

AALTO YLIOPISTO  
TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
INSINÖÖRITIEDEIDEN JA ARKKITEHTUURIN TIEDEKUNTA  
Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos  
Pohjarakennus ja maamekaniikka

Turo Auvinen

**Junaliikenteen aiheuttama tärinä ja sen vähentämisen vaikutus  
asuinviihtyvyyteen**

Pohjarakennuksen ja maamekaniikan syventymiskohteen diplomityö,  
joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 12.02.2010

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Kirsi Koivisto, Ramboll Finland Oy  
Valvoja: Professori Pauli Vepsäläinen, Teknillinen korkeakoulu

<b>Tekijä:</b>	Turo Auvinen		
<b>Diplomityö:</b>	Junaliikenteen aiheuttama tärinä ja sen vähentämisen vaikutus asuinviihtyvyyteen		
<b>Päivämäärä:</b>	12.02.2010	<b>Sivumäärä:</b>	73+38
<b>Professori:</b>	Pohjarakennus ja maamekaniikka	<b>Koodi:</b>	<b>Rak-50</b>
<b>Valvoja:</b>	Professori Pauli Vepsäläinen		
<b>Ohjaaja:</b>	DI Kirsi Koivisto		
<b>Avainsanat:</b>	Tärinä, asuinviihtyvyys, vaimentaminen, syvästabilointi, ihmisen reaktio, tärinämittaus, koerakenne, junaliikenne		
<p>Tässä diplomityössä syvennytään tutkimaan junaliikenteen aiheuttaman tärinän vaikutusta asuinviihtyvyyteen. Tutkimus toteutettiin kirjallisuustutkimuksena ja mittaus- sekä asukaskyselytutkimuksena. Rahoituksen työlle antoi Ratahallintokeskus. Työn tavoitteena oli selvittää asuinviihtyvyyden paranemista tärinävaimennuksen avulla sekä sen korrelaatiota tärinän vähentymisen määrään.</p> <p>Tutkimusalueena toimi Raunistulan asuinalue Turussa, jossa Toijala-Turku -radan junaliikenne aiheuttaa häiriöitä alueen asukkaille. Pohjamaa koostuu paksusta savikerroksesta, ja maanvaraiset asuinrakennukset sijaitsevat aivan junaradan tuntumassa. Tärinää vaimennettiin kahdella rinnakkaisella rakenteella, ponttiseinällä ja stabilointipilarikennolla.</p> <p>Tärinän lähtötilannetta ja asukkaiden viihtyvyyttä mitattiin ennen rakentamista suoritetuilla tutkimuksilla, ja tuloksia verrattiin vaimennusseinämien valmistumisen jälkeen saatuihin tuloksiin.</p> <p>Vaimennus onnistui ja suurin vaikutus koettiin lähimpänä rataa. Kauempana radasta ei havaittu parannusta, osin muun liikenteen häiritsevistä vaikutuksesta johtuen. Asuinviihtyvyyden koettiin parantuneen, mutta vaikutusta ei havaittu koko tutkimusalueella.</p>			

<b>Author:</b>	Turo Auvinen		
<b>Thesis:</b>	Vibrations Caused by Train Traffic and the Effect of its Mitigation on the Quality of Living		
<b>Date:</b>	12.02.2010	<b>Number of pages:</b>	73+38
<b>Professorship:</b>	Soil Mechanics and Foundation Engineering	<b>Code:</b>	<b>Rak-50</b>
<b>Supervisor:</b>	Pauli Vepsäläinen, Professor		
<b>Instructor:</b>	Kirsi Koivisto, M. Sc. (Tech.)		
<b>Key Words:</b>	vibration, quality of living, damping, deep stabilization, human reaction, vibration measurement, test structure, railway traffic		
<p>Railway traffic induced vibrations in dwellings often cause irritation or disturb the inhabitants. In this thesis, the effect of vibration countermeasures on the quality of living has been studied. The study was done by means of a literature study, vibration measurements and written surveys with the financial aid of the Finnish Rail Administration. The objective of the study was to evaluate the effects of vibration mitigation compared to the increase of inhabitant satisfaction, would the halving of vibration levels lead to a doubling of satisfaction?</p> <p>The testing was carried out in Raunistula, a suburb of Turku. Passing along the side of the residential area, the Toijala-Turku railway line causes vibrations in the surrounding areas affecting the quality of residents' life. To attenuate the vibration, two different structures were constructed, a sheet-pile wall and a matrix of lime-cement columns.</p> <p>The current status of vibrations and residents' satisfaction was evaluated prior to construction. After the installation of the fore mentioned walls, a new round of measurements was performed in order to find out how the mitigation succeeded.</p> <p>Results were found satisfactory, the greatest amount of mitigation was achieved nearest to the track and comments of a rise in the quality of living were achieved. The mitigation however was limited to a certain distance from the track. Farther away, partly due to other sources of vibrations, the mitigating effect of the structures was negligible.</p>			

## ALKUSANAT

Tässä diplomityössä tutkittiin rautatieliikenteen aiheuttaman tärinän vaikutusta ihmisiin ja asuinviihtyvyyteen, sekä sen vaimentamista. Tutkimus tehtiin sekä kirjallisuustutkimuksena, kyselytutkimuksin että tärinämittauksina. Tutkimuksen tavoitteena on tutkia koerakenteiden avulla saavutettua vaimennusta sekä asuinviihtyvyyden parannusta. Työ on tehty Teknillisen korkeakoulun Rakennus- ja ympäristötekniikan koulutusohjelmalle, Pohjarakennuksen ja maamekaniikan oppituolille. Työn valvojana toimi professori Pauli Vepsäläinen ja ohjaajana DI Kirsi Koivisto Ramboll Finland Oy:stä. Työ on osa Ratahallintokeskuksen tutkimusta ja kehitystä raideliikenteen ympäristövaikutusten vähentämiseksi. Työssä mukana on ollut projektin työryhmä, jonka jäseninä toimivat:

DI	Tuomo Viitala	Ratahallintokeskus
FM	Arto Hovi	Ratahallintokeskus
TkL	Erkki Mäkelä	Ratahallintokeskus
FM	Erkki Poikolainen	Ratahallintokeskus
DI	Juha Tuovinen	Kalliotekniikka Oy
RI	Jani Sinkkonen	Pöyry CM
RI	Kari Vehmas	Kon-INS Oy
TkT	Mauri Koskinen	Oy VR-Rata Ab
DI	Kirsi Koivisto	Ramboll Finland Oy
tekn.yo	Turo Auvinen	Ramboll Finland Oy

Kiitän Ratahallintokeskusta, joka rahoituksellaan mahdollisti tämän diplomityön. Suuri kiitos kuuluu myös työni ohjaajalle DI Kirsi Koivistolle hyvistä neuvoista sekä työni valvojalle professori Pauli Vepsäläiselle. Lopuksi haluan vielä kiittää Outia, perhettäni, ystäviäni ja kaikkia muita, jotka ovat edistäneet työn valmistumista.

Espoossa 12.02.2010

Turo Auvinen

# SISÄLLYSLUETTELO

Alkusanat .....	4
Sisällysluettelo .....	5
Merkinnät .....	7
1 Johdanto .....	8
1.1 Taustaa .....	8
1.2 Työn tavoite .....	9
1.3 Työmenetelmät .....	9
2 Teoria .....	10
2.1 Värähtelyn perusteet .....	10
2.2 Tärinä maaperässä .....	11
2.3 Tärinän eteneminen .....	12
2.4 Tärinän muutos .....	17
2.4.1 Tärinän vaimeneminen .....	17
2.4.2 Tärinän voimistuminen .....	18
2.4.3 Tärinän siirtyminen rakennuksiin .....	18
3 Tärinän vaikutus ihmiseen .....	20
3.1 Ihminen .....	20
3.2 Tärinän luonteen vaikutus .....	22
3.3 Haitat .....	25
3.3.1 Ihmisen kokemat haitat .....	25
3.3.2 Rakennusten vaurioitumisriski .....	26
3.3.3 Melu .....	27
3.3.4 Tärinän ja melun yhteisvaikutus .....	29
3.4 Asumisviihtyvyys .....	31
4 Tärinärajat eri standardeissa .....	32
4.1 Yleistä .....	32
4.2 ISO 2631 – standardi .....	33
4.3 DIN 4150-2 – standardi .....	34
4.4 BS 6472 – standardi .....	35
4.5 SS 460 48 61 -standardi .....	36
5 Tutkimusalue .....	38
5.1 Yleistä .....	38
5.2 Pohjasuhteet .....	38
5.3 Asutus .....	39
5.4 Junaliikenne .....	39
5.5 Junarata .....	39
5.6 Kyselytutkimus .....	40
5.6.1 Yleistä .....	40
5.6.2 Asukaskysely 1 .....	40
5.6.3 Asukaskysely 2 .....	41
6 Tärinävaimennusrakenteet .....	42
6.1 Yleistä .....	42
6.2 Menetelmät .....	43
6.2.1 Avoin ja täytetty kaivanto .....	43
6.2.2 Ponttiseinä .....	43
6.2.3 Stabiloitu seinämä .....	43

6.3 Rakentaminen .....	44
6.3.1 Yleistä .....	44
6.3.2 Ponttiseinäjä.....	45
6.3.3 Stabiloitu seinämä.....	46
6.4 Tärinämittaukset .....	47
7 Tutkimustulokset .....	49
7.1 Tutkimukset ennen vaimennusseinämien rakentamista.....	49
7.1.1 Tärinämittaukset .....	49
7.1.2 Asukaskysely .....	53
7.2 Tutkimukset vaimennusseinämien rakentamisen jälkeen.....	57
7.2.1 Tärinävaimennuksen jälkeinen tilanne .....	57
7.2.2 Tärinämittaukset .....	58
7.2.3 Asukaskysely .....	58
7.3 Tulosten vertailu .....	60
8 Johtopäätökset.....	64
9 Yhteenveto .....	66
Lähdeluettelo .....	68
Liiteluettelo.....	73

## MERKINNÄT

$a$	kiihtyvyys [mm/s]
$a_{res}$	kiihtyvyyden resultantti [mm/s]
$A_o$	värähtelyn nopeuden tehollisarvon vertailuarvo [-]
$A_u$	värähtelyn nopeuden tehollisarvon maksimiarvo [-]
$A_r$	vuorokauden keskiarvoisen värähtelyn nopeuden tehollisarvon maksimi [-]
$dB(A)$	desibeli, A-taajuuspainotusta käytetyn mittauksen äänenpainetaso [-]
$f$	taajuus [1/s tai Hz]
$f_0$	vertailutaajuus [Hz]
$G$	leikkausmoduuli [kPa]
$KB$	värähtelyn nopeuden tehollisarvo [-]
$KB_{FTmax}$	värähtelyn nopeuden tehollisarvon huippuarvo [-]
$KB_{FTr}$	vuorokauden keskiarvoinen värähtelyn nopeuden tehollisarvo [-]
$k/k$	keskeltä keskelle -väli [m]
$L_{Aeq}$	A-painotettu keskiäänitaso [dB]
$L_{DEN, vuosi}$	Pitkän ajan keskimääräinen äänekkyystaso [dB]
$M$	kokoonpuristuvuusmoduuli [kPa]
$r$	etäisyys herätelähteestä [m]
$t$	aika [s]
$T$	jaksonaika [s]
$v$	aallonnopeus [m/s]
$v_p$	puristusaallon nopeus [m/s]
$v_s$	leikkausaallon nopeus [m/s]
$VDV$	tärinäannos [ $mm/s^{1,75}$ ]
$v_{res}$	komponenttien vektorisumma [mm/s]
$v_{vert}$	heilahdusnopeuden pystykomponentti [mm/s]
$v_{Ing}$	heilahdusnopeuden radan suuntainen vaakakomponentti [mm/s]
$v_{tran}$	heilahdusnopeuden rataa vastaan kohtisuora komponentti [mm/s]
$v_w$	painotettu tehollisarvo [-]
$v_{w,95}$	painotetun värähtelyn nopeuden tilastollinen maksimi [mm/s]
$W_a$	kiihtyvyydsriippuvainen painotuskerroin [-]
$W_v$	taajuusriippuvainen painotuskerroin [-]
$W_y$	pontin taivutusvastus [ $cm^3/m$ ]
$\lambda$	aallonpituus
$\rho$	tiheys [ $kg/m^3$ ]
$\nu$	Poissonin luku [-]
$\phi$	intensiteetti [-]
$\psi$	havainnon suuruus [-]
$\omega$	kulmanopeus [m/s]

# 1 JOHDANTO

## *1.1 Taustaa*

Alati kasvavan yhteiskunnan seurauksena uusia rakennuksia ja asuinalueita rakennetaan aivan junaratojen viereen ja raideyhteyksiä laajennetaan asuinalueiden keskellä. Kehittyneet tekniset laitteet sekä verkkoyhteisöjen suosio ovat myös kasvattaneet elämisen kotikeskeisyyttä, enää ei tarvitse poistua kodistaan ylläpitääkseen sosiaalisia verkostojaan. NykYTEknologia on tuonut tullessaan täysin tärinättömiä tiloja vaativia laitteistoja ja toimenpiteitä. Myös ihmisten herkkyyden erilaisille häiriötekijöille on havaittu olevan kasvussa. Viimeisen vuosikymmenen aikana terveyden määritelmä on muuttunut sairauden puuttumisesta enemmän kohti yleistä hyvinvointia ja elämän laatua. Enää ei puhuta eliniän pidentämisestä vaan elämän laadun parantamisesta. Nykyään terve ihminen ei ole vain vapaa sairauksista vaan myös muistakin ympäristön fyysisistä ja sosiaalisista kuormituksista.

Raiteiden parantuessa ja kaluston kehittyessä olemassa olevilla rataosuuksilla on voitu tehostaa liikennöintiä. Tämä tapahtuu kasvattamalla junien akseli- ja kokonaispainoja tai kuljetusnopeutta, jolloin maaperän dynaaminen kuormitus kasvaa. Näissä tilanteissa ihmisten havaitsema tärinä ja melu voivat kasvaa tasolle, joka koetaan hyvin epämiellyttäväksi – ne voivat jopa luoda pelkoa talon rakenteiden tai esineiden ja laitteiden rikkoutumisesta. Erityisen haitalliseksi tärinä on havaittu matalissa asuinrakennuksissa savikoilla. Liikenteestä aiheutuvien tärinöiden tutkiminen havaittiin ajankohtaiseksi jo viime vuosituhannen puolella, joten vaimennusmenetelmiä on tutkittu jo paljolti. Vaimennusmenetelmien mallinnus ja tärinän ennustaminen ovat nykyisillä elementtimenetelmillä mahdollisia.

Lakisääteisiä raja-arvoja ei tärinälle kuitenkaan ole Suomessa asetettu. VTT on tutkinut aihetta ja antanut omat suosituksensa, jotka perustuvat kansallisiin ja kansainvälisiin standardeihin (Talja 2005, s. 25). Standardien paikkansapitävyys Suomen oloissa on todistettu mittauksin. Raja-arvot ohjaavat hyvin uusien alueiden kaavoitusta, suunnittelua ja rakentamista, mutta olemassa olevilla asuinalueilla tärinähaitan minimoimiseksi täytyy suorittaa vaimennustoimenpiteitä.

Tärinää vaimentavien katkaisuseinämien toimivuus on todistettu maailmanlaajuisesti mittauksin, mallinnoin ja takaisinlaskennoin (Beskos et al. 1986, Hung et al. 2004, Adam & Estorff 2005, Andersen & Nielsen 2005), mutta niiden vaikutus asuinviihtyvyyteen sekä ihmisen havaitseman tärinän määrään ja epämiellyttävyyteen ovat laajalti tutkimatta. Myönteinen palaute ei vielä kerro kuinka paljon ihmisten havaitsema tärinä vaimenee ja vain järjestelmällisesti kerätty tieto antaa käsityksen vaimennuksen tehosta asukkaiden näkökulmasta. Voidaanko olettaa, että ihmisten kokeman häiriön määrä vähenee samassa suhteessa kuin tärinä vaimentuu?



Ihmisen kokema tärinä on yleensä tahdosta riippumatonta, vaikka jotkut omatoimisesti hakeutuvatkin tärinän vaikutuspiiriin jopa maksaen siitä. Harvempi meistä kuitenkaan haluaisi asua Linnanmäen Vekkulassa, joten asunnoissa koettu tärinä on useimmiten häiritsevää. Häiritsevyyttä lisää se, ettei tärinää voida kontrolloida. Asumisviihtyvyyden kannalta olisikin parasta, jos junaliikenteestä aiheutuvat häiriötekijät minimoitaisiin. Häiriön poistaminen kokonaan olemassa olevilta rataosuuksilta on lähes mahdotonta, tai ainakin taloudellisesti ja ekologisesti kannattamatonta, joten on löydettävä keinoja, joilla asukkaat saadaan tyytyväisiksi käytettävissä olevin resurssein.

Asuinalueella viihtyminen on elämän laadun kannalta keskeinen kriteeri. Jos jokapäiväinen arki on ympäristön vaikutuksesta tuskallista ja vaikeaa, kärsii ihminen henkisesti sekä fyysisesti. Arkipäivän vastoinkäymiset ja häiriöt ovat yhteydessä stressitutkimuksissa huomattuihin seuraavan päivän flunssa-, pää- ja selkäkipuoireiden määrään (Korpela 2001, s. 16). Melu ja tärinä vaikuttavat asuinviihtyvyyteen, mutta niiden yhteys sairauksiin on vielä epäselvä. Asumisviihtyvyys on kuitenkin hyvin laaja käsite - siihen vaikuttavia tekijöitä on lukemattomia ja niitä voidaan painottaa eri tavoin. Lisäksi tärinän havaitseminen ja sen epämiellyttävyys ovat subjektiivisia käsitteitä. Kuten makutottumuksille, ei tällaisille henkilökohtaisille tuntemuksille voida antaa absoluuttisia arvoja. Kun kyselytutkimuksen ja tilastollisen analyysin tuloksia verrataan mitattuun värähtelyn muutokseen, voidaan mahdollisesti löytää niiden välinen korrelaatio.

## ***1.2 Työn tavoite***

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää tärinää vaimentavien katkaisuseinämien vaikutusta asumisviihtyvyyden parantumiseen alueella, jossa junaliikenteestä aiheutuva tärinä koetaan häiritseväksi. Työ sisältää myös kirjallisuustutkimuksen raideliikenneperäisen tärinän ominaisuuksista, havaitsemisesta, vaimennusmenetelmistä sekä tärinän vaikutuksista ihmiskehoon ja mieleen. Tärinän määrää ja laatua tutkittiin asukaskyselyin sekä tärinämittauksin. Tutkimuksessa käsitellään hieman myös melua sekä tärinään liittyviä raja-arvoja ja suosituksia.

## ***1.3 Työmenetelmät***

Tutkimusalueen asukkaiden havainnot ja arviot junaliikenteen tärinän häiritsevyyteen liittyen kerättiin kirjallisin asukaskyselyin. Tuloksia analysoidaan tilastollisin menetelmin häiritsevyyden esittämiseksi lukuarvoina. Alueella suoritetaan myös tärinämittauksia, joiden tuloksia tulkitaan ihmisen havaitseman tärinän kannalta oleellisilta osilta. Kirjallisuustutkimuksessa esitetään aiheeseen liittyvän teorian pääkohdat. Asumisviihtyvyyden paranemisessa ei huomioida muita tekijöitä kuin tärinä. Tutkimuksen kohteena toimii Raunistulan asuinalue Turussa. Alueen vieritse kulkee Toijala-Turku junarata, jonka kilometrivälillä 271+980...272+420 koerakenne sijaitsee.

## 2 TEORIA

### 2.1 Värähtelyn perusteet

Harmonisen värähtelyn matemaattinen esitys on teoreettinen perusta kaikelle värähtelylle. Värähtelyn aallonkorkeutta sanotaan amplitudiksi. Jaksonaika  $T$  on kahden peräkkäisen samansuuruisen amplitudin välinen aika, jonka aikana kuvitteellinen partikkeli on tehnyt  $2\pi$  mittaisen matkan ympyrän kehällä kulmanopeudella  $\omega$  (Hemilä & Utriainen 1991, s. 1).

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.1)$$

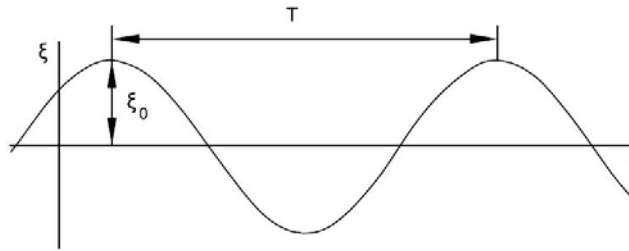
Värähtelyn taajuus on jaksonajan käänteisluku (Hemilä & Utriainen 1991, s. 2). Taajuuden yksikkö on hertsi.

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

Aallon etenemisnopeus saadaan jakamalla partikkelin etenemä matka  $\lambda$  yhdellä jaksonajalla (VTT 2001, s. 3).

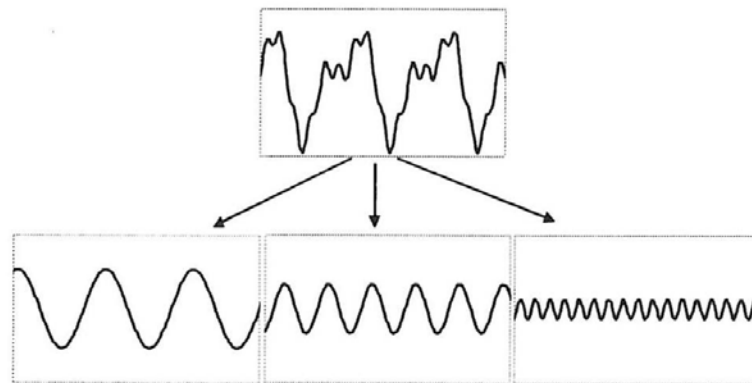
$$v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda \quad (2.3)$$

Edellä esitettyjä termejä on havainnollistettu kuvassa 2.1. Ajan kuluessa harmoninen värähtely toistaa samaa aaltokuviota uudestaan ja uudestaan. Jaksonajan  $T$  kuluttua ollaan aina samassa vapaasti valittavassa olevassa kohdassa seuraavassa aallossa (Prakash 1981, s. 12).



*Kuva 2.1. Harmonisen värähtelyn graafinen esitys, kuvassa  $\xi$  on aallon korkeus (Hemilä & Ursiainen 1991, s. 1).*

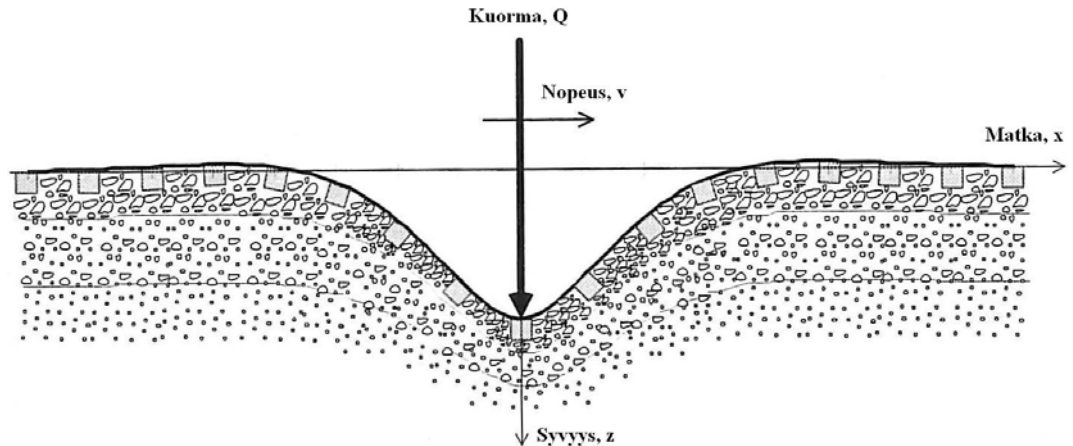
Mikä tahansa värähtely voidaan kuvata erilaisten harmonisten värähtelyjen summana (Sandover 1986, s. 151). Fourier-muunnoksilla voidaan värähtelyn eri osat erottaa toisistaan, kuva 2.2, mikä helpottaa värähtelyn tutkimista. Asiaa ei ole tarkemmin käsitelty tässä tutkimuksessa.



*Kuva 2.2. Useasta taajuuskomponentista koostuvan värähtelyn jako osiin (Kaaresoja 2007, s. 11).*

## **2.2 Tärinä maaperässä**

Tärinä maaperässä, kuten muuallakin, määritellään mekaaniseksi värähtelyksi tasapainoaseman suhteen. Tärinän aiheuttavaa tekijää kutsutaan herätteeksi. Junan kuormitus mallinnetaan pysähtyneen junan mukaisesti, jolloin raiteilla seisova juna luo herätteen jokaisessa akselissa olevan pyörän sekä kiskon kohtaamispaikassa aiheutuvan jännityksen lisäyksellä. Junan liikuessa jännityskuvio etenee sen mukana (Hall 2000, s. 15). Ratarakenteen käyttäytymistä junan yksittäisen akselikuorman alla on korostetusti esitetty kuvassa 2.3. Mitä suurempi painuma on, sitä suurempi on amplitudiltaan ympäristöön leviävä tärinä (VTT 2001, s. 9).



Kuva 2.3. Ratarakenteen käyttäytyminen junan pyörän kuorman alla (Hall 2000, s. 15).

Kiskojen epäjatkuvuuskohdat ja epätasaisuudet sekä junan nopeuden vaihtelu lisäävät oman osansa jännitykseen dynaamisena kuormana. Myös suurempi ajonopeus kasvattaa näitä kuormia. Pahimmillaan dynaamiset kuormat voivat aiheuttaa 200...300 % kasvun junan staattiseen kuormaan, mutta useimmiten vaikutus on matalilla taajuuksilla vain 10...20 % (Andersson et al. 2007, s. 9:5). Näistä muuttujista ja maaperän heterogeenisyydestä johtuen junaliikenteen aiheuttama värähtely maaperässä ei ole harmonista, vaan koostuu taajuussisällöltään erilaisista harmonisista komponenteista, ja on siten jaksollista värähtelyä (VTT 2001, s. 4).

Junan edetessä sen eri akseleista aiheutuvat pistemäiset herätteet muodostavat pitkän nauhamaisen herätteen. Junan pituuden ollessa suuri, voivat eri päistä lähtevät värähtelyt saapua samaan pisteeseen yhtä aikaa. Tällöin aallot voivat interferoida toisiaan, kasvattaen tai vähentäen tärinän määrää (VTT 2001, s. 8).

### 2.3 Tärinän eteneminen

Herätteen aiheuttama jännityskenttä etenee herätteestä pois päin aaltolina pitkin maaperää aiheuttaen tärinää ympäristössään. Maassa värähtely voi edetä neljänä erilaisena kimmoaaltona, jotka ovat puristava P-aalto, leikkaava S-aalto, sekä pinta-aallot Rayleigh- ja Loven aalto (Jones 2009, s. 410).

Puristus, eli P-aalto, on aallon etenemissuunnan kanssa samansuuntaista maan kokoonpuristumista sekä ohentumista. Puristusaallot kulkevat sekä kiinteässä aineessa että nesteessä. Puristusaallon nopeus voidaan laskea kaavalla (Hall 2000, s. 19):

$$v_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{Mg}{\gamma}} = \sqrt{\frac{G(2-2\nu)g}{\gamma(1-2\nu)}} \quad (2.4)$$

missä	M on	maakerroksen kokoonpuristuvuusmoduuli [kPa]
	g	vetovoiman kiihtyvyys [m/s]
	$\gamma$	tilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ]
	G	maakerroksen leikkausmoduuli [kPa]
	$\nu$	Poissonin luku [-].

Leikkaus, eli S-aalto, aiheuttaa leikkaavaa muodonmuutosta ja etenee hitaammin kuin P-aalto. S-aalto ei aiheuta maaperässä tilavuudenmuutosta eikä voi edetä nesteessä. S-aalto voidaan jakaa pystysuoraan sekä vaakasuoraan komponenttiin, SV ja SH. Leikkausaallon nopeus lasketaan kaavalla (Hall 200, s. 20):

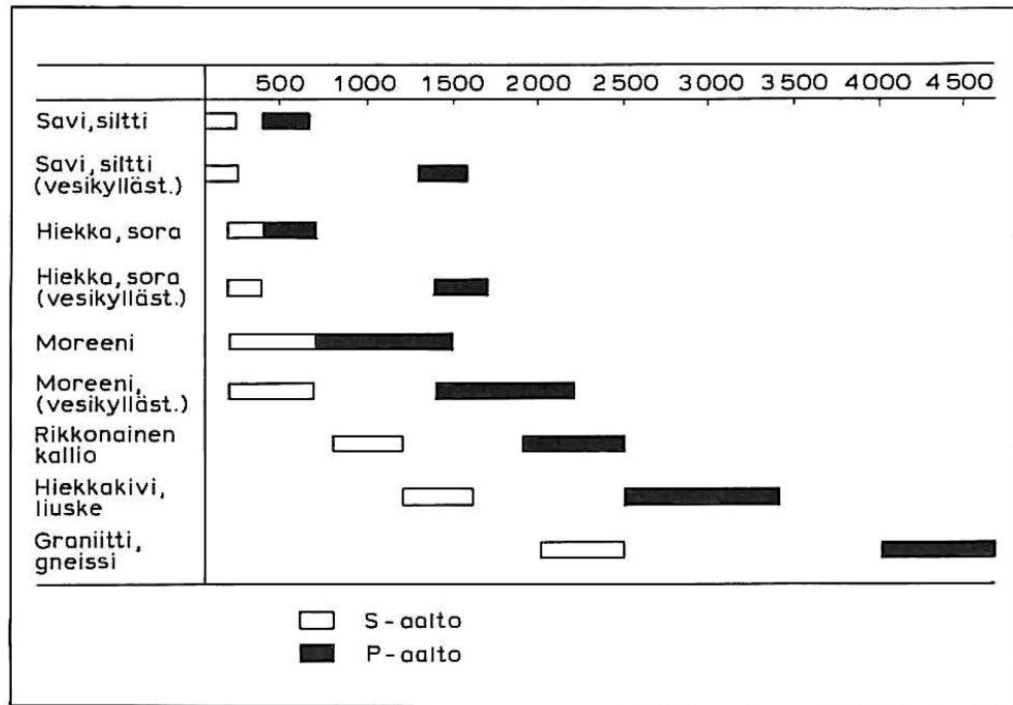
$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{Gg}{\gamma}}. \quad (2.5)$$

Aalto, joka on vuonna 1885 keksineen Lordi Rayleigh:n mukaan nimetty Rayleighin aalloksi, aiheuttaa maan pinnan lähellä ellipsin muotoista pyörimisliikettä, joka vaimenee nopeasti pystysuunnassa. Aallot etenevät sylinterinmuotoisena rintamana herätelähteestä pois päin (Hall 2000, s. 20). Rayleigh-aallon etenemisnopeus vaihtelee syvyyden mukaan ja on hieman pienempi kuin S-aallon nopeus (Saari 1990, s. 305). Käytännössä voidaan usein olettaa R-aallon nopeuden olevan sama kuin S-aallon (Major 1980, s. 255). Nopeuksien ero riippuu Poissonin luvusta ja R-aallon Poissonin luku on noin 6 % pienempi kuin S-aallon. Eri aaltotyyppien sisältämästä energiasta noin 67 % välittyy R-aaltojen mukana, S- ja P-aalloissa vastaavasti 27 % ja 7 % (Prakash 1981, s. 69). Tärkein aaltotyyppi on siis R-aalto, joka sisältää yli puolet aaltoenergiasta.

Toinen pinta-aalto, Loven aalto, esiintyy yleensä vain kerroksellisessa maaperässä (Hall 2000, s. 21). Loven aalto on vaakasuoraa leikkausta aiheuttava polarisoitunut pinta-aalto, jota ei ole tässä esitelty tarkemmin sen vähäisen energiasisällön ja vaikutuksen takia (Thompson & Jones 2006, s. 311).

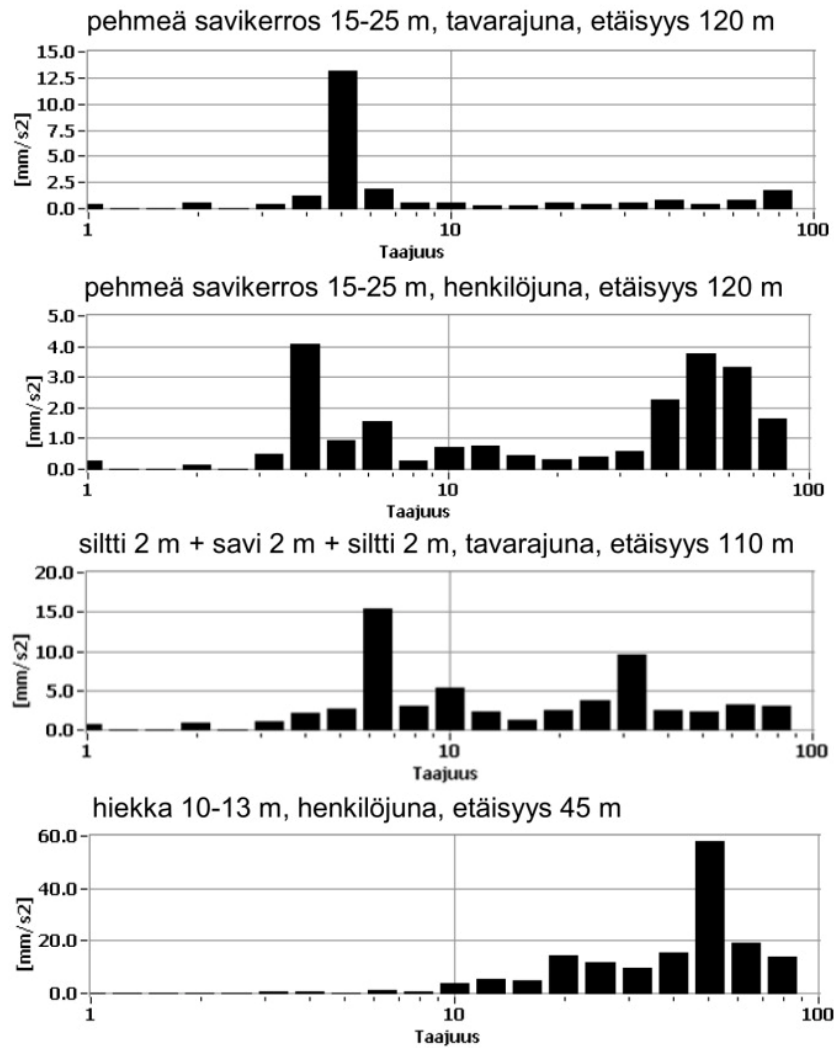
Kaikkien aaltojen nopeus ja kulkema matka riippuvat väliaineen geometriasta sekä jäykkyydestä (Hall 2000, s. 17). Hyvin pehmeissä maalajeissa aallot kulkevat huomattavasti hitaammin kuin kitkamaissa sekä kalliossa. Keskimääräisiä aallonnopeuksia maaperässä on esitetty kuvassa 2.4. Huomattavaa on, että P-aallon nopeus kasvaa huomattavasti maan ollessa vedellä kyllästetty, esimerkiksi sateen jälkeen, keväällä maan sulaessa tai pohjaveden pinnan alapuolella. Leikkausaallot eivät etene vedessä ja siksi S-aallonnopeus ei muutu veden vaikutuksesta. Nopeudet määräytyvät maan leikkausmoduulista, kaavat 2.4 ja 2.5, joka on kitkamailla

huomattavasti suurempi maaperän sisäisen kitkan ansiosta (Vepsäläinen 1985, s. 228-237).



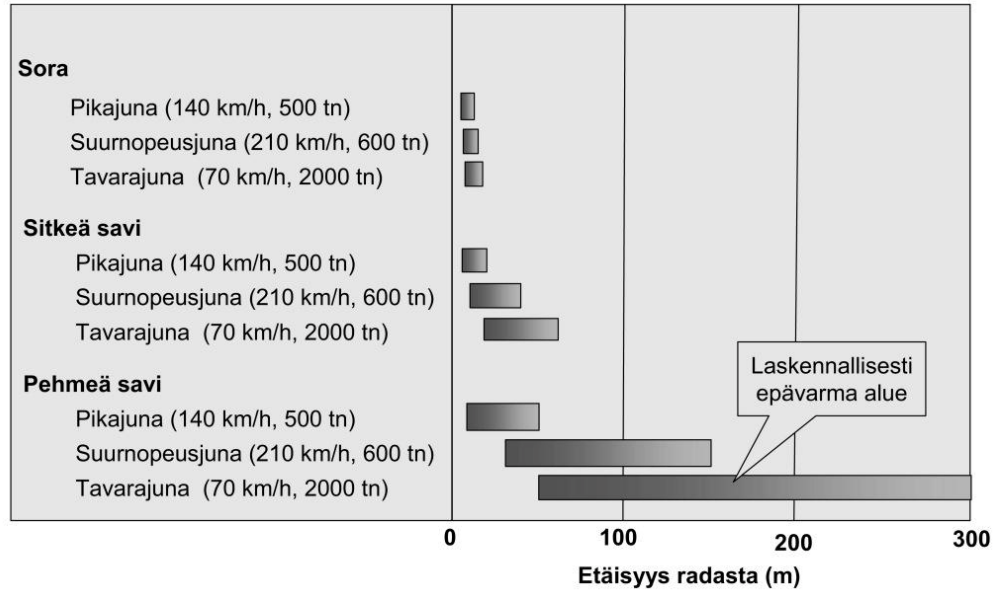
Kuva 2.4. P- ja S-aaltojen etenemisnopeus [m/s] eri maa- ja kalliolajeissa (Vuolio 1991, s. 166).

Etäisyys, johon asti värinä voi olla haitallista, riippuu paljolti maalajista sekä junan ja radan ominaisuuksista. Kuvassa 2.6 on esitetty arvio erityyppisten junien aiheuttaman värinän haitallisesta etäisyydestä, ja siitä havaitaan että tavarajunien vaikutusalue ulottuu kaikilla maalajeilla kauimmaksi niiden suuremman massan takia. Tavarajunien kaluston laatu voi vaihdella suuresti niin eri junien kesken kuin niiden sisälläkin, erilaisia käytössä olevia vaunutyyppisiä on kymmeniä. Erityisesti huonokuntoisten tai olemattomien jousitusten sekä lovisten pyörien arvioidaan kasvattavan värinän määrää (VTT 2001, s. 9-10). Pohjasuhteet, radan rakenne sekä junatyyppi vaikuttavat myös paljon värähtelyn taajuussisältöön, kuva 2.5.



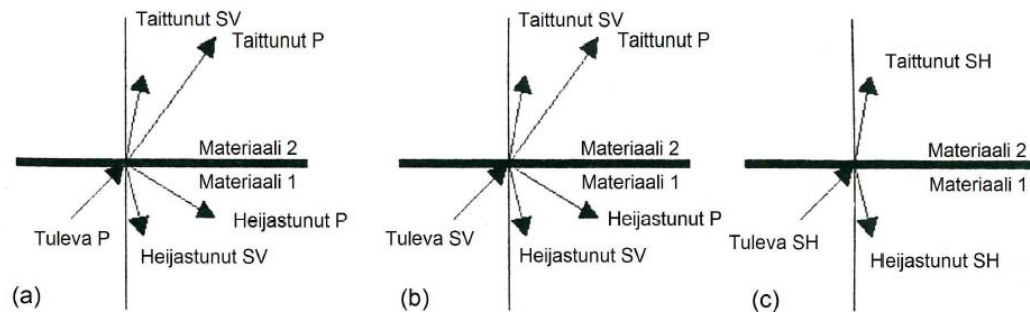
Kuva 2.5. Eri junista erilaisilla pohjaolosuhteilla mitatut värähtelytaajuudet (Talja et al. 2008, Liite B s. 7).

Kitkamailla haitalliset etäisyydet ovat huomattavasti pienempiä kuin savilla, etenkin pehmeän saven kohdalla vaikutusalue voi olla jopa monta sataa metriä. Varsinkin veden kyllästävässä pehmeikössä maan sisäisen vaimennuksen määrä on niin pieni, että tärinä ulottuu kauas herätteestä (Törnqvist & Talja 2006, Liite C s. 3). Kuitenkin mitä pidemmälle mennään, sitä todennäköisempää on, että pohjaolosuhteet ja maaperä muuttuvat, aiheuttaen suurta epävarmuutta laskentaan (Talja 2005, s. 15).



Kuva 2.6. Suunta-antava arvio etäisyydestä eri maalajeilla, jolloin junista aiheutuva tärinä voi olla haitallinen. Varjostetut alueet ovat laskennallisesti epävarmaa aluetta (Talja 2005, s. 15).

Kun tärinääalto kohtaa kahden materiaalin rajapinnan, kuten saven ja kallion, tapahtuu aallon taittumista ja heijastumista. Osa aallosta heijastuu takaisin, loppu taittuu ja jatkaa matkaansa lähteestä poispäin. Sama periaate pätee myös maahan asennettujen tärinää vaimentavien seinämien tapauksessa. Kuvassa 2.7 on esitetty, kuinka tulevien P- ja SV-aaltojen tapauksessa rajapinnassa muodostuu sekä P- että SV-aaltoja johtuen niiden kohtisuorasta tulokulmasta rajapintaan nähden (Hall 200, s. 25).



Kuva 2.7. Heijastuneita ja taittuneita runkoaaltoja a) P-aalto b) SV-aalto c) SH-aalto (Hall 2000, s. 25).

Koska horisontaalinen SH-aalto ei osu rajapintaan kohtisuorassa, taittumisen ja heijastuksen tuloksena muodostuu vain SH-aaltoja. Tärinän aaltoliike noudattaa samoja heijastumisen ja taittumisen lakeja kuin muutkin aallot, eli tulo- ja heijastuskulmat

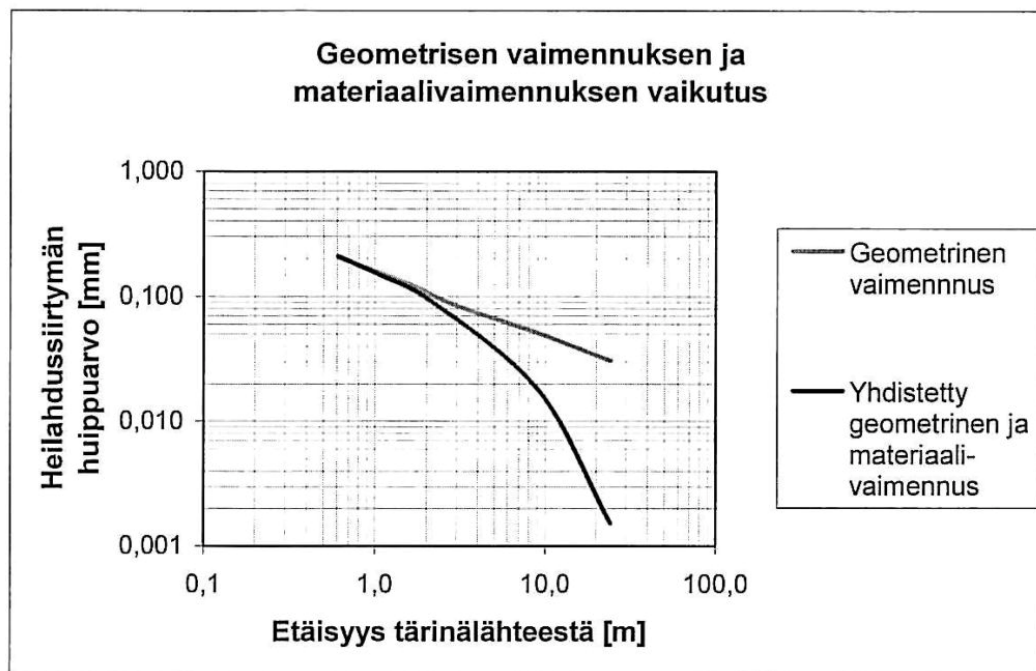


riippuvat aallon nopeuksien suhteesta eri väliaineissa Snellin lain mukaisesti (Hall 2000, s. 26).

## 2.4 Tärinän muutos

### 2.4.1 Tärinän vaimeneminen

Herätelähteestä poispäin etenevän aaltoliikkeen intensiteetti heikkenee kahdella eri tavalla. Geometrisessä vaimennuksessa voimakkuus heikkenee edetessään poispäin lähteestä aallon levitessä suuremmalle alueelle. Maan pinnassa P- ja S-aaltojen amplitudi vaimenee kääntäen verrannollisena etäisyyden neliöön lähteestä  $1/r^2$ , ja R-aallot suhteessa  $1/\sqrt{r}$ . Koska R-aalto vaimenee huomattavasti hitaammin, on se usein määräävä aaltotyyppi oltaessa kauempana herätelähteestä. Materiaalivaimennuksessa aaltoliikkeen energiaa kuluu aineen sisäisen kitkan ylitsepääsemiseen, jolloin se muuttuu enimmäkseen lämpöenergiaksi. Lisäksi maan kerrosrajoissa ja epäjatkuvuuskohdissa tapahtuu aaltojen heijastumista sekä taittumista (Saari 1990, s. 307). Kaukana herätelähteestä kaksi eri aaltoa voi interferoida keskenään, jolloin liike vaimenee aaltojen kumotessa toisensa.



Kuva 2.8. Tasaisesti vaikuttavasta tärinälähteestä aiheutuvan tärinäaallon vaimeneminen etäisyyden funktiona (ESI Engineering 2002, s. 2).

Kuvassa 2.8 on esitetty vaimennuksen määrää etäisyyden funktiona. Geometrisen vaimennus on materiaalivaimennusta suurempi tekijä kokonaisvaimennuksessa (ESI Engineering 2002, s. 2). Näin ollen loogisin tapa vaimentaa tärinää olisi kasvattaa rakennusten ja radan välistä etäisyyttä. Tämä ei kuitenkaan jo rakennetuilla asuinalueilla ole mahdollista, jolloin vaimennukseen on käytettävä muita menetelmiä.

Tärinän vaimentuessa, samalla kun intensiteetti laskee, myös sen taajuussisältö muuttuu. Matalataajuuksinen värähtely vaimenee hitaammin kuin korkeataajuuksinen (Talja 2005, s. 37), joten kaukana herätelähteestä taajuussisältö voi koostua pelkästään matalista taajuuksista. Myös vuodenajat vaikuttavat vaimennuksen määrään, jäätyneen savimaan vaimennus vastaa likimain hiekkamaan ominaisuuksia (Hanson & Meister 2003, s. 18). Jäätyneen maan värinäominaisuuksia on tutkittu vain vähän.

