

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Vulović, D., 2016. Vpliv gradbene mehanizacije na vibracije in posledične poškodbe objektov. Diplomski nalogi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Pulko, B.): 62 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5912/>

Datum arhiviranja: 28-09-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Vulović, D., 2016. Vpliv gradbene mehanizacije na vibracije in posledične poškodbe objektov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Pulko, B.): 62 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5912/>

Archiving Date: 28-09-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidatka:

DANIJELA VULOVIĆ

**VPLIV GRADBENE MEHANIZACIJE NA VIBRACIJE
IN POSLEDIČNE POŠKODBE OBJEKTOV**

Diplomska naloga št.: 3520/KS

**IMPACT OF CONSTRUCTION MACHINERY ON
VIBRATIONS AND RESULTING DAMAGE ON
BUILDINGS**

Graduation thesis No.: 3520/KS

Mentor:

doc. dr. Boštjan Pulko

Ljubljana, 21. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Spodaj podpisana študentka Danijela Vulović, vpisna številka 26108203, avtorica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Vpliv gradbene mehanizacije na vibracije in posledične poškodbe objektov

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

Ljubljana, 1. 9. 2016

Danijela Vulović

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

| | |
|-------------------------|---|
| UDK: | 614.872:697.912(043.2) |
| Avtor: | Danijela Vulović |
| Mentor: | doc. dr. Boštjan Pulko |
| Naslov: | Vpliv gradbene mehanizacije na vibracije in posledične poškodbe objektov |
| Tip dokumenta: | Diplomska naloga – univerzitetni študij |
| Obseg in oprema: | 62 str., 34 tab., 38 sl., 31 en. |
| Ključne besede: | Vibracije, vršna hitrost delca, linerno elastičen model, HS-Small model, togost, Rayleighovo dušenje |

Izvleček:

V diplomski nalogi smo obravnavali vpliv vibracij zaradi prometne obtežbe in gradbene mehanizacije na obstoječe objekte. Ukrepi, s katerimi bi lahko zaščitili konstrukcije, so zelo omejeni, zato je potrebno določene izračune in meritve vibracij izvesti pred gradbenimi deli. Parameter za presojo vpliva vibracij na objekte, ki je splošno priznan in ga primerjamo s kriteriji podanimi v standardih, je vršna hitrost delca. Na osnovi vršne hitrosti delca lahko določimo, katera je minimalna razdalja med izvorom in obstoječim objektom, da ne pride do poškodb. V Sloveniji nimamo standarda za določanje mejnih vrednosti vršnih hitrosti, zato so v uporabi evropski standardi. V diplomski nalogi smo navedli mejne vrednosti vršnih hitrosti, kot jih določajo britanski, nemški, avstrijski in švicarski standardi.

S programskim orodjem Plaxis 2D smo izvedli geodinamično analizo vpliva gradbenih naprav na temeljna tla. Ker nas zanimajo hitrosti površinskih valov, smo merilne točke postavili na površje. Pri analizi smo v izbranem časovnem intervalu spremljali potek hitrosti in zabeležili največjo absolutno hitrost. Zanimal nas je vpliv karakteristik tal na rezultate, zato smo spreminjali togost tal v prvem računskem primeru in dobljene podatke primerjali z empiričnimi enačbami. V drugem računskem primeru smo primerjali rezultate linearno elastičnega in HS-Small modela ter prišli do ugotovitve, da je uporaba slednjega bolj primerna za analizo točnih vibracij.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

| | |
|-----------------------|---|
| UDC | 614.872:697.912(043.2) |
| Author: | Danijela Vulović |
| Supervisor: | Assist. Prof. Boštjan Pulko, Ph.D. |
| Title: | The impact of construction machinery to vibrations and resulting damage to buildings |
| Document type: | Graduation Thesis – University studies |
| Notes: | 62 p., 34 tab., 38 fig., 31 eq. |
| Key words: | Vibration, peak particle velocity, linear elastic model, HS-Small model, stiffness, Rayleigh damping |

Abstract:

This thesis deals with impact of traffic and construction-induced vibrations on existing facilities. Protecting measures are very limited, therefore it is necessary to set out the calculations and measurements before the construction work. Parameter for assessing the impact of vibration on the building, which is widely recognized and compared to the criteria given in standard, is peak particle velocity. Based on the peak particle velocity we can determine the minimum distance between the source and existing building, in order to avoid construction damage. Slovenia has no standard for setting limit values for peak particle velocity. We have listed the limit values of peak particle velocity as defined in British, Austrian, German and Swiss standards.

Dynamic analyses with computer program Plaxis were carried out to analyze the impact of construction-induced vibrations on the ground. Since we are interested in the surface waves, the measuring points were set on ground surface. We selected the appropriate time interval and recorded the highest peak particle velocity. As we were interested in the influence of soil characteristics on the results, the stiffness of the ground was varied in the first case and the results compared to empirical equation. In the second case, the results using two different soil material models were compared. A linear-elastic and HS-Small model were used to model the soil. As in first case, the comparison of the calculated peak particle velocities showed, that the HS-Small model is more suitable for the analysis of ground vibrations.

ZAHVALA

Najprej bi se iskreno zahvalila mentorju doc. dr. Boštjanu Pulku za strokovnost, pomoč in podporo pri nastajanju diplomskega dela.

Zahvalila bi se tudi mojim kolegicam za vzpodbudo v trenutkih, ko ni šlo vse po načrtanih planih in veseli me, da nam je skupaj uspelo zaključiti to pot.

Največja zahvala gre moji družini, ki so me ves čas študija spodbujali in podpirali.

KAZALO VSEBINE:

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | UVOD..... | 1 |
| 1.1 | Splošno | 1 |
| 2 | SPLOŠNO O VIBRACIJAH..... | 2 |
| 2.1 | Osnove talnih vibracij | 3 |
| 2.2 | Največja hitrost delca..... | 5 |
| 2.3 | Vrste vibracijskih valov | 6 |
| 2.4 | Modeli širjenja vibracij | 8 |
| 2.5 | Izvor vibracij | 11 |
| 2.6 | Sprejemniki vibracij..... | 12 |
| 3 | KRITERIJI VIBRACIJ..... | 13 |
| 3.1 | Vpliv vibracij na človeka in stavbe..... | 13 |
| 4 | PROMETNA OBTEŽBA..... | 16 |
| 4.1 | Zemljske vibracije zaradi različnih vrst prometa | 16 |
| 5 | NAPOVED VIBRACIJ IN DEFORMACIJ | 18 |
| 5.1 | Oprema za zabijanje pilotov..... | 18 |
| 5.1.1 | Amplitude hitrosti, ki jih povzročajo zabijala pilotov | 19 |
| 5.1.2 | Amplitude hitrosti, ki jih povzročajo vibracijska zabijala za pilote | 19 |
| 5.1.3 | Amplitude hitrosti, ki jih povzročajo hidravlična kladiva | 21 |
| 5.1.4 | Amplitude hitrosti, ki jih povzroča ostala gradbena mahnizacija..... | 22 |
| 5.2 | Določanje deformacij materiala in največje napetosti na osnovi PPV..... | 23 |
| 6 | VREDNOTENJE MERITEV | 24 |
| 7 | STANDARDI S PODROČJA PRESOJE VPLIVOV VIBRACIJ NA OBJEKTE..... | 25 |
| 7.1 | Standard BS 7385 Vrednotenje in merjenje vibracij v zgradba | 25 |
| 7.1.1 | Merilna mesta BS 7385-1:1990..... | 27 |
| 7.1.2 | Merilne naprave..... | 28 |
| 7.2 | Avstrijski standard ÖNORM S 9020 | 29 |
| 7.3 | Nemški standard DIN 4150-3: Vpliv vibracij na objekte | 30 |
| 7.4 | Švicarski standard SN 640 312a:1992 | 31 |
| 8 | IZRAČUN VRŠNE HITROSTI DELCA ZARADI DELOVANJA GRADBENE MEHANIZACIJE..... | 32 |
| 8.1 | Računska simulacija zabijanja pilota | 32 |
| 8.1.1 | Uporabljeni modeli in karakteristike materialov | 33 |

| | | |
|-------|---|----|
| 8.1.2 | Modeliranje problema | 34 |
| 8.1.3 | Računske faze, dinamičen čas in število korakov | 35 |
| 8.1.4 | Rezultati | 36 |
| 8.2 | Računska simulacija udara hidravličnega kladiva | 45 |
| 8.2.1 | Izbrani hidravlični kladivi | 46 |
| 8.2.2 | Modeliranje tal | 47 |
| 8.2.3 | Rezultati | 50 |
| 9 | ZAKLJUČEK | 57 |
| VIRI: | | 59 |

KAZALO TABEL:

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Vrednosti geometrijskega koeficienta (Amick, 2000)..... | 9 |
| Tabela 2: Vrednosti koeficientov dušenja za različne materiale (za P in S valove) (Amick 2000, Hendricks 2002) | 10 |
| Tabela 3: Vrednosti parametra n (Woods, 1997)..... | 10 |
| Tabela 4: Vpliv stalnih vibracij na človeka in objekte (Whiffen, 1971) | 13 |
| Tabela 5: Chaeov kriterij za vibracije stavb | 13 |
| Tabela 6: Swiss Association of Standardization kriterij poškodb vibracij (SN 640 312a:1992)..... | 14 |
| Tabela 7: Konanov kriterij za vibracije zgodovinskih objektov..... | 14 |
| Tabela 8: Whiffenov kriterij za stalne vibracije | 14 |
| Tabela 9: Dowdingov kriterij vibracij za stavbe..... | 14 |
| Tabela 10: Faktorji, ki vplivajo na nivo vibracij (Hanson, Towers in Meister, 2006) | 17 |
| Tabela 11: Vrednosti parametra n glede na razred zemljine (Wood in Jedele, 1985) | 20 |
| Tabela 12: Referenčne vrednosti PPV za ostalo gradbeno opremo (Hanson, Towers, Meister, 2006). 22 | |
| Tabela 13: Ocena nastanka poškodb za prehodne vibracije (BS 7385-2:1993, str. 5) | 25 |
| Tabela 14: Odzivi različnih virov (BS 7385-1:1990, str. 5) | 26 |
| Tabela 15: Razredi objektov klasificirani po avstrijskem standardu (ÖNORM S 9020) | 29 |
| Tabela 16: Dovoljene vrednosti vR, max (ÖNORM S 9020)..... | 30 |
| Tabela 17: Mejne vrednosti pri stalnih in občasnih vibracijah (DIN 4150-3)..... | 30 |
| Tabela 18: Mejne vrednosti po švicarskem standardu zaradi miniranja in prometa/gradbene opreme SN 640 312a:1992 | 31 |
| Tabela 19: Karakteristike materialov | 33 |
| Tabela 20: Izbrane točke in njihove oddaljenosti od izvora. | 36 |
| Tabela 21: Najvišja vršna hitrost delca (mm/s) na različnih razdaljah pri različnih deformabilnostih zemljine. | 43 |
| Tabela 22: Izbrane točke in razdalje (m) od vira (kladiva) | 45 |
| Tabela 23: Tehnične specifikacije izbranih hidravličnih kladiv (Furukawa pletna stran)..... | 46 |
| Tabela 24: Hitrosti delovanja konice obeh kladiv | 46 |
| Tabela 25: Sila kladiv | 47 |
| Tabela 26: Tipi tal (EC8-1; str. 30) | 48 |
| Tabela 27: Izbrane strižne hitrosti za posamezen tip tal..... | 48 |
| Tabela 28: Parametri tal..... | 49 |
| Tabela 29: Karakteristike tal za linearno elastičen model | 50 |
| Tabela 30: Maksimalne hitrosti (mm/s) za linearno elastičen model brez dušenja in HS-Small model za kladivo F27XP na izbranih oddaljenostih | 50 |
| Tabela 31: Maksimalne hitrosti (mm/s) za linearno elastičen model brez dušenja in HS-Small model za kladivo F70XP na izbranih oddaljenostih | 50 |
| Tabela 32: Izbrana kritična dušenja in izračunane frekvence za posamezne tipe tal-elastičen model .. | 51 |
| Tabela 33: Primerjava PPV (mm/s) za linearno elastičen model z upoštevanjem dušenja in empiričnih vrednosti PPV za kladivo F27XP na izbranih oddaljenostih..... | 52 |

| | |
|---|----|
| Tabela 34: Primerjava PPV (mm/s) za linearno elastičen model z upoštevanjem dušenja in empiričnih vrednosti PPV za kladivo F70XP na izbranih oddaljenostih..... | 54 |
|---|----|

KAZALO SLIK:

| | |
|--|----|
| Slika 1: Prikaz širjenja vibracij (http://www.gradimo.hr/clanak/mjere-za-smanjenje-buke-i-vibracija-od-zeljeznickog-prometa/33829)..... | 3 |
| Slika 2: Prikaz enostavnega točkovnega sistema (Andrews, Buelher, Gill in Bender, 2013, str. 7) | 3 |
| Slika 3: Uporabljene količine za opis vibracijskega gibanja (Andrews, Buelher, Gill, Bender, 2013, str. 9)..... | 4 |
| Slika 4: Različne metode opisa vibracijskega signala (Hanson, Towers in Meister, 2006, str. 146) | 5 |
| Slika 5: Prikaz longitudinalnega valovanja (Benz, 2007, str. 11) | 6 |
| Slika 6: Prikaz transverzalnega gibanja (Benz, 2007, str. 11) | 7 |
| Slika 7: Prikaz valovanj glede na oddaljenost od točke izvora locirane na površju (Andrews, Buelher, Gill in Bender, 2013, str. 8)..... | 8 |
| Slika 8: Pot širjenja vibracij do objektov (Hanson, Towers in Meister, 2006)..... | 16 |
| Slika 9: Primerjava PPV za zabijala z različno energijo in vibracijsko zabijalo | 20 |
| Slika 10: Primerjava PPV za hidravlična kladiva z različno energijo | 21 |
| Slika 11: Primerjava PPV v odvisnosti od razdalje za naštetu gradbeno mehanizacijo | 23 |
| Slika 12: Grafični prikaz ocene nastanka kozmetičnih poškodb za prehodne vibracije (komponenta najvišje hitrosti delca (mm/s) v odvisnosti od frekvence (Hz)) (BS 7385-2:1993, str. 5)..... | 26 |
| Slika 13: Sestavni deli piezoelektričnega pospeškmera (http://www.pcb.com/techsupport/tech_accel) | 28 |
| Slika 14: Piezoelektrični pospeškmer (http://www.directindustry.com/prod/meggitt-sa/product-12023-1473021.html) | 29 |
| Slika 15: Prikaz sheme delovanja zabijalca pilotov in obravnavane plasti. (Plaxis 2D Manual, 2012) 32 | 32 |
| Slika 16: Prikaz vnosa dinamične obtežbe v programu Plaxis 2D. | 35 |
| Slika 17: Prikaz geometrije modela in nivo vode (Plaxis 2D)..... | 35 |
| Slika 18: Izračunane hitrosti v točki A | 37 |
| Slika 19: Izračunane hitrosti v točki B | 38 |
| Slika 20: Izračunane hitrosti v točki C | 39 |
| Slika 21: Izračunane hitrosti v točki D | 40 |
| Slika 22: Izračunane hitrosti v točki E..... | 41 |
| Slika 23: Izračunane hitrosti točki F..... | 42 |
| Slika 24: Izračunane hitrosti v točki G | 43 |
| Slika 25: Absolutne hitrosti (mm/s) pri različnih togostih | 44 |
| Slika 26: Primerjava rezultatov empirične enačbe in izračunanih PPV iz Plaxis 2..... | 45 |
| Slika 27: Prikaz modela z delujočo točkovno silo..... | 45 |
| Slika 28: Izbrana frekvenca delovanja kladiva in pripadajoč nihajni čas ter amplituda obtežbe | 47 |
| Slika 29: Povezava med togostjo pri majhnih in togostjo pri velikih deformacijah (10 kg/cm ² ≈ 1MPa) (Alpan, 1970)..... | 49 |
| Slika 30: Krivulje zemljin za različne indekse plastičnosti (Vučetić in Dobry, 1991)..... | 49 |
| Slika 31: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F27XP za tip tal A | 53 |
| Slika 32: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F27XP za tip tal B | 53 |
| Slika 33: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F27XP za tip tal C | 53 |

- Slika 34: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F27XP za tip tal S1.... 54
- Slika 35: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F70XP za tip tal A..... 55
- Slika 36: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F70XP za tip tal B 55
- Slika 37: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F70XP za tip tal C 55
- Slika 38: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F70XP za tip tal S1.... 56

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

1.1 Splošno

V vsakdanjem življenju smo tako živa bitja kot objekti in vse ostale konstrukcije izpostavljeni različnim vibracijam, katerih izvor je lahko vozilo na cesti, potres, uporaba najrazličnejše mehanizacije in drugo. Izvor vibracij je neomejen in tudi njihov učinek na ljudi je različen, saj imamo različen prag zaznavanja.

Če se omejimo samo na vpliv vibracij zaradi prometne obtežbe in gradbene mehanizacije na obstoječe objekte, lahko glede na literaturo ugotovimo, da so na tem področju zelo nepoenoteni kriteriji, na osnovi katerih lahko podamo napoved ali bo prišlo do poškodb objektov ali ne. Trenutno ne obstajajo metode, s katerimi bi lahko natančno in dosledno napovedali vibracije zaradi gradbenih dejavnosti.

Energija, ki je posledica delovanja opreme in prometa, se prenaša v tla in potuje skozi medij v obliki valovanja. Intenziteta energije je odvisna od razdalje, tipa tal in vhodne energije, ki se sprosti ob delovanju mehanizacije. Razlika je, ali gre za delovanje, ki povzroča stalne ali občasne vibracije. Pri slednjih, ki so časovno krajše, so tudi kritične meje vršnih hitrosti višje. Višja kot je vršna hitrost, večja je lahko potencialna škoda. Zato pred gradnjo preverimo stanje okoliških objektov in naredimo obširni popis obstoječih poškodb. Z namenom, da preprečimo nove poškodbe, je potrebno izvesti izračun morebitnih vršnih hitrosti, ki so posledica delovanja mehanizacije. Merjenje vršnih hitrosti, se je v praksi izkazalo za najbolj ustrezno mero nastanka poškodb, ki jo potem lahko primerjamo s standardiziranimi dovoljenimi vrednostmi.

V Sloveniji standarda, ki predpisuje najvišje dovoljene vršne hitrosti za posamezne tipe konstrukcij ni, zato za presojo vpliva vibracij na objekte uporabljamo tuje standarde. V nalogi smo podrobneje predstavili kriterije angleškega, avstrijskega, nemškega in švicarskega standarda, ki so bili določeni na podlagi dolgoletnih izkušenj in zabeleženih podatkov poškodb nastalih zaradi gradbenih aktivnosti.

V okviru diplomske naloge smo izvedli izračun vibracij s programskim orodjem Plaxis 2D, ki za znane karakteristike tal in podatke o dinamični obtežbi omogoča izračun hitrosti v radialni smeri (x) in vertikalni smeri (y) ter absolutno hitrost $|v|$, ki običajno predstavlja vrednost, ki je merilo za nastanek poškodb. Z dinamično obtežbo smo simulirali delovanje zabijala pilotov in hidravličnega kladiva in analizirali vpliv povzročenih vibracij na površju temeljnih tal v okolici. Pri tem smo za temeljna tla uporabili različne konstitutivne modele, ki jih omogoča program, ter rezultate med seboj primerjali.

Ko potrebujemo okvirne vrednosti vršnih hitrosti, lahko uporabimo tudi empirične enačbe, ki dajo v večini primerov konzervativne vrednosti vršnih hitrosti. V nadaljevanju smo preverili ujemanje rezultatov dobljenih s programom Plaxis in empiričnimi enačbami za primer različno deformabilnih tal.

2 SPLOŠNO O VIBRACIJAH

Vibracija je nihanje fizikalnega sistema okrog ravnovesne lege. Nihanje je lahko periodično (gibanje nihala) ali naključno, kot je na primer gibanje avtomobilskega kolesa ob vožnji po makadamski cesti. Vibracijo opišemo s tremi glavnimi parametri: amplitudo, frekvenco in periodo. Amplituda je pri nihanju največji odklik nihajoče količine od ravnovesne lege. Frekvenca je določena kot število ponavljajočih se dogodkov v časovni enoti. Recipročna vrednost frekvence (ν) je perioda t_o (nihajni čas) (<https://sl.wikipedia.org/wiki/Vibracija>):

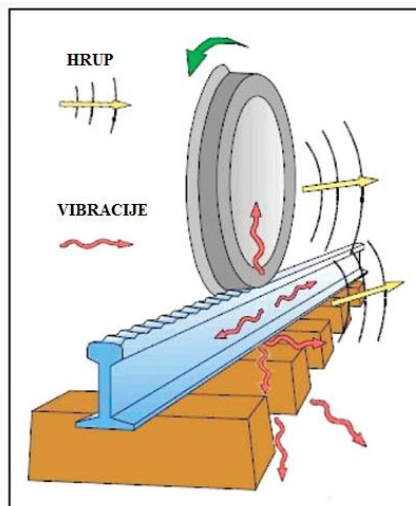
$$t_o = \frac{1}{\nu} \quad (1)$$

Izpeljana enota s^{-1} ali Hz je poimenovana po nemškem fiziku Heinrichu Rudolfu Hertzu. Pri cikličnih pojavih, kot so vrtenje, nihanje in valovanje, je vrednost 1 Hertza enaka enemu ciklu na sekundo (<https://sl.wikipedia.org/wiki/Frekvenca>).

Posledica delovanja vibracij je vibracijski ali strukturni hrup. Vibracije lahko delimo glede na časovne ponovitve. Če si sledijo v enakomernih časovnih intervalih, govorimo o periodičnih vibracijah, če pa se ponovitve ponavljajo v neenakomernih časovnih intervalih ali celo naključno, imenujemo takšne vibracije neperiodične.

Mehanski sistem lahko niha vodoravno ali navpično, zato tudi vibracije najpogosteje merimo v omenjenih smereh. Vibracije lahko ustvarjajo hrup, če se nihanja dovolj velike frekvence prenašajo iz strukture na okoliški zrak. To imenujemo aerodinamični hrup. Če pa se nihanja prenašajo tudi po strukturi, pravimo takšnemu hrupu strukturni hrup. Vibracije povzročajo neuravnovešeni vrteči se deli strojev, poškodbe rotorjev, nepravilna montaža strojev na podlago in drugo. Takšen vibracijski hrup lahko postane celo prevladujoč vir hrupa na primer pri resonančni frekvenci stroja. Zelo pomembna je tudi frekvenca nihanja vibracij, saj so te v nekaterih primerih lahko zelo nevarne za zdravje človeka ali pa za zgradbe. Nevarne frekvence za stavbe so od 10 Hz za nizke stavbe in do 1 Hz za visoke (stolpnice). Teh vibracij ne slišimo, ampak jih občutimo kot tresljaje. Večkrat se vibracijam ne moremo izogniti, vendar so v večini primerov nevarne (Žandar, 2004).

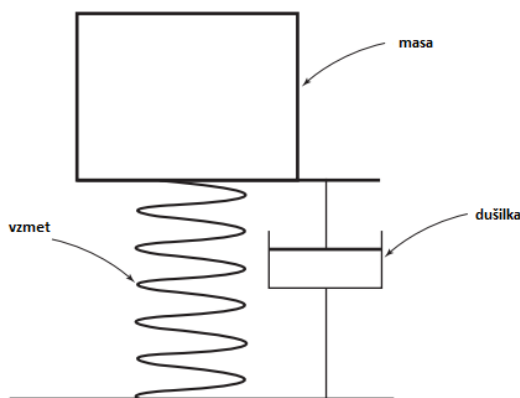
Delovanje gradbene opreme in različne gradbene tehnike, kot so eksplozije in zabijanje pilotov, povzročajo vibracije. Ostali vzroki so lahko tudi vzdrževalna dela, železniški in cestni promet in podobno. Če so amplitude vibracij dovolj visoke, lahko povzročene vibracije vodijo do konstruktivnih poškodb obstoječih objektov, manjših nekonstruktivnih poškodb objektov in motenj v delovanju vibracijsko občutljive opreme. Vibracije tal in spremljajoč hrup so lahko zelo moteči za ljudi, ki živijo ali delajo na teh področjih ali v njihovi bližini. Promet redko povzroča vibracije, ki dosegajo amplitude hitrosti, ki vodijo do poškodb objektov. Na drugi strani pa lahko vožnja težkih tovornjakov na poškodovani cesti povzroči vibracije visokih amplitud, ki lahko vodijo v pritožbe bližnjih stanovalcev. Take primere običajno enostavno rešimo z izravnavo cestnih površin. Primer prikaza širjenja vibracij po železniških tirih je prikazan na sliki 1 (Andrews, Buelher, Gill in Bender, 2013).



Slika 1: Prikaz širjenja vibracij (<http://www.gradimo.hr/clanak/mjere-za-smanjenje-buke-i-vibracija-od-zeljeznickog-prometa/33829>)

2.1 Osnove talnih vibracij

Dinamično vzbujanje elastičnega sistema kot sta zemlja ali konstrukcija, se odrazi v gibanju delcev, ki sestavljajo ta sistem. Idealiziran sistem točkovnih mas se običajno uporablja za opis in oceno odziva elastičnega ali vibracijskega sistema na vzbujanje. Najenostavnejši točkovni sistem se imenuje enostopenjski sistem z viskoznim dušenjem in je prikazan na sliki 2. Ta sistem obsega maso (predstavlja težo sistema), vzmet (predstavlja elastičnost sistema) in dušilko (predstavlja dušenje v sistemu).



Slika 2: Prikaz enostavnega točkovnega sistema (Andrews, Buelher, Gill in Bender, 2013, str. 7)

Naslednja enačba, ki izključuje efekt dušenja, je lahko uporabljena za vibracijsko gibanje mase v tem preprostem sistemu:

$$D = D_{pk} \sin(2\pi vt) \quad (2)$$

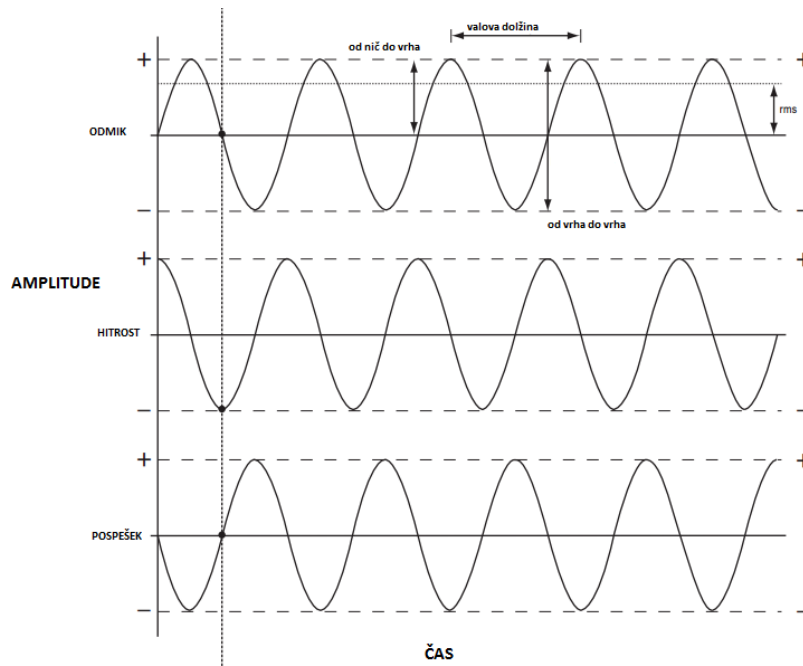
kjer je D odmik lege v izbranem trenutku, D_{pk} je največja amplituda odmika od ravnovesne lege, $\pi = 3,1416$, ν je frekvenca (število ponovitev v vsaki sekundi, enota Hz) in t je čas. Enačba 2 predstavlja zapis nedušenega nihanja in krivulja takega nihanja ima obliko sinusoide.

