

Samuel Talka

# PERUSTUSTEN TÄRINÄNVAIMENNUS

Opinnäytetyö  
Rakennustekniikka

2019



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

<b>Tekijä</b>	<b>Tutkinto</b>	<b>Aika</b>
Samuel Talka	Insinööri (AMK)	Marraskuu 2019
<b>Opinnäytetyön nimi</b>		
Perustusten tärinänvaimennus		46 sivua
<b>Toimeksiantaja</b>		
Sitowise Oy		
<b>Ohjaajat</b>		
Juha Karvonen, Jani Pitkänen, Teemu Savolainen		
<b>Tiivistelmä</b>		
<p>Tärinä ja runkomelu ovat liikennemelun kaltaisia häiriötekijöitä rakennuksen viihtyvyyttä ajateltaessa. Melulle on osoitettu huomattavasti enemmän ohjeistuksia ja rajoituksia rakentamisen lainsäädännössä kuin tärinälle ja runkoäänelle, ja siksi niiden tutkiminen ja ohjeistuksen laatiminen kaupunkiympäristöjen ja väylien määrän kasvaessa on tarpeen.</p> <p>Ihmisiä häiritsevä liikennetärinä ja runkomelu ovat liikenteen maahan synnyttämän värähtelyn tuotoksia. Näitä ilmiöitä esiintyy erilaisilla, maaperästä riippuvilla etäisyyksillä liikenneväylistä, ja niiden esiintymistä voidaan rajoittaa erilaisilla keinoilla. Tällaisia keinoja ovat väylille rakennettavat eristykset, maaperään tehtävät muutokset sekä rakennukseen toteutettava eristys. Tässä opinnäytetyössä keskitytään tilanteeseen, jossa rakennus suunnitellaan olemassa olevan väylän läheisyyteen, eikä maaperään tehtävä värähtelyn esto ole mahdollinen. Jo olemassa olevien teiden eristäminen on niin hankalaa, että rakennuksen eristäminen on paras vaihtoehto.</p> <p>Rakennuksen eristämiseksi ja värähtelyn vaimentamiseksi on erilaisia vaihtoehtoja, jotka sopivat erilaisiin tapauksiin. Eristys ja sen mitoitus toteutetaan eri tavalla riippuen maaperässä vallitsevan värähtelyn taajuudesta. Matalat taajuudet ovat tyypillisiä pehmeillä mailla ja aiheuttavat usein tärinää. Korkeat taajuudet taas kulkevat paremmin kiinteässä maaperässä aiheuttaen runkomelua erityisen selvästi silloin, kun rakennus ja väylä ovat molemmat yhteydessä kallioon. Mitoituksessa periaatteena on, ettei häiriö rakennuksen käyttäjälle olisi kohtuutonta.</p> <p>Tässä opinnäytetyössä on esitelty muutama esimerkkirakennuskohde, joissa maaperässä esiintynyt tärinä on velvoittanut rakentajan toteuttamaan vaimennuksen sitä vastaan. Kaksi kohteista on tilaajayritykselle tyypillisiä suunnittelukohteita, monikerroksisia asuinkerrostaloja, mutta mukana on myös amerikkalainen messukeskus. Tapauksista on esitelty lähtötilanne ja toteutunut värähtelyn vaimennussuunnitelma.</p>		
<b>Asiasanat</b>		
Liikennetärinä, runkomelu, tärinänvaimennus, eristys, perustukset		

<b>Author</b>	<b>Degree</b>	<b>Time</b>
Samuel Talka	Bachelor of Engineering	November 2019
<b>Thesis Title</b>		
Vibration Dampening in Building Foundations		46 pages
<b>Commissioned by</b>		
Sitowise Oy		
<b>Supervisors</b>		
Juha Karvonen, Jani Pitkänen, Teemu Savolainen		
<b>Abstract</b>		
<p>Ground-borne vibration and noise are much alike the noise generated by traffic, when it comes to disturbances encountered in buildings. In law-making, traffic noise has been taken into consideration much more widely than vibration or structure-borne noise. Further research of these phenomena is imperative, as urbanization and rising traffic levels make their occurrences more common.</p> <p>The troublesome ground-borne vibration and noise are the product of traffic on both wheels and rails. They occur near railways and heavily trafficked roads at distances dependent on the type of soil. Their occurrence can be deterred by means of insulating the railway or the building, or by modifications on the soil in between. This thesis focuses on the means of insulating a building against vibrations in the ground. Such a situation may occur when building near existing traffic routes. Typically, modifications to an already existing structure are too hard, leaving insulation of the building the better option.</p> <p>There are several ways to insulate a building against vibration that fit different situations. Requirements for the insulation vary depending on the frequencies of vibration present in the soil. Low frequencies are often present in soft grades of soil and are usually the cause of perceivable whole-body vibration, whereas higher frequencies travel easier on stiff ground and solid rock causing structure-borne noise inside the building. The purpose of vibration planning is to prevent excessive annoyance befalling the resident.</p> <p>In this thesis, a few example cases of construction projects with vibration issues have been presented along with the used solutions to the problems. Two of the examples are multi-storey apartment blocks, projects typical to the commissioner company, and one is a large convention centre in America. The cases have been reviewed to give insight to the usage of vibration dampening methods in practice.</p>		
<b>Keywords</b>		
Ground-borne vibration, structure-borne noise, vibration dampening, insulation, foundation		

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	TÄRINÄ JA ÄÄNI.....	6
2.1	Liikennetärinä.....	7
2.2	Runkomelu.....	9
2.3	Resonanssi.....	10
2.4	Maalajin vaikutus värähtelyyn.....	11
3	MITOITUKSEN OHJEARVOJA JA PERIAATTEITA.....	12
3.1	Ihminen ja värähtelyjen havaitseminen.....	12
3.2	Liikennetärinän ohjearvot.....	14
3.3	Runkomelun ohjearvot.....	16
4	TÄRINÄNVAIMENNUS KERROSTALORAKENTAMISESSA.....	18
4.1	Massiiviset rakenteet.....	18
4.2	Kelluvat laatat.....	19
4.3	Jousiperustus.....	19
4.4	Elastomeeriset tärinäeristeet.....	20
5	TOTEUTETTUJA TÄRINÄNVAIMENNUSRATKAISUJA.....	25
5.1	Helsingin Villiviini.....	25
5.2	Helsingin Keinulaudantie 2 a.....	32
5.3	Dallasin messukeskus.....	36
6	YHTEENVETO.....	39
6.1	Jatkotutkimusmahdollisuuksia.....	40
6.2	Pohdintaa.....	41
	LÄHTEET.....	42
	KUVALUETTELO	
	TAULUKKOLUETTELO	

## 1 JOHDANTO

Asuinrakennuksissa ilmenevä, liikenteen aiheuttama tärinä tai runkoääni on harvinainen mutta ilmetessään kiusallinen ongelma. Liikennetärinästä on kirjoitettu enemmän kuin sen kanssa läheisestä ilmiöstä, runkomelusta. Näistä on olemassa ohjeistuksia raja-arvoista ja mittaamisen menettelyistä, mutta laissa ei tarkkaan määritellä, kuinka ne tulee ottaa huomioon. Rakentamismääräyskokoelmassa (RakMK B3 2004, 10) on kirjoitettu, että tärinä ”ei saa aiheuttaa vaurioita rakennukselle eikä kohtuutonta häiriötä rakennuksessa oleville ihmisille”, mutta se ei määritä raja-arvoja tai mittaustapaa.

