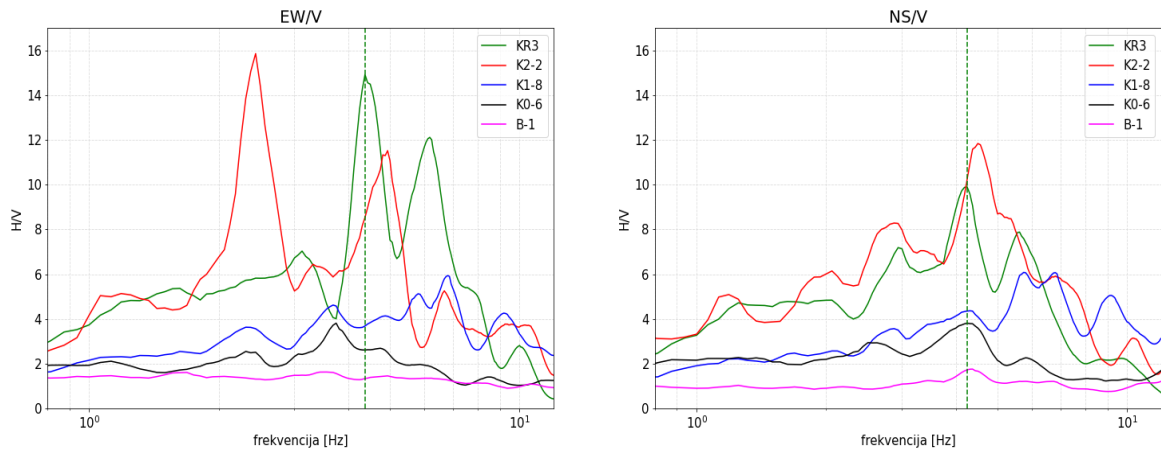
Slika 7.3: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2016. godine na četiri mjerne točke (K2-10, K1-15, K0-23, B-27) po visini u dvorcu Traškošćan. Zelenom vertikalnom crtom označena je vlastita frekvencija u točki K2-10. $H/V < 2$ ukazuje na stjenovitu podlogu.



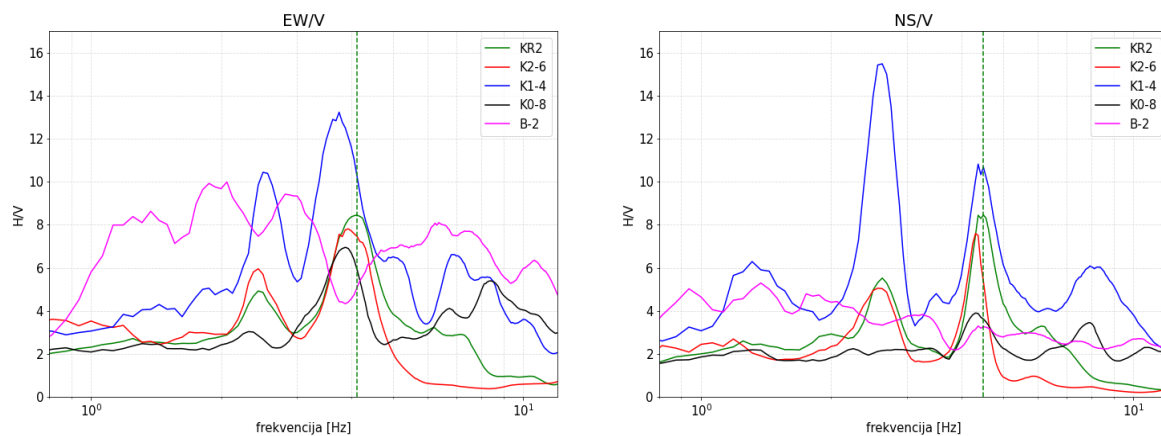
Slika 7.4: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2016. godine na četiri mjerne točke (K2-9, K1-14, K0-22, KUH-28) po visini u dvorcu Trakošćan. Zelenom vertikalnom crtom označena je vlastita frekvencija u točki K2-9. $H/V < 2$ ukazuje na stjenovitu podlogu.



