

Poročilo

Fakulteta za farmacijo

naročnik

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za farmacijo

naslov

Poročilo o raziskavi vibracij

30.08.2022

2.0



iC consulenten Ziviltechniker GesmbH
Schönbrunner Straße 297, 1120 Dunaj, Avstrija
T +43 1 521 69-0, F +43 1 521 69-180
office@ic-group.org, www.ic-group.org
FN 137252 t

EN ISO 9001

Številka projekta: 210116

Projektant: **iC consulenten Ziviltechniker GesmbH**
Schönbrunner Straße 297, A-1120 Dunaj
Tel: +43 1 521 69 0
Faks: +43 1 521 69 180
E-naslov: office@ic-group.org

Naročnik: **Univerza v Ljubljani**
Fakulteta za farmacijo
Aškerčeva cesta 6
1000 Ljubljana

Datum: 30.08.2022

Avtor: Laura Ibanez, Michael Österreicher

Datum	Izdaja:	Urednik	Pregledal	Podpisal	Podpis
30.08.2022	2.0	iba	om	uw	

Kazalo

1.	Uvod	1
2.	Osnove	2
2.1	Standardi in predpisi:.....	2
2.2	Reference.....	2
2.3	3	
2.4	Osnove	4
2.4.1	Splošni vidiki	4
2.4.2	Izvor vibracij.....	4
2.4.3	Širjenje valov.....	5
2.4.4	Sprejemnik.....	7
2.4.5	Metode dušenja.....	8
2.5	Mejne vrednosti po navedbah naročnika.....	9
3.	Ocenjevanje vibracij na lokaciji	10
3.1	Splošno	10
3.2	Priprava ocenjevanja vibracij.....	10
3.3	Izvedba ocenjevanja vibracij.....	13
3.4	Rezultati ocenjevanja vibracij	14
4.	Numerični izračuni in napovedi	21
4.1	Numerični izračuni.....	21
4.1.1	Splošno	21
4.2	Dušenje	23
4.3	Napovedovanje vibracij	24
5.	Sklepi	28

Preglednice

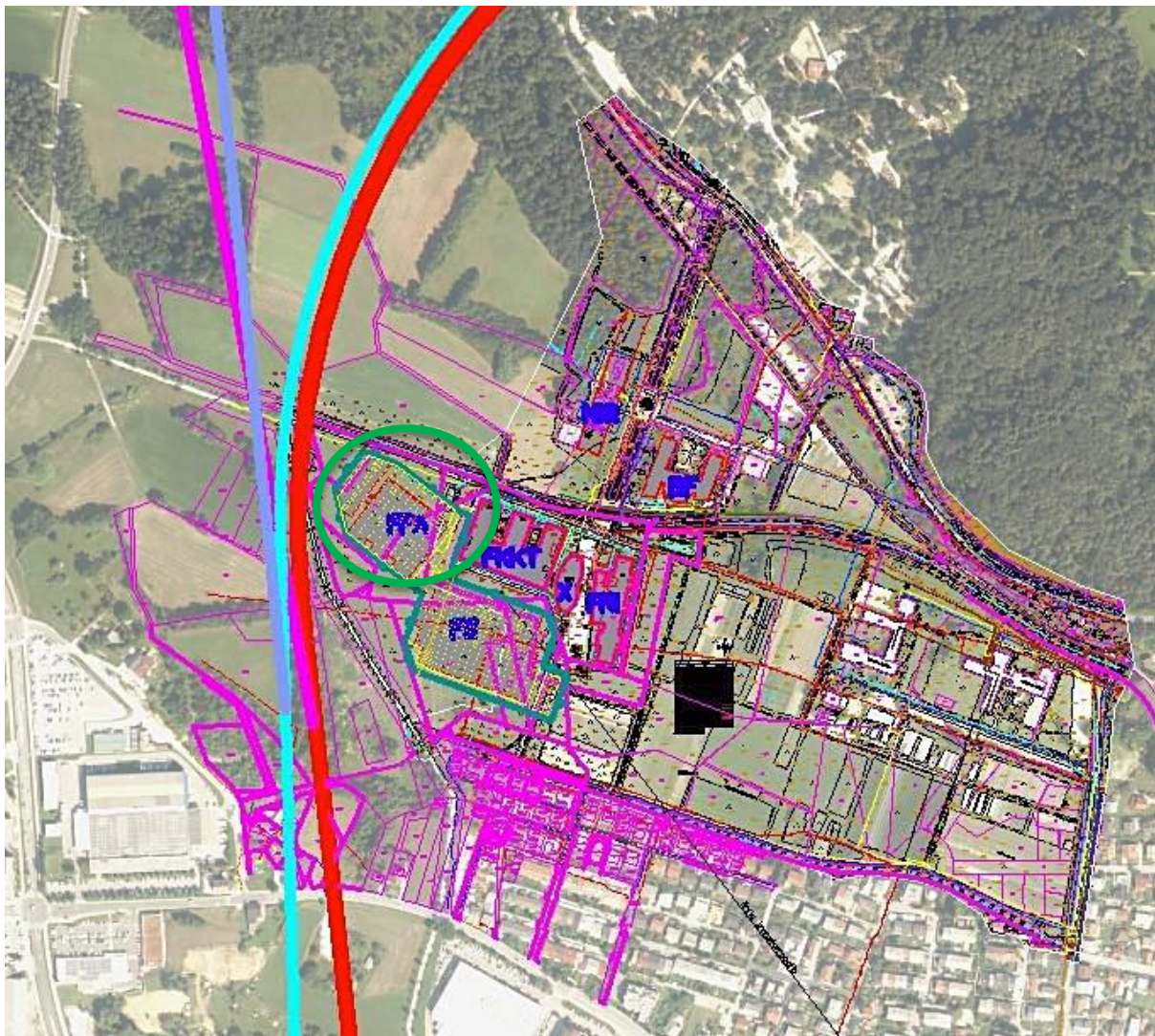
Preglednica 1: Moč geometrijskega dušenja.....	5
Preglednica 2: Moč dušenja materiala.....	6

Slike

Slika 1: pregled območja, namenjenega novi stavbi inštituta.....	1
Slika 2: Osnovni odnosi pri vibracijah iz tal.....	4
Slika 3: Povprečni spektri za prenos od tal k temeljem (vir: RVE 04.02.04).	7
Slika 4: Elastično podprta stavba [9].....	8
Slika 5: Odziv sistema z enotno maso na zunanje vibracije.....	9
Slika 6: Mejne vrednosti po navedbah naročnika.....	10
Slika 7: MP-1 Soba 004C (P20), NMR Spektroskopija (pritličje – stari del).....	11
Slika 8: MP-2 Soba 136, laboratorij (1. nadstropje – stari del).....	11
Slika 9: MP-3 Soba 310a, HPLC-HRMS (3. nadstropje – novi del).....	12
Slika 10: MP-4 Soba K06a (klet – novi del).....	12
Slika 11: MP-5 Soba P06, FT Kozmetologija (visoko pritličje).....	13
Slika 12: MP-6 in MP-7 na odprtem polju.....	13
Slika 13: Rezultat merjenja vibracij MP-1.....	14
Slika 14: Rezultat merjenja vibracij MP-2.....	15
Slika 15: Rezultat merjenja vibracij MP-3.....	16
Slika 16: Rezultat merjenja vibracij MP-4.....	17
Slika 17: Rezultat merjenja vibracij MP-5.....	18
Slika 18: Rezultat merjenja vibracij MP-5 in MP-6 (povprečje).....	19
Slika 19: Končni rezultati MP-1 do MP-4 (Aškerčeva c. 7, 1000 Ljubljana).....	20
Slika 20: Končni rezultati MP-5 (Tržaška ulica 32) in MP-6 in MP-7 na odprtem polju (Večna pot, 1000 Ljubljana).....	21
Slika 21: Primer preletne obremenitve, uporabljen v numeričnih izračunih.....	22
Slika 22: Funkcija prenosa vibracij od tal h konstrukciji.	23
Slika 23: Vrednosti Rayleighovega dušenja za numerične izračune.....	23
Slika 24: Tridimenzionalni model načrtovane nove stavbe fakultete.....	24
Slika 25: Funkcije prenosa vibracij od temeljev k nadstropjem (levo: območje A; desno: območje B).....	25
Slika 26: napoved vibracij brez železniškega predora (levo: območje A; desno: območje B).....	25
Slika 27: emisije vibracij primerljivih železniških predorov [10]–[12].....	26
Slika 28: Napoved vibracij brez železniškega predora (levo: območje A; desno: območje B).....	27

1. UVOD

Fakulteta za farmacijo Univerze v Ljubljani načrtuje gradnjo nove fakultetne stavbe na nezazidanem zemljišču v Ljubljani. Trenutno je na tem območju že več fakultetnih stavb. Na sliki 1 je prikazano območje, na katerem je načrtovana nova stavba.



Slika 1: pregled območja, namenjenega novi stavbi inštituta

Glede na dolgoročne prostorske plane naj bi v bližini načrtovane stavbe potekala železniška proga (glej sliko 1). Podrobnosti o potencialni železniški progi še niso znane. Nedavno je bilo odločeno, da bo proga v predoru. Na sliki 1 je prikazana tudi potencialna trasa železniške proge (rdeča črta).

Zaradi bližine potencialne železniške proge ni mogoče izključiti, da lahko imisije zaradi vibracij v stavbi presežejo mejne vrednosti za občutljivo opremo. Zato je Univerza v Ljubljani naročila podrobno raziskavo vibracij.

Cilj tega dela je podrobna raziskava vibracij z namenom oceniti imisije zaradi vibracij v načrtovani stavbi in nato po potrebi opredeliti ukrepe za doseganje skladnosti z mejnimi vrednostmi, ki jih je navedel naročnik.

2. OSNOVE

2.1 STANDARDI IN PREDPISI:

- ÖNorm S 9001 (1978/02): Mechanische Schwingungen – Erschütterungen; Allgemeine Grundsätze und Ermittlung von Schwingungsgrößen (Mehanske vibracije – šoki; Splošna načela in vrednotenje vibracij)
- ÖNorm ISO 2631-1: Mechanische Schwingungen und Stöße – Bewertung der Auswirkung von Ganzkörperschwingungen auf den Menschen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (Mehanske vibracije in udarci - Vrednotenje izpostavljenosti človeka vibracijam celotnega telesa - 1. del: Splošne zahteve)
- ÖNorm ISO 2631-2: Mechanische Schwingungen und Stöße – Bewertung der Auswirkung von Ganzkörperschwingungen auf den Menschen – Teil 2: Schwingungen in Gebäuden (Mehanske vibracije in udarci - Vrednotenje izpostavljenosti človeka vibracijam celotnega telesa - 2. del: Vibracije v zgradbah)
- ÖNorm S 9012 (2010/02): Beurteilung der Einwirkung von Schwingungsimmissionen des landgebundenen Verkehrs auf Menschen in Gebäuden - Schwingungen und sekundärer Luftschall (Vrednotenje izpostavljenosti človeka v zgradbah vibracijam kopenskega prometa – Vibracije in sekundarni zvok, ki ga prenaša konstrukcija)
- ÖNorm S 9020 (1986/08): Bauwerkerschütterungen; Sprengerschütterungen und vergleichbare impulsförmige Immissionen (Grabene vibracije, vibracije zaradi miniranja in podobne impulzne imisije)
- RVE 04.02.03 (01/2012): Maßnahmen zur Reduktion von Erschütterungen und sekundärem Luftschall (Ukrepi za redukcijo vibracij in sekundarnega zvoka, ki ga prenaša konstrukcija)
- VDI 3837 (01/2013): "Ground-borne vibration in the vicinity of at-grade rail systems Spectral prediction method" (Vibracije, ki se prenašajo prek tal, v bližini železniških sistemov Metoda spektralne predikcije)

2.2 REFERENCE

- [1] D. Brookes, W. I. Hamad, J. P. Talbot, H. E. M. Hunt, and M. F. M. Hussein, "The dynamic interaction effects of railway tunnels: Crossrail and the Grand Central Recording Studios," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 232, no. 2, pp. 542–559, 2018, doi: 10.1177/0954409716679446.
- [2] S. Zhu *et al.*, "Development of a Vibration Attenuation Track at Low Frequencies for Urban Rail Transit," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 32, no. 9, pp. 713–726, 2017, doi: 10.1111/mice.12285.
- [3] X. Sheng, "A review on modelling ground vibrations generated by underground trains," *Int. J. Rail Transp.*, vol. 7, no. 4, pp. 241–261, 2019, doi: 10.1080/23248378.2019.1591312.
- [4] J. F. Ruiz, P. J. Soares, P. Alves Costa, and D. P. Connolly, "The effect of tunnel construction on future underground railway vibrations," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 125, no. June, p. 105756, 2019, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105756.
- [5] J. M. Roësset, "Soil structure interaction. The early stages," *J. Appl. Sci. Eng.*, vol. 16 (1), no. 1, p. 1-8, 2013.
- [6] C. Meinhardt, "Einflussgrößen für das Schwingungsverhalten von Gebäuden zur Prognose von Erschütterungsimmissionen," Universität Berlin, 2008.
- [7] S. Appel, "Einfluss der Steifigkeit von Baugrund und Gründung auf die Abschirmung von Schienenverkehrserschütterungen mit Elastormatten," Technische Universität Berlin, 2011.
- [8] S. Appel, "Elastische Lagerung zur Minderung des Erschütterungseintrages in Bauwerke," pp. 1–10, doi: 10.1007/978-3-8348-2260-4.