Tärinän vaimentaminen katkaisuseinämillä perustuu värähtelevän materiaalin jäykistämiseen ja leikkausmoduulin kasvattamiseen. Lisäys leikkausmoduulissa kasvattaa materiaalivaimennuksen määrää, kun suurempi määrä aallon energiasta kuluu värinän etenemisen mahdollistavan maan muodonmuutoksen tai leikkautumisen aiheuttamiseen. Vaimennuksen tehokkuutta voidaan arvioida S-aallonnopeuden suhteella, jonka ollessa katkaisuseinämässä 2,5-kertainen maaperään verrattuna voidaan vaimennusta pitää tehokkaana (Ahmad & Al-Hussaini 1991, s. 79).

#### **2.4.2 Tärinän voimistuminen**

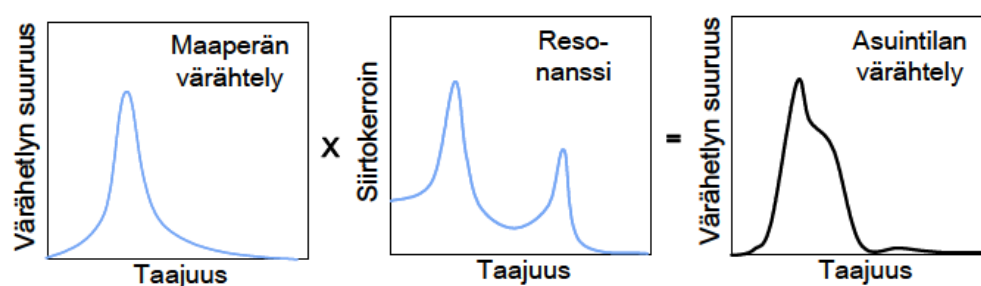
Tärinän taajuuden ollessa maaperän taajuuden kanssa yhtenevä tapahtuu värähtelyn voimistumista, resonanssia. Savimaiden ominaistajuus on yleensä 5...10 Hz. Kaikkein pahimmat värinän aiheuttamat häiriöt asunnossa koetaan, kun myös rakennusten ominaistajuus osuu tällä välillä (Törnqvist & Talja 2006, s. 31). Suomessa 1...2 kerroksisten pientalojen ominaistajuuden on todettu olevan 5...8 Hz. Talon iällä, mittasuhteilla tai sijainnilla ei ole havaittu olevan suurta merkitystä ominaistajuuteen. Resonanssi on tapahtumana hyvin sattumanvarainen ja riippuu useista tekijöistä. Joissain tapauksissa kaksi hyvinkin samanlaista rakennusta käyttäytyvät saman liikenteen herätteen vaikutuksesta hyvin eri tavoilla. Jo pienetkin erot pohjasuhteissa tai radan rakenteissa voivat edistää tai estää resonanssia rakennuksissa (Talja et al. 2008, Liite B, s. 16–19).

Eräessä tutkimuksessa (Hildebrand 2003) havaittiin radan alle asennettujen stabilointipilarien voimistavan värinää taajuuksilla 20...100 Hz. Tällöin radan läheisyydessä voi aiheutua haittaa voimistuneesta kuuloärsykkeestä. Ongelmaa esiintyy tosin vain hyvin lähellä rataa; kuten edellä on todettu, korkeataajuuksinen värähtely vaimenee nopeammin kuin matalataajuuksinen. Ilmiötä ei ole kuitenkaan tutkittu radan viereen asennettujen stabilointipilarien tapauksessa. Radan alle asennettujen pilaristabiloinnin vaimennustehon on todettu vähenevän kun pilarien pituus on noin kymmenen metriä tai enemmän. Pilarien jäykkyys ja lujuusominaisuudet määrittävät vaimennustehon (Kurkela 2007, s. 52-53).

#### **2.4.3 Tärinän siirtyminen rakennuksiin**

Kohdatessaan rakennuksen värinä vaikuttaa myös sen rakenteisiin. Rakenteissa värähtely voi voimistua, vaimentua ja aiheuttaa kuultavaa melua, runkoääntä. Liikenteestä aiheutuvaa runkomelua tarkastellaan yleensä taajuusalueella 16...250 Hz

(Talja et al. 2008, s. 10), jolloin äänen taajuus on ihmisen kuuloalueella. Noin sadan hertsin taajuudella tapahtuu kaikkein eniten seinien, ikkunoiden ja lattioiden resonanssia (Hildebrand 2003, s. 411). Usein resonanssin aiheuttama kuuloärsyke havahduttaa asukkaan, mikä edesauttaa muutoin havaitsematta jäävän tärinän huomaamista. Rakennukseen siirtyessä tärinän eri taajuuskomponentit käyttäytyvät erilailla. Matalat taajuudet eivät juuri muutu, mutta resonanssitaajuuksilla olevat värähtelyt voivat kasvaa moninkertaisiksi. Suuremmat taajuuskomponentit vaimenevat jopa kymmenyksen (Talja 2005, s. 36). Siirtokerroin, joka riippuu rakennuksen resonanssiominaisuuksista, määrittää miten ja kuinka paljon eri taajuuksista tärinää siirtyy (TTY 2009, s. 15). Kerrointa on havainnollistettu kuvassa 2.9.



Kuva 2.9. Värähtelyn taajuussisällön muutos rakenteisiin siirtyessä (Talja 2005, s. 35).

Erityisesti 2..3 kerroksisten rakennusten kohdalla rungon resonanssi voi osua juuri värähtelyn ominaistaajuudelle. Kellarin olemassaololla ei ole todettu olevan vaikutusta tärinän vaimenemiseen (Talja 2004 s. 40), mutta rungon resonanssi voi tuntua yksikerroksisissa taloissa, jos niissä ei ole kellaria (Talja et al. 2008, s. 82). Tärinän siirtymiseen rakennuksessa vaikuttavat muun muassa (Talja 2005, s. 35):

- perustamistapa
- maaperän värähtelyn taajuussisältö
- pinta-aallon pituus
- rakennuksen mitat
- rungon resonanssi sekä
- välipohjan ja muiden rakenneosien resonanssi.

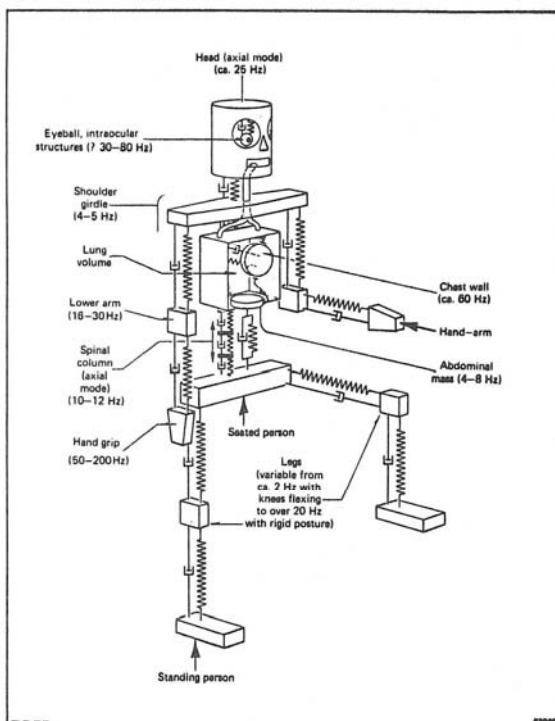
Tärinän siirtymistä rakenteisiin ja yllä mainittujen tekijöiden merkitystä rakenteen vuorovaikutukseen maaperän kanssa ei tunneta vielä täysin (Talja 2005, s. 48), mutta viimeisen vuoden aikana aihetta on tutkittu laajasti Rakentamisen aiheuttamat tärinät – projektin yhteydessä TTY:n ja VTT:n toimesta. Rakennusinsinöörien liitto RIL on tekemässä aineistosta painetun julkaisun.

## 3 TÄRINÄN VAIKUTUS IHMISEEN

### 3.1 Ihminen

Ihminen havaitsee värinän jo hyvin pienillä taajuuksilla ja amplitudeilla. Laboratoriokokeissa kohtuullisen herkkään ruumiinosaan, kuten käteen, kohdistetun värinän amplitudin tarvitsi olla vain kymmenen mikrometriä aiheuttaakseen havainnon (Gescheider 1997, s. 23). Fysiologisen havainnon suuruus riippuu myös värinän suunnasta sekä kehon asennosta (Major 1980, s. 308).

Ihmiskehon eri osat ja elimet reagoivat värinään eri tavoin, niiden ominaistajuuudet vaihtelevat jalkojen noin kahdesta hertsistä käsien noin kahteensataan hertsiin. Kuvassa 3.1 on esitetty istuvan ja seisovan ihmisen kehon yksinkertaistettu värähtelymalli sekä tärkeimpien ruumiinosien resonanssi- eli ominaistajuuksia, jotka pätevät matalilla värähtelytaajuuksilla ja -määrillä (Rasmussen 1982, s. 4). Koko kehon värinää tutkittaessa on seisovan ihmisen ominaistajuuksi saatu noin 12 Hz (Randall et al. 1997, s. 885) ja istuvalle ihmiselle 5 Hz (Griffin 1990, s. 384). Makuuasennossa oleva ihminen on herkimmillään noin 4 Hz värinälle (Griffin 1990, s. 236). Alle kahden hertsin taajuudella tapahtuvan värinän vaikutuksesta ihmiskeho käyttäytyy yhtenä kappaleena, jolloin mallintaminen helpottuu (von Gierke & Brammer 2002, s. 42:8). Ihminen voi asentoa tai lihasten jännitystä muuttamalla vaikuttaa ruumiinosien värähtelyn määrään ja myös kehon tuennalla on vaikutusta. Tämän takia koko kehon ominaistajuutta ei voida yksiselitteisesti määrittää, mutta olennaista on, että ominaistajuuudet ovat alhaisia, kuten junaliikenteestä aiheutuva värinäkin. Värinä siirtyä lattiasta tai esineestä ihmiseen, kuten maasta rakenteisiinkin, aiheuttaen häiriötä. Pahiten värinä häiritsee osuessaan kehon resonanssitaajuudelle aiheuttaen tavallista enemmän ja suurempaa värinää (Randall et al. 1997, s. 879).



Kuva 3.1. Seisovan ja istuvan ihmiskehon yksinkertaistettu värähtelymalli (Rasmussen 1982, s. 5).

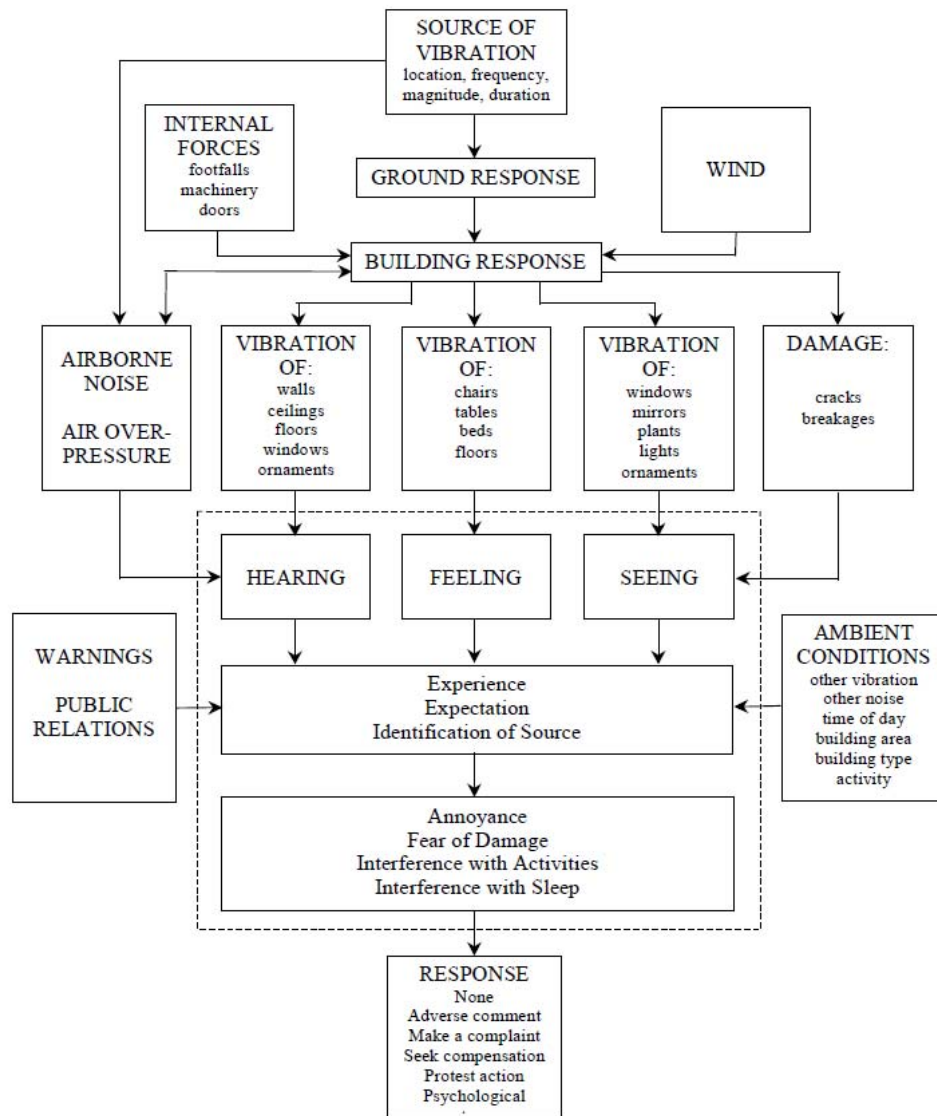
Tärinän havaitseminen on monimutkainen prosessi, jossa eri aistijärjestelmien liikkeenhavaitsemismekanismit ja niiden toisiinsa liittyminen eivät ole täysin mallinnettavissa (Griffin 1990, s. 226). Vuonna 1957 S.S. Stevens esitti useiden kansainvälisten laboratorioskokeiden perusteella että ärsyksen intensiteetin ja havainnon suuruuden välinen suhde olisi eksponenttifunktio

$$\psi = k\varphi^a \quad (3.1)$$

missä	$\psi$ on	havainnon suuruus
	$k$	vakiokerroin
	$\varphi$	ärsyksen intensiteetti
	$a$	eksponentti joka riippuu aistista ja olosuhteista.

Esimerkiksi 3000 Hz äänelle eksponentti on 0,67 ja 60 Hz tärinälle 0,95 mitattuna sormesta. Vakiokerroin  $k$  arvo riippuu ärsykkeestä ja käytettävistä suureista (Gescheider 1997, s. 298–299). Kokovartalotärinän epämiellyttävyydelle eksponentti  $a$  on noin yksi, eli haitta ja ärsyke kasvavat lineaarisesti (von Gierke & Brammer 2002, s. 42:22). Näin ollen ärsyksen puolittuessa pitäisi havainnonkin intensiteetin pudota puoleen.

Kuva 3.2 havainnollistaa tärinätapahtumaa ja eri tekijöitä, jotka siihen vaikuttavat, sekä sitä, kuinka ihminen tärinän kokee. Monet eri voimat ja herätteet saavat aikaan esineiden ja seinien värähtelyn, joka voidaan havaita eri aistein. Ulkoiset tekijät, kuten vuorokauden aika, muut äänet tai varoitukset, vaikuttavat havainnon kokemiseen ja siitä aiheutuvaan reaktioon. Asenteella ja odotuksilla on myös vaikutusta (Griffin 1990, s. 221–223).

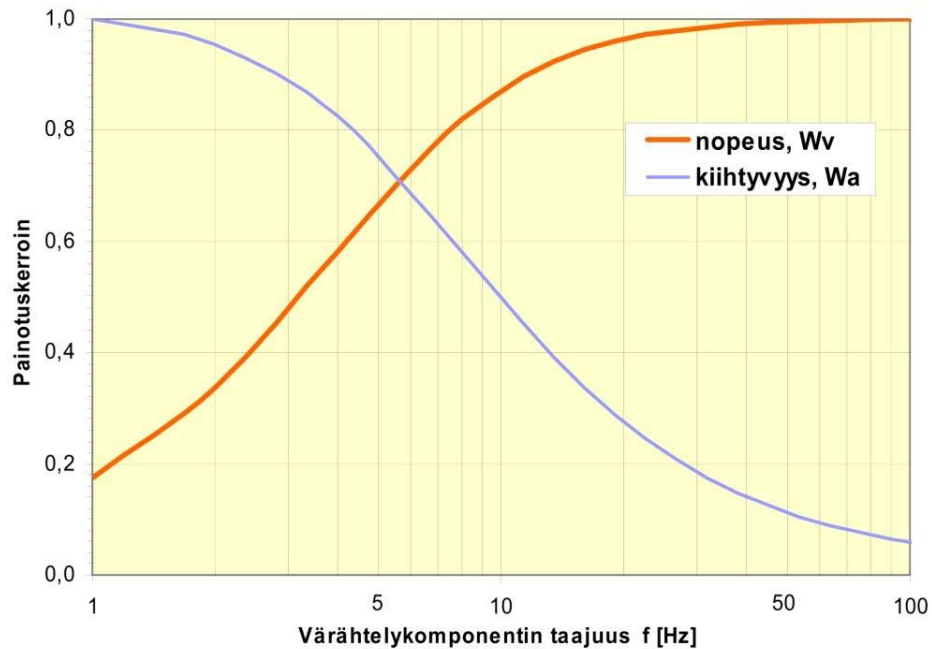


Kuva 3.2. Tärinästä aiheutuvan havainnon eri tekijöitä (Griffin 1990, s. 222).

### 3.2 Tärinän luonteen vaikutus

Junaliikenteestä aiheutuva tärinä on hyvin monitaajuista ja sen sisältö vaihtelee yksittäisellä rataosuudella junittain. Kun halutaan kuvata merkittävintä osiota tärinästä, mittaustuloksia pelkistetään valitsemalla tuloksista ajanjakso, jossa on merkittävintä

(suurin) painotettu värähtelyn tehollisarvo. Painottamalla tulosten keskiarvoja voidaan kuvata värähtelyn määrää yhdellä lukuarvolla. Ohjeita taajuuspainotukseen ja tilastolliseen tarkasteluun on Norjan normissa NS 8176. Tärinä sisältää monella eri taajuudella tapahtuvaa värähtelyä, ja jotta niiden vaikutus ihmisen havaitsemaan tärinään saataisiin tasavertaistettua, täytyy suorittaa taajuuspainotus. Taajuuspainotuksella, kuva 3.3, kaikista taajuuksista saadaan ihmisen havaintoihin verrattuna samanarvoisia ( $W_v$  ja  $W_a$  ovat painotuskerroimet) (Talja 2005, s. 20).

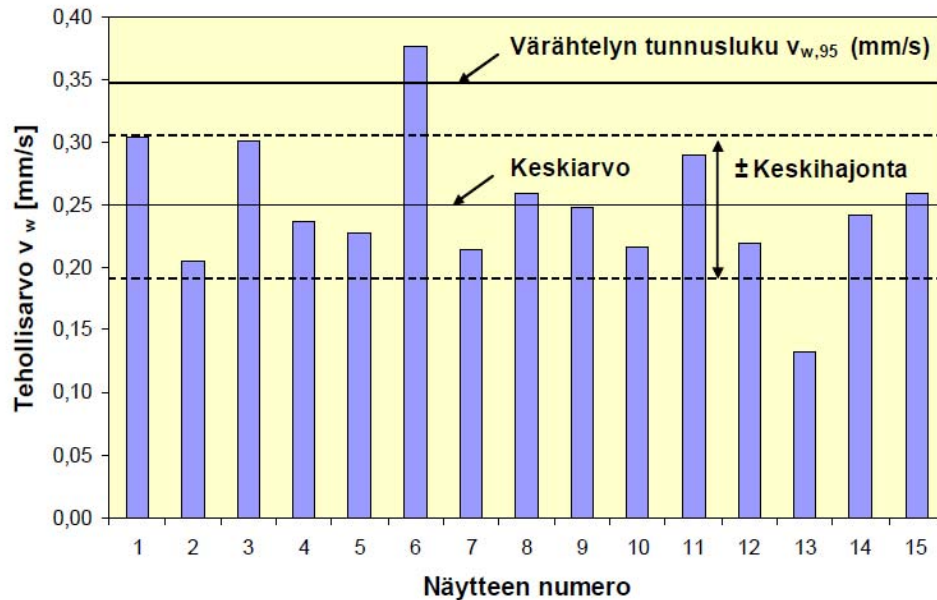


Kuva 3.3. Värähtelykomponenttien taajuuspainotus (Talja 2005, s. 21).

Kuvasta 3.3 nähdään kiihtyvyyden olevan ilman painotusta merkittävämpi tekijä noin viiden hertsin taajuudelle asti, joka jälkeen värähtelyn nopeus muuttuu määrääväksi. Painotuskertoimen avulla voidaan laskea koko taajuusalueen värähtelyn nopeuden painotetut tehollisarvot, kaava 3.2 (Talja 2005, s. 22).

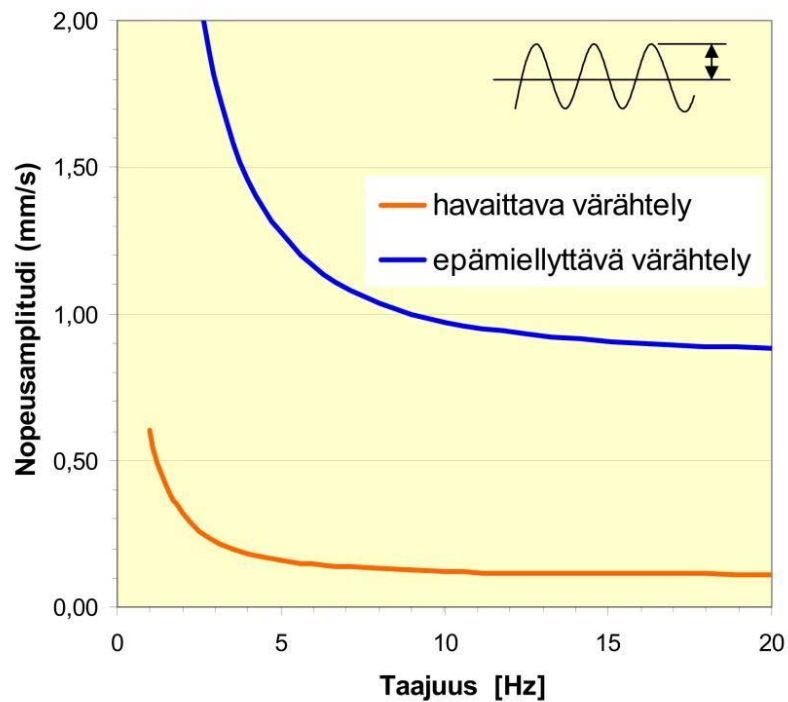
$$v_w = \sqrt{\sum_i (W_{v,i} v_i)^2} \quad (3.2)$$

Tutkittaessa värähtelyn vaikutusta asumisviihtyvyyteen tärkein tunnusluku on värähtelyn tehollisarvosta määritetty tunnusluku,  $v_{w,95}$ , joka kuvastaa viikon mittausajanjakson värähtelyn nopeuden maksimiarvoa 95 % todennäköisyydellä (Talja 2005, s. 20–24). Se on siis matemaattista keskiarvoa korkeampi värähtelyn nopeus, jonka ylittyminen on tilastollisesti epätodennäköistä. Tunnusluku  $v_{w,95}$  on aina värähtelyn keskiarvon ja huippuarvon välissä. Tunnuslukua on havainnollistettu kuvassa 3.4.



Kuva 3.4. Periaatekuva värähtelyn tunnusluvun määrittämisestä (Talja 2005, s. 24).

Painotettu tehollisarvo  $v_w$  värähtelyn tunnuslukuna esittää suurimman värähtelynopeuden, jolla voidaan kuvastaa koko värähtelytapahtumaa paremmin kuin värähtelyn aritmeettisella keskiarvolla tai huippuarvolla (Talja 2005, s. 23). Ihmisen herkkyyttä eritaajuiselle tärinälle on havainnollistettu kuvassa 3.5.



Kuva 3.5. Ihmisen herkkyyttä vakioamplitudiselle värähtelylle (Talja 2005, s. 13).



Kuten kuvasta 3.5 huomataan, ihmisen havaitsemat amplitudit ovat hyvinkin pieniä, mutta havaittavan ja epämiellyttävän värähtelyn ero on lähes kymmenkertainen. Siirryttäessä hyvin pieniltä taajuuksilta suurempiin,  $> 5$  Hz, raja-arvot tasaantuvat nopeasti ja epämiellyttävän värähtelyn raja-arvo asettuu hieman alle 1,0 mm/s nopeudelle. Raja-arvoja voidaan pitää suuntaa-antavina tavoitteina värähtelyn enimmäismäärälle. Jos värähtely pysyy noin alle 1 mm/s nopeudessa, ei kenenkään pitäisi kokea sitä epämiellyttäväksi. Lisäksi jos voidaan alittaa 0,1 mm/s raja, eikä värähtely enää havaita, se ei myöskään voi aiheuttaa häiriötä ihmisille (Talja 2005, s. 13).

### **3.3 Haitat**

#### **3.3.1 Ihmisen kokemat haitat**

Ihmisen kokemat haitat värähtelystä vaihtelevat hyvin paljon värähtelyn kohdistumisen, taajuuden sekä amplitudin mukaan. Koko keholla aistittavat värähtelyt aiheuttavat hyvin erilaisen reaktion kuin esimerkiksi työkoneesta suoraan käteen vaikuttava värähtely (Griffin 1990, s. 29). Junaliikenteestä aiheutuvat värähtelyt hyvin alhaiset taajuudet ja amplitudit eivät juuri koskaan aiheuta fyysistä vauriota ihmiskehoon, mutta kehon resonanssitaajuudelle osuva värähtely voi kuitenkin aiheuttaa epämukavuuden tunnetta. Hyvin alhaisilla taajuuksilla, 0,1...0,5 Hz, voi värähtely aiheuttaa matkapuhelinvaihtimien verrattavia huonon olon tuntemuksia (Griffin 1990, s. 297), mutta näin alhaista värähtelyä ei rautatieliikenteestä aiheudu. Värähtelyn huomaaminen ja sen aiheuttamat arkielämänsä häiriöt ja heräämiset alentavat asumisviihtyvyyttä. Havaitut värähtelyt aiheuttavat usein pelkoa rakennevaurioista, mutta useimmiten värähtely mielletään vaaralliseksi paljon alhaisemmilla määrillä kuin mitä rakennevaurioiden aiheuttamiseen tarvitaan (Griffin 1990, s. 268). Värähtelystä aiheutuvia haittoja ovat muun muassa (Talja 2005, s. 11):

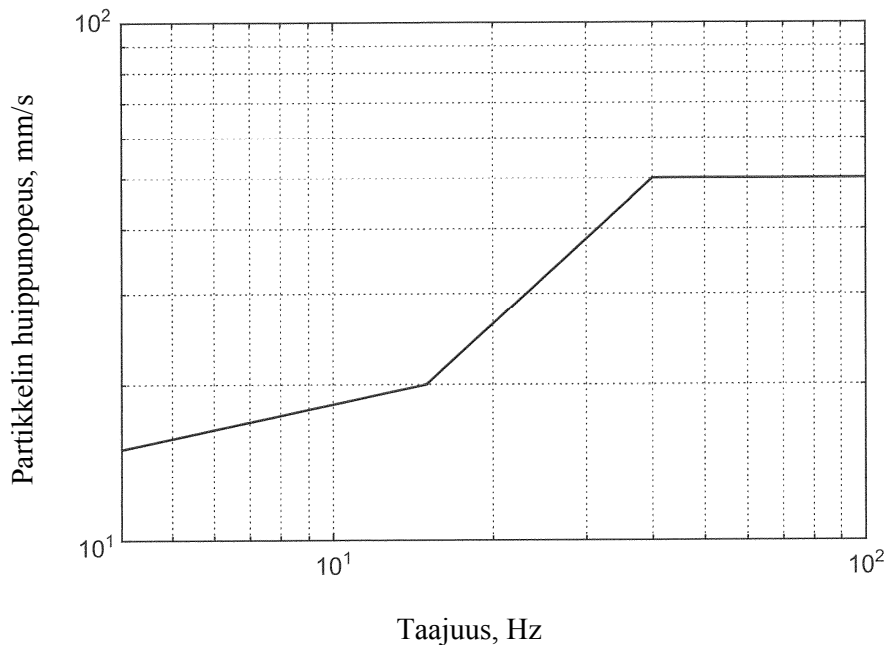
- asumismukavuuden väheneminen
- keskittymiskyvyn häiriintyminen
- nukkumisen häiriintyminen
- pelko rakennevaurioista tai
- pelko kiinteistön arvon alenemisesta

Värähtelyn haitat eivät rajoitu vain ihmisen kokemaan värähtelyyn. Rakennuksen rungon värähtellessä astiat usein värähtävät ja voivat jopa hajota esimerkiksi pudotessaan lattialle. Tämä kuitenkin vaatii usein suuren värähtelyn tai epäsuotuisat resonanssiolosuhteet. Värähtelystä herkät laitteet, kuten televisiot, radiot sekä tietokoneet, voivat kärsiä tai häiriintyä värähtelystä. Haittavaikutuksia voivat olla signaalin katkeaminen tai sen häiriintyminen. Kaikkein herkimpien laitteiden tai osien rikkoutuminen voi suurilla värähtelyillä myös olla mahdollista. Asuinrakennuksissa on kuitenkin harvoin näin herkkiä laitteita ja ongelma koskeekin enemmän teollisuusrakennuksia. Nykyään joka kodista löytyvien tietokoneiden kesto

sinimuotoiselle jatkuvalla tärinälle on todettu olevan jopa  $5 \text{ m/s}^2$ , joka vastaa 60 Hz taajuudella 13 mm/s heilahdusnopeutta. Valmistajan ilmoittama sallitun siirtymän raja-arvo matalille taajuuksille on kuitenkin vain 0,1...1,0 mm (TTY 2009, s. 62).

### 3.3.2 Rakennusten vaurioitumisriski

Ihmisten suurin pelon aihe rakennusten värähtelyssä on sen aiheuttamien vaurioiden pelko. Rakennusten vauriot voivat johtua itse tärinästä tai sen välillisistä vaikutuksista, kuten perustusten painumisesta. Vaurioita rakenteisiin voi muodostua vasta suuremmalla värähtelynopeudella, suuruusluokkaa 15 mm/s (Griffin 1990, s. 268). ISO 4866 – standardi esittää kosmeettisen vaurion olevan riippuvainen värähtelyn taajuudesta, kuva 3.6. Vanhojen rakennusten tärinänsieto voi olla kuitenkin pienempi, huonosta rakentamisen ja rakenteiden laadusta tai aikaisempien kuormitusten vaikutuksesta johtuen (TTY 2009, s. 35). Myös rakennusten laajennusosat ovat vaurioalttiimpia johtuen rakennustavan ja painumien eroista.



Kuva 3.6. Kosmeettisten rakennusvaurioiden syntymisen raja-arvo (Jones 2009 s. 406).

VTT:n suosituksen mukaiset raja-arvot vaurioriskille poikkeavat suuresti edellä mainitusta. Värähtelyn eri komponenttien resultanttiin  $v_{res}$ , kaava 3.3, perustuvat raja-arvot koskevat rakennuksen perustuksista mitattuja nopeuksia. Tällöin vauriot ovat mahdollisia jo 3 mm/s ylittävillä värähtelynopeuksilla. Värähtelyn resultantti lasketaan vektoritulona kaikkien akselien suuntaisista värähtelynopeuksista (VTT 2001, s. 36)

$$v_{res} = \sqrt{(v_{vert})^2 + (v_{long})^2 + (v_{tran})^2}, \quad (3.3)$$

missä  $v_{res}$  on komponenttien vektorisumma, "resultantti"  
 $v_{vert}$  heilahdusnopeuden pystykomponentti  
 $v_{long}$  heilahdusnopeuden radan suuntainen vaakakomponentti  
 $v_{tran}$  heilahdusnopeuden rataa vastaan kohtisuora komponentti.

Alueet voidaan mitattujen resultanttien nopeuden perusteella jakaa kolmeen eri luokkaan, taulukko 3.1. Vauriot ovat mahdollisia alueella V ja epätodennäköisiä alueilla H ja E. Epätodennäköisten vaurioiden alueet erotetaan toisistaan mahdollisten haittojen perusteella. H-alueen tärinät voivat aiheuttaa haittoja rakennukselle, kun taas E-alueella ne ovat epätodennäköisiä, vaikka tärinä voidaan havaita (Kaaresoja 2007, s. 34).

*Taulukko 3.1. Suositus rakennusten vaurioriskin kannalta (VTT 2001, s. 20-21).*

Alue	Alueen kuvaus	Heilahdusnopeuden resultantin huippuarvo rakennuksen perustuksessa $v_{res}$ (mm/s)
V	<b>Vauriot ovat mahdollisia</b> Kohonneen tärinäalttiuden alue	> 3,0
H	<b>Haitat ovat mahdollisia, vauriot epätodennäköisiä</b> Vähäisen tärinäalttiuden alue	1,0...3,0
E	<b>Haitat epätodennäköisiä</b> Tärinä voidaan havaita, mutta vaurioriski on merkityksetön	<1,0

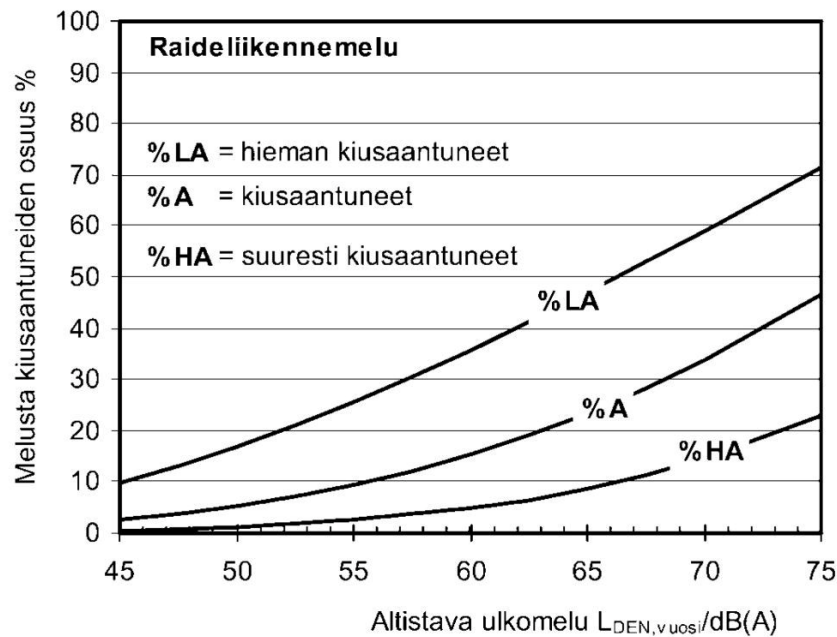
RHK:n Ratatekniset ohjeet (RATO, osa 3) antavat radan suunnittelua varten ohjeeksi, että mitoittavana tekijänä voidaan käyttää heilahdusnopeuden maksimiarvoa. Perinteisesti rakennetuille betoni-, tiili- tai puurakennuksille perustuksesta mitatun värähtelyn maksimiarvon tulee olla pienempi kuin 4 mm/s, kun dominoiva värähtelytaajuus on alueella alle 10 Hz. Taajuusalueella 10–30 Hz raja-arvo on 5 mm/s ja yli 30 Hz:n alueella 6 mm/s (RHK 2008c, s. 43).

### 3.3.3 Melu

Yleiskäsitteenä melu on ääntä, jonka ihminen kokee epämiellyttävänä tai joka on muulla tavoin ihmisen terveydelle vahingollista tai hänen muulle hyvinvoinnilleen haitallista (Sosiaali- ja terveysministeriö 2003 s. 53). Ihmisen kuuloalue on noin

20...20 000 Hz. Melun haittavaikutukset vaihtelevat suuresti, pysyvää kuulovauriota vähäiseen häiriöön (Pesonen 2005, s. 11). Asuinrakennuksiin kantautuva junaliikenteen melu ei lähes koskaan ylitä arvoa 85 dB, joka on työterveyslaitoksen kuulovaurion muodostumisraja pitkäaikaisessa altistuksessa. Täten ei junaliikenteen melusta ole vaaraa kuulolle. Junaliikenteen melu on vain hetkellistä, ja sen kesto riippuu ohiajavan junan nopeudesta ja pituudesta. Radan geometria vaikuttaa meluun siten, että mutkissa ja kaarteissa aiheutuu pahin melu (Thompson 2009, s. 315). Akselikuorman kasvaessa pyörien ja kiskon kosketuksesta aiheutuva melu vähenee (Thompson 2009, s. 151). Toisaalta tällöin tärinän amplitudi kasvaa, mahdollisesti aiheuttaen suurempaa häiriötä. Melun haittavaikutukset ovat samankaltaisia kuin tärinänkin, uhkaa rakenteille ei kuitenkaan ole. Melun ehkäisy- ja vaimennuskeinot ovat halvempia ja helpompia, hyviin tuloksiin päästään esimerkiksi ikkunoiden uusimisella.

Kuten tärinän, myös äänen häiritsevyyden tulkinta on monimutkaista. Havainnon häiritsevyys riippuu esimerkiksi kuulijan asennoitumisesta, tapahtuman kontekstista ja muista samanaikaisista ärsykeistä. Maaperästä rakennuksen runkoon johtuva aaltoliike aiheuttaa rungon värähtelyn, joka voidaan havaita runkoääninä. Ääni voi itsessään olla häiritsevä, tai rungon tärinästä johtuva astioiden tai muun irtaimiston liike voi aiheuttaa melun. Etenkin aamulla ja yön hiljaisina tunteina, kun taustamelua ei ole, tuntuu liikenteen aiheuttama melu erittäin häiritsevältä (Lambert et al. 1996, s. 26). Kuvassa 3.7 on esitetty raideliikenteen aiheuttaman melun häiritsevyys ulkona. Vuoden mittaista ajanjaksoa kuvaava äänitaso ja sitä vastaavan kiusaantuneiden asukkaiden prosenttiosuudet kuvastavat melun häiritsevyyttä. Vielä hyvinkin alhaisilla äänitasoilla hieman kiusaantuneiden osuus on vähintään 10 % asukkaista (Pesonen 2005, s. 60–61).



Kuva 3.7. EU:n ympäristödirektiivin ehdottamat kiusallisuusvasteet raideliikennemelulle ulkona (Pesonen 2005, s. 61).

Valtioneuvoston päätöksen mukaiset ohjearvot melulle,  $L_{Aeq}$ , rakennusten sisäpuolella ovat päivisin (07...22)  $\leq 55$  dB(A) ja öisin (22...07)  $\leq 50$  dB(A) (Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö 2003, s. 37). Näillä arvoilla alle 10 % asukkaista kokee kiusaantuvansa melun määrästä. Melun häiritsevyyden on todettu kasvavan, kun samanaikaisesti havaitaan tärinää (Öhrström 1997, s. 560).

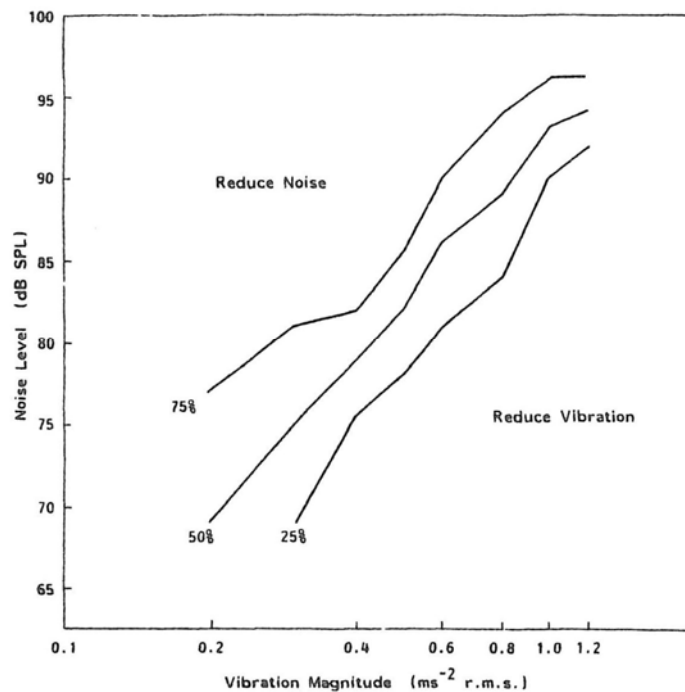
### 3.3.4 Tärinän ja melun yhteisvaikutus

Samanaikaisen tärinän sekä melun yhteisvaikutus on hyvin monimutkainen prosessi, vaikka koettujen äänten ja tärinän suuruusluokkien on todettu olevan verrannollisia keskenään Stevensin psykofyysisen lain mukaisesti (Howarth & Griffin 1990a, s. 129). Junaliikenteestä aiheutuva ääni ei ole niin kova, että se vaikuttaisi ilman värähtelynä suoraan koetun tärinän määrään, mutta sen välilliset, psykologiset, vaikutukset kasvattavat koetun haitan määrää. On osoitettu, että samanaikainen tärinä ja melu vaikuttavat aina yhdessä junaliikenteestä aiheutuvan häiriön määrään (Howarth & Griffin 1990a, s. 133). Näiden kahden ärsykkeen intensiteetin muutos vaikuttaa eri määrin havainnon suuruuteen. Howarth & Griffin (1990b, s. 2320) ovat havainneet, että tärinän havainnon suuruus kasvaa enemmän ärsykkeen suurentuessa. He esittivät, että kahden ärsykkeen kokonaishavainnon suuruus voidaan laskea havaintojen summana Stevensin lain mukaisesti,

$$\psi = a + b\varphi_v^{n_v} + c\varphi_s^{n_s} \quad (3.4)$$

missä a, b, ja c ovat vakioita ja  $n_i$  ovat äänen ja värinän eksponentit. Koetulosten perusteella eksponenteiksi saatiin äänelle  $n_s = 0,036$  ja värinälle  $n_v = 1,18$ .

Joissain tutkimuksissa kovan melun on havaittu vähentävän värähtelyn havaitsemista, kun taas melun havainnointiin värähtelyt eivät vaikuta (Paulsen & Kastka 1995, s. 296). Kova melu voi myös kasvattaa kovan värähtelyn epämiellyttävyyden tunnetta, vaikka tutkimuksissa koehenkilöiltä kysyttäisiinkin vain värähtelystä aiheutuvia tuntemuksia (Griffin 1990, s. 95). Matalilla värähtelymäärillä tai melutason ylittäessä 60 dB(A), on kannattavampaa vähentää äänen intensiteettiä kokonaishäiriön pienentämiseksi (Howarth & Griffin 1990, s. 132–133). Kuvassa 3.8 on esitetty suositukset joko melun tai värinän vähentämiselle, riippuen äänenpaineesta ja värähtelyn resultantista.



Kuva 3.8. Suositus koska pitäisi vähentää melua ja koska värinää (Griffin 1990, s. 96).

Melun vähentäminen tosin saattaa tuoda esiin piilevän, aiemmin havaitsemattoman, värinän, jolloin asumisviihtyvyys ei välttämättä parane ollenkaan (Paulsen & Kastka 1995, s. 313). Useat normit käsittelevät melua ja värinää vain erillisinä tapahtumina, eivätkä ota huomioon niiden yhteisvaikutusta (Paulsen & Kastka 1995, s. 295).

Asumisviihtyvyyden kannalta on selvää, että parhaisiin tuloksiin päästään kun melu- sekä värinähaittaa vähennetään samanaikaisesti.

### **3.4 Asumisviihtyvyys**

Asumisviihtyvyys voidaan mieltää osaksi suurempaa kokonaisuutta, elämän laatua. Muita elämänlaadun muuttujia ovat esimerkiksi työ, varallisuus, terveys sekä koulutustaso. Asumisviihtyvyys on hyvän elämän perusedellytys, huonossa ympäristössä asuva ihminen kärsii henkisesti ja mahdollisesti myös fyysisesti. Tutkimuksissa on havaittu ihmisen mieluiten hakeutuvan luonnonläheisiin ympäristöihin, erityisesti silloin, kun on tarve rauhoittua ja "ladata akkuja" (Korpela 2001, s. 16). Hyvällä asuinalueella ei aiheudu liiallista haittaa ulkoisista häiriötekijöistä, kuten rautatieliikenteestä aiheutuva melu ja tärinä.

Subjektiivisenä käsitteenä, joka vaihtelee vastaajien kesken ja myös vastaajan mielentilan mukaan, on asumisviihtyvyyttä hyvin vaikea käsitellä yksiselitteisenä arvona, joka olisi kaikille sama. Vaikka ihmisten on havaittu arvostavan samankaltaisia asioita, ovat ihmisten mieltymykset hyvin yksilöllistä. Toisaalta myös haittojen ja häiriötekijöiden painoarvot vaihtelevat suuresti. Kaikki eivät koe tiettyä määrää tärinää tai melua häiritseväksi, kun taas toiset häiriintyvät jo vähästä. Demograafisten muuttujien, kuten iän, tulotason, siviilisäädyn ja koulutuksen, ei ole havaittu vaikuttavan häiriön määrään (Weinstein 1976, s. 244). Yleiseen terveyteen ja terveyden tasoon edellä mainitut muuttujat vaikuttavat, matalampi elintaso vaikuttaa terveysongelmien määrän kasvuun (de Hollander 2004 s. 40). Terveiden ja meluärsykkeen häiritsevyyden syy-seuraussuhdetta ei ole täysin selvitetty tutkimuksin (Fyrhi & Klæboe 2009, s. 95), mutta terveysongelmien on havaittu madaltavan häiriötekijöiden sietokykyä (de Hollander s. 39).

Sosiologiaa, yhdyskuntasuunnittelua ja psykologiaa sivuava asumisviihtyvyyden taustojen, yksityiskohtien ja vaikutusten tutkiminen on tässä tutkimuksessa jätetty taka-alalle ja tyydytään vain toteamaan, että siihen vaikuttaa useita tekijöitä. Tässä tutkimuksessa selvitetään asumisviihtyvyyden muutosta tärinänvaimennusrakenteiden aiheuttamina muutoksina asukaskyselyn tuloksissa.

## 4 TÄRINÄRAJAT ERI STANDARDEISSA

### 4.1 Yleistä

Eri kansainväliset ja kansalliset standardit ovat muodostaneet raja-arvoja ja suosituksia hyväksyttävälle tärinän määrälle. Myös tärinän mittaamiseen ja arviointiin on määritetty sääntöjä ja rajoja. Suositellut mittaamenetelmät sekä avainsuureet vaihtelevat hieman maittain, mutta raja-arvot ovat hyvin samansuuruisia. Kansainvälinen standardoimisorganisaatio, ISO, alkoi jo 1960-luvulla luonnostella omaa standardiaan ISO 2631: ”Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration”. Vuosituhannen vaihteen molemmin puolin on julkaistu useita kansallisia standardeja koskien tärinää.