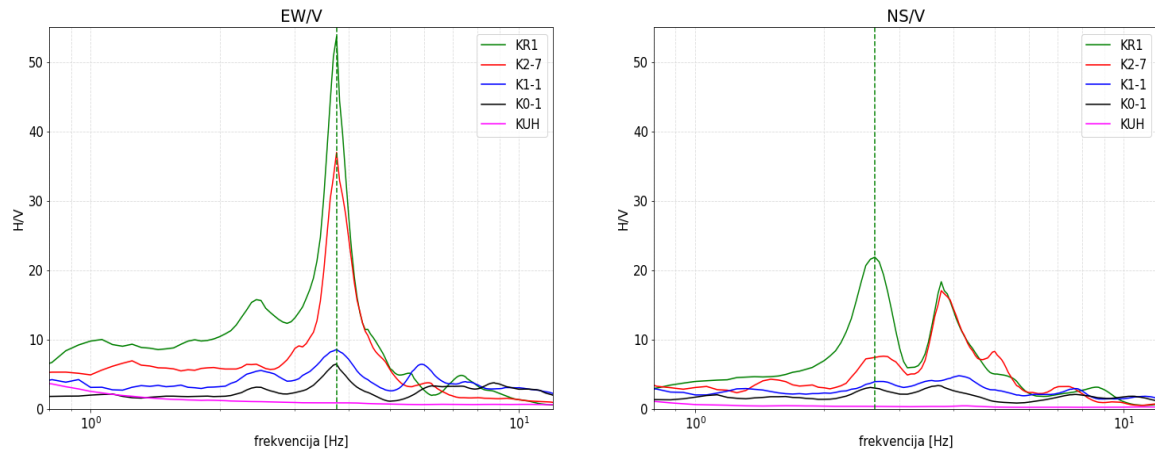
Slika 7.5: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2023. godine na četiri mjerne točke (KR4, K2-9, K1-12, K0-2, P-1) po visini u dvorcu Trakošćan. Zelenom vertikalnom crtom označena je vlastita frekvencija u točki KR4. $H/V < 2$ ukazuje na stjenovitu podlogu.



Slika 7.6: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2023. godine na četiri mjerne točke (KR3, K2-2, K1-8, K0-6, B-1) po visini u dvorcu Trakošćan. Zelenom vertikalnom crtom označena je vlastita frekvencija u točki KR3. $H/V < 2$ ukazuje na stjenovitu podlogu.