- [9] J. P. T. DE OLIVEIRA, "Study of the dynamic Soil-Structure interaction of a Building on elastic foundation," 2000.
- [10] G. Lombaert, S. François, H. Verbraken, G. Degrande, and D. J. Thompson, "Numerical , experimental and hybrid methods for the prediction of railway-induced ground vibration," *9th Int. Conf. Struct. Dyn. EUROLYN 2014*, no. July, pp. 91–100, 2014.
- [11] W. Shi, L. Bai, and J. Han, "Subway-Induced Vibration Measurement and Evaluation of the Structure on a Construction Site at Curved Section of Metro Line," *Shock Vib.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/5763101.
- [12] G. Degrande *et al.*, "A numerical model for ground-borne vibrations from underground railway traffic based on a periodic finite element-boundary element formulation," *J. Sound Vib.*, vol. 293, no. 3–5, pp. 645–666, 2006, doi: 10.1016/j.jsv.2005.12.023.

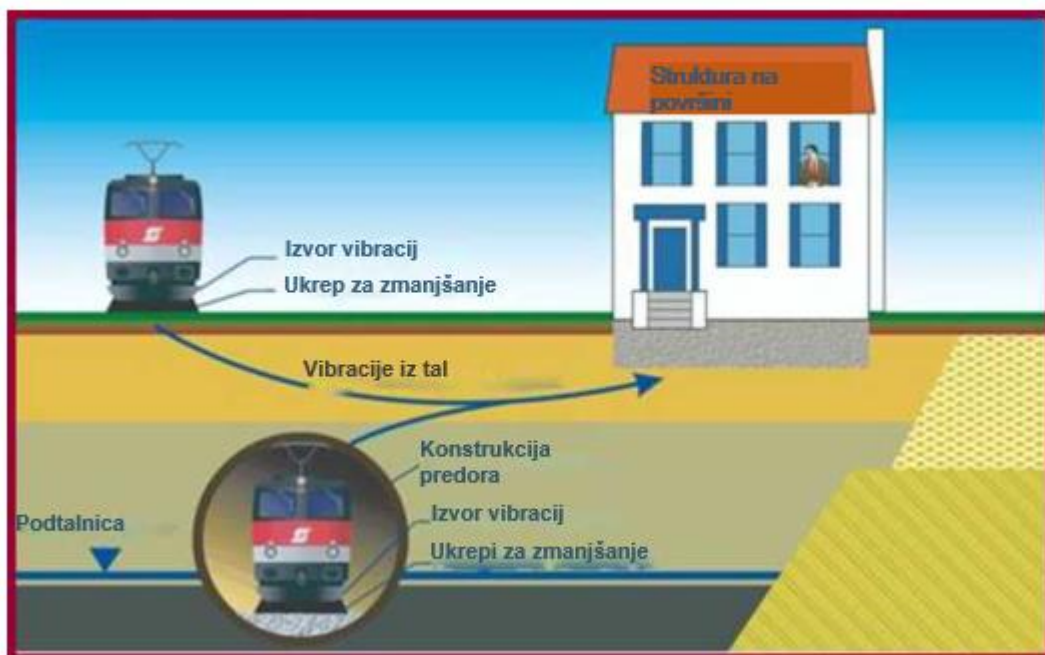
2.3

2.4 OSNOVE

2.4.1 Splošni vidiki

Ta del poročila vsebuje kratek povzetek glavnih osnovnih podatkov o železniških vibracijah, uporabljenih v tem poročilu.

Na splošno lahko rečemo, da imajo vibracije, ki se prenašajo iz tal zaradi železniškega prometa, tri dejavnike; izvor, pot in sprejemnik, kot je shematično prikazano na spodnji sliki (Slika 2).



Slika 2: Osnovni odnosi pri vibracijah iz tal

Pri napovedovanju in blaženju vibracij je pomembno razumeti, kakšen vpliv ima vsak od teh treh dejavnikov. V naslednjih razdelkih je na kratko predstavljen vsak od teh treh dejavnikov.

2.4.2 Izvor vibracij

Vibracije, ki jih oddaja potujoči vlak, nastanejo zaradi interakcije vlaka s tirom, ki leži na osnovni konstrukciji (predoru) ali tleh. V nadaljevanju so shematično navedeni glavni dejavniki vpliva vlaka z vidika ustvarjanja vibracij.

- Prispevek k skupni sili
- Statična sila koles
- Kvazistatični prispevek v zavojih
- Dinamični prispevek zaradi hrapavosti tirnic
- Dinamični prispevek zaradi ploskega dela koles
- Prispevek zaradi zaviranja
- Prispevek zaradi asimetrije

Karoserija vagona je s podstavnim vozičkom povezana prek sekundarnega vzmetenja, ki je pri sodobnih potniških vlakih običajno v obliki zračne blazine. Teža karoserije se prenese na kolesa prek okvirja podstavnega vozička, ki je s kolesi povezan s primarnim sistemom vzmetenja. Kolesa prenašajo obremenitev na tirnice in nato na povezano konstrukcijo ali tla.

Ker obstaja tudi povratna povezava med osnovno konstrukcijo ali tlemi in tirnicami ter dinamiko vozila, je za ustrezen opis izvora vibracij potrebno podrobno poznavanje tal ali osnovne konstrukcije (predora) [1], [2], [3], [4].

2.4.3 Širjenje valov

Po nastanku v tirnici, kot je opisano v razdelku 2.4.2, se vibracije širijo v okoliško zemljinu. V okoliški zemljini prevladujejo tri vrste valov, ki v tleh prenašajo energijo [5]:

- Valovi P (v zemljini)
- Valovi S (v zemljini)
- Rayleighovi valovi (na površini zemljine)

Pri vibracijskih vzbujanjih v tleh – na primer v predorih – prevladujejo prostorski valovi (valovi P in valovi S). Pri površinskem vzbujanju – na primer tramvajske proge – prevladujejo Rayleighovi valovi.

Enačba 1 v bistvu opisuje dušenje razširjanja valov v linearnem elastičnem polprostoru, pri čemer je n podan v spodnji preglednici (Preglednica 1). Rayleighovo valovanje je pomembno zlasti pri večjih razdaljah od proge, saj prostorsko valovanje zaradi geometrijskega širjenja pojema hitreje kot Rayleighovi valovi. Osnovna enačba za širjenje valovanja je podana z enačbo 1.

$$v = v_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-n} e^{-\alpha(r-r_0)} \quad (1)$$

kjer je

v_0	hitrost delcev pri izvoru
r_0	oddaljenost referenčne točke, v kateri se meri v_0
r	razdalja do sprejemnika
v	hitrost delcev v točki sprejemnika
n	moč geometrijskega dušenja
α	faktor dušenja materiala

Vrednosti moči za geometrijsko dušenje za različne vrste valovanja in različne vrste izvorov so navedene spodaj (Preglednica 1).

Preglednica 1: Moč geometrijskega dušenja

Vrsta valovanja	Točkovni izvor	Linijski izvor
P-valovanje	1	0,5
S-valovanje	1	0,5
Rayleighovi valovi	0,5	0

Poleg tega je, kot je prikazano v (1), za oceno širjenja vibracij v tleh potrebno dobro poznavanje vrednosti dušenja materiala. V spodnji preglednici (Preglednica 2) je navedenih nekaj primerov vrednosti dušenja materialov za različne vrste tal.

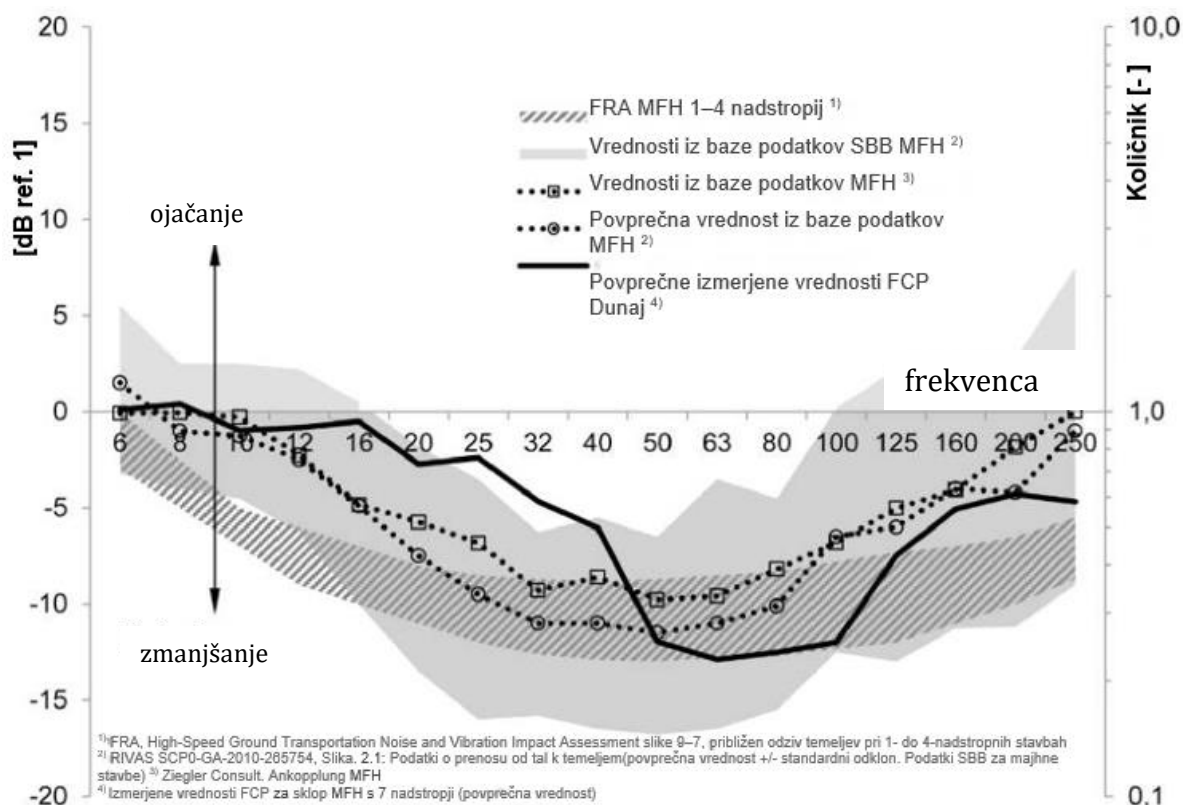
Preglednica 2: Moč dušenja materiala

Vrsta tal	Dušenje v tleh [m^{-1}]
Z vodo nasičena glina	0,04–0,12
Puhlica in puhličasta prst	0,10
Pesek in mulj	0,04

Za pridobitev parametrov območja dušenja materiala so potrebne meritve (seizmične raziskave). Zgoraj navedene vrednosti se lahko uporabijo za grobo oceno širjenja vibracij skozi zemljo in na površini.