Suomessa ei omaa standardia aiheesta ole tehty, eivätkä VTT:n suosittelemat ohjearvot ole lainvoimaisia. VTT:n ohje-arvot perustuvat norjalaisen NS 8176 standardin mukaisiin arvoihin, taulukko 4.1 (Talja 2005, s. 25).

Taulukko 4.1. Standardin NS 8176 mukaiset rajat tärinän määrälle (Talja 2005, s. 25).

Värähtelyluokka	Kuvaus värähtelyolosuhteista	$v_{w,95}$ [mm/s]
A	Hyvät asuinolosuhteet. <i>Ihmiset eivät yleensä havaitse värähtelyitä.</i>	$\leq 0,10$
B	Suhteellisen hyvät olosuhteet. <i>Ihmiset voivat havaita värähtelyä, mutta ne eivät ole häiritseviä.</i>	$\leq 0,15$
C	Suositus uusien rakennusten ja väylien suunnittelussa. <i>Keskimäärin 15 % asukkaista pitää värähtelyitä häiritsevinä ja voi valittaa häiriöistä</i>	$\leq 0,30$
D	Olosuhteet, joihin pyritään vanhoilla asuinalueilla. <i>Keskimäärin 25 % asukkaista pitää värähtelyitä häiritsevinä ja voi valittaa häiriöistä</i>	$\leq 0,60$

Normin mukaisesti asunnot ovat jaettavissa neljään eri luokkaan, joissa tärinän tunnusluku on tiettyjen raja-arvojen sisällä. Uudet asuinalueet tulisi rakentaa värähtelyluokan C mukaisin raja-arvoin, kun taas vanhoilla asuinalueilla pyritään korkeimpiin, luokan D, raja-arvoihin. Rajat ovat hyvin samanlaiset kuin muissakin lähteissä on esitetty. Taulukossa 4.2 on esitetty Norjan, Saksan, USA:n ja Ruotsin suositukset samassa taulukossa.



Taulukko 4.2. Eri lähteiden suosituksia värähtelyjen ohjearvoiksi (Talja 2005, s. 29).

$v_w$ [mm/s]	Soveltamisalue, häiriölähde ja viite
$\leq 1,0$	Vanhat rata- ja asuinalueet, junat [Banverket 1997]
$\leq 0,6$	<i>Olosuhteet, joihin pyritään vanhoilla asuinalueilla, kisko- ja tieliikenne</i> [NS 8176, 1999]
$\leq 0,6$	Uudet teollisuusalueet, kisko- ja tieliikenne [DIN 4150-2, 1999]
$\leq 0,6$	Maanpäällinen kiskoliikenne vanhoilla asuinalueilla [DIN 4150-2, 1999]
$\leq 0,4$	Uudet asuinalueet ja peruskorjattavat väylät, junat [Banverket 1997]
$\leq 0,36$	Uudet toimistoalueet, junat [FRA 1998]
$\leq 0,3$	<i>Suositus uusien rakennusten ja väylien suunnittelussa, kisko- ja tieliikenne</i> [NS 8176, 1999]
$\leq 0,3$	Uudet seka-alueet, kisko- ja tieliikenne [DIN 4150-2, 1999]
$\leq 0,3$	Maanalainen kiskoliikenne vanhoilla asuinalueilla [DIN 4150-2, 1999]
$\leq 0,25$	Uudet asuinalueet, junat [FRA 1998]
$\leq 0,20$	Uudet asuinalueet, kisko- ja tieliikenne [DIN 4150-2, 1999]
$\leq 0,15$	<i>Suhteellisen hyvät olosuhteet, kisko- ja tieliikenne</i> [NS 8176, 1999]
$\leq 0,15$	Erityisrakennukset (kisko- ja tieliikenne), jotka on tarkoituksellisesti suunniteltu häiriöttömiksi [DIN 4150-2, 1999]
$\leq 0,10$	<i>Hyvät asuinolosuhteet, kisko- ja tieliikenne</i> [NS 8176, 1999]

Taulukossa esitetyt arvot ovat värähtelyn tehollisarvoja, eikä  $v_{w,95}$  – tunnuslukuja, joten niitä ei voi täysin suoraviivaisesti verrata keskenään, suuruusluokat pysyvät kuitenkin samoina. Vain DIN ja NS standardit koskevat pelkästään junaliikennettä (Talja 2005, s. 29).

Vaikka eri normeissa on annettu samankaltaisia suositusarvoja värähtelylle, on niihin päästy hieman eri lähestymistavoilla. Joissain normeissa on keskitytty enemmän yksittäisen värähtelytapahtuman maksimiarvoon, kun taas toisissa on panostettu erilaisten keskiarvojen käyttöön raja-arvojen määrittämisessä.

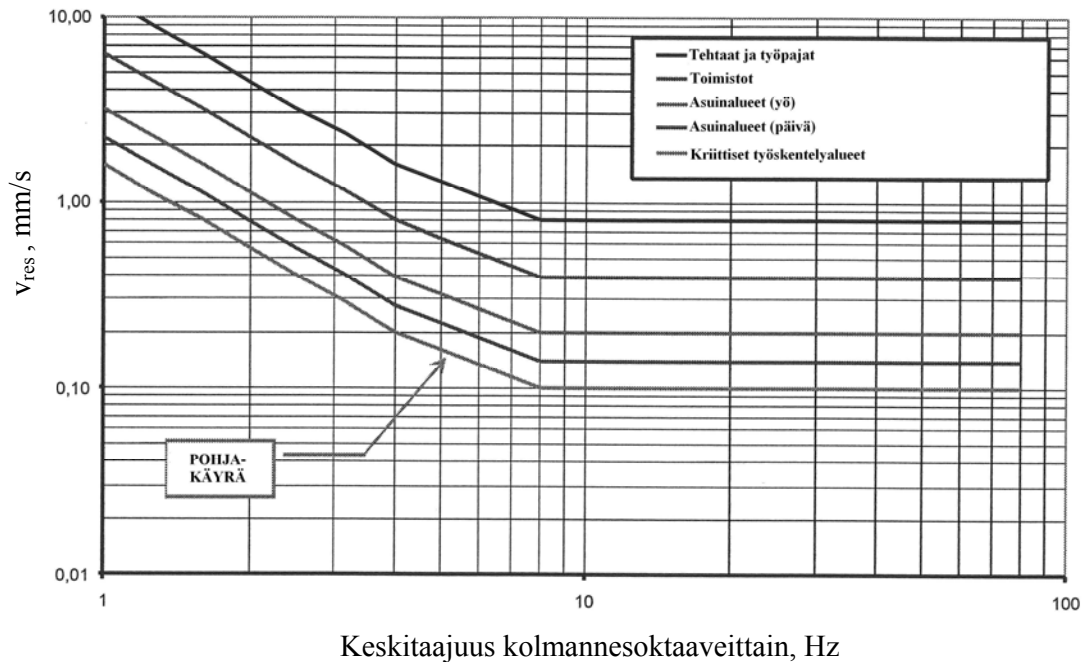
Normien lainvoimaisuus vaihtelee paljon. Joissain maissa raja-arvot ovat ehdottomat, kun taas toisaalla on tyydytty pitämään ne ohjeellisina. Tähän vaikuttaa suuresti paikalliset maaperäolosuhteet, esimerkiksi Tanskassa ei ole samanlaisia pehmeikköjä kuin muissa pohjoismaissa, joten siellä on muista maista poiketen otettu käyttöön ISO 2631-2 standardin raja-arvot (Hakulinen 1999, s. 7).

#### 4.2. ISO 2631 – standardi

Standardi on jakautunut neljään eri osaan joista ensimmäinen käsittelee ihmisen kokovartalotärinää ja sen arvioimista yleisesti ja toinen tärinää rakennuksissa taajuusalueella 1...80 Hz. Kaksi jälkimmäistä osaa koskevat hyvin matalataajuisista

tärinää ja laivojen värähtelyä, eivätkä siten ole tässä yhteydessä käsittelyarvoisia (Griffin 1990, s. 426). Standardi esittää painotuskertoimet ja käytettävät akselit tärinän arvioimiseksi, toisesta osasta löytyy myös painotuskerroin tilanteeseen missä ihmisen asentoa rakennuksen sisällä ei ole tiedossa. Myös hyväksyttävän tärinän määrän raja-arvot erilaisissa rakennustyypeissä on esitetty. Rakennusten vaurioriskiä käsitellään erikseen standardissa ISO 4866 (Jones, 2009 s. 402–405).

Standardin 2631-2 tapa tulkita ihmistä häiritsevää tärinää on taajuusriippuvaisten referenssikäyrien kautta, jossa pohjakäyrää kerrotaan eri tekijällä rakennustyyppistä ja vuorokaudenajasta riippuen. Kertoimet vaihtelevat välillä 1...128, sairaaloista ja laboratorioista työpajoihin ja tehtaisiin. Junaliikennettä käsitellään jatkuvana tärinänä ja sen pohjakäyrän kerroin asuinalueilla on 1,4...2,0 (Griffin 1990, s. 256). Käyrästä on esitetty kuvassa 4.1, ja se esittää ihmisen asennosta riippumattoman värähtelynopeuden jolla tärinän havaitseminen ja siitä häiriintyminen on mahdollista (PrognosVib, 2002, s. 22).



Kuva 4.1. Tärinän häiriön raja-arvot eri kohteissa ISO 2631-2 mukaan (PrognosVib 2002, s. 22).

### 4.3 DIN 4150-2 – standardi

Saksan standardoimiskomitean DIN 4150-2 koskee rakennusten värähtelyn vaikutusta ihmiseen. Värähtelyä käsitellään tärinän tunnuslukua  $v_w$  vastaavan dimensiottoman yksikön KB kautta (PrognosVib 2002, s. 25).

$$KB = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v_{\max}}{1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2}}, \quad (4.1)$$

missä  $v_{\max}$  on värähtelyn huippunopeus  
 $f_0$  vertailutaajuus (= 5,6 Hz)  
 $f$  vallitseva taajuus hertseinä.

Värähtelyjen vertailuarvot vaihtelevat alueittain käyttötavan mukaan, taulukko 4.3. Värähtelynopeuden tehollisarvon huippuarvon  $KB_{F_{\max}}$  tulisi olla pienempi kuin  $A_u$ . Mikäli ehto ei täyty, on tarkasteltava vuorokauden keskimääräistä tehollisarvoa  $KB_{F_{Tr}}$ , jonka on oltava pienempi kuin  $A_r$ . Jos  $KB_{F_{\max}}$  on suurempi kuin taulukossa esitetty vertailuarvo  $A_0$ , standardin vaatimukset eivät täyty (Kaaresoja 2007, s. 51).

*Taulukko 4.3. DIN – standardin mukaiset rajat värähtelyn määrälle (Kaaresoja 2007, s. 51).*

Tarkasteltava alue	Päivisin			Öisin		
	$A_u$	$A_0$	$A_r$	$A_u$	$A_0$	$A_r$
1. Teollisuusalueet	0,4	6,0	0,2	0,3	0,6	0,15
2. Pienteollisuusalueet	0,3	6,0	0,15	0,2	0,4	0,1
3. Asuinalueet, joita ei ole erityisesti rakennettu teollisuus-, elinkeino- eikä asuinalueeksi (keskustat, seka-alueet, kylät)	0,2	5,0	0,1	0,2	0,3	0,07
4. Asuinalueet, jotka on suunniteltu pääasiallisesti tai yksinomaan asuinkäyttöön	0,2	3,0	0,07	0,1	0,2	0,05
5. Erityisrakennukset (esim. sairaalat), jotka on tarkoituksellisesti sijoitettu häiriöttömälle alueelle	0,1	3,0	0,05	0,1	0,15	0,05

Standardi ottaa huomioon ensisijaisesti yksittäisen värähtelytapahtuman intensiteetin, ja sen ylittäessä raja-arvon siirrytään käsittelemään värähtelyn päivittäistä keskiarvoa (Kaaresoja 2007, s. 50-51). Menetelmä on siis hyvin erilainen kuin VTT:n suosittama, jossa arvioidaan 15 merkitsevimmän tapahtuman tunnuslukua viikon mittaiselta ajanjaksolta.

#### **4.4 BS 6472 – standardi**

Britannian oma vastine ISO:n ohjeille julkaistiin vuonna 1984 paikkaamaan standardin hidasta edistymistä. BS 6472 on huomattavasti yksinkertaisempi kuin ISO 2631, mutta eroavaisuuksia löytyy enimmäkseen vain impulssimaisen värähtelyn käsittelystä (Griffin 1990, s. 444). Uusin versio, 6472-1 “Guide to evaluation of human exposure to

vibration in buildings. Vibration sources other than blasting” julkaistiin vuonna 2008. Huomattavaa on, että Britanniassa tärinän vaikutuksia käsitellään samalla tavalla kuin melua (PrognosVib 2002, s. 23).

Päivän tai yön mittaisen ajanjakson värähtelyjen kokonaismäärää kuvaava ”vibration dose value” VDV (dose = annos) saadaan laskettua kun integroidaan kiihtyvyyden a neljättä potenssia halutun ajanjakson yli ja ottamalla siitä neljäs juuri (Griffin 1990, s. 76).

$$VDV = \left[ \int_{t=0}^{t=T} a^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.2)$$

Tätä keskiarvotulosta voidaan käyttää muodostettaessa raja-arvoja sallitulle tärinän määrälle. Menetelmää käytetään esimerkiksi juuri Britanniassa (PrognosVib 2002, s. 23). Taulukossa 4.4 on esitetty VDV:n raja-arvot, jotka jakavat tärinän määrän eri todennäköisyyksillä aiheutuvien valitusten ja negatiivisten reaktioiden mukaan.

*Taulukko 4.4. Tärinäannoksen (VDV) raja-arvot, m/s<sup>1.75</sup> eriasteisille kommenteille asuinrakennuksista (PrognosVib 2002, s. 23).*

	Alhainen todennäköisyys negatiiviseen kommenttiin	Negatiivinen kommentti mahdollinen	Negatiivinen kommentti todennäköinen
Päivä	0.2-0.4	0.4-0.8	0.8-1.6
Yö	0.13	0.26	0.51

#### **4.5 SS 460 48 61 -standardi**

SS 460 48 61 ”Vibrationer och stötmätning och riktvärden för bedömning av komfort i bostäder” on Ruotsin versio värähtelyyn liittyvästä standardista. Se on hyvin samanlainen kuin Norjan standardi NS 8176, mutta tärinälle on asetettu uusien asuinalueiden kohdalle hieman löyhemmät raja-arvot. Raja-arvot on esitetty taulukossa 4.5. Hieman korkeammat rajat johtuvat laskennassa käytetyistä resultanteista, jotka ovat suurempia kuin esimerkiksi tehollisarvon tunnusluku  $v_{w,95}$ . Muissa standardeissa ei ole esitetty kiihtyvyydelle raja-arvoa. Lisäksi Ruotsin standardi on vähemmän lainvoimainen kuin Norjan.

*Taulukko 4.5. Ruotsin standardin ohjeelliset raja-arvot (Kaaresoja 2007, s. 49).*

Kriteeri	Uudet asuinalueet ja peruskorjattavat rata-alueet	Vanhat rata- ja asuinalueet
$v_{\text{res}}$ (mm/s)	$\leq 0,4$	$\leq 1,0$
$a_{\text{res}}$ (mm/s <sup>2</sup> )	$\leq 14,0$	$\leq 36,0$

## 5 TUTKIMUSALUE

### 5.1 Yleistä

Tämän tutkimuksen kohteena toimii Raunistulan asuinalue Turussa. Aiempien mittausten sekä asukkailta tulleiden palautteiden perustella on havaittu, että junaliikenteen tärinät aiheuttavat asuinviihtyvyyttä alentavia haittoja. Tutkimusalue rajautuu Raunistulan puistotien, Raunistulantien, Vanhan Tampereentien ja Toijala-Turku junaradan väliin, radan kilometrivälille 271+980...272+420. Alueen sijainti kartalla on esitetty liitteessä A.

Alueella vallitsee yleinen 40 km/h nopeusrajoitus, eikä alueella liiku raskasta liikennettä tai läpiajavia autoja. Raunistulan puistotie on alueen pääväylä ja sillä kulkee paljon liikennettä. Tutkimusalueen rajalla liikennöi Raunistulantietä pitkin kaksi bussilinjaa, Raunistulan puistotietä pitkin kahdeksan muutakin linjaa. Bussit eivät liikennöi yöllä. Kadut ovat asfaltilla päällystettyjä, lukuun ottamatta Siirintietä, joka on sorapäällysteinen. Ajohidasteita, jotka voisivat vaikuttaa tärinän määrään moottoriliikenteen osalta, ei alueella ole.

### 5.2 Pohjasuhteet

Raunistulan maaperä on tyypillistä lounaissuomalaista vanhaa merenpohjaa. Alue on hyvin tasaista, maanpinnan korkeus on keskimäärin tasolla +12,00. Ylin maakerros on 0,3...1,0 m paksu kuivakuorisavikerros, jonka vesipitoisuus on noin 20 % ja siipikairausten perusteella redusoimaton leikkauslujuus on 14...37 kPa. Seuraava maakerros on noin 20...25 metriä paksu savikerrostuma, jossa redusoimaton leikkauslujuus on 25...43 kPa. Saven alla on 5...10 m paksu silttiä ja hiekkaa sisältävä kerros. Ratavälillä 272+360...272+450 km savikerrokset ohenevat siten, että kohdalla 272+450 kaikkien savikerrosten yhteispaksuus on enää n. 11 m (Ramboll 2009, s. 3). Suoritetut kairaukset ovat päättyneet määräsyvyyteen tai kiveen, eikä kallion pintaa ole varmennettu porakonekairauksin. Tutkimusalueen länsipuolella jonkin matkan päässä maan pinta nousee melko jyrkästi paljaana kalliona tasoon +25,00 asti.

Tutkimusalueen lähiympäristössä on suoritettu yli kolmesataa pohjatutkimusta, joista kuitenkin vain 38 kappaletta on radan välittömässä läheisyydessä. Tutkimukset ovat paino-, täry-, puristinheijari- sekä siipikairauksia. Pohjavedenpinnan taso vaihtelee junaradan kohdalla välillä +1,3...+2,0. Pohjatutkimuskartta ja leikkaukset on esitetty liitteessä B.

### 5.3 Asutus

Rakennuskanta tutkimusalueella koostuu pääosin 1950-luvulla rakennetuista rintamamiestalo – tyyppisistä omakotitaloista, alueen kaakkoislaidalla on lisäksi kolme rivitaloa. Rakennukset ovat asukastietojen perusteella maanvaraisesti perustettuja tiili- ja puurunkoisia taloja, joissa on yhdestä kolmeen maanpäällistä asuinkerrosta. Lähinnä junarataa olevat talot ovat alle kymmenen metrin päässä radasta, kun taas alueen kaukaisimmat talot ovat noin kolmensadan metrin etäisyydellä.

### 5.4 Junaliikenne

Tutkimusalueen itälaidassa kulkee etelä-pohjoissuunnassa Toijala-Turku junarata, jolla on liikennöity jo vuodesta 1876 lähtien. Radalla kuljetettiin vuonna 2008 6,2 miljoonaa bruttotonnia kuormaa ja tehtiin 575 000 henkilöliikennematkaa (RHK 2008b, s. 35). Tavaraliikenteen määrä on hyvin suuri, se kattaa lähes neljänneksen koko rautatieverkon kotimaisesta kuormasta vuositasona. Nopeusrajoitukset erilaisille junatyypeille on esitetty taulukossa 5.1.

*Taulukko 5.1. Eri junille sallitut nopeudet Toijala-Turku – junaradalla (RHK 2009).*

Junatyyppi	Akselipaino	Nopeusrajoitus
Henkilöjuna	-	140 km/h
Tavarajuna	< 200 kN	120 km/h
	200–225 kN	100 km/h
	> 3000 t (kokonaispaino)	40 km/h

Käytännössä on havaittu että junat usein lastataan juuri ja juuri alle 3000 tonnin rajan, jolloin maksimoidaan kuljetuksen nopeus. Junan nopeus kasvattaa maaperään aiheutuvaa dynaamista kuormaa ja siten tärinän määrää. Painavampi juna myös kasvattaa kuvassa 2.3. esitettyä radassa tapahtuvaa pystysuoraa siirtymää, suurentaen tärinän amplitudia.

### 5.5 Junarata

Toijala-Turku junarata on yksiraiteinen. Sähköistys radalle saatiin muiden uudistusten yhteydessä vuonna 2000 (RHK 2000, s. 14). Rata on betonipölkyille maanvaraisesti perustettu rakenne, jonka kunnossapitotaso on normaali, taso 1. Kiskot, pölkyt ja päällysrakenne on uusittu vuonna 2007 tehtyjen perusparannusten yhteydessä (RHK 2008a, s. 18). Kiskojen hiontatyö suoritettiin vuonna 2008.

## **5.6 Kyselytutkimus**

### **5.6.1 Yleistä**

Ihmisten mielipidettä asuinympäristöstään voidaan arvioida usein eri menetelmin. Järjestäytyneet asukaskokoontumiset ja mielenilmaisut viittaavat siihen että alueella voi olla esimerkiksi laaja meluongelma. Myös yksittäisistä valituksista poliisille tai virastoille voi päätellä ongelmia olevan, mutta haitan laajuudesta on mahdoton saada käsitystä. Usein vahvat ja motivoituneet yksilöt, joilla on usko omien toimintojensa vahvaan vaikutukseen, aiheuttavat suurimman osan valituksista. Tämä ei tarkoita sitä että he olisivat hyviä kuvaamaan koko asukaskannan kantaa häiriön määrästä. Laboratoriokokeista saadaan paljon arvokkaita tuloksia ihmisen reaktioista meluun ja tärinään, mutta kliiniset olot ja ärsykkeet harvoin vastaavat tyypillisiä kotioloja ja häiriönlähteitä (Weinstein 1976, s. 232).

Kyselytutkimus on käyttökelpoinen keino selvittää asukkaiden mielipide tehtyjen toimenpiteiden vaikutuksesta (Talja 2005, s. 34). Kyselytutkimus voidaan suorittaa puhelimitse tai kasvotusten haastatellen, mutta nämä vaativat paljon aikaa ja resursseja. Yleisesti ihmiset vierastavat tällaisia kohtaamisia ja kieltäytyvät haastattelusta. Kirjeitse toimitettu kysely on taloudellinen vaihtoehto ja koetaan vähemmän tunkeilevaksi kuin edellä mainitut tutkimustavat. Kirjallinen kysely poistaa kasvotusten tehtävän kyselyn tulkinnanvaraisuutta niin haastattelijan kuin haastateltavankin osalta (Marans 1976, s. 130).

Kyselytutkimus on yleensä paljon herkempi mittari häiriöiden määrän ja voimakkuuden suhteen kuin mitä alueelta tulleista valituksista voisi päätellä (Pesonen 2005, s. 22). Tutkittaessa toimenpiteiden vaikutusta tällä seikalla ei pitäisi olla väliä sillä voidaan olettaa herkkyyden pysyvän samana tutkimusten välisenä aikana.

### **5.6.2 Asukaskysely 1**

Ensimmäinen asukaskysely jaettiin tutkimusalueen asukkaille 25.5.2009. Yhteensä 69 kirjekuorta toimitettiin asukkaiden postilaatikoihin, vain pari alueen taloa jäi ilman kyselyä lukitun portin tai muun esteen takia. Kuori sisälsi saatekirjeen sekä kyselylomakkeen, suomeksi ja ruotsiksi. Mukaan liitetyllä postimerkillä varustetulla palautuskuorella varmistettiin palauksen helppous sekä alennettiin vastauskynnystä. Kyselyssä kysyttiin asunnon ja asukkaan yleisten tietojen lisäksi tärinän havainnoimisesta ja määrästä, melusta sekä melun ja tärinän yhteisvaikutuksista ja eroista. Kyselylomake on esitetty liitteessä D, ja tutkimuksen tuloksia käsitellään kappaleessa 7.1.2.

Kyselytutkimuksen tavoitteena oli selvittää nykytilanteen mukainen junaliikenteen tärinästä ja melusta asukkaille aiheutuvan häiriön määrä sekä asuinalueen asukas- ja rakennuskanta. Kyselyssä oli yhteensä 29 kysymystä, joista yhdessä kysyttiin arviota



numeerisella asteikolla 0...10. Muut kysymykset käsittelivät tärinän ja melun häiritsevyyttä eri paikoissa ja aikoihin sekä häiriön toistuvuutta sanallisin asteikoin. Kyselyn täyttämiseen arvioitiin kuluvan noin kymmenen minuuttia. Aikaraja kyselyn palauttamiseen oli kymmenen päivää, myöhästyneet palautteet kuitenkin käsiteltiin normaalisti.

### **5.6.3 Asukaskysely 2**

Jälkimmäinen kysely toteutettiin samalla tavalla kuin ensimmäinenkin, ja se jaettiin asukkaille 16.12.2009. Jaettuja kirjeitä oli tällä kertaa vain 59 kappaletta. Kysymyksiä oli hieman muutettu, mutta käytännössä sisältö oli sama kuin ensimmäisessä kyselyssä. Lisäkysymyksillä kysyttiin talojen rakenteista sekä pyydettiin asukasta arvioimaan tärinän muutosta sekä sen vaikutusta asuinviihtyvyyteen. Kyselyn tavoite oli selvittää tärinänvaimennustoimenpiteiden vaikutus asukkaiden mielipiteeseen junaliikenteen tärinän ja melun häiritsevyydestä. Tutkimuksen tuloksia käsitellään kappaleessa 7.2.3.

## 6 TÄRINÄNVAIMENNUSRAKENTEET

### 6.1.Yleistä

Tärinän vaimentamiseen on kehitetty monia vaihtoehtoisia rakenteita kuten avoin ja täytetty kaivanto, maahan asennettu ponttiseinä, syvästabiloitu seinämä sekä kuplaseinä. Kaikki edellä mainitut ovat passiivisia vaimennusratkaisuja jotka eristävät kohteen tärinän lähteeltä. Aktiiviset, tärinän lähteen eristävät rakenteet, on rajattu tämän opinnäytetyön ulkopuolelle.

Vaimennusrakenteiden kustannuksista on varsin vähän tietoa, mutta tyypillisesti kaikkein tehokkaimmat menetelmät ovat myös kaikkein kalleimpia toteuttaa. Taulukossa 6.1 on esitetty eräiden rakenteiden kustannuksia, joista stabiloitu eristysseinämä on halvin ratkaisu ja kalleimmat menetelmät ovat aktiivisia vaimennusratkaisuja.

*Taulukko 6.1. Vaimennusrakenteiden kustannuksia (Hakulinen 1999, s. 17).*

<b>Ratkaisu</b>	<b>Tärinän alentuminen</b>	<b>Kustannus (€/m/raide)</b>
Rata perustettu kalkki/sementtipilareille	50 %	340
Kalkki/sementtipilari lokerikkoseinät	40 %	100
Ratapenkereen kasvattaminen	30 %	340
Rata perustettu teräsbetonilaatalle	60-80 %	680-1400
Kuplaseinä radan vieressä	50 %	?
Rata perustettu paalulaatalle	90 %	2000

Kaikilla rataosuuksilla ei edes ole mahdollista toteuttaa kaikkein suurimpia rakennusrakenteita, kuten paalulaatalle perustamista, joten menetelmät rajoittuvat entisestään. Rajoittavia tekijöitä voi olla esimerkiksi tilan puute tai luonne, sekä liikenteen katkaisemisen mahdottomuus yksiraiteisella osuudella.

## **6.2 Menetelmät**

### **6.2.1 Avoin ja täytetty kaivanto**

Maailmalla on käytetty ja tutkittu avoimia sekä täytettyjä kaivantoja koneperustusten vaimentamisessa jo vuosikymmeniä (Beskos et al. 1986, s. 1). Avoimen kaivannon menetelmä perustuu värinäaallon etenemisen katkaisemiseen väliaineella, jolla ei ole puristus- tai leikkauslujuutta, eli ilmalla. Värinä ei tällöin voi edetä kaivannon seinästä toiseen. Koska kaivannon syvyys kasvaa matalia taajuuksia vaimennettaessa hyvinkin paljon, voi kaivannon stabiliteetti koitua ongelmaksi (ESI Engineering 2002, s. 2). Lisäksi avoin kaivanto lähellä asuinalueita ei ole turvallisin vaihtoehto. Avoimen kaivannon stabiliteettiongelmat voidaan ratkaista täyttämällä kaivanto aineella, jonka leikkauslujuus on huomattavasti suurempi kuin alkuperäisellä aineella. Työteknisesti tämä voi kuitenkin olla kallista, kun poistetut maat joudutaan läjittämään muualle, ja täyttömateriaalin hankintakustannus voi olla suuri. Kaivantojen leveydellä ei ole vaimennuksessa merkitystä, mutta junaliikenteen aiheuttaman matalataajuisen värähtelyn takia niiden pitäisi olla jopa 25 m syviä (ESI Engineering 2002, s. 2).

### **6.2.2 Ponttiseinä**

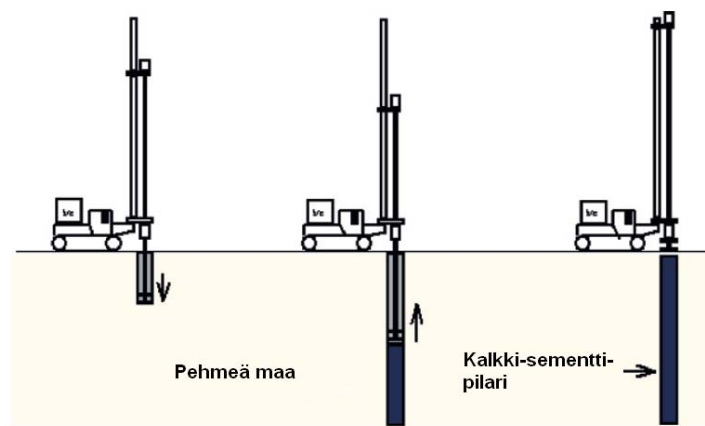
Maahan lyöty tai upotettu ponttiseinä heijastaa osan värinästä takaisinpäin. Rakente on helppo toteuttaa, mutta maahan jätettävistä teräsponteista voi koitua suuri kustannus. Tilantarve rakenteelle ja asennukselle ovat pienemmät kuin esimerkiksi stabiloinnissa, jolloin menetelmä soveltuu hyvin esimerkiksi ahtaille katu- ja tonttialueille (Törnqvist 2004, s. 3). Ponttien asennus aiheuttaa värinää ympäristöönsä. Asennuksen aiheuttama värinä on luonteeltaan hyvin erilaista kuin junaliikenteen, eikä sen vaikutusalue ulotu kauas. Lyömällä asennettujen ponttien värinä on vähäisempää kuin täryttämällä asennettujen (Leppänen 2008, s. 47). Teräsponttiseinä vaimentaa erityisesti maan pystyvärähtelyjä muuttamalla maan värähtelyn seinämän pystysuuntaiseksi jännitykseksi. Maan ja pontin välinen adheesio pitää seinämän paikoillaan (Törnqvist 2004, s. 4). Vinoon asennetun ponttiseinän käyttö värinänvaimennukseen on patentoitu Destialle vuonna 2006.

### **6.2.3 Stabiloitu seinämä**

Stabiloitu seinämä vähentää maaperän värinää heijastamalla, vaimentamalla ja hajauttamalla sitä kohti tulevan värinäaallon (With et al. 2009, s. 1028). Pehmeitä maalajeja stabiloidaan yleensä erilaisilla kalkin ja sementin sekoituksilla, jotka reagoivat maaperän kanssa muodostaen luonnontilaista ainesta kovemman rakenteen. Myös muitakin aineita kuten teollisuusjätteitä, esimerkiksi lentotuhkaa, voidaan käyttää sideaineena. Stabilointimenetelmiä on kaksi erilaista: kuiva- sekä märkämenetelmä. Yleisemmin pohjoismaissa käytetty menetelmä on kuiva, jossa aines lisätään maahan

paineilman avulla. Japanissa, Keski-Euroopassa ja Yhdysvalloissa käytetään märkämenetelmää, jossa sideaineeseen lisätään vettä ennen kuin se sekoitetaan maaperään (Koivisto 2004, s. 53).

Stabiloinnin työvaiheet ovat seuraavanlaiset: Ensin stabilointikaluston pyörivä kärki ulotetaan haluttuun määräsyyvyteen asti. Kärkeä nostettaessa ilman ja sideaineen sekoitus suihkutetaan ulos kärjestä, ja sekoitetaan maaperään pyörivällä liikkeellä (Bahrekazemi 2001, s. 20). Toimenpidettä on havainnollistettu kuvassa 6.1. Suihkutuksen paine määrää seoksen tunkeutumisetäisyyden ja siten pilarin halkaisijan. Halkaisija on tyypillisesti 500...800 mm (Tiehallinto 2001, s. 10).



Kuva 6.1. Kalkki-sementtipilarin teon työvaiheet (Bahrekazemi 2001, s. 20).

Stabilointipilareita voidaan asentaa erilaisiin muodostelmiin maahan. Pilareista voidaan muodostaa kapea yhtenäinen seinämä, kennomainen verkosto tai leveä blokki. Stabilointipilarit kovettuvat noin 30...90 päivää ennen kuin saavuttavat lopullisen lujuutensa. Lujuuden kehitys jatkuu vielä useita kuukausia, mutta tässä vaiheessa lujuuden lisäys on vähäistä. Pilarien pituus voi vaihdella, laitteiston rajoittama maksimipituus on yli 20 metriä (Tiehallinto 2001, s. 10) Saven stabiloinnilla voidaan saavuttaa leikkausaallon nopeuden kasvu alkuperäisestä 40...80 m/s jopa viisinkertaiseksi arvoon 200...400 m/s (PrognosVib 2002, s. 98).

## 6.3 Rakentaminen

### 6.3.1 Yleistä

Tärinänkatkaisuseinämän rakennus aloitettiin 24.7.2009, urakoitsijana toimi YIT Rakennus Oy. Vaimennusrakenteet asennettiin radan itäpuolen välittömään läheisyyteen, kilometrivälille 271+980...272+420. Pohjoiseen päähän rakennettiin stabiloiduista pilareista koostuva kennorakenne ja eteläosaan asennettiin teräsponttiseinää. Työteknisistä syistä rakentaminen aloitettiin ponttiseinämän

asennuksella ennen stabiloinnin aloitusta. Työmaan alueelle levitettiin kitkamaata parantamaan kantavuutta sekä helpottamaan työskentelyä savikolla, kuva 6.2. Työmaan päätyttyä tien maa-aines kasattiin vaimennusrakenteen kohdalle muodostamaan vaimennusta edistävä matala ylipenger joka samalla suojaa nykyisen maanpinnan yläpuolelle jääviä ponttien yläpäitä. Junaliikennettä ei katkaistu rakentamisen ajaksi. Rakennustyöt saatiin valmiiksi 9.12.2009. Vaimennusrakenteiden sijainti kartalla on esitetty liitteessä C, katkot vaimennusrakenteissa johtuvat maassa olevista kaapeleista ja putkista.

### **6.3.2 Ponttiseinämä**

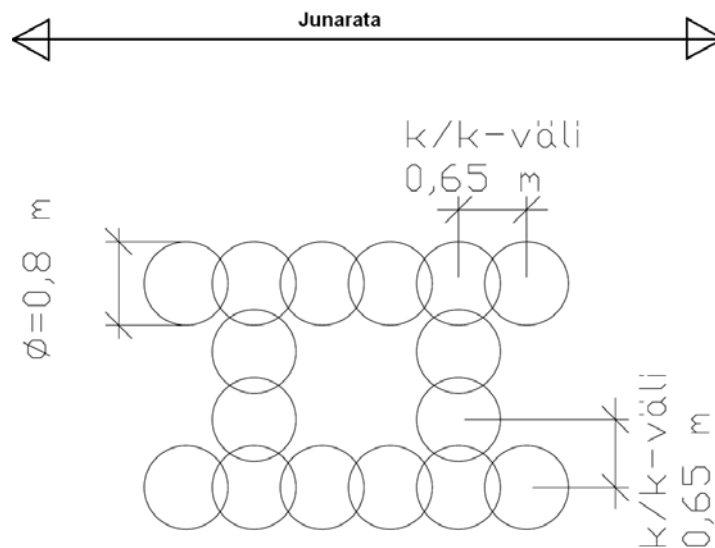
Pontit asennettiin pystysuoraan kilometrivälille 272+140...272+420 Bauer RG 16T työkoneella. Työ suoritettiin 2.9...2.10.2009. Ponttien pituus on 12 m, pontit ovat tyyppiä VL 603, jonka taivutusvastus  $W_y$  on  $1180 \text{ cm}^3/\text{m}$ . Ponttien päät liitettiin hitsiliitoksien kiinni jatkuvaan vaakapalkkiin, jolla estettiin yksittäisten ponttien uppoaminen haluttua asennustasoa syvemmälle. Vaakapalkki myös edistää ponttien toimintaa yhtenäisenä rakenteena. Rakentamisen aikaisen tärinän minimoimiseksi ponttien asennuksessa käytettiin varioivalla taajuudella toimivaa tärytintä, joka estää pontin asennuksesta aiheutuvan maan resonanssitilan muodostumisen. Vaimennusrakenteen päälle ylijäämämassoista rakennettu matala valli tiivistää alla olevaa maata ja auttaa vaimentamaan tärinää. Valli voi myös hieman suojata asuntoja junaliikenteen ääniltä.



*Kuva 6.2. Ponttiseinän asennusta sekä työmaatien tekoa.*

### **6.3.3 Stabiloitu seinämä**

Maaperään asennettiin 8.10...13.11.2009 junaradan viereen kalkkisementtipilareita 800 mm halkaisijalla limittäin keskeltä-keskelle välillä 0,65 m, kennomuotoiseksi rakenteeksi, kuva 6.3. Kenno- tai tikapuumuotoisen rakenteen on todettu vaimentavan matalataajuista tärinää tehokkaammin kuin yksittäiset pilarit (Koivisto 2004 s. 112). Rakenteen kokonaisleveys kohtisuoraan junarataa vasten on 2,7 metriä ja seinämän pituus junaradan suuntaisesti on 160 m, kilometrivälillä 271+980...272+140. 16 metriä pitkiä pilareita tehtiin yhteensä yli 10 000 metriä. Sideaineena pilareissa käytettiin 1:1 kalkki-sementtiseosta,  $160 \text{ kg/m}^3$  (Ramboll 2009).



Kuva 6.3. Stabilointipilareista muodostuva kennorakenne (Ramboll 2009).

#### 6.4 Tärinämittaukset

Tärinämittaukset suoritettiin Kalliotekniikka Oy:n sekä Promethor Oy:n toimesta kesäkuussa 2009 viikon mittaisena ajanjaksona. Mittaukset suoritettiin maaperästä sekä taloista. Taloista mitattiin tärinää yhdessätoista eri pisteessä, joista viisi oli talojen sokkeleihin kiinnitettyjä, yksi ensimmäisen kerroksen lattialla ja loput viisi yläkerran lattioilla olevia (Kalliotekniikka 2009, Promethor 2009). Kuva 6.4 esittää erään mittauspisteen laitteiston asettelun.



Kuva 6.4. Eräs mittari ja anturi asennettuna talon sokkeliin (Kalliotekniikka 2009, s. 5).

Tärinämittauksia suoritettiin yhteensä 46 eri pisteessä, viidellä eri mittalinjalla. Mittauspisteet on esitetty kartalla liitteessä G ja tärinämittausten tuloksia on käsitelty kappaleessa 7. Tärinämittauksen lisäksi 25 ohikulkeneen junan nopeus mitattiin tutkalla. Junien tunnistamiseksi aikataulut ja junatiedot tilattiin VR yhtymältä.

Mittauslaitteina tärinämittauksissa käytettiin Instancel MiniMate Plus – tärinämittaria ja kolmikomponentti antureita (Kalliotekniikka 2009, s. 1) sekä kiihtyvyyssantureita Metra KS-48B/C ja datatallentimena Rion DA-20 (Promethor 2009, s. 3). Näillä laitteilla saatiin kaikissa kolmessa akselissa tapahtuvan tärinän signaalit tallennettua yhdellä kertaa. Laitteistoja suojattiin sääolosuhteilta jätesäkein.



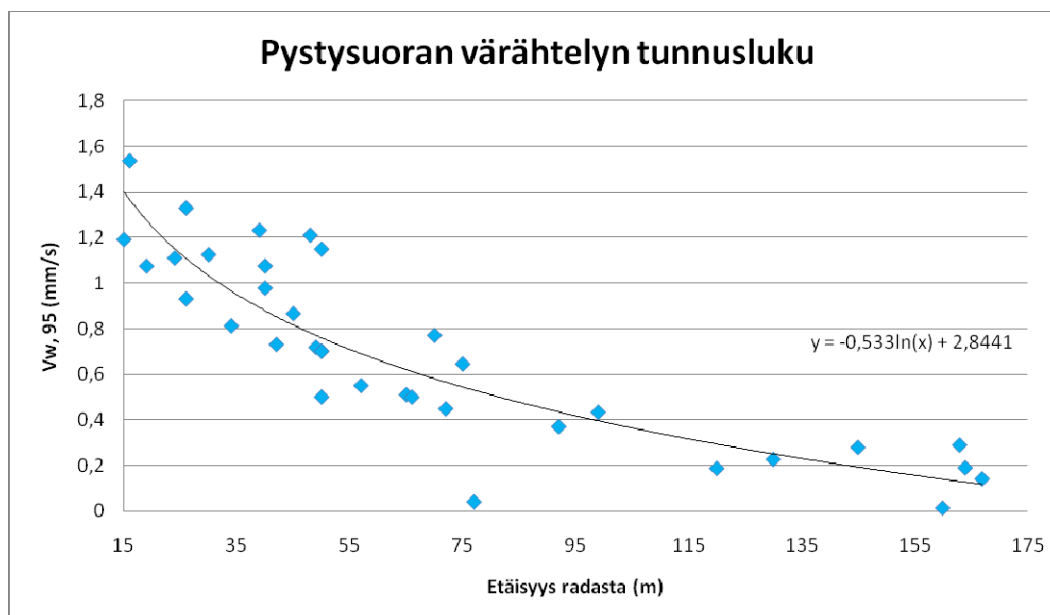
## 7 TUTKIMUSTULOKSET

### *7.1 Tutkimukset ennen vaimennusseinämien rakentamista*

#### **7.1.1 Tärinämittaukset**

Ennen katkaisuseinämän rakentamista tehdyt mittaukset ja kysely luovat käsityksen nykyisestä tärinän määrästä ja sen aiheuttamista haitoista. Ilman näitä tietoja on mahdotonta arvioida muutoksen määrää, joka työllä saavutetaan.

Tärinämittausten laajuudesta johtuen mittaustulosten määrä on hyvin suuri. Tulosten perusteella liikennetärinä oli mittausajankohtana erittäin voimakasta (Kalliotekniikka 2009). Taloista mitatut tärinät ylittivät osin selvästi VTT:n esittämät raja-arvot. Kolmessa mittapisteessä saavutettiin heikoin luokka, D ( $< 0,6$  mm/s), joka on hyväksyttävä tärinä vanhoilla asuinalueilla. Nämä kohteet olivat yli 75 metrin etäisyydellä radasta. Yksi kohde alitti luokan C raja-arvon 0,3 mm/s. Matkaa mittauspisteeltä rataan oli kuitenkin jo 163 m. Muissa mittauspisteissä, alle 50 m päässä radasta mitattiin yli 1 mm/s tunnuslukuja ja korkein arvo tavattiin 14 m päässä radasta, 2,84 mm/s. Vaurioiden mahdollisuus jälkimmäisessä rakennuksessa on korkea, heilahdusnopeuden resultantti ylittää VTT:n raja-arvon vauriomahdollisuudelle yli kaksinkertaisesti ( $v_{res} = 7,47$  mm/s). On kuitenkin huomiotavaa että VTT:n tutkimuksissa on todettu että nykyisillä rata- ja asuinalueilla luokan D raja ylitetään usein (Talja 2005, s. 26). Mittausten tuloksia on esitetty taulukoituna liitteessä H. Junaradan etäisyyden suhteen tärinän vaimeneminen noudattelee logaritmista funktiota, kuva 7.1.



Kuva 7.1. Pystysuoran värähtelyn tunnusluvun muutos etäisyyden funktiona.

Kuten odotettavissa oli, vallitsevan taajuuden keskiarvot jokaisessa mittauspisteessä olivat hyvin alhaisia muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Pystysuorien värähtelyjen taajuuksien yhteenlaskettu keskiarvo oli 6,3 hertsiä. Tyypillisesti savimailla hallitseva taajuus on 2...6 hertsiä (Hakulinen 1999, s. 7).

Alla esitetyissä taulukoissa 7.1...7.5 on eri mittalinjoilta mitattuja tuloksia – tärinän tunnusluku ja vallitseva taajuus kaikissa kolmessa akselissa sekä mittapisteen etäisyys rataa. Linjalta A ei ole mitattu muun kuin pystysuoran tärinän vallitseva taajuus. Yleisesti linjojen tulokset ovat keskenään hyvin samanlaisia, B-linja on kuitenkin lähes kaksi kertaa pidempi kuin muut ja siinä tapahtuva vaimeneminen on voimakkaampaa kuin muilla linjoilla.

Taulukko 7.1. Mittauslinja A.

mittapiste	x	z	y	z	etäisyys
	$v_{W,95}$ [mm/s]	$v_{W,95}$ [mm/s]	$v_{W,95}$ [mm/s]	f[Hz]	rataan [m]
a1	0,99	1,19	0,71	6,3	15
a2	0,83	0,93	0,58	6,3	26
a3	0,63	0,73	0,49	5	42
a4	0,32	0,51	0,19	6,3	65
a5	0,28	0,37	0,18	5	92

Taulukko 7.2. Mittauslinja B.

	x	z	y	x	z	y	etäisyys
mittapiste	$v_{W,95}$ [mm/s]	$v_{W,95}$ [mm/s]	$v_{W,95}$ [mm/s]	f [Hz]	f [Hz]	f [Hz]	rataan [m]
b1	0,80	1,21	1,02	6	6	5	21
b2	0,66	1,12	0,79	5	6	5	30
b3	0,49	0,87	0,48	5	6	5	45
b4	0,39	0,55	0,51	10	9	11	57
b5	0,25	0,50	0,29	11	12	5	66
b6	0,23	0,43	0,32	4	5	4	99

Mittauslinjan C tulokset eivät jostain syystä vaimenneet täysin lineaarisesti, vaan tärinän tunnusluku sai suuremman arvon 50 m etäisyydellä junaradasta kuin kymmenen metriä aikaisemmin. Huomionarvoista on että pisteet c5 ja c6 ovat lähempänä rataa kuin piste c4, eli pisteiden numeroinnissa ei ole lineaarisuutta.