Masa oscilira gor in dol glede na ravnotežno lego. Ko je masa maksimalno oddaljena od ravnovesne lege in je vzmet popolnoma skrčena ali razbremenjena, je hitrost mase v tej točki enaka nič in pospešek maksimalen. Ko je masa v točki ničnega pomika, je hitrost maksimalna in vrednost pospeška nič (slika 3). Hitrost obravnavane mase (v) se lahko določi kot prvi odvod lege po času:

$$v = 2\pi\nu D_{pk} \cos(2\pi\nu t) \quad (3)$$

Pospešek mase (a) je definiran kot prvi odvod hitrosti po času ali drugi odvod lege po času:

$$a = -2\pi\nu^2 D_{pk} \sin(2\pi\nu t) \quad (4)$$

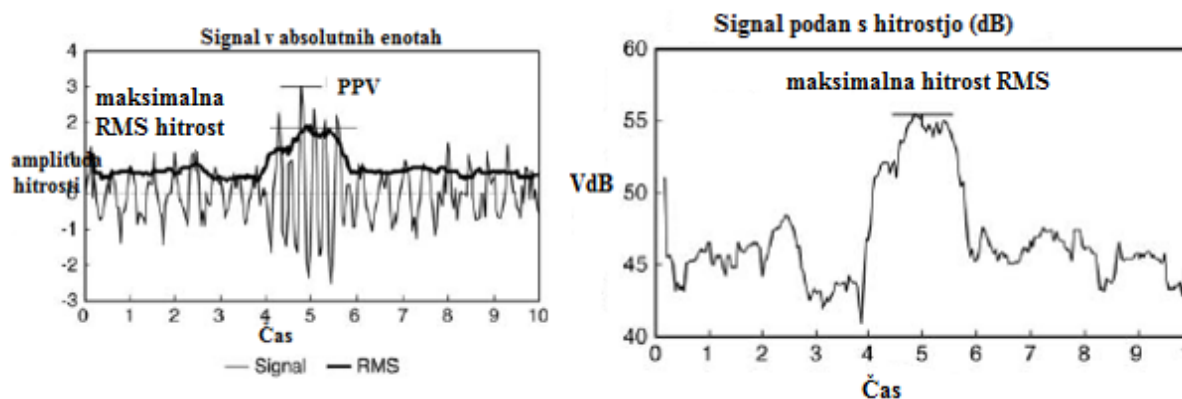


Slika 3: Uporabljene količine za opis vibracijskega gibanja (Andrews, Buelher, Gill, Bender, 2013, str. 9)

Vidimo, da v primeru, ko je frekvenca in amplituda odmika, hitrosti ali pospeška znana, lahko manjkajoče vrednosti določimo z odvajanjem ali integracijo. Če je znana frekvenca in amplituda hitrosti, amplitudo odmika določimo z integracijo, amplitudo pospeška pa z odvajanjem (Andrews, Buelher, Gill in Bender, 2013).

2.2 Največja hitrost delca

S premikom, hitrostjo in pospeškom obravnavanega delca stavbe lahko opišemo, kako se tla in obstoječe stavbe odzovejo na vzbujanje. Čeprav si lažje predstavljamo in razumemo premik delca, v večini primerov merilne naprave za analizo vibracij beležijo pospešek in hitrost. Več pretvornikov je lahko uporabljenih za vrednotenje amplitud, od katerih so trije prikazani na sliki 4. Pri presoji vibracij nas običajno zanimajo največja (vršna) hitrost delca (angl. **Peak Particle Velocity** = PPV) in največji pospešek delca (**Peak Particle Acceleration** = PPA).



Slika 4: Različne metode opisa vibracijskega signala (Hanson, Towers in Meister, 2006, str. 146)

Manj krepka linija na sliki levo prikazuje signal, ki predstavlja hitrost vibracije, ki niha v pozitivne in negativne vrednosti glede na ničelno točko. Ekstremno vrednost imenujemo PPV, ki je splošno sprejeta kot najbolj ustrezna količina (deskriptor) za vrednotenje potenciala za poškodbe objektov. Človeško telo se ne odzove na najvišje amplitude ampak povprečne. Za vrednotenje človeškega odziva se uporablja amplituda, ki je določena kot aritmetična sredina kvadratov amplitud (angl. **Root Mean Square**) oziroma RMS vrednost. Ta vrednost je vedno pozitivna, manjša od PPV in običajno dosega približno 70% vrednosti PPV. Tako PPV in RMS imata enoto hitrosti (mm/s). Desni graf slike 3 prikazuje krivuljo aritmetične sredine kvadratov (RMS), ki izhaja iz prvega grafa, le da je ta izražena v decibelih. Pri presoji talnih vibracij se odmik delca iz ravnovesne lege običajno meri v milimetrih, hitrost v mm/s in pospešek pa v mm/s^2 (Hanson, Towers in Meister, 2006).

Pri amplitudi vibracije je potrebno navesti tudi smer gibanja delca. Amplitudo vibracij je mogoče opisati z vertikalno komponento, horizontalno vzdolžno komponento, horizontalno prečno komponento in rezultanto, ki je vektorska vsota horizontalne in vertikalne komponente. V večini primerov se pri presoji talnih vibracij uporabljajo vertikalni PPV merilniki, ker so amplitude hitrosti vzdolž zemeljskega površja ponavadi največje v vertikalni smeri zaradi vpliva gravitacije na maso sistema. V tej smeri se tudi vibracije najlažje merijo in so ponavadi reprezentativne (Hendriks, 2002).

2.3 Vrste vibracijskih valov

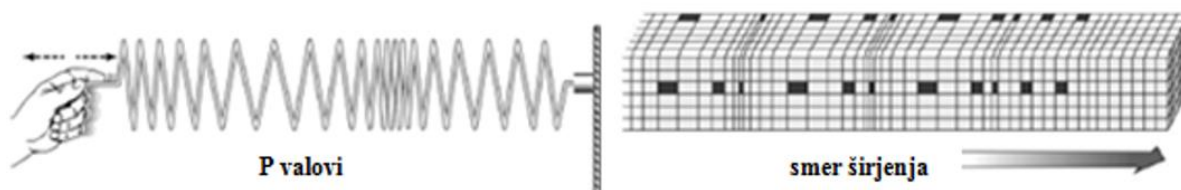
Če z veslom udarimo po gladini vode, se gladina razburka in nastale motnje se razširijo po celotni gladini. Ko z lokom potegnemo po napeti struni, se struna vboči in nastala vboklina se razširi vzdolž strune. Ko zavpijemo, se zrak v neposredni bližini ust stisne. Podobno zgoščino povzročimo v zraku, če zamahnemo z roko. Pri omenjenih primerih povzročimo v snovi spremembo, na primer spremeni se lega delca. Nastala sprememba ali motnja se razširi skozi snov. Pravimo, da skozi snov potuje val. Če motnje povzročamo kontinuirno gre za valovanje. Glede na to, kako delci snovi nihajo, ločimo dve glavni skupini valovanj: vzdolžno ali longitudinalno in prečno ali transverzalno (Kladnik, 1994).

Pri širjenju motnje skozi temeljna tla obstaja več različnih vrst valov. Vsi ustvarjeni valovi se širijo v različnih smereh. Obstajajo volumski in površinski valovi. Volumski valovi potujejo skozi notranje plasti tal, medtem ko se površinski lahko gibajo vzdolž površine tal, podobno kot valovi na vodi.

- **P valovi**

Prva vrsta volumskega valovanja, je primarno valovanje ali longitudinalno valovanje. Longitudinalni valovi so najhitrejši in se širijo skozi trdne in tekočine, kot na primer voda ali razne tekoče plasti v zemlji (Suhairy, 2000).

Pri longitudinalnem valovanju nihajo delci snovi vzdolž smeri širjenja valovanja. Takšno valovanje lahko povzročamo v poljubni snovi, s tem da izvor valovanja snov stiska ali redči. Longitudinalno valovanje torej pomeni stiskanje in redčenje snovi. Ker delci snovi nihajo v smeri širjenja valovanja (slika 5) in ker ne nihajo sočasno, se na nekaterih mestih zgoščajo, drugje pa redčijo; v snovi zato nastajajo zgoščenine in razredčine, torej se spreminja gostota snovi. Zgoščenine in razredčine potujejo skozi snov s hitrostjo valovanja (Suhairy, 2000).



Slika 5: Prikaz longitudinalnega valovanja (Benz, 2007, str. 11)

Za hitrost P valov v homogenem izotropnem materialu, lahko ob predpostavki linearno elastičnega obnašanja materiala, zapišemo zvezo med elastično togostjo snovi in hitrostjo širjenja valovanja:

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G_o}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G_o}{\rho}} \quad (5)$$

λ je Lamejeva brezdimenzijska konstanta, ρ je gostota materiala, skozi katerega se širijo valovi, G_o je strižni modul pri majhnih deformacijah in K je kompresijski modul. Modul P-valov, boljše poznan kot

edometrski modul M , je definiran s splošnim izrazom $M = K + \frac{4G_0}{3}$, tako da lahko prejšnjo enačbo zapišemo:

$$v_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (6)$$

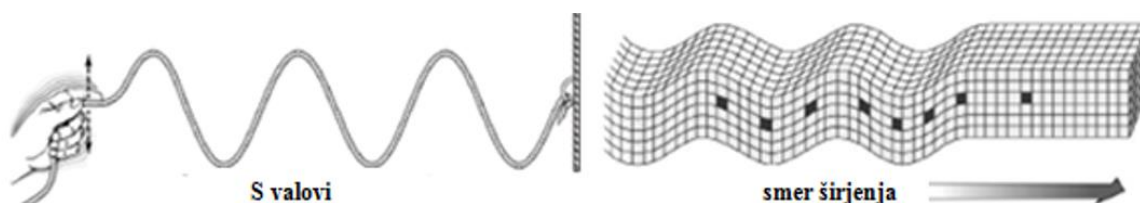
Lamejevo konstanto definiramo z naslednjo enačbo:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (7)$$

kjer je E elastični modul materiala, ν pa Poissonov količnik.

- **S valovi**

Drugi tip volumskih valov so S-valovi (prečni valovi). Ti so počasnejši od P-valov in se lahko širijo samo skozi trdne snovi. Sekundarni valovi premikajo delce gor in dol ter levo in desno (prečno na smer širjenja) in povzročajo transverzhalno valovanje (slika 6). Prečno valovanje povzroča odklone v prečni smeri in povzroča spremembo oblike oziroma strižne deformacije (Kladnik, 1994).



Slika 6: Prikaz transverzalnega gibanja (Benz, 2007, str. 11)

Hitrost, s katero se širijo S-valovi po izotropni elastični snovi je definirana z enačbo:

$$v_s = \sqrt{\frac{G_0}{\rho}} \quad (8)$$

G_0 je strižni modul in ρ je gostota materiala, skozi katerega se širi valovanje. Strižni modul je povezan z elastičnim modulom E (Youngov modul):

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (9)$$

Poleg omenjenih dveh valov, je Lord Rayleigh leta 1885 odkril še tretjo vrsto valov, ki jih imenujemo Rayleigh valovi (R valovi). To valovanje je omejeno na širjenje blizu površja in je sestavljeno iz vertikalne in horizontalne komponente (Richart, Hall in Woods, 1970).

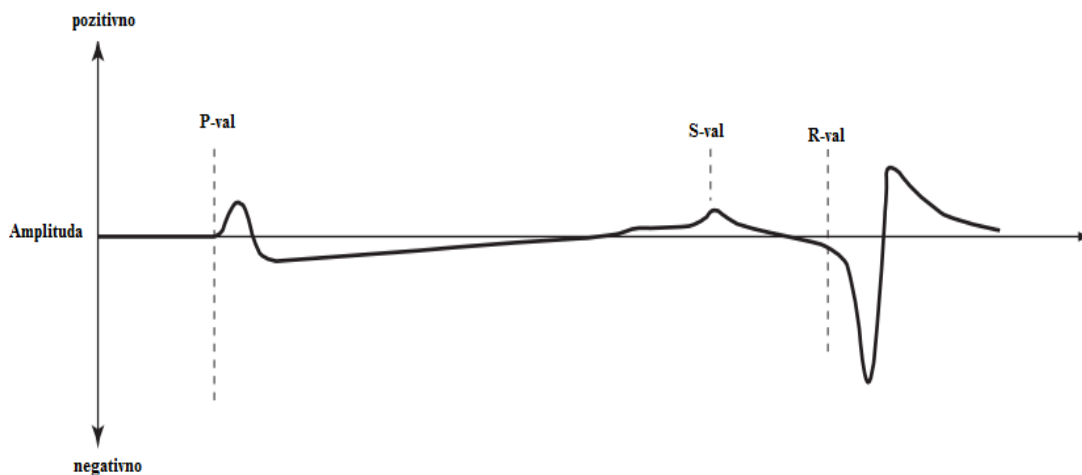
- **R valovi**

Hitrost R valov zapišemo z naslednjo enačbo (Davis, 2010):

$$v_r \approx v_s \frac{0.86 + 1.14\nu}{1 + \nu} \quad (10)$$

2.4 Modeli širjenja vibracij

Našteti valovi potujejo z različno hitrostjo, kjer so P valovi najhitrejši, sledijo S valovi in najpočasnejši R valovi. Pri prenašanju energije je vrstni red ravno obraten in tu prednjačijo R valovi. Najmanj energije prenašajo P valovi, kar je shematično prikazano na sliki 7.



Slika 7: Prikaz valovanj glede na oddaljenost od točke izvora locirane na površju (Andrews, Buelher, Gill in Bender, 2013, str. 8)

Amplitude energij volumskih valov se proporcionalno zmanjšujejo z oddaljenostjo od vira, razen vzdolž površja, kjer je zmanjšanje amplitude energij v sorazmerju s kvadratom oddaljenosti od izvora. Amplituda energije R valov se zmanjšuje v sorazmerju s korenomo oddaljenosti od izvora. Splošna enačba za modeliranje širjenja valov:

$$v_b = v_a \left(\frac{r_a}{r_b} \right)^\gamma \quad (11)$$

v_a je amplituda hitrosti izvora na oddaljenosti r_a , v_b je amplituda hitrosti na razdalji r_b in γ geometrijski koeficient oslavitve, ki je odvisen od vrste vala. Vrednosti geometrijskega koeficienta γ so prikazane v tabeli 1.

Tabela 1: Vrednosti geometrijskega koeficienta (Amick, 2000)

| Izvor | Tip vala | Točka merjenja | γ |
|-------------------|----------|----------------|----------|
| Točka na površini | R | Površje | 0.5 |
| Točka na površini | P ali S | Površje | 2 |
| Točka v globini | P ali S | Površje | 1 |
| Točka v globini | P ali S | Globina | 1 |

Glede na to, da se dve tretjini celotne vhodne energije, prenaša od izvora vertikalnega nihanja z R valovi in da ti z oddaljenostjo upadajo najpočasneje, predstavljajo glavno grožnjo za temelje na površini ali blizu nje (Richart, Hall in Woods, 1970).

Pri večini lokacij za gradnjo se srečujemo z izvori vibracij na površju ali blizu njega. Tudi ko je dejanski izvor vibracij (na primer pri zabijanju pilotov v podlago) pod površino, se R -valovi formirajo nekaj metrov pod površjem ali neposredno nad virom (Dowding, 1996). Za vkopane vire velja, da se R -valovi pojavijo na petkratni razdalji globine izvora.

Ker temeljna tla niso idealno elastična, vpliva na zmanjšanje vibracijskih valov tudi dušenje (Richart, 1970). Dušenje tal se na splošno privzema kot izguba energije zaradi notranjega drsenja delcev v zemljini. Gibanje tekočine v porah prav tako lahko povzroči zmanjšanje amplitude. Na dušenje materiala v zemljini vpliva veliko faktorjev, kot so: vrsta zemljine, vlažnost, temperatura in frekvenca vibracij izvora. Gline imajo ponavadi večje dušenje kot peščene zemljine (Wiss, 1967).

Vlažen pesek ima manjše dušenje kot suh, ker kombinacija vode v porah in delci peska ne nudijo toliko trenjskega dušenja kot pri suhem pesku. Širjenje R valov je zato zelo odvisno od prisotnosti vode. Zmrznjena tla povzročajo manj dušenja kot odmrznjena (Barkan, 1962). Vpliv materialnega dušenja zajamemo s faktorjem $e^{\alpha(r_a-r_b)}$:

$$v_b = v_a \left(\frac{r_a}{r_b} \right)^{0,5} e^{\alpha(r_a-r_b)} \quad (12)$$

kjer je α koeficient materialnega dušenja, r_a in r_b pa razdalji na katerih vrednotimo hitrosti.

V tabeli 2 so prikazane vrednosti koeficienta dušenja za različne vrste zemljin.

Tabela 2: Vrednosti koeficientov dušenja za različne materiale (za P in S valove) (Amick 2000, Hendricks 2002)

| Raziskovalec | Tip zemljine | α meter ⁻¹ |
|-----------------|--|------------------------------|
| Forsblad | Zameljen prodnat pesek | 0.13 |
| Richart | 10-centimetrska betonska plošča nad granulirano podlago | 0.02 |
| Woods | Zameljen droben pesek | 0.26 |
| Barkan | Zasičen droben zrnat pesek | 0.010 |
| | Zasičen droben zrnat pesek v zmrznjenem stanju | 0.06 |
| | Zasičen pesek s šoto in organskim muljem | 0.04 |
| | Glinast pesek, glina z nekaj peska in šota na nivojem vode | 0.04 |
| | Marly kreda | 0.1 |
| | Puhlica in puhljčasta zemljina | 0.1 |
| | zasičena glina s peskom in šoto | 0.0-0.12 |
| Dalmatov | Pesek ali mulj | 0.026-0.36 |
| Clough, Chameau | Blato s peskom | 0.05-0.2 |
| | Sipina peska | 0.025-0.65 |
| Peng | Mehka bangkoška glina | 0.026-0.44 |
| Hendriks | Zameljen pesek, glinast mulj, peskast mulj | 0.021 |

Wiss (1967) je predlagal poenostavljen model, ki da najustreznejše vrednosti in ga zapišemo z naslednjo enačbo:

$$PPV = kD^{-n} \quad (13)$$

kjer je PPV največja hitrost delca v seizmičnem valu, k je vrednost hitrosti na neki enoti razdalje, D je razdalja od vibracijskega vira in n stopnja zmanjšanja.

Parameter n v tem primeru ne predstavlja koeficienta oslavitve, ampak skupek geometrijskega in materialnega dušenja, ki je odvisen vrste tal. Vrednosti parametra n so prikazane tabeli 3.

Tabela 3: Vrednosti parametra n (Woods, 1997)

| Vrsta zemljine | n |
|------------------------------|---------------|
| Mehke zemljine | Ni definirano |
| Peski, zameljene gline, šote | 1.5 |
| Trdne zemljine | 1.1 |
| Kamnine | Ni definirano |

Obstaja povezava med amplitudo hitrosti in energijo (Hendricks, 2002). Če se energija spremeni od E_1 do E_2 , se amplituda hitrosti spremeni od v_1 do v_2 , kar je razvidno iz naslednje enačbe:

$$v_2 = v_1(E_2/E_1)^{0.5} \quad (14)$$

Z enačbami (13) in (14) ocenimo rezultirajočo amplitudo hitrosti na katerikoli razdalji. Ta metodologija predstavlja ustrezno sredstvo za oceno vpliva vibracij na človeka in objekte, vendar ne vsebuje dovolj podrobnosti, da bi lahko bila koristna za presojo vplivov ocene za vibracijsko občutljive raziskave ali napredne tehnološke objekte (Amick, 2000).

Za namene ugotavljanja ocene učinkov vibracij na ljudi in objekte, je uporaba frekvenčno neodvisnih koeficientov dušenja materialov podprta z dejstvom, da je stopnja škode povezana s hitrostjo v frekvenčnem območju od 1 Hz do 80 Hz ponavadi neodvisna od frekvence. Tipične vibracije, ki jih povzroča transport in gradbena mehanizacija, se gibljejo v območju od 10 Hz do 30 Hz. Zaradi ozkega spektra frekvenc večine virov je frekvenčna neodvisnost razumna predpostavka (Hendricks, 2002).

2.5 Izvor vibracij

Izvori vibracij vključujejo naravne pojave (potres, erupcija vulkanov, valovi, plazovi, ...) in tiste, ki jih povzroča človek (eksplozije, stroji, promet, vlaki, gradbena mehanizacija, ...). Ločimo vibracije, ki so stalne in občasne. Potrebno je ločiti med talnimi vibracijami in zračnimi vibracijami. Zračne vibracije povzročajo rakete, letala, eksplozije, lokomotive in celo tovornjaki, ki pod določenimi pogoji lahko ustvarijo nizke frekvence zvoka dovolj velike intenzitete, ki se jih lahko občuti in sliši (Andrews, Buelher, Gill in Bender, 2013).

Trajanje in amplitude vibracij, ki jih povzročajo različne gradbene naprave, se razlikujejo glede na vrsto in namen uporabe. Amplitude vibracij zaradi miniranja so visoke in kratkotrajne, medtem ko so amplitude vibracij pri gradnji in vzdrževanju cest nizke in z daljšim trajanjem. Pri ocenjevanju vibracij je zato potrebno kategorizirati gradbeno mehanizacijo glede na naravo vibracij, ki jih generirajo.

Med opremo in aktivnosti, ki povzročajo stalne vibracije sodijo:

- oprema za izkop
- oprema za statično kompaktiranje
- goseničarji
- avtocestni promet
- zabijala pilotov
- oprema za dinamično kompaktiranje

Oprema in aktivnosti, ki povzročajo občasne vibracije (enkratni učinek):

- zabijanje pilotov
- miniranje
- globinsko zgoščanje s težko padajočo utežjo
- ročna vibracijska zgoščevala
- oprema za obnovo betonskih vozišč (angl. crack and seat)

Oprema, ki povzroča visoko stopnjo ponavljajočih vibracij:

- hidravlična kladiva

2.6 Sprejemniki vibracij

Obstajajo trije tipi sprejemnikov, na katere vibracije tal različno vplivajo:

- ljudje
- objekti
- oprema

Vibracije tal so lahko moteče za ljudi. Primarni učinek zaznanih vibracij je običajno največji problem. Sekundarni učinek (na primer rožljanje porcelana na omari), se lahko zgodi, ko so vibracije pod nivojem zaznavanja. Vsak učinek vibracij (primarno zaznane vibracije, sekundarni učinki ali kombinacija obojega) lahko povzroči motnjo. Stopnja, do katere osebo povzročen učinek moti, je odvisna od aktivnosti udeleženca v tem času. Nekdo, ki teče, bo manj dovzeten za vibracije, kot nekdo, ki spi ali bere. Ponavljajoče primarne in sekundarne vibracije vodijo do prepričanja, da lahko poškodujejo stavbe, čeprav so nivoji vibracij v večini primerov pod mejo potencialnih poškodb objektov.

Vibracije, katerih izvor so gradbena mehanizacija in dela, lahko povzročijo konstruktivne poškodbe, in sicer razpoke v stebrih, ploščah, temeljih, gredah in stenah in manjše nekonstruktivne poškodbe ometov, fasad, štukatur in podobno. Vibracije tal pa lahko motijo tudi delovanje vibracijsko občutljive napredne tehnološke opreme, kot so:

- optični mikroskopi
- laboratorijska oprema
- stroji za magnetno resonanco
- elektronske naprave za skeniranje
- mikro stručnice
- oprema za natančno rezkanje

Stopnja do katere je moteno delovanje opreme, je odvisno od vrste opreme in podporne strukture.

3 KRITERIJI VIBRACIJ

3.1 Vpliv vibracij na človeka in stavbe

Za določitev odziva človeka na vibracije so bile izvedene številne študije. V tabeli 4 so prikazani vplivi vibracij na človeka in objekte v odvisnosti od vršne hitrosti delca PPV.

Tabela 4: Vpliv stalnih vibracij na človeka in objekte (Whiffen, 1971)

| Amplituda vibracije PPV (mm/s) | Reakcija človeka | Vpliv na stavbe |
|--------------------------------|---|---|
| 0.15-0.30 | Prag zaznavanja | Vibracije, ki nimajo skoraj nobenega vpliva na stavbe v smislu poškodb |
| 2.0 | Komaj zaznane vibracije | Priporočena zgornja amplituda vibracij za zgodovinske objekte in ruševine |
| 2.5 | Raven amplitude, pri kateri stalne vibracije moteče vplivajo na ljudi | Virtualno ne obstaja možnost nekonstruktivnih poškodb pri normalnih objektih |
| 5 | Vibracije, ki so moteče za ljudi v objektih | Prag, pri katerih obstaja nevarnost nekonstruktivne škode pri stanovanjskih hišah |
| 10-15 | Za ljudi moteče vibracije in nesprejemljive za tiste, ki hodijo po mostovih | Vibracije večjih amplitud kot se običajno pričakuje pri prometu in lahko vodijo v strukturne poškodbe |

Učinki vibracij na konstrukcije so predmet obsežnih raziskav. Večina jih je nastala v rudarski industriji, kjer se vibracije pojavljajo zaradi miniranja. Chae (1978) je izvedel študijo in stavbe klasificiral v kategorije na osnovi starosti in stanja. Tabela 5 prikazuje mejne hitrosti delca, ki pogojujejo nastanke poškodb objektov po Chaeu (1978) zaradi miniranja (eksplozij).

Tabela 5: Chaeov kriterij za vibracije stavb

| Razred | PPV (enkratna eksplozija) (mm/s) | PPV (ponavljajoče eksplozije) (mm/s) |
|---|----------------------------------|--------------------------------------|
| Objekti trdnih konstrukcij | 101.6 | 50.8 |
| Relativno nove stanovanjske strukture v dobrem stanju | 50.8 | 25.4 |
| Relativno stare stanovanjske strukture v slabem stanju | 25.4 | 12.7 |
| Relativno stare stanovanjske strukture v zelo slabem stanju | 12.7 | / |

V tabeli 6 so prikazane ravni vibracij (PPV), ki povzročajo poškodbe, ampak se ločijo glede na to, ali gre za enkratni (eksplozija) ali ponavljajoč vpliv (stroji in promet) (SN 640 312a:1992). Glede na to, da je frekvenčno območje, ki nas pri obravnavanju stavb najbolj zanima od 10 - 30 Hz, so kriteriji podani za to frekvenčno območje (Wiss, 1981).

Tabela 6: Swiss Association of Standardization kriterij poškodb vibracij (SN 640 312a:1992)

| Razred | Stalne vibracije PPV (mm/s) | Občasne vibracije PPV (mm/s) |
|------------|-----------------------------|------------------------------|
| Razred I | 12.7 | 30.48 |
| Razred II | 7.62 | 17.78 |
| Razred III | 5.08 | 12.7 |
| Razred IV | 3.05 | 7.62 |

- **Razred I:** jeklene konstrukcije ali konstrukcije iz armiranega betona, kot so tovarne, mostovi, jekleni stolpi, podzemne zbornice, predori
- **Razred II:** stavbe s temeljnimi stenami, kamnite zidane podporne stene, podzemne komore, vodi
- **Razred III:** stavbe, ki so omenjene zgoraj, vendar z lesenimi stropovi in stenami
- **Razred IV:** objekti zgodovinskega pomena, ki so vibracijsko zelo občutljivi

Konan (1985) je pregledal številne kriterije za dovoljeno raven vibracij, ki se nanašajo na zgodovinske in občutljive stavbe in izdelal kriterije za prehodne (enkratni dogodek) in stalne vire vibracij. Predlagal je, da naj bodo mejne vrednosti vršnih hitrosti delcev za stalne vibracije približno pol manjše kot pri občasni vibraciji.

Tabela 7: Konanov kriterij za vibracije zgodovinskih objektov

| Razpon frekvenc (Hz) | Občasne vibracije PPV (mm/s) | Stalne vibracije PPV (mm/s) |
|----------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1-10 | 6.35 | 3.05 |
| 10-40 | 6.35-12.7 | 3.05-6.35 |
| 40-100 | 12.7 | 6.35 |

Whiffen (1971) je predstavil dodatna merila za stalne vibracije, kot je prikazano v tabeli 8.