2.4.4 Sprejemnik

Vibracije, ki nastanejo v progi in se širijo po mediju, se prenesejo na temelje bližnjih stavb. Prenos iz tal na temelje stavbe je odvisen od vrste temeljev, tal in mase stavbe [6], [7]. Na spodnji sliki (Slika 3) je pregled več izvorov prenosnih funkcij (vir: RVE 04.02.04).



Slika 3: Povprečni spektri za prenos od tal na temelje (vir: RVE 04.02.04).

Kot je prikazano na zgornji sliki (Slika 3), se pri nizkih frekvencah < 10 Hz vibracije med prenosom s tal na temelje ojačajo. Pri frekvencah nad 20 Hz do 100 Hz pa vibracije med prenosom s tal na temelje močno oslabijo.

V splošnem so resonančne frekvence celotne stavbe skupaj s temelji običajno precej pod 10 Hz, kar je tudi razlog za ojačitve na zgornji sliki (Slika 3), medtem ko se resonance sten in stropov pojavljajo v razponu 10–60 Hz [6]. Resonančne frekvence stavbe za človekovo zaznavanje niso pomembne, medtem ko so resonančne frekvence tal pomembne tako za zaznavanje vibracij kot tudi za odbiti hrup.

Ocenjevanje vibracij, ki se širijo po stavbi, je brez numeričnega modela težko izvedljivo. Dinamične lastnosti stavb (npr. lastne frekvence tal) se razlikujejo, tako da preslikavo ocene z ene stavbe na drugo spremlja velika negotovost [6]–[8].

2.4.5 Metode dušenja

Dušenje imisij podzemne železnice je mogoče doseči v vseh podsistemih. Za ta namen so na voljo različni ukrepi. V nadaljevanju so opisani in prikazani ukrepi, ki se načeloma uporabljajo za nadzemno železnico, medtem ko so za proge v predorih ali na mostovih na voljo preizkušeni ukrepi za dušenje, kot so elastična pritrditev tirnic, masivne plošče ali sistemi za vzmetenje mase. Nivo dušenja opisanih ukrepov je dokazan z meritvami. Ukrepe dušenja za nadzemni promet je možno izvajati le z veliko truda, saj so elastični elementi ali sistemi za vzmetenje mase v primeru nadzemnega prometa lahko učinkoviti le, če je sistem zgrajen na dovolj togih tleh ali togi plošči. V nadaljevanju so opisani možni ukrepi na mestu emisije in na poti prenosa imisij.

Ukrepi za zmanjšanje na mestu emisije so namenjeni predvsem zmanjšanju vzbujanja tira, kar pomeni zmanjšanje sil vzbujanja vsaj v določenem frekvenčnem razponu. To se na splošno doseže z vgradnjo elastičnih elementov in po potrebi dodatnega materiala v vibracijski sistem, kar zmanjša vibracije za faktor več kot $\sqrt{2}$ resonančne frekvence sistema. Možni ukrepi so sistemi vzmetenja mase, podloge pod tirno gredo ali podložke pod pragi.

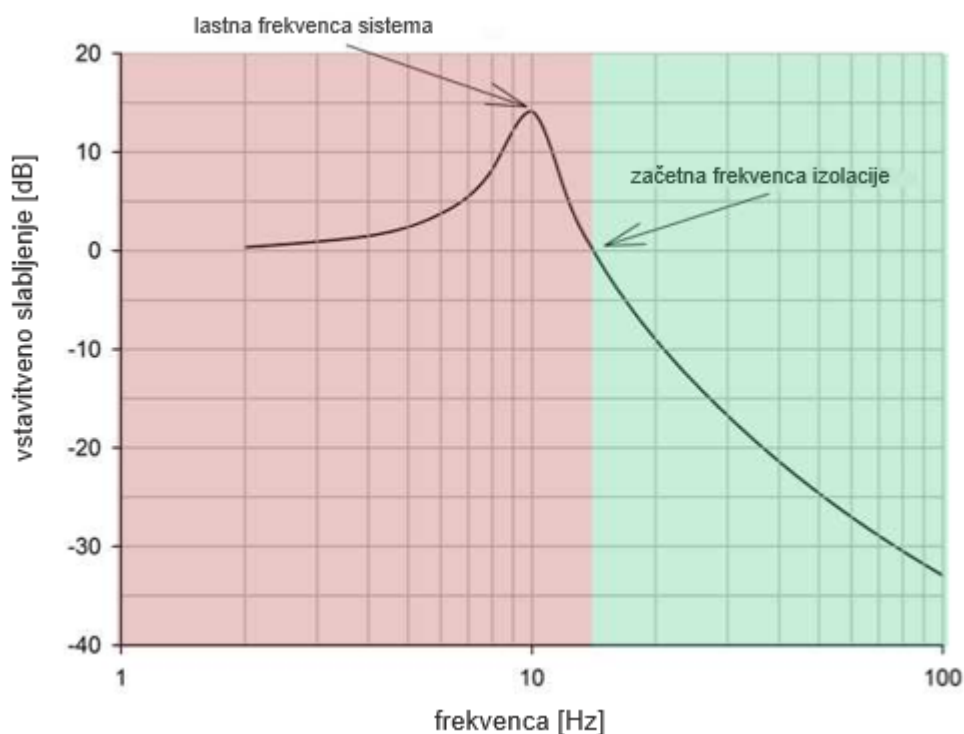
V posebnih primerih so priporočljivi ekstremni ukrepi za zmanjšanje vibracij na poti prenosa med tirnico in konstrukcijo. Prikazan je učinek zmanjšanja vibracij z ukrepi, kot so pregrade, pilotne stene ali odprti jarki v zemljini oz. ukrepi, ki so upravičeni le v posebnih primerih, kot so ojačenje tal, prelomi ali podobno.

Ukrepi na stavbi so običajno priporočljivi kadar je treba ob obstoječi proggi zgraditi posamezne stavbe ali kadar je treba stavbo v celoti ali delno spremeniti z vidika zmanjšanja vibracij. Možni ukrepi so elastično podprta konstrukcija (Slika 4) ali ojačitev temeljev oziroma sten.



Slika 4: Elastično podprta stavba [9]

V grobi oceni lahko stavbo obravnavamo kot togo telo [9], ki ga podpira več vzmeti (blažilniki). Lastna frekvenca sistema mora biti načrtovana tako, da je zagotovo pod najnižjo frekvenco vibracij, ki jih je treba ublažiti, kot je prikazano za sistem z eno stopnjo prostosti na spodnji sliki (Slika 5).



Slika 5: Odziv sistema z eno maso na zunanje vibracije

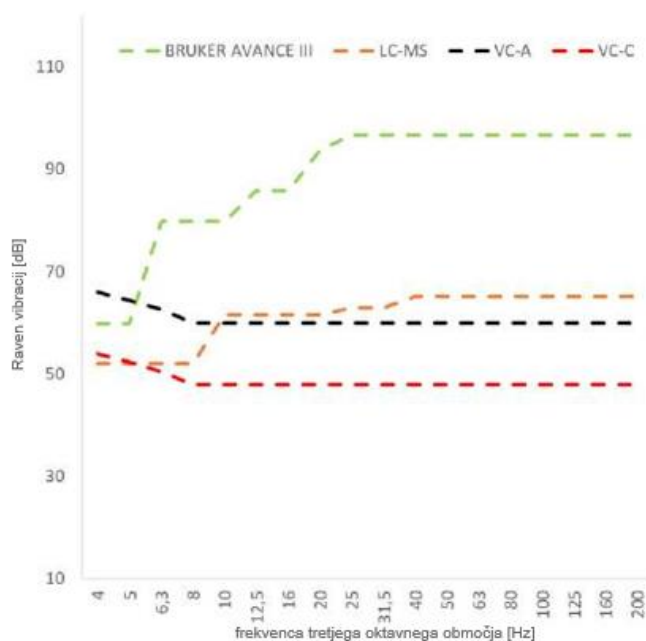
Rdeča in zelena območja na grafu ponazarjajo odziv sistema z elastično podlago na zunanje vibracije. V območju lastne frekvence se vibracije okrepijo, zato je pomembno, da se sistem z elastično podlago projektira glede na lastno frekvenco. Nad lastno frekvenco sistema, pri $1,4 \cdot f_0$, začne sistem blažiti vibracije, to ponazarja zeleno območje na grafu.

2.5 MEJNE VREDNOSTI PO NAVEDBAH NAROČNIKA

V načrtovani stavbi bo nameščenih več občutljivih naprav. Zaradi preprečevanja poškodb na opremi in zagotavljanja pravilne uporabe je naročnik določil mejne vrednosti. Navedene so bile naslednje mejne vrednosti:

- Bruker Avance III
- LC-MS
- VC-A in VC-C (potrebno za merilno opremo, npr. za skenirno elektronsko mikroskopijo (SEM) in mikroskopijo na atomsko silo (AFM))

Grafični prikaz mejnih vrednosti v odvisnosti od frekvence je na spodnji sliki (Slika 6).



Slika 6: Mejne vrednosti po navedbah naročnika

Za načrtovano stavbo naročnik zahteva kriterij za vibracije VC-A. Na posebnih območjih, kjer bo nameščena občutljiva oprema, je treba zagotoviti VC-C in/ali mejne vrednosti za opremo.

3. OCENJEVANJE VIBRACIJ NA LOKACIJI

3.1 SPLOŠNO

Za ugotavljanje trenutne ravni vibracij v obstoječih stavbah so bile opravljene meritve v obdobju približno 48 ur na petih lokacijah v dveh različnih stavbah. Lokacije so bile izbrane skupaj z naročnikom v bližini obstoječe občutljive opreme.

Druga meritev je bila opravljena v obdobju približno 48 ur na območju načrtovane stavbe. Cilj te meritve je bil po eni strani ugotoviti trenutno raven vibracij na lokaciji in po drugi strani pridobiti nekatere dinamične parametre tal na lokaciji.

3.2 PRIPRAVA OCENJEVANJA VIBRACIJ

Kot je navedeno v uvodu, so bile v okviru te raziskave vibracij opravljene meritve na naslednjih lokacijah:

- Aškerčeva c. 7, 1000 Ljubljana (4 merilna mesta)
- Večna pot (načrtovano gradbišče) (2 merilni mesti)
- Tržaška ulica 32 (1 merilno mesto)

Na naslednjih slikah so prikazana 4 merilna mesta v stavbi Aškerčeva c. 7, 1000 Ljubljana.



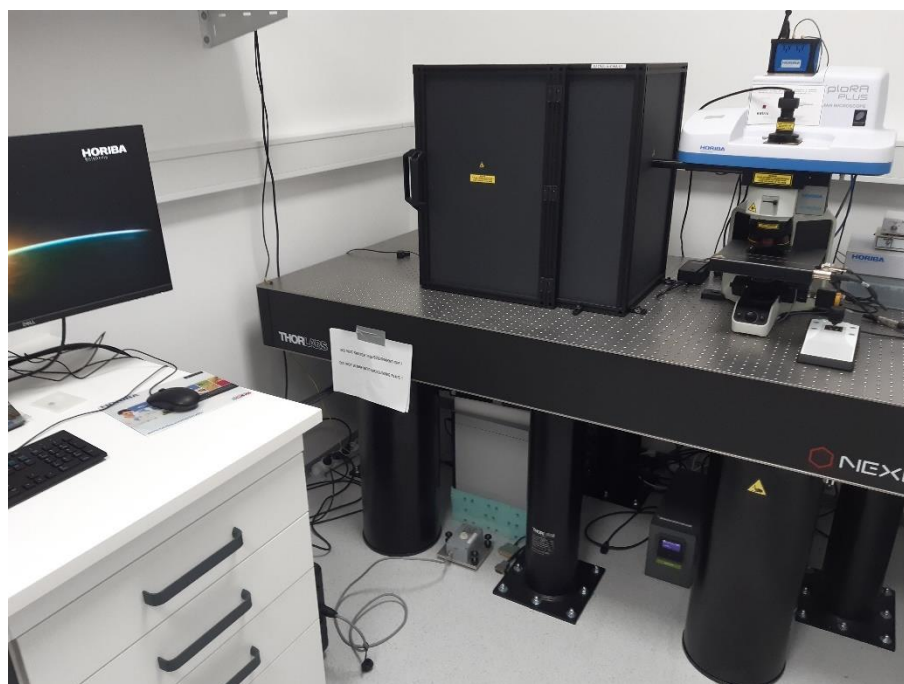
Slika 7: MP-1 Soba 004C (P20), NMR Spektroskopija (pritličje – stari del)



Slika 8: MP-2 Soba 136, laboratorij (1. nadstropje – stari del)



Slika 9: MP-3 Soba 310a, HPLC-HRMS (3. nadstropje – novi del)



Slika 10: MP-4 Soba K06a (klet – novi del)

Slika 11 prikazuje merilna mesta v stavbi Tržaška ulica 32, 1000 Ljubljana.