Taulukko 7.3. Mittauslinja C.

	x	z	y	x	z	y	etäisyys
mittapiste	$v_{W,95}$ [mm/s]	$v_{W,95}$ [mm/s]	$v_{W,95}$ [mm/s]	f [Hz]	f [Hz]	f [Hz]	rataan [m]
c1	0,51	1,45	0,92	5	6	5	16
c6	0,64	1,07	0,34	4	6	5	19
c2	0,57	1,22	0,62	6	6	7	25
c5	0,66	1,33	0,37	5	6	6	26
c3	0,47	0,98	0,47	10	8	10	40
c4	0,37	1,15	0,46	5	5	5	50

Kaikkein homogeenisimmat tulokset saatiin mittauslinjalta D, jossa värähtelytaajuudet pysyvät samana ja eri akseleissa tapahtuva värähtely vaimenee samalla tavalla.

Taulukko 7.4. Mittauslinja D.

	x	z	y	x	z	y	etäisyys
mittapiste	$v_{W,95}$ [mm/s]	$v_{W,95}$ [mm/s]	$v_{W,95}$ [mm/s]	f [Hz]	f [Hz]	f [Hz]	rataan [m]
d1	0,66	1,28	0,70	6	6	6	17
d2	0,51	1,11	0,57	6	6	5	24
d3	0,41	1,07	0,35	5	5	5	40
d4	0,30	0,72	0,34	5	5	4	49

Mittalinjalla E, taulukko 7.5, on vähemmän rakennettua ympäristöä lähistöllä ja siinä tapahtuva vaimeneminen on melko heikkoa. Värähtely on pystysuunnassa suurempaa kuin muilla linjoilla, joka viittaa erilaisiin pohjaolosuhteisiin.

Taulukko 7.5. Mittauslinja E.

	x	z	y	x	z	y	etäisyys
mittapiste	$v_{W,95}$ [mm/s]	$v_{W,95}$ [mm/s]	$v_{W,95}$ [mm/s]	f[Hz]	f[Hz]	f[Hz]	rataan [m]
e1	0,73	1,67	0,79	6	6	6	15
e2	0,65	1,58	0,52	6	6	6	24
e3	0,54	1,23	0,60	5	6	5	39
e4	0,55	1,21	0,36	6	6	5	48

Mittauspisteiden pystysuoran värähtelyn tunnusluvun  $v_{w,95}$  tuloksia interpoloimalla muodostettu tasa-arvokäyrästä havainnollistaa maan värähtelyn määrän jakautumista tutkimusalueella. Kuvassa 7.2. punaisimmat alueet aivan junaradan tuntumassa kuvastavat voimakasta tärinää. Vihreillä alueilla tärinä on vähäistä ja alueet erottava vaalea viiva kuvastaa 0,6 mm/s värähtelynopeuden rajaviivaa.



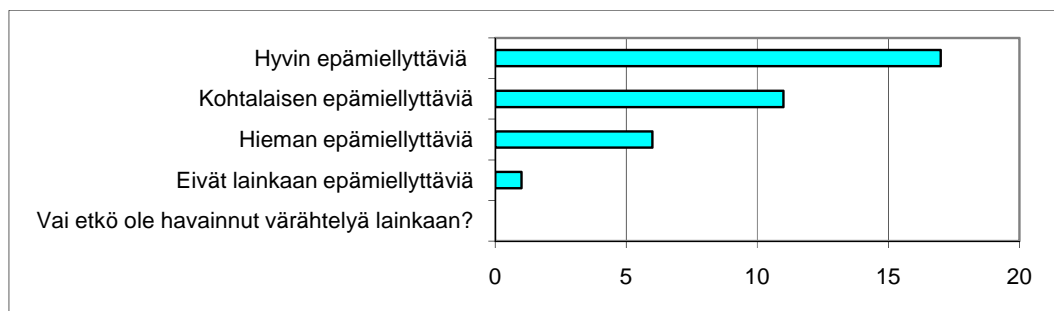
Kuva 7.2. Maan pystysuoran värähtelyn tunnusluvun tasa-arvokäyrästä sekä mittauspisteet.

### 7.1.2 Asukaskysely

Ensimmäiseen asukaskyselyyn vastasi 37 asukasta ja näin ollen vastausprosentiksi saatiin 54 %. Palautusten määrä on tyydyttävä, etenkin kun lähes kaikki radan välittömässä läheisyydessä asuvat ovat vastanneet. Vastajien sukupuoli jakautui lähes tasan, 60 % vastaajista oli miehiä. Melkein kaikki vastanneista olivat yli 40- vuotiaita, ja noin kolmasosa eläkeiän ylittäneitä. Noin 20 % vastanneista asuu yksin, muissa talouksissa on avo- tai aviopareja, joista 40 % on lapsiperheitä.

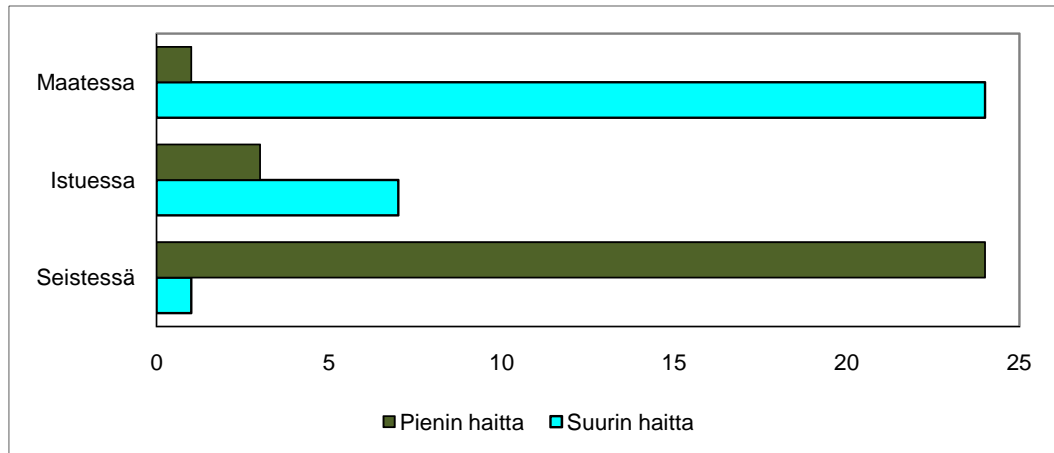
Asukkaat havaitsivat paljon tärinää ja se koettiin hyvin epämiellyttäväksi. Vain yhden vastaajan mielestä tärinät eivät olleet epämiellyttäviä ja vain yksi oli kokenut ettei junaliikenne aiheuta asunnossaan tärinää ollenkaan. Joka kolmannelta talosta on tehty valitus joko melusta tai tärinästä ja joka neljännessä talossa on suoritettu tärinämittauksia kuluvan vuosikymmenen aikana. Suurin osa vastanneista koki tärinän hyvin tai kohtalaisen epämiellyttäväksi, taulukko 7.6.

*Taulukko 7.6. Tärinän epämiellyttävyys asukaskyselyyn vastanneiden mielestä.*



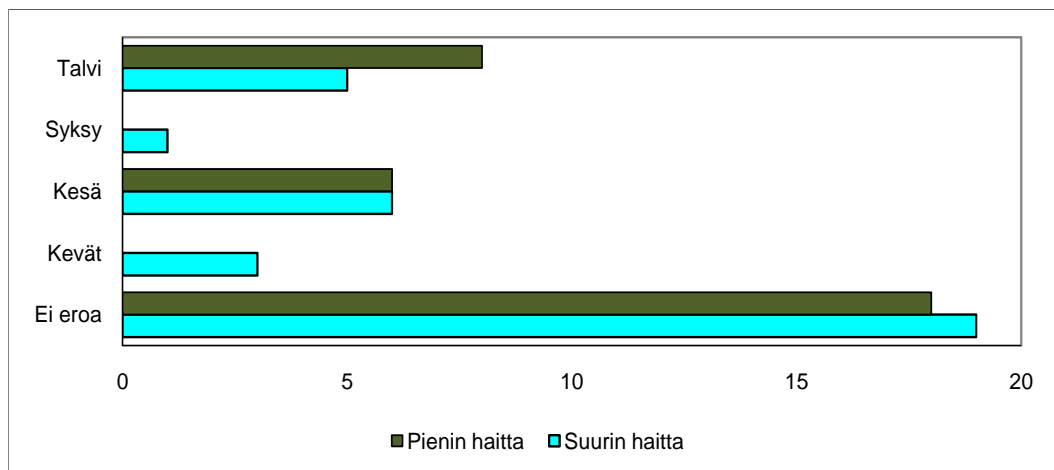
Kun tärinän epämiellyttävyyttä arvioitiin numeerisella asteikolla, 0...10, annettujen vastausten keskiarvoksi saatiin 8,2. Kaikkein häiritsevimmäksi tärinä havaittiin makuuasennossa ja vähiten seistessä, tämä viittaisi siihen, että asuinrakennusten lattioiden pystysuuntainen komponentti olisi määräävin, koska ihmiskeho havaitsee pystysuuntaisen liikkeen helpoiten makuuasennossa (Griffin 1990, s. 237). Asukkaiden vastukset tärinän häiritsevyyteen eri asennoissa on esitetty taulukossa 7.7.

Taulukko 7.7. Suurimman ja pienimmän haitan aiheuttavat asennot asukaskyselyn tuloksissa.



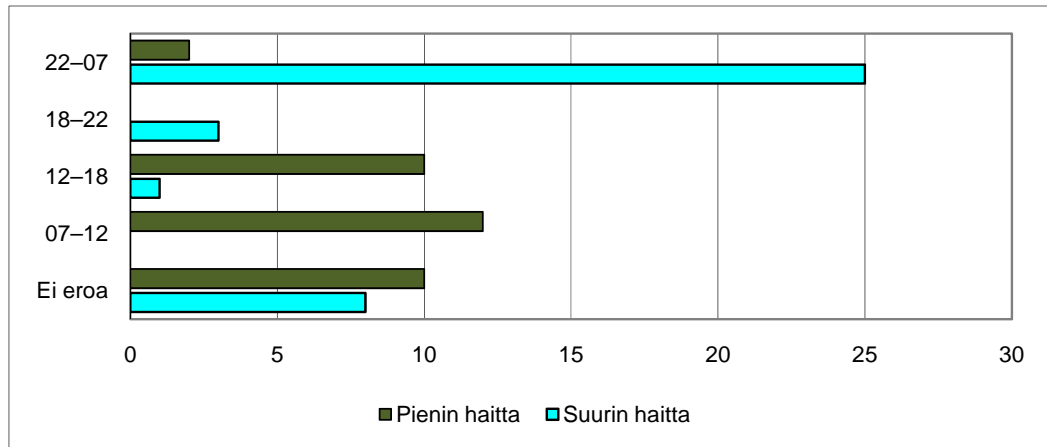
Vuodenaikojen välille ei muodostunut vastausten perusteella mitään eroa, kesää ja talvea ehdotettiin sekä suurimman että pienimmän tärinähaitan ajaksi, taulukko 7.8. Jäätyneen maan jäykkyys on suurempi kuin sulan (Ling et al. 2009, s. 10) ja vallitseva taajuus on korkeampi (Yang et al. 2008, s. 80), jolloin tärinän tulisi vaimentua nopeammin talvisin. Asukaspalautteiden perusteella ei voida tehdä aiheesta minkäänlaisia johtopäätöksiä. Toisaalta suuri osa vastaajista ei kokenut värähtelyssä eroja eri vuodenaikoina, joten asialla ei ole suurta merkitystä kokonaisuuden kannalta.

Taulukko 7.8. Eri vuodenaikojen vaikutus tärinästä aiheutuvan haitan määrään.



Vuorokauden aikana tärinän häiritsevyys on vastanneiden mukaan suurin illalla ja yöllä ja pienin aamulla ja päivällä. Tulokset on esitetty taulukossa 7.9. Pienimmän haitan vastauksessa oleva havaintojen tasaisuus viittaa siihen, että pienimmillään haittaa ei ole lähes ollenkaan ja sen ajankohtaa on vaikea määrittellä. Päivätoissa käyvät ihmiset ovat lähes aina poissa kotoa klo 07 ja 18 välillä, joten pienimmän haitan vastausten kertyminen tälle aikavälille on luonnollista.

Taulukko 7.9. Eri vuorokaudenaikojen vaikutus tärinästä aiheutuvan haitan häiritsevyyteen.



Erittäin suuri osa vastanneista, 75 % oli sitä mieltä, että häiritsevimmät tärinät tapahtuvat yöaikaan. Sama tulos on havaittavissa myös muista kysymyksistä sekä avoimista vastauksista.

*”Niin paikat rytiseen että pelkää nukkua yöllä”*

Tärinää esiintyy usein ja häiritsee paljon, mutta haitat koetaan lievemmin kuin mitä voisi odottaa. Taulukoista 7.10 ja 7.11 näkyy selvä painotus vastausten ääripäissä kun on kysytty tärinän ilmenenmismuotoja ja häiriön määrää.

Taulukko 7.10. Tärinän ilmenemisen määrä.

4. Kuinka usein tärinä ilmenee ja kuinka paljon tärinä häiritsee?

Ilmenemistapa	Kuinka usein ilmenee?			Kuinka paljon häiritsee?				
	Ei koskaan	Joskus	Useita kertoja päivässä	Ei merkitystä	Vähän	Melko vähän	Melko paljon	Paljon
Talo tärisee tai värähtelee		9	25		4	1	14	13
Kalusteet/astiat/ikkunat helisevät	3	7	21	2	3	1	13	10
Keho aistii värähtelyt		9	22	1	2	6	10	11
Muu:			5				3	2

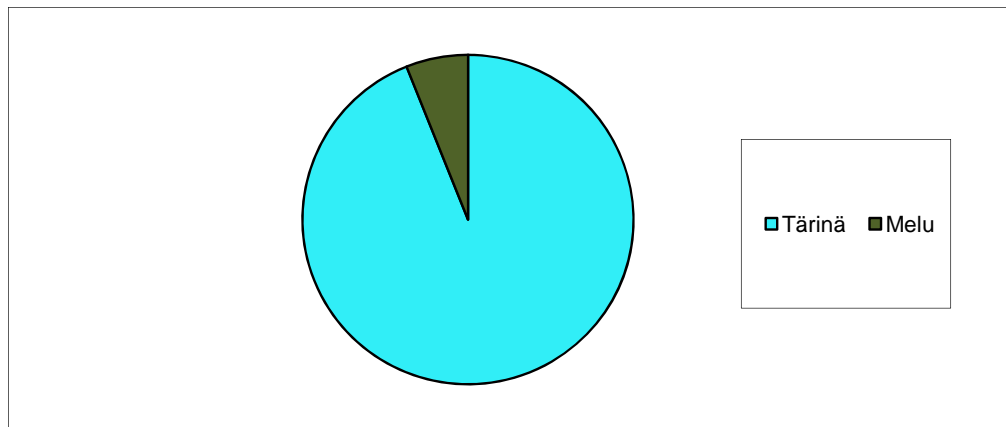
Taulukko 7.11. Tärinän haitan laatu ja määrä.

5. Kuinka usein tärinästä aiheutuva haitta esiintyy ja kuinka paljon haitta häiritsee?

Tärinästä aiheutunut haitta	Kuinka usein esiintyy?			Kuinka paljon häiritsee?				
	Ei koskaan	Joskus	Useita kertoja päivässä	Ei merkitystä	Vähän	Melko vähän	Melko paljon	Paljon
Vaikeuttaa nukahtamista	5	19	6	3	5	8	6	8
Herättää kesken unien	3	22	7	3	4	3	8	10
Häiritsee keskittymistä	4	14	10	3	8	4	8	4
Aiheuttaa pelkoa		13	18		3	1	4	23
Muu:			1					1

Vaikka keho aistii värähtelyt useita kertoja päivässä (70 % vastanneista) ja se häiritsee paljon tai melko paljon, aiheutuu siitä haittoja keskittymiseen tai lepoon vain joskus. Ainoana poikkeuksena on pelko rakenneaurioista, joka esiintyy usein ja häiritsee paljon. Talojen ulkopuolella tärinän havaitseminen on vähäisempää, mutta neljäsosa vastanneista silti piti tärinää hyvin epämiellyttävänä.

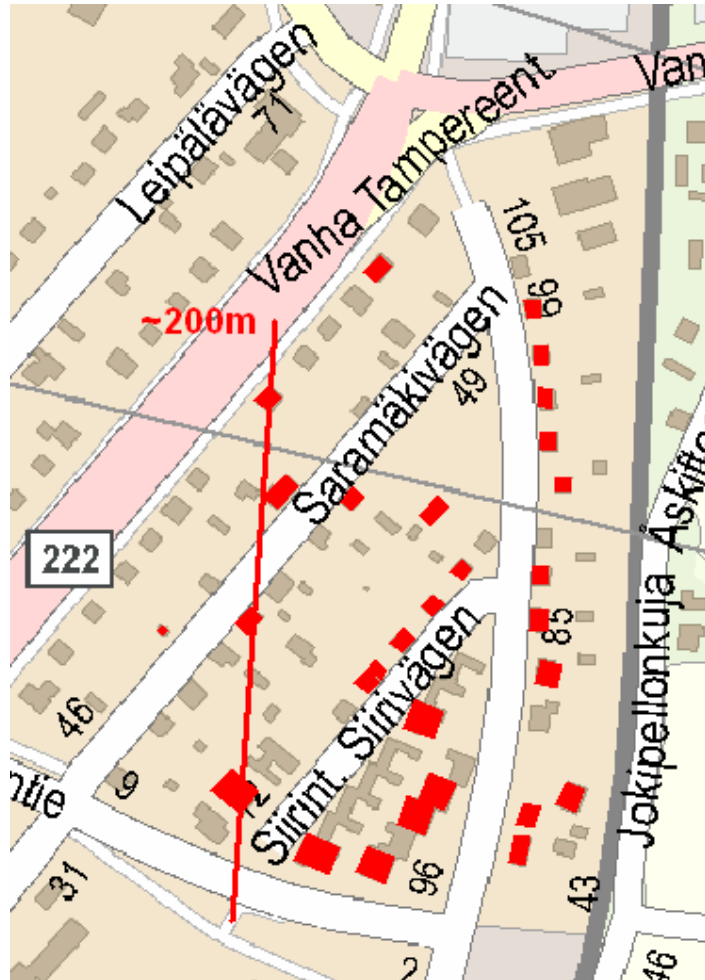
Melu koetaan asunoissa vastauksien perusteella lähes yhtä häiritseväksi ongelmaksi kuin tärinä, mutta tärinä on lähes kaikkien vastaajien mukaan häiritsevempi tekijä näistä kahdesta, kuva 7.3. Kyselytutkimuksen tuloksia on esitelty tarkemmin liitteessä E.



Kuva 7.3. Tärinän ja melun häiritsevempi tekijä asukaskyselyyn vastanneiden mielestä.

Kun kyselytutkimukseen vastanneiden osoitteet ja numeerisen vastauksen tulokset vietiin paikkatietojärjestelmään, havaittiin että vain yksi vastaus oli palautunut yli 200 metrin etäisyydeltä radasta. Tämänkin palautteen vastaus värähtelyjen epämiellyttävyyteen oli viisi, kun taas lähes kaikki lähempänä rataa asuvat vastasivat joko yhdeksän tai kymmenen. Kuvassa 7.4 on esitetty vastanneiden talouksien sijainti punaisin laatikoin. Kuvan ylä laidassa olevat suuremmat rakennukset kuuluvat autokorjaamolle eivätkä kuulu tutkimuksen piiriin, muutoin lähes kaikki radan välittömässä läheisyydessä asuvat vastasivat kyselyyn.





Kuva 7.4. Ensimmäiseen kyselyyn vastanneiden talouksien sijainti.

Tästä voidaan päätellä ettei tärinä häiritse yli kahdensadan metrin päässä olevia asukkaita ainakaan niin paljon, että he kokisivat tärkeäksi vastata aiheesta tehtyyn kyselyyn. Huomionarvoista on myös se, että nämä asunnot ovat lähimpänä vilkkaasti liikennöityä Raunistulan Puistotietä, jonka liikennemelu voi mahdollisesti peittää junaliikenteen aiheuttaman melua ja tärinää alleen. VTT:n arvion mukaan Saramäentien rakennukset, jotka ovat Raunistulan puistotien laidalla, kuuluvat edellä kuvatun vaikutuksen piiriin.

## 7.2 Tutkimukset vaimennusseinämien rakentamisen jälkeen

### 7.2.1 Tärinävaimennuksen jälkeinen tilanne

Tärinävaimennusrakenteiden valmistumisen jälkeen tehtävillä tutkimuksilla selvitetään saavutetun vaimennuksen määrää. Projektin viivästymisien takia jälkimmäiset mittaukset eivät ehtineet tähän opinnäytteeseen mukaan, joten vaimennuksen tehoa arvioidaan vain asukaskyselyjen perusteella.

## 7.2.2 Tärinämittaukset

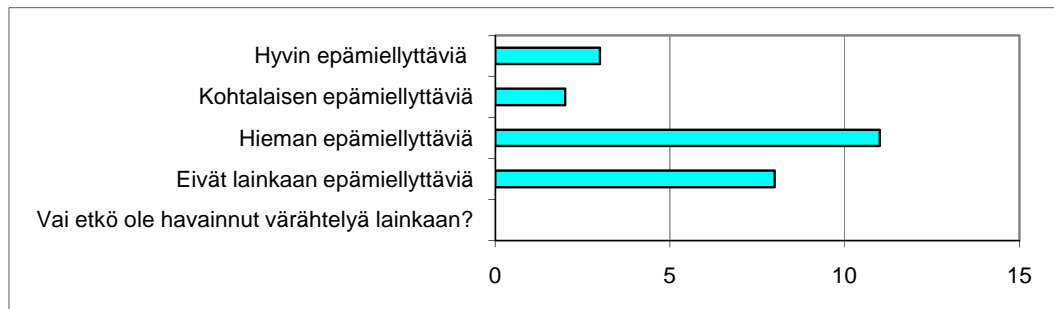
Jälkimmäinen mittausohjelma suunniteltiin hieman suppeammaksi kuin ensimmäinen, ja sen toteutus siirtyi rakentamisaikataulusta ja talven tulosta johtuen tämän opinnäytetyön aikataulua myöhemmäksi.

## 7.2.3 Asukaskysely

Toiseen asukaskyselyyn vastasi 26 henkilöä eli vastausprosentiksi muodostui 44 %. Sukupuoli, ikä ja asumismuodot jakautuivat samalla tavalla kuin ensimmäisessä kyselyssä. Yli 70 % asunnoista on kellari. Neljässä yksikerroksisessa rakennuksessa ei kuitenkaan ole kellaria, jolloin rungon resonanssiherkkyys on näissä taloissa tavallista suurempi verrattuna yksikerroksisiin, kellarillisiin rakennuksiin.

Asukkaiden havaitsemasta tärinän määrästä 21 % vastanneista koki tärinän hyvin tai kohtalaisen epämiellyttäväksi. Vaihtoehdon "tärinä ei ole lainkaan epämiellyttävää" valitsi kahdeksan vastaajaa, joka on 30 % vastaajista. Vastausmäärät on esitetty taulukossa 7.12. Numeerisella asteikolla 0...10 arvioituna tärinän epämiellyttävyyden keskiarvo oli 5,4.

Taulukko 7.12. Tärinän epämiellyttävyys



Suurimman ja pienimmän haitan aiheuttavaa asentoa ei voi tulosten perusteella luotettavasti arvioida, etenkin pienimmän haitan vastaukset jakautuivat hyvin tasaisesti jokaiselle vaihtoehdolle. Madaltuneet tärinän häiritsevyys ja havainnointitiheys luultavasti aiheuttavat sen, ettei tärinää enää niin selkeästi havaita, jolloin sille herkimmän asennon arvioiminen ei onnistu.

Taulukot 7.13 ja 7.14 kuvastavat tärinää, siitä aiheutuvia haittoja ja niiden merkitystä asukkaille. Häiriöt ovat vähäisiä ja satunnaisia, ainoastaan pelko rakenneaurioista esiintyy usein ja on melko paljon häiritsevä. Myös kesken unien herääminen on keskiarvoista useampaa ja häiritsevämpää.

Taulukko 7.13. Tärinän ilmenemisen määrä.

4. Kuinka usein tärinä ilmenee ja kuinka paljon tärinä häiritsee?

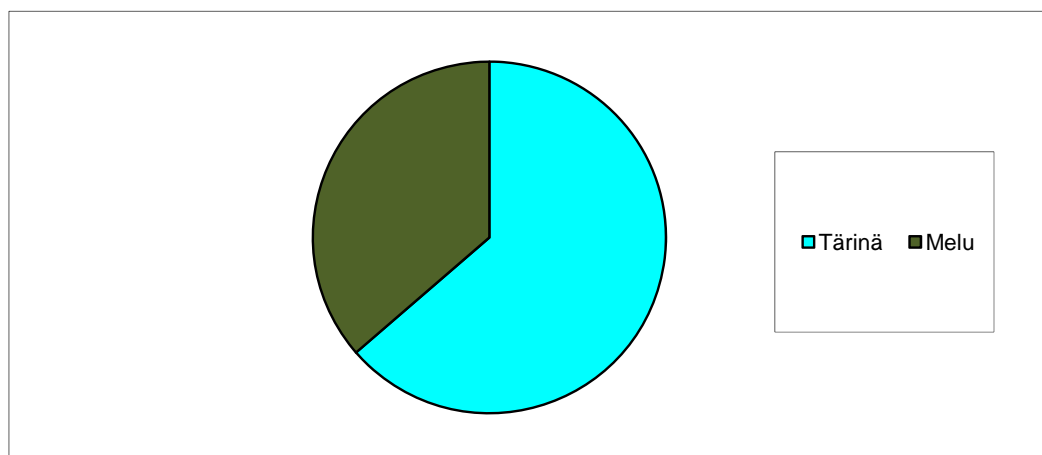
Ilmenemistapa	Kuinka usein ilmenee?			Kuinka paljon häiritsee?				
	Ei koskaan	Joskus	Useita kertoja päivässä	Ei merkitystä	Vähän	Melko vähän	Melko paljon	Paljon
Talo tärisee tai värähtelee	1	15	6	1	9	2	4	
Kalusteet/astiat/ikkunat helisevät	6	10	2	2	3	3	3	
Keho aistii värähtelyt		17	2	1	9	1	3	

Taulukko 7.14. Tärinän haitan laatu ja määrä.

5. Kuinka usein tärinästä aiheutuva haitta esiintyy ja kuinka paljon haitta häiritsee?

Tärinästä aiheutunut haitta	Kuinka usein esiintyy?			Kuinka paljon häiritsee?				
	Ei koskaan	Joskus	Useita kertoja päivässä	Ei merkitystä	Vähän	Melko vähän	Melko paljon	Paljon
Vaikeuttaa nukahtamista	11	7		6	2	2	2	1
Herättää kesken unien	10	11		3	1	2	5	1
Häiritsee keskittymistä	12	5		5	2		3	1
Aiheuttaa pelkoa rakenneaurioista	4	12	1	2	3	1	8	1

Tärinää talon ulkopuolella ei enää koettu epämiellyttäväksi, tai sitä ei havaittu ollenkaan. Suurin osa vastaajista totesi sen olevan enintään hieman epämiellyttävää, ja vain yksi koki sen kohtalaisen epämiellyttäväksi. Eniten haittaa muusta kuin junaliikenteen tärinästä aiheutuu liikenteestä sekä rakentamisesta tai vastaavasta toiminnasta. Tärinähaitan vähentyminen johti meluhaitan häiritseväksi arvioinnin yleistymiseen, kuva 7.5.

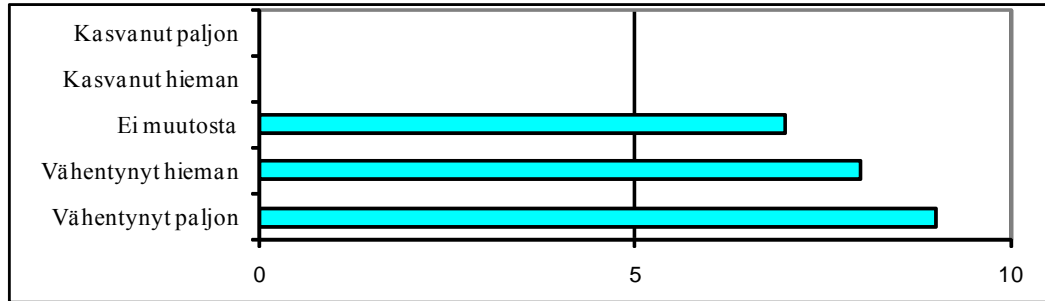


Kuva 7.5. Tärinän ja melun häiritsevempi tekijä asukaskyselyyn vastanneiden mielestä.

Neljäsosa vastaajista koki, ettei tärinän määrässä ollut heidän mielestään tapahtunut muutosta. Puolet vastaajista oli kuitenkin sitä mieltä että vähennystä on tapahtunut, eikä kukaan kokenut tärinän määrän kasvaneen. Kuten taulukosta 7.15 havaitaan, ei kukaan kuitenkaan ollut havainnut tärinän määrän kasvua.

Taulukko 7.15. Asukkaiden arvio tärinän määrän muutoksesta

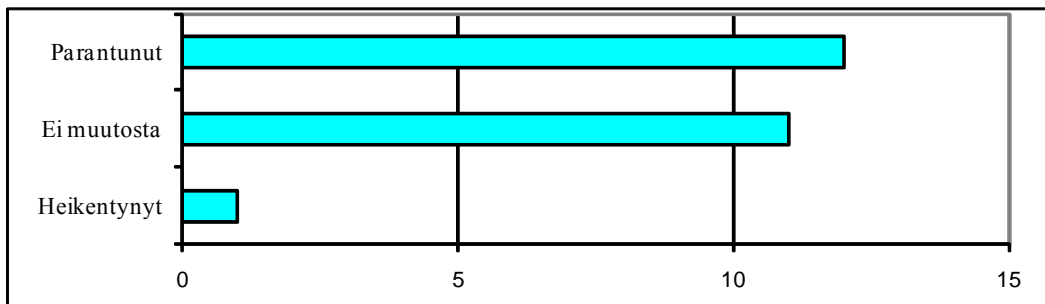
20. Tärinän määrän muutos



Vastaavanlaisesti, puolet vastaajista oli sitä mieltä, että asuinviihtyvyys on parantunut katkaisuseinämien rakentamisen jälkeen, taulukko 7.16. Kuitenkin toinen puolikas vastanneista koki, ettei viihtyvyydessä ole tapahtunut muutosta, yksi jopa koki sen heikentyneen.

Taulukko 7.16. Asukkaiden mielipide asuinviihtyvyyden muutoksesta

21. Onko asuinviihtyvyys mielestänne muuttunut verrattuna ennen kesää 2009 vallinneeseen tilanteeseen?



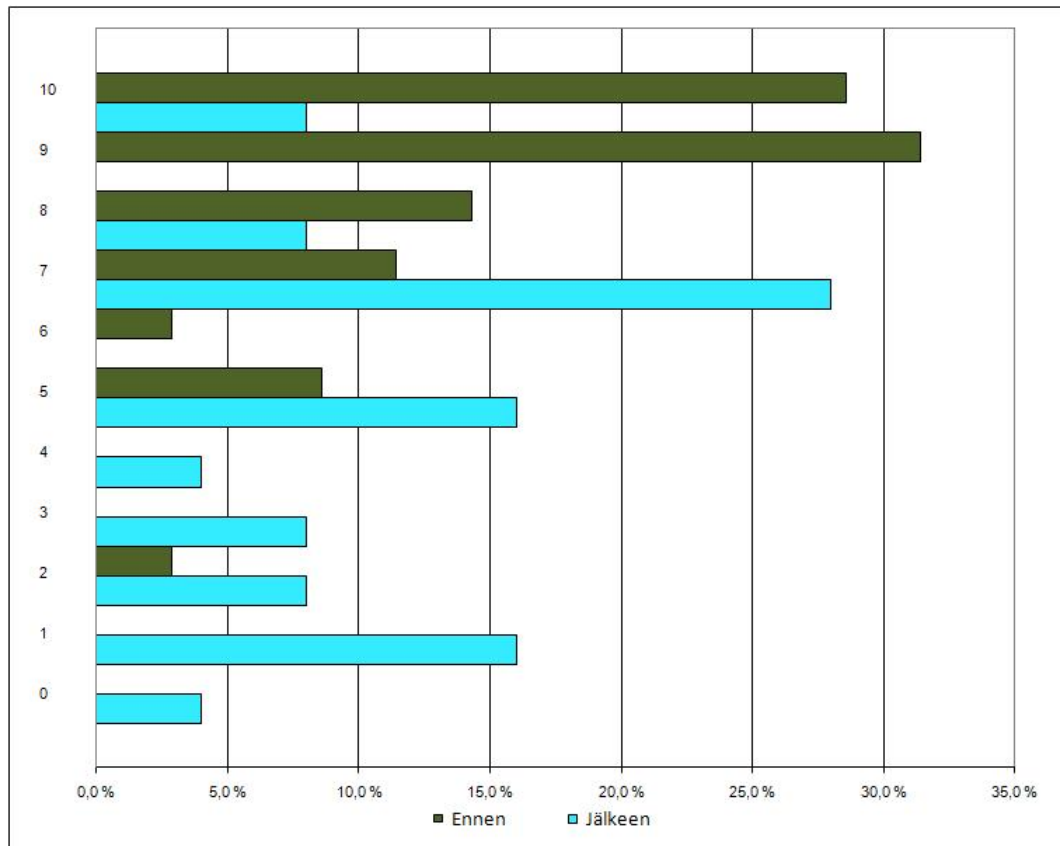
Vaimennusrakenteiden vaihtokohdan kohdalta saatiin keskiarvosta poikkeavia negatiivisia tuloksia asukaspalautteessa. Ponttiseinän ja stabilointipilarien välissä voi olla jonkinlainen epäjatkuvuuskohta, josta tärinä pääsee läpi vaimentamattomana. Eri vaimennusrakenteiden vaikutusalueilla olevien vastausten väliltä ei löytynyt eroja, joten kyselytutkimustulosten perusteella ei voida todeta vaimennustehojen eroavaisuuksia. Lisäksi havaittiin, että palautteista jotka tulivat lähinnä Raunistulan Puistotietä olevista rakennuksista, melu koettiin häiritsevämmäksi kuin muun tutkimusalueen vastauksissa. Tuloksia on esitelty tarkemmin liitteessä F.

**7.3 Tulosten vertailu**

Asukaskyselyjen ennen ja jälkeen -tuloksia vertaamalla saadaan selville kuinka ihmisten havainnot tärinän häiritsevyydestä ovat vähentyneet. Numeerisen arvon keskiarvo laski 45 %, arvosta 8,25 arvoon 5,4. Taulukosta 7.17 nähdään kuinka numeeristen vastausten jakauma on muuttunut rajusti kyselyiden välillä. Asteikon

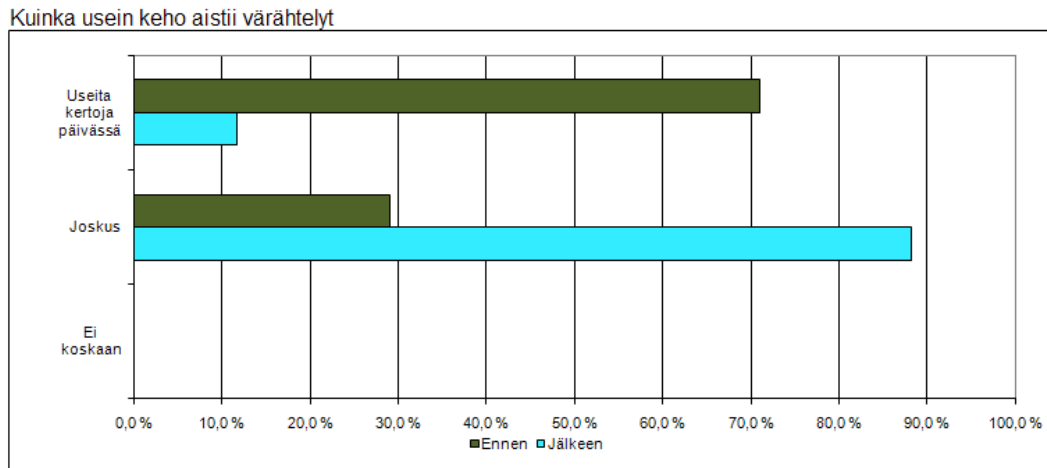
yläpäästä on leikkautunut pois suuri määrä vastauksia ja samalla hyvin alhaiset arviot muuttuivat yleisiksi jälkimmäisessä kyselyssä.

*Taulukko 7.17. Tärinän häiritsevyyden numeeriset arviot, ennen ja jälkeen tärinävoimennuksen*

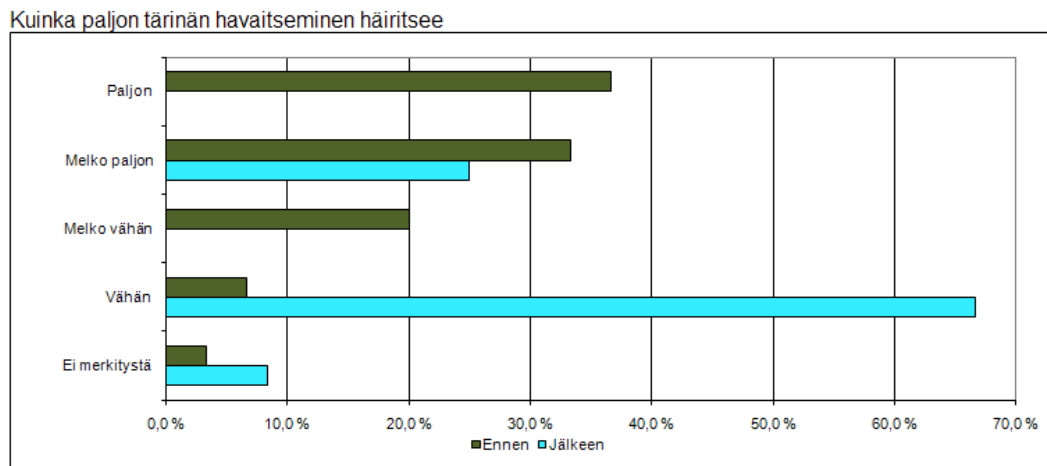


Muutoinkin tärinän haittoja koettiin harvemmin ja ne olivat lievempiä. Haittoja, jotka aiemmin esiintyivät usein tai joskus, ei enää esiintynyt paikoin ollenkaan. Merkittävänä poikkeuksena tästä rakenneaurioiden pelkoa esiintyi edelleen usein, ja se koettiin edelleen häiritseväksi. Taulukoissa 7.18 ja 7.19 on esitetty kuinka usein keho on havainnut tärinää ja kuinka häiritsevänä sitä on pidetty ennen ja jälkeen katkaisuseinämien rakentamisen.

Taulukko 7.18. Havaitun tärinän frekvenssi ennen ja jälkeen tärinävoimennuksen.



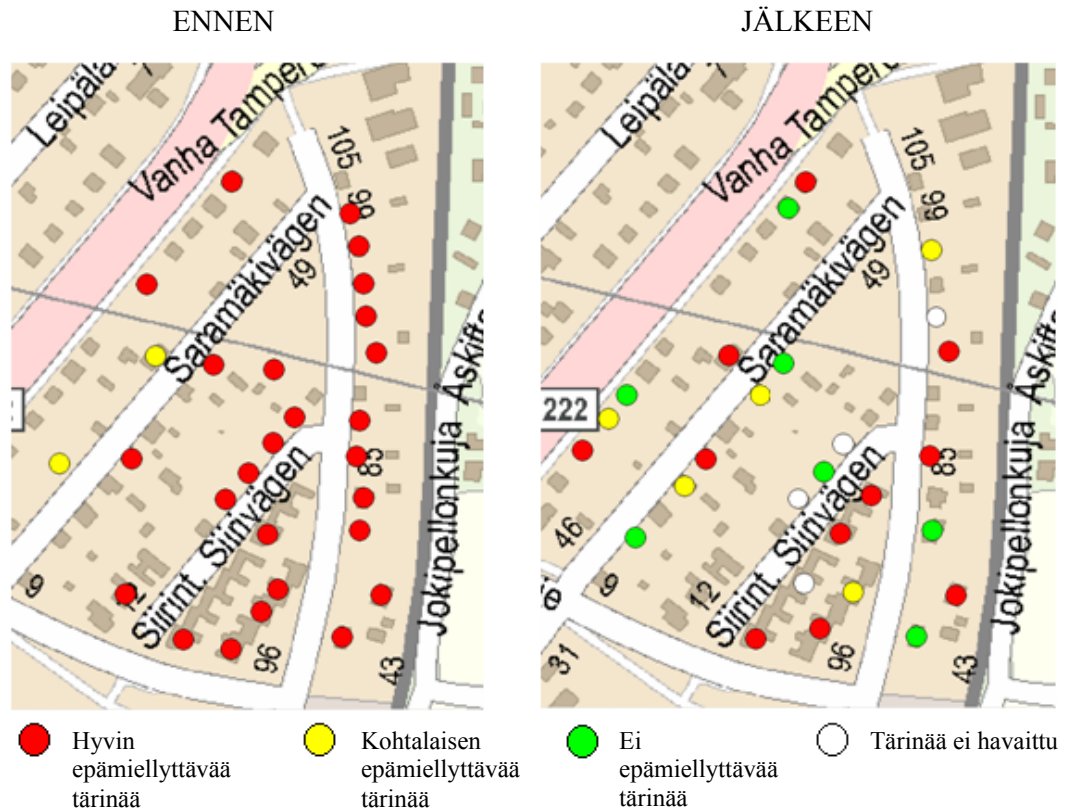
Taulukko 7.19. Tärinän havaitsemisen häiritsevyys, ennen ja jälkeen tärinävoimennuksen.



Häiritsevimmän vuorokaudenajan vastauksissa ei suurta muutosta kyselyiden välille muodostunut, vaan suurin häiriö koettiin edelleen ilta- ja yöaikana.

Selkeää kuviota tärinän haittojen vähenemiselle ei voitu muodostaa, kuten kuva 7.6 havainnollistaa. Vaikka tärinän haitta on vähentynyt, ei se näytä seuraavan mitään tiettyä logiikkaa etäisyyden suhteen. Päätelmiä tärinän yleisestä häiritsevyydestä on siten hankala tehdä. Tulos kuvastaa tärinän häiritsevyyden yksilöllisyyttä, vierekkäisistä rakennuksista saatiin sekä hyvin korkeita että alhaisia arvioita tärinän häiritsevyydelle. Kuvassa 7.6 on vasemmalla kuvattu tärinän häiritsevyyden tilanne ennen tärinävoimennustoimenpiteitä, ja oikealla sen jälkeen. Punaiset ympyrät kuvastavat hyvin epämiellyttävää tärinää, numeerisen asteikon arvoja 7...10. Keltaiset

ympyrät kohtalaisen epämiellyttävää (arvot 4...6) ja vihreät ei lainkaan epämiellyttävää tärinää (1...3). Valkoisissa kohteissa tärinää ei havaittu ollenkaan.



Kuva 7.6. Tärinän häiritsevyyys kyselytutkimuksen perusteella ennen ja jälkeen katkaisuseinämien rakentamisen.

Ennen rakentamista suoritetun kyselyn vastauksista kaikki vastaajat kokivat tärinän hyvin tai kohtalaisen epämiellyttäväksi. Jälkimmäisen kyselyn vastauksissa vastaava tulos oli laskenut 60 prosenttiin.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Yleensä rajana merkittävälle parannukselle tärinävaimennuksessa on pidetty 40...50 %, jolloin vaimennusta voidaan pitää kannattavana (Talja 2005, s. 13, Hakulinen 1999, s. 16). Soveltamalla samaa periaatetta kyselytutkimusten tuloksiin, voidaan todeta tärinävaimennuksen onnistuneen. Vastausten perusteella tärinän haitta oli pienentynyt suuresti, numeerinen arvio laski noin 45 %. Asuinviihtyvyyden parantumista havaittiin noin joka toisessa kyselyyn vastanneessa taloudessa. Vaikka asukaskyselyn tuloksista ei selkeää jakaumaa junaradan etäisyyden suhteen saatu, niin koko tutkimusalueelta saatiin positiivisia tuloksia. Jo pienilläkin teoilla voidaan aikaansaada vähennystä tärinän aiheuttamaan haittaan. Tämä näkyi jo rakentamisen aikana saatuna positiivisena palautteena asukkailta. Vaimennusta tässä vaiheessa oli saavutettu radan viereen rakennetusta työmaatienä toimivasta murskepatjasta sekä puolivalmiista ponttiseinämästä. Positiivista palautetta voi myös siivittää se, että asian eteen on tehty konkreettisia toimenpiteitä.

Pelko rakenneaurioista ilmenee selvästi jo pienilläkin tärinämäärillä. Esittämällä tutkimustuloksia ja faktoja, jotka todistavat rakenneauriot hyvin epätodennäköisiksi, voidaan yrittää lieventää asukkaiden pelkoja ja edistää viihtymistä. Ihmisten omakohtaiset kokemukset esimerkiksi putkijohdon rikkoutumisesta voivat vaikeuttaa asiaa. He eivät usko tärinän vaikutuksen rikkoutumiseen olevan pieni, vaikka todellinen syy voi olla jossain aivan muualla.

Ehdotuksia lisätutkimuksille:

- VTT:n ohjearvojen kriittinen arviointi olisi tarpeen, sillä nykyisen mittauskäytännön arvellaan vääristävän tuloksia, etenkin jos alueen suurimmat tärinät aiheuttaa yksittäinen juna jonka herätteestä aiheutuu muihin juniin verrattuna moninkertaisia värähtelynopeuksia.
- Nopeuden vaihtelun merkitystä dynaamiseen kuormaan tulisi tutkia tarkemmin. Tämänhetkiset tutkimusten mukaiset kiihdytyksen ja jarrutuksen lisäykset dynaamiseen kuormaan vaihtelevat kymmenistä satoihin prosentteihin. Jos suurimmat arviot pitävät paikkansa, tuovat ne esille uuden ulottuvuuden junaliikenteen tärinäihin.
- Ehdotus mahdollisille kenttäkokeille, jotka tosin vaativat mahdollisesti laajamittaiset koejärjestelyt. Rataosuus jossa voidaan ajaa samalla junalla useita kertoja pitkin suljettua rataosuutta. Menettelyllä poistetaan junien välisten erojen aiheuttamat vaihtelut tärinän herätteessä, ja voidaan paremmin keskittyä tutkimaan esimerkiksi nopeuden ja dynaamisten kuormien vaikutusta tärinään. Vaatii myös kaluston varaamista.
- Jatkossa pitäisi tehdä lisää mittauksia taloista ja selvittää niiden rakenteita, jos kiinnostusta asuinoloihin ja rakennusten tärinään löytyy. Maan värähtelyn siirtyminen rakenteisiin on niin rakennuskohtaista, ettei tarkkoja ennusteita tällä hetkellä voida tehdä.
- Tuleviin tärinävaimennusprojekteihin tulisi sisällyttää lyhyt asukaskysely ennen ja jälkeen vaimennusrakenteiden teon. Kyselyn tuloksilla voidaan mahdollisesti vahvistaa



tässä työssä esitetty korrelaatio asuinviihtyvyyden parantumiselle ja tärinän vaimennuksen väliselle suhteelle.