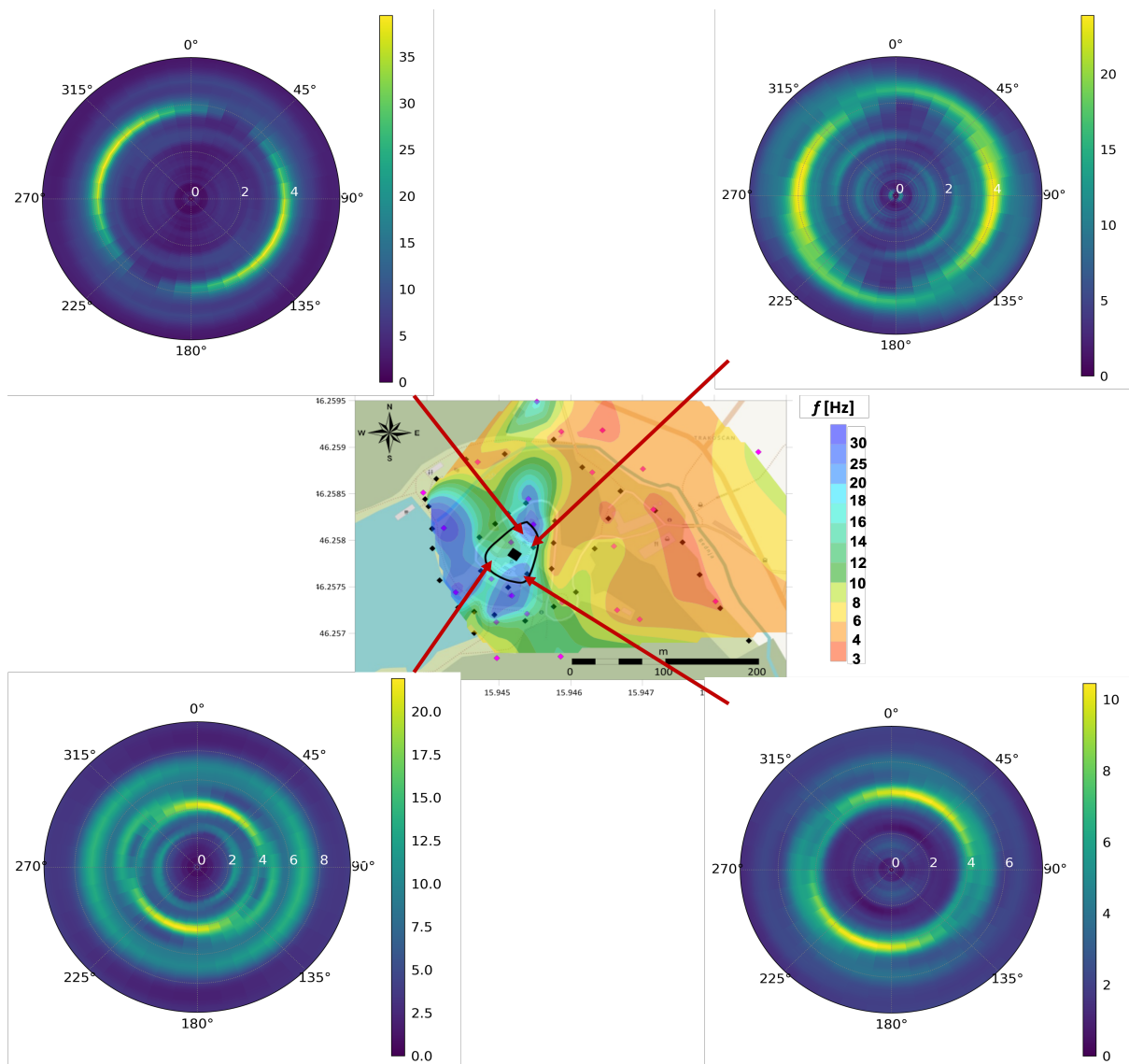


Slika 7.7: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2023. godine na četiri mjerne točke (KR2, K2-6, K1-4, K0-8, B-2) po visini u dvorcu Trakošćan. Zelenom vertikalnom crtom označena je vlastita frekvencija u točki KR2. $H/V < 2$ ukazuje na stjenovitu podlogu.



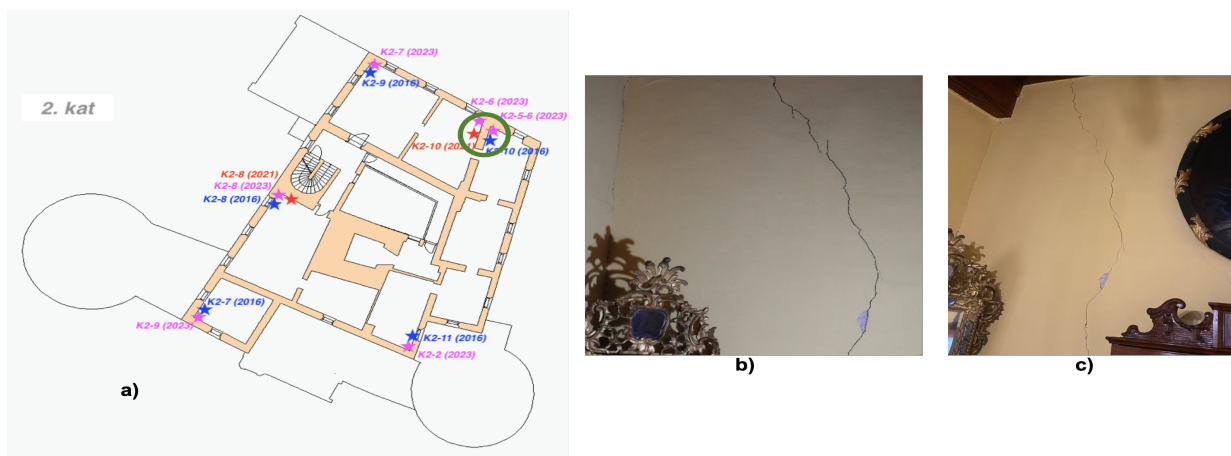
Slika 7.8: Grafički prikaz ovisnosti horizontalnih komponenti (EW/V, NS/V) o frekvenciji f dobivenih usmjerenom HVSR analizom mjerenja ambijentalnih vibracija 2023. godine na četiri mjerne točke (KR1, K2-7, K1-1, K0-1, KUH) po visini u dvorcu Trakošćan. Zelenom vertikalnom crtom označena je vlastita frekvencija u točki KR1. $H/V < 2$ ukazuje na stjenovitu podlogu.