Slika 11: MP-5 Soba P06, FT Kozmetologija (visoko pritličje)

Slika 11 prikazuje dve merilni mesti na načrtovanem gradbišču Večna pot 1000 Ljubljana.



Slika 12: MP-6 in MP-7 na odprtem polju

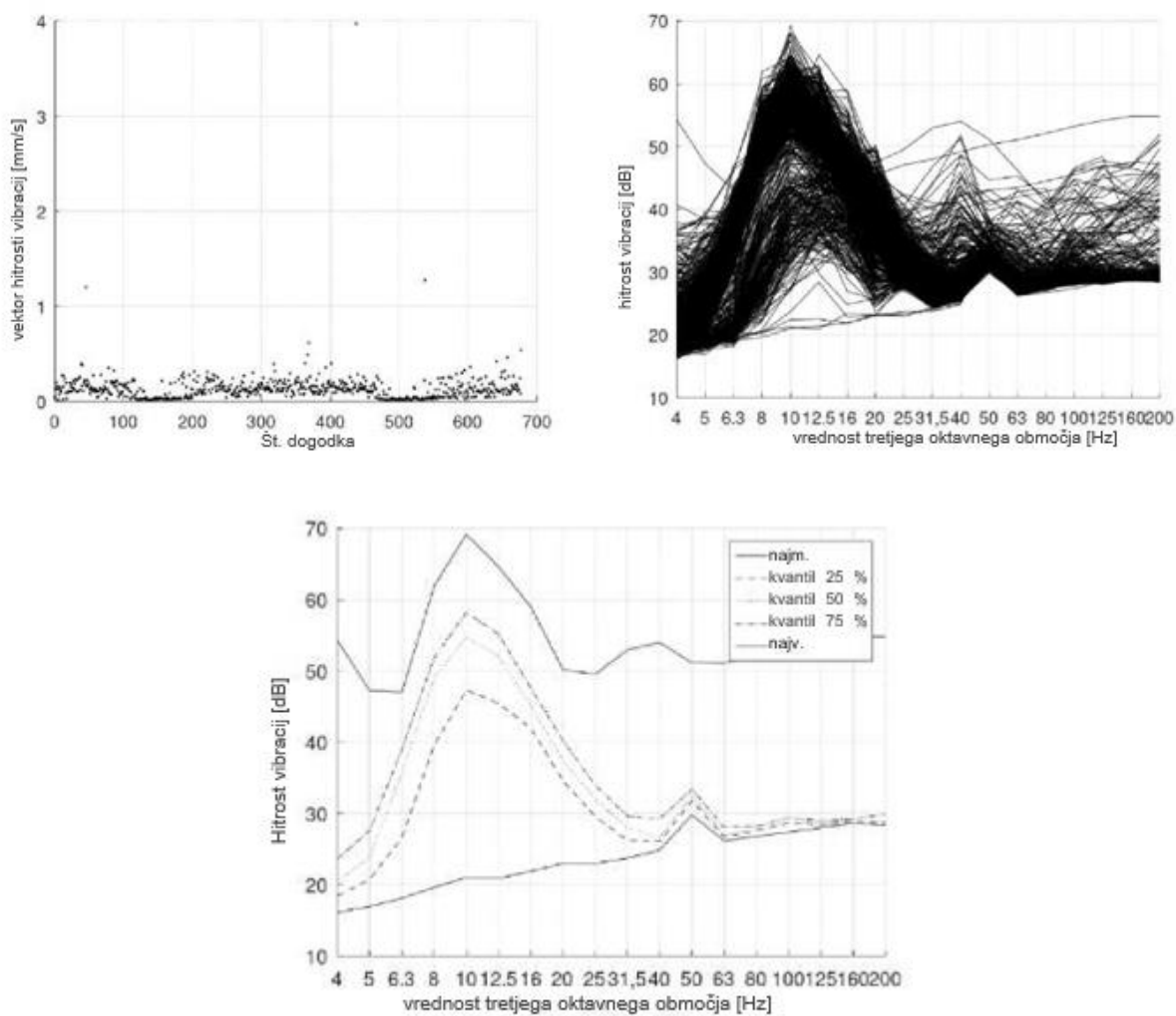
3.3 IZVEDBA OCENJEVANJA VIBRACIJ

Meritev je bila izvedena v obdobju med 20. junijem 2022 in 22. junijem 2022, in sicer se je izvajala neprekinjeno. Sprožilna vrednost ni bila nastavljena, zato so bili med obdobjem opazovanja zabeleženi vsi odčitki.

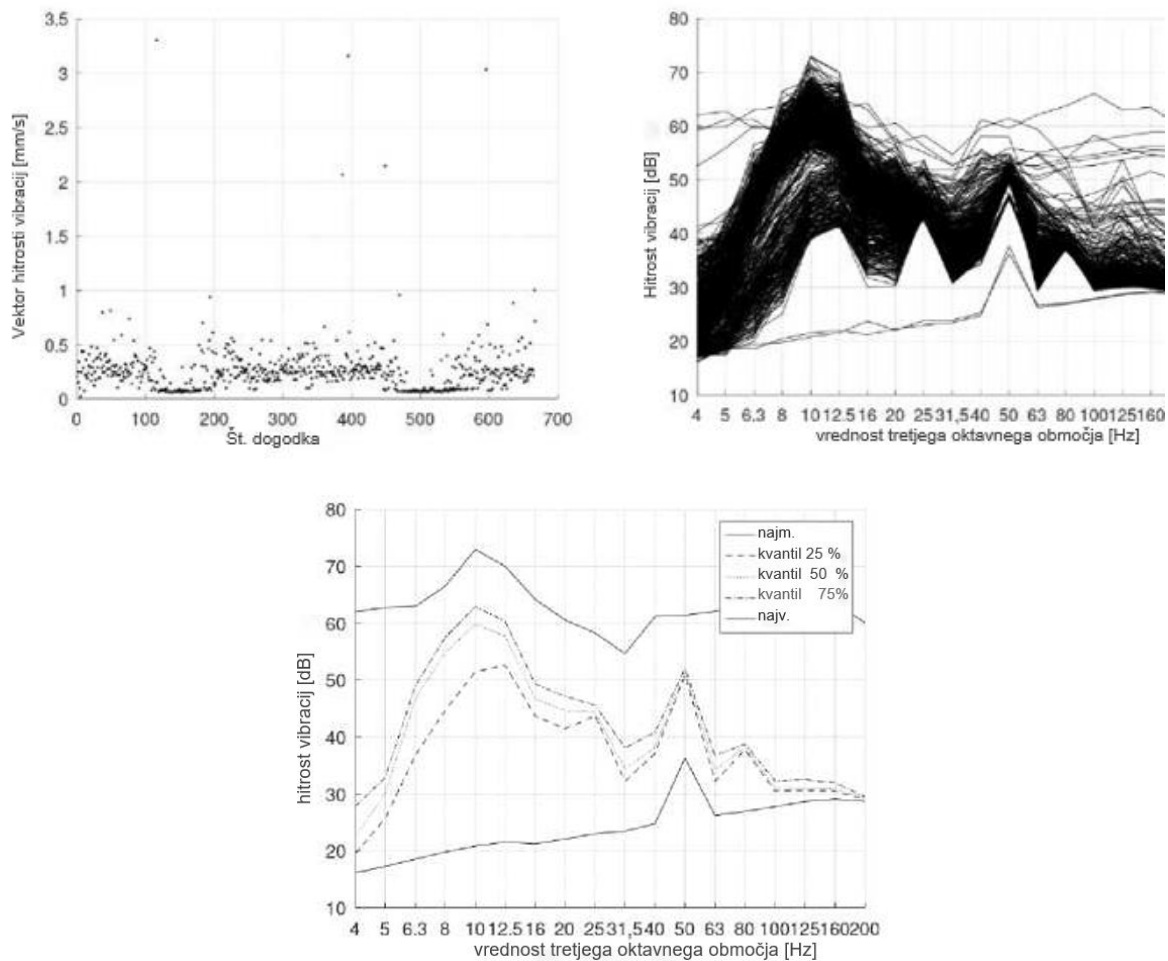
Kot senzorji vibracij so bili uporabljeni geofoni tipa Walesch MST-1031. Ta tip senzorja beleži hitrost vibracij v frekvenčnem območju 1–315 Hz.

3.4 REZULTATI OCENJEVANJA VIBRACIJ

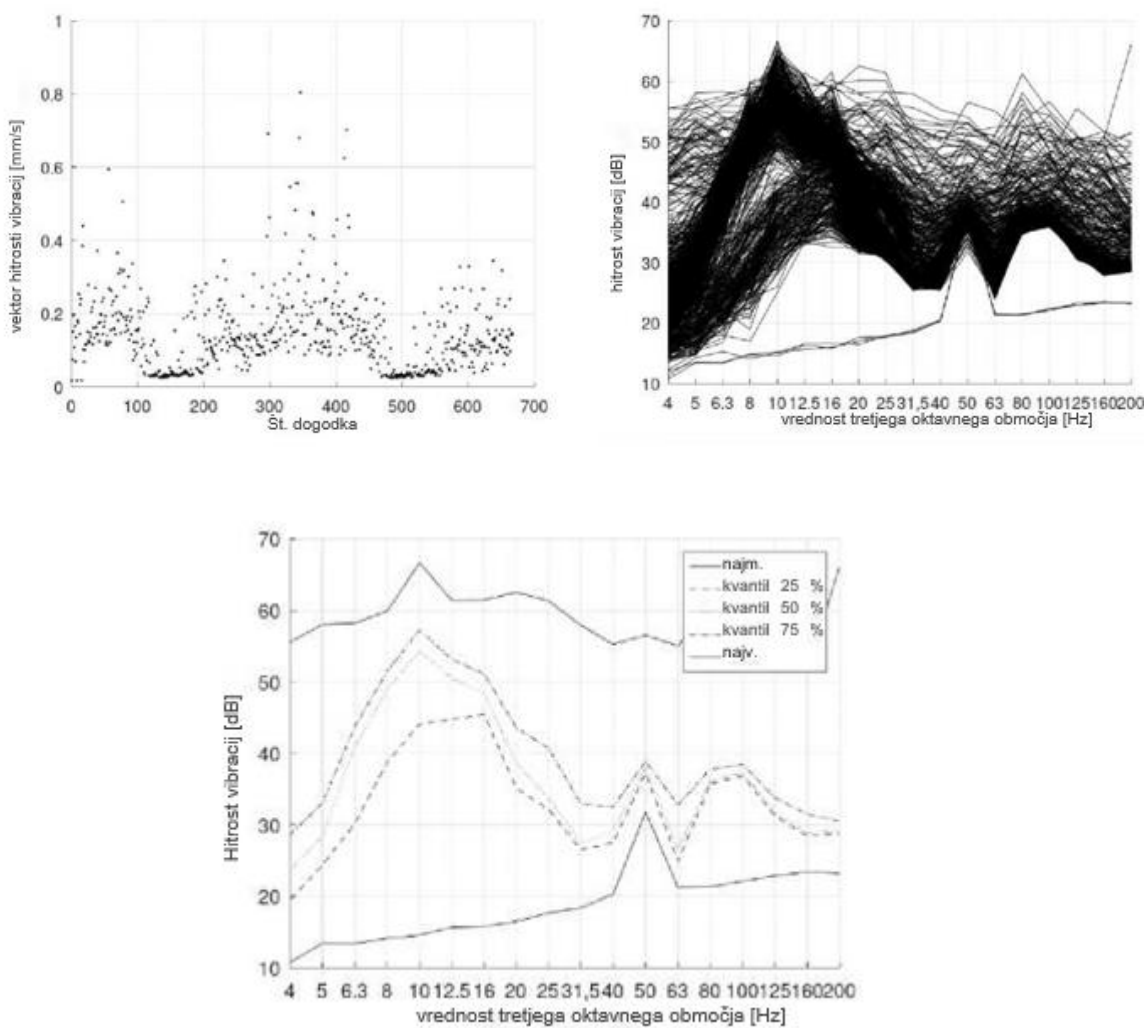
Na naslednjih petih slikah so prikazani neobdelani rezultati meritev vibracij. Na vsaki sliki je prikazana maksimalna vrednost 4-minutnega vektorja (zgornji levi graf), spekter tretjega oktavnega območja za največjo vrednost v vsakem intervalu 4 minut (zgornji desni graf) in nekateri statistični rezultati (fraktile).