Rakentamisessa suositaan nykyään kevyitä rakenteita, kuten teräsrunkoja sekä esijännitetyjä betonirakenteita. Nämä mahdollistavat esimerkiksi suuret välipohjien jännevälit mutta johtavat rakennuksiin, jotka ovat herkempiä värähtelyn matalammilla taajuuksilla aiheuttamille ongelmille. Alle 250 Hz taajuudet ovat usein tärinän ja runkomelun kannalta riskialuetta. (Hassan 2006, 317.) Liikennetärinään kiinnitettiin ensi kertaa huomiota maanalaisten rautateiden rakentamisen yhteydessä, ja avoratojen aiheuttamaan tärinäan ollaan vasta viime aikoina kiinnitetty huomiota (de Vos 2017, 7).

Alati tiivistyvässä kaupunkiympäristössä rakennesuunnittelija huomaa yhä useammin olevansa liikenteen värähtelyherätteen aiheuttaman ongelman edessä. Uutta kohdetta suunniteltaessa tai laajentaessa vastassa voi olla vilkas rautatie, jonka vaikutus rakennuksen asumismukavuuteen täytyy ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Huomattavasti helpompaa on rakentaa rautatie tärinäeristykseen, kuin eristää uusi talo vanhan rautatien tärinää vastaan. Toisaalta olemassa olevaa rataa voi myös olla vaikea eristää. Niinpä rakennuksen rakenteellisen tärinäeristyksen suunnittelulle on tarvetta.

Tämä opinnäytetyö tarjoaa yleiskatsauksen tärinäan ja runkomeluun sekä niiden eristämiseen ja vaimennukseen. Työssä kerrotaan niiden syntymisestä ja huomioon ottamisesta rakennussuunnittelussa sekä esitellään esimerkkien avulla, miten maaperän värähtelyn siirtymistä perustuksiin ehkäistään. Tavoitteena on auttaa rakennussuunnittelijaa ymmärtämään kyseisiä ilmiöitä ja selvittää, miten ne otetaan suunnittelussa huomioon.

## 2 TÄRINÄ JA ÄÄNI

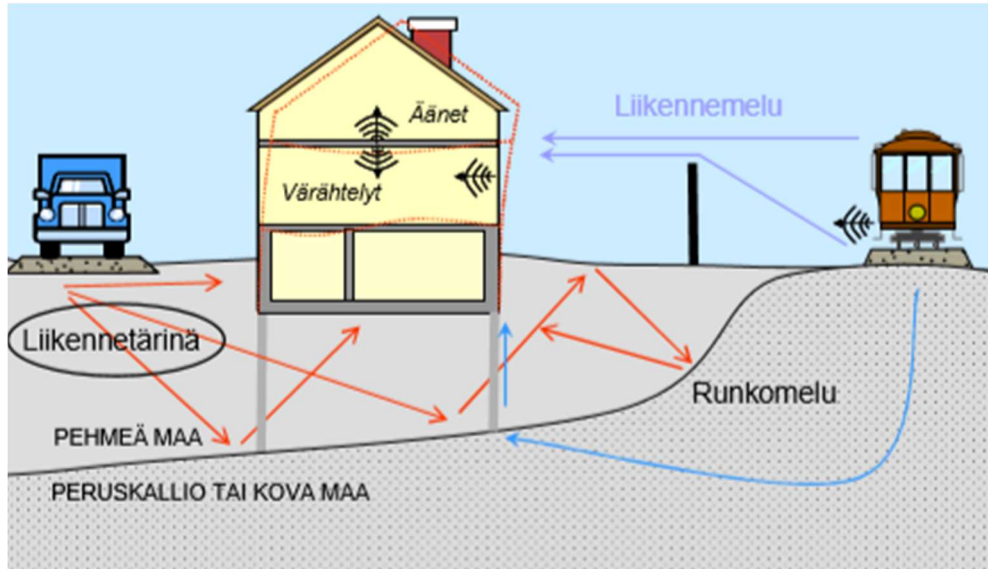
Maaperässä esiintyvä, tärinää ja runkoääntä aiheuttava värähtely voi aiheutua muun muassa liikenteestä, maanrakennustöistä ja maankuoren järkkymisestä. Värähtelyheräte tarkoittaa värähtelyn synnyttävää tekijää. Raideliikenteen tapauksessa heräte on junan pyörien ja kiskojen välinen kontakti, jossa epäta-saisuudet näiden välillä herättävät rakennneosat värähtelemään. Maaperään välittynyt värähtely taas toimii herätteenä rakennuksen perustukselle ja niin edelleen.

Kappale värähtelee, kun se toistaa samanlaista liikettä jaksoittain. Taajuus on kappaleen toistamien jaksollisten liikkeiden lukumäärä aikayksikköä kohden ja SI-järjestelmässä sen yksikkö on hertsi (Hz). Amplitudilla tarkoitetaan kappaleen värähtelyjakson aikaista suurinta poikkeamaa tasapainoasemasta. (Suvanto & Laajalehto 2008, 204.) Värähtelyn suuruuden kuvaamiseen käytetään amplitudin sijasta yleensä värähtelynopeutta, jota mitataan millimetreinä sekunnissa (Talja 2004, 13).

Värähtelyn kanssa samankaltainen suure on intensiteettitaso eli äänenpaine-taso. Ihminen ei havaitse kummassakaan tapahtuvaa muutosta suoraan ver-rannollisesti oikeasti tapahtuneeseen tason muutokseen. Äänenpainetasolla ei edes ole varsinaista yksikköä, vaikka desibeliä (dB) sellaisena käytetäänkin. (Suvanto & Laajalehto 2008, 283; Talja 2004, 13.) de Vosin (2017, 39) mu-kaan desibelin määritelmä on pienin muutos äänenpaineinetasossa, jonka ih-minen pystyy normaalisti huomaamaan. Silti jo kuuden desibelin muutos alas-päin äänenpainetasossa tarkoittaa sen puolittumista (Talja 2004, 13). Arkikie-lessä äänenpainetasoa kutsutaan usein äänen voimakkuudeksi.

Liikenteestä aiheutuva häiriö ilmenee kolmella eri tavalla: liikennetärinä, lii-kennemeluna sekä runkomeluna. Liikennetärinä tarkoittaa liikenteen maahan aiheuttaman värähtelyn välittymistä maaperän kautta rakennukseen ja on ha-vaittavissa vain tärinä. Sen merkittävin taajuusalue ihmisen kannalta on maaperän pehmeydestä riippuen 5-25 Hz (Talja 2004, 13). Liikennemelu on suoraan liikenteestä julkisivun läpi ilmaitse kantautuvaa ääntä. Runkomelu

taas on liikennetärinän tavoin maaperän kautta välittyvää värähtelyä, mutta aiheuttaa rakennuksessa ihmiskorvin kuultavaa ääntä. (de Vos 2017, 11-12.) Taajuudeltaan se on liikennetärinää tiheämpää ja etenee hyvin kalliassa ja huonosti pehmeässä maassa. Matalataajuinen liikennetärinä sen sijaan etenee paremmin pehmeässä maassa kuin kalliassa, kuten kuvassa 1 esitetään.