Tabela 8: Whiffenov kriterij za stalne vibracije

| PPV (mm/s) | Vplivi na objekte |
|-------------|--|
| 10.16-15.24 | Nekonstruktivne poškodbe in možne manjše konstrukcijske poškodbe |
| 5.08 | Meja, kjer se lahko pojavi nevarnost poškodbe stanovanjskih hiš |
| 2.54 | Za normalne stavbe ni tveganja, da bi prišlo do arhitekturnih poškodb |
| 2.03 | Priporočena zgornja meja tresljajev, kjer bi posebej izpostavili ruševine in antične spomenike |
| 0.15-0.48 | Vibracije, ki bi malo verjetno povzročile kakršnekoli poškodbe |

Dowding (1996) je predlagal maksimalne dovoljene hitrosti (PPV) za različne objekte in pogoje.

Tabela 9: Dowdingov kriterij vibracij za stavbe

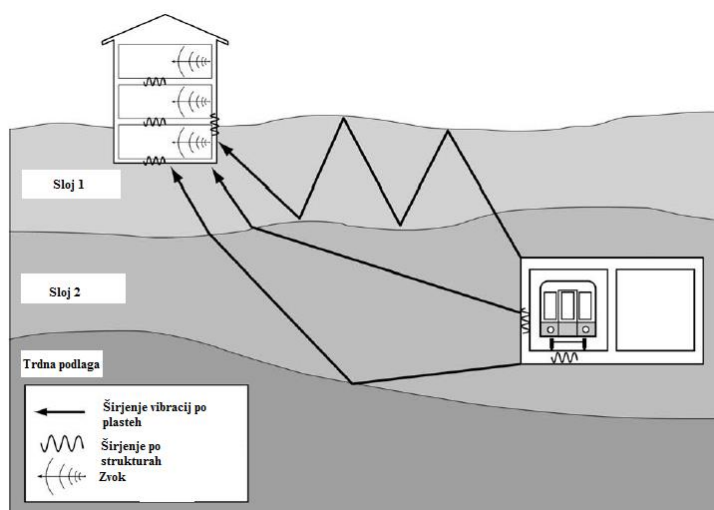
| Stavba in pogoji | Mejne vrednosti PPV (mm/s) |
|---------------------------------|----------------------------|
| Zgodovinske in stare stavbe | 12.7 |
| Stanovanjski objekti | 12.7 |
| Novi stanovanjski objekti | 25.4 |
| Industrijski objekti in mostovi | 50.8 |

Vidimo lahko, da je skladnost kategorizacije stavb in dovoljenih (mejnih) vrednosti PPV omejena. Očitno je, da so mejne vrednosti PPV za vire, ki povzročajo stalne vibracije (promet) manjše od tistih, ki povzročajo občasne (enkratne) tresljaje (eksplozije). Večina gradbenih postopkov sodi v ti dve kategoriji. Učinek zabijanja pilotov na primer nenehno ustvarja posamezne enkratne tresljaje.

4 PROMETNA OBTEŽBA

Poleg gradbeniških del, vibracije v zemlji povzročajo tudi cestni in železniški promet. Za razliko od zvoka, vibracije, ki se širijo po tleh, niso tako tipičen okoljski problem. Nenavadno je, da se vibracije vira, kot je na primer avtobus ali tovornjak, zaznajo že v sami bližini delovanja izvora. Učinki takih vibracij se prenašajo na okoliške stavbe, kjer jih ljudje zaznajo kot rahle premike ali premikanje visečih delov na stropu. Poškodba objektov zaradi transporta je zelo redek pojav. Osnovni pojmi talnih vibracij, ki jih povzroča vožnja vlaka, so predstavljeni na sliki 8. Kolesa vlaka na tirnicah pri vožnji ustvarjajo vibracijsko energijo, ki se širi na ostale tranzitne strukture, skozi plasti zemlje do temeljev objektov. Sproščena energija je odvisna od:

- togosti sistema vzmetenja vozil
- okroglosti koles
- hrapavosti tirov in koles
- podpornega železniški sistem
- mase in togosti primarne strukture
- togosti in plasti zemljin, ki podpirajo tise (Andrews, Buleher, Gill in Bender, 2013)



Slika 8: Pot širjenja vibracij do objektov (Hanson, Towers in Meister, 2006)

Ker so vozila na cestah podprta s prilagodljivim sistemom vzmetenja in pnevmatikami, niso kritičen izvor vzbujanja vibracij, zato lahko prenesejo vse tresljaje v cestne površine, četudi so te neravne. Nprekinjen promet na cestah, kjer ni nepravilnosti, ustvari precej konstanten vendar pretežno nizek nivo vibracij. Če se na cestišču pojavljajo diskontinuitete, potem prehodi težkih tovornjakov lahko povzročijo velike skoke vibracij, ki trajajo par sekund ali pa celo samo del sekunde. Vibracije, ki jih vzbujajo avtomobili, so po intenziteti bistveno manjše od vibracij, ki jih povzročajo tovornjaki.

4.1 Zemljske vibracije zaradi različnih vrst prometa

Nivo vibracij je običajno pogojen z vrsto prometa:

- **Mestni železniški promet:** problem glede zemljskih vibracij se pri tej vrsti prometa pojavi, ko je razdalja med podzemno železnico in temelji stavb manjša od 15 m. Ali bo prišlo do poškodb, je odvisno od lokalne geologije in strukturnih podrobnosti objekta.
- **Medkrajevni in mednarodni potniški vlak:** gre z vlake, ki jih poganja bodisi dizelske ali električne lokomotive. Razlika med enim in drugim v smislu vibracij je, da so mednarodni manj pogosti. Oboji si tire delijo s tovornimi vlaki, ki pa imajo drugačne vibracije. Najvišje vibracije povzročajo lokomotive.
- **Hitri potniški vlak:** ti povzročajo zelo visoke ravni talnih vibracij. Povzročajo največji vpliv v mestnem in predmestnem območju.
- **Tovorni vlak:** lokalni in medkrajevni vlaki so si podobni v tem, da so lokomotive običajno na dizelski pogon. Razlikujejo se v dolžini kompozicije, številu in velikosti lokomotiv in številu močno obremenjenih vagonov. Ker je vzmetenje lokomotiv enako, so mejne vrednosti vibracij lokalnih in medkrajevnih tovornih vlakov enake. Zelo težko je izvajati omejevanje vibracij na tirih, kjer pričakujemo vlake z visoko osno obremenitvijo.
- **Avtobusni promet:** Ker pnevmatike in sistemi vzmetenja pri avtobusih zagotavljajo vibracijsko izolacijo, je nenavadno, da povzročajo tresljaje. Ko avtobus povzroči vpliv, je to verjetno zaradi hrupa. Večina vibracij s to vrsto prometa je povezana z dilatacijskimi regami, luknjami in drugimi prekinitvami cestišča (Hanson, Towers in Meister, 2006).

V tabeli 10 so naštetih faktorji, ki vplivajo na talne vibracije zaradi prometa.

Tabela 10: Faktorji, ki vplivajo na nivo vibracij (Hanson, Towers in Meister, 2006)

| Faktorji povezani z izvorom vibracij | |
|--------------------------------------|--|
| Faktorji | Vpliv |
| Vzmetenje | Če je vpliv tog v vertikalni smeri, bodo učinkovite vibracijske sile višje. Na vagonih na vibracije vpliva samo primarno vzmetenje, medtem ko sekundarno nima očitnega vpliva. |
| Stanje pnevmatik | Uporaba pnevmatik je eden izmed najboljših načinov omejevanja vibracij, ki se prenašajo v tla. |
| Površina cestišča | Neravne ceste so v večji meri razlog za nastanek vibracij. Ohranjanje gladkih cestišč bo doprineslo zmanjšanju vibracij. |
| Železniški tiri | Sistem za podporo prog je eden od glavnih komponent pri določanju ravni vibracij. Najvišja raven vibracij je ustvarjena na tiru, ki je togo pritrjen na betonsko stezo. Vibracije občutno zmanjšamo ob uporabi elastičnih pritržilnih elementov, balastnih podlag in plavajočih plošč. |
| Hitrost | Večja hitrost se odraža v višji vibraciji. Če se hitrost podvoji, se raven vibracij poveča za 4-6 dB. |
| Tranzitne strukture | Težje so, manjše so vibracije. Ravni vibracij pri lažjem predoru se višje, kot pri betonski podzemni železnici. |
| Globina izvora vibracij | Obstajajo velike razlike v značilnostih vibracij, ko je vir pod zemljo ali na površju. |

5 NAPOVED VIBRACIJ IN DEFORMACIJ

Za presojo možnosti pojava vibracij, ki motijo ljudi in povzročajo poškodbe na objektih, obstaja več metod za napovedovanje vršne hitrosti delca (PPV) na različni oddaljenosti od vira vibracij. Veliko število tehnoloških aktivnosti v gradbeništvu, kot je na primer zabijanje kolov, vibracijsko kompaktiranje zemeljskih materialov, zabijanje zagatnic, povzroča vibracije, ki se lahko prenašajo na bližnje objekte. Pri zabijanju pilotov, obstaja kar nekaj evidentiranih primerov neposrednih poškodb bližnjih objektov, ki za več kot dolžino pilota odmaknjeni od lokacije zabijanja (Andrews, Buelher, Gill in Bender, 2013, 2013).

Metoda napovedi PPV, ki je predstavljena v tem poglavju, temelji na uporabi referenčne vibracije izvora in poenostavljenem modelu širjenja zapisanim z enačbo (13), ki ga je podal Wiss (1967). Obravnavana gradbena mehanizacija je v nadaljevanju razdeljena na:

- zabijanje pilotov
- hidravlična kladiva
- in druga gradbeniška oprema

Amplitude PPV izračunane z uporabo metode, predstavljene v tem poglavju, so običajno konzervativne in jih smemo obravnavati samo kot grobo oceno. Dejanske vrednosti iz naprav lahko presegajo ali pa so manjše od izračunanih.

Učinki vibracij, ki jih povzročajo gradbeni stroji, se lahko spreminjajo glede na številne dejavnike, in sicer:

- kakovost vgrajenih gradbenih materialov
- različna sestava in kakovost tal med virom vibracij in objektom
- dimenzije objekta
- kakovost vgrajenih gradbenih materialov

Največji vpliv na amplitude vibracij imajo trajanje in intenziteta. (Achmus, 2008).

5.1 Oprema za zabijanje pilotov

Najpogosteje uporabljene vrste so:

- gravitacijsko kladivo
- pnevmatično kladivo
- dizelsko kladivo
- hidravlično kladivo
- vibracijsko kladivo

5.1.1 Amplitude hitrosti, ki jih povzročajo zabijala pilotov

Obsežen pregled dostopne literature kaže, da lahko PPV zaradi zabijanja pilotov izračunamo po naslednji enačbi, ki temelji na pregledu dejanskih terenskih meritev ob uporabi različnih zabijal za pilote (Wood in Theissen, 1982; Wiss, 1967; Morris, 1991):

$$PPV_{Zabijalo\ pilotov} = PPV_{Ref} \left(\frac{7,62}{D} \right)^n \times (E_{oprema}/E_{Ref})^{0,5} \quad (15)$$

PPV_{Ref} je definiran z vrednostjo 16,51 mm/s za referenčno kladivo za zabijanje pilotov na razdalji 7,62 m, D je razdalja od kladiva do sprejemnika v m, $n=1.1$ (to je vrednost povezana z zmanjšanjem širjenja vibracij skozi tla), $E_{Ref} = 48\ 000$ J ter E_{oprema} je ocenjena energija učinka zabijanja pilotov izražena v J.

Ocenjene vrednosti energije večine kladiv za pilote dosegajo vrednosti med 27 - 410 kJ. Zelo veliko kladivo, Vulcan 6300, ima ocenjeno energijo 2 500 kJ, manjša kladiva pa tudi 410 J (Wood in Theissen, 1982; Wiss, 1967).

Vrednost parametra n je odvisna od vrste tal in znaša od 1 do 1,5. Predlagana vrednost je 1,1. Uporaba vrednosti več kot 1,1, bi namreč izkazala previsoke vrednosti PPV na razdaljah manj kot 7,62 m in bi bila nekoliko konzervativna na razdaljah, ki presegajo to razdaljo.

Ko so pričakovane visoke amplitude vibracij zaradi delovanja gradbeniške opreme, je priporočljivo pred pričetkom del natančno pregledati stanje objektov ter to posneti, poslikati, pregledati notranji inventar in vse že obstoječe razpoke zabeležiti.

5.1.2 Amplitude hitrosti, ki jih povzročajo vibracijska zabijala za pilote

Na podlagi pregleda razpoložljive literature (Wood in Theissen 1982; Wiss 1967, 1974, 1981) in informacij, ki jih nudi Institution of Civil Engineers (ICE) (Morris 1991, 1996, 1997), lahko PPV, ki jih povzroča vibracijsko zabijalo za pilote, izračunamo po naslednji enačbi:

$$PPV_{Vibracijsko\ kladivo} = PPV_{Ref} \left(\frac{7,62}{D} \right)^n \quad (16)$$

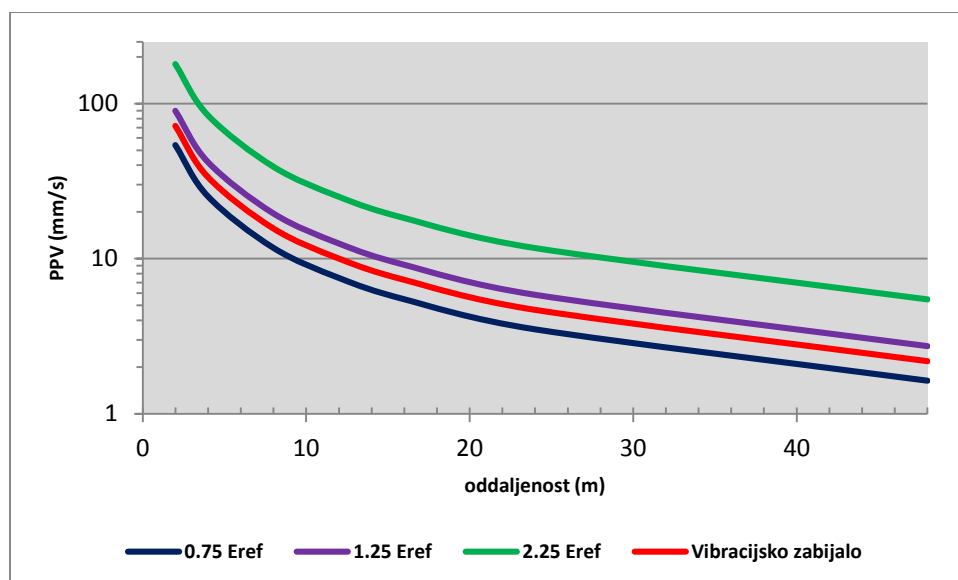
PPV_{Ref} je 16,51 mm/s za referenčno kladivo na razdalji 7,62 m, D je razdalja od kladiva do sprejemnika v m, $n = 1,1$ (to je vrednost povezana z zmanjšanjem širjenja vibracij skozi tla).

Predlagana vrednost parametra n je 1,1, enako kot pri klasičnih zabijalih za pilote. V primeru, ko je podan tip tal, lahko vrednost parametra n odčitamo iz tabele 11 glede na klasifikacijo tal.

Tabela 11: Vrednosti parametra n glede na razred zemljine (Wood in Jedele, 1985)

| Vrsta zemljine | Woodove in Jedelove izračunane vrednosti parametra n | Vrednosti parametra n |
|------------------------------|--|-------------------------|
| Mehke zemljine | Podatek ni znan | 1.4 |
| Peski, zameljene gline, šote | 1.5 | 1.3 |
| Trdne zemljine | 1.1 | 1.1 |
| Kamnine | Podatek ni znan | 1.0 |

Na sliki 9 je prikazana primerjava PPV (mm/s) v odvisnosti od razdalje za zabijala z različnim energijskim učinkom ter vibracijsko kladivo, ki pa ni odvisno od E_{oprema} in E_{Ref} . Razvidno je, da večja kot je energija zabijala ob udaru, višje so vrednosti PPV (grafičen prikaz enačbe (15) in (16)). Privzeli smo, da ima parameter n vrednost 1,1.

**Slika 9: Primerjava PPV za zabijala z različno energijo in vibracijsko zabijalo**

Vibracijska zabijala za pilote povzročajo največje vibracije med zagonom in v fazi izklopa (Woods, 1997). Najvišja izmerjena vibracija se pojavi, ko je frekvenca zabijala v resonanci s sistemom zemljina-zabijalo. Frekvenca je odvisna od lastnosti zemljine, skozi katero penetrira pilot. Navedeno enačbo 16 lahko uporabimo za oceno PPV med resonančnim zagonom in fazo izklopa zabijala. Te vibracije so zelo zaznavne in so pogosto vzrok pritožb okoliških stanovalcev zaradi vibracij, ki gre za zabijanje pilotov. Neprekinjeno delovanje teh naprav pri določeni frekvenci, je bolj zaznavno pri ljudeh, ki živijo v bližini, čeprav so te vibracije nižjih ravni. Poleg tega se lahko v stanju dinamičnega vzbujanja tal poveča verjetnost odziva na resonančno frekvenco gradbenih materialov, kar je lahko kritično za zgodovinske občutljive objekte. Zabijala za pilote povzročajo visoke vibracije, ki trajajo kratek čas ($\approx 0,2$ s), tako da je med dvema udarcema dovolj časa, da se zmanjša možnost resonančnega odziva.

Wood in Theissen (1982) navajata, da je raven vibracij, ki jih povzročajo vibracijska zabijala vsaj tako visoka kot pri klasičnih gravitacijskih zabijalih, vendar je pri vibracijskih zabijalih škoda lahko večja zaradi stalnih tresljajev.

5.1.3 Amplitude hitrosti, ki jih povzročajo hidravlična kladiva

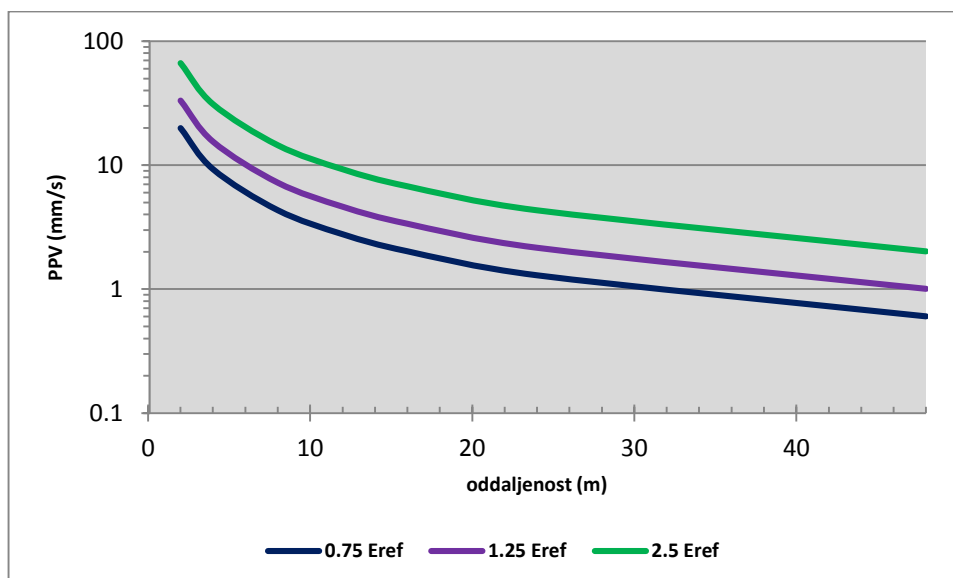
Pregled literature kaže, da ni na voljo dovolj podatkov o izmerjenih amplitudah hitrosti, ki jih povzročajo hidravlična kladiva, ki jih običajno uporabljamo za rušitvena ali izkopna dela (»pikiranje« kamnin). Hidravlična kladiva se običajno klasificira glede na energijo, ki jo sprostijo ob udarcu. Razpon strojnih hidravličnih kladiv je od 2,7 do 21,5 kJ. Ker je vpliv hidravličnih kladiv podoben kot pri zabijalih za pilote, domnevamo, da lahko pristop predstavljen v enačbi 15 uporabimo tudi za to vrsto kladiv. V enačbi 15 je potrebno referenčno energijo prilagoditi hidravličnim kladivom in tako lahko zapišemo enačbo:

$$PPV_{\text{Hidravlično kladivo}} = PPV_{\text{Ref}} \left(\frac{7,62}{D} \right)^n \times (E_{\text{oprema}}/E_{\text{Ref}})^{0,5} \quad (17)$$

PPV_{Ref} znaša 6,09 mm/s za referenčno kladivo za zabijanje pilotov na razdalji 7,62 m, D je razdalja od kladiva do sprejemnika v m, $n = 1,1$ (to je vrednost povezana z zmanjšanjem širjenja vibracij skozi tla), $E_{\text{Ref}} = 6780$ J ter E_{oprema} je energija učinka hidravličnega kladiva v J.

Predlagana vrednost parametra n je 1.1. Ker je vir vibracij zaradi hidravličnih kladiv blizu površja tal, lastnosti tal, v tem primeru ne vplivajo na vrednost parametra n .

Na sliki 10 je prikazana primerjava PPV (mm/s) v odvisnosti od razdalje od izvora za hidravlična kladiva z različnim energijskim učinkom. Razvidno je, večja kot je energija kladiva ob udaru, višje so vrednosti PPV (grafičen prikaz enačbe (17)). Privzeli smo, da parameter $n = 1,1$.



Slika 10: Primerjava PPV za hidravlična kladiva z različno energijo

5.1.4 Amplitude hitrosti, ki jih povzroča ostala gradbena mehanizacija

Pregled razpoložljive literature kaže, da praktično ni znanih informacij o nivoju doseženih vibracij za ostalo gradbeno mehanizacijo. Najbolj obsežen seznam referenčnih vrednosti PPV je na voljo v dokumentu Transit Noise and Vibration Impact Assessment (Hanson, Towers, Meister, 2006). Ta navaja referenčne vrednosti PPV, ki jih različna gradbena mehanizacija povzroči na razdalji 7,62 m (tabela 12).

Tabela 12: Referenčne vrednosti PPV za ostalo gradbeno opremo (Hanson, Towers, Meister, 2006)

| Gradbeniška mehanizacija | Referenčna vrednost PPV na razdalji 7,62 m (mm/s) |
|-----------------------------------|---|
| Vibracijski valjar | 5,334 |
| Velik buldozer | 2,26 |
| Manjši buldozer | 0,076 |
| Naloženi tovornjaki | 1,93 |
| Udarno kladivo (ročno) | 0,889 |
| Oprema za obnovo betonskih vozišč | 60,96 |

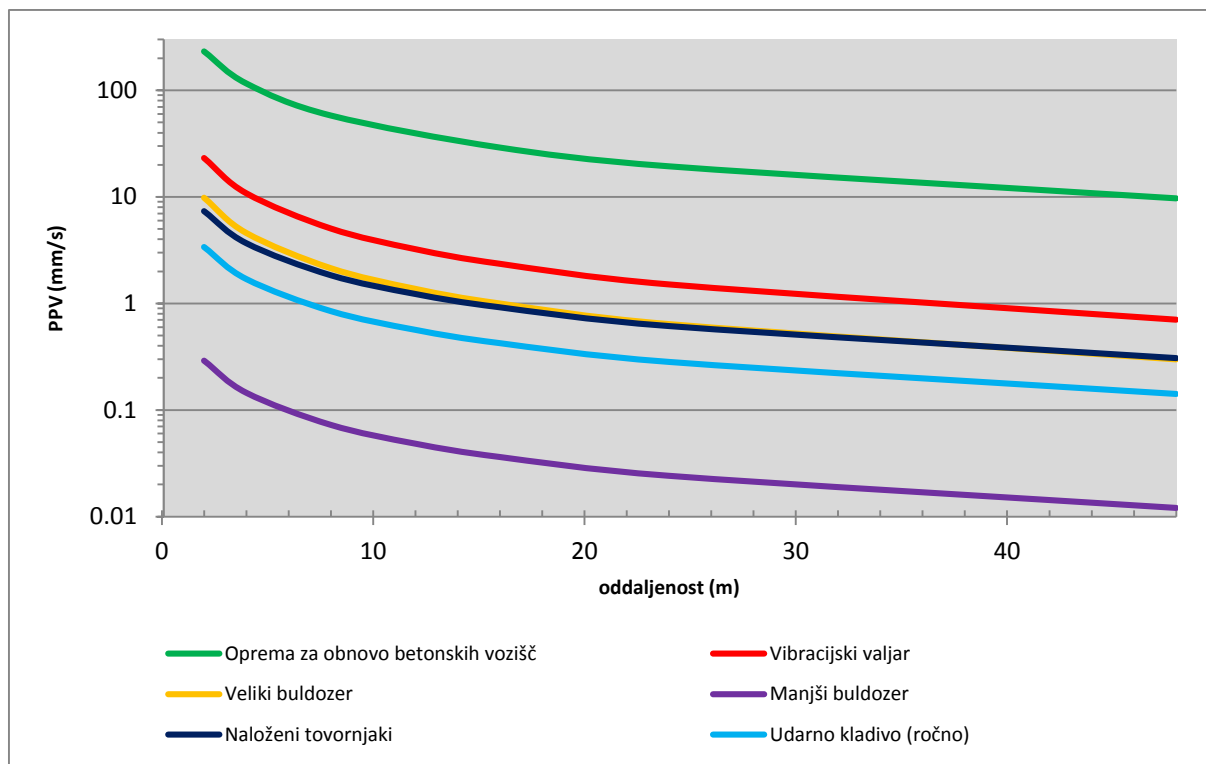
Z uporabo zapisanih referenčnih vrednosti vibracije omenjene gradbene mehanizacije lahko izračunamo z naslednjo enačbo:

$$PPV = PPV_{Ref} \left(\frac{7,62}{D} \right)^n \quad (18)$$

PPV_{Ref} je referenčna vrednost PPV na razdalji 7,62 m, D je razdalja od kladiva do sprejemnika v m, $n = 1,1$ (to je vrednost povezana z vibracijsko stopnjo zmanjšanja skozi tla).

Predlagana vrednost parametra n je 1.1. Ker vibracije, ki jih povzroča gradbena mehanizacija, nastajajo blizu površja tal, sestava tal ne vpliva bistveno na vrednost parametra n .

Na sliki 11 je prikazana primerjava PPV za različno gradbeno mehanizacijo v odvisnosti od oddaljenosti od izvora. Najmanjše vršne hitrosti lahko glede na enačbo (18) pričakujemo pri manjšem buldozerju, največje pa pri opremi za obnovo betonskih vozišč.



Slika 11: Primerjava PPV v odvisnosti od razdalje za našeto gradbeno mehanizacijo

5.2 Določanje deformacij materiala in največje napetosti na osnovi PPV

Deformacija je posledica širjenja valov v elastičnem mediju. Določimo jo z naslednjo enačbo:

$$\varepsilon = \frac{PPV}{c} \quad (19)$$

kjer je ε deformacija materiala (mm/mm), PPV največja hitrost delca v napetostni coni (mm/mm) in c hitrost širjenja motnje skozi medij (mm/mm).

Enačba nam pove, da je deformacija v materialu v direktni povezavi s hitrostjo delca in hitrostjo širjenja motnje v mediju. Če poznamo dovoljeno raven deformacije, lahko v tem primeru določimo dovoljeno vrednost PPV. Dokler je zveza med napetostmi in deformacijami linearna, lahko ob znanem PPV določimo tudi maksimalne tlačne/natezne in strižne napetosti v materialu:

$$\sigma = E \varepsilon = E \frac{PPV}{c} \quad (20)$$

$$\tau = G \gamma = G \frac{2PPV}{c} \quad (21)$$

6 VREDNOTENJE MERITEV

Namen meritev je pridobiti zadostno količino informacij, ki omogočajo nadaljnje metode vrednotenja, ki se jih izvede z zadostno stopnjo zaupanja. Obseg meritev, ki se zahteva za vrednotenje vibracij, se povečuje sorazmerno s kompleksnostjo vibriranja, ko prehajamo od preprostega periodičnega nihanja k naključnim prehodnim tresljajem. Sistemi za zbiranje podatkov, ki so primerni za opredelitev periodičnega nihanja v določenem frekvenčnem območju niso nujno primerni za ugotavljanje enega parametra (npr.: najvišja hitrost delca) pri bolj zahtevnih gibanjih.