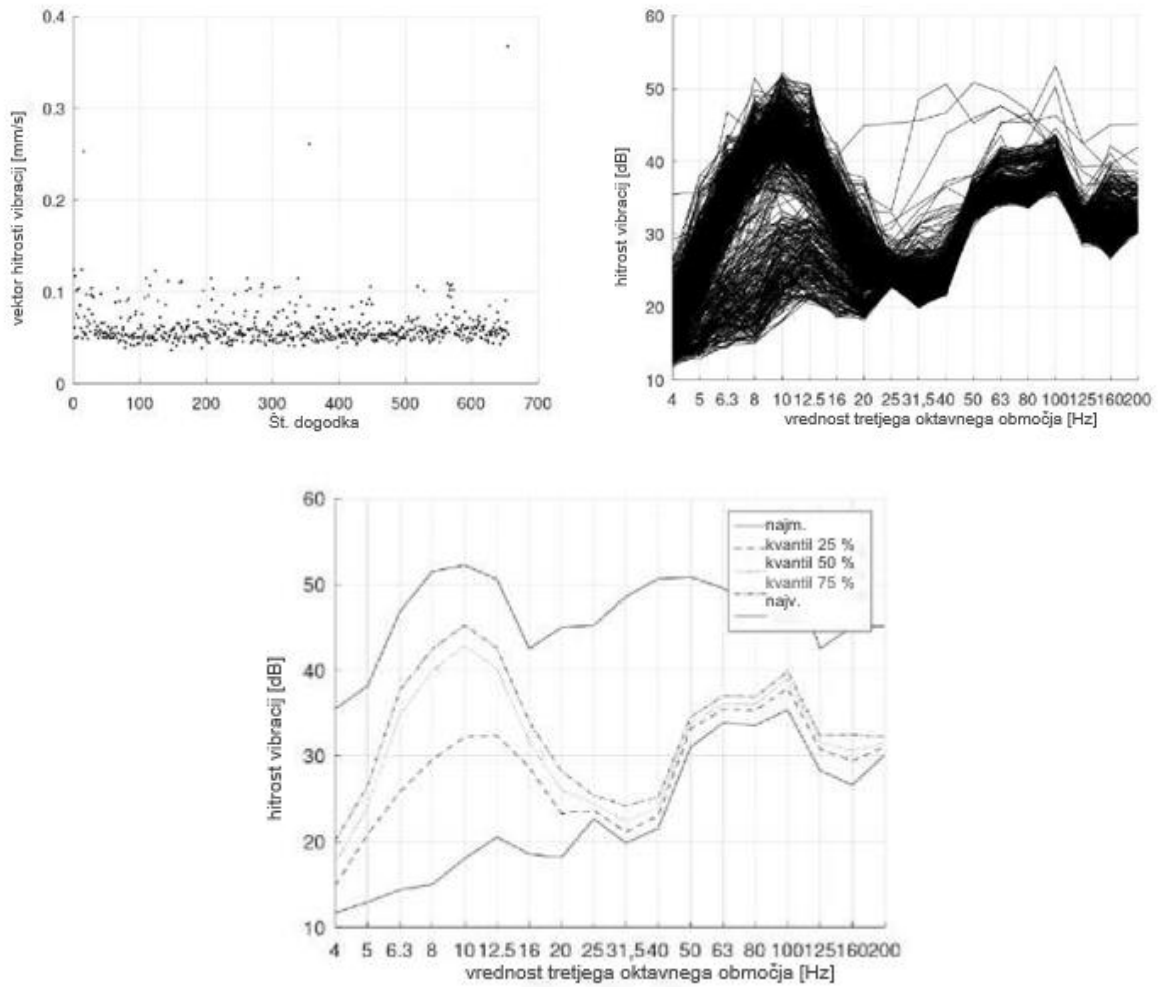
Slika 13: Rezultat merjenja vibracij MP-1



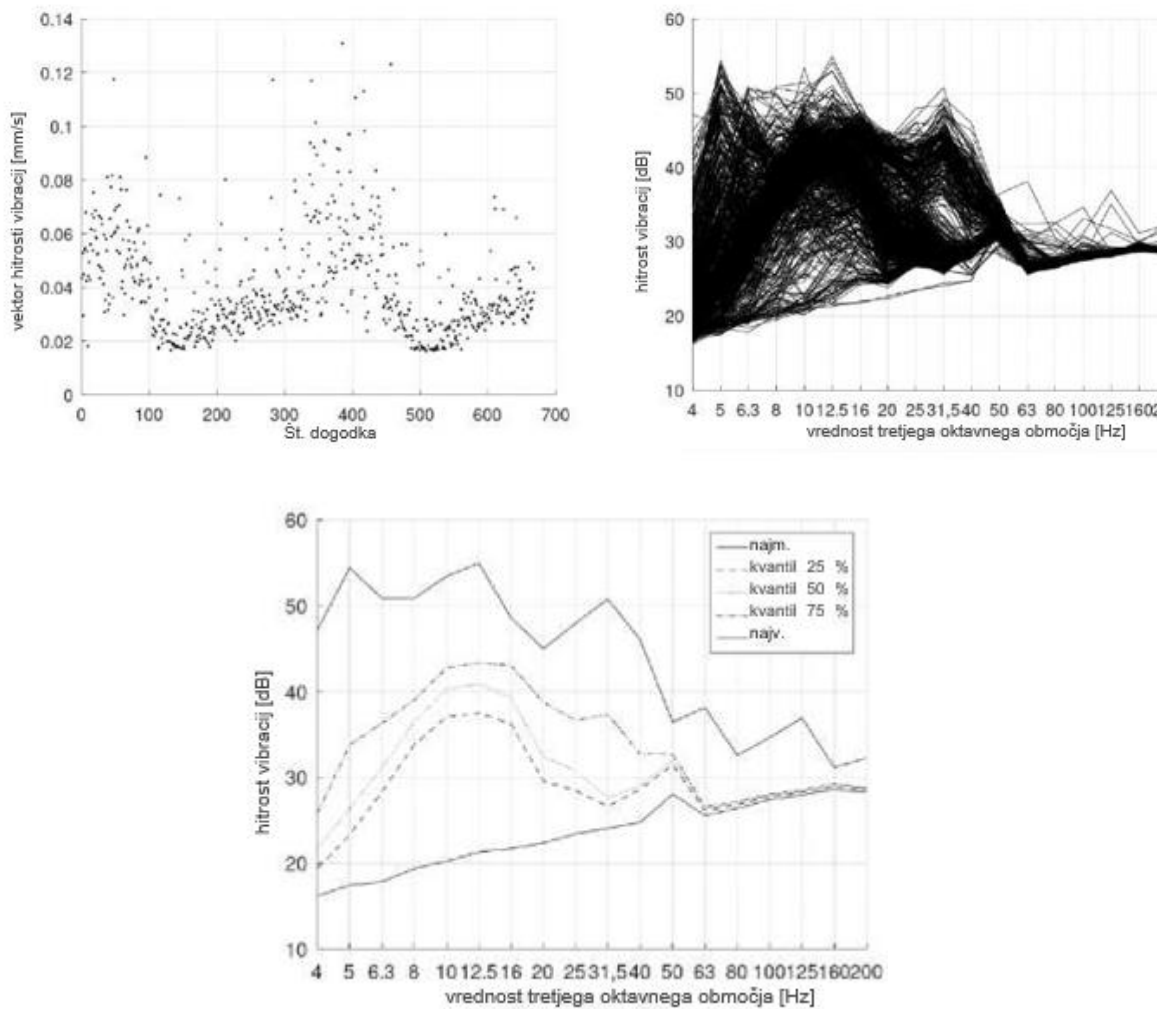
Slika 14: Rezultat merjenja vibracij MP-2



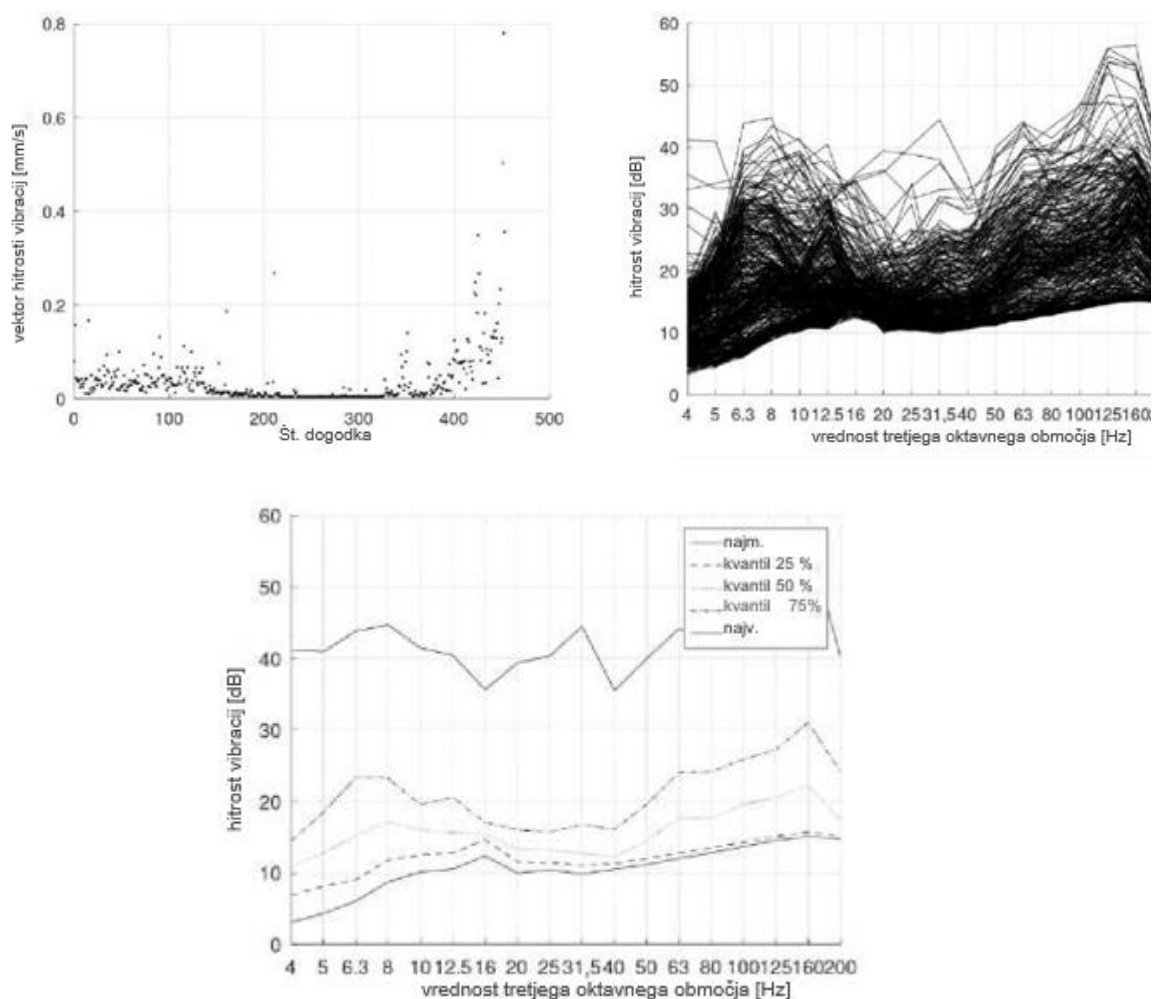
Slika 15: Rezultat merjenja vibracij MP-3