Kuva 1. Liikenteestä aiheutuvan värähtelyn eteneminen rakennukseen (Talja 2011, 11)

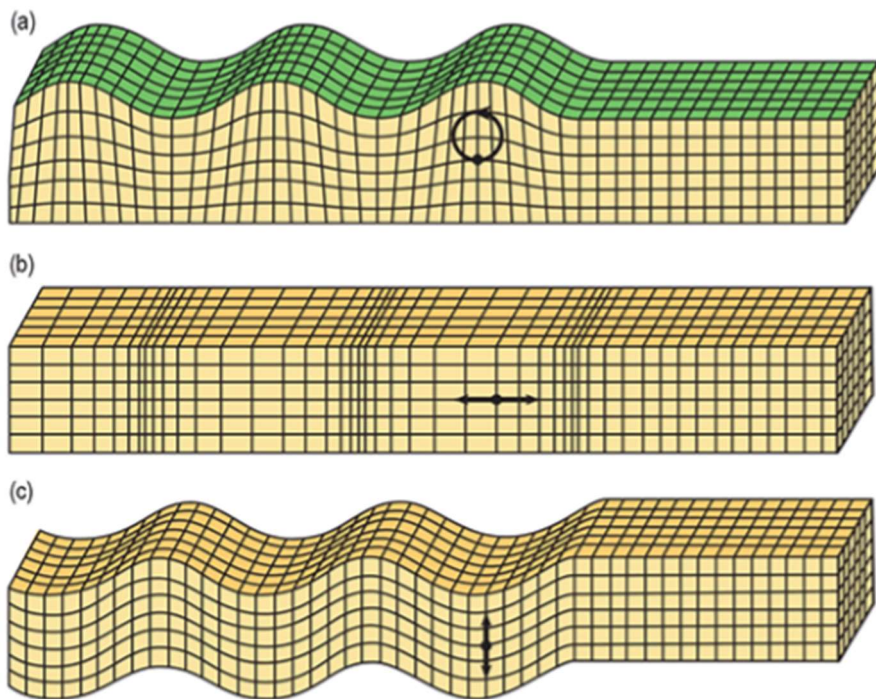
Liikennemelu on näistä helpoin ymmärtää ja mitata. myös sen torjuminen on kohtuullisen yksinkertaista maavalleilla tai meluaidoilla, jotka muodostavat esteen häiriön lähteen suoralle reitille rakennukseen. Maaperän kautta johtuvaa tärinää sen sijaan on hankalampi torjua.

## 2.1 Liikennetärinä

Liikenteen aiheuttama tärinä ei yleensä aiheuta rakenteellisia vaurioita. Pintojen vaurioita saattaa ilmetä esimerkiksi paalutuksen aiheuttaman tärinän seurauksena, mutta siinä värähtelynopeus ylittääkin usein jopa 5 mm/s, kun liikennetärinän värähtelynopeus on tyypillisesti 0,1 ja 0,6 mm/s välillä. (de Vos 2017, 37.)

Liikennetärinä on myös täysin eri asia kuin esimerkiksi voimakkaista maanjäristyksistä aiheutuva värähtely. Suomen maaperällä rakennuksia vaurioittavaa maan järkkymistä ei kuitenkaan ole tapahtunut, eikä siltä suojaaviin rakentamisen ratkaisuihin perehdytä tässä opinnäytetyössä.

Rakennukseen johtuva, liikenteen aiheuttama värinä voi ilmetä eri tavoin. Sen voi tuntea suoraan kehossaan tai se voi aiheuttaa kalusteiden tai esineiden kolinaa tai kilinää. Värähtelyn etenemiseen maaperässä herätelähteen ja rakennuksen välillä vaikuttaa moni asia, kuten maalajien pehmeys ja maakerroksen paksuus (kuva 2). Värinän syntymisessä ajoneuvon pyörän ja tien tai junan pyörän ja kiskon pinnan vuorovaikutuksessa ja sen siirtymisessä rakennukseen on kuitenkin sen verran paljon epävarmuustekijöitä, että värinän vaikutusta rakennukseen on lähestulkoon turhaa yrittää arvioida laskennallisin keinoin. (Talja 2004, 11-12.)



Kuva 2. Värähtelyn etenemistavat maaperässä, liikkeen etenemissuunta vasemmalta oikealle (de Vos 2017, 24)

Maassa värähtely etenee kolmen erityyppisen aaltoliikkeen kautta, jotka on esitetty kuvassa 2 seuraavin kirjaimin:

- (a) pinnalla Rayleigh-aaltoina
- (b) pitkittäisenä (P-aallot)
- (c) poikittaisena (S-aallot)

Mikäli värähtelyllä on herätelähteestä esteetön kulku rakennukseen, aiheuttavat pinnalla kulkevat aallot olennaisimman häiriön. Ne käyttäytyvät verrattain samoin kuten näkyvät aallot vedessä. Pinta-aaltoja nopeammin kulkee sisällä maaperässä poikittainen (S-aallot) ja pitkittäinen (P-aallot) aaltoliike. P-aallot

etenevät maaperässä vielä huomattavasti S-aaltoja nopeammin. Nopeudetaan huolimatta maaperässä kulkevat aallot yleensä vaimenevat matkalla nopeastikin matalimpia taajuuksia lukuun ottamatta. (de Vos 2017, 23-24.) Vaimenemiseen vaikuttaa herätelähteen tyyppin ja etäisyyden lisäksi olennaisesti maaperän tyyppi. Kovissa, karkearakenteisissa tai kivennäisistä koostuvissa maalajeissa, kuten kalliossa, tärinä vaimenee hyvinkin nopeasti, kun taas hienoissa ja pehmeissä se kantaa pitkälle. (Talja 2004, 14.)

Yleensä maata pitkin kulkeva tärinä vaimenee matkalla ja saavuttaessaan rakennuksen perustuksen se on huomaamattoman pientä. Huomaamatonkin tärinä perustuksissa toimii kuitenkin herätteenä rakennuksen ylemmille osille, mikä voi aiheuttaa resonanssi-ilmiön. Ominaisaajuudet riippuvat käytetyistä materiaaleista ja rakenteista, mutta ominaisaajuuden vastatessa perustuksiin kohdistuvan värähtelyn taajuutta, voi värähtely voimistua jopa 15-kertaiseksi. (de Vos 2017, 26.)

## **2.2 Runkomelu**

Runkomelua syntyy, kun rakenneosat värähtelevät taajuudella, joka vastaa ihmisen kuuloaluetta. Tällöin seinien ja lattian kanssa vuorovaikutuksessa oleva huoneilma alkaa myös värähdellä ja tämä on kuultavissa äänenä. (de Vos 2017, 27.) Runkoääntä esiintyy taajuusalueella 16...250 Hz, mikä on liikennetärinälle tyypillisen taajuusalueen yläpuolella. Yleensä se on ukkosen kaltaista kumua, jonka taajuus on alle 100 Hz, materiaalin värähtelyherätteelle tarjoamasta vastuksesta johtuen. Korkeammatkin taajuudet (yli 250 Hz) voivat kuitenkin ilmetä runkomeluna päästessään kulkemaan esimerkiksi kalliota pitkin tai lyhyen matkan päähän. Kalliota pitkin kulkevan värähtelyn runkomeluhaitat ovat yleensä suurimpia, etenkin, kun sekä rakennuksen että herätelähteen perustukset ulottuvat kallioon. Runkomelua aiheuttava värähtely ei vahingoita rakennuksia. (Talja & Saarinen 2009, 14-16.)