Kako bi se odredila moguća interakcija između tla i same građevine te potencijalna rezonancija za frekvencije osnovnog i višeg moda, potrebno je usporediti mjerenja ambijentalnih vibracija unutar same građevine, dvorca Trakošćan, s onima na okolnom terenu (engl. *free-field*). Na Slici 7.9 prikazana je karta seizmičkog mikrozoniranja rezonantnih zona iz vlastitih frekvencija tla na području dvorca Trakošćan (Stanko i sur., 2016), ažurirana novijim mjerenjima u sklopu projekta SeisRICHerCRO. Kvadratičima su označene točke mjerenja seizmičkog nemira, a crnom linijom označen je položaj dvorca Trakošćan. Također, prikazani su polarizacijski dijagrami četiri točke na uglovima 2. kata. Polarizacijski dijagrami HVSR-a prikazuju projekciju HVSR-a uzduž različitih smjerova, od 0° (sjever) do 180° (jug) u smjeru kazaljke na satu ili od 0° do 360° (simetričnost). Skala s desne strane polarizacijskog dijagrama predstavlja vrijednost amplitude HVSR-a. Frekvencije na području aluvijalnih naslaga rijeke Bednje poprimaju vrijednost između 4 Hz i 5 Hz, dok su vlastite frekvencije izmjerene na drugom katu između 3.75 Hz i 5 Hz. Aluvijalne naslage rijeke Bednje orijentirane su u smjeru dva rasjeda pružanja SSI-JJZ i SZ-JI (Stanko i sur., 2016). Stjenoviti brežuljak na kojem je izgrađen dvorac Trakošćan orijentiran je u smjeru SSI-JJZ i okomit na polarizaciju prikazanu gornjim lijevim i desnim dijagramom (SSZ-JJI). Donja dva dijagrama prikazuju polarizaciju u smjeru pružanja samog dvorca. Oštećenja dvorca u potresu 1982. godine, ali i potresima u Zagrebu i Petrinji 2020. godine, nastala su, jednim dijelom, i zbog utjecaja topografije. Takvo ponašanje opisujemo fokusiranjem energije, odnosno seizmički valovi povećavaju svoju amplitudu prolaskom kroz mekše, aluvijalne naslage te konstruktivno interferiraju zbog male razlike u fazi i tada na vrhu brda imaju najveću amplitudu (Panžera i sur., 2013). Dobivene vrijednosti frekvencija u dvorcu i onih na okolnom terenu, s obzirom na topografska obilježja gdje se dvorac nalazi, mogu indicirati potencijalnu rezonanciju potres-tlo-građevina.



Slika 7.9: Karta seizmičkog mikrozoniranja rezonantnih zona iz vlastitih frekvencija tla za područje dvorca Trakošćan (Stanko i sur. (2016)). Kvadratići označuju točke mjerenja mikroseizmičkog nemira. Položaj dvorca s tornjem je naznačen na karti. Na karti su prikazani polarizacijski dijagrami četiri točke na uglovima 2. kata (gornji lijevi-K2-7, gornji desni-K2-5-6, donji lijevi-K2-9, donji desni K2-2).