## 9 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin junaliikenteestä aiheutuvan värinän vaikutusta ihmisiin ja sen vaimentamista rakenteilla. Kirjallisuustutkimuksen lisäksi suoritettiin värinämittauksia ja kyselytutkimuksia sekä ennen että jälkeen värinävaimennusrakenteiden rakentamisen. Tavoitteena oli löytää yhteys värinän vaimenemisen ja asuinviihtyvyyden paranemisen välillä.

Ihmisen asunnossaan havaitsemat junaliikenteen värinät eivät aiheuta vaaraa ihmisille ja harvoin rakenteillekaan. Haittoina on kuitenkin arkielämän ja levon häiriintyminen ja pelko rakenteiden vaurioitumisesta, jotka alentavat asumisviihtyvyyttä. Ihmisten herkkyyden ulkoisille häiriötekijöille on havaittu olevan kasvussa.

Ihminen havaitsee värinän hyvin pienilläkin amplitudeilla ja nopeuksilla ja usein värähtely vahvistuu siirtyessään maaperästä asuinrakennuksiin. VTT:n ehdottamat ohjearvot ovatkin melko tiukat, suurin sallittu värähtelynopeuden vertailuarvo ( $v_{w,95}$ ) olemassa olevan väylän läheisyydessä on 0,6 mm/s, joka on yleistä kansainvälistä tasoa. Muista normeista poiketen vain Britannian standardi käsittelee melun ja värinän haittoja samalla tavalla.

Fysiologisen havainnon on todettu kasvavan lineaarisesti ärsykkeen intensiteetin mukaan, mutta havainnon suuruuden ja aiheutuvan häiriön välistä suhdetta on hankala arvioida. Subjektivisten käsitteiden mittaaminen on kuitenkin hyvin haastavaa ja herkkää monille ulkoisille tekijöille. Ihmisten mielipiteet ja vastaukset asukaskyselyissä voivat vaihdella suuresti suoritusajankohdan mukaan.

Tutkimusalueena toimi Raunistulan asuinalue Turun kaupungissa. Enimmäkseen maanvaraisesti perustetuista 1...3 kerroksisista omakotitaloista rakentuvan alueen maaperä on paksua savikkoa, jossa alueen laidalla kulkeva junarata aiheuttaa häiritsevää värinää. Lähimmät rakennukset ovat alle kymmenen metrin päässä junaradasta. Värinän vaimentamiseksi maahan asennettiin ponttiseinää sekä suoritettiin pilaristabilointia junaradan ja asutuksen väliin.

Värinän määrää ja sen häiritsevyyttä mitattiin värinämittauksin sekä kyselytutkimuksin ennen ja jälkeen värinävaimennusrakenteiden rakentamisen. Värinämittauksia suoritettiin ennen katkaisuseinämien rakentamista 46 eri pisteessä, rakennuksista sekä maaperästä, viidellä eri linjalla. Kyselylomakkeet jaettiin alueen kaikille asukkaille postitse.

Ennen värinävaimennusta mitatun värinän määrän havaittiin olevan suurta ja sen häiritsevyyttä koettiin usein ja paljon. Värähtelytaajuudet olivat odotusten mukaisesti matalia, noin 5...7 hertsiä, ja värinä vahvistui erityisen häiritseväksi talojen sisällä. Erityisesti värinä häytti keskustelua, iltaisin nukahtamista ja aiheutti pelkoa

rakennevaurioista. Keskiarvo asukaskyselyiden asteikolla 0...10 arvioidusta tärinän häiritsevyydestä oli 8,5.

Rakentamisen jälkeen suoritetulla kyselytutkimuksella havaittiin suuri lasku värähtelyn häiritsevyydessä etenkin radan läheisyydessä, jotkut asukkaat jopa totesivat tärinän loppuneen kokonaan. Tärinän haittavaikutusten vähentyessä, meluhaitat koettiin häiritsevämmiksi kuin ennen. Tärinän yleisarvion numeerinen arvosana laski vaimennusrakenteen vaikutuksesta noin 45 % arvoon 5,4 ja suurin osa asukkaiden palautteista oli erittäin positiivista. Puolet vastauksen lähettäneistä koki asumisviihtyvyyden parantuneen. Oletetulla tärinän puolittumisella saavutettiin näin ollen 50 % kasvu asuinviihtyvyydessä.

## LÄHDELUETTELO

Adam, M. von Estorff, O. 2005. Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches. *Computers and Structures* 83. s. 11-24.

Ahmad, S. Al-Hussaini, T. M. 1991. Simplified Design for Vibration Screening by Open and In-Filled Trenches. *Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 117:1. s.67-87.

Andersen, L. Nielsen S.R.K. 2005. Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25. s. 701-716.

Andersson, E. Berg, M. Stichel, S. 2007. *Rail Vehicle Dynamics*. Stockholm, Sweden. Centre for Research and Education in Railway Engineering.

Bahrekazemi, M. 2001. Lime-Cement Columns as a Countermeasure against Train-Induced Ground Vibration. Licentiate Thesis. Stockholm, Sweden. Royal institute on Technology, Division of Soil and Rock Mechanics.178 s. ISSN 1650-951X.

Beskos, D.E. Dasgupta, B. Vardoulakis, I.G. 1986. Vibration isolation using open or filled trenches – Part 1: 2-D homogeneous soil. *Computational Mechanics*. Vol. 1. s. 43-63.

ESI Engineering, Inc., Minneapolis, Minnesota. Brief Technical Notes on Vibration Monitoring & Control. Tuote-esite. 2 s. (An Informational Series, V9701). (<http://www.esi-engineering.com/V9701.PDF>)

Fyhri, A. Klæboe, R. 2009 Road traffic noise, sensitivity, annoyance and self-reported health—A structural equation model exercise. *Environment International* 35. s. 91-97.

Gescheider, G.A. 1997. *Psychophysics: The Fundamentals*. Mahwah, United States of America. Lawrence Erlbaum Associates. 435 s. ISBN 0-8058-2281-X.

von Gierke, H.E. Brammer A.J. 2002. Effects of Shock and Vibration on Humans. In: Harris. C. M. Piersol, A. G. (eds.) *Harris' Shock and Vibration Handbook*. McGraw-Hill. s. 42.1-42.62. ISBN 0-07-137081-1.

Griffin, M.J., 1990. *Handbook of Human Vibration*. London, United Kingdom. Elsevier Academic Press Limited.986 s. ISBN 0-12-303041-2.

Hakulinen, M. 1999. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A5/1999: Rautatietärinän mittauskäytäntö Pohjoismaissa Helsinki. Ratahallintokeskus. 22s. ISBN 952-445-023-2.

Hall, L. 2000. Simulations and analyses of train induced ground vibrations – A Comparative Study of Two- and Three-Dimensional Calculations with Actual Measurements. Doctoral Thesis. Stockholm, Sweden. Royal Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Soil and Rock Mechanics. 196 s. ISSN 1400-1284.

Hanson, C. E. & Meister, L. 2003. Anchorage Rail Capacity Improvements Noise and Vibration Study. Burlington. Harris Miller Miller & Hanson inc. HMMH Report No. 298680.01. 22 s.  
([http://www.akrr.com/pdf/PROJ\\_2005\\_Anch\\_Capacity\\_Noise\\_Study.pdf](http://www.akrr.com/pdf/PROJ_2005_Anch_Capacity_Noise_Study.pdf))

Hemilä, S. Utriainen, J. 1991. Värähtelyt ja aallot. Helsinki. Otatiето. 164 s. ISBN 951-672-126-5.

Hildebrand, R. 2003. Effect of soil stabilization on audible band railway ground vibration. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Vol. 24. s. 411-424.

de Hollander, A E M. 2004. Assessing and Evaluating the Health Impact of Environmental Exposures “Deaths, DALYs or Dollars?” Väitöskirja. Utercht. Universiteit Utercht. 211 s. ISBN 90-393-3703-9.

Howarth, H.V.C. Griffin, M.J. 1990a. The relative importance of noise and vibration from railways. Applied Ergonomics. Vol. 21.2. s. 129-134.

Howarth, H.V.C. Griffin, M.J. 1990b. The annoyance caused by simultaneous noise and vibration from railways. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 89:5. s. 2317-2323.

Hung, H.H. Yang, Y.B. Chang, D.W. 2004. Wave Barriers for Reduction of Train-Induced Vibrations. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering. Vol 130:12. s. 1283-1291.

Jones, C. 2009. Low Frequency Ground Vibration. In: Thompson, D. Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control. Oxford. United Kingdom. Elsevier Ltd. s. 399–436. ISBN 978-0-08-045147-3.

Kaaresoja, K. 2007. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 6/2007, Suomen rataverkon tärinäselvitys. RHK. 93 s. ISBN 978-952-445-191-3.

Kalliotekniikka. 2009. Liikennetärinämittaus Raunistulan tärinäseinäkokeilu. Kalliotekniikka Consulting Engineers Oy. 27.8.2009. 10 s.

- Koivisto, K. 2004. Katuliikenteen aiheuttaman tärinän vähentäminen syvästabiloinnin avulla. Diplomityö. Espoo. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. 120 s.
- Korpela, K. 2001. Mielipaikkojen ja epämiellyttävien paikkojen merkitys terveyden ja mielenterveyden kannalta. Teoksessa: Liikanen, H-L. (toim.). Suomen ympäristö 531 Hyvän asumisen ja elämisen elementit. Helsinki. Ympäristöministeriö. s.15–18. ISBN 952-11-1052-X.
- Kurkela, S. 2007 Junaliikenteen ympäristötärinän vähentäminen alusrakenteen stabiloinnilla. Opinnäytetyö. Lappeenranta. Etelä-Karjalan ammattikorkeakoulu, Tekniikan yksikkö. 57 s.
- Lambert, J. Champelovier, P. Vernet, I. 1996. Annoyance from High Speed Railway Noise: A Social Survey. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 193:1. s. 21–28.
- Leppänen, H. 2008. Paalutuksesta ja pontituksesta aiheutuva tärinä. Diplomityö. Tampere. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma. 120 s.
- Ling, X-Z. Zhu, Z-Y. Zhang, F. Chen, S-J. Wang, L-N. Gao, X. Lu, Q-R. 2009. Dynamic elastic modulus for frozen soil from the embankment on Beiluhe Basin along the Qinghai–Tibet Railway. *Cold Regions Science and Technology*. Vol. 57. s. 7-12.
- Marans, R. 1976. Perceived Quality of Residential Environments. In: Craik, K. Zube, E. (eds.) *Perceiving environmental quality*. Plenum Press. New York. USA. s. 123-147. ISBN 0-306-36309-7.
- Paulsen, R. Kastka, J. 1995. Effects on combined noise and vibration on annoyance. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 181:2. s. 295–314.
- Pesonen, K. 2005. Sosiaali- ja terveysministeriön selvityksiä 2005:14 Ympäristömelun haittojen arvioinnin perusteita. Helsinki. 174 s. ISBN 952-00-1684-8.
- Prakash, S. 1981 *Soil Dynamics*. USA. McGraw-Hill Inc. 426s. ISBN 0-07-050658-2.
- PrognosVib. 2002. Effects of vibrations from railway traffic. Delrapport 1 – Vibrationsproblem från spårbunden trafik. Banverket. Contract B01-1027/17. 114 s.
- Promethor. 2009. Turku, Raunistula, ennen pontitusta ja syvästabilointia tehty tärinäselvitys. Promethor Oy. 2.9.2009. 6 s.
- Ramboll. 2009. Raunistulan tärinäseinäkoikeilu, työselostus. Ramboll Finland Oy. 13.7.2009. 21 s.

Randall, J. M. Matthews, R. T. Stiles M. A. 1997. Resonant frequencies of standing humans. *Ergonomics*. Vol. 40. s. 879-886.

Rasmussen, G. 1982. Human Body Vibration Exposure and its Measurement. Technical Review to Advanced Techniques in Acoustical, Electrical and Mechanical Measurement. Brüel & Kjaer. 31 s.

Ratahallintokeskus. 2001. Vuosikertomus 2000. Ratahallintokeskus. 28 s.

Ratahallintokeskus. 2009. Ratahallintokeskuksen julkaisu F 2/2009: Rataverkon kuvaus 1.1.2009. Ratahallintokeskus. 72 s. ISBN 978-952-445-265-6.

Ratahallintokeskus. 2008a. Vuosikertomus 2007. Ratahallintokeskus. 32 s.

Ratahallintokeskus. 2008b. Suomen rautatietilasto 2008. Ratahallintokeskus. 54 s. ISSN 1239-7180.

Ratahallintokeskus. 2008c. Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 3 Radan rakenne. 89 s. Dnro 1090/041/2008.

Saari, K. 1990. Geodynamiikka. Teoksessa: RIL 157-2 Geomekaniikka II. Vaasa. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL r. y. s. 299-337. ISBN 951-758-213-7.

Sosiaali- ja terveysministeriö. 2003. Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003:1 Asumisterveysohje. Helsinki. 93 s. ISBN 1236-116X.

Sandover, J. Vibration and People. 1986. *Clinical Biomechanics*. Vol. 1:3. s. 150-159.

Talja, A. 2005. VTT tiedotteita 2278: Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. Espoo. VTT. 74 s. ISBN 951-38-6523-1.

Talja, A. Vepsä, A. Kurkela, J. Halonen, M. 2008. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi, VTT tiedotteita 2425. 176 s. ISBN 978-951-38-7197-0.

Thompson, D. Jones, C. 2006. Noise and Vibration from Railway Vehicles. In: Iwnicki, S. (ed.) *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. CRC Press. Boca Raton. USA. s. 279-325. ISBN 0-8493-3321-0.

Thompson, D. 2009. *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Oxford. United Kingdom. Elsevier Ltd. 518 s. ISBN 978-0-08-045147-3.

Tiehallinto. 2001. Syvästabiloinnin suunnitteluohje. Helsinki. 49 s. ISBN 951-803-305-6.

TTY. 2009. Rakentamisen aiheuttamat tärinät –projekti, Taustaselvitykset. Tampereen teknillinen yliopisto, maa- ja pohjarakenteet. Tampere. 130 s.

Törnqvist, J. 1.11.2004. Tärinän vaimennuksen tärytuoteratkaisu väyläkohteisiin: "Damp sheet". Esitys.

Törnqvist, J. Talja, A. 2006. VTT Working papers 50: Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. VTT. 80 s. ISBN 951-38-6602-5.

Vepsäläinen, P. 1985. Jännitys- ja muodonmuutostila. Teoksessa: RIL 157-I Geomekaniikka I. Espoo. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r. y. s. 220-240. ISBN 951-758-086-X.

VTT. 2001. Rautatieliikenteen tärinän vaikutus rakenteisiin – vaurioalttiuden kartoittaminen ja mittaaminen. Luonnos 16.11.2001. 55 s.

Vuolio, R. 1991. Räjätystyöt. Helsinki: Suomen Maarakentajien Keskusliitto ry. 318 s. ISBN 952-90-2761-3.

Weinstein, N. 1976. Human evaluations of environmental noise. In: Craik, K. Zube, E. (eds.) Perceiving environmental quality. Plenum Press. New York. USA. s. 229-232. ISBN 0-306-36309-7.

With, C. Bahrekazemi, M. Bodare, A. 2009 Wave barrier of lime–cement columns against train-induced ground-borne vibrations. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Vol. 29. s. 1027-1033.

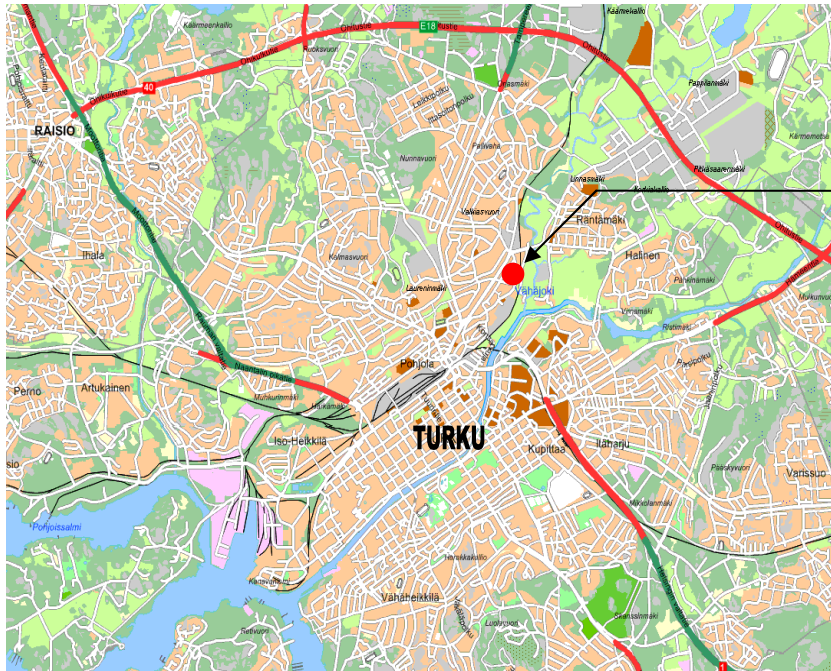
Yang, Z. Dutta, U. Xiong, F. Biswas, N. Benz, H. 2008. Seasonal frost effects on the dynamic behavior of a twenty-story office building. Cold Regions Science and Technology. Vol. 51. s.76-84.

Öhrström, E. 1997. Effects of Exposure to Railway Noise—A Comparison Between Areas With and Without Vibration. Journal of Sound and Vibration 205:4, s. 555-560.

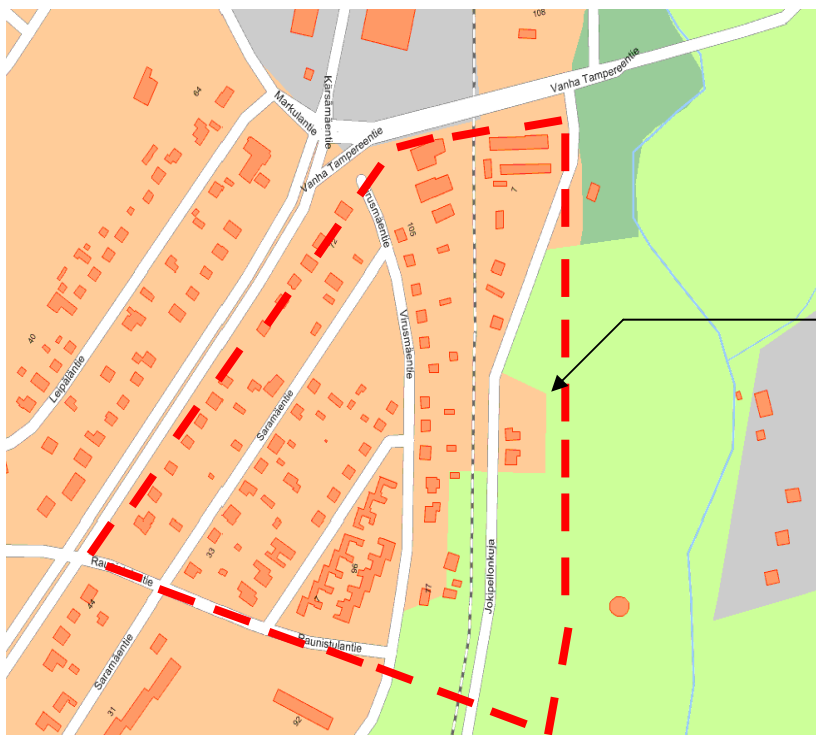


## **LIITELUETTELO**

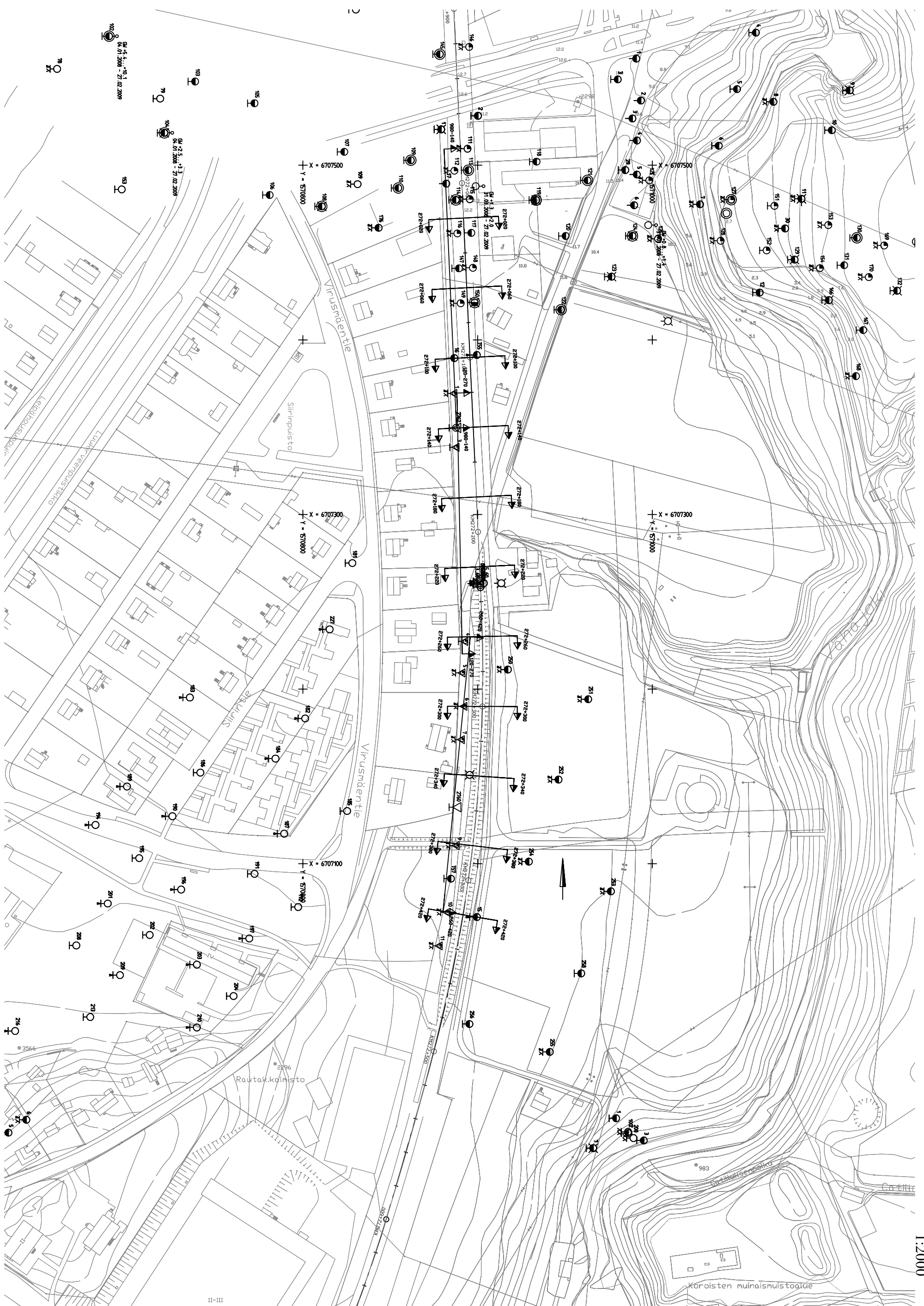
Liite A	Raunistulan koerakenteen sijainti
Liite B	Tutkimusalueen pohjatutkimuskartta
Liite C	Tärinävaimennusrakenteiden sijaintikartta
Liite D	Asukaskyselyn kyselylomake
Liite E	Ensimmäisen kyselytutkimuksen tulokset
Liite F	Toisen kyselytutkimuksen tulokset
Liite G	Mittauspisteet ennen tärinävaimennusten rakentamista
Liite H	Mittaustulokset ennen tärinävaimennusten rakentamista

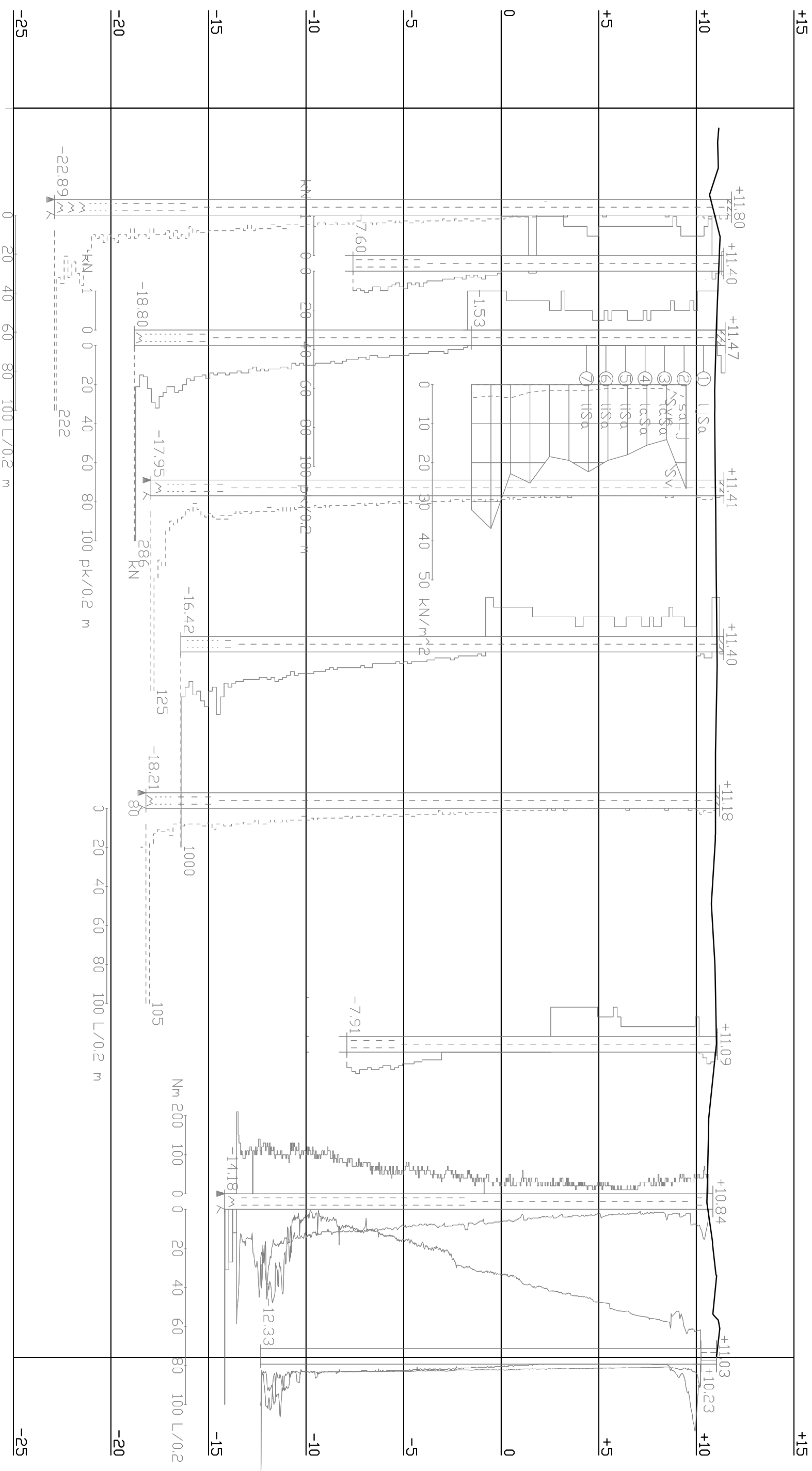


Raunistulan  
koerakenteen  
sijainti



Tutkimusalue









### ASUKKAAN YLEISARVIO

1. Oletko kokenut, että liikenne aiheuttaa tärinää tai värähtelyä huoneistossasi?  
Mikäli vastauksesi oli ei, niin siirry kohtaan 21.

Kyllä   
Ei

2. Kun ajattelet noin 12 viimeisen kuukauden aikaa, katsotko että tärinä tai värähtelyt ovat olleet:

Hyvin epämiellyttäviä	
Kohtalaisen epämiellyttäviä	
Hieman epämiellyttäviä	
Eivät lainkaan epämiellyttäviä	
Vai etkö ole havainnut värähtelyä lainkaan?	

3. Pyydämme Sinua vastaamaan samaan kysymykseen myös käyttäen numeerista asteikkoa. Valitse numero 0:sta 10:een siten, että 0 merkitsee tilannetta, jossa tärinä tai värähtelyt eivät ole olleet havaittavia ja 10 tilannetta, jossa ne ovat olleet erittäin epämiellyttäviä:

Värähtelyt eivät ole havaittavia	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Värähtelyt ovat erittäin epämiellyttäviä
----------------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	--

4. Kuinka usein tärinä ilmenee ja kuinka paljon tärinä häiritsee?

Ilmenemistapa	Kuinka usein ilmenee?			Kuinka paljon häiritsee?				
	Ei koskaan	Joskus	Useita kertoja päivässä	Ei merkitystä	Vähän	Melko vähän	Melko paljon	Paljon
Talo tärisee tai värähtelee								
Kalusteet/astiat/ikkunat helisevät								
Keho aistii värähtelyt								
Muu:								

5. Kuinka usein tärinästä aiheutuva haitta esiintyy ja kuinka paljon haitta häiritsee?

Tärinästä aiheutunut haitta	Kuinka usein esiintyy?			Kuinka paljon häiritsee?				
	Ei koskaan	Joskus	Useita kertoja päivässä	Ei merkitystä	Vähän	Melko vähän	Melko paljon	Paljon
Vaikeuttaa nukahtamista								
Herättää kesken unien								
Häiritsee keskittymistä								
Aiheuttaa pelkoa rakennevaurioista								
Muu:								

6. Missä asennossa tärinästä aiheutuva haitta on suurin?

Seistessä	Istuessa	Maatessa
-----------	----------	----------

7. Missä asennossa tärinästä aiheutuva haitta on pienin?

Seistessä	Istuessa	Maatessa
-----------	----------	----------

8. Mikä on vuodenaika, jolloin tärinästä aiheutuva haitta on suurin?

Ei eroa	Kevät	Kesä	Syksy	Talvi
---------	-------	------	-------	-------

9. Mikä on vuodenaika, jolloin tärinästä aiheutuva haitta on pienin?

Ei eroa	Kevät	Kesä	Syksy	Talvi
---------	-------	------	-------	-------

10. Mikä on vuorokaudenaika, jolloin tärinästä aiheutuva haitta on suurin?

Ei eroa	07-12	12-18	18-22	22-07
---------	-------	-------	-------	-------

11. Mikä on vuorokaudenaika, jolloin tärinästä aiheutuva haitta on pienin?

Ei eroa	07-12	12-18	18-22	22-07
---------	-------	-------	-------	-------

12. Minä viikonpäivänä ja mihin kellonaikaan yksittäinen liikenneväline aiheuttaa häiritsevimmän tärinän päiväsaikaan (07.00–22.00)?

13. Minä viikonpäivänä ja mihin kellonaikaan yksittäinen liikenneväline aiheuttaa häiritsevimmän tärinän yöaikaan (22.00–07.00)?

14. Missä päin taloa tärinä ilmenee?

Kerros

Ilmansuunta

15. Onko tärinä talon ulkopuolella:

Hyvin epämiellyttävää	
Kohtalaisen epämiellyttävää	
Hieman epämiellyttävää	
Ei lainkaan epämiellyttävää	
Vai etkö ole havainnut tärinää lainkaan?	

Kysymykset 16–18 koskevat liikenteestä sisätiloihin siirtyvää melua.

16. Kun ajattelet noin 12 viimeisen kuu-  
kauden aikaa, katsotko että melu on  
ollut:

Hyvin epämiellyttävää	
Kohtalaisen epämiellyttävää	
Hieman epämiellyttävää	
Ei lainkaan epämiellyttävää	
Vai etkö ole havainnut melua lainkaan?	

17. Kuinka usein melusta aiheutuva haitta esiintyy ja kuinka paljon haitta häiritsee?

Melusta aiheutunut haitta	Kuinka usein esiintyy?			Kuinka paljon häiritsee?				
	Ei koskaan	Joskus	Useita kertoja päivässä	Ei merkitystä	Vähän	Melko vähän	Melko paljon	Paljon
Vaikeuttaa nukahtamista								
Herättää kehen unien								
Häiritsee keskittymistä								
Häiritsee keskustelua								
Muu:								

18. Jos myös melu on häiritsevää, niin kuinka paljon liikennemelun poistuminen vaikuttaisi liikenteestä aiheutuvan tärinän epämiellyttävyyteen?

Ei merkitystä	Kohtalaisesti	Paljon	En osaa sanoa

19. Kumman koet häiritsevämmäksi, tärinän vai melun?

Tärinä  Melu

20. Jos havaitset melua ja tärinää, kumman havaitset ensin?

Tärinä  Melu

Tähän antamanne yhteystiedot ja muut taustatiedot ovat luottamuksellisia, eikä niitä luovuteta eteenpäin ulkopuolisille tahoille. Kysymme yhteystietojanne ainoastaan, jotta voimme tarvittaessa ottaa teihin uudelleen yhteyttä tutkimukseen liittyen.

21. Kuinka kauan olet asunut nykyisessä asunnossa?  vuotta

22. Onko liikenteen aiheuttamasta tärinästä tehty valitus? Kyllä  Ei

23. Onko liikenteen aiheuttamasta melusta tehty valitus? Kyllä  Ei

24. Onko rakennuksessanne tehty joskus tärinämittauksia? Kyllä  Ei   
Jos kyllä, niin koska? Aika  En tiedä

25. Mikä on talon rakennusmateriaali? \_\_\_\_\_

26. Mikä on talo kerroslukumäärä?  kerrosta

27. Vastaajan sukupuoli Mies  Nainen

28. Vastaajan ikä

-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	80+
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

29. Asumismuoto Lapsiperhe  Naimisissa tai avoliitossa, ei lapsia  Yksin asuva

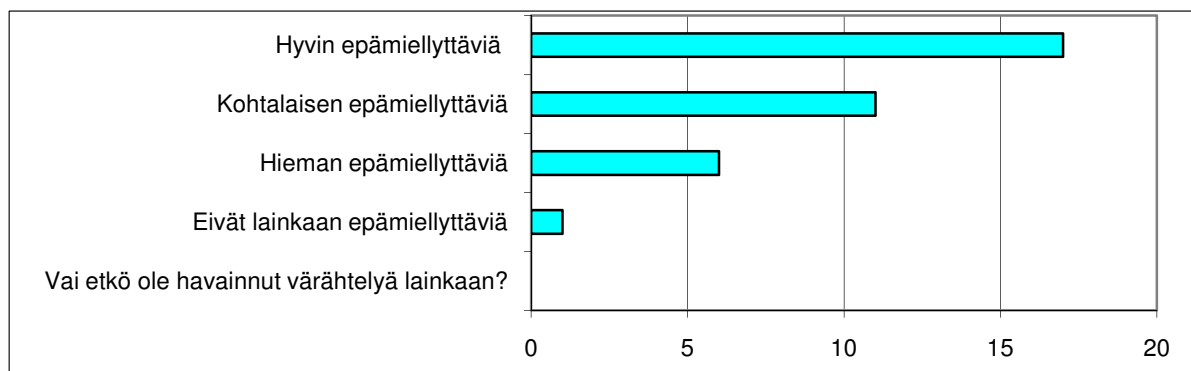
Arvioijan nimi:

Osoite:

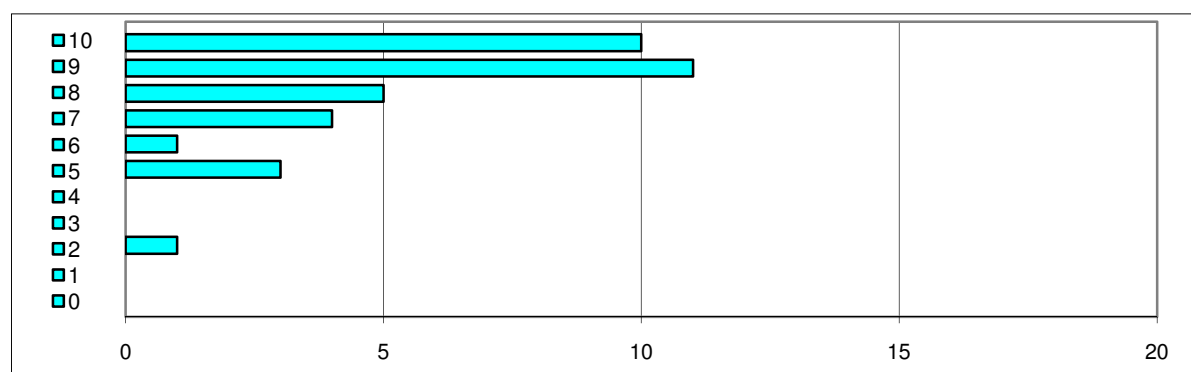
Vapaat kommentit:



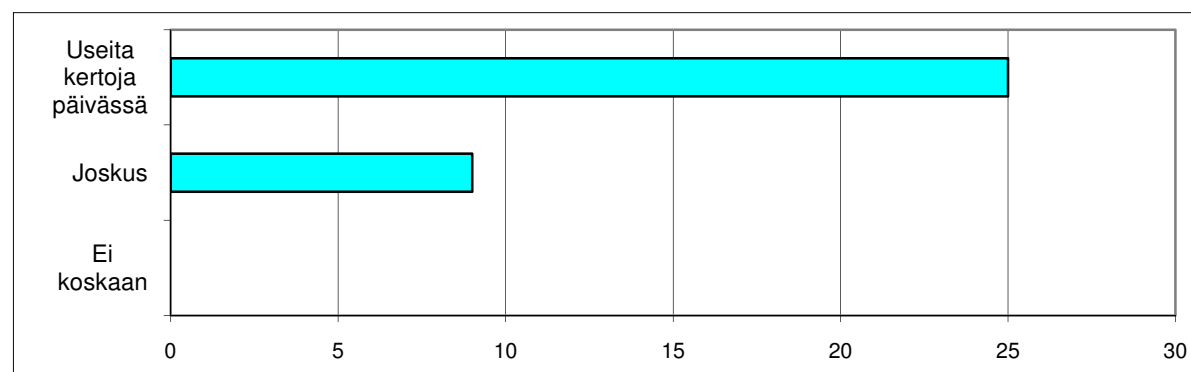
2. Kun ajattelet noin 12 viimeisen kuukauden aikaa, katsotko että värähtelyt ovat olleet:



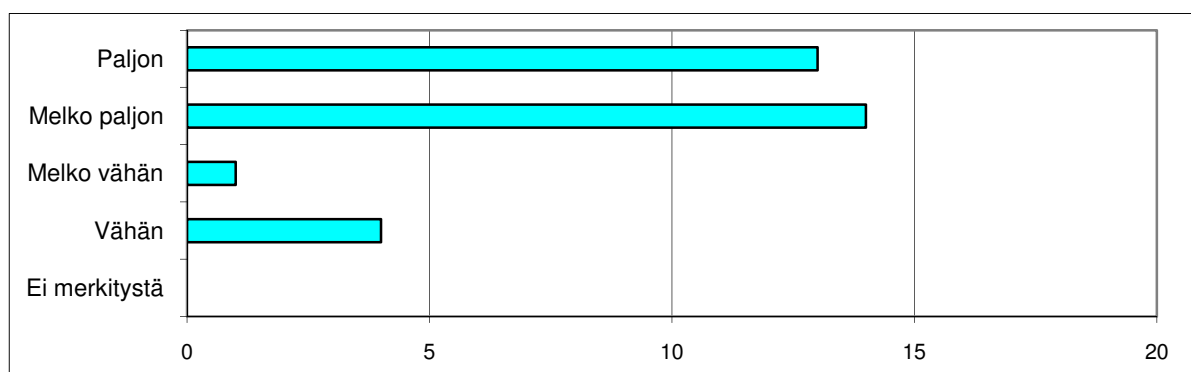
3. Värähtelyt ovat olleet numeerisella asteikolla: (0 - 10)

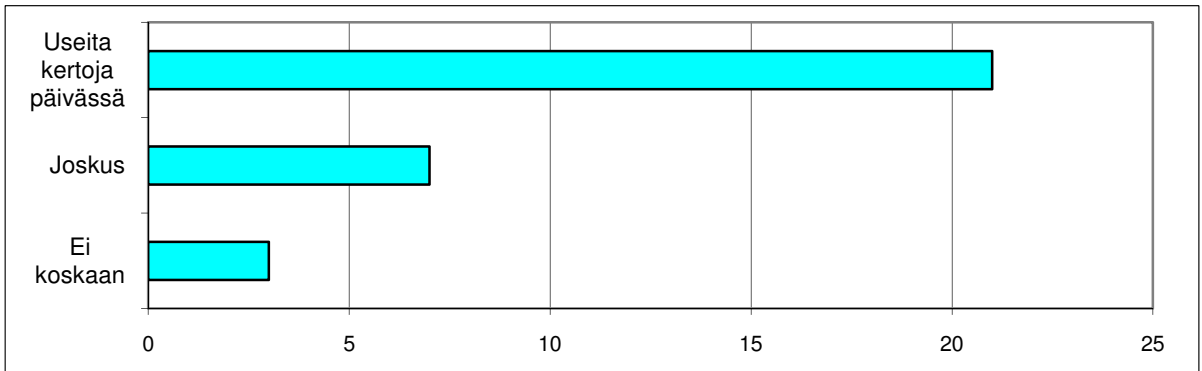


4. Kuinka usein talon tärinä häiritsee

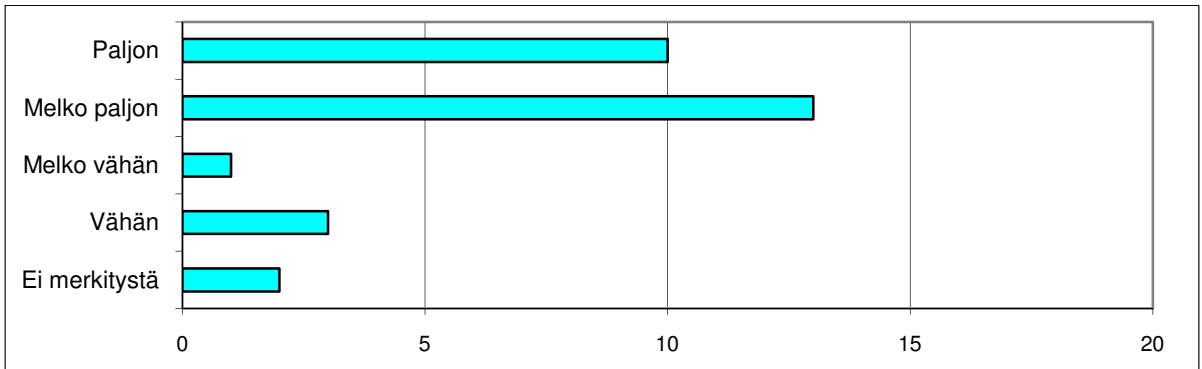


Kuinka paljon talon tärinä häiritsee

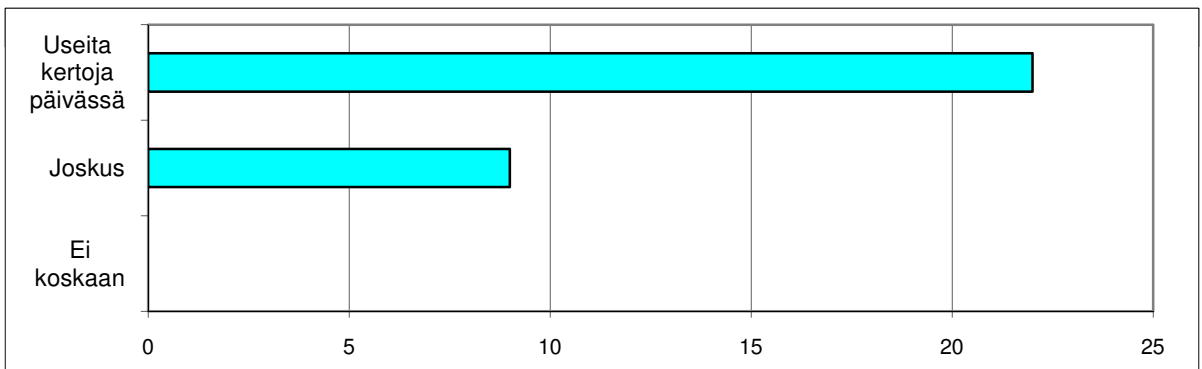




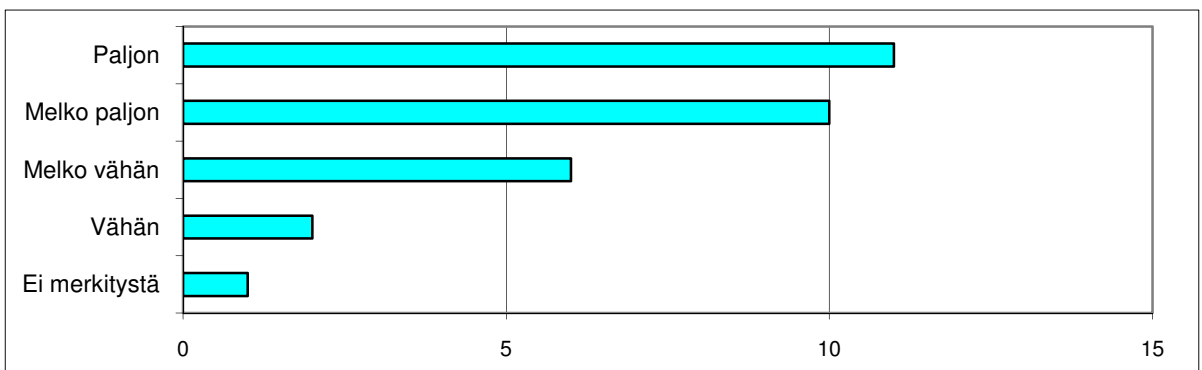
Kuinka paljon kalusteiden/astioiden värinä häiritsee