Koska runkomelu aiheutuu rakenneosien värähtelystä, voi sitä ilmetä yhdessä liikennetärinän kanssa. Runkomelua voi syntyä liikenteen lisäksi myös maaperän muokkaustöistä. Ilmiönä runkomelu on suhteellisen harvinainen, mutta se

voi aiheuttaa tuntuvaakin häiriötä esimerkiksi tiloissa, joissa nukutaan, konserttisaleissa tai äänitysstudioissa. Maanalaisen liikenteen synnyttämänä runkomelu mielletään usein haitallisemmaksi. (Talja & Saarinen 2009, 15-16.)

### 2.3 Resonanssi

Talon runko ja lattiat ovat systeemejä, joilla on tietyt ominaistuuudet. Ominaisuus on taajuus, jolla objekti värähtelee siihen kohdistuneen iskun seurauksena. Kun värähtelyä ei pidetä yllä, se vaimenee riippuen materiaalin tai rakenteen vaimentavuudesta. (Hassan 2006, 283-284.) Kun systeemiin vaikuttaa värähtely, jonka taajuusalue vastaa systeemin ominaistuuutta, värähtely voimistuu. Tätä ilmiötä kutsutaan resonanssiksi. Ominaisuus vaikuttaa myös siten, että sitä korkeampitaajuinen värähtely vaimenee systeemiin siirtyessään ja sitä matalampitaajuinen pysyy ennallaan. (Talja 2004, 35-36.)

Samoin tapahtuu maaperän värähtelylle, joka siirtyy rakennuksen perustuksiin. Värähtely siirtyy ominaistuuuden alapuolella sellaisenaan, ja yläpuolella pienenee. Resonanssitajuuden ympärillä voidaan pitää merkittävänä 0,75... 1,25 kertaista taajuusalueetta. Maaperän värähtelyn tapahtuessa yksinomaan tällä taajuusalueella voi värähtely voimistua rakenteessa resonanssin seurauksena jopa yli kymmenkertaiseksi. Reilusti maaperän värähtelyn taajuuskaistan ylittävän ominaistuuuden rakenteessa värähtely voi pienentyä jopa kymmenesosaan. (Talja 2004, 36.)

Rungon ja lattian värähtelyä arvioitaessa käytetään kahta eri lähestymistapaa. Ensin arvioidaan värähtelyn tasainen voimistuminen sen koko taajuusalueella ja toiseksi rungon sekä lattian alimmalla ominaistuuudella esiintyvän värähtelyn voimistuminen resonanssin myötä. Resonanssitarkastelussa värähtely jaetaan kolmeen komponenttiin, joista pystysuuntaista käytetään lattian ja vaakasuuntaista rungon värähtelyn tarkastelussa. (Talja ym. 2008, 3.)

Resonanssin suhteen lattia ja runko on suunniteltava niin, että niiden alin ominaisuus ei satu maaperän värähtelyn dominoivalle taajuusalueelle. Yleensä tämä tarkoittaa niiden suunnittelemista jäykemmäksi, jolloin ominais-

taajuus nousee. Nyrkkisääntö on, että jäykkyyden nelinkertaistuessa ominaistaajuus kaksinkertaistuu. Ominaistaajuutta voidaan myös yrittää madaltaa, mikäli maaperässä esiintyvä värähtely on tarpeeksi korkeataajuisia. Tässä on kuitenkin vaarana, että häiritsevää tärinää alkaa syntyä askeleista. (Talja ym. 2008, 84-85.)

Ominaistaajuuden laskennallinen mitoitus on Taljan ym. (2008, 84) mukaan lattioille suhteellisen helppoa, mutta rungolle vaikeampaa. Myös rungon ylemmillä ominaistaajuuksilla voi esiintyä resonanssia, mutta värähtelysuunnittelussa merkittävämpänä pidetään alinta ominaistaajuutta (Talja 2004, 37).

## **2.4 Maalajin vaikutus värähtelyyn**

Maaperän koostumuksella on olennainen vaikutus värähtelyn leviämiseen lähteestä rakennukseen. Useimmat Suomen valta- ja rautatiet on rakennettu kallioiden ympäröimille savikkoalueille, joilla värähtelyn dominoiva taajuusalue on hyvin kapea. Värähtelyn suuruutta on vaikea arvioida ja mittaukset ovat yleensä ainoa keino sen selvittämiseen. (Talja 2011, 11.)

Kuten edellisissä luvuissa on kerrottu, matalataajuinen värähtely, joka aiheuttaa usein tärinää, etenee pidemmälle pehmeissä maalajeissa ja vaimenee kovissa. Runkomelua aiheuttava korkeataajuinen värähtely taas vaimenee pehmeässä maassa nopeammin ja etenee hyvin kovissa tai karkearakenteisissa maalajeissa. Pehmeille maa-alueille tyypillisen liikennetärinän taajuusalue on 1...80 Hz ja kovalla maaperällä runkomelun taajuusalue on tyypillisesti 16...250 Hz (Talja ym. 2008, 10).

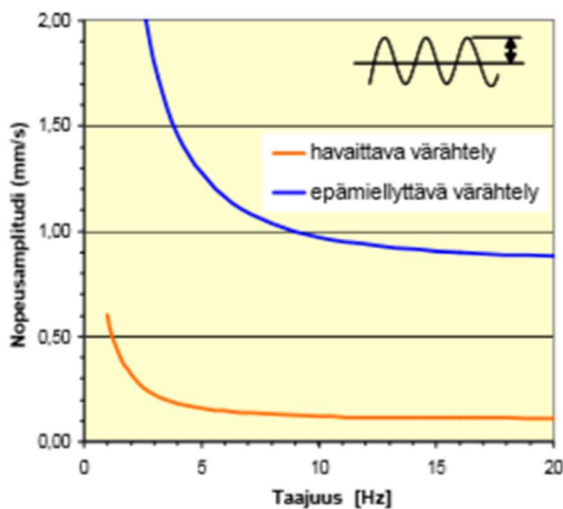
Matalataajuinen värähtely etenee kauimmaksi saven ja siltin kaltaisissa pehmeissä ja hienorakeisissa maalajeissa, etenkin kosteissa sellaisissa. Myös eloperäiset maalajit, turve ja lieju, johtavat tärinää tehokkaasti. Tällaisessa maassa dominoiva taajuusalue on pehmeystä riippuen 4...20 Hz. Kovissa ja karkeissa maalajeissa, kuten hiekka ja sora, dominoiva taajuus ylittää usein 40 Hz ja runkomelu on liikennetärinää merkitsevempi. Vielä selvemmin näin on moreenimaalajien ja kallion kanssa. (Talja ym. 2008, 10; Talja 2011, 14)

### 3 MITOITUKSEN OHJEARVOJA JA PERIAATTEITA

Tässä luvussa selkeytetään mitoituksen peruseriaatteita sekä raja-arvojen takana olevia perusteita. Varsinaista toteutusohjetta värähtelymitoitukselle luvussa ei esitetä, vaan tarkoitus on antaa yleinen käsitys siitä, miten mitoitus tapahtuu ja mihin se perustuu.