Slika 16: Rezultat merjenja vibracij MP-4



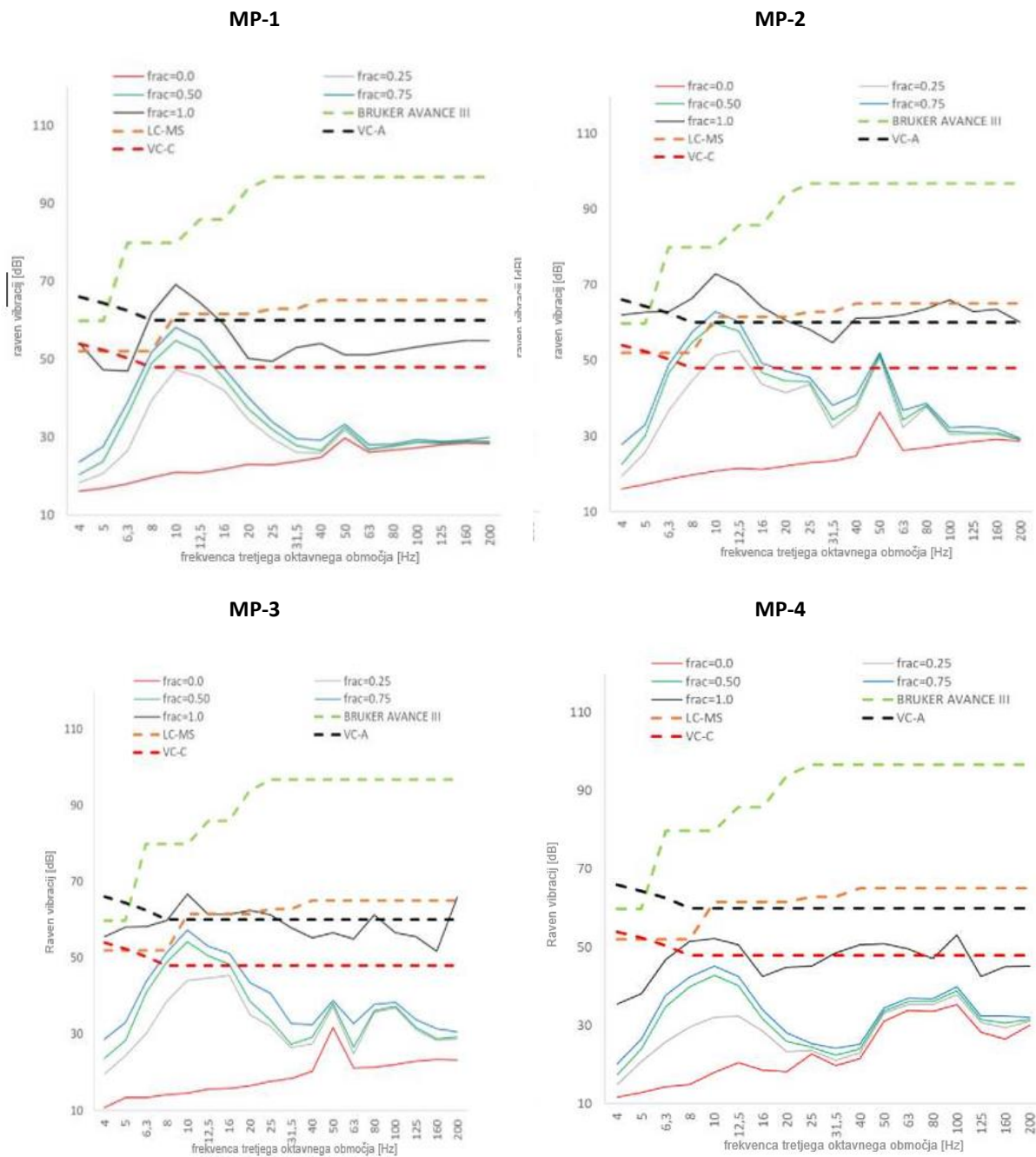
Slika 17: Rezultat merjenja vibracij MP-5



Slika 18: Rezultat merjenja vibracij MP-5 in MP-6 (povprečje)

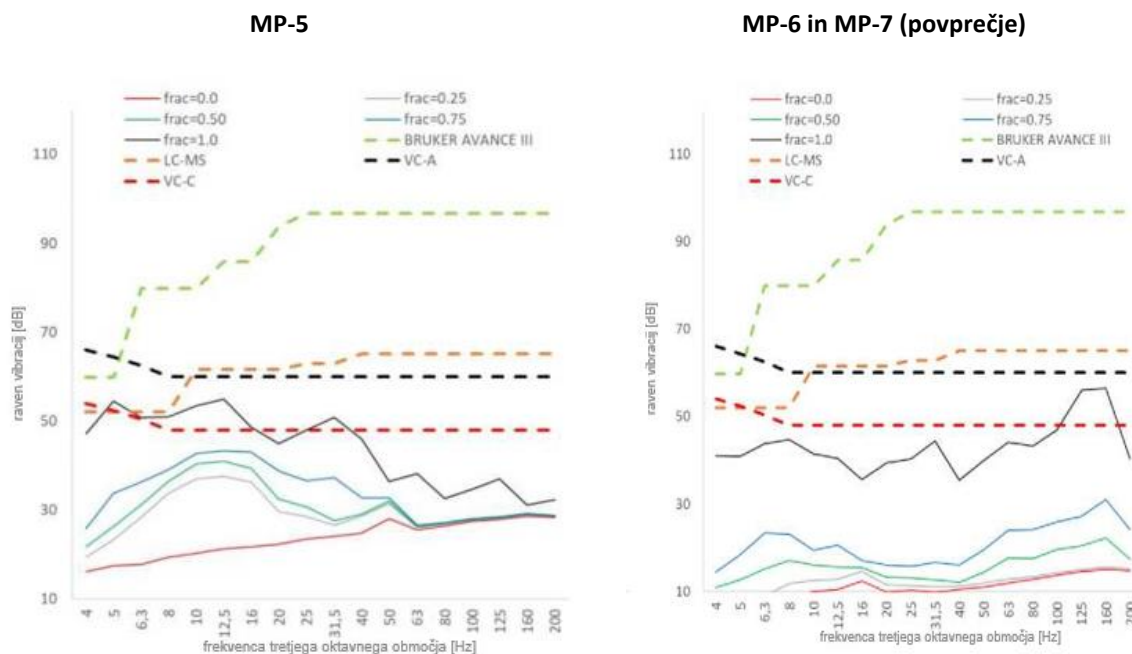
Kot kažejo raztreseni diagrami z največjo vrednostjo vektorja v vsakem 4-minutnem obdobju, so vrednosti v nočnem času veliko nižje. To je mogoče pripisati predvsem manjšemu prometu ponoči. Poleg tega se ponoči v stavbi ne gibljejo ljudje. Statistični diagrami kažejo veliko razliko, zlasti med najmanjšo in največjo vrednostjo. To je posledica hoje ljudi mimo senzorjev med delovnim časom. Frekvenčni diagrami kažejo povečane vibracije pri precej nizkih frekvencah pod približno 50 Hz.

V spodnjih diagramih je prikazan povzetek glavnih rezultatov. Polne barvne črte prikazujejo rezultate meritev kot statistične fraktile (najm., 25 %, 50 %, 75 %, najv.) za vsak frekvenčni pas (vrednost tretjega oktavnega območja). Poleg tega so v tabelah prikazane vrednosti kriterijev za vibracije za kategoriji VC-A in VC-C ter mejne vrednosti, ki jih je univerza navedla za posebno opremo.



Slika 19: Končni rezultati MP-1 do MP-4 (Aškerčeva c. 7, 1000 Ljubljana)

Med meritvami v stavbi fakultete na Aškerčevi c. 7 so bile največje vibracije zaznane v sobi 136 v 1. nadstropju (MP-2). Ob upoštevanju fraktile 50 % in 75 % v tej sobi niso izpolnjeni kriteriji razredov VC-C in VC-A ter mejne vrednosti za LC-MS. V 3. nadstropju (MP-3) in kleti UltraShield (MP-1) sta mejni vrednosti VC-C preseženi pri fraktilih 50 % in 75 %, medtem ko je mejna vrednost VC-A izpolnjena. Meritve v kleti K06A (MP-4) so pokazale, da vse prikazane mejne vrednosti dosegajo fraktile 50 % in 75 %.



Slika 20: Končni rezultati MP-5 (Tržaška ulica 32) in MP-6 in MP-7 na odprtem polju (Večna pot, 1000 Ljubljana)

Meritve na odprtem polju na bodočem gradbišču kažejo, da vse prikazane mejne vrednosti dosegajo fraktilne 50 % in 75 %. Pri tem je treba še enkrat omeniti, da trenutno na lokaciji ni večjega prometa, ne avtomobilskega ne železniškega.

4. NUMERIČNI IZRAČUNI IN NAPOVEDI

4.1 NUMERIČNI IZRAČUNI

4.1.1 Splošno

Cilj numeričnih izračunov je oceniti vibracije za načrtovano stavbo. Osnovne vhodne vrednosti za oceno na podlagi numeričnih izračunov so vibracije v kleti. Ker so bile meritve vibracij opravljene predhodno, se lahko rezultati te ocene uporabijo v numeričnem modelu. Poleg tega so bili za oceno vpliva vibracij prihodnjega železniškega predora uporabljeni primerjalni podatki iz podobnih projektov.

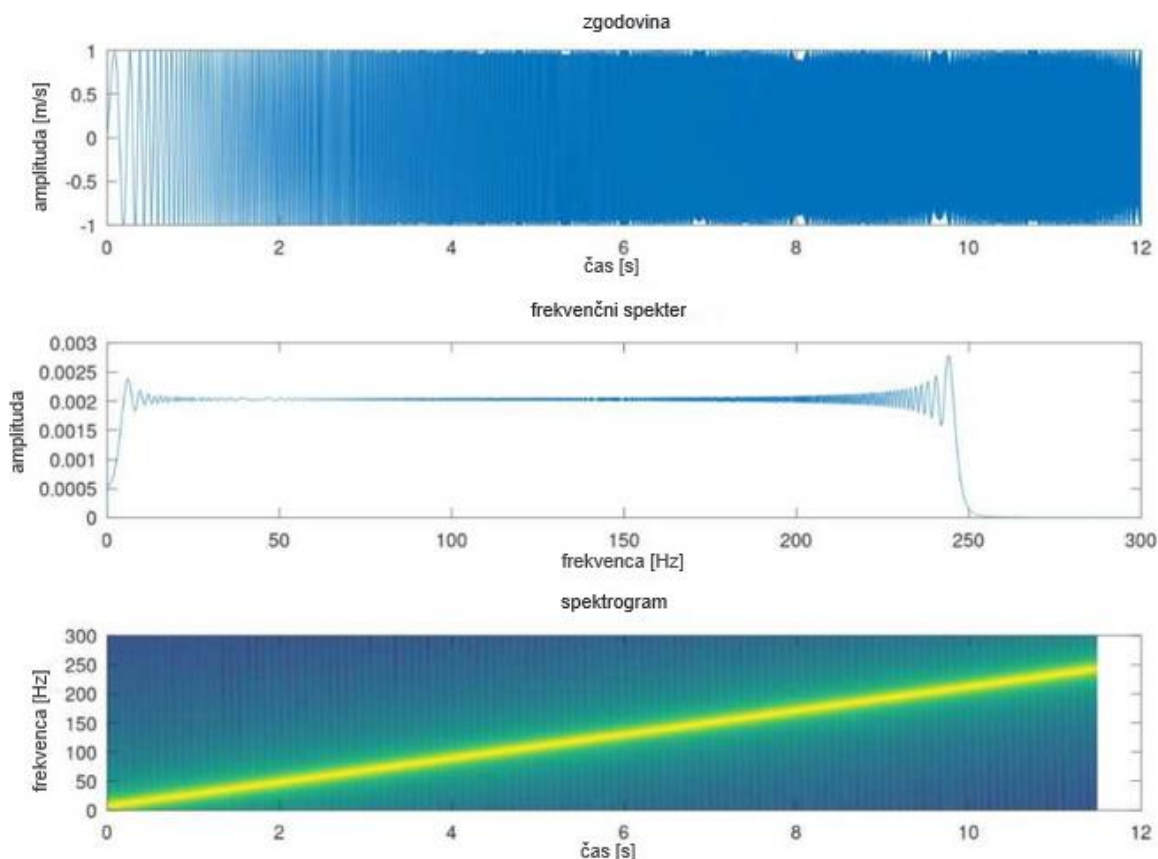
Na podlagi tridimenzionalnega modela celotne stavbe je bilo izdelanih več dvodimenzionalnih presekov, s katerimi je bilo raziskano podrobno vedenje različnih delov stavbe.