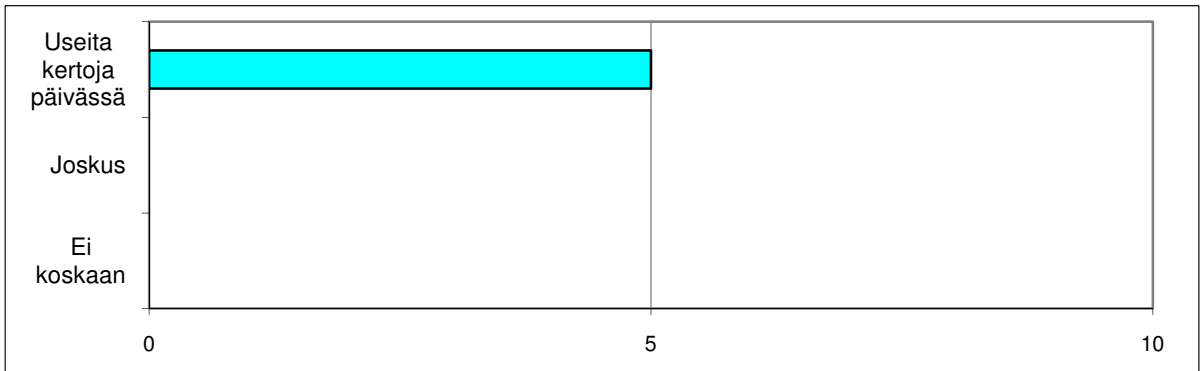


Kuinka usein keho aistii värähtelyt

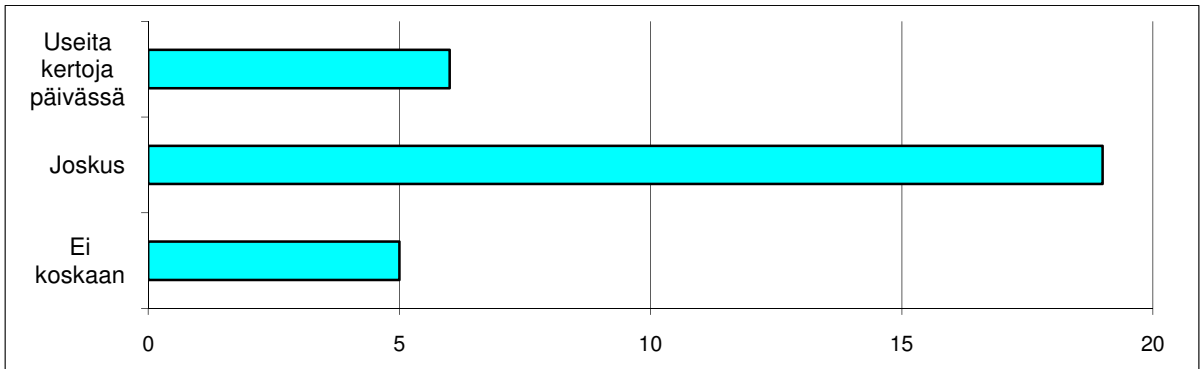


Kuinka paljon värinän havaitseminen häiritsee

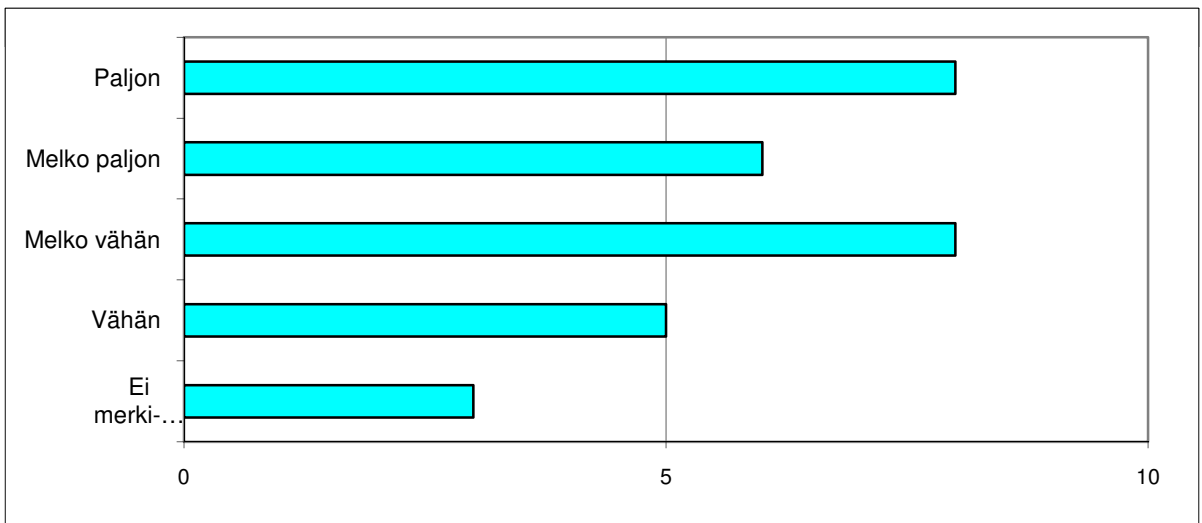




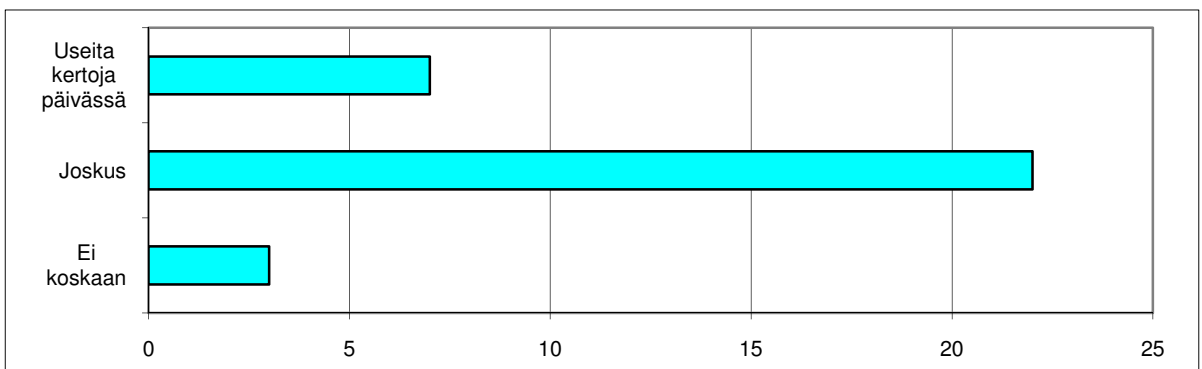
5. Kuinka usein tärinähaitta vaikeuttaa nukahtamista

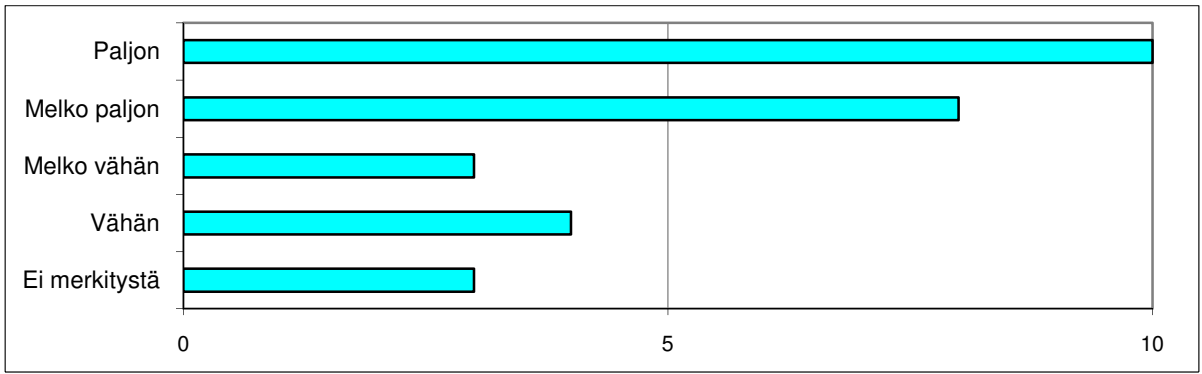


Kuinka paljon häiritsee

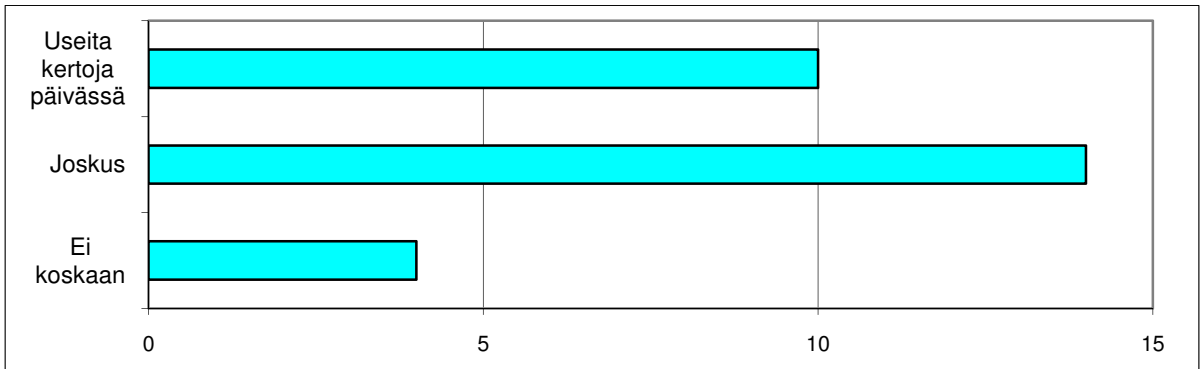


Kuinka usein tärinähaitta herättää kesken unien

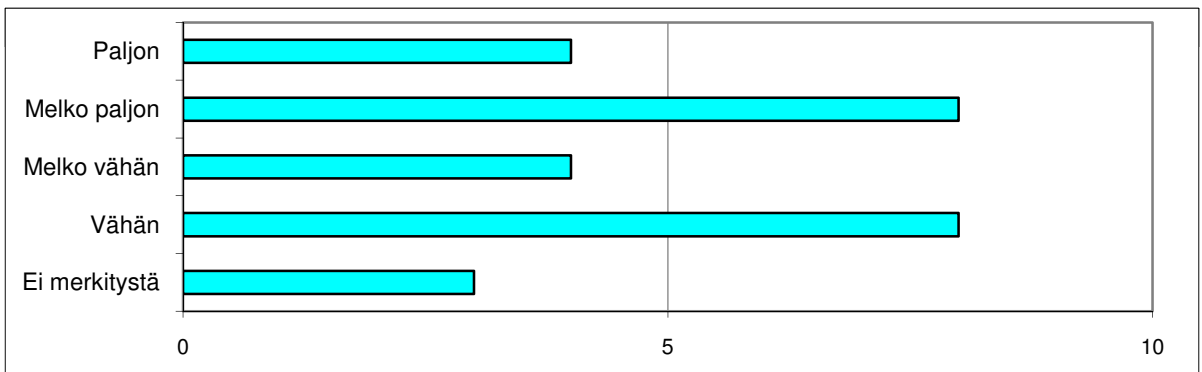




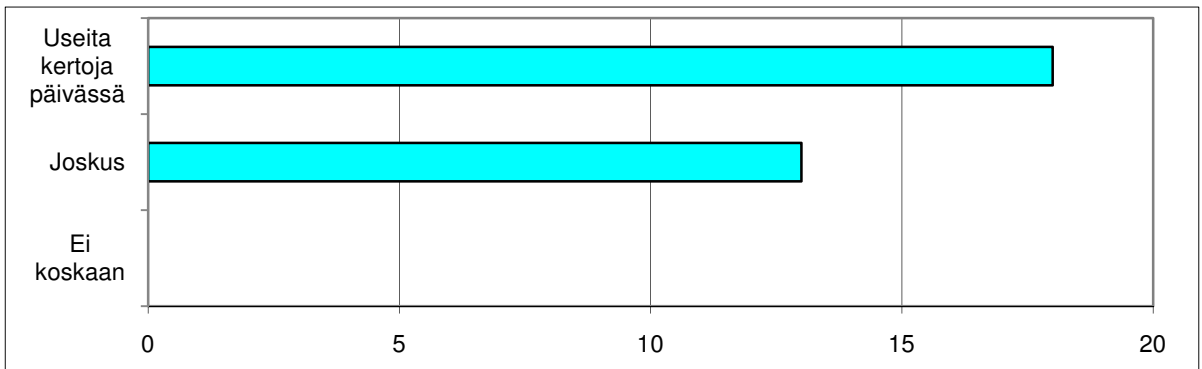
Kuinka usein tärinähaitta häiritsee keskittymistä

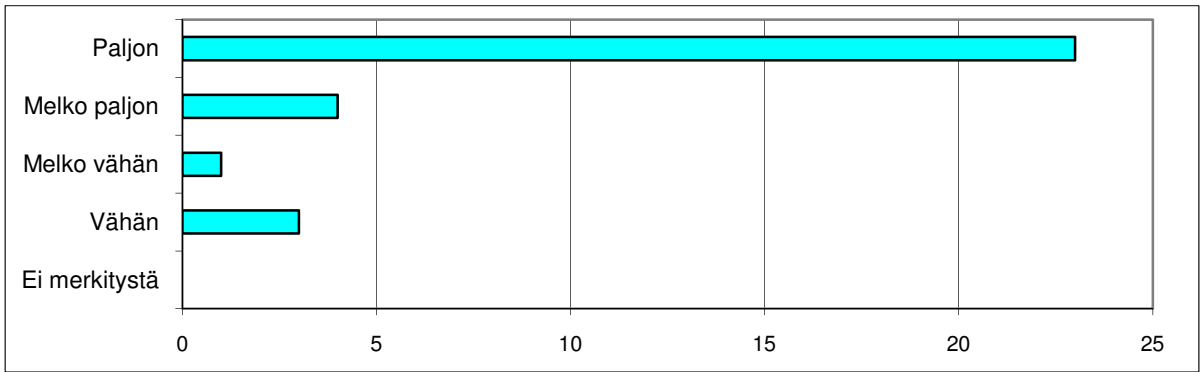


Kuinka paljon häiritsee

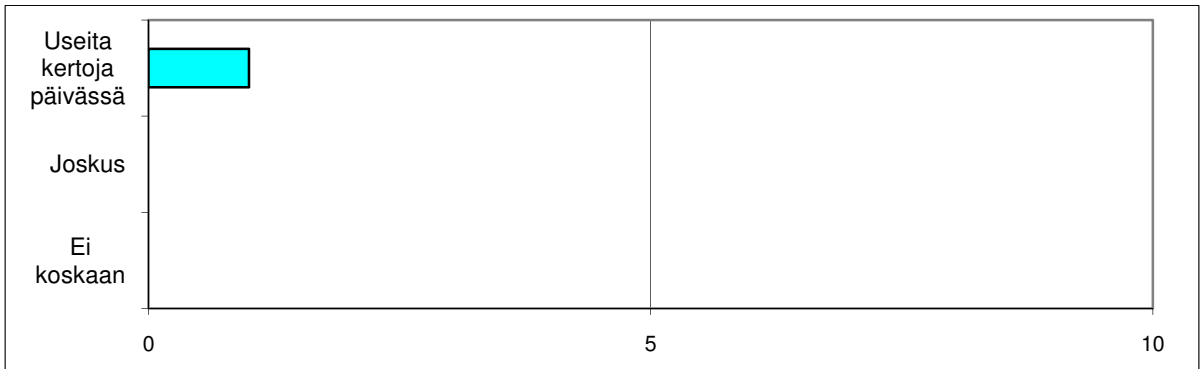


Kuinka usein tärinähaitta aiheuttaa pelkoa rakennevaurioista





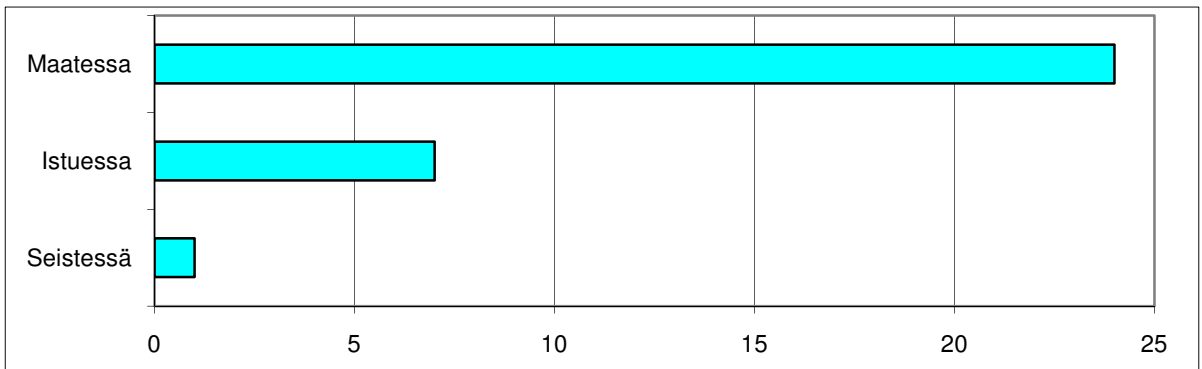
Kuinka usein muu haitta häiritsee

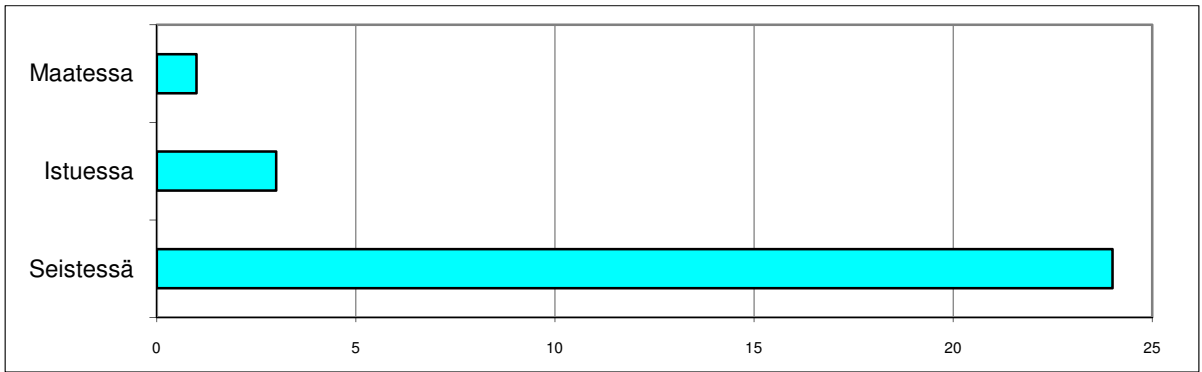


Kuinka paljon häiritsee

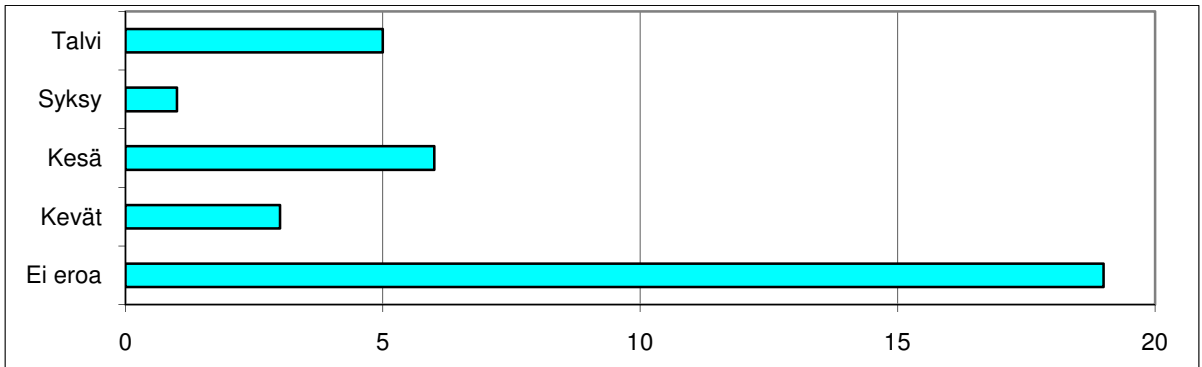


6.Asento, jossa tärinstä aiheutuva haitta on suurin

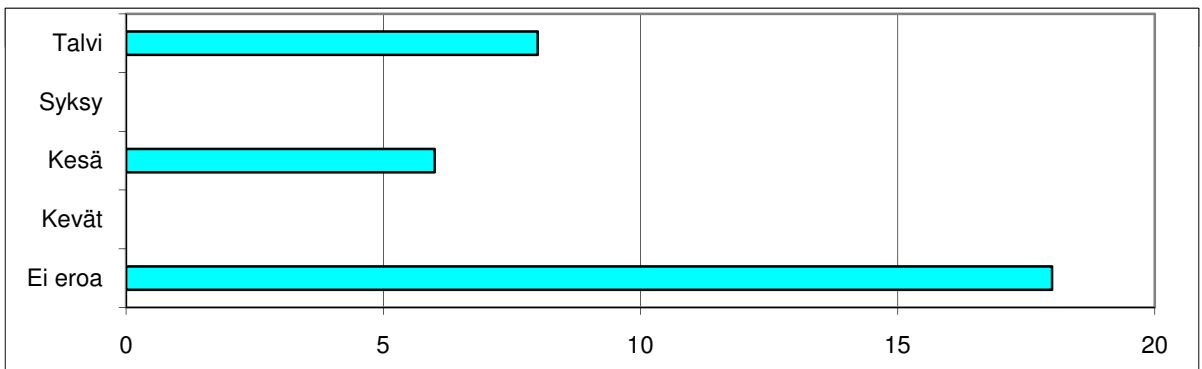




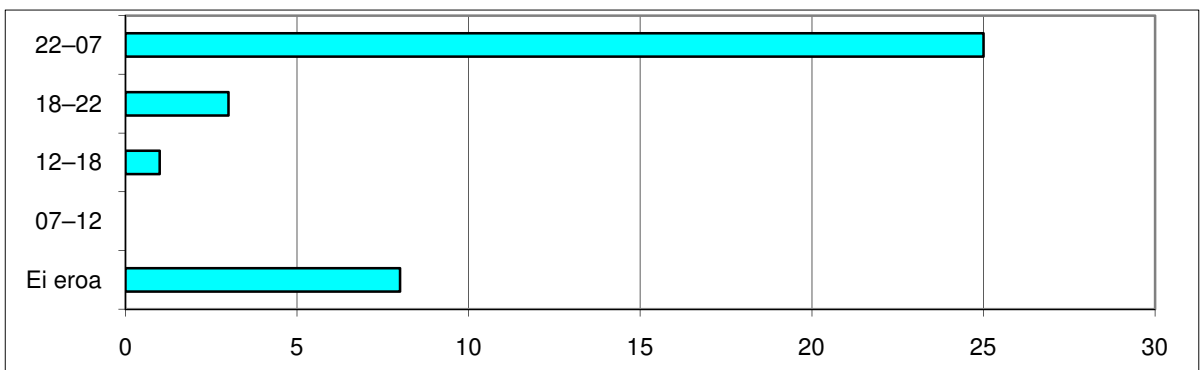
## 8.Vuodenaika, jolloin tärinästä aiheutuva haitta on suurin

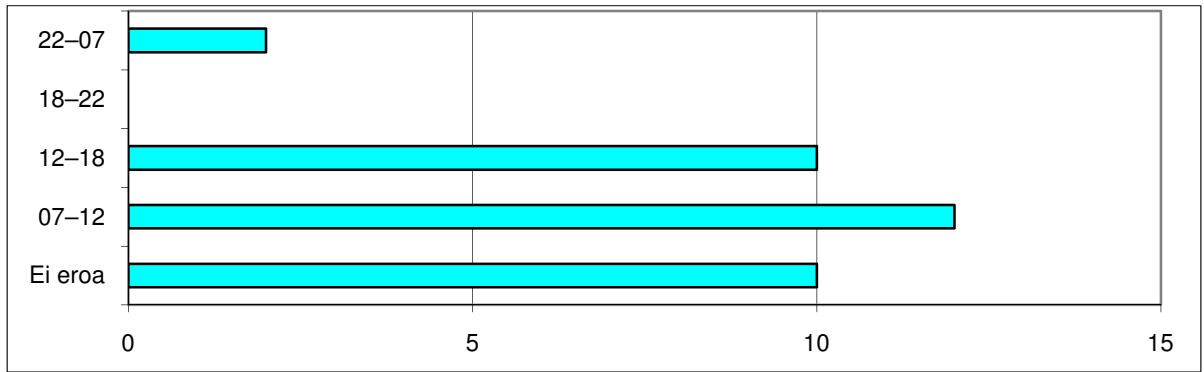


## 9.Vuodenaika, jolloin tärinästä aiheutuva haitta on pienin

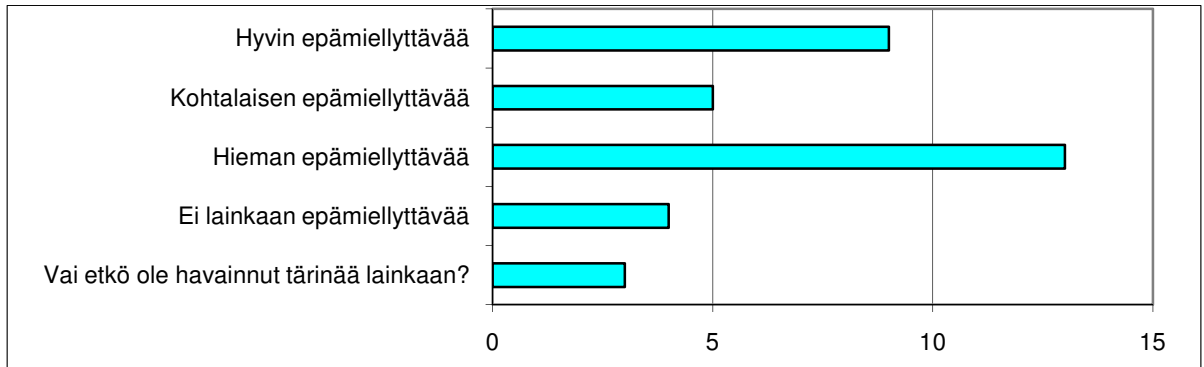


## 10.Vuorokaudenaika, jolloin tärinästä aiheutuva haitta on suurin

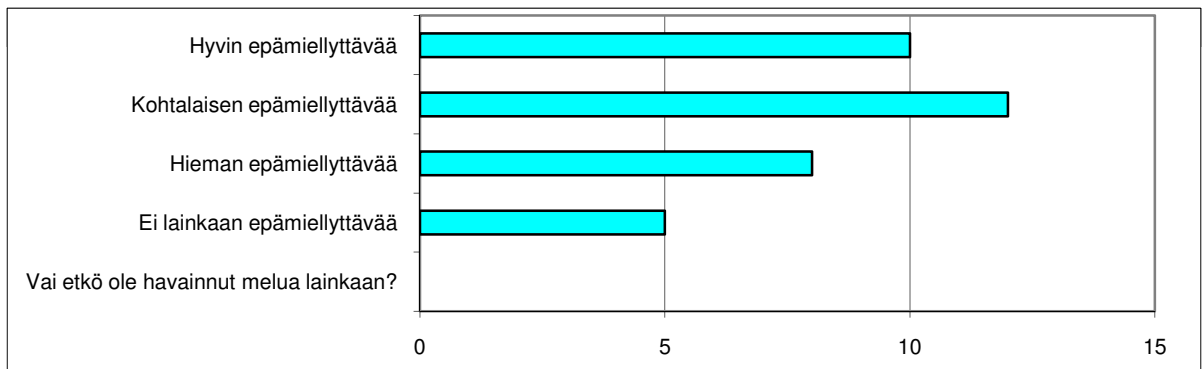




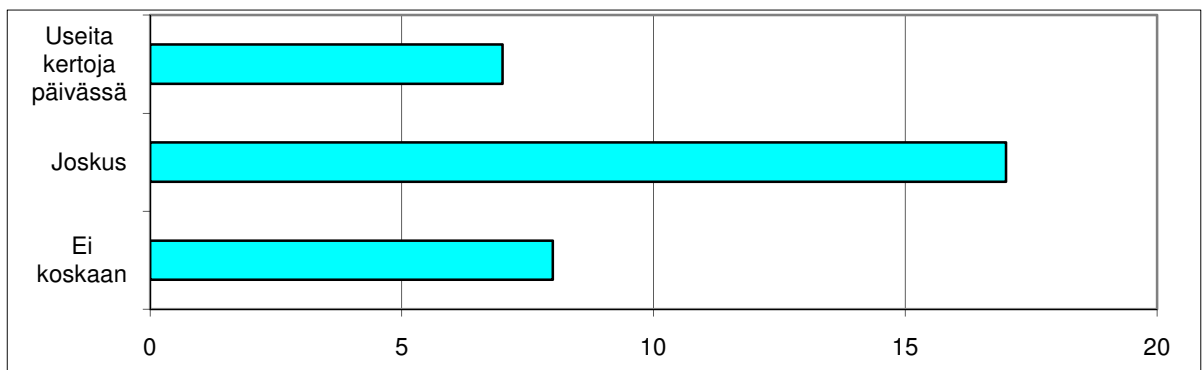
## 15. Tärinä talon ulkopuolella on

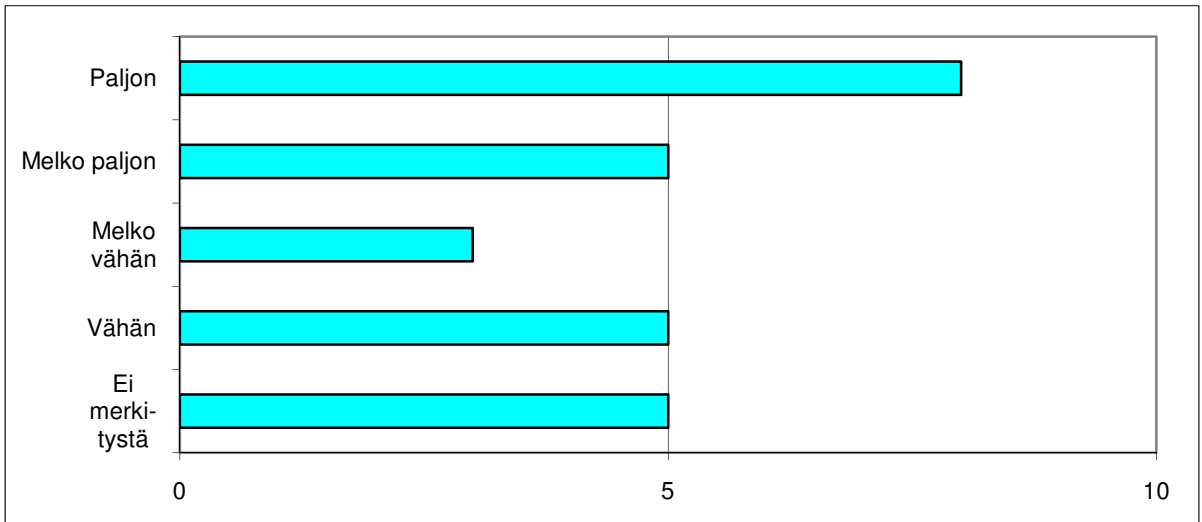


## 16. Kun ajattelet noin 12 viimeisen kuukauden aikaa, katsotko että melu on ollut:

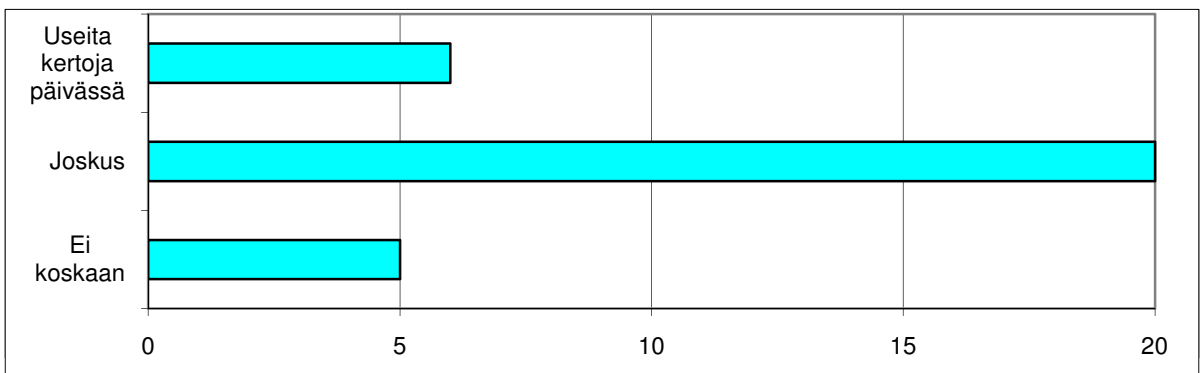


## 17. Kuinka usein melusta aiheutuva haitta on vaikeuttanut nukahtamista

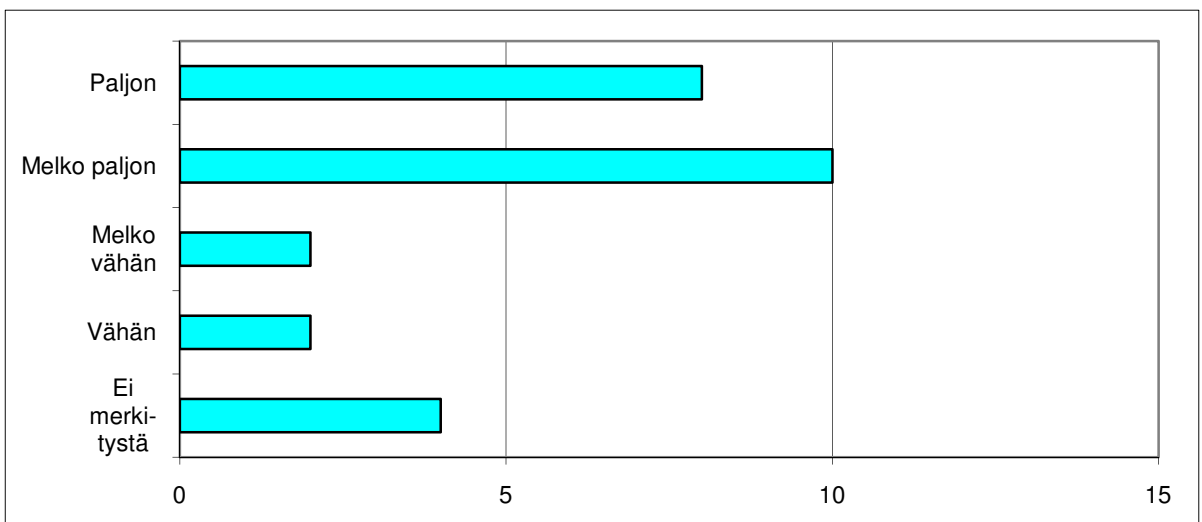




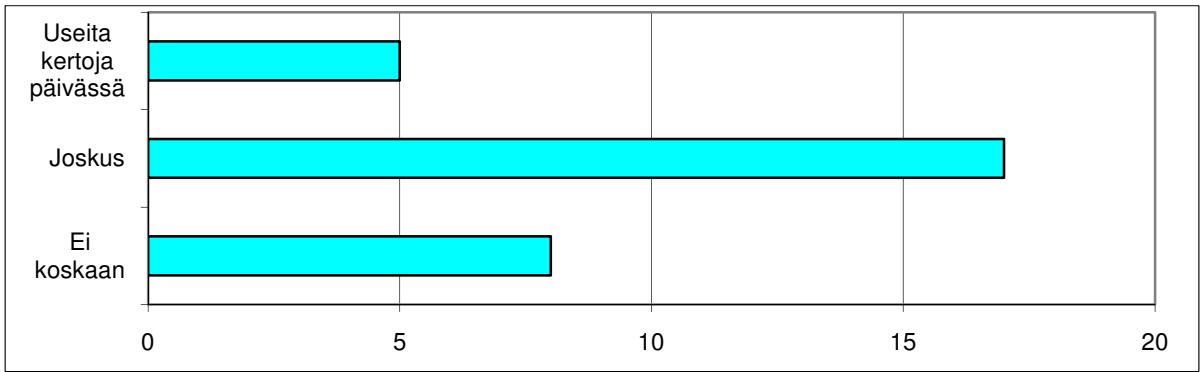
Kuinka usein melusta aiheutuva haitta herättää kesken unien