#### 3.1 Ihminen ja värähtelyjen havaitseminen

Ihmisen kokeman värähtelyn häiritsevyys riippuu värähtelyn suuruuden ja taajuuden lisäksi myös yksilöstä ja olosuhteista. Tästä huolimatta ihmisen kynnyksenä tärinän tuntemiselle pidetään yleisesti 1 mm/s värähtelynopeutta 1 Hz taajuudella ja 0,1 mm/s nopeutta 10 Hz taajuudella. Yli 10 Hz taajuuksilla ihmisen herkkyys värähtelylle alkaa olla riippumaton nopeusamplitudista (kuva 3). Kuvan 3 kuvaaja kertoo myös, että matalilla taajuuksilla ihmisen herkkyys värähtelylle laskee. (de Vos 2017, 37; Talja 2004, 13)



Kuva 3. Ihmisen herkkyys värähtelylle (Talja 2004, 13)

Värähtelynopeuden arvoa 0,1 mm/s alhaisempia arvoja voidaan pitää rakentamisessa turvallisina. Jos herätelähteen tärinän suuruus ja maan vaimentavuus tiedetään, tämän arvon avulla voidaan määrittää radan ympärille vyöhyke, jonka ulkopuolella tärinää ei tarvitse miettiä. (de Vos 2017, 39.)

Kuten on ilmaäänenkin kanssa, ihmisen tuntema värähtelyn muutos ei ole suoraan verrannollinen värähtelyssä tosiasiasa tapahtuneeseen muutokseen. Jotta ihminen kokisi tärinän selvästi vaimentuneen, saattaa sitä joutua laskemaan jopa puoleen alkuperäisestä. (Talja 2004, 13.)

Runkomeluun liittyvä tärinä on niin pientä, ettei ihminen tunne sitä. Sen sijaan värähtely säteilee huonepinnoilta ilmaan aiheuttaen meluhaittaa. Se voi olla niin vaimeaa, ettei sitä kuule, mutta sekin riippuu taustatekijöistä. Hiljaisuutta vaativissa paikoissa, kuten konserttisaleissa, hiljaisetkin runkoäänet voivat olla kiusallisia, kun taas liikenne- tai muun taustamelun sekaan runkomelu saattaa helposti hävitä. (Talja & Saarinen 2009, 15-16.) Taulukossa 1 on esitetty esimerkkejä runkomelun määrästä ja vaikutuksista.

Taulukko 1. Runkomelun haittavaikutusten raja-arvoja (Talja & Saarinen 2009, 16)

<b>Äänenpaine- taso (dB)<sup>1</sup></b>	<b>Subjektillinen kokemus</b>
alle 25	Ääni ei ole yleensä havaittavaa.
25–35	Pieni häiriövaikutus. Melu voi olla hyväksyttävissä nukkumiseen tarkoitetuissa tiloissa (mm. asunnot, hotellit, sairaalat).
35–45	Kohtalainen häiriövaikutus. Äänet ovat liian voimakkaita nukkumiseen tarkoitettuihin tiloihin.
yli 45	Suuri häiriövaikutus. Melu koetaan häiritsevänä useimmissa häiriöttömyyttä vaativissa tiloissa.

Vertailun vuoksi voidaan todeta, että esimerkiksi lehtien havinan intensiteettitaso on 10 dB, kuiskauksen 30 dB ja puheen 50 dB. On tosin todettava myös, että korvan kuulokyky on yksilöllinen ja riippuu ainakin ihmisen iästä. Yleensä kuulokynnys on 0... 10 dB välillä ja aistittava taajuus 16... 20 000 Hz välillä. (Suvanto & Laajalehto 2008, 278, 283.)

Runkomelun häiritsevyys riippuu voimakkuuden lisäksi sen taajuudesta, toistuvuudesta sekä sen sulautumisesta taustameluun. Ilmiön muista vaikutuksista ihmiseen ei ole olemassa juuri tutkimustietoa sen suhteellisen harvinaisuuden vuoksi, mutta ne lienevät samankaltaisia liikennemelun kanssa. (Talja & Saarinen 2009, 16-17.)

### 3.2 Liikennetärinän ohjearvot

Liikennetärinällä ei ole varsinaisia rajoituksia, mutta eri lait määräävät Suomessa ottamaan sen huomioon jo kaavoitusvaiheessa. Siitä ei saa aiheutua rakennuksen käyttäjille kohtuutonta häiriötä, ja laissa ympäristövahinkojen korvaamisesta (1994/737) korostetaan Taljan & Törnqvistin (2006, 10) mukaan kaavoittajien ja vahingon aiheuttajien vastuuta liikenteen aiheuttamista vahingoista. Laki velvoittaa vahingon ilmenemisestä vastuussa olevan tahon korvauksiin yksityishenkilöille, mikäli olosuhteet ja häiriön syntymistilanne eivät riitä häiriön katsomiseen kohtuulliseksi.

Ensimmäisenä liikennetärinää mitoittaessa pyritään arvioimaan tärinän esiintymisen riski. Kokemuksen kautta osataan määrittää tietyt turvaetäisyydet, joita pidemmälle tärinä ei kannata. Nämä etäisyydet ovat riippuvaisia liikenteen tyypistä, nopeudesta ja raskaudesta sekä vallitsevista maaperän olosuhteista. Taulukossa 2 esitetyt arvot vastaavat yleensä 2–4-kerroksisia taloja, joiden lattioilla on kohtuullisen suuret jänneväliä. (Talja 2011, 13.)

Taulukko 2. Liikennetärinän turvaetäisyydet (Talja 2011, 13)

Etäisyys väylästä	Liikennetyyppi yöalkaan	Pehmein maalaji väylän alla
500 m	Tavarajunaliikenne (3 500 tn, 90 km/h)	Pehmeä maa
200 m	Pikajunaliikenne (140 km/h)	Pehmeä maa
100 m	Metro- ja sähkömoottorijunat (80 km/h)	Pehmeä maa
100 m	Raskas maantieliikenne (100 km/h, sileä)	Pehmeä maa
100 m	Hidastetöyssyt, raskas liikenne (40 km/h)	Pehmeä maa
50 m	Raskas katuliikenne (40 km/h, sileä)	Pehmeä maa
100 m	Tavara- ja pikajunat	Kova maa
15 m	Raskas maantie- ja katuliikenne (ml. töyssyt)	Kova maa

Kun rakennus sijaitsee taulukossa 2 mainittuja etäisyyksiä lähempänä tärinälähdettä, tulee mitata maaperässä esiintyvä värähtely. Sen perusteella voidaan arvioida perustuksiin ja runkoon sekä lattiaan siirtyvä värähtely. Arvioin-

nissa huomioidaan sekä värähtelyn tasainen voimistuminen koko taajuusalueella että resonanssitaajuudella tapahtuva voimistuminen. Maaperän värähtelystä mitataan kolme eri komponenttia, joista vaakasuuntaisia tarvitaan rungon ja pystysuuntaista lattian resonanssitarkasteluun. (Talja 2011, 14.)