Celotna analiza odziva za napovedovanje PPV zahteva podatke o detajlih zgradbe. Pri takem ocenjevanju je treba upoštevati naslednje dejavnike:

- Lastne frekvence objekta in njegovih sestavnih delov (stene, tla, okna)
- Značilnosti dušenja osnovne strukture in sestavnih delov
- Vrsta gradnje, stanje objekta in uporabljeni materiali
- Značilnosti vzbujanja
- Nelinearni amplitudni odziv konstrukcije

Za mnoge izmed zgoraj naštetih parametrov je izbira merilne naprave, njena lokacija v stavbi, vrsta snemalne naprave, število merilnih mest in trajanje beleženja pojavov predvidena že takoj na začetku raziskave.

Tipi raziskav za napovedovanje vibracij:

- **Predhodna ocena:** V nekaterih situacijah je potrebno oceniti možnost problemov z vibracijami preden se lotimo meritev. Pod pogojem, da so znani podatki o parametrih vira, značilnostih odziva konstrukcije in podatki povezani z dušenjem, lahko uporabimo empirične metode za oceno odziva.
- **Raziskovalni monitoring:** Zelo malo izmerjenih vibracij na objektu ali širši okolici lahko kaže na verjetnost obstoja problema, ki zahteva dodatne preiskave. Velike napake so pogoste in to dejstvo je potrebno upoštevati.
- **Terenske raziskave:** Pri terenski raziskavi določimo merilne točke, na katerih z ustreznim merilnikom običajno izmerimo največji pospešek in najvišjo hitrost delca. Te točke so ponavadi na temelju objekta in v primeru, da nimamo direktnega dostopa do temelja, merilno točko postavimo na temeljna tla izven objekta.
- **Inženirske analize:** Ko obravnavamo kompleksne objekte visoke pomembnosti, je potrebno izvesti natančne preiskave odziva na vibracijsko vzbujanje. Število merilnih točk in njihove lokacije na temeljih je potrebno določiti na osnovi karakteristik obravnavanega objekta. Če je le možno, je treba določiti lastne frekvence objekta.

7 STANDARDI S PODROČJA PRESOJE VPLIVOV VIBRACIJ NA OBJEKTE

7.1 Standard BS 7385 Vrednotenje in merjenje vibracij v zgradba

Britanski standard BS 7385 Vrednotenje in merjenje vibracij v zgradbah sestavljata standarda BS 7385-1 in BS 7385-2. Standard BS 7385-1:1993 podaja navodila za merjenje vibracij in vrednotenje vplivov na zgradbah, drugi del standarda BS 7385-3:1993 pa podaja smernice za nastanek poškodb objektov zaradi talnih vibracij.

Standard BS 7385-2 podaja priporočene vrednosti dovoljenih vibracij stavb, ki temeljijo na najnižjih mejnih vrednostih, nad katerimi je bila verodostojno dokazana škoda. Namenjen je zagotavljanju standardnih postopkov merjenja, beleženja in analiziranja učinkov vibracij na objekte.

Obravnavan standard je bil razvit na osnovi obsežnega pregleda podatkov v Veliki Britaniji, ustreznih nacionalnih in mednarodnih dokumentov ter drugih objavljenih podatkov. Čeprav je v podatkovni bazi Velike Britanije zbranih veliko informacij, je bilo zelo malo zabeleženih primerov povezanih s poškodbami zaradi vsiljenih vibracij. Zaradi tega so se pri pripravi standarda opirali na rezultate eksperimentalnih preiskav, ki so se izvajale v drugih državah.

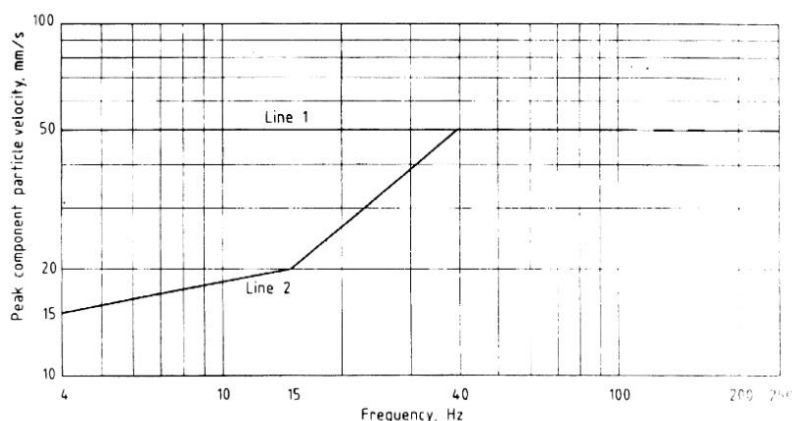
Kot pri večini standardov s področja vibracij, je ena od ključnih merjenih količin vršna hitrost delca (PPV). Motnja, ki jo povzroči vibracijski vir, se razširja proč od tega vira z določeno hitrostjo vala, medtem ko delci nihajo s spremenljivo vršno hitrostjo.

Na določeni lokaciji vzdolž poti širjenja lahko gibanje definirano s tremi med seboj pravokotnimi komponentami (vertikalna, prečna in radialna). Če želimo natančno določiti hitrost delca, je potrebno vse tri komponente hitrosti meriti sočasno. Izraz največja komponenta hitrosti delca označuje največjo hitrost delca izmed vseh treh ortogonalnih komponent.

Na strukturni odziv stavbe pomembno vpliva tudi trajanje vibracije. Vpliv časa glede na tip vibracij (stalne ali občasne) je prikazan tabeli 13. Meja nad katero lahko pride do manjših nekonstruktivnih poškodb (kozmetične poškodbe) zaradi stalnih vibracij, je nižja od tiste pri občasnih oziroma enkratnih vibracijah. Če je stavba izpostavljena neprekinjenim vibracijam dovolj časa (odvisno od frekvence in dušenja stavbe), je možen pojav resonance.

Tabela 13: Ocena nastanka poškodb za prehodne vibracije (BS 7385-2:1993, str. 5)

| Linija (graf spodaj) | Tip stavbe | Največja komponenta hitrosti delca v določenem frekvenčnem območju | |
|----------------------|---|--|----------------------------|
| | | 4Hz-15Hz | 15Hz in nad |
| 1 | Ojačane in industrijske stavbe | 50mm/s (4Hz) in nad | |
| 2 | Neojačane in lahke stavbe, stanovanjski objekti | 15mm/s (4Hz)-20mm/s (15Hz) | 15mm/s (4Hz)-20mm/s (15Hz) |



Slika 12: Grafični prikaz ocene nastanka kozmetičnih poškodb za prehodne vibracije (komponenta najvišje hitrosti delca (mm/s) v odvisnosti od frekvence (Hz)) (BS 7385-2:1993, str. 5)

Tipična frekvenčna območja, ki zajemajo strukturni odziv za različne vibracijske vire, so zajeta v tabeli 13. Najnižja frekvenca, ki jo povzročajo umetni viri je 1 Hz, medtem ko najvišja, ki je rezultat miniranja v trdih tleh, je 1000Hz. Najbolj pričakovane frekvence v gradbeništvu se pojavljajo v območju med 4 Hz in 250 Hz, medtem ko so v tabeli 13 prikazane najpogosteje zastopane. Standard navaja, da so manjše nestrukturne poškodbe na objektih možne pri vrednostih PPV, ki so več kot 2x večje od vrednosti v tabeli (13), večje strukturne poškodbe pa lahko nastopijo pri vrednostih, ki so več kot 4x večje od vrednosti navedenih v tabeli (13). V tabeli 14 so prikazani vpliv različnih virov, ki jih upošteva britanski standard.

Tabela 14: Odzivi različnih virov (BS 7385-1:1990, str. 5)

| | Frekvenca (Hz) | Amplituda (μm) | Hitrost delca (mm/s) | Pospešek delca (m/s^2) | Čas trajanja | Merjene količine |
|--|----------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------------|--------------|------------------|
| Promet (ceste, železnice, talne vibracije) | 1-80 | 1-200 | 0.2-50 | 0.02-1 | C/T | Pvth |
| Miniranje | 1-300 | 100-2500 | 0.2-500 | 0.02-50 | T | Pvth |
| Zabijanje pilotov | 1-100 | 10-50 | 0.2-50 | 0.02-1 | T | Pvth |
| Strojna oprema zunaj | 1-300 | 10-1000 | 0.2-50 | 0.02-1 | C/T | pvth/ath |
| Zvok (promet, strojna oprema) | 10-250 | 1-1100 | 0.2-30 | 0.02-1 | C | pvth/ath |
| Strojna oprema znotraj | 1-1000 | 1-100 | 0.2-30 | 0.02-1 | C/T | Pvth |
| Človeški vpliv | | | | | | |
| a) Učinek | 0.1-100 | 100-500 | 0.2-20 | 0.02-5 | T | pvth/ath |
| b) Neposreden | 0.1-12 | 100-5000 | 0.2-5 | 0.02-0.2 | | |
| Potresi | 0.1-30 | 10-10 ⁵ | 0.2-400 | 0.02-20 | T | pvth/ath |
| Veter | 0.1-10 | 10-10 ⁵ | | | T | Ath |
| Zvok znotraj | 5-500 | | | | | |
| C = stalen T = prehodni pvth = zgodovina hitrosti delca ath = zgodovina pospeškov | | | | | | |

Na odziv stavbe vplivajo povezava med temelji in temeljnimi tlemi, sestava tal, razdalja med izvorom vibracije in stavbo ter vhodni spekter vibracij, ki vpliva na objekt. Če ima stavba močne temelje, se to odrazi v višjih naravnih frekvencah sistema objekt-temeljna tla in višje frekvence so ponavadi povezane s trdimi tlemi. Deformacije, ki jih vsilimo stavbi z vibracijami, so odvisne od dinamičnih karakteristik obravnavane stavbe, lastne frekvence in dušenja. Lastne frekvence so odvisne od geometrije stavbe in komponent, stopnje togosti teh komponent v stavbi in njihove mase. Posamezne komponente, kot so: tla, strop, nosilci in stebri imajo višje frekvence kot celotna zgradba, zato za to obstaja večja verjetnost resonančnega odziva posameznih komponent pri stalnih vibracijah (BS 7385-2:1993).

7.1.1 Merilna mesta BS 7385-1:1990

Za pravilno opredelitev vibracij v stavbi, je potrebno določiti ustrezna merilna mesta, ki so odvisna od velikosti in kompleksnosti stavbe. Priporočeno mesto merjenja so temelji na strani, ki je obrnjena proti izvoru vibracij. Ko merjenje na temeljih ni možno, to izvedemo na tleh zunaj objekta. Meritve vibracijskega odziva stavb zaradi prometa, zabijanja pilotov in miniranja, kažejo da se vibracije ojačajo sorazmerno z višino stavbe. Zato je potrebno opraviti sočasne meritve na večih delih stavbe.

Če ima stavba več kot 4 nadstropja (12 m), je treba predvideti merilna mesta na vsako 4. nadstropje in na najvišje nadstropje. V primeru, da je stavba več kot 10 m dolga, merilna mesta postavimo na horizontalnem razmiku približno desetih metrov. Dodatna merilna mesta lahko dodamo na zahteve stanovalcev. Za določitev deformacij objekta kot celote, so potrebne meritve direktno na nosilni konstrukciji, ki je dovolj toga. To ponavadi pomeni, da izvedemo merjenje vseh treh komponent hitrosti v kotih, možne so tudi druge kombinacije.

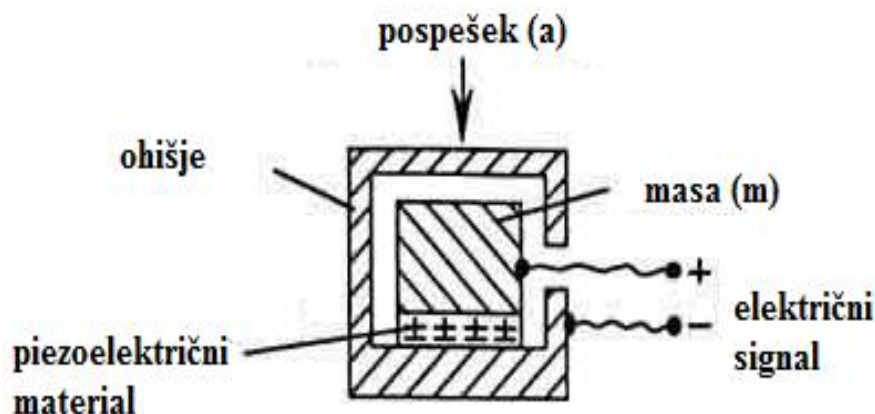
Montaža merilnikov vibracij (akcelerometrov) na elemente, ki so predmet vibriranja, mora biti v skladu z ISO 5348: Mechanical mounting of accelerometers. Zagotoviti moramo, da nameščene naprave omogočajo neovirano gibanje merjenih elementov in njihovih odzivov. Pri triosnih sklopih je treba paziti, da ne pride do upogibanja ali zibanja. Masa merilnikov ne sme biti večja od 10% teže elementa, na katerega so pritrjeni. Montaža mora biti čim lažja in dovolj čvrsta, pri tem lahko uporabimo ekspanzijske vijake, pri lahkih betonih pa mavčne spoje. V posebnih okoliščinah je sprejemljivo, da merilnike prilepimo ali pa jih pritrdimo z magneti. Pri notranjih horizontalnih meritvah lahko uporabimo dvostranski lepilni trak za vse trde površine, če so pospeški manjši kot 10 m/s.

Če izvajamo meritve zunaj stavbe, lahko merilnik namestimo na togo jekleno palico (s premerom večjim od 10 mm), ki jo vtisnemo v zgornjo plast zemljine. Palica ne sme segati več kot nekaj milimetrov nad površino tal, saj moramo omogočiti dober kontakt med napravo in tlemi. Če pričakujemo pospeške večje od 2 m/s, je potrebna vgradnja, da preprečimo zdrs. Da se izognemo popačenju rezultatov, je potrebno merilnik zakopati na globino, ki je trikrat večja od največje dimenzije merilnika. Ena izmed možnosti je tudi, da pritrdimo pretvornik na togo ploščo, katere masni količnik ($m/\rho r^3$) ni večji od 2. Masni količnik je odvisen od mase merilnika in plošče m , polmera plošče r in gostote zemljine ρ (Evaluation and measurement for vibration in buildings, BS 7385-1:1990).

7.1.2 Merilne naprave

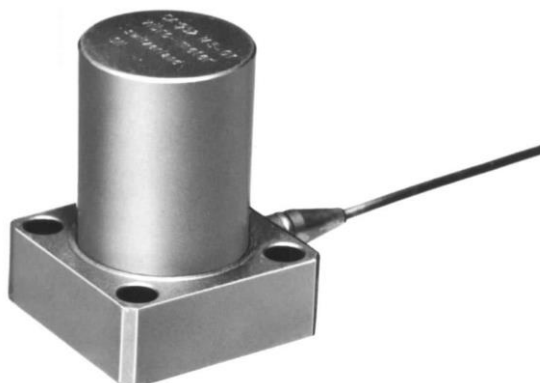
Merilni sistem, ki obsega merilnike, signalne naprave in naprave za beleženje podatkov, mora biti izbran na osnovi predvidene preiskave. Celoten sistem in predvsem merilnik mora imeti ustrezno občutljivost in frekvenčno območje za pričakovane magnitude hitrosti vibracij in frekvenčnih razponov. Čas snemanja in beleženja izmerjenih vrednosti je odvisen od načina vzbujanja, vendar mora biti tak, da je zajet maksimalen odziv in določene spektralne lastnosti z dovolj veliko natančnostjo.

Za določanje hitrosti vibracij (v_s) sestava (objekta), se najpogosteje uporabljajo elektromehanski merilniki (T). Ločimo dve vrsti merilnikov, eni imajo direkten kontakt z obravnavanimi strukturami, drugi kontakta nimajo. Kot smo že omenili, jih lahko pritrdimo direktno na strukturni element ali pa jih postavimo v njihovo neposredno bližino. Ločimo piezoelektrične pospeškomere in seizmične merilnike hitrosti. Način pritrditve je zelo pomemben in do neke mere lahko vpliva na izmerjene pospeške, vendar standard predpisuje ukrepe za izločitev teh vplivov, ne glede na tip izbranega pritrdjevanja. ISO 5348:1998 obravnava samo tiste merilnike, ki jih mehansko pritrdimo.



Slika 13: Sestavni deli piezoelektričnega pospeškomera (http://www.pcb.com/techsupport/tech_accel)

Piezoelektrični pojav sta odkrila brata Pierre in Jacques Curie (1880). To je pojav električnega naboja na površini posebno odrezanega kristala, ki se elastično deformira zaradi zunanje sile. Kot pri vseh pretvornikih, piezoelektrični pospeškomer pretvori eno vrsto energije v drugo in tako zagotovi električni signal kot odziv količine, ki jo merimo. Akcelerometer deluje na osnovi metode zaznavnja pospeška na seizmično maso, ki je pritrdjena z vzmetjo na previsni nosilec in potem pretvori silo v električni signal (https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectric_accelerometer).



Slika 14: Piezoelektrični pospeškometer (<http://www.directindustry.com/prod/meggitt-sa/product-12023-1473021.html>)

7.2 Avstrijski standard ÖNORM S 9020

Eden izmed pogosto rabljenih standardov je tudi avstrijski standard ÖNORM S 9020, kjer so hitrosti merjene v vseh treh ortogonalnih smereh x, y in z. Z vsoto kvadratov izmerjenih hitrosti v_x , v_y in v_z dobimo s spodnjo enačbo največjo hitrosti delca:

$$v_{R,max} = \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t) + v_z^2(t)} \Big|_{\max} \quad (22)$$

$v_{R,max}$ je karakterističen odzivni parameter za oceno potenciala škode obravnavanega objekta zaradi vibracijskega vzburjanja izražena v mm/s (PPV). Začetna ocena dinamičnega obnašanja stavbe zahteva oceno naslednjih parametrov:

- velikost objekta
- starost objekta
- strukturni sistem
- temeljenje
- število nadstropij

V avstrijskem standardu so stavbe klasificirane v štiri razrede (I-IV) (tabela 15).

Tabela 15: Razredi objektov klasificirani po avstrijskem standardu (ÖNORM S 9020)

| Razred objekta | Tip konstrukcije |
|----------------|---|
| I | Industrijski objekti <ul style="list-style-type: none"> - Okvirna konstrukcija iz jekla ali armiranega betona - Stenaste konstrukcije (betonske, iz prefabriciranih elemntov) - Lesene konstrukcije (hale) |
| II | Stanovanjske stavbe <ul style="list-style-type: none"> - Okvirne kostrukcije (kot I) - Stenaste konstrukcije (kot I) - Konstrukcije iz betonskih plošč in sten - Lesene konstrukcije |
| III | Okvirne konstrukcije z manjšo togostjo kot razred I in II Konstrukcije iz lesa in opeke |
| IV | Objekti občutljivi na vibracije |

V tabeli 16 so prikazane dovoljene vrednosti $v_{R,max}$ za posamezne razrede. V drugem stolpcu so zapisane mejne vrednosti hitrosti, ki so posledica vibracij občasnega miniranja ali pa kompaktiranja.

Tabela 16: Dovoljene vrednosti $v_{R,max}$ (ÖNORM S 9020)

| Razred objekta | Maksimalna dovoljena vršna hitrost delca $v_{R,max}$ (mm/s) | | |
|----------------|---|---|--|
| | Občasno miniranje (tedensko) ¹ | Pogosto miniranje (dnevno) ² | Dolgo trajajoče vibracije ³ |
| I | 30 | 24 | 12 |
| II | 20 | 16 | 8 |
| III | 10 | 8 | 4 |
| IV | 5 | 4 | 2 |

*mejne vrednosti primerne za RIC

1-po ÖNORM S 9020

2-po ÖNORM S 9020, stolpec 1 zmanjšan za 20%

3-po ÖNORM S 9020, stolpec 1 zmanjšan za 60%

Meritve hitrosti izvajamo na mestu temeljev na tisti strani, ki je najbližja izvoru. Če gradbena dela potekajo istočasno na večih lokacijah, potem so zahtevane meritve na večih točkah.

7.3 Nemški standard DIN 4150-3: Vpliv vibracij na objekte

Za razliko od avstrijskega, nemški standard DIN 4150-3 kot kriterij navaja mejne vrednosti poljubne ortogonalne komponente hitrosti maksimalne hitrosti delca $V_{i,max}$ (smer $i = x, y, z$; smeri merjenja hitrosti določa standard). Ob upoštevanja standardiziranih vrednosti nemški standard zagotavlja, da raven vibracij ne bo povzročila škode, ki bi vplivala na uporabnost objekta. Vibracije, ki so posledica lomljenja skal, lahko potencialno trajajo dalj časa, kar lahko vodi do resonančnega odziva. Zato jih v spodnji tabeli razvrščamo v stalne vibracije. Pri miniranju je možnost resonance manjša, ker so sunki vibracij občasni (Ross, 2015).

Tabela 17: Mejne vrednosti pri stalnih in občasnih vibracijah (DIN 4150-3)

| Tip objekta | Stalne vibracije | | | | Občasne vibracije |
|-------------------------------|--|----------|-----------|--|--|
| | $V_{i,max}$ (mm/s) na temeljih pri frekvencah: | | | $V_{i,max}$ (mm/s) na najvišjem nadstropju pri vseh frekvencah | $V_{i,max}$ (mm/s) na najvišjem nadstropju pri vseh frekvencah |
| | 1-10 Hz | 10-50 Hz | 50-100 Hz | | |
| Industrijski objekti | 20 | 20-40 | 40-50 | 40 | 10 |
| Stanovanjske hiše, šole | 5 | 5-15 | 15-20 | 15 | 5 |
| Zgodovinsko zaščiteni objekti | 3 | 3-8 | 8-10 | 8 | 2,5 |

Nemški standard DIN 4150-3 velja za konzervativnega in v primerjavi z britanskim standardom BS 7385-2:1993 ima približno trikrat strožje mejne vrednosti. Kar pa ne pomeni, da bo v primeru, ko bodo omejitve nemškega standarda presežene, takoj prišlo do poškodb objekta (Ross, 2015).

7.4 Švicarski standard SN 640 312a:1992

Za primerjavo navajamo v tabeli 18 še mejne vrednosti PPV po švicarskem standardu.

Tabela 18: Mejne vrednosti po švicarskem standardu zaradi miniranja in prometa/gradbene opreme SN 640 312a:1992

| Tip konstrukcije | Frekvenca (Hz) | PPV (mm/s) zaradi miniranja | PPV (mm/s) zaradi prometa in gradbene opreme |
|--|----------------|-----------------------------|--|
| Jeklene ali ojačane konstrukcije: tovarne, jekleni stolpi, mostovi, podzemni predori | 10-60 | 30 | - |
| | 60-90 | 30-40 | - |
| | 10-30 | - | 12 |
| | 30-60 | - | 12-18 |
| Objekti s temeljnimi stenami in betonskimi tlemi, predori z zidanimi oblogami | 10-60 | 18 | - |
| | 60-90 | 18-25 | - |
| | 10-30 | - | 8 |
| | 30-60 | - | 8-12 |
| Objekti z zidanimi stenami in lesenimi stropovi | 10-60 | 12 | - |
| | 60-90 | 12-18 | - |
| | 10-30 | - | 5 |
| | 30-60 | - | 5-8 |
| Na vibracije občutljivi objekti | 10-60 | 8 | - |
| | 60-90 | 8-12 | - |
| | 10-30 | - | 3 |

8 IZRAČUN VRŠNE HITROSTI DELCA ZARADI DELOVANJA GRADBENE MEHANIZACIJE

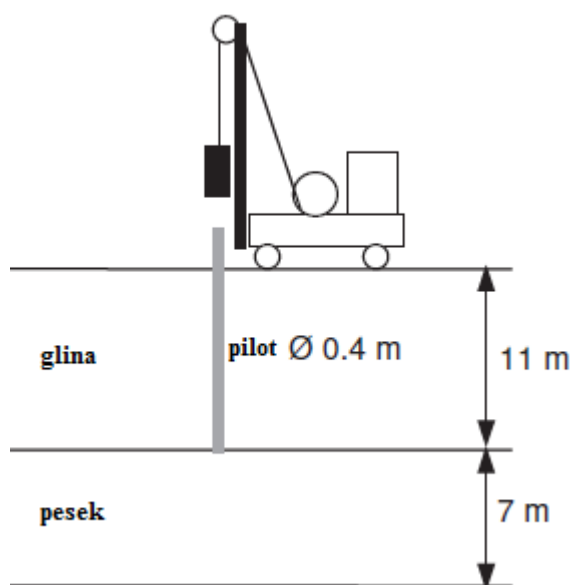
V teoretičnem delu diplome so navedene enačbe (15-18), s katerimi lahko izračunamo vršno hitrost delca PPV, ki jih posamezna vrsta gradbene mehanizacije (izvor) povzroči na različni oddaljenosti od izvora. Izračunane vrednosti PPV predstavljajo konzervativno oceno dejanskih vrednosti. Po empiričnih enačbah izračunane vršne hitrosti smo primerjali z rezultati dinamične analize, ki smo jih izračunali s programskim orodjem Plaxis 2D. Z dinamično analizo s programom Plaxis 2D je možno računsko simulirati interakcijo zemljine in konstrukcije pod vplivom dinamične obtežbe.

Primerjavo smo naredili za primer zabijanja pilota in za primer uporabe hidravličnega kladiva.

8.1 Računska simulacija zabijanja pilota

Če s plitvim temeljenjem ne zadostimo kriteriju mejnega stanja nosilnosti (dejanska obtežba temeljnih tal je večja od projektne nosilnosti temeljnih tal), ali če so absolutni in/ali diferenčni posedki/zasuki temeljev take velikosti, da jih objekt ne more prenesti (preseženo mejno stanje uporabnosti), se odločimo za globoko temeljenje - uporabo pilotov (kolov). Potreba po pilotih se pojavi, ko imamo tla, ki torej sama niso sposobna prenesti zunanje obtežbe. Pilote lahko vgradimo na različne načine in v nalogi smo analizirali zabijanje pilota ter njegov učinek posameznega udarca zabijala na pilot na bližnjo okolico.

Upoštevali smo dva sloja zemljine, in sicer sloj gline debeline 11 m in sloj peska debeline 7 m. V analizi smo upoštevali osno simetrijo ter mejni radij modela 30 m. V obeh slojih je v analizi za zemljini privzeto nedrenirano stanje, kar pomeni, da sta zemljini zasičeni in se pri kratkotrajni obtežbi tal pojavijo presežni porni tlaki.



Slika 15: Prikaz sheme delovanja zabijalca pilotov in obravnavane plasti. (Plaxis 2D Manual, 2012)

8.1.1 Uporabljeni modeli in karakteristike materialov

Z namenom, da bi nelinearne deformacije v zemljini pod pilotom upoštevali na primeren način, smo sloj peska modelirali s Hardening Soil Small modelom (HS-Small model). Območje deformacij, v katerem zemljine lahko obravnavamo kot elastične, je namreč zelo majhno. Z naraščanjem deformacij se togost zemljine zmanjšuje. HS-Small model je nelinearno elastoplastičen model z izotropnim utrjevanjem in upoštevanjem togosti pri majhnih deformacijah. Pri tem modelu je za razliko od bolj poznane Hardening Soil modela (HS model) za definiranje HS-Small modela potrebno vnesti dodatna dva materialna parametra, ki natančneje opišeta obnašanje zemljine v področju majhnih deformacij:

- $\gamma_{0.7}$ (strižna deformacija, pri kateri se vrednost sekantnega strižnega modula zmanjša na 70% G_o)
- G_o^{ref} (strižni modul pri zelo majhnih deformacijah).

Glino smo modelirali z linearno elastičnim idealno plastičnim Mohr-Coulomb modelom. Mohr je predstavljal hipotezo, da do porušitve pride, ko strižna napetost na porušni ploskvi doseže vrednost, ki je enolična funkcija normalne napetosti na tej ploskvi:

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (23)$$

S kombinacijo Coulombove enačbe in Mohrovega kriterija porušitve so dobili Mohr-Coulombov kriterij porušitve, ki je z upoštevanjem Terzaghijeve teorije (1925) o efektivnih napetostih dobil končno obliko:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (24)$$

Idealno plastičen model je konstitutivni model z določeno porušno ploskvijo, ki je popolnoma definirana s parametri modela in neodvisna od plastičnega deformiranja (Plaxis 2D Manual, 2012).