U radu Markušić i sur. (2021) procijenjena je šteta u dvorcu nakon zagrebačkog i petrinjskog potresa 2020. godine. Za sve pukotine na vanjskim i unutarnjim zidovima, nastale nakon potresa, zapisana je duljina, širina, usmjerenje i položaj u dvorcu. Tijekom rekonstrukcije početkom 2000. godine nisu bili dovršeni armirano-betonski stupovi i grede, tzv. serklaži na 2. katu dvorca Trakošćan (K2-6 i K2-5-6) te su na tom mjestu zabilježena najveća oštećenja tijekom zagrebačkog i petrinjskog potresa 2020. godine. Na Slici 7.10 prikazana je najveća pukotina (širine manje od 3 mm) na drugom katu dvorca Trakošćan zajedno s lokacijom.



Slika 7.10: a) prikaz lokacije gdje je nastalo najveće oštećenje na zidu (2. kat) uslijed zagrebačkog i petrinjskog potresa 2020. godine. b) pukotina širine manje od 3 mm (Markušić i sur., 2021). c) ista pukotina zabilježena tijekom mjerenja ambijentalnih vibracija u dvorcu Trakošćan 2023. godine.

Iz navedenog se zaključuje da je iznimno važno ponavljati mjerenja ambijentalnih vibracija nakon određenog vremena kako bi se uočile moguće promjene u vlastitim frekvencijama, na koje bi moglo utjecati jače ili slabije podrhtavanje tla ili vibracije uzrokovane djelovanjem čovjeka. Povijesne građevine, poput dvorca Trakošćan, ne uspijevaju pravilno odgovoriti na seizmičku pobudu jer nemaju potrebnu krutost, odnosno post-potresnu deformabilnost te je upravo zato provjera dinamičkih svojstava povijesnih građevina glavni cilj istraživačkog projekta "Procjena seizmičkog rizika građevina kulturne baštine u Hrvatskoj" voditeljice izv. prof. dr. sc. Snježane Markušić.

8 Zaključak

Dvorac Trakošćan jedan je od najposjećenijih dvoraca u Republici Hrvatskoj te dio kulturno-povijesne baštine. Potres 16. ožujka 1982. godine, lokalne magnitude $M_L=4.5$ s epicentrom u podnožju gore Ivanščice uzrokovao je oštećenja tornja i drugog kata dvorca Trakošćan te su 2016. godine provedena mjerenja ambijentalnih vibracija u okolini dvorca i tornju kako bi se otkrila moguća rezonancija tlo-građevina (Stanko i sur., 2016). S obzirom na zagrebački i petrinjski potres 2020. godine, u sklopu istraživačkog projekta "Procjena seizmičkog rizika građevina kulturne baštine u Hrvatskoj" voditeljice izv. prof. dr. sc. Snježane Markušić, provedena su mjerenja ambijentalnih vibracija 2021. godine (Markušić i sur., 2021) na dvije lokacije, na 2. katu i u tornju dvorca te 2023. godine na području tornja, krovšta, 2. kata, 1. kata, prizemlja i niskog prizemlja. Cilj je diplomskog rada bila analiza mogućih promjena dinamičkih parametara, odnosno vlastite frekvencije dvorca Trakošćan, u razdoblju od 2016. do 2023. godine, kako bi se ukazalo na moguća oštećenja nastala tijekom potresa iz 2020 godine.

U radu je korištena neinvazivna seizmička metoda omjera horizontalne i vertikalne komponente spektra, tzv. HVSR metoda. Usporedbom usmjerene HVSR analize mjerenja mikroseizmičkog nemira 2016., 2021. i 2023. godine, za horizontalne komponente (EW/V, NS/V) opisano je dinamičko ponašanje dvorca Trakošćan.