Po pripravi numeričnega modela v programski opremi je treba v naslednjih korakih oceniti vibracije v notranjosti načrtovane stavbe:

- Na podlagi meritev in primerjalnih podatkov iz podobnih projektov je treba določiti referenčni primer obremenitve z vibracijami. Za zadostno rezervo pri napovedi se kot obremenitve uporabijo ravni vibracij fraktilne 75 %.
- Uporabiti je treba primer obremenitve zaradi vibracij na temeljih stavbe v numeričnem modelu.
- Oceniti je treba izgube pri prenosu vibracijske energije med zemljino in temelji na podlagi standardnih modelov in referenčnih podatkov.

- Iz numeričnega modela je treba izračunati spektre prenosa za vsa ustrezna nadstropja v stavbi. Spektri prenosa v osnovi opisujejo prenos vibracij od temeljev k posameznim nadstropjem stavbe. Za ugotavljanje vedenja prenosa od temeljev k različnim nadstropjem je bil uporabljen preletni signal, s katerim se zagotovi upoštevanje vseh frekvenc (Slika 21).
- Izbrano raven vibracij je treba uporabiti kot primer obremenitve, da se skupaj s spektri prenosa izračuna absolutna raven vibracij za različna nadstropja.

Slika 21 predstavlja funkcijo obremenitve, ki se uporablja za določitev funkcije prenosa vibracij od temeljev k različnim nadstropjem. Poleg tega Slika 21 ponazarja frekvenčni spekter in spektrogram uporabljenе funkcije.

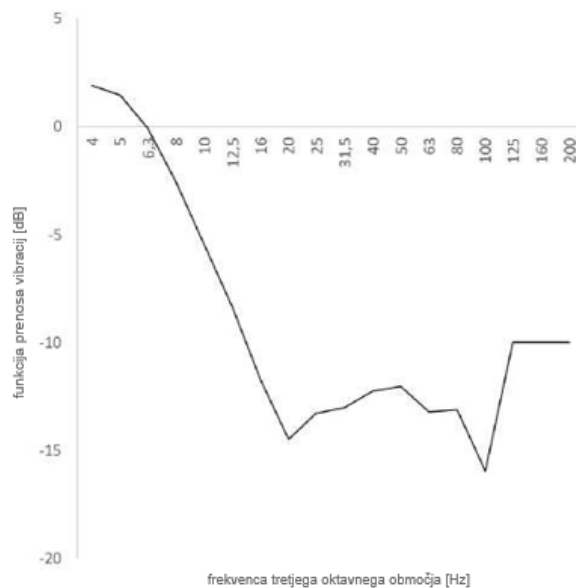


Slika 21: Primer preletne obremenitve, uporabljen v numeričnih izračunih

Kot ponazarja Slika 21, so bile upoštewane frekvence med 1 Hz in 250 Hz.

Vibracije, ki prihajajo iz zemljine, se med prenosom k temeljem stavbe dušijo. To dušenje je zelo odvisno od bruto mase in lastnih frekvenc stavbe ter hitrosti širjenja valov v zemljini. Bruto teža in lastne frekvence stavbe se izračunajo z modelom KE. Lastnosti valovanja v zemljini so bile povzete iz prejšnje raziskave (poročilo št. 40-10691-01-D1, 15. 12. 2020), ki ga je izvedlo podjetje Baudynamik Heiland & Mistler GmbH.

Rezultat dušenja vibracij od zemljine do temeljev stavbe ponazarja Slika 22.



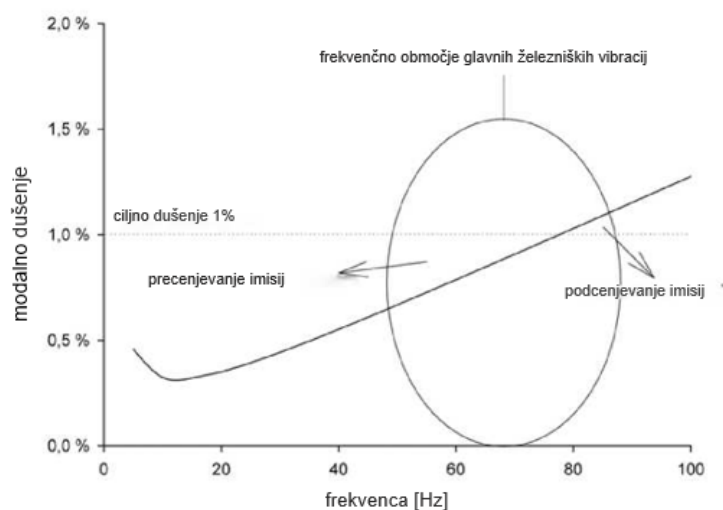
Slika 22: Funkcija prenosa vibracij od tal na konstrukcijo.

V nizkofrekvenčnem območju do približno 8 Hz so vibracije nekoliko ojačane, nad tem območjem pa se vibracije, ki prihajajo iz zemljine, znatno zmanjšajo.

4.2 DUŠENJE

Kot model dušenja je bilo uporabljeno Rayleighovo dušenje. Parametri Rayleighovega dušenja so bili izbrani tako, da znaša dušenje v frekvenčnem območju med 1 Hz in 100 Hz približno 1 %. To je tipična vrednost dušenja, ki jo lahko pričakujemo pri betonu.

Slika 23 ponazarja ustrezne vrednosti modalnega dušenja za izbrane parametre Rayleighovega dušenja za ciljno dušenje 1 %.



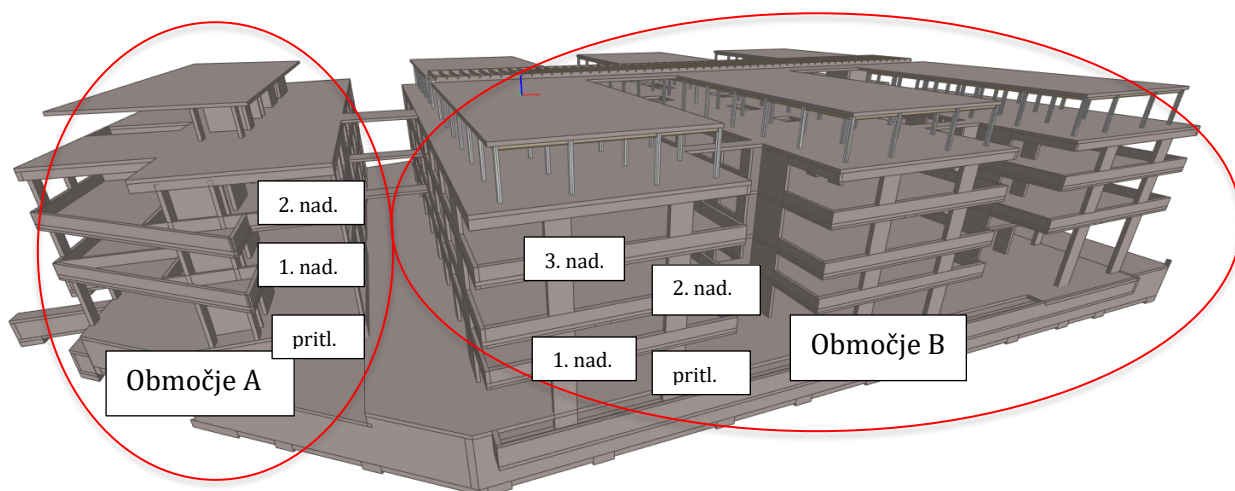
Slika 23: Vrednosti Rayleighovega dušenja za numerične izračune

Kot je prikazano na zgornji sliki (Slika 23), so dobljene vrednosti modalnega dušenja predvsem pod 1 % v frekvenčnem območju, ki nas zanima. To lahko štejeemo za konservativen pristop, saj nižje vrednosti dušenja povzročijo precenjevanje širjenja vibracij znotraj stavbe.

Pri izbranem dušenju niso vključeni učinki, kot je prenos dušenja od sten k stropu. Pri blaženju 1 % je vključeno samo materialno blaženje samega betona. Izbrane vrednosti dušenja se zato lahko štejejo za precej konservativne.

4.3 NAPOVEDOVANJE VIBRACIJ

Za napoved vibracij za ciljni projekt je bila stavba razdeljena na dva dela. Del A je manjši del v bližini morebitnega bodočega železniškega predora, del B pa sestavljajo preostale tri stavbne konstrukcije. Napoved vibracij je bila izvedena za vsako nadstropje stavbe. Zagotovljena napoved vibracij predstavlja največjo vrednost vibracij za vsako nadstropje. Slika 24 prikazuje 3D-model stavbe in dele za izračune.

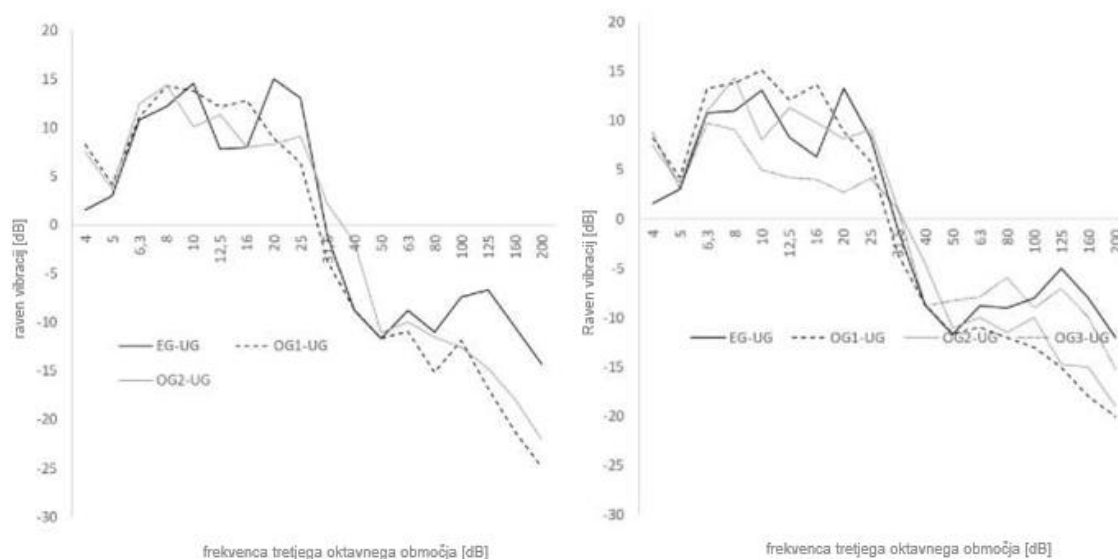


Slika 24: Tridimenzionalni model načrtovane nove stavbe fakultete

Napoved vibracij je bila izvedena za dva primera obremenitve. En primer obremenitve temelji na oceni prihodnjega železniškega predora, drugi primer obremenitve pa predstavlja trenutne razmere na gradbišču, pridobljene z meritvami.