Jos tavoiteraja ylittyy resonanssitarkastelussa mutta ei tasaisen voimistumisen tarkastelussa, suunnitellaan rakennus uudelleen niin, ettei rakenteen ominaistaajuus satu resonanssia aiheuttavalle taajuudelle. Tähän voidaan vaikuttaa esimerkiksi muuttamalla lattian jänneväliä ja rakennuksen korkeutta. Jos taas tasaiseen voimistumiseen perustuva arvio ylittää tavoiterajan, tarvitaan tarkempi värähtelysuunnitelma. Jos se ei riitä, tulee rakennuspaikan värähtelyyn puuttua tai muuttaa rakennuksen käyttötarkoitusta tavoiterajan saavuttamiseksi. Tärinä ei saa ylittää raja-arvoja missään kerroksessa eikä osassa rakennusta. (Talja 2011, 14-15.) Tärinän raja-arvoina käytetään Suomessa yleisesti taulukon 3 mukaisia arvoja.

Taulukko 3. Suositus tärinän raja-arvoista (Talja ym. 2008, 16)

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

Taulukossa 3 esiintyvä värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  tarkoittaa Taljan & Törnqvistin (2006) mukaan ”värähtelyn maksimi-arvon odotusarvoa, joka määritellään mittaustuloksista 95 % todennäköisyyttä vastaavaksi tilastollisesti suurimmaksi arvoksi.” Sen perusteena on viikon ajalta 15 suurimmasta värähtelytapahtumasta laskettu suurin painotettu värähtelyn tehollisarvo  $v_w$  ja sitä käytetään asumisviihtyvyyden arvioinnissa. Rakenteiden ja laitteiden suhteen tärinän arvioinnissa käytetään ehdottomampaa värähtelyn huippuarvoa  $v_{max}$ . (Talja & Törnqvist 2006, 13.)

### 3.3 Runkomelun ohjearvot

Useimmissa maailman maissa ei ole säädetty raja-arvoja liikenteen aiheuttamalle runkomelulle. Näin on myös Suomessa. Käytössä on suosituksia, joissa on kuitenkin tulkinnanvaraa esimerkiksi raja-arvojen mittaamisen suhteen.

Runkomelun raja-arvot voidaan perustaa muun melusaasteen rajoihin, mihin sen häiriövaikutukset parhaiten vertautuvat. (Talja & Saarinen 2009, 17.) Taulukossa 4 esitetään tällainen suositus raja-arvoista.

Taulukko 4. Suositus raja-arvoista runkomelutason mitoituksessa (Talja & Saarinen 2009, 18)

Rakennustyyppi	Runkomelutaso $L_{prm}$ [dB]
Radio-, tv- ja äänitysstudiot, konserttitalit	25–30
Asuinhuoneistot	30/35 <sup>2</sup>
Hoito- ja sosiaalihuollon laitokset, majoitustilat <ul style="list-style-type: none"> <li>potilashuoneet, majoitustilat</li> <li>päiväkodit, lasten ja henkilökunnan oleskeluun tarkoitettut huoneet</li> </ul>	30/35 <sup>2</sup>
Kokoontumis- ja opetustilat <ul style="list-style-type: none"> <li>luokkahuoneet, luentosalit, kirkot ja muut huonetilat, joissa edellytetään yleisön saavan hyvin puheesta selvän ilman äänentoistolaitteiden käyttöä</li> <li>muut kokoontumistilat kuten teatterit ja kirjastot</li> </ul>	35
Toimistot, kaupat, näyttelytilat, museot	40/45 <sup>2</sup>

Myös sisä- ja ulkomelutasoille on olemassa erilaisia ohjetasoja. Ulkomelutasot saavat olla korkeampia, ja toteutuessaan vaimenevat sisälle kantautuessaan myös rajojen mukaisiksi. Taajamissa ulkoisen melun ohjearvot kuitenkin harvoin toteutuvat. (Talja & Saarinen 2009, 18.)

Fennoskandiassa käytetyt raja-arvot runkomelulle ovat melko samankaltaisia eritellen tasot rakennuksen tai huoneiston käyttötarkoituksen mukaan. Muissa maissa käytettyjä perusteita raja-arvoille ovat käyttötavan lisäksi ohiajojen määrä ja vuorokaudenaika sekä väylän sijainti tunnelissa tai maan päällä. Runkomelun mittaustuloksissa esiintyy usein merkittävää hajontaa johtuen monista muuttujista, jotka vaikuttavat värähtelyn syntyymiseen ja kulkeutumiseen. Tästä syystä yhtenäinen määrittäminen arvojen mittaukselle on tärkeää. (Talja & Saarinen 2009, 19-21.)

Taljan & Saarisen selvityksessä (2009) esitetään luvussa 4 menetelmä maaperän värähtelytasoon perustuvaan runkomelutason arviointiin. Menetelmä perustuu Pohjois-Amerikassa tehtyihin mittauksiin, joten niiden soveltaminen Suomen maaperäolosuhteisiin on kyseenalaista, johtuen värähtelyn suuruuden arvaamattomuudesta näennäisesti samanlaisillakin alueilla. Eroavaisuuksia voi aiheuttaa niinkin kaukaiselta tuntuva seikka kuin yleinen nastarenkaiden käyttö Suomen tieliikenteessä talvisin. (Talja & Saarinen 2009, 24.)

Menetelmässä käytetään liikennetärinän tapaan ensimmäisenä arvioinnin tasona etäisyyttä herätelähteestä. Taulukossa 5 esitetyjä etäisyyksiä kauempana sijaitsevilla rakennuksilla runkomelutason pitäisi olla alle tavoitetason. (Talja & Saarinen 2009, 24.)

Taulukko 5. Runkomelun kannalta turvalliset etäisyydet (Talja & Saarinen 2009, 25)

Liikennetyyppi	Maapohja, väylän sijainti ja runkomelutason raja			
	pehmeä maa, pintaväylä, 35 dB	kova maa, pintaväylä, 35 dB	kallio, tunneli, 30 dB	kallio, pintaväylä, 35 dB
Tieliikenne, 50 km/h	< 5 m	< 5 m	< 5 m	< 5 m
Tieliikenne, 100 km/h	< 5 m	< 5 m	< 5 m	5 m
Raitiovaunu, 40 km/h	< 5 m	15 m	50 m	120 m
Metro tai lähijuna, 80 km/h	< 5 m	30 m	90 m	160 m
Lähijuna, 160 km/h	10 m	60 m	130 m	200 m
Sähkömoottorijuna, 220 km/h	15 m	70 m	150 m	>200 m
IC-juna, 160 km/h	40 m	130 m	200 m	>200 m
Tavarajuna, 100 km/h	60 m	160 m	>200 m	>200 m

Alle viiden metrin etäisyyksillä rakenneratkaisuilla on etäisyyttä enemmän merkitystä värähtelyn kulkeutumisessa. Suurien etäisyyksien arvioihin taas tulee suhtautua varauksella siksi, että maaperäolosuhteiden vaihteluiden merkitys kasvaa. Pehmeän maan arvoissa taas oletetaan, että pintakerroksessa on ainakin kolme metriä tukematonta pehmeää ainesta. Tieliikenne ei juuri aiheuta runkomelua, vaan sen suurin aiheuttaja on rautatieliikenne. (Talja & Saarinen 2009, 25-26)

Jos rakennus täytyy rakentaa turvallista etäisyyttä lähemmäs herätelähdettä, on syytä arvioida värähtelyn aiheuttamaa runkomelua sen siirtymisreitillä perusteella. Tämäkin menetelmä on esitetty Taljan & Saarisen selvityksessä (2009) ja se perustuu värähtelyn nopeuteen. Nopeustasoa korjataan värähtelylähteestä, siirtymisestä ja rakennuksesta riippuvilla tekijöillä ja saadaan näin arvio sisätilan runkomelutasosta. (Talja & Saarinen 2009, 26-27.)