Karakteristike obravnavanih materialov so zbrane v tabeli (19).

Tabela 19: Karakteristike materialov

| Parameter | Oznaka | Glina | Pesek | Pilot | Enota |
|---|------------------|--------------|-------------|--------------------|-------------------|
| Materialni model | Model | Mohr-Coulomb | HS-Small | Linearno-elastičen | - |
| Tip obnašanja | Tip | Nedrenirano | Nedrenirano | Neporozno | - |
| Prostorninska teža nad gladino vode | γ_{unsat} | 16 | 17 | 24 | kN/m ³ |
| Prostorninska teža pod gladino vode | γ_{sat} | 18 | 20 | - | kN/m ³ |
| Sekantni elastični modul | E_{50}^{ref} | - | 50000 | - | kN/m ² |
| Elastični modul pri razbremenitvi/ponovni obremenitvi | E_{ur}^{ref} | - | 150000 | - | kN/m ² |

...se nadaljuje

... nadaljevanje Tabele 19

| | | | | | |
|------------------|-----------------|---|-------|--|--|
| Edometrski modul | E_{oed}^{ref} | - | 50000 | | |
|------------------|-----------------|---|-------|--|--|

| | | | | | |
|--|----------------|------|--------|-----|-------------------|
| Elastični modul | E | 5000 | - | - | kN/m ² |
| Poissonov količnik | ν | 0.3 | 0.2 | 0.1 | - |
| Kohezija | c | 2 | 0 | 0.1 | kN/m ² |
| Strižni kot | φ | 24 | 31 | - | ° |
| Kot razmikanja | ψ | 0 | 1 | - | ° |
| Strižna deformacija pri $G_s = 0.722G_0$ | $\gamma_{0.7}$ | - | 0.0001 | - | - |
| Strižni modul pri zelo majhnih deformacijah | G_o^{Ref} | - | 120000 | - | kN/m ² |

8.1.2 Modeliranje problema

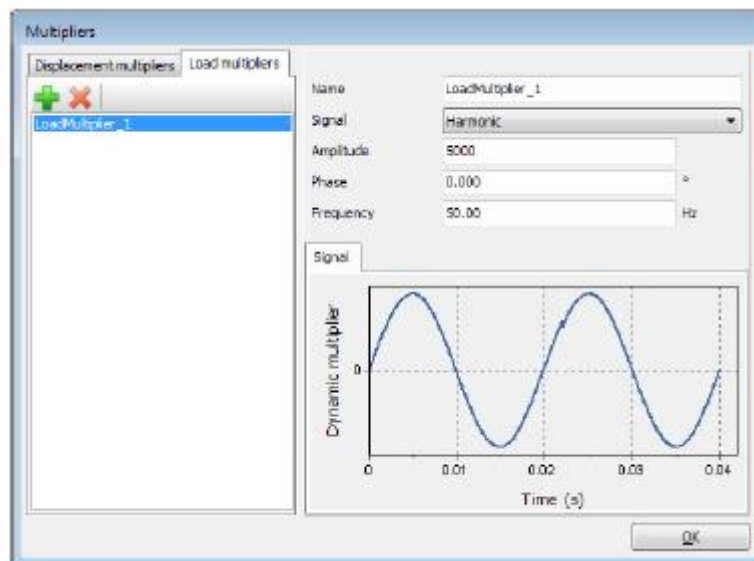
Obravnavan problem je v splošnem 3D narave, vendar smo ga mi upoštevali v pogojih osne simetrije. To pomeni, da merimo hitrosti samo v radialni smeri (koordinata x) in vertikalni smeri (koordinata y). Absolutno vrednost hitrosti izračunamo kot rezultanto teh dveh hitrosti.

$$v_{R,max} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (25)$$

Privzeti betonski pilot ima premer 0.4 m. V programu smo upoštevali osno simetrijo in privzeli, da porazdeljena dinamična obtežba deluje na radiju 0.2 m. Vhodni podatek za velikost dinamične obtežbe je 1 kN/m/m in se potem v postopku izračuna pomnoži z vrednostjo obtežnega faktorja *Multiplier*, s katerim definiramo velikost obtežbe in frekvenco zabijanja. Torej je končna dinamična obtežba produkt enotske porazdeljene obtežbe in vrednosti obtežnega faktorja *Multiplier*.

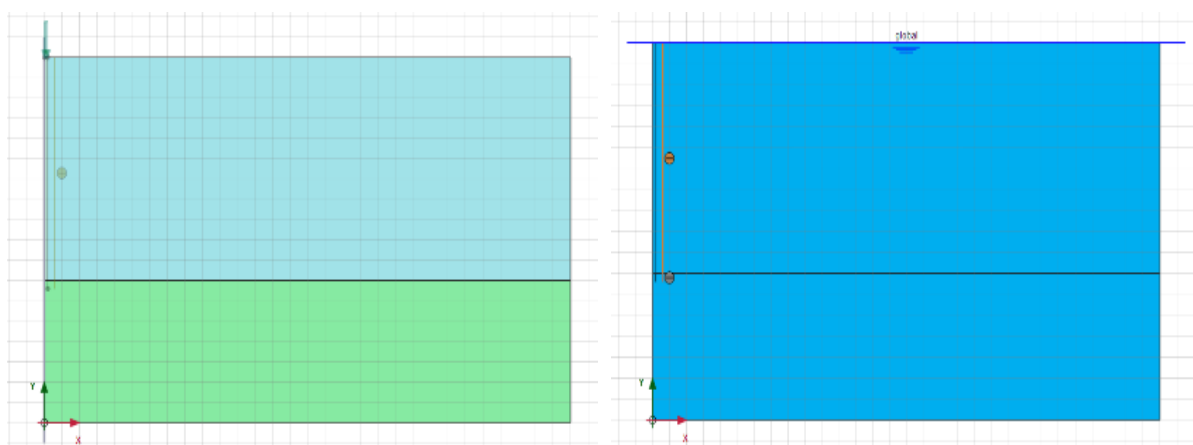
$$\text{Dinamična obtežba} = \text{enotska obtežba} * \text{Multiplier}$$

Podatki o dinamični obtežbi, so razvidni iz spodnje slike, in sicer znaša amplituda 5000 in frekvenca 50 Hz. Slednji podatek nam pove, da zabijalo generira 50 udarcev v sekundi. Iz enačbe (1) vidimo, da če poznamo frekvenco, lahko določimo nihajni čas $t_0 = 0.02s$. Signal, ki ga ustvarja obtežba zabijala je harmoničen in ima obliko sinusoide, kot je prikazano na sliki 16. Vrh sinusne krivulje je dosežen pri vnešeni vrednosti amplitude, to je sila udarca zabijala 5000 kN.



Slika 16: Prikaz vnosa dinamične obtežbe v programu Plaxis 2D.

Ustrezno modeliranje interakcije pilot-zemljina je pomembno z vidika upoštevanja dušenja materiala, ki se pojavi med drsenjem zemljine ob pilotu. To zagotovimo z uporabo posebnega *Interface* elementa na stiku med pilotom in zemljino. Gladina vode je na površini terena (slika 17), zato se hidrostatski tlaki pojavijo povsod.



Slika 17: Prikaz geometrije modela in nivo vode (Plaxis 2D)

Ker temeljna tla idealiziramo kot neskončen medij, je potrebno definirati ustrezne robne pogoje. Brez teh pogojev bi se dinamični valovi odbili od robov modela in tako povzročili motnje. Na robovih modela smo uporabili t.i. »viskozne meje« (angl. viscous boundaries), ki večji del prispelih valov absorbirajo, zanemarljivo malo pa se jih odbije nazaj.

8.1.3 Računske faze, dinamičen čas in število korakov

Dinamičen čas pri dinamični analizi podajamo v sekundah. V 2. fazi smo predpisali vrednost 0,01 s in v 3. fazi 3.5 s. Druga faza predstavlja nanos obtežbe (1 udarec zabijala v trajanju 0,01 s), medtem ko v 3. fazi izračunamo dinamičen odziv - hitrosti v vnaprej določenih točkah na površju tal zaradi delovanja

dinamične obtežbe v 2. fazi. Pri 3. fazi smo preverili, če so v izbranem dinamičnem času zajete najvišje vrednosti izračunanih hitrosti. V primeru, ko niso, je potrebno čas merjenja podaljšati. Število korakov v posameznem računskem koraku nam pove, na koliko intervalov je razdeljen dinamičen čas in v teh intervalih program shrani iskane podatke (notranje statične količine, deformacije in hitrosti). Mi smo želeli imeti izračunane hitrosti na vsakih 0,001 s, zato smo vnesli 3500 računskih korakov. Višja kot je ta številka, manjša je možnost, da zgrešimo maksimalno vrednost odziva tal v posamezni točki.

8.1.4 Rezultati

Hitrosti smo merili v sedmih različnih točka na površju terena ($y = 18.0$ m). V spodnji tabeli so prikazane oddaljenosti teh točk od izvora vibracij (zabijalec pilotov).

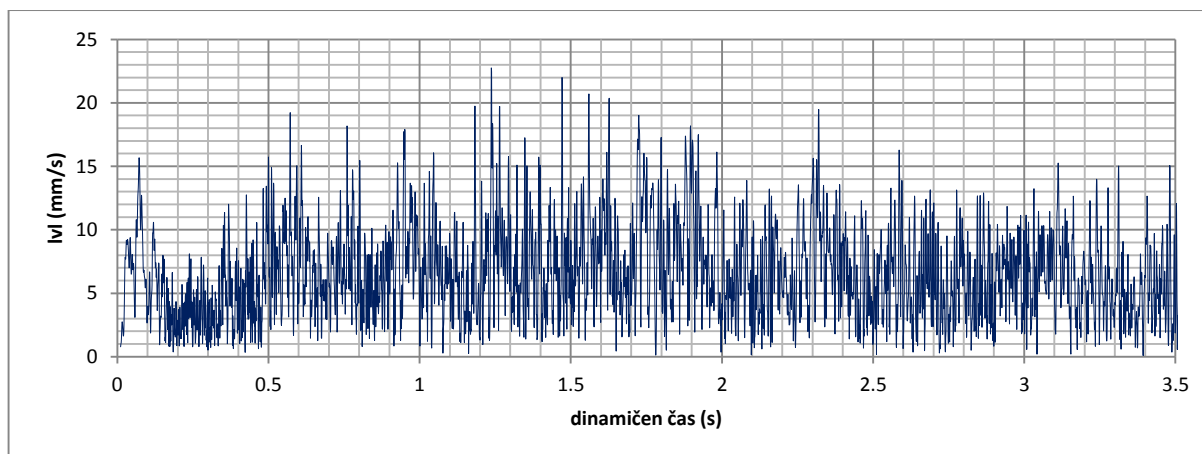
Tabela 20: Izbrane točke in njihove oddaljenosti od izvora.

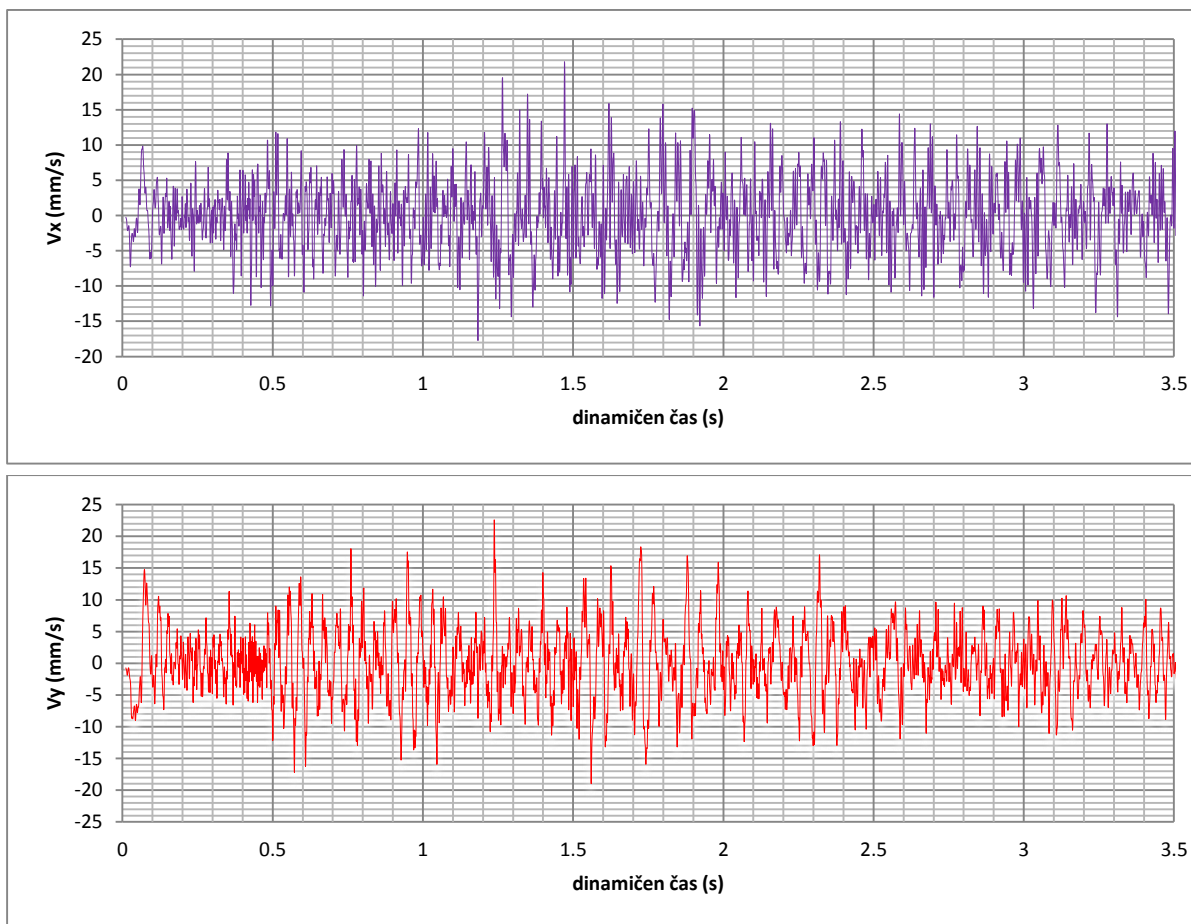
| Točka | A | B | C | D | E | F | G |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Razdalja od izvora (m) | 1,0 | 2,0 | 4,0 | 8,0 | 12,0 | 16,0 | 24,0 |

Na spodnjih grafih so prikazane hitrosti v radialni (x) in vertikalni (y) smeri ter njihova absolutna vrednost $|v|$. Najvišjo absolutno hitrost smo primerjali z izračunom po empirični enačbi za vibracijska zabijala:

$$PPV_{Vibracijsko\ kladivo} = PPV_{Ref} \left(\frac{7,62}{D} \right)^{1,3} \quad (26)$$

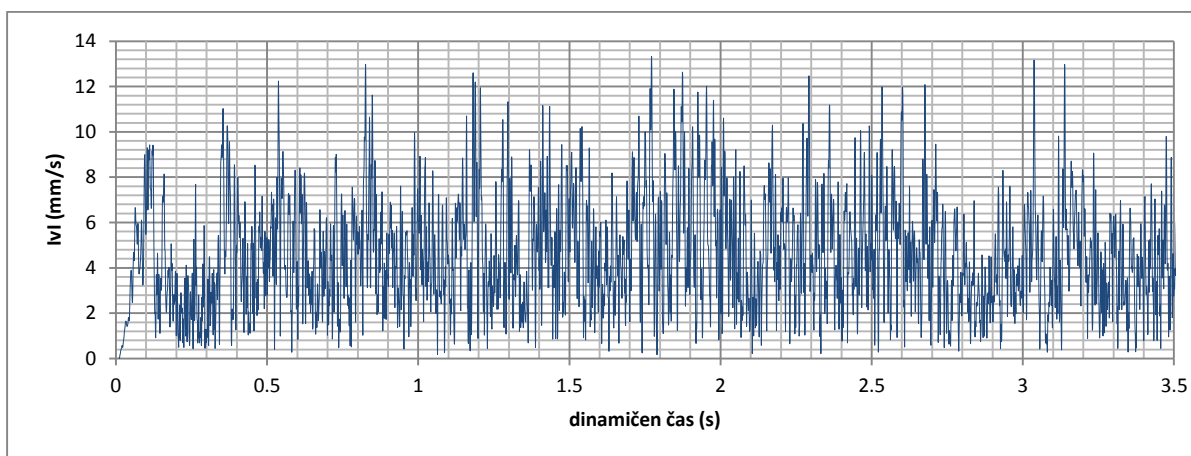
Na sliki 18 so prikazani grafi hitrosti v točki A. Prvi graf prikazuje potek absolutne hitrosti $|v|$ v odvisnosti od čas. Največjo izračunano $|v|$ primerjamo z standardiziranimi mejnimi vrednostmi PPV. $|v|$ doseže maksimalno vrednost v času 1,24 s (22,75 mm/s). Grafi so prikazani za časovni interval 3,5 s, kjer je možno opaziti, da vrednosti hitrosti rahlo padajo. V primeru daljšega časovnega intervala, bi bilo to padanje bolj očitno. Bistveno je, da v izbranem intervalu zajamemo maksimalne vrednosti, s katerimi lahko potem preverimo učinek vibracij na objekte. Druga dva grafa prikazujeta hitrost v radialni smeri, ki doseže največjo vrednost (21,80 mm/s) v času 1,48 s, ter v vertikalni smeri, ki ima maksimum (22,60 mm/s) v času 1,24 s.

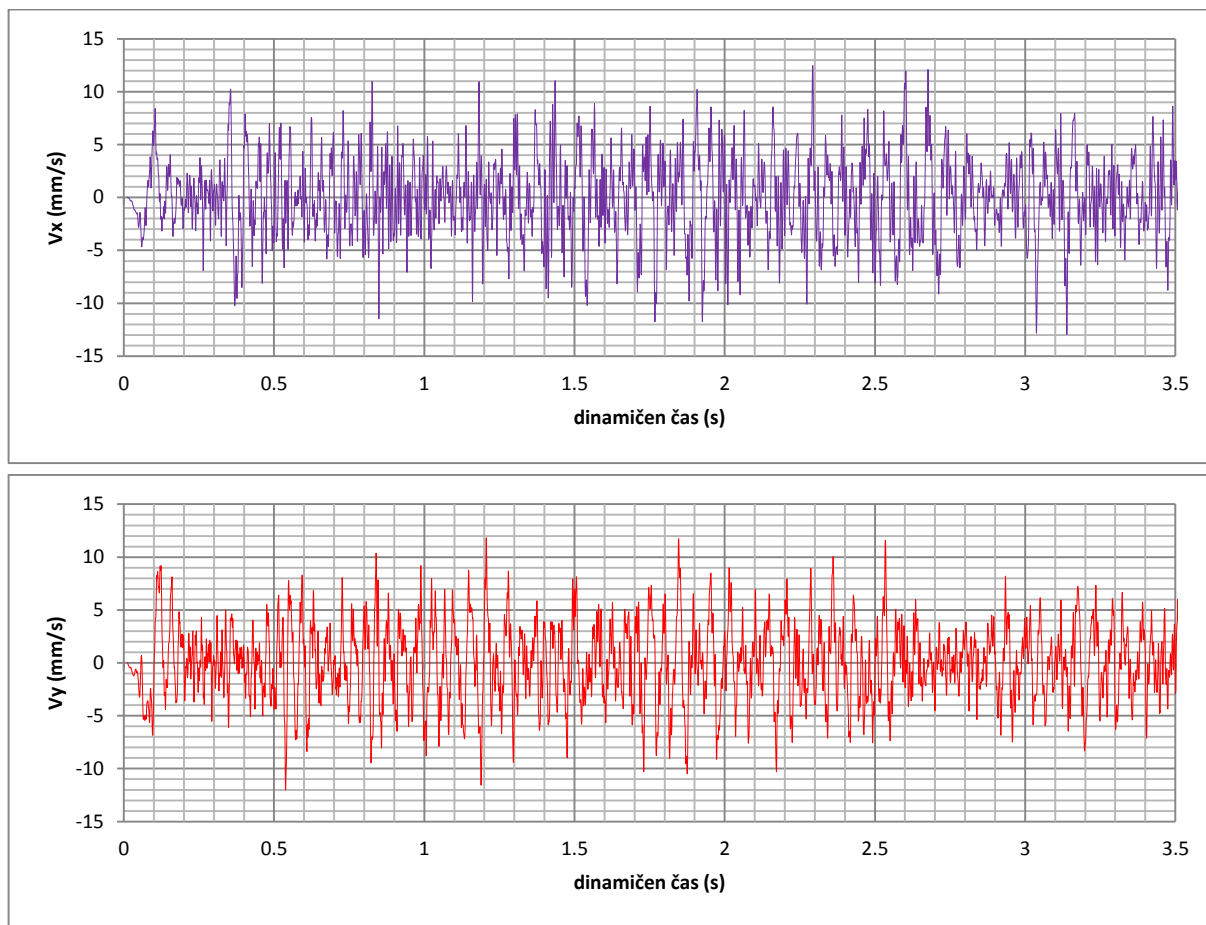




Slika 18: Izračunane hitrosti v točki A

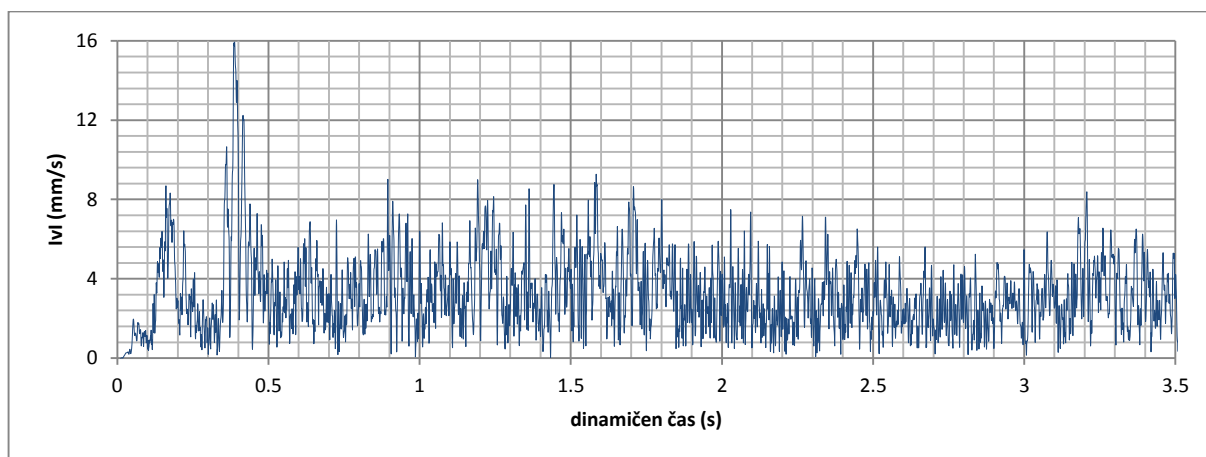
$|v|$ doseže maksimalno vrednost v točki B (slika 19) v času 1,78 s (13,32 mm/s). Druga dva grafa prikazujeta hitrost v radialni smeri, ki doseže največjo vrednost v času 3,05 s, ter v vertikalni smeri, ki ima maksimum v času 0,53 s.

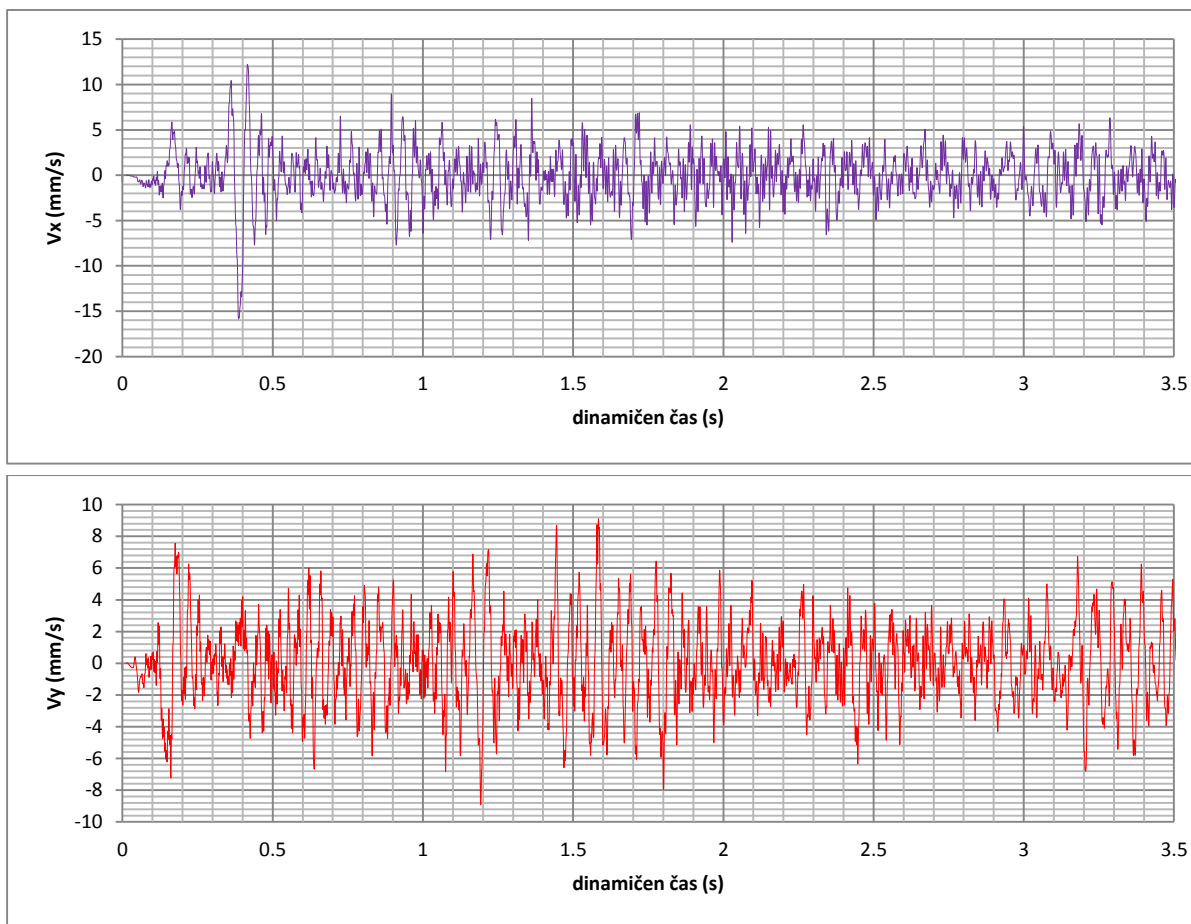




Slika 19: Izračunane hitrosti v točki B

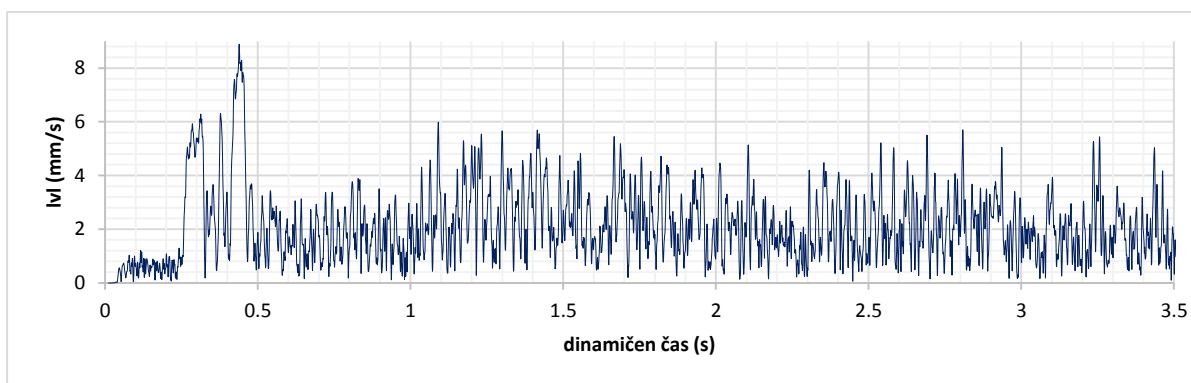
$|v|$ doseže maksimalno vrednost v točki C (slika 20) v času 0,39 s (15,94 mm/s). Druga dva grafa prikazujeta hitrost v radialni smeri, ki doseže največjo vrednost v času 0,39 s, ter v vertikalni smeri, ki ima maksimum v času 1,58 s.