Numerični izračuni so bili izvedeni s programskim paketom Sofistik, različica 2022.

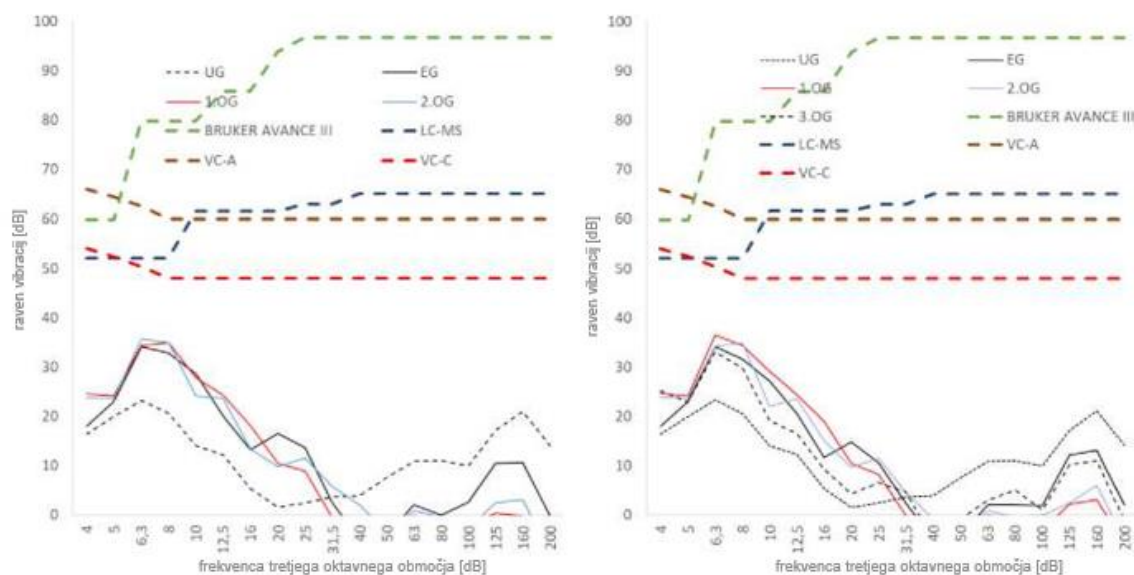
Rezultati numeričnih izračunov za obe območji so prikazani na spodnji sliki (Slika 25). Graf prikazuje funkcije prenosa vibracij od temeljev stavbe k različnim nadstropjem. Ti rezultati predstavljajo največjo vrednost prenosa vibracij za vsako nadstropje.



Slika 25: Funkcije prenosa vibracij od temeljev do nadstropji (levo: območje A; desno: območje B)

V nizkofrekvenčnem območju do približno 30 Hz je mogoče opaziti znatno ojačitev vibracij. To je posledica lastnih frekvenc talnih plošč in/ali stebrov. Nad tem frekvenčnim območjem se vibracije od temeljev k nadstropjem znatno zmanjšajo.

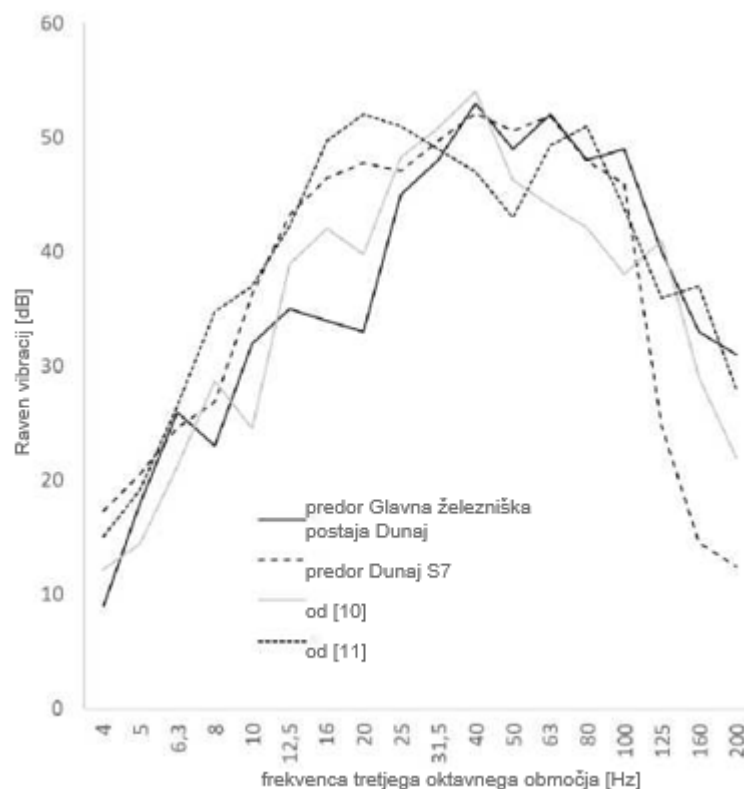
Na podlagi zgoraj prikazanih rezultatov je mogoče napovedati vibracije za primer, ko železniške proge ni. Ti rezultati so skupaj z mejnimi vrednostmi, ki jih je posredoval naročnik, za obe območji prikazani na spodnji sliki (Slika 26).



Slika 26: napoved vibracij brez železniškega predora (levo: območje A; desno: območje B)

Na podlagi zgornje slike (Slika 26), je mogoče ugotoviti, da so brez železniškega predora mejne vrednosti za VC-C in s tem vse mejne vrednosti za specifično opremo izpolnjene v vseh etažah načrtovane stavbe.

Naslednji korak je napoved na podlagi prihodnje železniške proge v bližini načrtovane stavbe. Znana je le informacija, da bo proga v predoru, ki bo najverjetneje zgrajen po metodi Nöt (nova avstrijska metoda gradnje predorov). Tako ni bilo mogoče zbrati podatkov o vibracijah in so bili uporabljeni primerljivi podatki o emisijah vibracij iz drugih projektov in iz literature. Slika 27 prikazuje zbirko podatkov o emisijah vibracij.

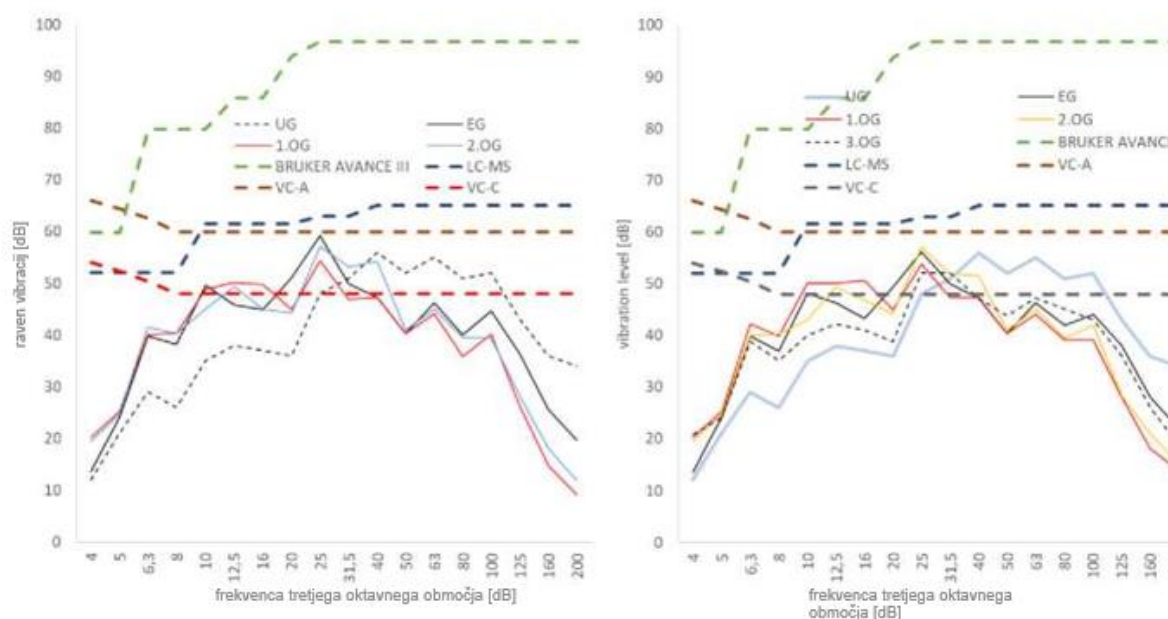


Slika 27: emisije vibracij primerljivih železniških predorov [10]–[12]

Omeniti je treba, da podatki o emisijah temeljijo na tirnih progah s plavajočimi tirnimi ploščami z lahкими vzmetnimi sistemi (približno 20–22 Hz).

Za nadaljnje napovedovanje vibracij je bila kot primer obremenitve uporabljena največja vrednost frekvence tretjega oktavnega območja glede na vse podatke.

Graf na spodnji sliki (Slika 28) prikazuje napoved za primer, da bo v prihodnosti zgrajen železniški predor. Na tem mestu je treba omeniti, da dejanske vrednosti emisij vibracij za morebitni predor še niso bile na voljo. Tako so bile za pridobitev podatkov o emisijah uporabljene emisije vibracij iz podobnih železniških predorov v Avstriji (nova avstrijska metoda gradnje predorov). Podatki o emisijah vibracij iz predorov v Avstriji so temeljili na tirnicah iz plavajočih tirnih plošč z lahkim masnim vzmetnim sistemom s frekvenco približno 20–22 Hz. Uporabljeni podatki o emisijah so temeljili na različnih vlakih (tovorni in potniški vlaki). Poleg tega je bil za naslednje ocene uporabljena fraktila 75 % merjenih vlakov.



Slika 28: Napoved vibracij z železniškim predorom (levo: območje A; desno: območje B)

Graf na zgornji sliki (Slika 28) prikazuje napoved za primer, da bo v prihodnosti zgrajen železniški predor. Rezultati napovedi kažejo, da je mogoče izpolniti kriterij VC-A, medtem ko je kriterij VC-C znatno presežen.

Naj ponovno poudarimo, da primerjalni podatki iz avstrijskih predorov temeljijo na tirih s plavajočimi ploščami z lahkim sistemom masnih vzmeti s frekvenco približno 20–22 Hz.

5. SKLEPI

V tem poročilu so prikazani rezultati raziskave vibracij za novo stavbo Fakultete za farmacijo. Za pridobitev napovedi vibracij za novo stavbo so bile opravljene meritve vibracij v obstoječih stavbah in na območju načrtovane stavbe ter numerični izračuni na podlagi modela KE za načrtovano stavbo.

Rezultati kažejo, da so brez železniškega predora v bližini načrtovane stavbe izpolnjene vse mejne vrednosti, ki jih je podal naročnik.

Ocena za primer bližnjega železniškega predora (20 m od načrtovane stavbe) je pokazala, da kriterija za vibracije VC-C ni mogoče izpolniti. Zato so predlagani nadaljnji ukrepi za doseganje ravni vibracij, da se bo občutljiva oprema lahko uporabljala na ustrezen način.

- Na lokacijah, na katerih bo nameščena oprema občutljiva na vibracije, je treba upoštevati dodatne obremenitve za dodatne temelje (kot dodaten ukrep proti vibracijam). Ocenjujemo, da bodo ti dodatni temelji debeli od 20 do 30 cm. Dimenzije teh dodatnih temeljev so odvisne od teže opreme, nameščene na lokacijah. Vsekakor je treba zmanjšanje vibracij z elastičnimi plastmi načrtovati v sodelovanju s proizvajalcem opreme, da ne bi prišlo do resonančnih težav.
- Občutljivo opremo je treba namestiti blizu temeljev stavbe in ne v višja nadstropja. V temeljih so frekvence imisij višje, zaradi česar je lažje doseči izolacijo proti vibracijam.
- Pri projektiranju železniškega predora je treba vsekakor upoštevati plavajoče tirne plošče z izolacijo. Druga možnost je proga s podlogo pod tirno gredo. Za nadaljnje zmanjšanje vibracij je treba razmisliti o plavajočih tirnih ploščah z nižjo lastno frekvenco < 20 Hz.

Laura Ibanez

Michael Österreicherf