#### **4 TÄRINÄNVAIMENNUS KERROSTALORAKENTAMISESSA**

Kun haetaan maaperän tärinän eristykseen vaihtoehtoja vielä rakentamattomalle talolle, on lähestymistapoja käytännössä kaksi erilaista. Eristys voidaan suunnitella osaksi rakennusta, mikä tarkoittaa yleensä perustuksiin tehtäviä ratkaisuja. Toinen tapa on maaperään tehtävät muokkaukset, kuten ponttiseinät, kaivannot, vinopaalutus ja massastabilointi. Tässä opinnäytetyössä keskitytään rakennuksessa tehtäviin tärinänvaimennuskeinoihin.

Perustuksien eristäminen on yleisimpiä talonrakentamisen tapoja vaimentaa maaperästä siirtyvää värähtelyä. Vanhimpia esimerkkejä tästä lienee vuonna 1965 valmistunut asuinkerrostalo St James's Parkin metroaseman yläpuolella Lontoossa. Käytännössä on mahdollista eristää myös ylempiä kerroksia rakennuksesta tärinältä, mutta Cryerin (1994) mukaan eristyksen alapuolisissa rakenteissa tapahtuva resonanssi tekee tästä menetelmästä tehottoman. (Hassan 2006, 317-318.)

##### **4.1 Massiiviset rakenteet**

Massiivisilla rakenteilla tarkoitetaan yleisesti betonirakenteita, joiden sivumitta ylittää metrin. Tämä johtuu niiden rakentamisen vaatimista erityistoimenpiteistä halkeilemisen ja lujuuskadon rajoittamiseksi. Pienemmätkin rakenteet voivat kuitenkin vaatia erityistoimenpiteitä, jos käytettävässä betonissa on runsaasti sideainetta. (Haara 2018, 376.)

Massiivisissa rakenteissa käytettävän betonimassan koostumukseen tulee kiinnittää huomiota. Erityisesti sementin ominaisuuksilla on vaikutusta hydrataatioreaktioiden lämpötilan pitämiseen hallinnassa. Myös massiivisten rakenteiden betonointi vaatii suunnittelua. (Haara 2018, 377-378.)

Massiiviset rakenteet vaimentavat värähtelyä yksinkertaisesti kokonsa ansiosta. Massiivisuus lisää rakenteen jäykkyyttä, mikä johtaa paitsi värähtelyn vaimenemiseen, myös rakenteen ominaistaajuuden nousemiseen. Massiivisia rakenteita suunniteltaessa tuleekin muistaa erityisesti resonanssin vaikutus rakenteiden värähtelyyn.

#### **4.2 Kelluvat laatat**

Kelluvalla betonilaatalla tarkoitetaan eristekerroksen päälle valettua betonipintaa, joka värähtelyteknisesti kelluu eristeen päällä irti varsinaisista rakenteista (RT 83-10902 2007, 3). Näin rungossa kulkeva värähtely voidaan eristää esimerkiksi sellaisen tilan lattiasta, jossa käytetään värähtelylle herkkiä laitteita. Käänteisesti, sellainen talotekninen laite, jonka tärinä halutaan eristää asuinhuoneistosta, voidaan rakentaa kelluvalle lattialle.

Kelluva laatta voidaan tehdä myös muusta materiaalista kuin betonista, kuten rakennuslevystä. Askeläänien eristyksessä kelluva lattia on usein käytetty ratkaisu. (RT 83-10902, 3.)

Kelluva pintabetonilattia voidaan tehdä raudoittamattomana, mikäli se on tarpeeksi ohut. Alle 40 mm paksuja laattoja ei kuitenkaan yleensä tehdä ilman erikoisbetonilaatuja. Kelluvan pintabetonilattian rakentamisessa täytyy kiinnittää erityistä huomiota laatan tarttumiseen alustaan, sillä huonosti kiinnittynyt laatta voi halkeilla kuivuessaan. (Haara 2018, 415.)

#### **4.3 Jousiperustus**

Pystysuuntaisen värähtelyn vaimentamiseen on mahdollista käyttää teräksisiä kierrejousia. Näillä voidaan saavuttaa erittäin matala ominaistaajuus jousien suunnassa ja vaimennusta teoriassa jopa 2 Hz taajuudella tapahtuvaa maaperän värähtelyä vastaan. (Hassan 2006, 324.)

Teräsjouset valmistetaan yleensä kahden teräslevyn välisinä useamman jousen elementteinä ja voivat olla esijännitetyjä. Esijännityksellä ei ole vaikutusta jousien eristävyYTEEN, mutta sillä saavutetaan tiettyjä etuja jännittämättömiin

jousiin verrattuna. Esijännitettyjen jousielementtien korkeus ei muutu rakennusaikaisten kuormien vaikutuksesta ja niitä voidaan säätää asennuksen jälkeenkin esimerkiksi painumien korjaamiseksi. (Hassan 2006, 324-325.)

Jousiperustuksen huonoja puolia on sen kykenemättömyys vaakasuuntaisen värähtelyn vaimentamiseen huolimatta siitä, että se antaa mahdollisuuden vaakasuuntaisen jäykkyyden tarkempaan suunnitteluun. Lisäksi ongelmia voi aiheutua niiden massasta, joka yhdistettynä teräksen huonoon vaimentavuuteen johtaa sisäisiin resonansseihin matalilla taajuuksilla ja siten eristyksen huononemiseen. Tätä voidaan ehkäistä yhdistämällä kumimatto jousielementtiin tai elementin sulkemisella jähmeällä nesteellä täytettyyn sylinteriin. Jousiperustus tulee myös useimmiten huomattavasti kumisia eristeitä kalliimmaksi. (Hassan 2006, 324, 326)

#### **4.4 Elastomeeriset värinäeristeet**

Synteettisistä tai luonnonkumimateriaaleista valmistettavat värinäeristeet ovat olleet käytössä jo 1800-luvun puolella rautateiden värinänvaimennuksessa, löytäen tiensä talonrakennukseen 1960-luvulla Lontoossa Albany Court -nimisen kerrostalon myötä. Varsinkin Iso-Britanniassa on sittemmin suosittu kumieristeitä muissakin kuin metroasemien päälle rakennettavissa taloissa. (Hassan 2006, 322.) Kumisia eristeitä käytetään enemmän runkoääntä aiheuttavien taajuuksien eristämiseksi, vaikka teoriassa kumieristeilläkin voidaan saavuttaa eristystä jopa 4 Hz asti eristeen paksuutta kasvattamalla (Hassan 2006, 323).

Elastomeereilla tehtävän värähtelyeristyksen periaate on yleensä tehdä perustukset kahdessa osassa, jotka eriste erottaa. Paaluanturoiden päälle asennetaan eriste, jonka päälle valetaan vasta-antura. Näiden vasta-anturoiden päälle rakennettava rakennus ei saa olla eristämättömässä kosketuksessa maaperään. Kuvassa 4 on paaluantura sekä vasta-antura, ja niiden välissä on Getzner Werkstoffen Sylomer-eristys. Myös esimerkiksi Helsingin musiikkitalon pysäköintihallin pilarit on eristetty yläpäästään Sylomerilla.