Rekonstrukcija tornja dvorca, odnosno nadogradnja tornja na vrh konstrukcije dvorca, u razdoblju od 1840. do 1862. godine, bez propisanog ojačanja jedan je od razloga nejednakih frekvencija po visini tornja. Vidljiva je razlika u vrijednosti frekvencija između visina T1 i T2, koje su više u odnosu na visine T3 i T4 gdje je frekvencija približno jednaka 5 Hz, odnosno bliža vrijednostima frekvencijama same konstrukcije dvorca Trakošćan (1. i 2. kat). Također, prilikom analize mjerenja 1. i 2. kata dvorca 2023. godine uočene su niže frekvencije u odnosu na vrijednosti frekvencija dobivenih mjerenjima prije potresa 2016. godine i nakon potresa 2021. godine, što ukazuje na oštećenja koja mogu, ali i ne moraju biti vidljiva.

Oštećenja dvorca u potresu 1982. godine, ali i potresima u Zagrebu i Petrinji 2020. godine, nastala su dijelom i zbog utjecaja topografije. Zbog svog položaja, na vrhu brda, dolazi do fokusiranja energije, odnosno seizmički valovi povećavaju svoju amplitudu prolaskom kroz mekše slojeve, aluvijalne naslage rijeke Bednje, konstruktivno interferiraju te najveću amplitudu bilježe na vrhu brda gdje se nalazi dvorac (Panžera i sur., 2013). Uspoređene su i frekvencije na području aluvijalnih naslaga rijeke Bednje (Stanko i sur., 2016), ažurirane novijim mjerenjima u sklopu projekta SeisRICHerCRO, s vlastitim frekvencijama na drugom katu dvorca. Uočeno je poklapanje dobivenih vrijednosti frekvencija (4-5 Hz), što s obzirom na topografska obilježja dvorca Trakošćan, može indicirati potencijalnu rezonanciju potres-tlo-građevina.

Usporedbom po visini za pet točaka (krovište, 2. kat, 1. kat, prizemlje, nisko prizemlje) na temelju mjerenja iz 2023. godine i za četiri točke (2. kat, 1. kat, prizemlje, nisko prizemlje) na temelju mjerenja iz 2016. godine, u uglovima dvorca Trakošćan, za horizontalne komponente (EW/V, NS/V), vidljivo je nepoklapanje frekvencija na različitim katovima. Razlog tomu je asimetričnost dvorca Trakošćan, čija duža os ima smjer pružanja SSI-JJZ (Stanko i sur., 2016). Većina mase dvorca je raspodijeljena u smjeru ZSZ-IJI (Stanko i sur., 2016), što se jasno uočava u višim modovima hori-

zonalne komponente EW/V. Amplituda horizontalnih komponenti najveća je na vrhu građevine, odnosno na tornju dvorca.

Zaključno, ponavljanjem mjerenja ambijentalnih vibracija nakon određenog vremena ili instalacijom akcelerometara, omogućilo bi se kontinuirano mjerenje budućih potresa, ali i praćenje dinamičkih svojstava i ranjivost dvorca Trakošćan.

9 Literatura

Arnold, C., Bolt, B., Dreger, D., Elsesser, E., Eisner, R., Holmes, W., McGavin, G., Theodoropoulos, C. (2006): *Designing for Earthquakes*. Chapter 4. FEMA 454, 1-27.

Atalić, J., Demšić, M., Baniček, M., Uroš, M., Dasović, I., Prevolnik, S., Kadić, A., Šavor Novak, M., Nastev, M. (2023): *The December 2020 magnitude (M_w) 6.4 Petrinja earthquake, Croatia: seismological aspects, emergency response and impacts*. Bull. Earthquake Eng. 21, 5767-5808.

Baize, S., Amoroso, S., Belić, N., Benedetti, L., P. Boncio, P., Budić, M., Cinti, F.R., Henriquet, M., Jamšek Rupnik, P., Kordić, B., Markušić, S., Minarelli, L., Pantosti, D., Pucci, S., Špelić, M., Testa, A., Valkaniotis, S., Vukovski, M., Atanackov, J., Barbača, J., Bavec, M., Brajković, R., Brčić, V., Caciagli, M., Celarc, B., Civico, R., De Martini, P.M., Filjak, R., Iezzi, F., Moulin, A., Kurečić, T., Métois, M., Nappi, R., Novak, A., Novak, M., Pace, B., Palenik, D., Ricci, T. (2022): *Environmental effects and seismogenic source characterization of the December 2020 earthquake sequence near Petrinja, Croatia*. Geophysical Journal International 230 (2), 1394–1418.