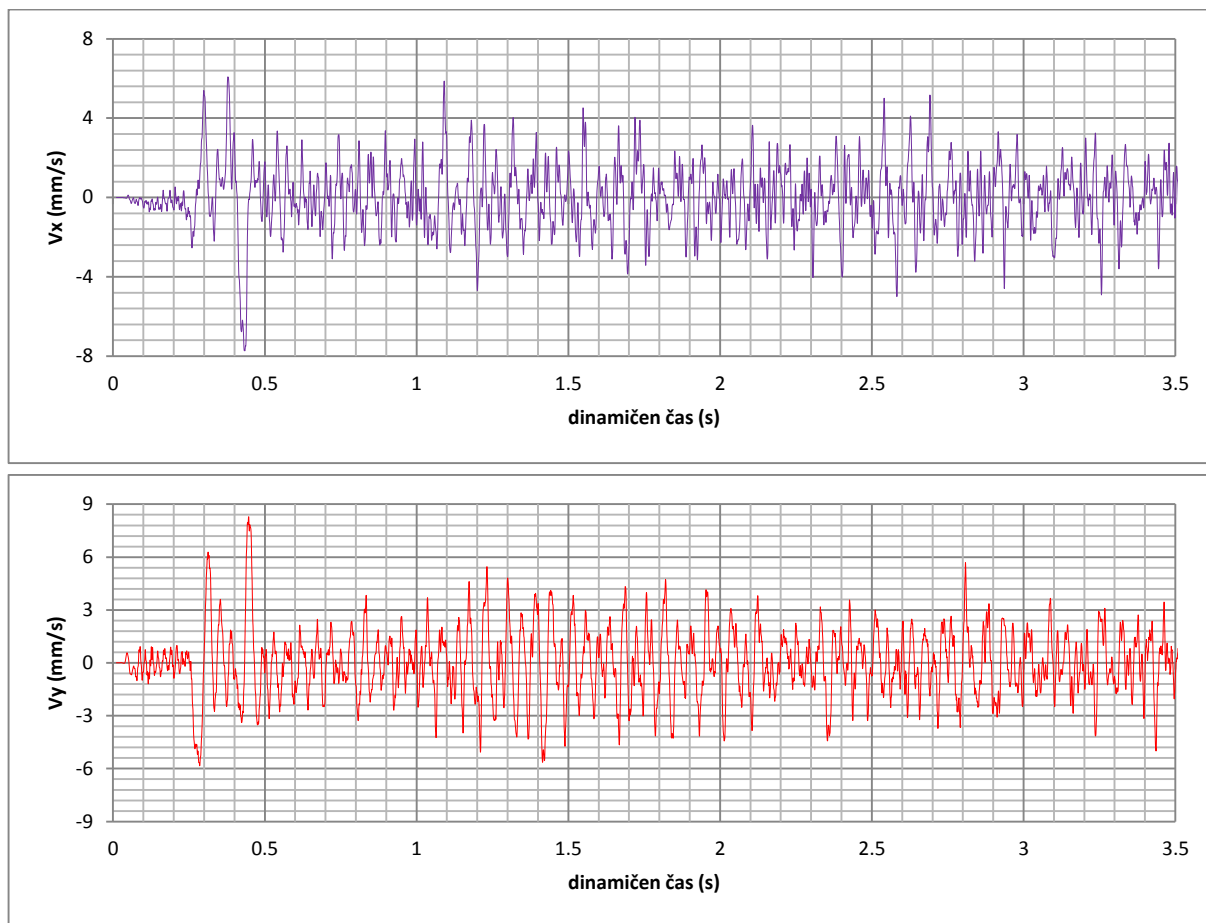




Slika 20: Izračunane hitrosti v točki C

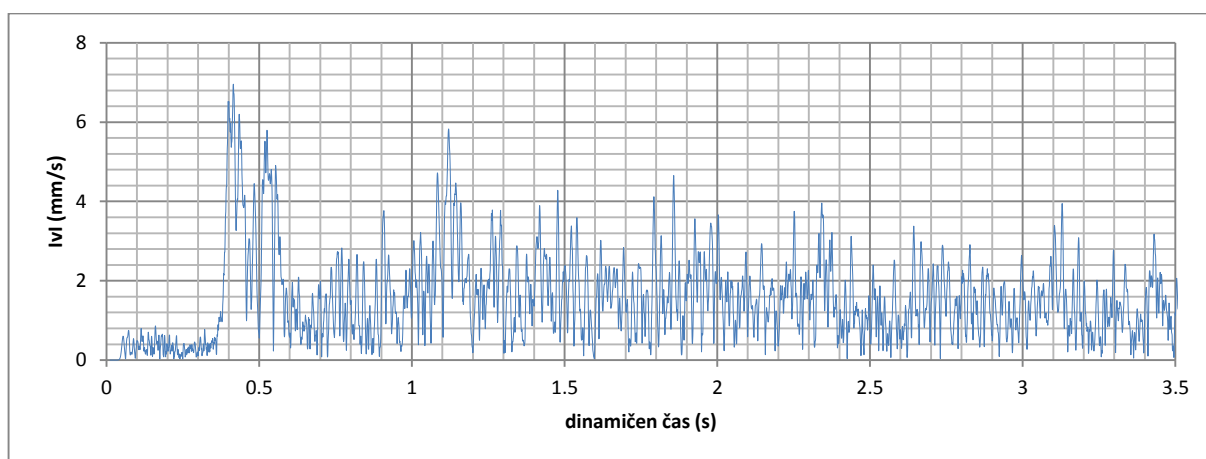
$|v|$ doseže maksimalno vrednost v točki D (slika 21) v času 0.43 s (8,89 mm/s). Druga dva grafa prikazujeta hitrost v radialni smeri, ki doseže največjo vrednost v času 0.43 s, ter v vertikalni smeri, ki ima maksimum v času 0,45 s.

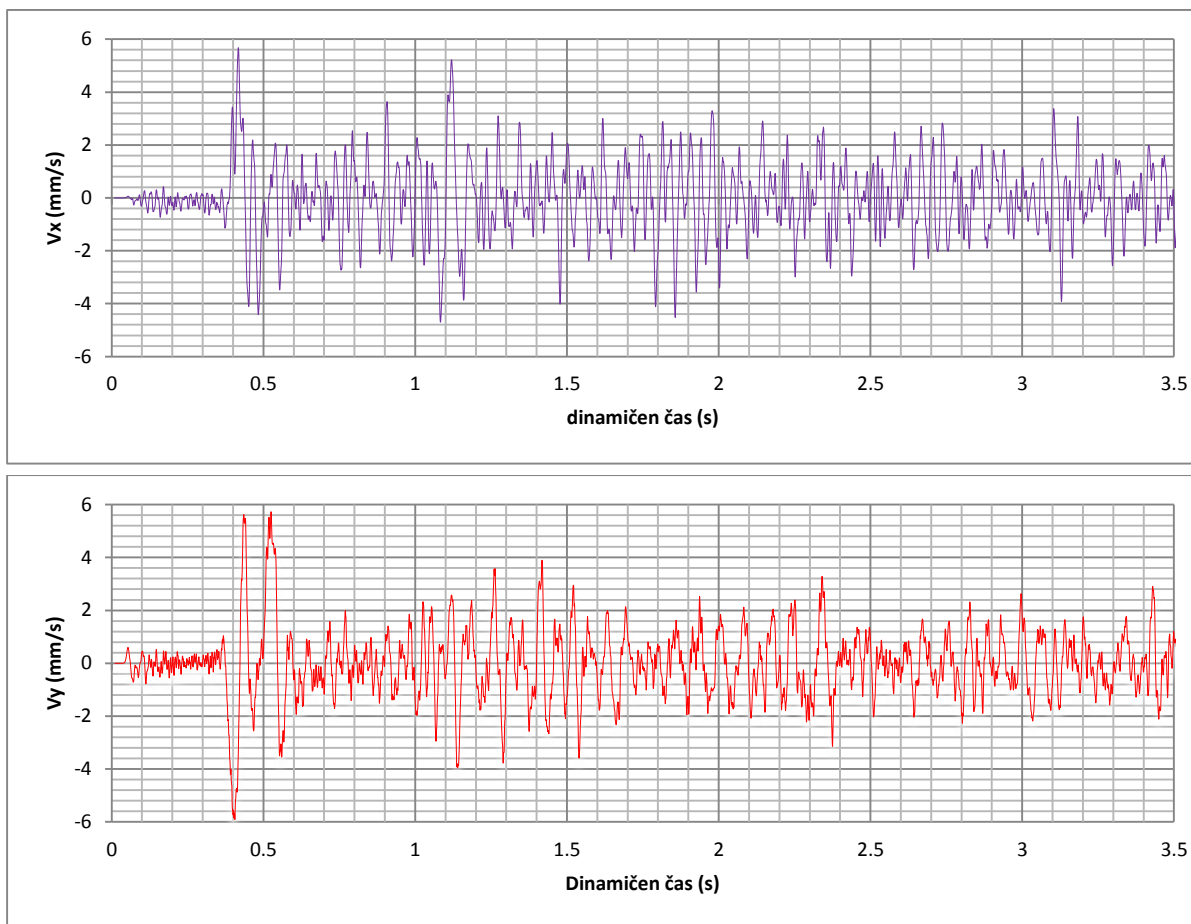




Slika 21: Izračunane hitrosti v točki D

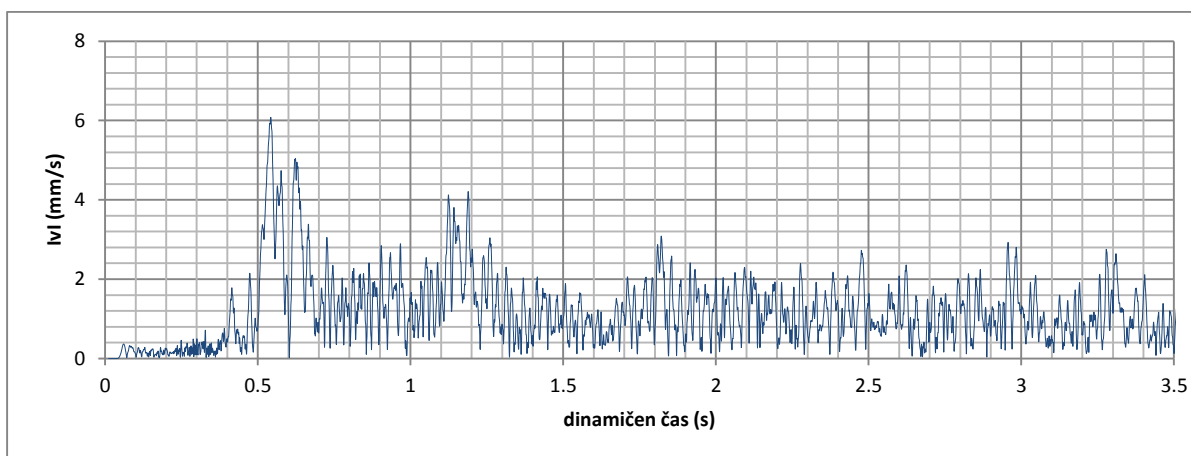
$|v|$ doseže maksimalno vrednost v točki E (slika 22) v času 0,41 s (6,96 mm/s). Druga dva grafa prikazujeta hitrost v radialni smeri, ki doseže največjo vrednost v času 0.41 s, ter v vertikalni smeri, ki ima maksimum v času 0,40 s.

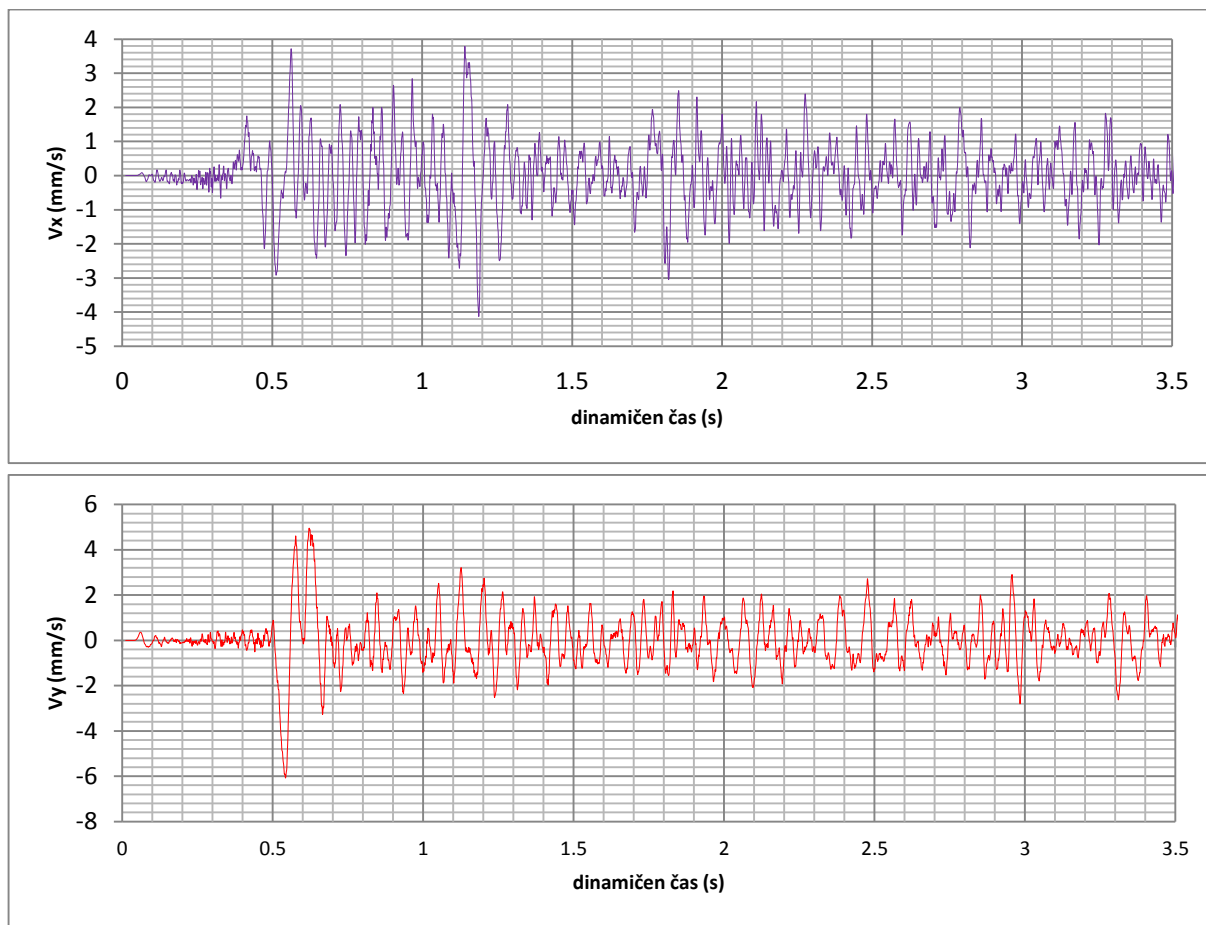




Slika 22: Izračunane hitrosti v točki E

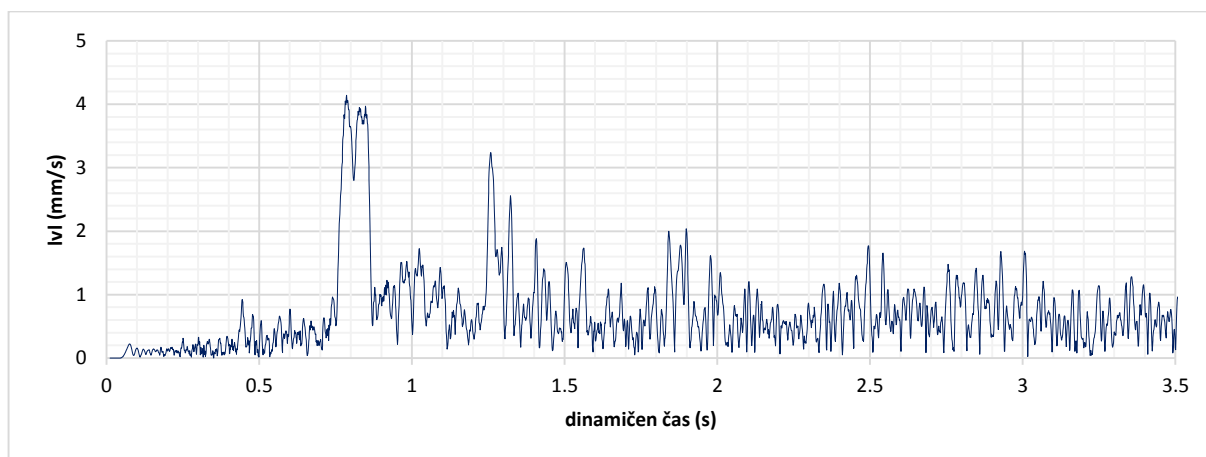
$|v|$ doseže maksimalno vrednost v točki F (slika 23) v času 0,53 s (6,08 mm/s). Druga dva grafa prikazujeta hitrost v radialni smeri, ki doseže največjo vrednost v času 1,18 s, ter v vertikalni smeri, ki ima maksimum v času 0,54 s.

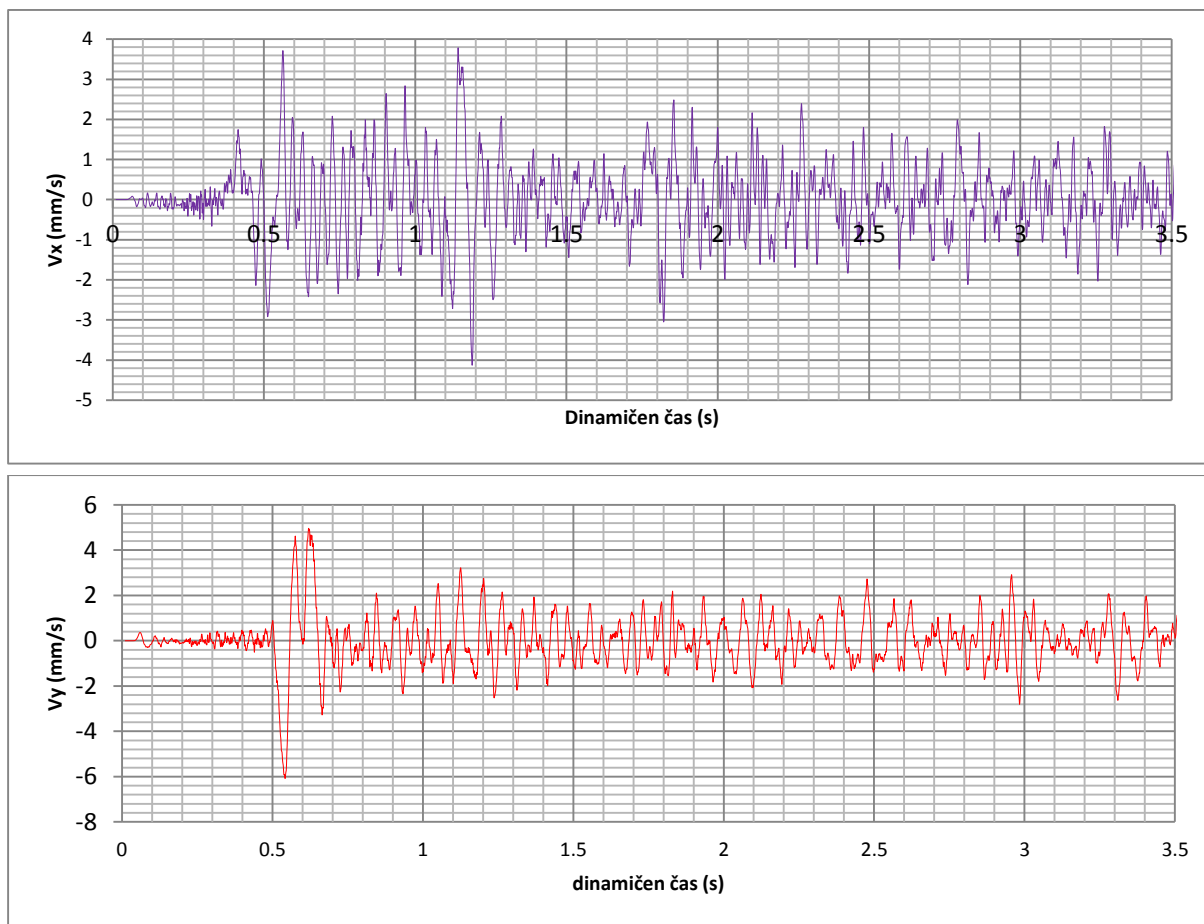




Slika 23: Izračunane hitrosti točki F

$|v|$ doseže maksimalno vrednost v točki G (slika 24) v času 0,78 s (4,14 mm/s). Druga dva grafa prikazujeta hitrost v radialni smeri, ki doseže največjo vrednost v času 1,18 s, ter v vertikalni smeri, ki ima maksimum v času 0,52 s.



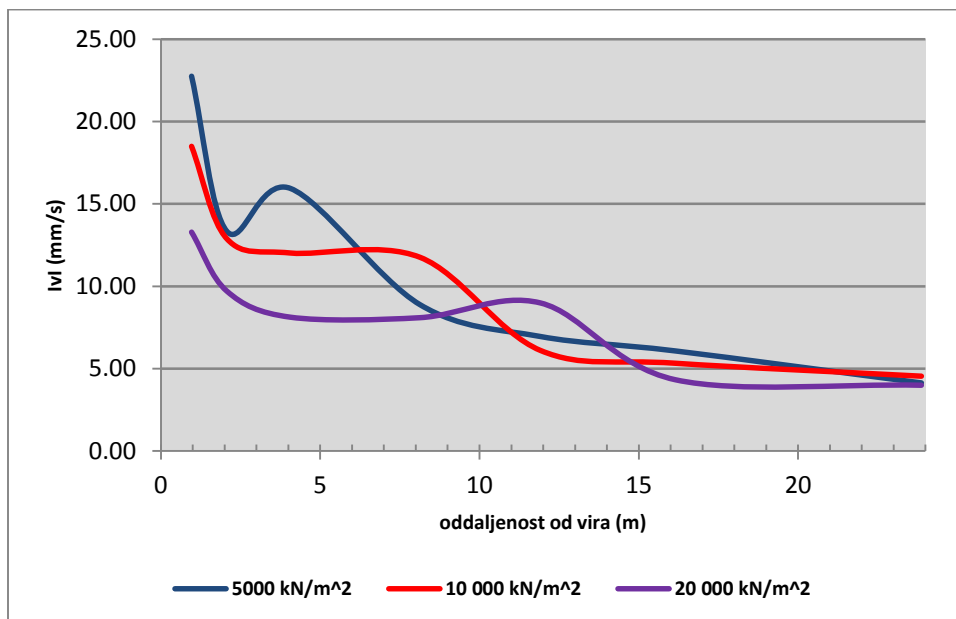


Slika 24: Izračunane hitrosti v točki G

Kot je razvidno iz tabele 21, je znašal izbrani elastični modul sloja gline 5000 kN/m^2 . Zanimalo nas je, kako deformabilnost tal vpliva na hitrosti v izbranih točkah in kako vrednosti iz Plaxisa sovpadajo z izračuni po empirični enačbi (26). Iz tabele 12 smo za sloj gline izbrali ustrezno vrednost $n = 1.3$. V drugem primeru smo v izračunu po metodi končnih elementov s programom Plaxis 2D togost sloja gline povečali za 2x in v tretjem za 4x. Najvišje absolutne izračunane hitrosti s programom Plaxis 2D so prikazane v tabeli 21 in na sliki 25.

Tabela 21: Najvišja vršna hitrost delca (mm/s) na različnih razdaljah pri različnih deformabilnostih zemljine.

| | A | B | C | D | F | G | H |
|--------------------------|--------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 5 000 kN/m ² | 22,75 | 13,33 | 15,94 | 8,89 | 6,96 | 6,08 | 4,14 |
| 10 000 kN/m ² | 18,49 | 12,87 | 12,02 | 8,55 | 6,10 | 5,32 | 4,53 |
| 20 000 kN/m ² | 13,29 | 9,71 | 8,13 | 8,10 | 9,00 | 4,33 | 4,00 |
| empirična rešitev | 243,97 | 89,85 | 37,43 | 15,18 | 9,24 | 6,22 | 3,74 |

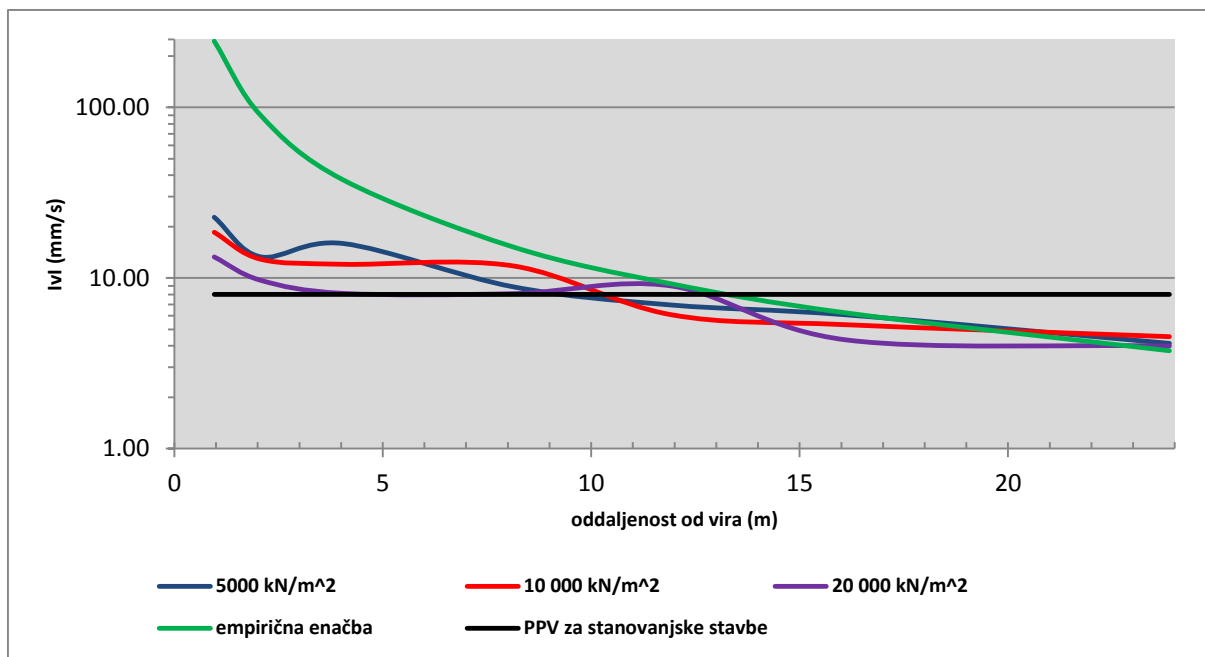


Slika 25: Absolutne hitrosti (mm/s) pri različnih togostih

Ugotovimo, da s togostjo tal vršne hitrosti padajo. Pri gradnji na manj kvalitetnih tleh lahko v splošnem pričakujemo višje vibracije.

Po empirični enačbi dobimo konzervativno oceno vrednosti PPV. Naj omenimo, da je empirična enačba odvisna samo od tipa tal, kar zajamemo s parametrom n in ni direktno odvisna od togosti zemljine. Posledično lahko dobljene empirične rezultate primerjamo z vsemi izračunanimi PPV iz Plaxisa 2D pri različnih togostih. Primerjava vrednosti PPV, ki jo dobimo po enačbi (26) in vrednosti PPV, kot jih dobimo iz dinamične analize s programom Plaxis 2D je prikazana na sliki 30. Posebnost, ki jo lahko opazimo na sliki 26, je drastično odstopanje empiričnih rezultatov pri manjših oddaljenostih od zabijala. Razlog je zelo verjetno v tem, da nas vrednosti PPV v neposredni bližini izvora vibracije običajno ne zanimajo in je bila empirična enačba določena na osnovi meritev pri razdaljah, ki običajno presegajo referenčno razdaljo 7,62 m (25 ft).