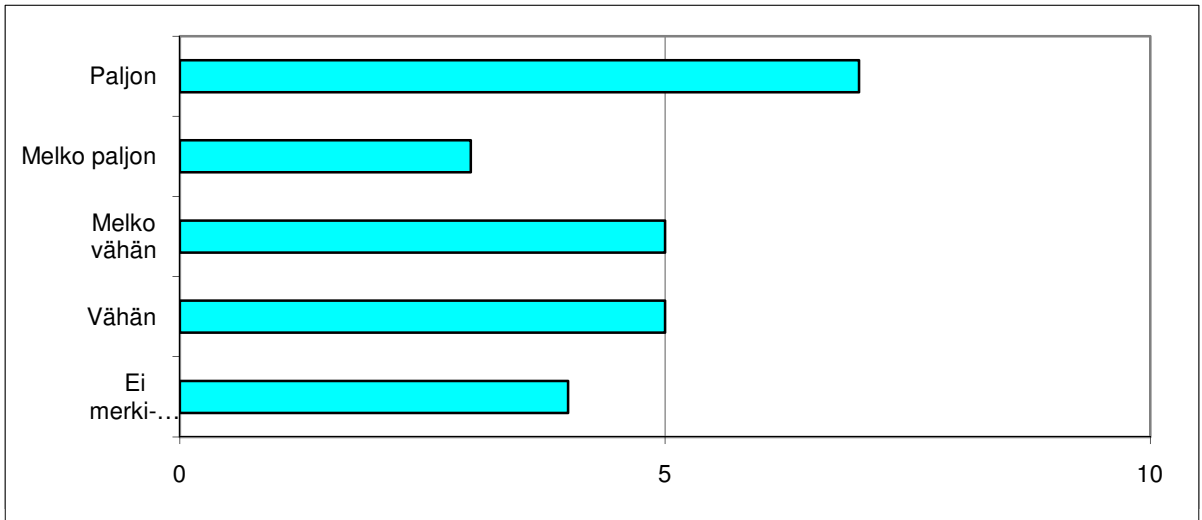
Kuinka paljon häiritsee



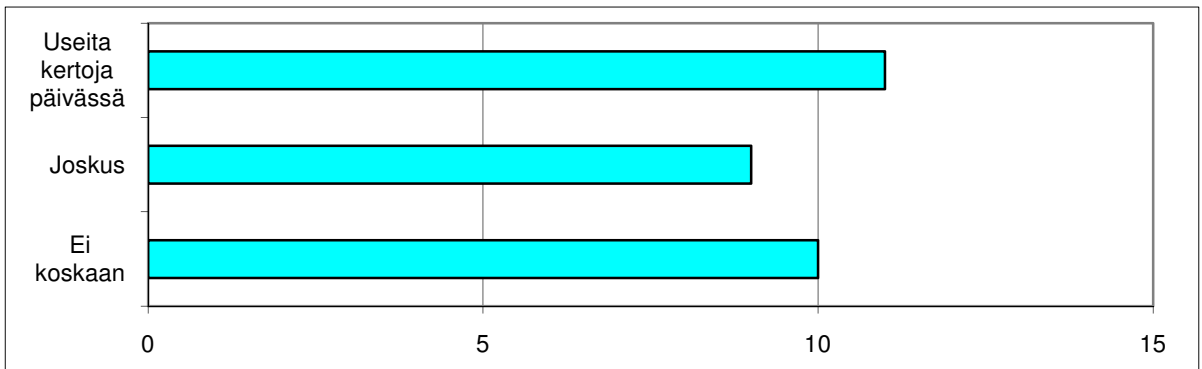


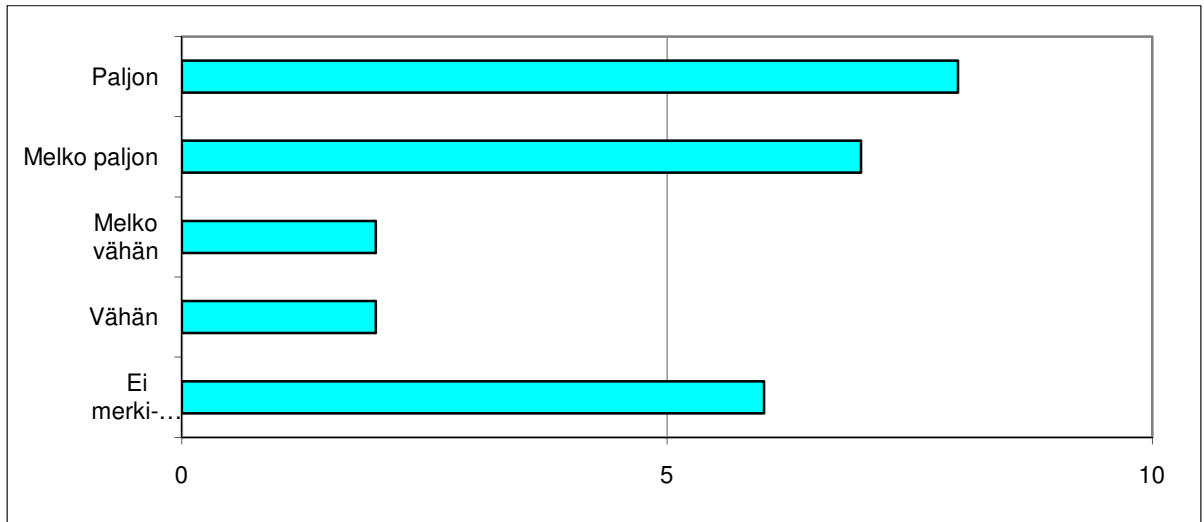


Kuinka paljon häiritsee

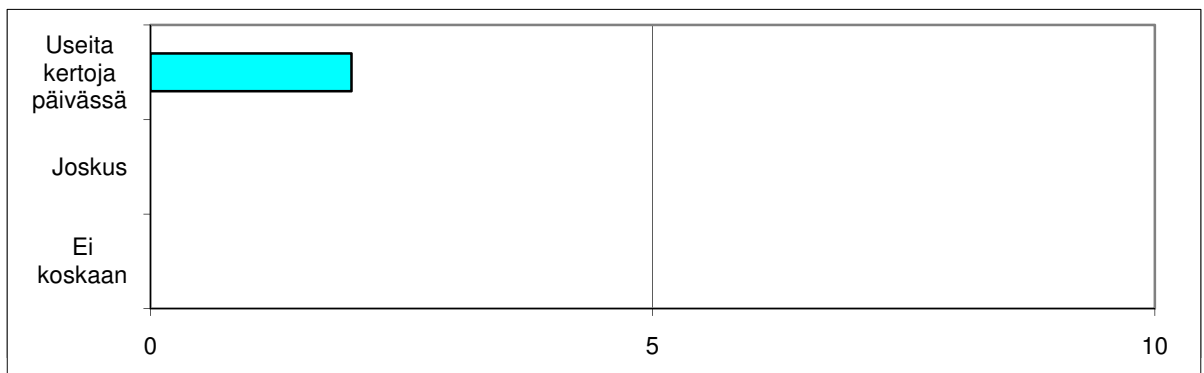


Kuinka usein melusta aiheutuva haitta häiritsee keskustelua

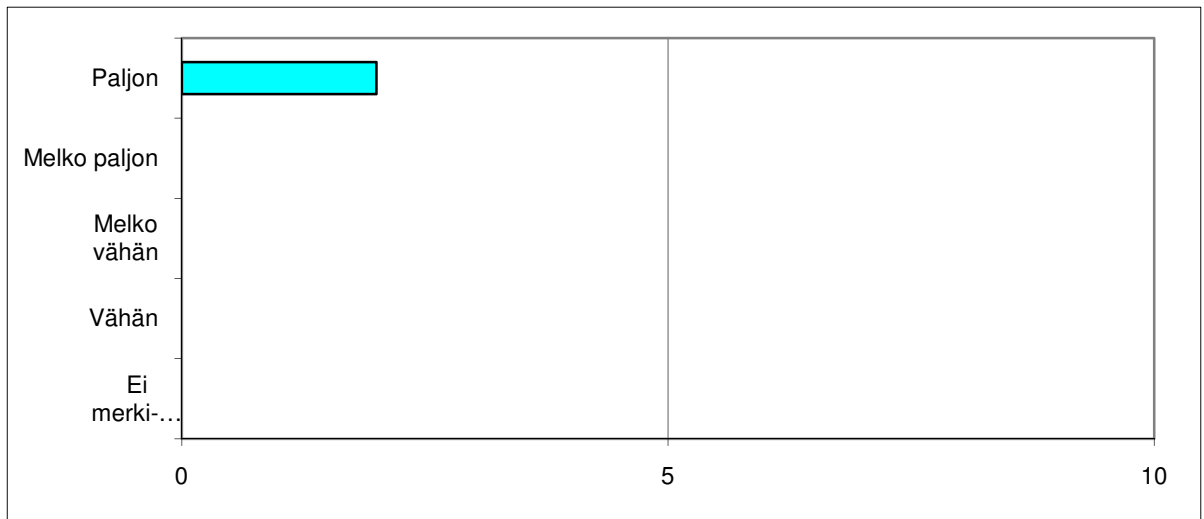


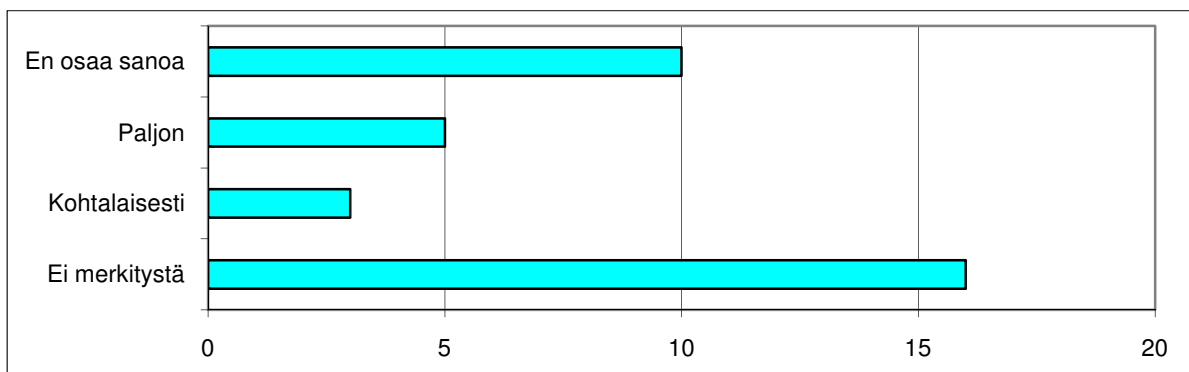


Kuinka usein muu melusta aiheutuva haitta häiritsee

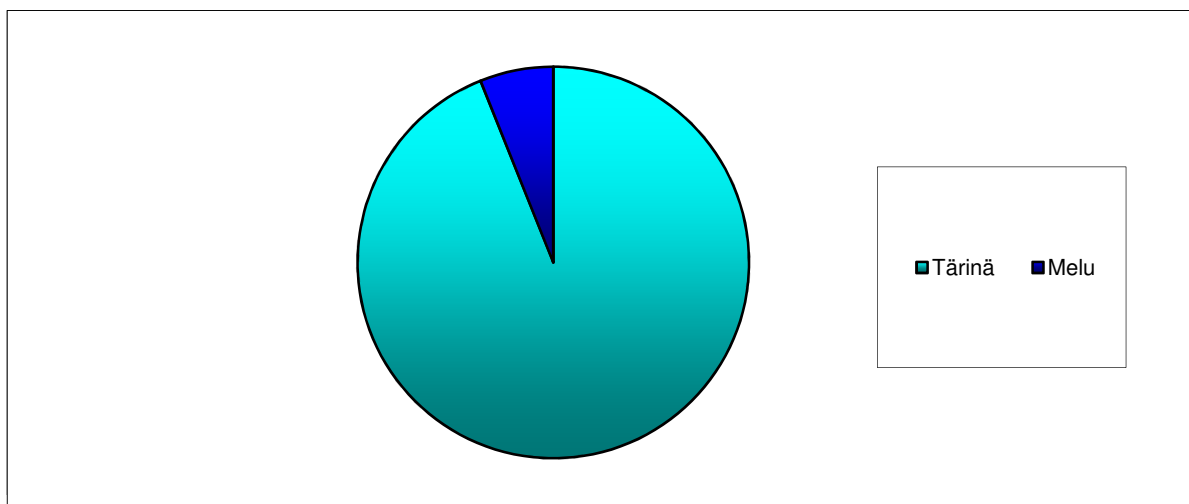


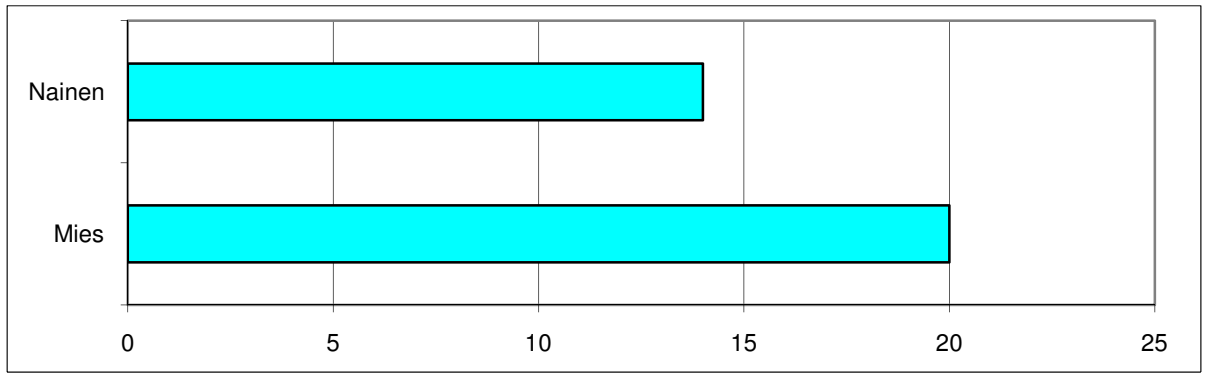
Kuinka paljon häiritsee



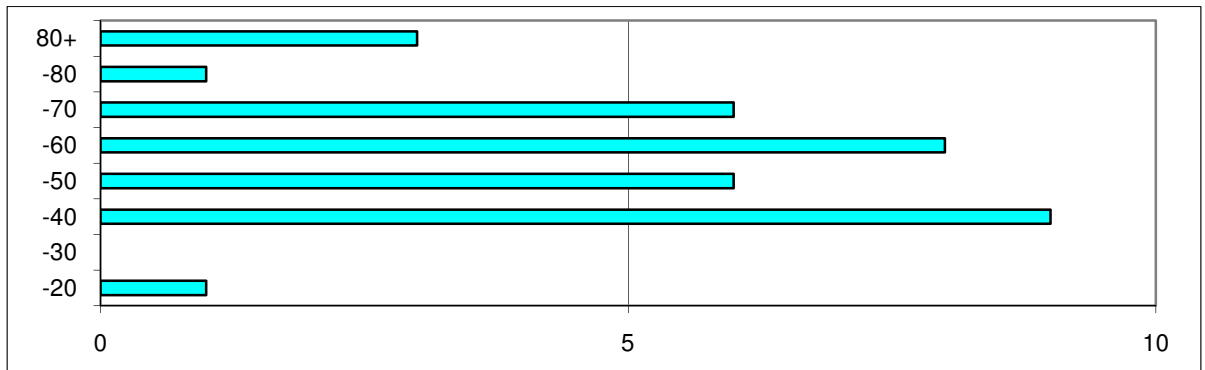


19.Kumpi on häiritsevää

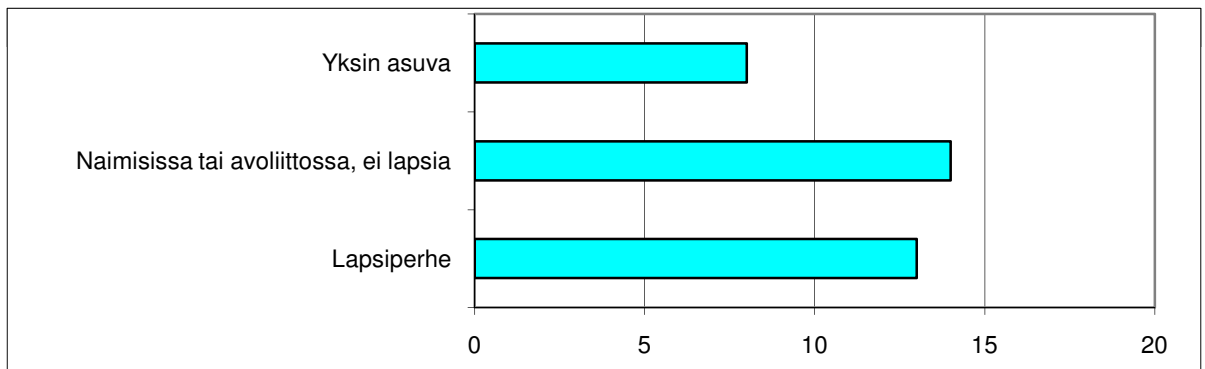




## 28.Ikä



## 29.Asumismuoto



Sukupuoli		Mies	20	Nainen	14	Vastauksia	37	Lähetettyjä kyselyjä	69			
Vastaajan ikä		-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	80+			
		1		9	6	8	6	1	3			
Asumismuoto		Lapsiperhe										
		Naimisissa tai avoliitossa, ei lapsia										
		Yksin asuva										
Rakennuksessa kerroksia		1	4	Runko						Betonirunko		
		1,5	4	Puuverhouk						Tiiliverhouk		
		2	10	Puuvälipohja						Betonivälip.		
		2,5	2	Onko kellaria						Ei		
		3	7	Kyllä						18		
Kun ajattelet noin 12 viimeisen kuukauden aikaa, katsotko että tärinä tai värähtelyt ovat olleet:												
Hyvin epämiellyttäviä												
17												
Kohtalaisen epämiellyttäviä												
11												
Hieman epämiellyttäviä												
6												
Eivät lainkaan epämiellyttäviä												
1												
Vai etkö ole havainnut värähtelyä lainkaan?												
Värähtelyt eivät ole havaittavia	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Värähtelyt ovat erittäin epämiellyttäviä
				1			3	4	5	11	10	
Kuinka usein tärinä ilmenee ja kuinka paljon tärinä häiritsee?												
Ilmenemistapa	Kuinka usein ilmenee?			Kuinka paljon häiritsee?								
	Ei koskaan	Joskus	Useita kertoja näivässä	Ei merkitystä	Vähän	Melko vähän	Melko paljon	Paljon				
Talo tärisee tai värähtelee		9	25		4	1	14	13				
Kalusteet/astiat/ikkunat helisevät	3	7	21	2	3	1	13	10				
Keho aistii värähtelyt		9	22	1	2	6	10	11				
Muu:			5				3	2				

Kuinka usein tärinästä aiheutuva haitta esiintyy ja kuinka paljon haitta häiritsee?		Kuinka usein esiintyy?		Kuinka paljon häiritsee?			
Tärinästä aiheutunut haitta	Ei koskaan	Joskus	Useita kertoja näivässä	Ei merkitsevästä	Melko vähän	Melko paljon	Pajon
Vaikeuttaa nukahtamista	5	19	6	3	5	8	8
Herättää kesken unien	3	22	7	3	4	3	10
Häiritsee keskittymistä	4	14	10	3	8	4	4
Aiheuttaa pelkoa rakennevaurioista		13	18		3	1	23
Muu:							1

Missä asennossa tärinästä aiheutuva haitta on suurin?

Seistessä	Istuessa	Maatessa
1	7	24

Entä pienin?

Seistessä	Istuessa	Maatessa
24	3	1

Mikä on vuodenaika, jolloin tärinästä aiheutuva haitta on suurin?

Ei eroa	Kevät	Kesä	Syksy	Talvi
19	3	6	1	5

Entä pienin?

Ei eroa	Kevät	Kesä	Syksy	Talvi
18		6		8

Mikä on vuorokaudenaika, jolloin tärinästä aiheutuva haitta on suurin?

Ei eroa	07-12	12-18	18-22	22-07
8	1	3	25	

Entä pienin?

Ei eroa	07-12	12-18	18-22	22-07
10	12	10		2

Minä viikompäivänä ja mihin kellonaikaan yksittäinen liikenneväline aiheuttaa häiritsevimmän tärinän päiväsaikaan (07.00-22.00)?

Ei eroa	07-12	12-16	16-20	20-22
11		3	6	4

Minä viikompäivänä ja mihin kellonaikaan yksittäinen liikenneväline aiheuttaa häiritsevimmän tärinän yöaikaan (22.00-07.00)?

Ei eroa	22-00	00-02	02-04	04-07
12	4	1	3	6

Missä päin taloa tärinä ilmenee?

Kerros	1	11
	2	8
	3	1

Pohjoispuoli	3
Itäpuoli	6
Eteläpuoli	1
Länsipuoli	

Onko tärinä talon ulkopuolella:

Hyvin epämiellyttävää	9
Kohtalaisen epämiellyttävää	5
Huonon epämiellyttävää	13
Ei lainkaan epämiellyttävää	4
Vai etkö ole havainnut lainkaan?	3

Seuravat kysymykset koskevat liikenteestä sisätiloihin siirtyvää melua.

Onko melu ollut viimeisen 12 kuukauden aikana:

Hyvin epämiellyttävää	10
Kohtalaisen epämiellyttävää	12
Hieman epämiellyttävää	8
Ei lainkaan epämiellyttävää	5
Vai etkö ole havainnut lainkaan?	

Kuinka usein melusta aiheutuva haitta esiintyy ja kuinka paljon haitta häiritsee?

Melusta aiheutunut haitta	Kuinka usein esiintyy?			Kuinka paljon häiritsee?				
	Ei koskaan	Joskus	Useita kertoja näivässä	Ei merkitystä	Vähän	Melko vähän	Melko paljon	Paljon
Vaikeuttaa nukahtamista	8	17	7	5	5	3	5	8
Herättää keken unien	5	20	6	4	2	2	10	8
Häiritsee keskittymistä	8	17	5	4	5	5	3	7
Häiritsee keskustelua	10	9	11	6	2	2	7	8
Muu:			2					2

Jos myös melu on häiritsevää, niin kuinka paljon liikennemelun poistuminen vaikuttaisi liikenteestä

Ei merkitystä	Kohtalaisesti	Paljon	En osaa sanoa
16	3	5	10

Kumman koet häiritsevämmäksi, tärinän vai melun?

Tärinä	31	Melu	2
--------	----	------	---

Jos havaitset melua ja tärinää, kumman havaitset ensin?

Tärinä	24	Melu	11
--------	----	------	----

Onko liikenteen aiheuttamasta tärinästä tehty valitus?

Kyllä	12	Ei	21
-------	----	----	----

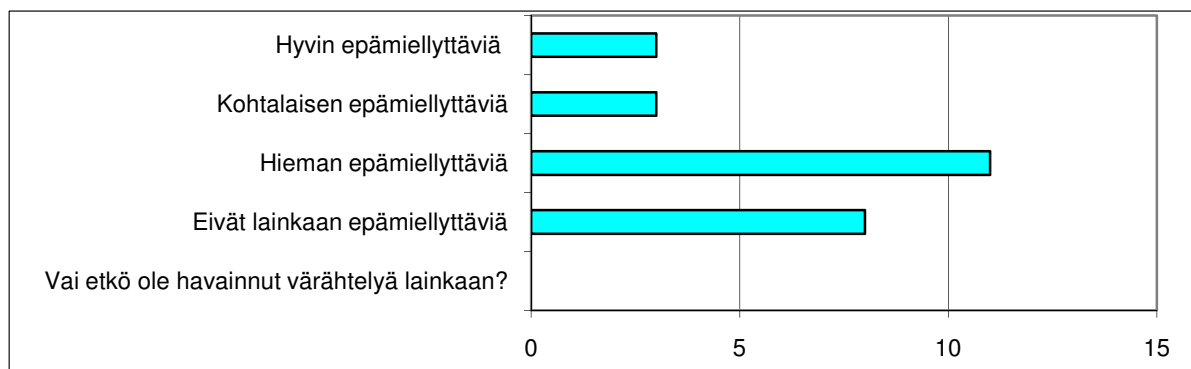
Onko liikenteen aiheuttamasta melusta tehty valitus?

Kyllä	10	Ei	22
-------	----	----	----

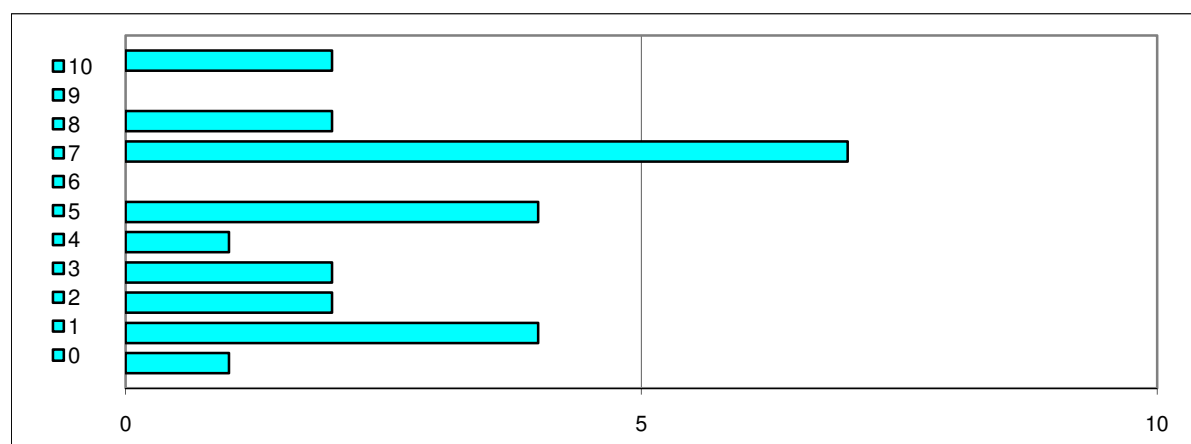
Onko rakennuksessanne tehty joskus tärinämittauksia?

Kyllä	9	Ei	16
-------	---	----	----

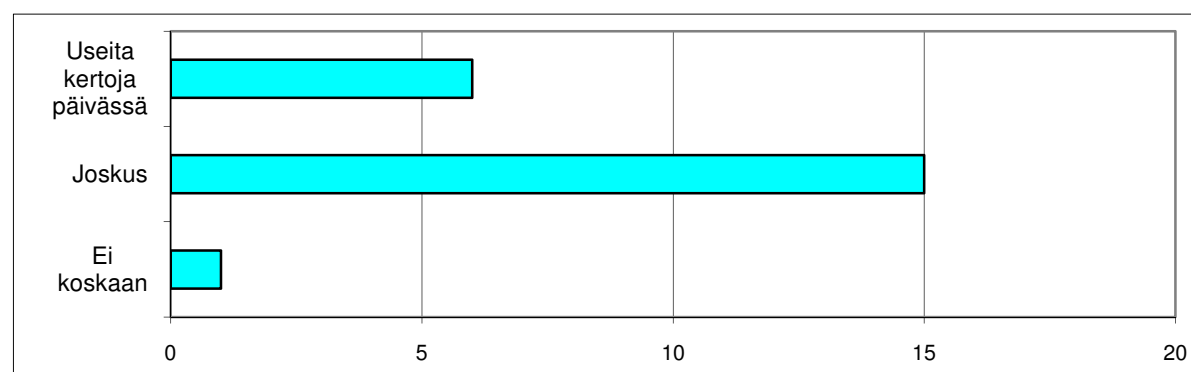
2. Kun ajattelet noin 2-3 viimeisen kuukauden aikaa, katsotko että värähtelyt ovat olleet:



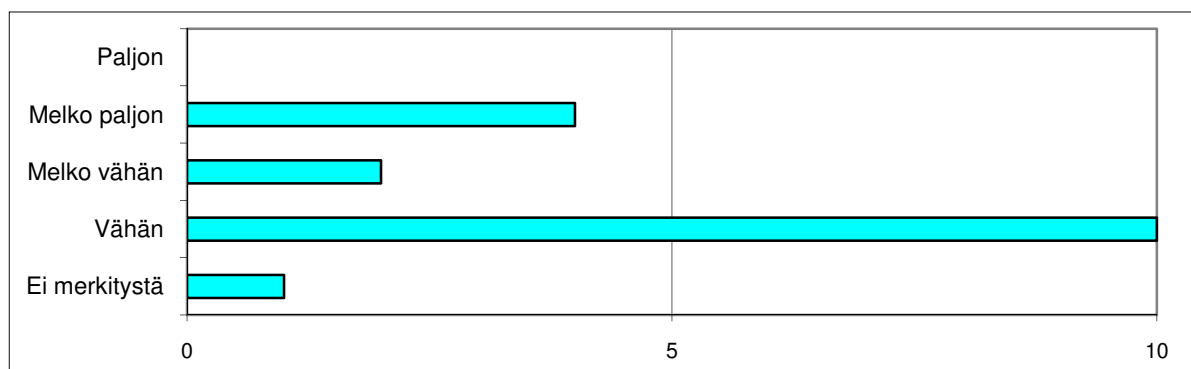
3. Värähtelyt ovat olleet häiritseviä numeerisella asteikolla: (0 - 10)



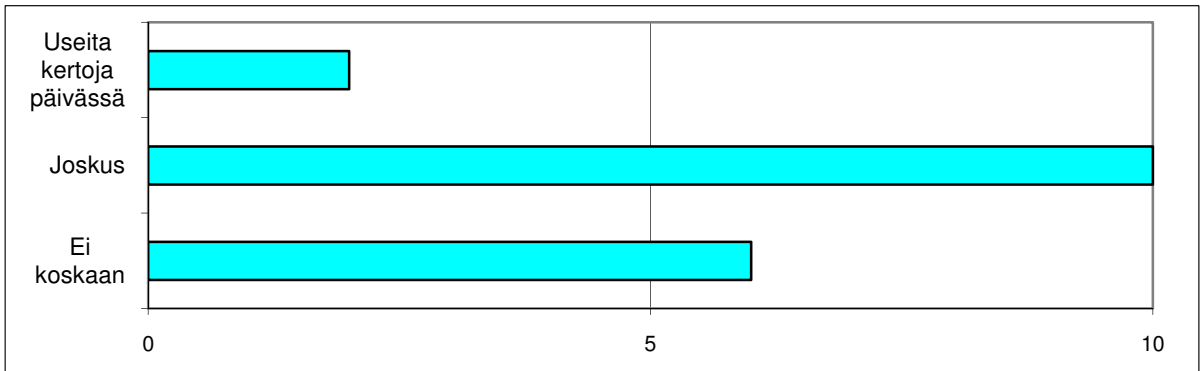
4. Kuinka usein talon tärinä häiritsee



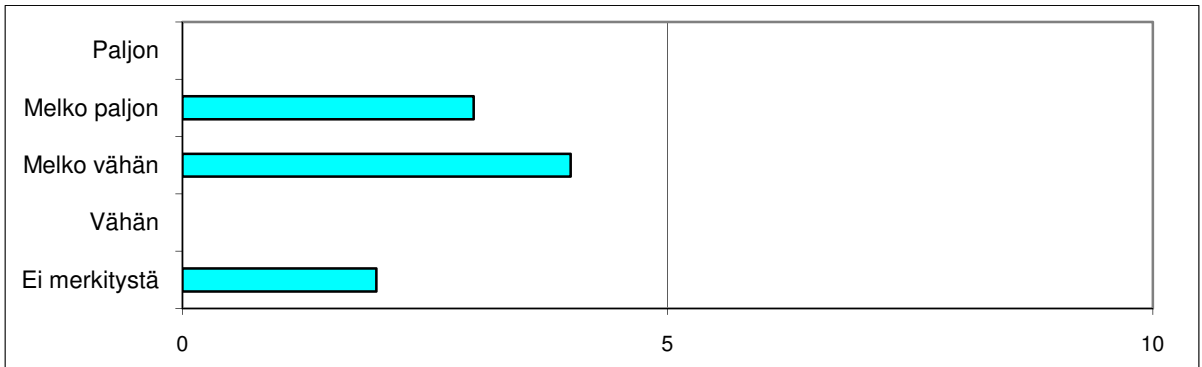
Kuinka paljon talon tärinä häiritsee



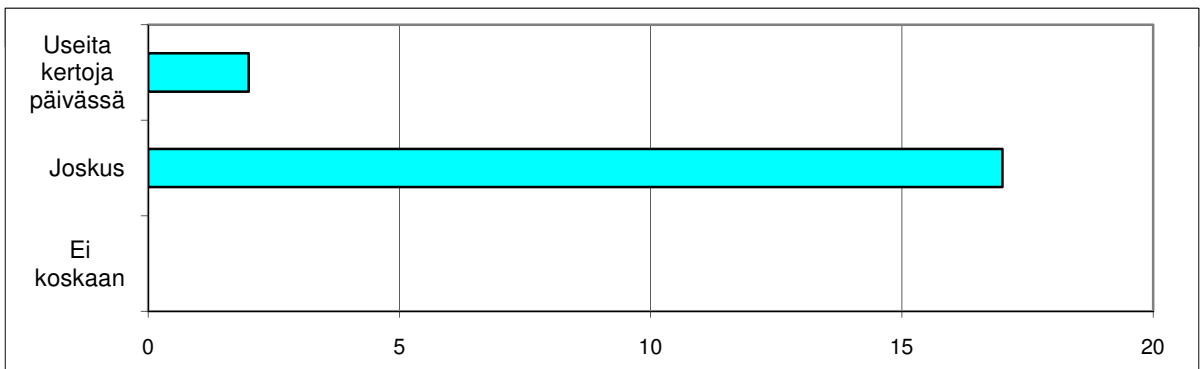




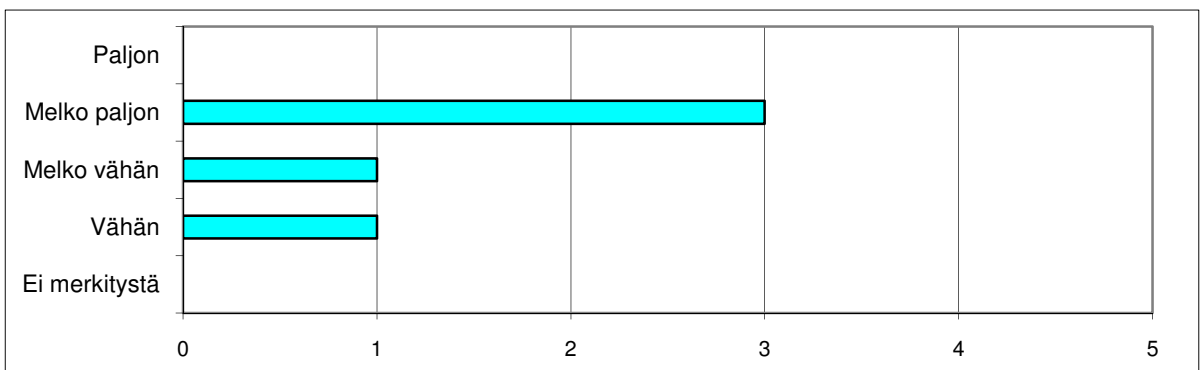
Kuinka paljon kalusteiden/astioiden värinä häiritsee

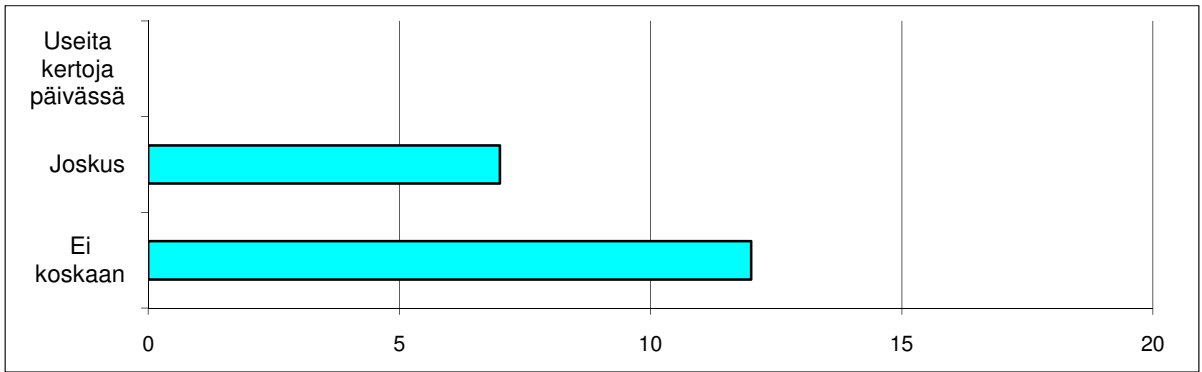


Kuinka usein keho aistii värähtelyt

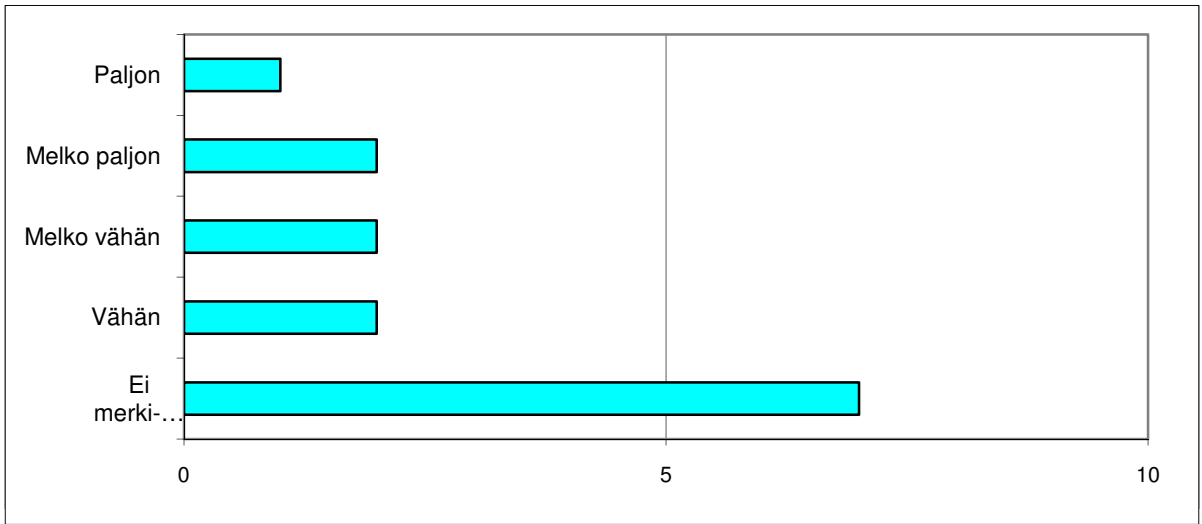


Kuinka paljon värinän havaitseminen häiritsee

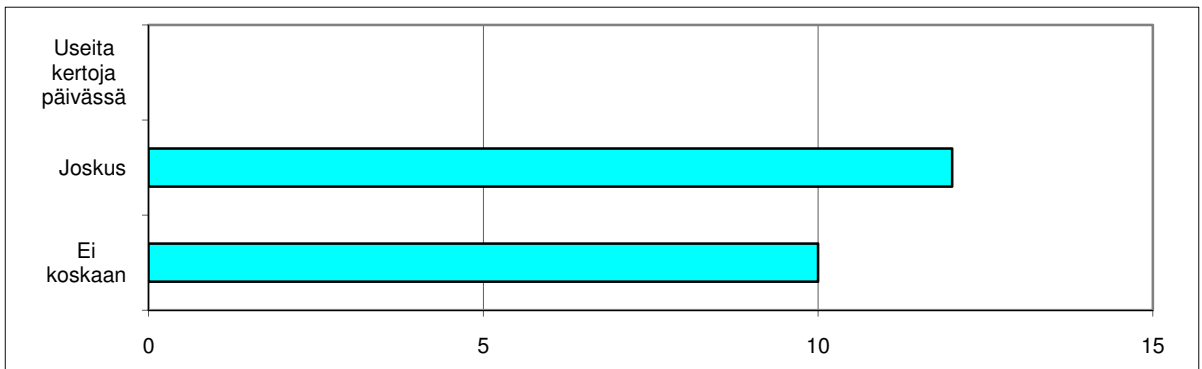




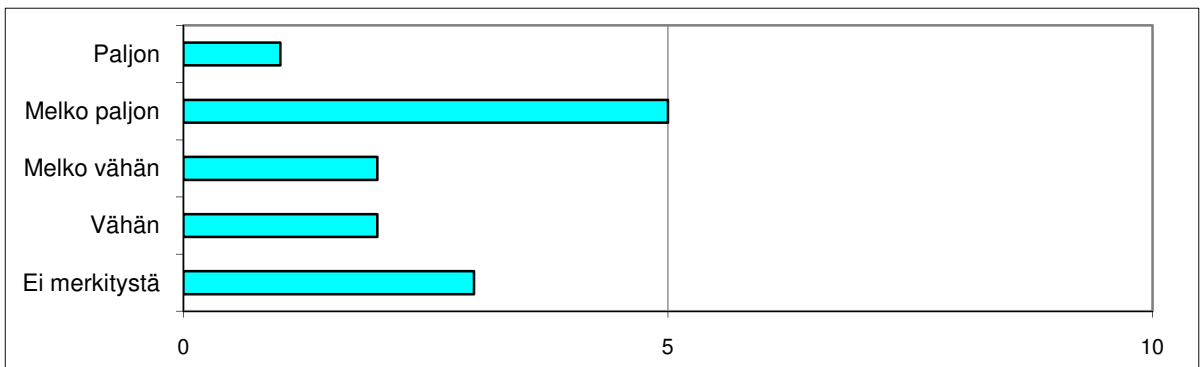
Kuinka paljon häiritsee

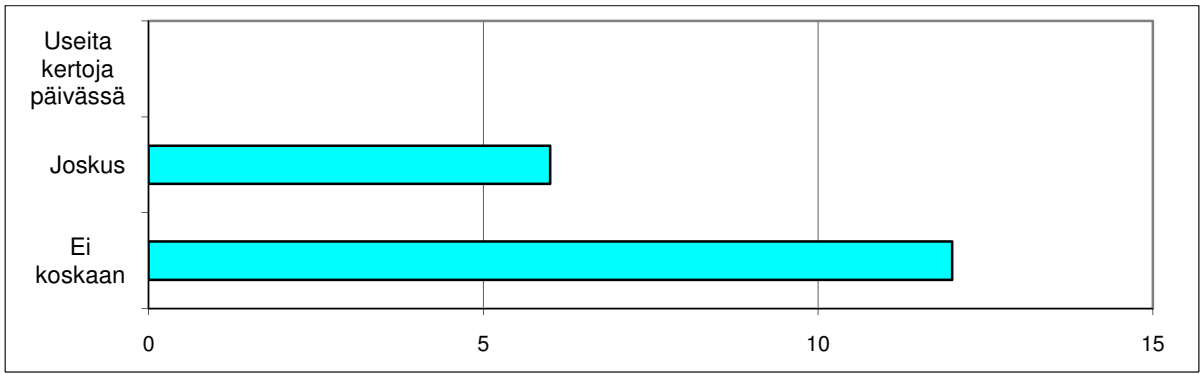


Kuinka usein tärinhäirtä herättää kesken unien

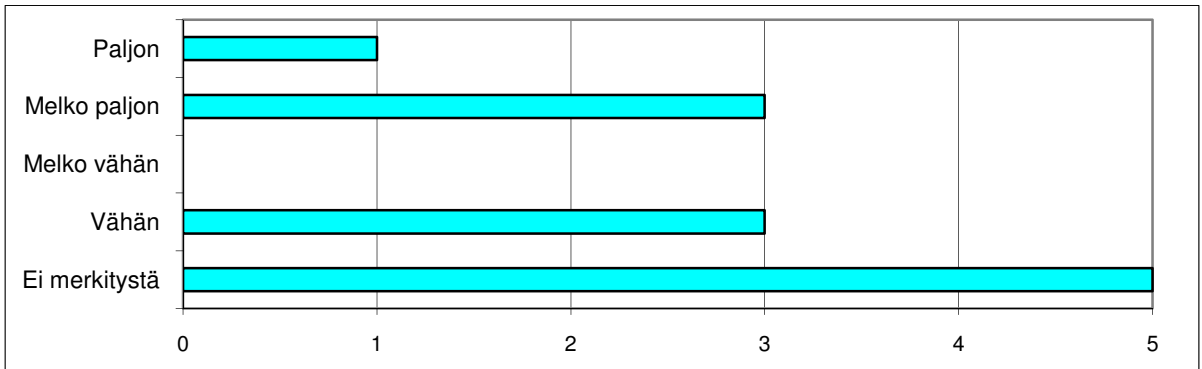


Kuinka paljon häiritsee

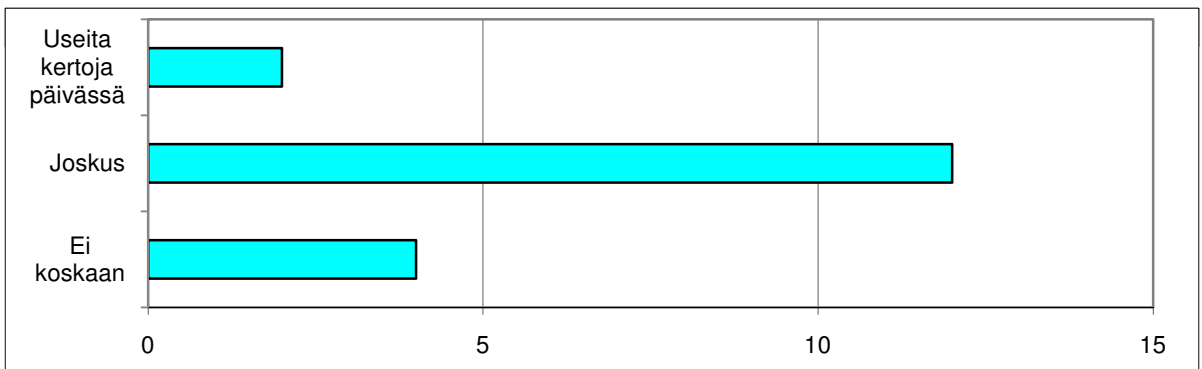




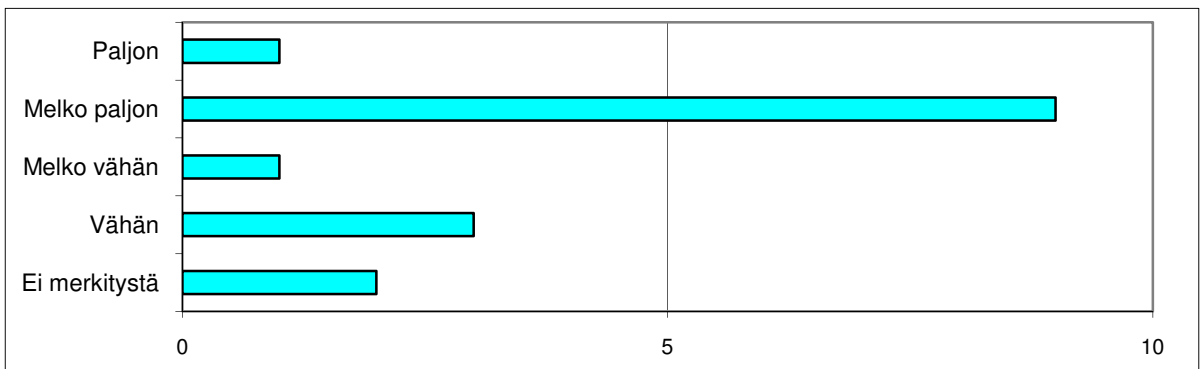
Kuinka paljon häiritsee



Kuinka usein tärinähaitta aiheuttaa pelkoa rakennevaurioista

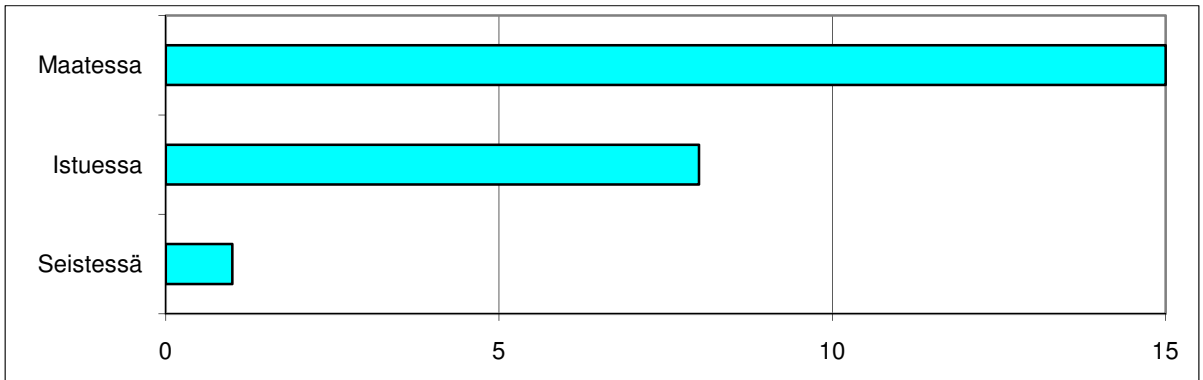


Kuinka paljon häiritsee

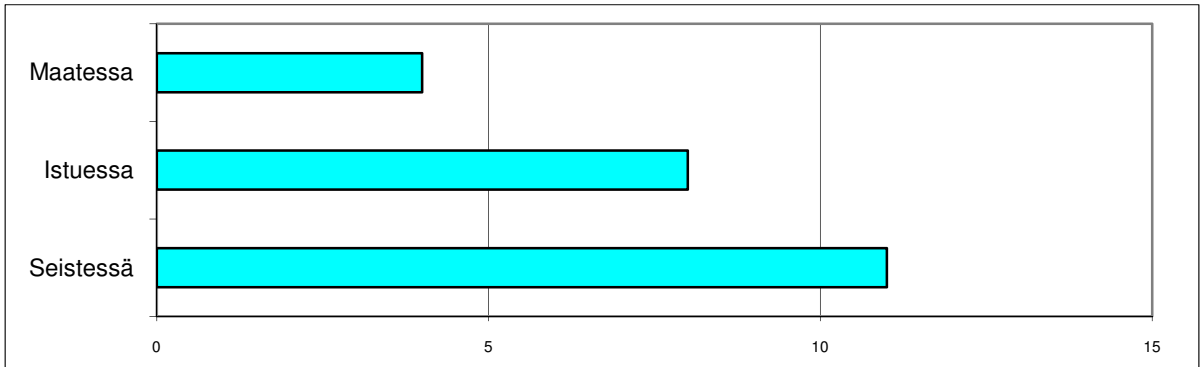


## 6.Asento, jossa tärinistä aiheutuva haitta on suurin

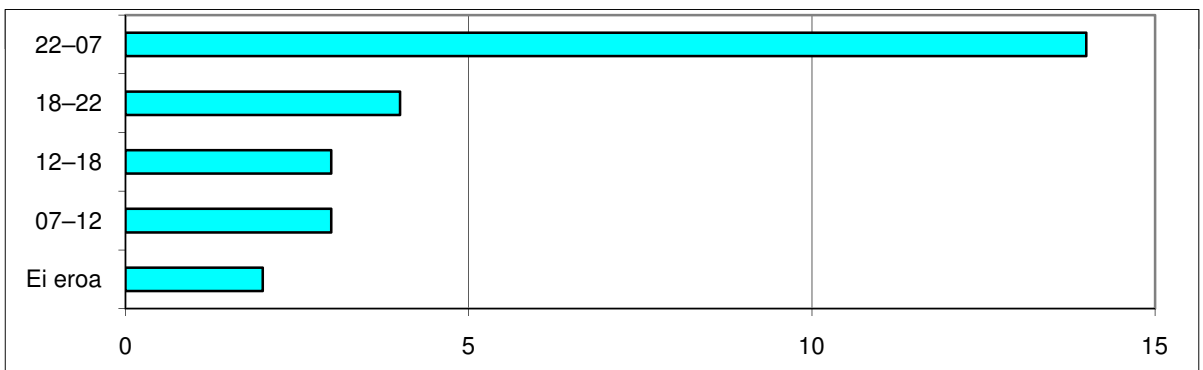
LIITE F5



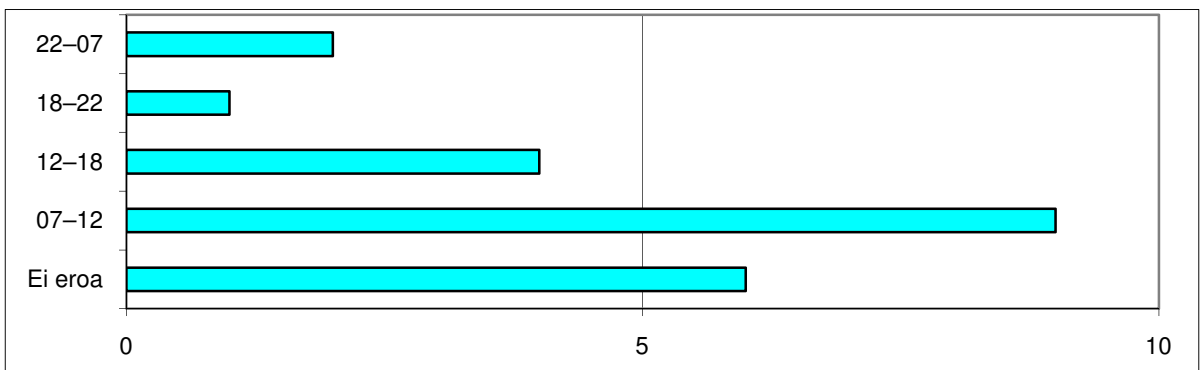
## 7.Asento, jossa tärinistä aiheutuva haitta on pienin