Bard, P. Y. (1999): *Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?* Balkema, Rotterdam.

Begović, S., Pejić, T., Višnjević, V. (2012): *Dinamička svojstva sedam povijesnih zgrada u Zagrebu i njihova ugroženost potresima*. Geofizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

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

Castellaro, S., Perricone, L., Bartolomei, M., Isani, S. (2016): *Dynamic characterization of the Eiffel Tower*. Engineering Structures 126, 628-640.

Celebi, M., Bazzurro, P., Chiaraluce, L., Clemente, P., Decanini, L., Desortis, A., Ellsworth, W., Gorini, A., Kalkan, E., Marcucci, S., et al. (2010): *Recorded motions of the 6 April 2009 M_w 6.3 L'Aquila, Italy, earthquake and implications for building structural damage: Overview*. Earthq. Spectra. 26, 651–684.

Dasović, I., Herak, D., Herak, M., Latečki, H., Mustač, M., Tomljenović, B. (2020): *O potresima u Hrvatskoj*. Vijest Hrvatskog geološkog društva 57, 4-27.

Dasović, I., Herak, D., Herak, M., Latečki, H., Sečanj, M., Stipčević, J., Tomljenović, B. (2021): *Osvrt Veliki petrinjski potres-godinu dana poslije*. Geofizički zavod Andrija Mohorovičić i Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

Erceg, P. (2019): *Mjerenje osnovne frekvencije okoliša i zgrade Geofizičkog odsjeka*. Diplomski rad. Geofizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

Fiaschi, A., Matassoni, L., Pratesi, G., Garzonio, C. A., Malesani, P. (2012): *Microtremor analysis of the Basilica of the Holy Sepulchre, Jerusalem*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 41, 14-22.

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

Gallipoli, M.R., Mucciarelli, M., Castro, R.R., Monachesi, G., Contri, P. (2004): *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, 487-495.

Herak, D., Herak, M., Tomljenović, B. (2009): *Seismicity and earthquake focal mechanism in North-Western Croatia*. Tectonophysics 465, 212-220.

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

Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Kuk, K., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Stipčević, J. (2010): *HVSR of ambient noise in Ston (Croatia): comparison with theoretical spectra and with the damage distribution after the 1996 Ston-Slano earthquake*. Bull. Earthquake Eng. 8, 483-499.

Herak, M., Herak, D. (2009): *Effects of earthquakes on buildings by A. Mohorovičić*. Geofizika, 26,1.

Herak, M., Herak, D. (2023): *Properties of the Petrinja (Croatia) earthquake sequence of 2020-2021-Results of seismological research for the first six months of activity*. Tectonophysics 858, 229885.

Herak, M., Herak, D., Markušić, S. (1996): *Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908.-1992*. Terra Nova 8 (1), 86-94.

Latečki, H., Molinari, I., Stipčević, J. (2021): *3D physics-based seismic shaking scenarios for city of Zagreb, Capital of Croatia*. Bull. Earthq. Eng 1, 28.

Markušić, S., Stanko, D., Korbar, T., Belić, N., Penava, D., Kordić, B. (2020): *The Zagreb (Croatia) M5.5 Earthquake on 22 March 2020*. Geosciences 10(7), 252.

Markušić, S., Stanko, D., Penava, D., Ivančić, I., Bjelotomić Oršulić, O., Korbar, T., Sarhosis, V. (2021): *Destructive M6.2 Petrinja Earthquake (Croatia) in 2020 - Preliminary Multidisciplinary Research*. Remote Sens. 13(6), 1095.

Markušić, S., Stanko, D., Penava, D., Trajber, D., Šalić, R. (2021): *Preliminary Observations on Historical Castle Trakošćan (Croatia) Performance under Recent $ML \geq 5.5$ Earthquakes*. Geosciences 11, 461.