Če nas zanima, kakšna je najkrajša razdalja zabijala od obstoječe konstrukcije, ki je občutljiva na vibracije (razred IV, tabela (15)), lahko ob upoštevanju avstrijskega standarda iz tabele (16) najprej odčitamo dovoljeno vršno hitrost za stalno obtežbo, ki znaša 2 mm/s. Gre za konzervativen kriterij, saj pod to mejo standard predpostavlja, da ne pride do nobenih poškodb na objektu razreda IV. Glede na dobljene rezultate in empirično enačbo, ki da najbolj konzervativne rezultate, vidimo da pri razdalji 24 m še vedno nismo na varni strani in da na takšni oddaljenosti gradbenih del ne bi smeli opravljati, da ne bi prišlo do poškodb objektov razred IV. Pri stanovanjskih stavbah je vrednost PPV = 8 mm/s in posledično se minimalna potrebna razdalja, ki bo pri istem viru vibracij zagotovila, da ne pride do poškodb objektov razreda II, zmanjša. Na sliki 26 vidimo, da je ta razdalja za vse obravnavane togosti tal približno 10 – 13 m. Največjo »varno« razdaljo dobimo z empirično enačbo, katere vrednost je 14 m. Glede na zahteve avstrijskega standarda, bi torej lahko na oddaljenosti 15 m od stanovanjskega objekta zabijali pilote in pri tem ne bi prišlo do poškodb na obstoječih konstrukcijah.



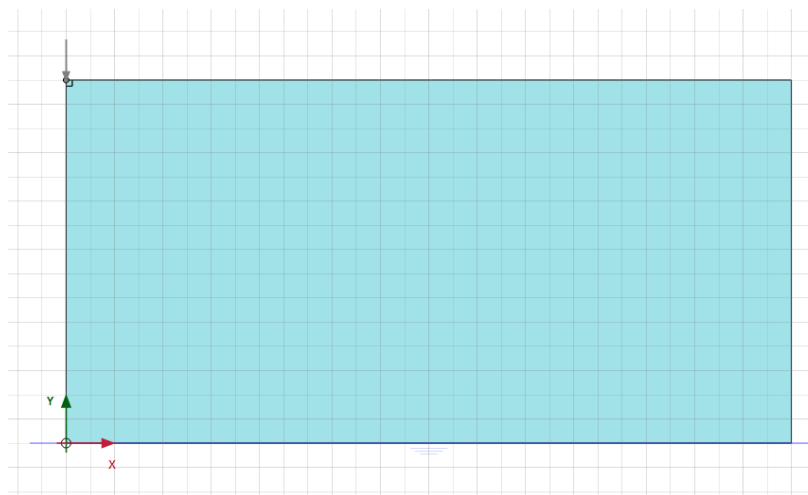
Slika 26: Primerjava rezultatov empirične enačbe in izračunanih PPV iz Plaxis 2

8.2 Računska simulacija udara hidravličnega kladiva

Pri tem računskem primeru smo računali vršne hitrosti v naprej izbranih točkah zaradi delovanja hidravličnega kladiva na krožni temelj $r = 0,25$ m, ki leži na sloju homogenih tal. Problem smo zopet modelirali kot osnosimetričen, in sicer smo upoštevali tla v debelini 15 m z radijem 30 m. Upoštevana frekvenca udarcev kladiva na temelj je 50 Hz (kot pri prejšnjem primeru), nihajni čas pa 0,02 s. V tabeli so prikazane izbrane točke na površju (kota $y = 15$ m).

Tabela 22: Izbrane točke in razdalje (m) od vira (kladiva)

| Točke | A | B | C | D | E |
|-------------------------|-----|-----|-----|------|------|
| Razdalja od kladiva (m) | 2,0 | 4,0 | 8,0 | 16,0 | 24,0 |





Slika 27: Prikaz modela z delujočo točkovno silo

8.2.1 Izbrani hidravlični kladivi

Primerjali smo rezultate dveh kladiv z različno nazivno energijo. Ker je pri vnosu dinamične obtežbe (v tem primeru gre za točkovno obtežbo) potreben podatek, s kolikšno silo kladivo udari, je v nadaljevanju prikazan postopek izračuna.

Tabela 23: Tehnične specifikacije izbranih hidravličnih kladiv (Furukawa pletna stran)

| Hidravlično kladivo F27XP | | Hidravlično kladivo F70XP | |
|--|------|---|-------|
| Teža kladiva (kg) | 1805 | Teža kladiva (kg) | 4315 |
| Višina kladiva s konico (mm) | 2455 | Višina kladiva s konico (mm) | 3235 |
| Sproščena energija ob udarcu (J) | 5118 | Sproščena energija ob udarcu (J) | 13667 |
| Premer konice (mm) | 140 | Premer konice (mm) | 180 |
| Teža konice (kg) | 145 | Teža konice (kg) | 270 |
|  | |  | |

Vemo, da ima točkovno telo z maso m (kg), ki se giblje s hitrostjo v (m/s) kinetično energijo (J):

$$W_k = \frac{mv^2}{2} \quad (27)$$

Kinetična energija kladiva je podatek proizvajalca, ki označuje maksimalno sproščeno energijo ob udarcu. Ob znani masi konice lahko določimo translatorsko hitrost gibajočega se tlesa. Izračunani hitrosti obeh konic sta podani v tabeli 24 (Kladnik, 1994).

Tabela 24: Hitrosti delovanja konice obeh kladiv

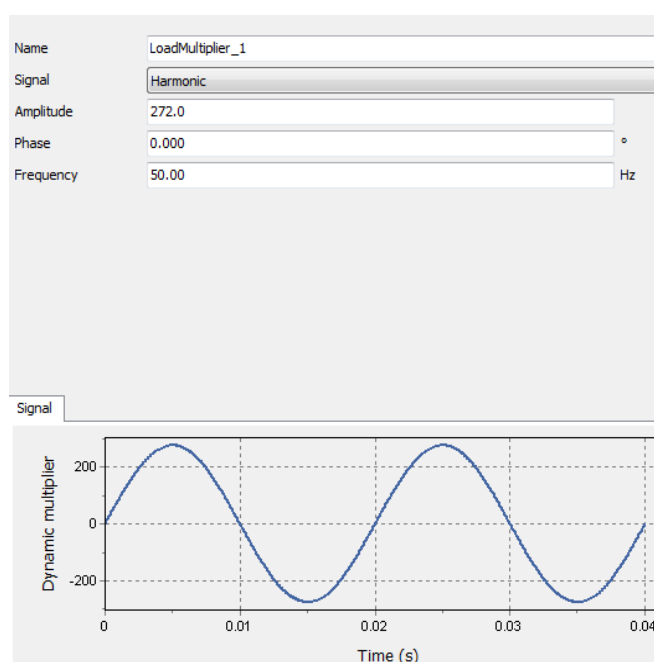
| Hidravlično kladivo F27XP | Hidravlično kladivo F45XP |
|---------------------------|---------------------------|
| $v = 8.4 \text{ m/s}$ | $v = 10.06 \text{ m/s}$ |

Če zanemarimo energijske izgube lahko ob znani hitrosti ($v_z = 0 \text{ m/s}$, $v_k = v$, $\Delta v = v_k - v_z$), masi telesa (konice) in časovnem intervalu delovanja obtežbe ($t_z = 0 \text{ s}$, $v_k = \frac{t_o}{2}$, $\Delta t = t_k - t_z$) z Newtonovim zakonom dinamike $F = m \frac{\Delta v}{\Delta t}$ izračunamo teoretično silo udarca (tabela 25).

Tabela 25: Sila kladiv

| Hidravlično kladivo F27XP | Hidravlično kladivo F45XP |
|---------------------------|---------------------------|
| $F = 122 \text{ kN/m}$ | $F = 272 \text{ kN/m}$ |

Na sliki 28 so prikazani vneseni podatki za hidravlično kladivo F45XP (amplituda sile in frekvenca).



Slika 28: Izbrana frekvenca delovanja kladiva in pripadajoč nihajni čas ter amplituda obtežbe

8.2.2 Modeliranje tal

Zemljino smo modelirali z linearno elastičnim modelom in HS-Small modelom ter njune rezultate primerjali. Linearno elastičen model temelji na Hookovem zakonu. Elastični parametri, ki jih moramo poznati so: Youngov modul E in Poissonov količnik ν . Pri HS-Small modelu definiramo obnašanje zemljine bolj natančno in podamo naslednje deformacijske parametre:

- elastični modul pri razbremenitvi/ponovni obremenitvi E_{ur}^{ref} ,
- referenčni elastični modul E_{50}^{ref} ,
- referenčni edometriški modul E_{oed}^{ref} ,
- Poissonovo količnik ν_{ur} .

in parametra strižne trdnosti: kohezijo c in strižni kot zemljine φ ter kot razmikanja zemljine ψ .

Pri določitvi materialnih parametrov smo privzeli izkustvena razmerja: $E_{ur} \approx 3 * E_{50}$ ter $E_{50} \approx E_{oed}$. V tabeli 26, ki je povzeta iz Evrokoda 8, je prikazana kategorizacija tal glede na strižno hitrost valovanja v_s . Bolj kot so tla toga, višja je strižna hitrost.

Tabela 26: Tipi tal (EC8-1; str. 30)

| Tip tal | Opis tal | v_s (m/s) |
|----------------|--|---------------------|
| A | Skala ali druga skali podobna geološka formacija, na kateri je največ 5 m slabšega površinskega materiala | > 800 |
| B | Zelo gost pesek, prod ali zelo trda glina, debela vsaj nekaj 10 m, pri katerih mehanske značilnosti z globino postopoma naraščajo | 360 – 800 |
| C | Globoki sedimenti do srednje gostega peska, prod ali toge gline globoke nekaj 10 do več 100 metrov | 180 – 360 |
| D | Sedimenti rahlih do srednje gostih nevezljivih zemljin (z nekaj mehкими vezljivimi plasti ali brez njih) ali pretežno mehkih do trdnih vezljivih zemljin | < 180 |
| E | Profil tal, kjer površinska aluvialna plast z debelino med okrog 5 in 20 metri in vrednostmi v_s , ki ustrezajo tipoma C ali D, leži na bolj togem materialu z $v_s > 800$ m/s | - |
| S ₁ | Sedimenti, ki vsebujejo najmanj 10 m debele plasti mehke gline7melja z visokim indeksom plastičnosti (PI > 40) in visoko vsebnostjo vode | < 100 (indikativno) |
| S ₂ | Tla podvržena likvifikaciji, občutljive gline ali drugi profili tal, ki niso vključeni v tipe A – E ali S ₁ | - |

V tabeli 27 so zapisane izbrane strižne hitrosti zemljin povzete iz tabele 26.

Tabela 27: Izbrane strižne hitrosti za posamezen tip tal

| Tip tal | Strižna hitrost (m/s) |
|----------------|-----------------------|
| A | 800 |
| B | 550 |
| C | 250 |
| S ₁ | 100 |

S privzetimi strižnimi hitrostmi smo s spodaj navedenimi enačbami določili iskane deformacijske parametre.

$$G_S = v_s^2 * \rho \quad (28)$$

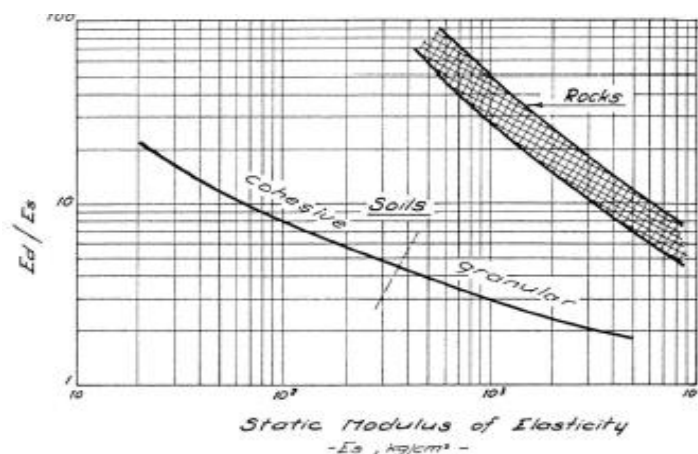
G_S je strižni modul (N/m²), v_s strižna hitrost (m/s) in ρ gostota materiala (kg/m³).

Vrednost dinamičnega modula E_d pri majhnih deformacijah izračunamo z enačbo:

$$E_d = 2G_S(1 + \nu) \quad (29)$$

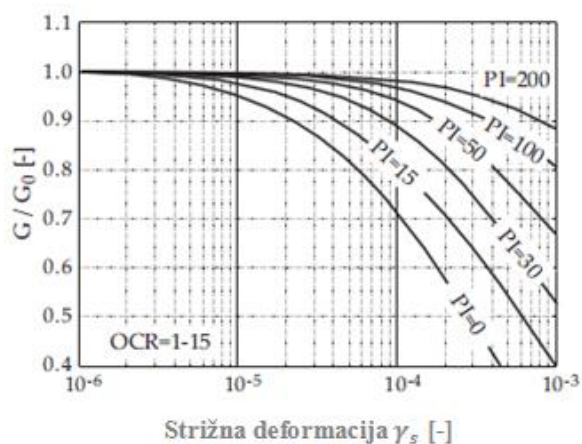
kjer je G_S strižni modul in ν Poissonov količnik. Pri HSSMALL modelu lahko vrednost razbremenilnega modula $E_{ur} = E_S$ približno določimo s spodnjim diagramom, ki prikazuje razmerje med togostjo pri

majhnih in togostjo pri velikih deformacijah določeno s konvencionalnimi laboratorijskimi testi (Alpan, 1970).



Slika 29: Povezava med togostjo pri majhnih in togostjo pri velikih deformacijah ($10 \text{ kg/cm}^2 \approx 1 \text{ MPa}$) (Alpan, 1970)

Poleg strižnega modula G_s moramo definirati še strižno deformacijo $\gamma_{0.7}$, pri kateri se vrednost G_s zmanjša na 70 % vrednosti G_0 (maksimalni strižni modul pri zelo majhnih deformacijah). Pri tem si pomagamo s spodnjim diagramom, ki prikazuje redukcijo strižnega modula pri majhnih deformacijah v odvisnosti od indeksa plastičnosti.



Slika 30: Krivulje zemljin za različne indekse plastičnosti (Vučetić in Dobry, 1991)

- Karakteristike tal za HS-Small model**

V posameznem modelu smo obravnavali zemljine tipa A, B, C in S₁ po Evrokodu 8. Materialni podatki za HS-Small so zbrani v spodnji tabeli.

Tabela 28: Parametri tal

| Tip tal | v_s (m/s) | ρ (kg/m ³) | E_d (MPa) | ν (-) | PI | E_{ur} (MPa) | E_{50} (MPa) | E_{oed} (MPa) | G_s (MPa) | $\gamma_{0.7}$ (-) | c (kN/m ²) | φ (°) | ψ (°) |
|---------|-------------|-----------------------------|-------------|-----------|----|----------------|----------------|-----------------|-------------|--------------------|--------------------------|---------------|------------|
| A | 800 | 2 500 | 4 000 | 0.3 | 0 | 400 | 130 | 130 | 1 550 | $1 \cdot 10^{-4}$ | 0 | 41 | 11 |
| B | 550 | 1 800 | 800 | 0.3 | 0 | 400 | 130 | 130 | 288 | $1 \cdot 10^{-4}$ | 5 | 36 | 6 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----|-------|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|--------------------|----|----|---|
| C | 250 | 1 700 | 277 | 0,3 | 0 | 90 | 30 | 30 | 107 | 1*10 ⁻⁴ | 5 | 35 | 5 |
| S ₁ | 100 | 1 700 | 44 | 0,3 | 50 | 4 | 1,3 | 1,3 | 17 | 8*10 ⁻⁴ | 25 | 5 | 0 |

- **Karakteristike tal za linearno elastičen model**

Tabela 29: Karakteristike tal za linearno elastičen model

| Tip tal | <i>E</i> (MPa) | <i>ν</i> (-) |
|----------------|-------------------|-----------------|
| A | 4 000 | 0,3 |
| B | 800 | 0,3 |
| C | 277 | 0,3 |
| S ₁ | 44 | 0,3 |

8.2.3 Rezultati

8.2.3.1 Primerjava rezultatov za linearno elastičen model brez dušenja in HS-Small model

V spodnjih tabelah so prikazane absolutne maksimalne hitrosti v obravnavanih točkah za izbrani kladivi za linearno elastičen model brez dušenja in HS-Small model.

Tabela 30: Maksimalne hitrosti (mm/s) za linearno elastičen model brez dušenja in HS-Small model za kladivo F27XP na izbranih oddaljenostih

| tip tal | A (2 m) | | B (4 m) | | C (8 m) | | D (16 m) | | E (24 m) | |
|----------------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | LE | HS-Small | LE | HS-Small | LE | HS-Small | LE | HS-Small | LE | HS-Small |
| A | 9,91 | 31,48 | 5,98 | 14,04 | 4,20 | 7,68 | 2,77 | 3,82 | 1,90 | 2,27 |
| B | 56,64 | 68,01 | 30,89 | 20,75 | 22,58 | 11,60 | 15,04 | 4,08 | 10,52 | 2,61 |
| C | 144,35 | 85,94 | 86,60 | 22,91 | 58,17 | 7,90 | 48,45 | 4,48 | 28,73 | 2,86 |
| S ₁ | 419,58 | 125,89 | 166,09 | 30,81 | 35,02 | 14,34 | 2,78 | 5,71 | 0,16 | 3,35 |

Tabela 31: Maksimalne hitrosti (mm/s) za linearno elastičen model brez dušenja in HS-Small model za kladivo F70XP na izbranih oddaljenostih

| tip tal | A (2 m) | | B (4 m) | | C (8 m) | | D (16 m) | | E (24 m) | |
|----------------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | LE | HS-Small | LE | HS-Small | LE | HS-Small | LE | HS-Small | LE | HS-Small |
| A | 22,09 | 98,11 | 13,33 | 24,82 | 9,37 | 13,67 | 6,17 | 7,43 | 4,24 | 4,16 |
| B | 126,28 | 140,56 | 68,86 | 36,55 | 22,58 | 15,60 | 33,54 | 6,05 | 23,46 | 4,11 |
| C | 321,82 | 189,81 | 193,08 | 35,21 | 129,69 | 15,14 | 108,03 | 6,38 | 64,05 | 4,14 |
| S ₁ | 935,45 | 170,86 | 370,30 | 44,36 | 78,08 | 17,78 | 6,20 | 8,50 | 0,35 | 4,60 |

Iz dobljenih rezultatov vidimo, da so po pričakovanju maksimalne hitrosti pri močnejšem kladivu približno 2x večje, saj je tudi sila, s katero deluje drugo kladivo, približno 2x večja. Manj ko so tla toga, večje so maksimalne absolutne hitrosti. To lahko vidimo pri obeh modelih. Torej, ko se pri linearno elastičnem modelu zmanjšuje elastični modul (s tem tudi togost), hitrosti rastejo. Pri HS-Small modelu s slabšanjem kvalitete tal hitrosti prav tako rastejo. Očitno je, da primerjava teh dveh modelov ni najbolj ustrezna, saj med rezultati pride do velikega odstopanja. Pri linearno elastičnem modelu opazimo, da v

bližjih točkah hitrosti dosežejo vrednosti večje tudi od 200 mm/s, kar pa pri HS-Small modelu ni opaziti. Ker pri linearno elastičnem modelu materialno dušenje ni upoštevano, tako kot je to kot pri HS-Small modelu, smo dušenje defnirali z Rayleighovim dušenjem, ki ga program Plaxis omogoča.

8.2.3.2 Primerjava rezultatov linearno elastičnega modela z Rayleighovim dušenjem in HS-Small modelom

V tem poglavju smo prikazali rezultate omenjenih materilanih modelov. V linearno elastičnem modelu smo upoštevali Rayleighovo dušenje, ki je predstavljeno v nadaljevanju.

- **Rayleighovo dušenje**

Rayleighovo dušenje pri dinamični obtežbi izrazimo z enačbo, ki je linearna kombinacija masne in togostne matrike:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (30)$$

kjer sta α in β Rayleigova koeficienta dušenja. Določimo jih lahko, če poznamo vsaj dva koeficienta kritičnega dušenja ξ_i , ki pripadata vsaj dvema lastnima frekvencama ω_i . Korelacija med zgoraj naštetimi parametri je prikazana v spodnji enačbi:

$$\alpha + \beta\omega_i^2 = 2\omega_i\xi_i \quad (31)$$

Če poznamo dva koeficienta kritičnega dušenja pri neki frekvenci, lahko z dvema enačbama določimo neznanki (α in β). Znotraj intervala izbranih frekvenc je dušenje manjše od kritičnega, medtem ko je zunaj intervala to dušenje večje. Izračun koeficientov dušenja za izbrane podatke opravi program.

Lastno frekvenco posameznih tal smo določili tako, da smo na sloj zemljine obremenili s statično silo. Po deaktivaciji statične obtežbe, smo na mestu sile v času 0,5 s opazovali odziv in določili nihajni čas. Recipročno vrednostjo dobljenega nihajnega časa nam da frekvenco f_1 . Za frekvenco f_2 smo privzeli, da je $f_2 \cong 2f_1$. Ko dobljene podatke vstavimo v program, nam ta izračuna lastni frekvenci nihanja $\omega = 2\pi f$ ter iskana koeficienta.

Pri odzivu na statični obtežbi enega in drugega kladiva, so bile razlike v nihajnem času zanemarljive, zato smo privzeli enake frekvence. V spodnji tabeli so prikazani podatki, ki so potrebni za definiranje Rayleighovega viskozne dušenja. Glede na to, da smo v tleh S₁ dobili največje absolutne hitrosti, smo tu privzeli izkustveno tudi največje kritično dušenje.

Tabela 32: Izbrana kritična dušenja in izračunane frekvence za posamezne tipe tal-elastičen model

| | Primer 1 | | | Primer 2 | | |
|---------|------------------------|---------------|---------------|------------------------|---------------|---------------|
| Tip tal | $\xi_1 = \xi_2$ (%) | f_1 (Hz) | f_2 (Hz) | $\xi_1 = \xi_2$ (%) | f_1 (Hz) | f_2 (Hz) |

| | | | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|----|-----|-----|
| A | 2.5 | 170 | 340 | 5 | 170 | 340 |
| B | 5 | 200 | 400 | 10 | 200 | 400 |
| C | 7.5 | 200 | 400 | 15 | 200 | 400 |
| S _I | 15 | 100 | 200 | 20 | 100 | 200 |

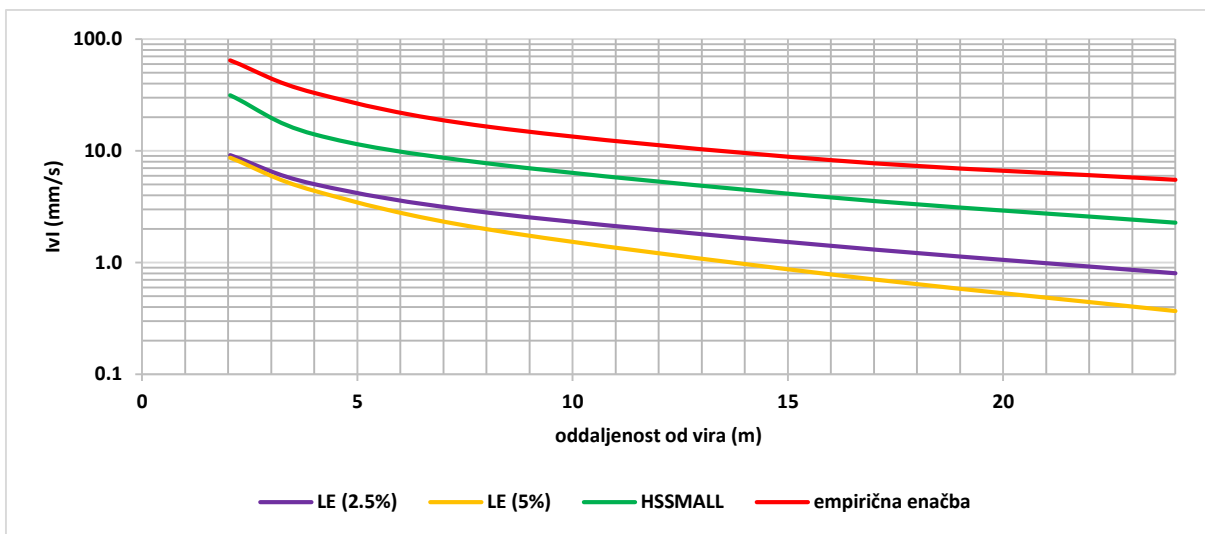
- **Primerjava rezultatov**

Dobljene rezultate, ki smo jih dobili z analizo s programom Plaxis 2D smo primerjali z vrednostmi PPV po empirični enačbi 17, v kateri je zajet podatek energije kladiva in v parametru n vrednost, ki je odvisna od tipa tal in določa zmanjšanje jakosti valovanja skozi temeljna tla. Zbrani podatki za posamezen tip tal so predstavljeni v tabelah 33 in 34.

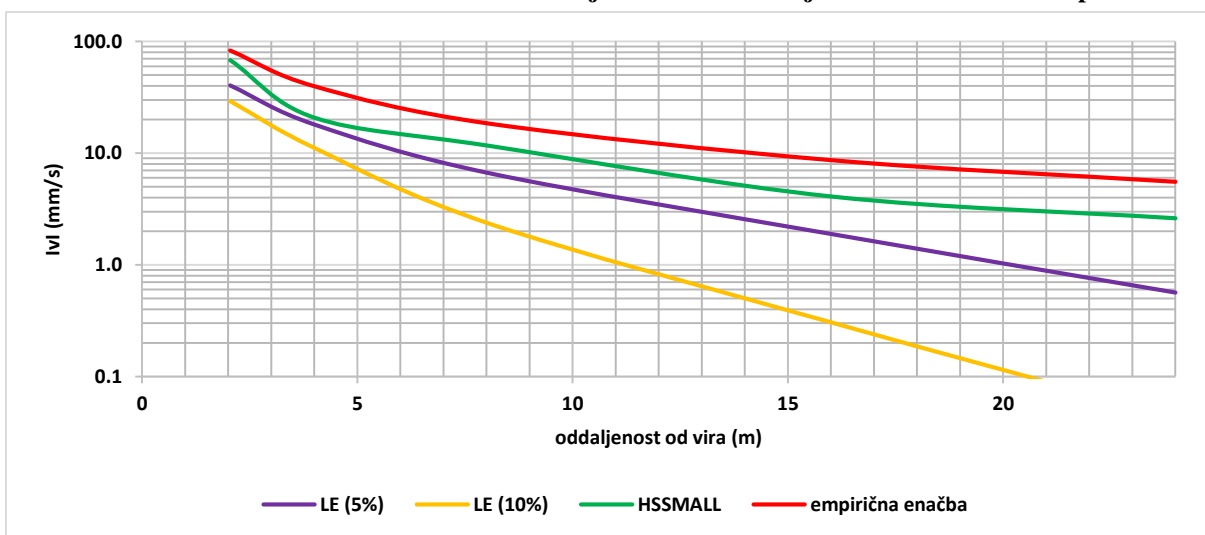
Tabela 33: Primerjava PPV (mm/s) za linearno elastičen model z upoštevanjem dušenja in empiričnih vrednosti PPV za kladivo F27XP na izbranih oddaljenostih

| tip tal | A (2 m) | B (4 m) | C (8 m) | D (16 m) | E (24 m) |
|--------------------------|---------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| A (2.5%) | 9,20 | 5,05 | 2,80 | 1,41 | 0,81 |
| A (5%) | 8,72 | 4,40 | 1,98 | 0,78 | 0,37 |
| empirična rešitev | 64.59 | 33.02 | 16.39 | 8.25 | 5.52 |
| B (5%) | 40,36 | 18,01 | 6,60 | 1,88 | 0,57 |
| B (10%) | 29,31 | 11,14 | 2,33 | 0,30 | 0,04 |
| empirična rešitev | 82.94 | 39.65 | 18.35 | 8.63 | 5.54 |
| C (7.5%) | 79,10 | 25,68 | 5,52 | 0,47 | 0,05 |
| C (15%) | 46,37 | 9,90 | 0,71 | 0,04 | 0,00 |
| empirična rešitev | 136.77 | 57.17 | 23.00 | 9.43 | 5.58 |
| S (15%) | 149,30 | 22,47 | 0,99 | 0,03 | 0,00 |
| S (20%) | 92,74 | 9,03 | 0,44 | 0,01 | 0,00 |
| empirična rešitev | 175.64 | 68.66 | 25.75 | 9.86 | 5.61 |

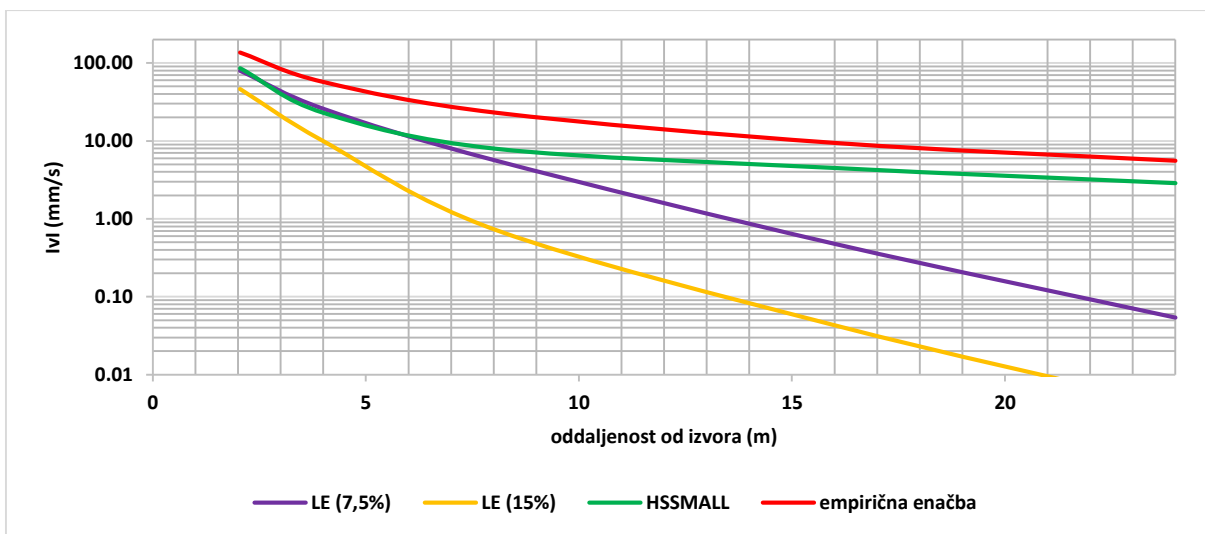
Na slikah so grafično prikazani rezultati linearno elastičnega modela z dušenjem, rezultati empirične enačbe ter rezultati HS-Small modela, ki so tabelarično navedeni v tabeli 30.