## 8.Vuorokaudenaika, jolloin tärinästä aiheutuva haitta on suurin

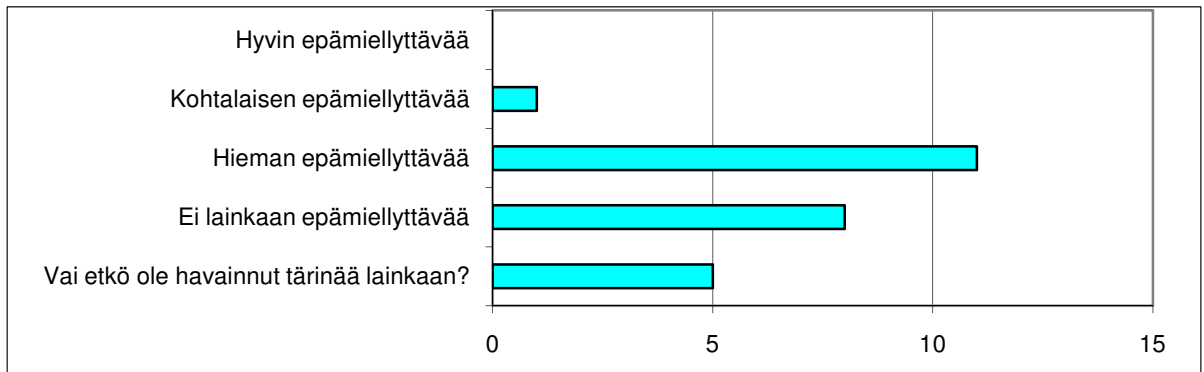


## 9.Vuorokaudenaika, jolloin tärinästä aiheutuva haitta on pienin



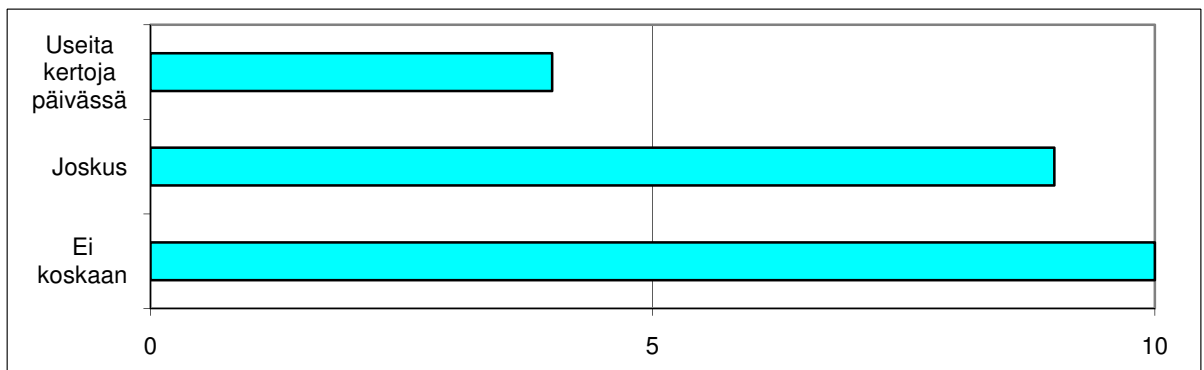
### 13. Tärinä talon ulkopuolella on

LIITE F6

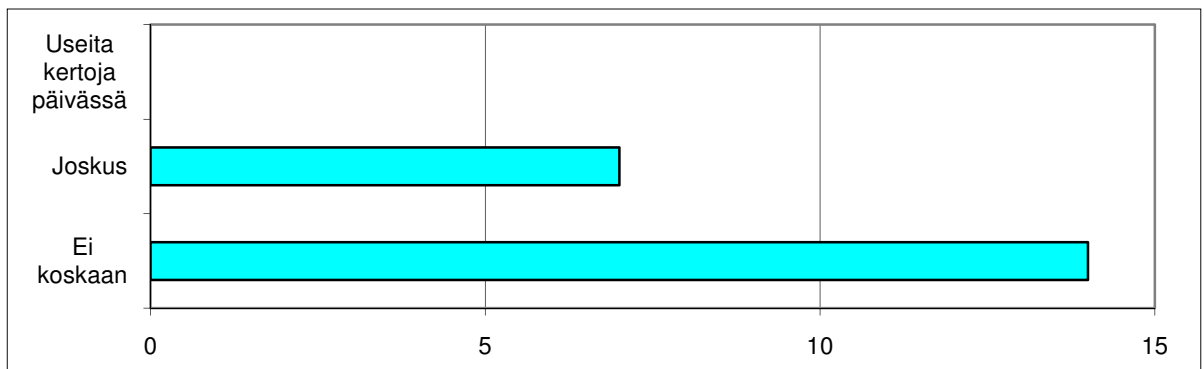


### 14. Aiheutuuko rakennukseen muista syistä havaittavaa värähtelyä?

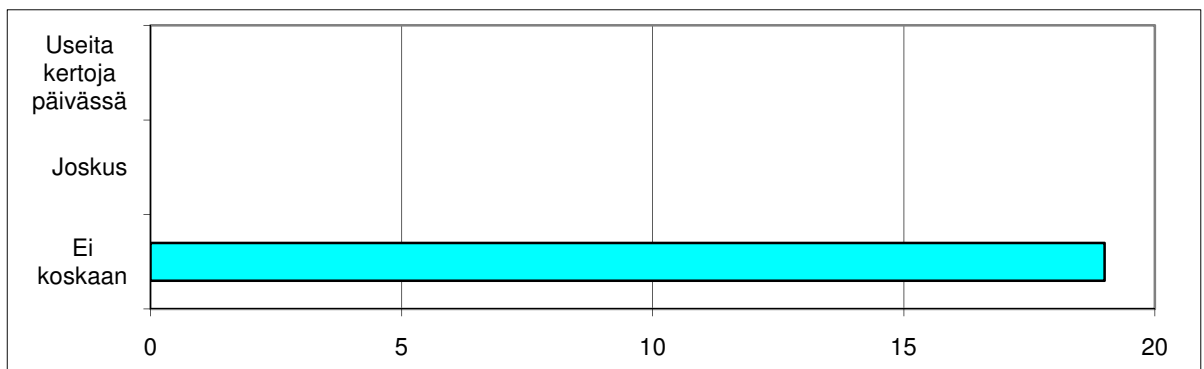
Liikenne katualueella

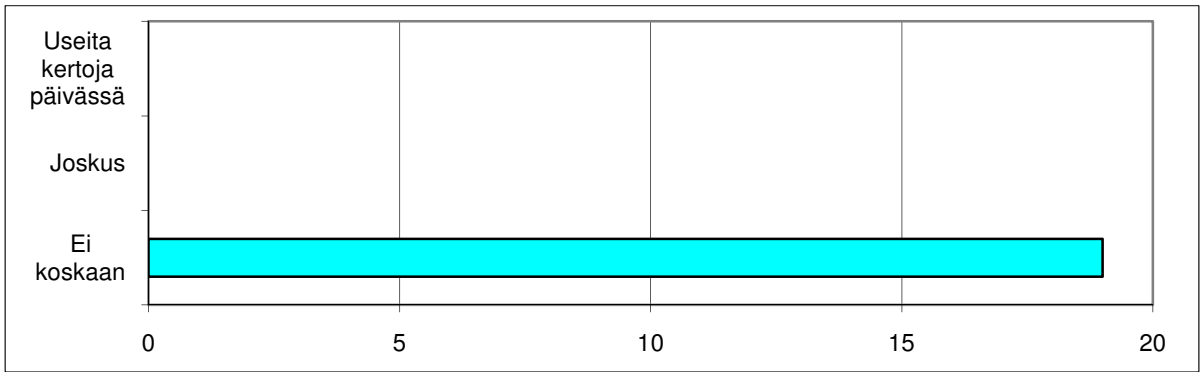


Rakentaminen tai vastaava naapurissa tai katualueella

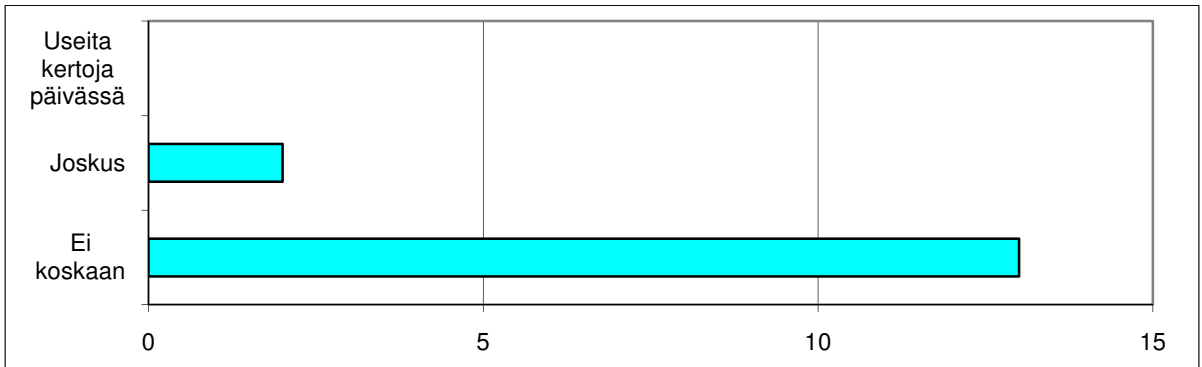


Kävely rakennuksessa

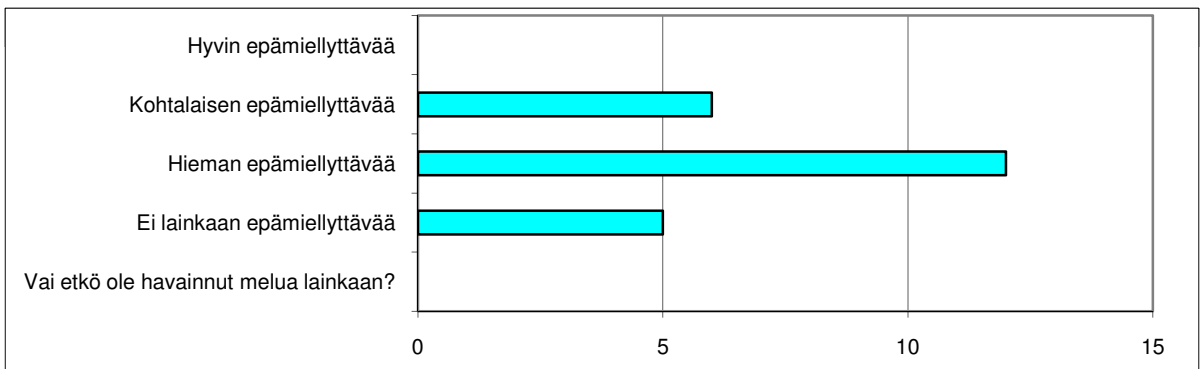




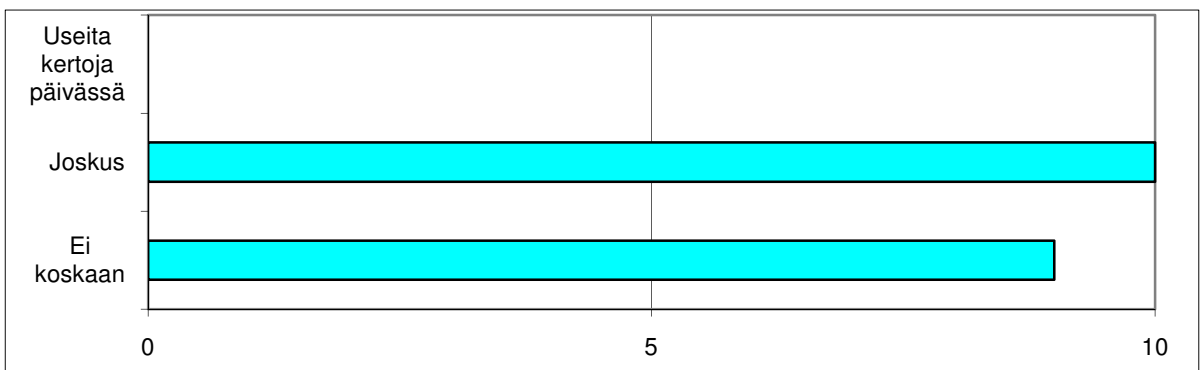
## Muu aiheuttaja

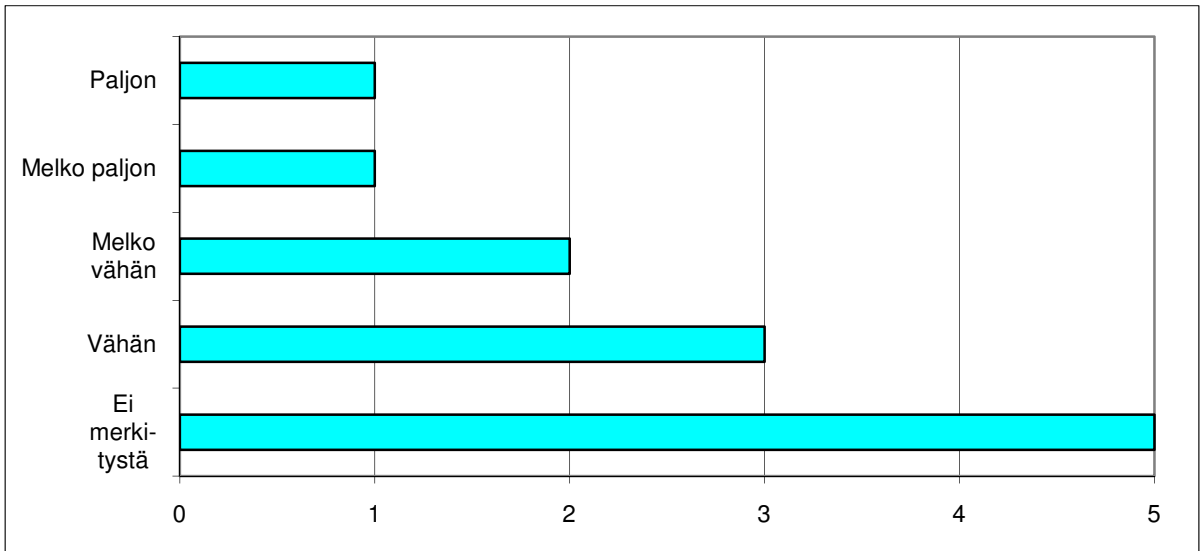


## 15. Kun ajattelet noin 2-3 viimeisen kuukauden aikaa, katsotko että melu on ollut:

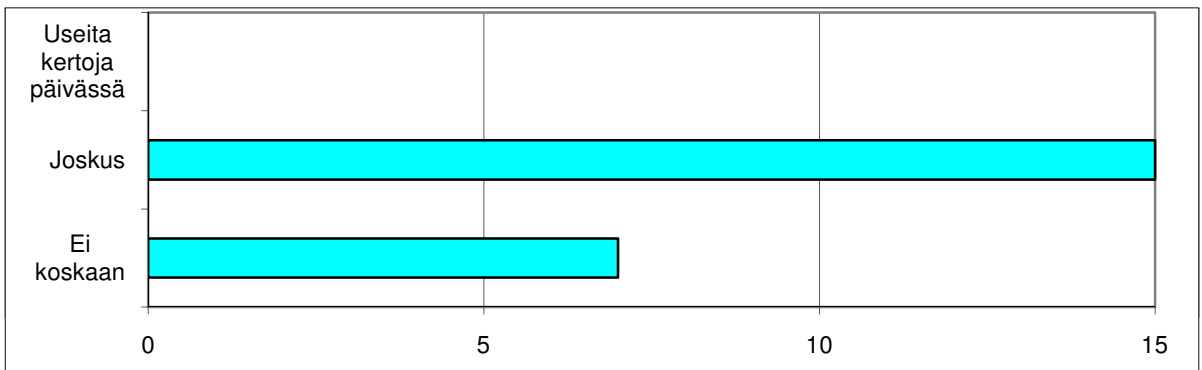


## 16. Kuinka usein melusta aiheutuva haitta on vaikeuttanut nukahtamista

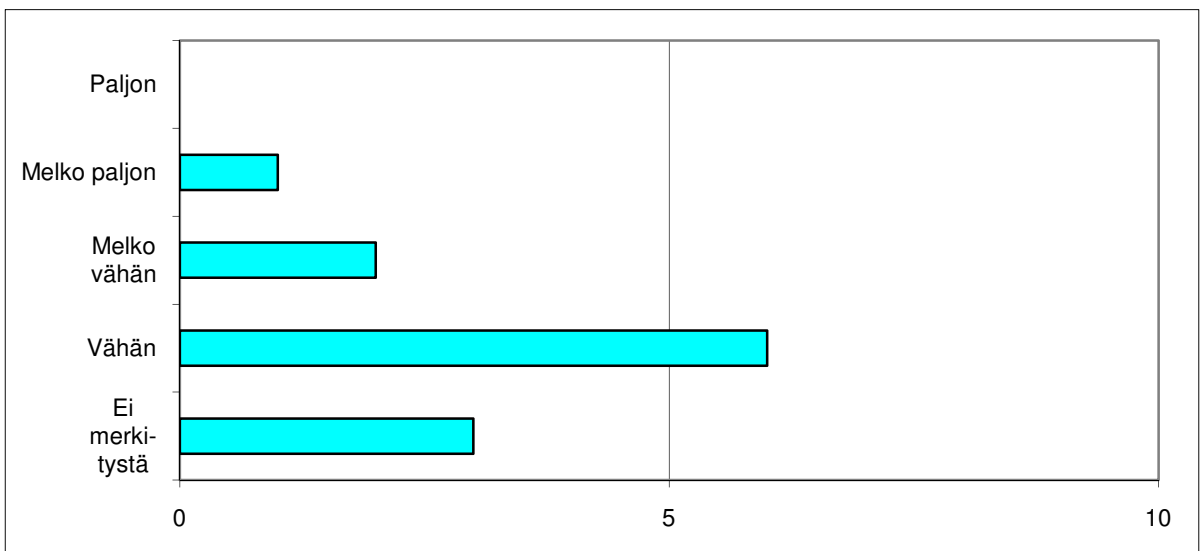


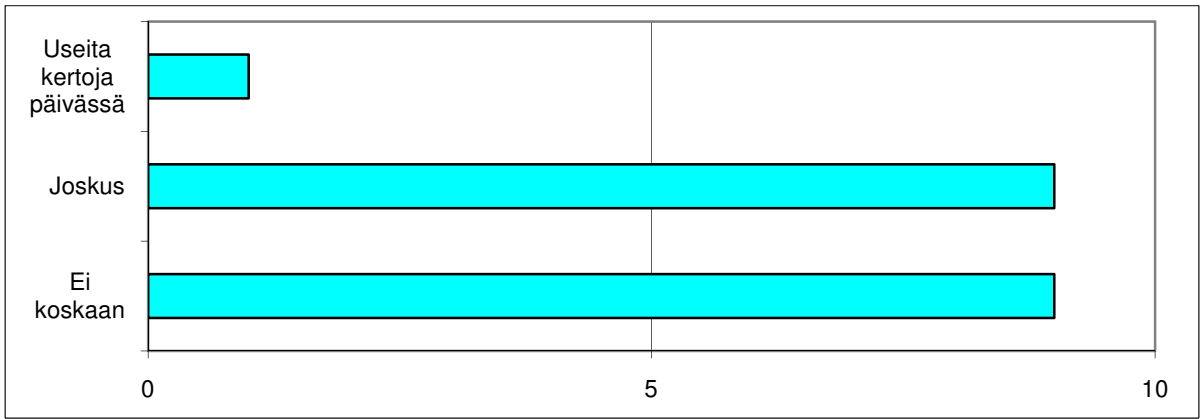


Kuinka usein melusta aiheutuva haitta herättää kesken unien

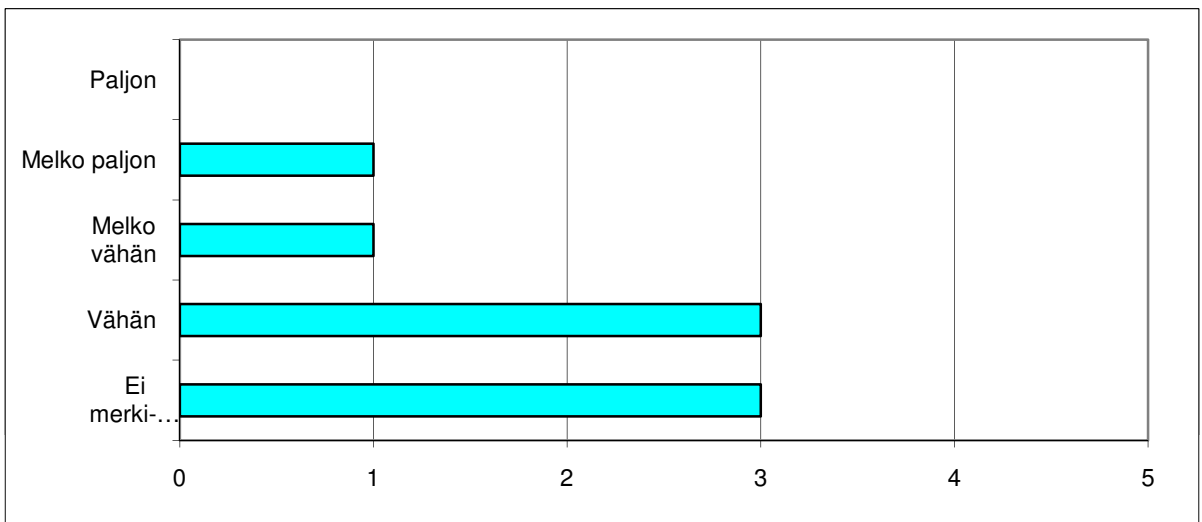


Kuinka paljon häiritsee

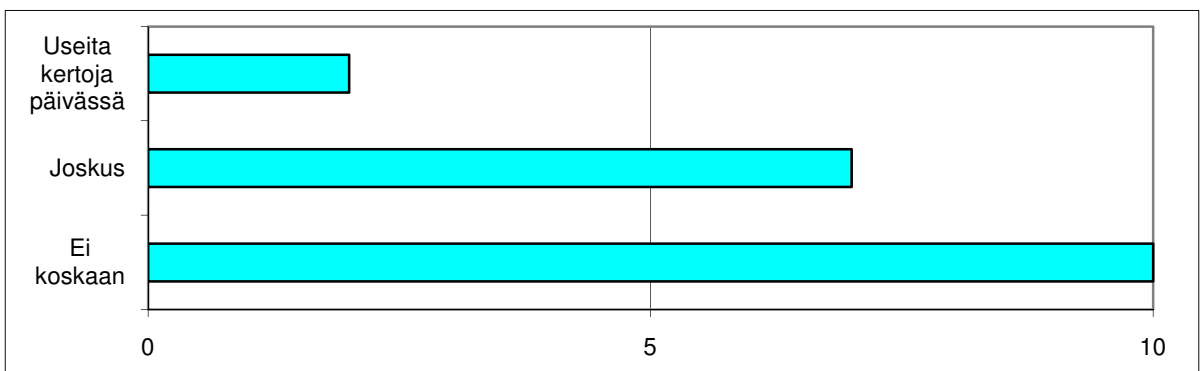




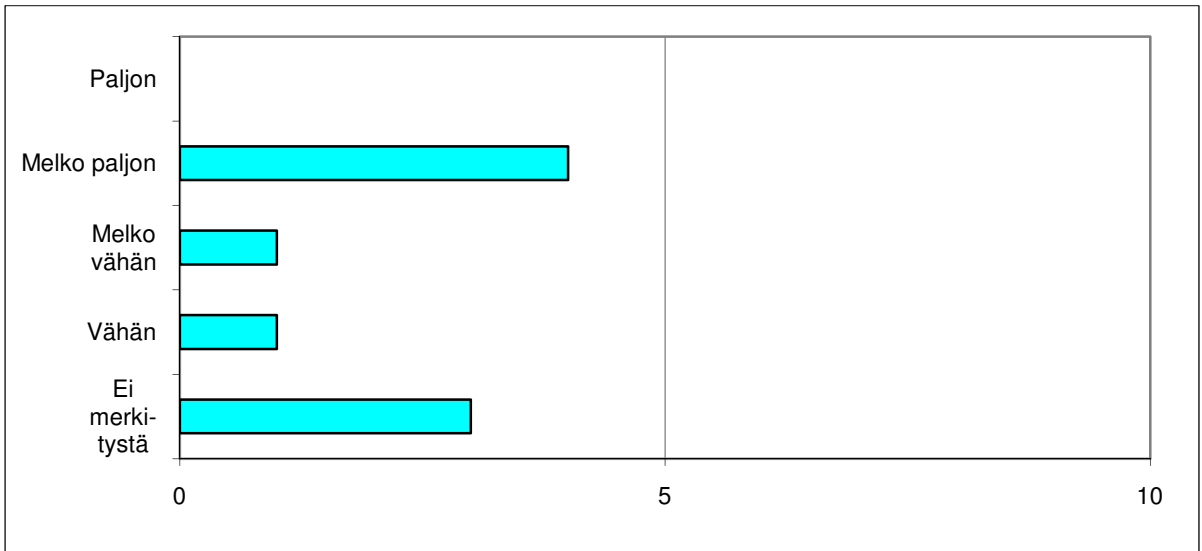
Kuinka paljon häiritsee



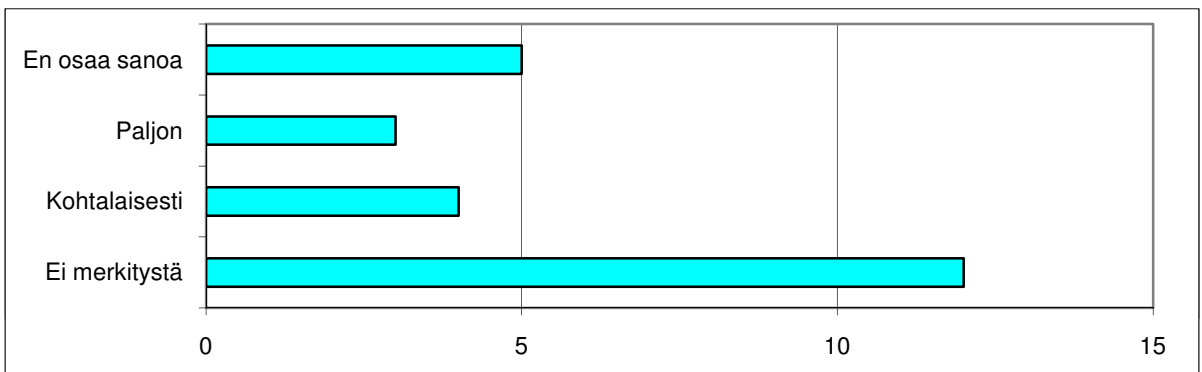
Kuinka usein melusta aiheutuva haitta häiritsee keskustelua



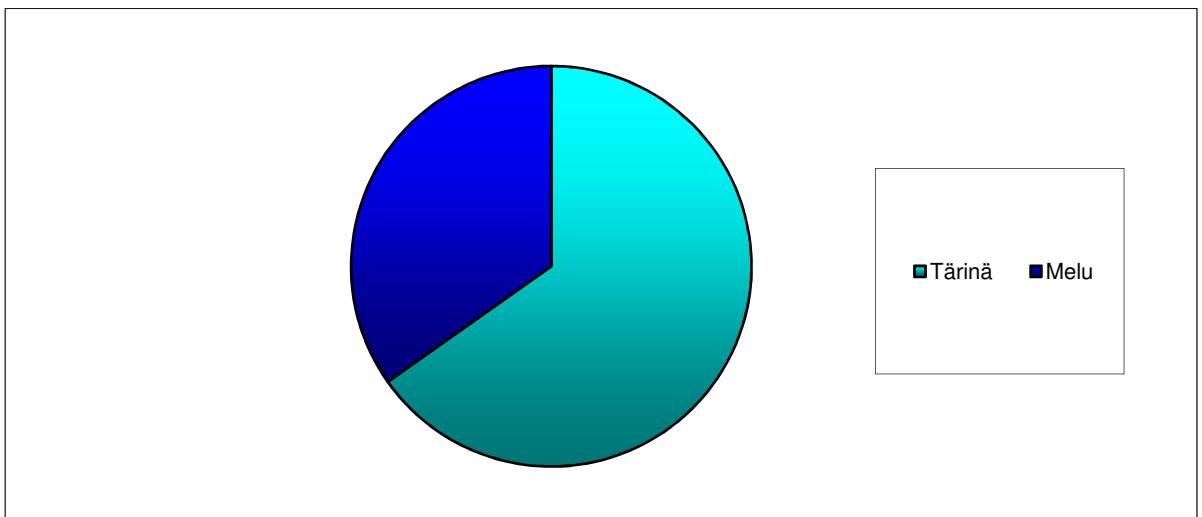




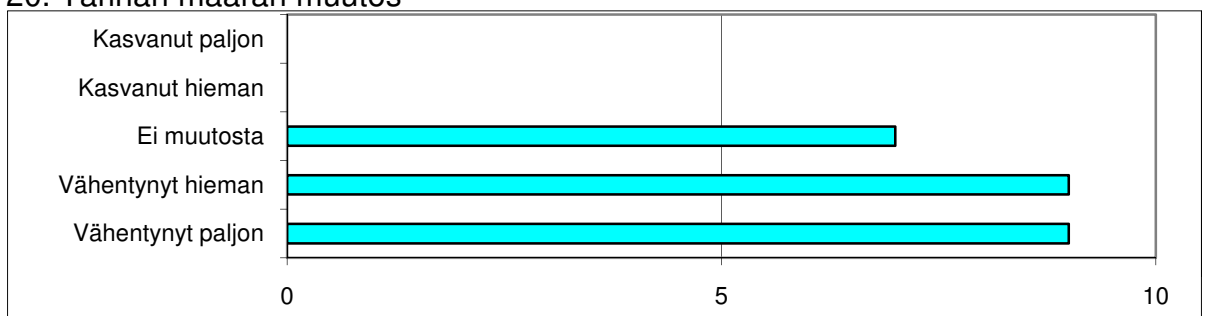
17. Melun poistamisen vaikutus tärinän epämiellyttävyyteen



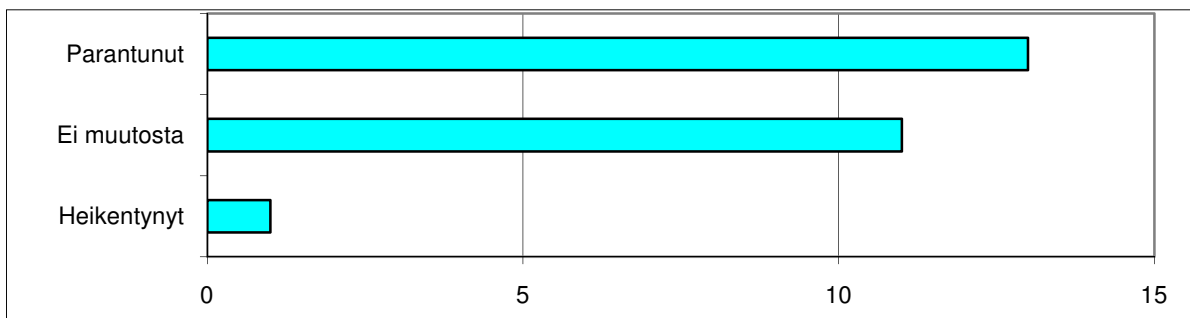
18. Kumpi on häiritsevämpää



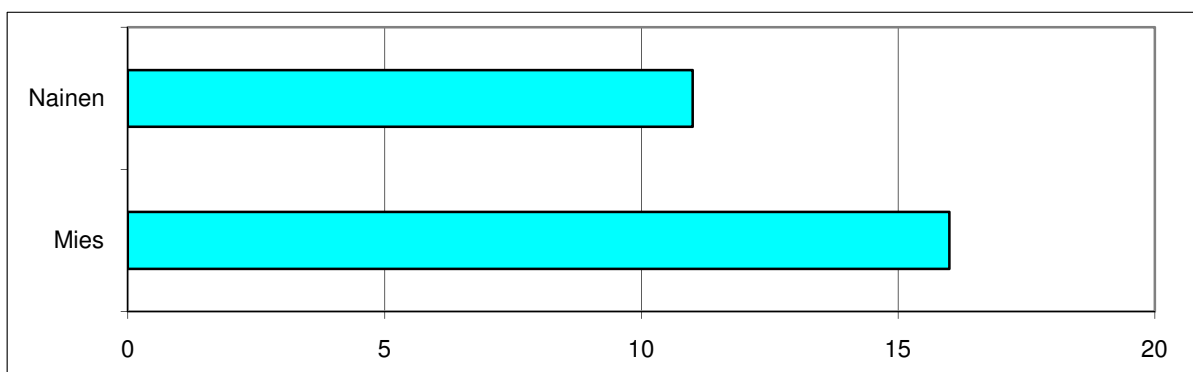
20. Tärinän määrän muutos



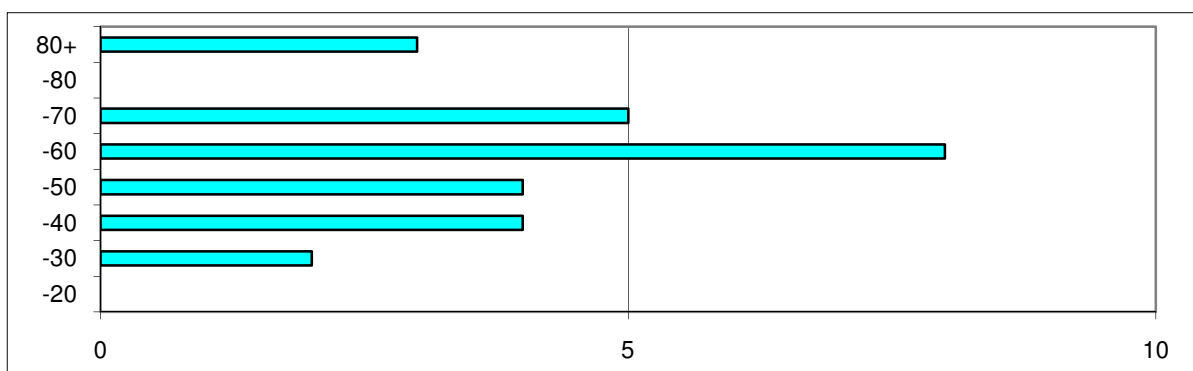
21. Onko asuinviihtyvyys mielestänne muuttunut verrattuna ennen kesää 2009 vallinneeseen tilanteeseen?



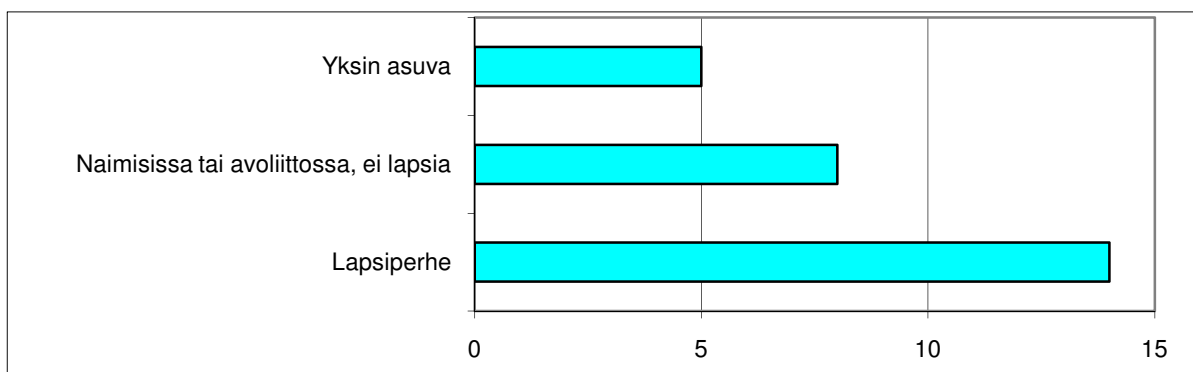
Vastaajan sukupuoli



Vastaajan ikä



Asumismuoto





Missä asennossa tärinästä aiheutuva haitta on suurin?	Seistessä		Istuessa		Maatessa					
	1	8	15	11	8	4				
Mikä on vuorokaudenaika, jolloin tärinästä aiheutuva haitta on suurin?	Ei eroa		07-12		12-18		18-22		22-07	
	2	3	3	4	14	6	9	4	1	2
Minä viikonpäivänä ja mihin kellonaikaan yksittäinen liikenneväline aiheuttaa häiritsevimmän tärinän päiväsaikaan (07.00-22.00)?	Ei eroa		07-12		12-16		16-20		20-22	
	5	1	3	3	3	5	3	3	3	3
Minä viikonpäivänä ja mihin kellonaikaan yksittäinen liikenneväline aiheuttaa häiritsevimmän tärinän yöaikaan (22.00-07.00)?	Ei eroa		00-02		02-04		04-07			
	6	2	1	3	3	6	2	1	3	3
Missä päin taloa tärinä ilmenee?	Kerros		Pohjoispuoli		Itäpuoli		Eteläpuoli		Länsipuoli	
	1	9	2	10	3	2	2	2	2	2
Aiheutuuko rakennukseen muista syistä havaittavaa värähtelyä?	Kuinka usein esiintyy?		Ei koskaan		Useita kertoja päivässä		Ei lainkaan		Vai etkö ole havainnut lainkaan?	
	10	9	4	14	7	19	19	13	2	2
Tärinän aiheuttaja	Ei koskaan		Useita kertoja päivässä		Ei lainkaan		Vai etkö ole havainnut lainkaan?			
Liikenne katualueella	10		9		4		7		4	
Rakentaminen tai vastaava naapurissa tai katualueella	14		7		7		7		7	
Kävely rakennuksessa	19		19		19		19		19	
Ovien paiskonta tms.	19		19		19		19		19	
Muusta, mistä?	13		2		2		2		2	
Entä pienin?										
Seistessä										
Istuessa										
Maatessa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										
Ei eroa										
6										
9										
4										
1										
2										
Entä pienin?										
Ei eroa										
07-12										
12-18										
18-22										
22-07										

Seuravat kysymykset koskevat liikenteestä sisätiloihin siirtyvää melua.

Onko melu ollut viimeisen 12 kuukauden aikana:

Hyvin epämiellyttävää	
Kohtalaisen epämiellyttävää	6
Hieman epämiellyttävää	12
Ei lainkaan epämiellyttävää	5
Vai etkö ole havainnut lainkaan?	

Kuinka usein melusta aiheutuva haitta esiintyy ja kuinka paljon haitta häiritsee?

Melusta aiheutunut haitta	Kuinka usein esiintyy?		Kuinka paljon häiritsee?				
	Ei koskaan	Joskus kertoja näivässä	Ei merkitystä	Vähän	Melko vähän	Melko paljon	Paljon
Vaikeuttaa nukahtamista	9	10	5	3	2	1	1
Herättää keken unien	7	15	3	6	2	1	1
Häiritsee keskittymistä	9	9	3	3	1	1	1
Häiritsee keskustelua	10	7	3	1	1	1	4

Jos myös melu on häiritsevää, niin kuinka paljon liikennemelun poistuminen vaikuttaisi liikenteestä

Ei merkitystä	Kohtalaise	Paljon	En osaa sanoa
12	4	3	5

Kumman koet häiritsevämmäksi, tärinän vai melun?

Tärinä	15	Melu	8
--------	----	------	---

Jos havaitset melua ja tärinää, kumman havaitset ensin?

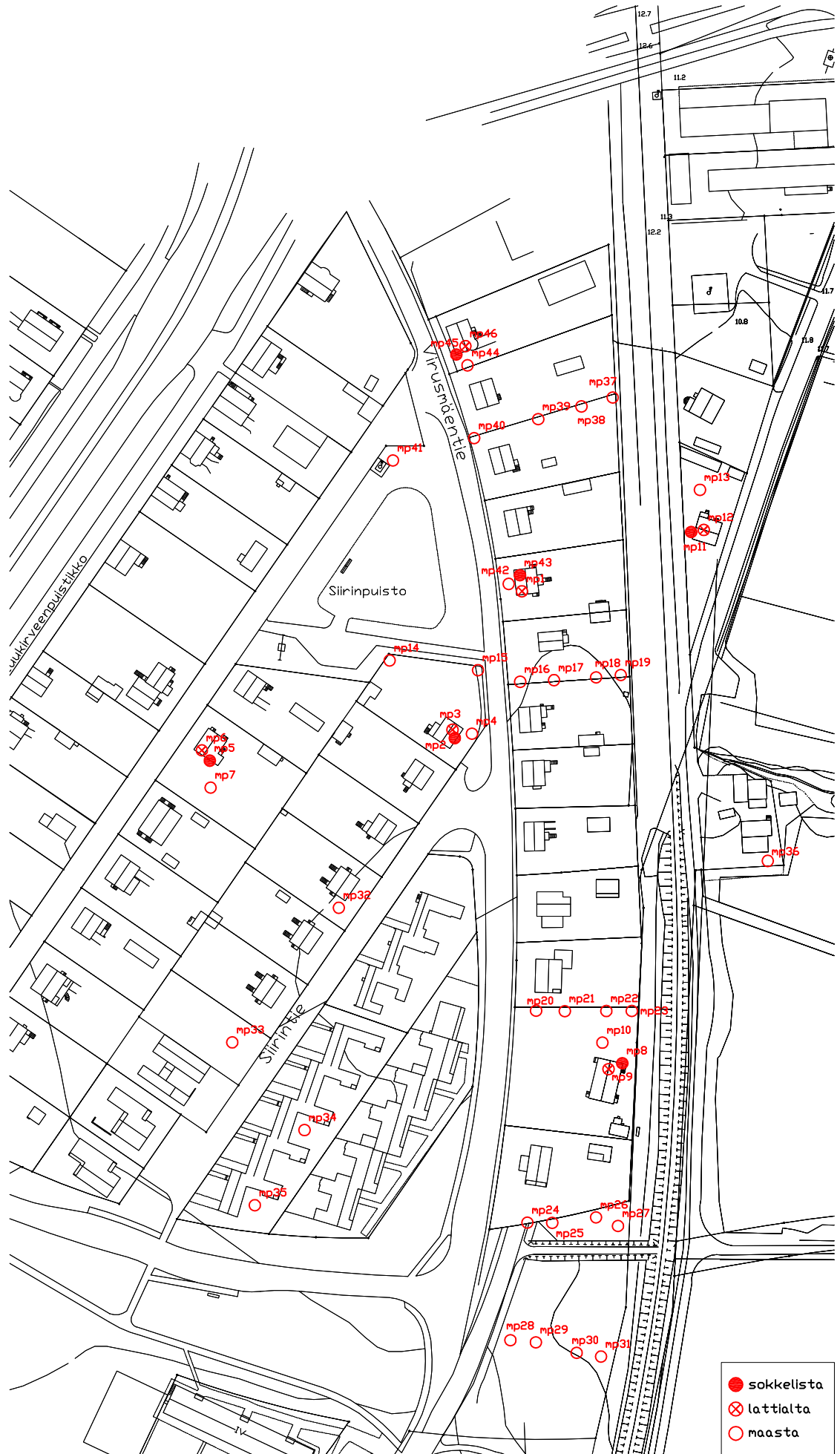
Tärinä	12	Melu	12
--------	----	------	----

Onko tärinän määrässä mielestänne tapahtunut muutosta jos vertaatte nykytilannetta ennen kesää 2009 vallinneeseen tilanteeseen?

Vähentynyt paljon	Ei muutos	Kasvanut hieman	Kasvanut paljon
9	9	7	

Onko asuinviihtyvyys mielestänne muuttunut johtuen tärinän määrän muutoksesta verrattuna ennen kesää 2009 vallinneeseen tilanteeseen?

Heikentynyt	Ei muutosta	Parantunut
1	11	13



		x	y	z	x			z			y			x	z	y	x	z	y	etäisyys rataan [m]
					$v_{w,95}$ [mm/s]	$v_{w,95}$ [mm/s]	$v_{w,95}$ [mm/s]	$v_{max,95}$ [mm/s]	$v_{max,95}$ [mm/s]	$v_{max,95}$ [mm/s]	$v_{max}$ [mm/s]	$v_{max}$ [mm/s]	$v_{max}$ [mm/s]							
mp1	kohde 3	6707347,048	1570848,419	11	1,74	0,70	1,05	4,00	1,83	2,75	4,11	1,94	2,84	5	5	4	50			
mp2	kohde 7	6707293,445	1570823,917	11	0,24	0,64	0,24	0,80	1,60	0,73	0,83	1,57	0,78	4	4	3	75			
mp3	kohde 7	6707296,745	1570822,917	11	0,19	0,04	0,50	0,43	0,13	1,08	2,71	1,51	3,11	7	22	6	77			
mp4	kohde 7	6707296,345	1570828,117	11	0,36	0,45	0,27	1,07	1,33	0,80	1,08	1,38	0,91	13	12	11	72			
mp5	kohde 8b	6707284,844	1570738,312	11	0,11	0,29	0,09	0,37	0,69	0,30	0,38	0,79	0,30	4	5	4	163			
mp6	kohde 8b	6707288,045	1570733,812	11	0,31	0,14	0,47	0,76	0,39	1,15	0,92	0,48	1,49	5	5	5	167			
mp7	kohde 8b	6707283,044	1570738,112	11	0,16	0,19	0,18	0,53	0,51	0,58	0,59	0,60	0,71	10	7	6	164			
mp8	c6	6707178,094	1570883,256	11	0,64	1,07	0,34	1,65	2,79	1,03	1,68	3,27	0,97	4	6	5	19			
mp9	kohde 1	6707177,538	1570878,520	11	1,52	0,95	1,73	4,10	2,61	4,37	3,86	2,76	4,40	4	5	5	24			
mp10	c5	6707185,434	1570876,176	11	0,66	1,33	0,37	1,73	3,46	1,09	1,92	3,76	1,11	5	6	6	26			
mp11	kohde 6	6707367,149	1570908,823	11	0,46	1,17	0,49	1,50	3,39	1,73	1,56	3,43	1,75	5	6	8	12			
mp12	kohde 6	6707368,950	1570910,223	11	2,84	1,35	2,19	7,15	4,20	5,63	7,32	4,46	5,71	5	5	4	14			
mp13	kohde 6	6707380,550	1570912,723	11	0,71	1,53	0,88	1,93	3,98	2,67	2,05	4,11	3,02	5	6	5	16			
mp14	b6	6707322,242	1570800,090	12	0,23	0,43	0,32	0,75	1,13	0,85	0,73	1,13	0,89	4	5	4	99			
mp15	b5	6707318,315	1570832,398	11	0,25	0,50	0,29	0,82	1,29	0,91	1,00	1,41	0,89	11	12	5	66			
mp16	b4	6707314,033	1570846,876	11	0,39	0,55	0,51	1,06	1,50	1,30	1,13	1,43	1,40	10	9	11	57			
mp17	b3	6707314,607	1570858,931	11	0,49	0,87	0,48	1,26	2,36	1,33	1,21	2,29	1,44	5	6	5	45			
mp18	b2	6707315,608	1570873,922	11	0,66	1,12	0,79	1,79	3,11	2,17	2,14	3,41	2,19	5	6	5	30			
mp19	b1	6707316,440	1570882,727	11	0,80	1,21	1,02	2,29	3,41	2,89	2,44	3,19	3,24	6	6	5	21			
mp20	c4	6707196,810	1570852,544	11	0,37	1,15	0,46	1,05	2,85	1,29	1,08	2,95	1,30	5	5	5	50			
mp21	c3	6707196,648	1570862,779	11	0,47	0,98	0,47	1,27	2,72	1,53	1,35	3,03	1,57	10	8	10	40			
mp22	c2	6707196,705	1570877,575	11	0,57	1,22	0,62	1,54	3,26	1,66	1,64	3,35	1,70	6	6	7	25			
mp23	c1	6707196,720	1570886,661	11	0,51	1,45	0,92	1,46	3,65	2,41	1,46	3,92	2,38	5	6	5	16			
mp24	d4	6707121,291	1570849,440	11	0,30	0,72	0,34	0,85	1,86	0,98	0,87	2,00	1,08	5	5	4	49			
mp25	d3	6707121,215	1570858,303	11	0,41	1,07	0,35	1,11	2,79	1,10	1,27	2,87	1,16	5	5	5	40			
mp26	d2	6707123,158	1570873,900	11	0,51	1,11	0,57	1,53	3,01	1,55	1,65	3,22	1,57	6	6	5	24			
mp27	d1	6707120,090	1570881,715	11	0,66	1,28	0,70	1,87	3,34	1,94	2,03	3,91	2,06	6	6	6	17			
mp28	e4	6707079,388	1570843,384	11	0,55	1,21	0,36	1,41	2,81	1,10	1,44	3,00	1,02	6	6	5	48			
mp29	e3	6707078,628	1570852,469	11	0,54	1,23	0,60	1,37	2,82	1,55	1,41	3,06	1,56	5	6	5	39			
mp30	e2	6707074,882	1570866,992	11	0,65	1,58	0,52	1,82	3,85	1,63	2,11	4,62	1,65	6	6	6	24			
mp31	e1	6707073,555	1570875,684	11	0,73	1,67	0,79	2,01	4,44	2,37	2,17	5,25	2,29	6	6	6	15			
mp32	L1	6707231,141	1570781,614	11	0,14	0,19	0,15	0,69	0,60	0,76	0,83	0,59	0,91	3	4	3	120			
mp33	L2	6707159,937	1570711,710	11	0,01	0,01	0,01	0,04	0,04	0,06	0,04	0,05	0,08	3	5	3	160			
mp34	L3	6707151,836	1570770,314	11	0,10	0,23	0,12	0,55	0,60	0,63	0,59	0,62	0,60	3	5	3	130			
mp35	L4	6707126,635	1570753,113	11	0,12	0,28	0,10	0,48	2,83	0,44	0,56	0,79	0,52	5	6	7	145			
mp36	L5	6707247,442	1570935,724	11	0,27	0,81	0,46	1,11	2,04	1,46	1,27	2,25	1,56	9	6	8	34			
mp37	a1	6707415,338	1570879,852	11	0,99	1,19	0,71	-	-	-	-	-	-	-	6	-	15			
mp38	a2	6707412,170	1570868,706	11	0,83	0,93	0,58	-	-	-	-	-	-	-	6	-	26			
mp39	a3	6707407,628	1570853,297	11	0,63	0,73	0,49	-	-	-	-	-	-	6	5	6	42			
mp40	a4	6707400,865	1570830,472	12	0,32	0,51	0,19	-	-	-	-	-	-	6	6	5	65			
mp41	a5	6707392,906	1570801,534	-	0,28	0,37	0,18	-	-	0,18	-	-	-	5	5	5	92			
mp42	3maa	6707348,907	1570842,767	-	0,26	0,7	0,42	-	-	-	-	-	-	5	5	5	50			
mp43	3s okkeli	6707352,007	1570846,776	-	0,24	0,5	0,51	-	-	-	-	-	-	5	5	5	50			
mp44	4maa	6707426,803	1570828,094	-	0,36	0,77	0,59	-	-	-	-	-	-	5	5	5	70			
mp45	4s okkeli	6707430,649	1570824,118	-	0,25	0,58	0,44	-	-	-	-	-	-	5	5	5	70			
mp46	4lattia	6707433,646	1570827,363	-	0,27	0,47	0,34	-	-	-	-	-	-	5	5	5	70			