Mucciarelli, M., Gallipoli, M.R. (2001): *A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique*. Boll. Geof. Teor. Appl. 42 (3-4), 255-266.

Murty, C. V. R., Goswami, R., Vijayanarayanan, A. R., Mehta, V. V. (2012): *Some Concepts in Earthquake Behaviour of Buildings*. Gujarat State Disaster Management Authority. Government of Gujarat, Gujarat, India.

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

Nakamura, Y. (2008): *On the H/V spectrum*. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.

Nakamura, Y., Gurler, E.D., Saita, J. (1999): *Dynamic characteristics of leaning tower in Pisa using microtremor—Preliminary results*. In Proceedings of the 25th Japan Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan.

Nakamura, Y., Gurler, E.D., Saita, J., Rovelli, A., Donati, S. (2000): *Vulnerability investigation of Roman Colosseum using microtremor*. In Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.

Nakamura, Y., Takizawa, T. (1989): *Evaluation of Liquefaction of Surface Ground using Strong Motion Records*, (na japanskom jeziku). Proc. 20th JSCE Earthquake Eng. Symposium, 133-136.

Nogoshi, M., Igarashi, T. (1971): *On the Amplitude Characteristics of Microtremor*, (na japanskom jeziku sa sažetkom na engleskom jeziku). Jour. Seism. Soc. Japan 24, 26-40.

Panzer, F., Lombardo, G., D'Amico, S., Galea, P. (2013): *Speedy Techniques to Evaluate Seismic Site Effects in Particular Geomorphologic Conditions: Faults, Cavities, Landslides and Topographic Irregularities*. Chapter 5. InTech, 102–138.

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

Pintarić, A. (2006): *Trakošćan-baština kao turistički resurs*. Dvorci i ljetnikovci-kulturno nasljeđe kao pokretač gospodarskog razvoja, Varaždin.

Pollak, D., Gulam, V., Novosel, T., Avanić, R., Tomljenović, B., Hećaj, N., Terzić, J., Stipčević, J., Bačić, M., Kurečić, T., Dolić, M., Bostjančić, I., Wacha, L., Kosović, I., Budić, M., Vukovski, M., Belić, N., Špelić, M., Brčić, V., Barbača, J., Kordić, B., Palenik, D., Filjak, R., Frangen, T., Pavić, M., Uromović, K., Sećanj, M., Matoš, B., Govorčin, M., Kovačević, M.S., Librić, L. (2021): *The preliminary inventory of coseismic ground failures related to December 2020-January 2021 Petrinja earthquake series*. Geologia Croatia 74(1), 189-208.

SESAME 2004. Guidelines for implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing and interpretation.

Seville, E., Metcalfe, J. (2005): *Developing Hazard Risk Assessment Framework for the New Zealand State Highway Network*. Land Transport New Zealand. Report no. 276., 80.

Smiljanić, A. (2023): *Trakošćan*. Završni rad, Fakultet za interdisciplinarne, talijanske i kulturološke studije, Sveučilište Jurja Dobrile u Puli.

Stanko, D., Markušić, S., Strelec, S., Gazdek, M. (2016): *Seismic response and vulnerability of historical Trakošćan Castle, Croatia using HVSR method*. Environ. Earth Sci. 75, 368.

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

Stranice muzejske ustanove Dvor Trakošćan, (2023). [Internet], raspoloživo na: <https://trakoscan.hr/>.

Tomljenović, B., Csontos, L. (2001): *Neogene-Quaternary structures in the border zone between Alps, Dinarides and Panonian Basin (Hrvatsko zagorje and Karlovac Basins, Croatia)*. Int J Earth Sciences 90, 560-578.

Uglešić, J. S. (2021): *Procjena amplifikacije gibanja tla uslijed Zagrebačkog ML5.5 potresa (2020.) ekvivalentno-linearnom metodom*. Diplomski rad, Geofizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

Zailac, K. (2015): *Kontinuirano opažanje dinamičkih parametara zgrade Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu*. Diplomski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.