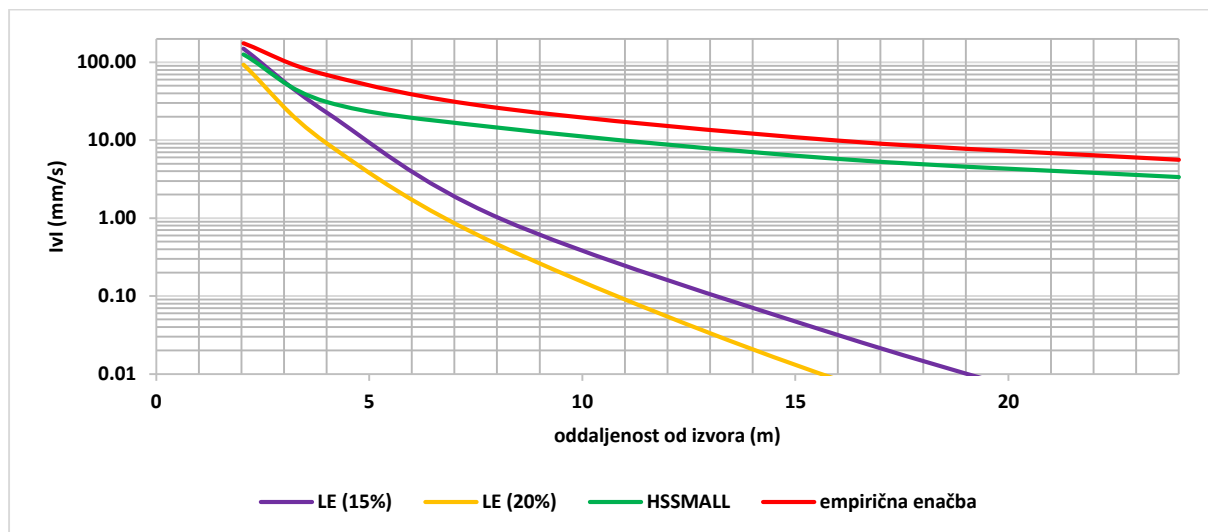
Slika 31: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F27XP za tip tal A



Slika 32: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F27XP za tip tal B



Slika 33: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F27XP za tip tal C



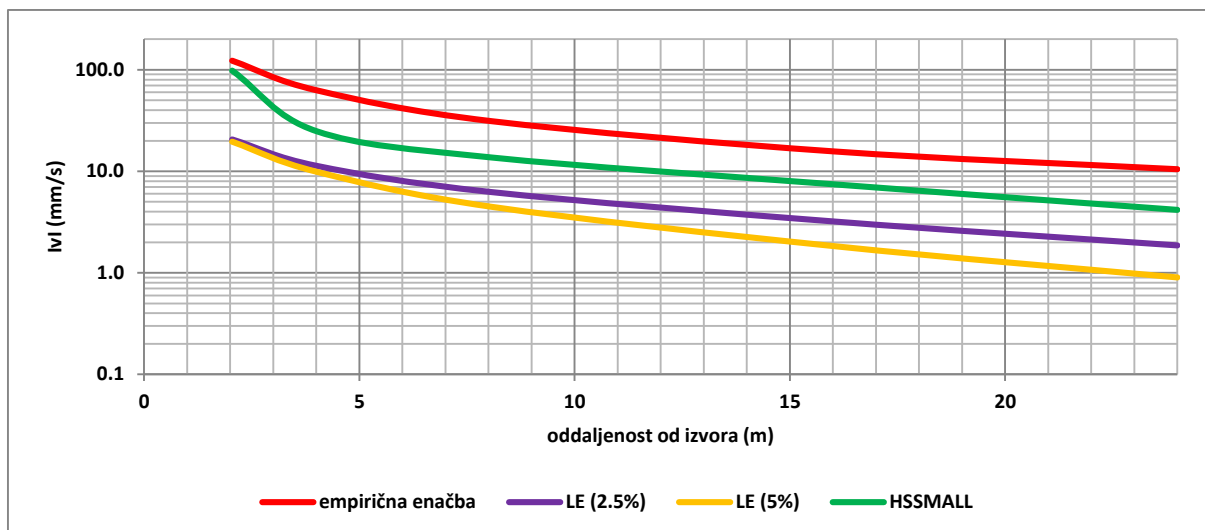
Slika 34: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F27XP za tip tal S1

Če primerjamo rezultate linearno elastičnega modela (LE) brez upoštevanega dušenja in z dušenjem, vidimo, da so se izračunane vršne hitrosti občutno zmanjšale. Opazimo, da je bila manjša izbrana vrednost dušenja povsem dovolj, da smo se nekoliko približali rezultatom HS-Small modela, pri katerem je materialno dušenje upoštevano že v samem modelu. Rezultati empirične enačbe so konzervativni, tako da nam lahko služijo za varno oceno vpliva vibracij hidravličnih kladiv na okolico. Podobno kot pri prejšnjem primeru, je tudi tu možno opaziti, da so vrednosti PPV, ki jih dobimo po empirični enačbi za manjše razdalje zelo visoke, kar je posledica tega, da v praksi vibracije v točkah zelo blizu vira običajno niso merjene, ker se izkustveno pričakuje, da bo vpliv vibracij prevelik.

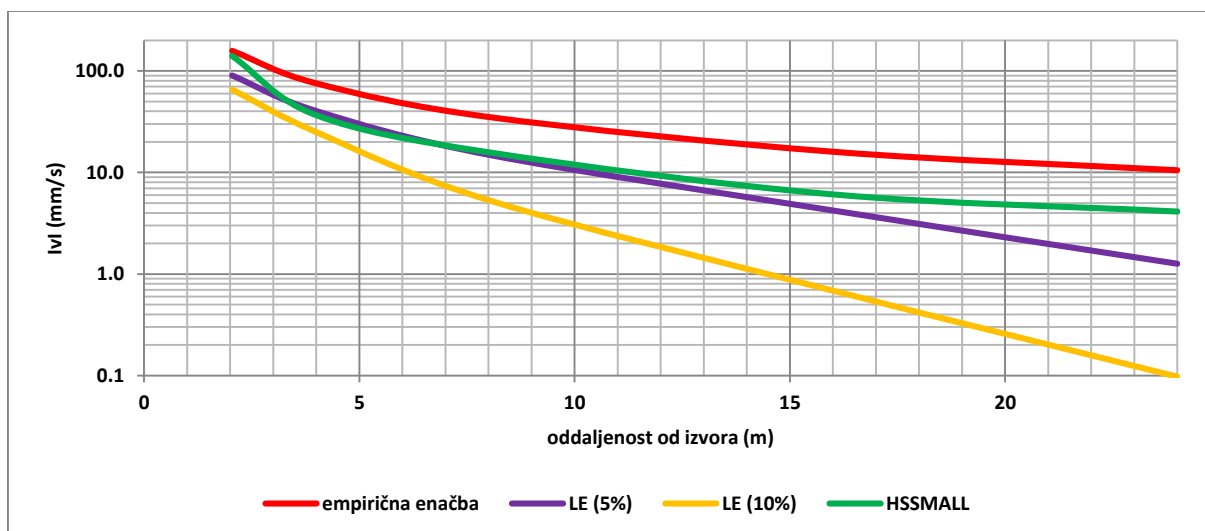
Tabela 34: Primerjava PPV (mm/s) za linearno elastičen model z upoštevanjem dušenja in empiričnih vrednosti PPV za kladivo F70XP na izbranih oddaljenostih

| tip tal | A (2 m) | B (4 m) | C (8 m) | D (16 m) | E (24 m) |
|-------------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| A (2.5%) | 20,60 | 11,33 | 6,25 | 3,21 | 1,87 |
| A (5%) | 19,60 | 9,92 | 4,48 | 1,83 | 0,90 |
| empirična rešitev | 122.91 | 62.83 | 31.18 | 15.71 | 10.50 |
| B (5%) | 89,98 | 40,15 | 14,71 | 4,19 | 1,26 |
| B (10%) | 65,34 | 24,84 | 5,20 | 0,68 | 0,10 |
| empirična rešitev | 157.83 | 75.45 | 34.91 | 157.83 | 10.54 |
| C(7.5%) | 176,36 | 57,25 | 12,31 | 1,05 | 0,12 |
| C (15%) | 103,38 | 22,07 | 1,59 | 0,10 | 0,01 |
| empirična rešitev | 260.28 | 108.80 | 43.76 | 17.95 | 10.63 |
| S (15%) | 332,87 | 50,09 | 2,20 | 0,07 | 0,00 |
| S (20%) | 206,77 | 20,13 | 0,98 | 0,02 | 0,00 |
| empirična rešitev | 334.24 | 130.65 | 48.99 | 18.76 | 10.67 |

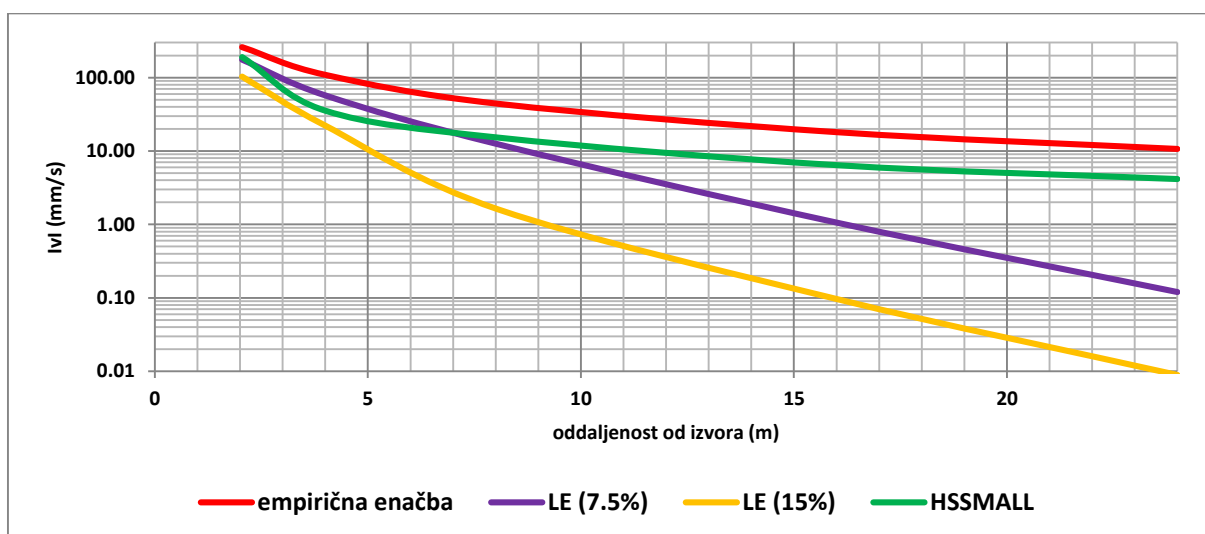
Na slikah so grafično prikazani rezultati linearno elastičnega modela z dušenjem, rezultati empirične enačbe ter rezultati HS-Small modela, ki so tabelarično navedeni v tabeli 31.



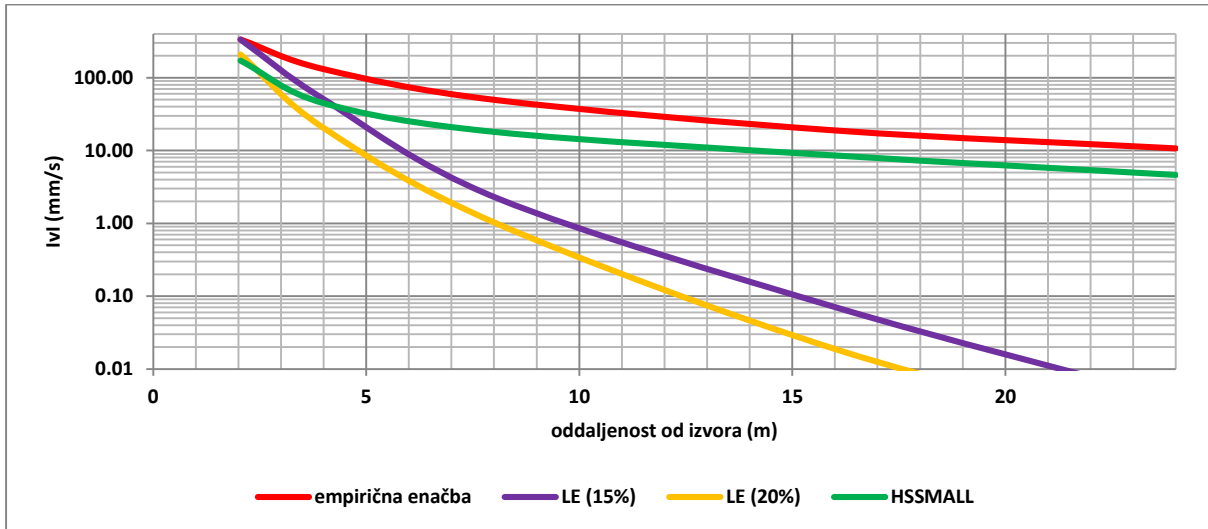
Slika 35: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F70XP za tip tal A



Slika 36: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F70XP za tip tal B



Slika 37: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F70XP za tip tal C



Slika 38: Vrednosti PPV v odvisnosti od oddaljenosti vira vibracij za kladivo F70XP za tip tal S1

Zaključek pri močnejšem kladivu F70XP je podoben kot pri F27XP. Z empirično enačbo so vrednosti PPV vedno na varni strani. Predvsem v slabih tleh ima dušenje zelo velik vpliv na rezultate. Opazimo lahko, da s tem, ko v LE model vpeljemo dušenje, se v točkah D (16 m) in E (24 m) absolutna hitrost v večini tal spusti pod kriterij največje dovoljene hitrosti za stavbe občutljive na vibracije. V tabeli (16) lahko odčitamo, da je v_{max} za objekte razreda IV $v_{max} = 2$ mm/s. Ker gre za relativno majhno vrednost, je potrebno biti previden pri upoštevanju dušenja, da na osnovi dobljenih rezultatov ne presodimo, da je izvajanje del na tej razdalji možno. V teh primerih je empirična rešitev bolj konzervativna.

9 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo obravnavali vpliv vibracij na obstoječe objekte. Izvor vibracij so lahko naravni pojavi ali pa jih povzroča človek. Med slednjega vključujemo promet, gradbeno mehanizacijo in delovanje ostalih naprav. Da bi se v največji možni meri izognili poškodbam na objektih zaradi vibracij, je smiselno preveriti okvirne vrednosti PPV. V začetnih poglavjih smo tako podali teoretične osnove izračuna PPV za zabijala pilotov, hidravlična kladiva ter ostalo gradbeno mehanizacijo. V večini primerov smo pri uporabi te enačbe na varni strani, saj so rezultati zelo konzervativni.

V nadaljevanju smo si pogledali kriterije vibracij za različne tipe stavb glede na delujočo obtežbo, ki je lahko stalna ali občasna. V majhni meri smo se dotaknili vpliva vibracij na počutje človeka. Iz tabele 4 vidimo, da je vrednost $PPV = 5 \text{ mm/s}$ meja, kjer vibracije postanejo moteče za človeka in lahko že povzročijo nekonstruktivno škodo pri objektih. Pri pregledu vpliva mejnih vrednosti PPV na konstrukcije opazimo, da so kriteriji pri dlje trajajočih vibracijah strožji. To je naprimer razvidno iz tabele 6, ki je povzeta po švicarskem standardu (SN 640 312a:1992), kjer vidimo, da je pri ponavljajočih vibracija zgornja meja $PPV = 12,7 \text{ mm/s}$, medtem ko je pri občasnih vibracijah (eksplozija) skoraj trikrat večja.

V Sloveniji ne obstajajo standardi na tem področju, zato smo predstavili pogosto rabljene evropske standarde, kot so: britanski (BS 7385 Vrednotenje in merjenje vibracij v zgradbah), avstrijski (ÖNORM S 9020), nemški (DIN 4150-3) in švicarski standard (SN 640 312a:1992). Pri slednjem smo navedli samo standardizirane meje PPV. Pri britanskem standardu smo poleg dovoljenih vršnih hitrosti delca bolj podrobno zapisali tudi način merjenja vibracij in vrste merilnikov vibracij.

V zadnjem delu naloge smo izvedli dinamično analizo vibracij tal s programskim orodjem Plaxis, in sicer za primer zabijanja pilota v sloj gline in peska ter za primer uporabe hidravličnega kladiva na sloju gline. Pri prvem primeru smo želeli preveriti, kako se rezultati spreminjajo z deformabilnostjo tal, medtem ko smo pri drugem primeru analizirali vpliv izbire materialnega modela zemljin. Upoštevali smo linearno elastični model in HS-Small model, ki upošteva togost tal pri majhnih deformacijah.

Pri prvem primeru, je bil sloj gline modeliran s Mohr-Coulombovim konstitutivnim modelom, ki predstavlja približno aproksimacijo obnašanja zemljin in kamnin in privzema povprečno vrednost deformacijskega modula. Sloj peska smo modelirali s HS-Small modelom. Ker so nas zanimale vrednosti na površju in ker se pilot nahaja v zgornjem sloju, smo spreminjali togosti sloja gline in prišli do zaključka, da ima povečanje togosti tal za posledico zmanjšanje vršnih hitrosti na površju tal. Pri boljši kvaliteti tal, lahko torej pričakujemo manjši vpliv vibracij na obstoječe objekte. Potem smo vrednosti, ki smo jih izračunali z dinamično analizo po metodi končnih elementov, primerjali še z vrednostmi po empirični enačbi. Ugotovili smo, da se z oddaljenostjo od izvora vibracij, rezultati empirične enačbe približujejo vrednostim izračunanim s programom Plaxis.

Pri drugem primeru smo sloj gline obremenili z dinamično obtežbo zaradi delovanja hidravličnega kladiva in preverili vpliv izbire materialnega modela na rezultate. Z linearno elastičnim modelom za

temeljna tla smo dobili višje vrednosti vršnih hitrosti kot s HS-Small modelom. HS-Small model upošteva materialno dušenje, kar je poglavitni vzrok, da je prišlo do razlik v primerjavi z elastičnim modelom tal. Razlike so bile večje pri slabši kvaliteti tal (manjša togost tal). Zato smo pri linearno elastičnem modelu upoštevali še Rayleighovo dušenje in ga proporcionalno povečevali s slabšanjem kvalitete tal. Izračuni z upoštevanim Rayleighovim dušenjem izkažejo nekoliko boljše rezultate v točkah v neposredni bližini vira vibracij. Na večjih oddaljenostih od vira vibracij so vrednosti vršnih hitrosti površja podcenjene, saj z oddaljenostjo (pre)hitro upadejo na zanemarljive vrednosti. Na osnovi izvršenih analiz po metodi končnih elementov in glede na izračune po empiričnih enačbah lahko zaključimo, da je pri izračunu vpliva vibracij izbira materialnega modela HS-Small v splošnem bolj ustrezna kot izbira elastičnih ali idealno elastoplastičnih modelov.

VIRI:

Achmus, M., 2008. Building vibrations due to ground works, Institut für Geotechnik, Hannover: 61 str.

Alpan, I. 1970. The geotechnical properties of soils. Earth-Science Reviews 6: p. 5-49.

Amick, H. 2000. Construction vibrations and their impact on vibration-sensitive facilities. San Mateo, California: Colin Gordin & Associates.

Andrews, J., Buelher, D., Gill, H., Bender, W. 2013. Transportation and Construction Vibration Guidance Manual. Sacramento: 190 str.

Barkan, D.D. 1962. Dynamics of bases and foundations. New York, McGraw-Hill Co.

Beg, D. (ur.), Pogačnik, A. (ur.) 2009. Priročnik za projektiranje konstrukcij po Evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 1077 str.

Benz, T. 2007. Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences. Ph.D. Thesis. Stuttgart, Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart: 11 p.

http://www.uni-stuttgart.de/igs/content/publications/IGS_Dissertationen/Diss_Benz.pdf (Pridobljeno 5. 7.2016.)

BS 7385-1:1990. Evaluation and Measurement for vibration in buildings. Part 1: Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings.

BS 7385-2:1993. Evaluation and Measurement for vibration in buildings. Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration.

Buldožer.

<http://rhinoeq.com/bulldozer.html> (Pridobljeno 28. 6. 2016.)

Chae, Y.S. 1978. Design of excavation blasts to prevent damage. Civil Engineering-American. Society of Civil Engineers 48:77–79.

Davis, D. 2010. A Review of Prediction Methods for Ground-Borne Noise due to Construction Activities. International Congress on Acoustics, Sydney, August, 2010, 23-24: str. 4-6.

Dawn, T.M. 1983. Ground Vibration from Heavy Freight Trains. Journal of Sound and Vibration. Vol. 87, No. 2: 156-172.

DIN 4150-3:1999. Structural vibration – Effects of Vibration on structures.

Dowding, C.H. 1985. Blast vibration monitoring and control. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall.

Frekvenca.

<https://sl.wikipedia.org/wiki/Frekvenca> (Pridobljeno 16. 6.2016.)

Furukawa.

<http://www.marubeni-komatsu.co.uk/images/file/product/brochure/frd-hydraulic-breakers-brochure-1381248630.pdf> (Pridobljeno 22. 7. 2016.)

Hall, L. 2003. Simulations and Analyses of Train-Induced Ground Vibration. Doctoral Thesis.

Hanson, C., Towers, D., Meister, L. 2006. Transit Noise and Vibration Impact Assessment. Burlingon: 100-170.

Hendriks, R. 2002. Transportation related earthborne vibrations (Caltrans experience). California Department of Transportation. Sacramento, California: 14-17.

ISO 5348:1998. Mechanical vibration and shock - Mechanical mounting of accelerometers.

Kladnik, R., 1994. Energija, topolota, zvok, svetloba. Fizika za srednješolce 2. Ljubljana, DZS: 32-46.

Konan, W. 1985. Vibration criteria for historic buildings. Journal of Construction Engineering and Management 111:208–215.

Madshus, C., Bessason, B., Hårvik, L. 1996. Prediction Model For Low Frequency Vibration From High Speed Railways On Soft Ground. Journal of Sound and Vibration. Vol. 193, No. 1.

Morris, R.S. 1991. Surface vibration measurements for vibratory pile drivers. Tests conducted by International Construction Equipment.

ONORM S 9020:1986. Building vibrations – Blasting vibrations and Comparable Emissions of Impulse Shape.

Piezoelektrični pospeškometer.

<http://www.directindustry.com/prod/meggitt-sa/product-12023-1473021.html> (Pridobljeno 1. 8. 2016.)

Plaxis 2012. Plaxis material models 2012.

http://www.plaxis.nl/files/files/2D-3-Material-Models_02.pdf (Pridobljeno 25. 6. 2016.)

PLAXIS. 2D AE. 2014. Plaxis bv.

Pospeškometer.

https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectric_accelerometer (Pridobljeno 28. 7. 2016.)

Richart, F.E., Hall, J.R., Woods, R.D. 1970. Vibrations of soil and foundations. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall: str. 155-177.

Ross, M., 2015. Vibration assessment-rock breaking. Parnell. Auckland: p.8.

Sestavni deli pospeškamera.

http://www.pcb.com/techsupport/tech_accel (Pridobljeno 28. 7. 2016.)

Sharif, M., Jaworski, C. 2007. Non-Destructive Testing of Historic Structures of Establish Vibration Criteria. Blasting Technology Conference, Key Largo, Florida, January, 15-17, 2007: p. 7.

SN 640 312a:1992. Beurteilung von Erschütterungen - Studer Engineering.

Suhairy, S. 2000. Prediction of Ground Vibration from Railways. Swedish National Testing and research Institute, Boras: 103 str.

Udarno kladivo.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Jackhammer> (Pridobljeno 28. 6. 2016.)

Vibracije.

<https://sl.wikipedia.org/wiki/Vibracija> (Pridobljeno 15. 6.2016.)

Vibracije in materiali.

<http://www.gradimo.hr/clanak/mjere-za-smanjenje-buke-i-vibracija-od-zeljeznickog-prometa/33829>
(Pridobljeno 15. 5. 2016.)

Vibracijski valjar.

http://blogsdir.cms.rrcdn.com/91/files/2013/02/BOMAG_BW211D-50_1.jpg (Pridobljeno 28. 6. 2016.)

Vučetić, M., Dobry, R. 1988. Degradation of marine clays under cyclic loading. Journal of Geotechnical Engineering 114, 2: 133-149.

Žandar, S. 2004. Seminarska naloga pri predmetu fizika. Merjenje, vrednotenje in zmanjšanje vibracij.

Whiffen, A.C. 1971. A survey of traffic-induced vibrations. Crowthorne, Berkshire, England: United Kingdom Department of Environment. Transport and Road Research Laboratory: p. 51.

Wiss, J. F. 1967. Damage effects of pile driving vibration. Structural Construction: Five Reports. Highway Research Record. Washington: p. 14-20.

Woods, R.D. 1997. Dynamic effects of pile installations on adjacent structures. Washington, DC: National Academy Press.

Woods, R.S., Jedele, L.P. 1985. Energy attenuation relationships from construction vibrations. G. Gazetas and E. T. Selig: p. 187.

Wood, W.C., Theissen, J.R. 1982. Variations in adjacent structures due to pile driving. Geopile Conference, 1982, May, 19: p. 83