Kuva 4. Helsingin Villiviinissä paaluanturoiden ja vasta-anturoiden eristämiseen käytetään Sylomer-eristimiä. (Savolainen 2016)

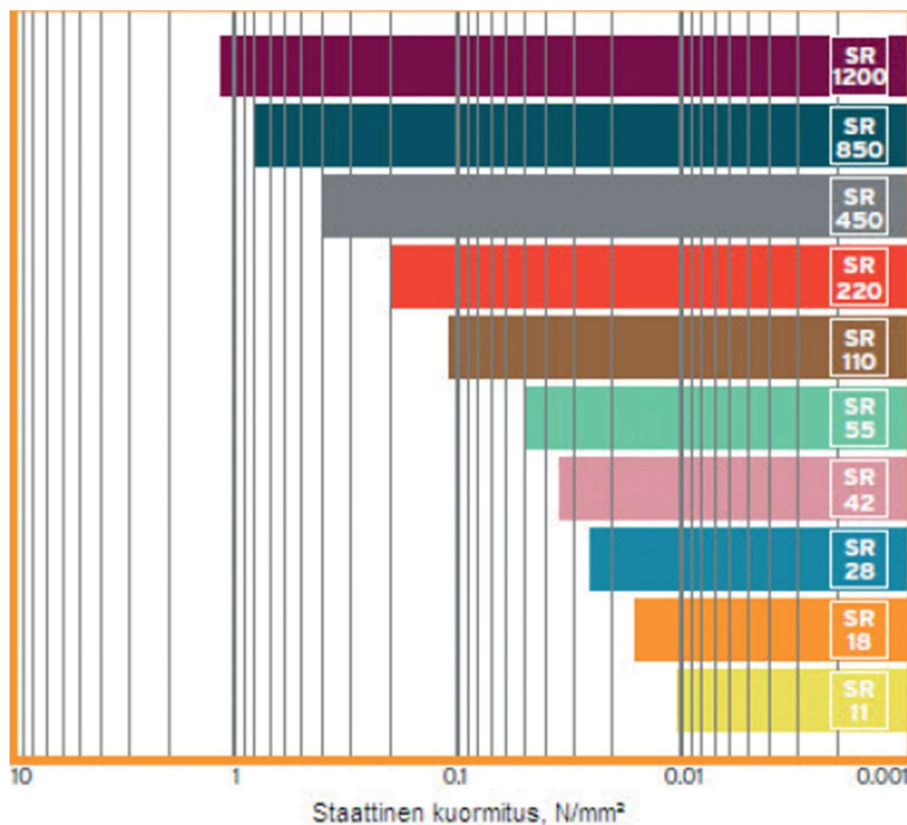
Suomessa kumisia tärinäeristeitä ei ole käytetty kovin kauan. Kuten Helimäki Akustikkojen Helsingin Villiviinistä laatimassa värähtelyteknisessä työselityksessä (2016) sanotaan, Sylomer-eriste valittiin sen ollessa markkinoilla käytännössä ainoa vaihtoehto vuonna 2016. Nykyään, kolme vuotta myöhemmin, kilpailutilanne on jo parempi. Toisessa tämän opinnäytetyön esimerkkikohteessa, Helsingin Keinulaudankuja 2 a:ssa on käytetty VibraFlex-eristettä, joka on samankaltainen tuote kuin Sylomer. Näistä molemmista on kerrottu enemmän seuraavissa luvuissa.

#### 4.4.1 Sylomer ja Sylodyn

Sylomer ja Sylodyn ovat itävaltalaisen Getznerin valmistamia tärinäeristeitä. Niiden maahantuoja Suomessa on Christian Berner Oy ja tarkemmin niistä kerrotaan RT-kortissa 103116 (2019), johon tämän luvun tieto perustuu. Ne valmistetaan polyuretaanista 12,5 mm tai 25 mm paksuisina mattoina.

Sylomer on solurakenteeltaan avoin tai suljettu riippuen sen jäykkyydestä. Sitä on saatavissa kymmenen eri laatua, jotka eroavat toisistaan kuormituskykynsä perusteella. Laadut on merkitty värikoodein ja niiden tunnus kertoo niiden

staattisen kuormitettavuuden. Esimerkiksi sivulla 21 kuvassa 4 anturoiden välissä on punainen eriste. Punainen väri tarkoittaa, että eriste on tyypiltään SR220 ja sen kuormituskyky staattiselle kuormalle on  $0,22 \text{ N/mm}^2$ . Pienin kuormitettavuus on keltaisella (SR11,  $0,011 \text{ N/mm}^2$ ) ja suurin violetilla (SR1200,  $1,2 \text{ N/mm}^2$ ) värikoodilla, kuten kuvasta 5 käy ilmi.

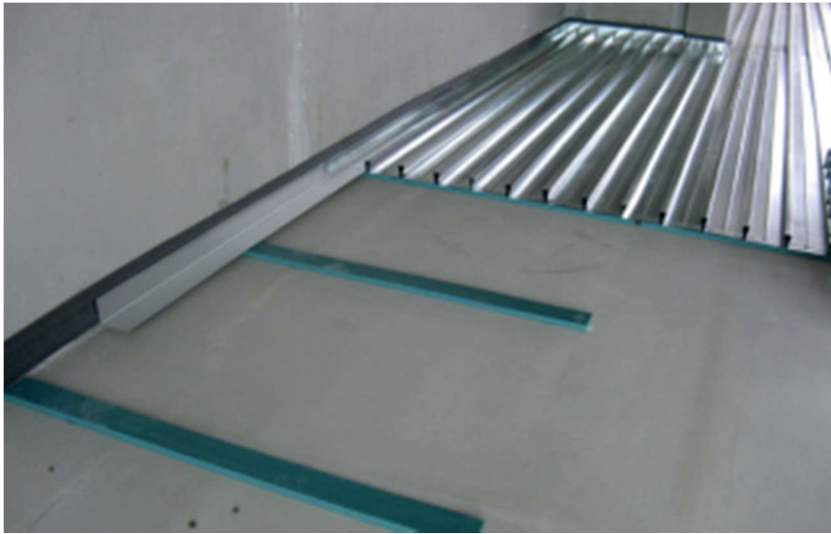


Kuva 5. Sylomer-eristeiden värikoodit ja kuormituskyvyt (RT-103116 2019)

Sylodynin kaikki laadut ovat solurakenteeltaan suljettuja. Sitä on saatavissa viisi eri laatua, joiden kuormitettavuusalue on  $0,075 \text{ N/mm}^2 \dots 1,5 \text{ N/mm}^2$ . Sekä Sylomer että Sylodyn myydään rullina, joiden standardileveys on 1500 mm ja standardipituus 5000 mm. Näiden vakiolaatujen ja vakioimittojen lisäksi Sylomeria ja Sylodynä on saatavilla erikoislaatuina ja erikoismittoilla. Iskumaisiin rasituksiin on lisäksi saatavilla paremmin soveltuva Sylomer HD -eriste.

Sylomer ja Sylodyn sopivat monipuolisesti erilaisiin rakennuksiin perustuksista välipohjiin ja lattioihin. Niitä voidaan käyttää askeläänien eristämiseen sekä herkkien mittalaitteiden suojaamiseen. Ne kestävät myös dynaamisen kuormituksen huippuja hyvin, säilyttäen alkuperäiset ominaisuutensa. Asennus voi

olla pistemäinen, kuten pilarin päällä, nauhamainen (kuva 6), kuten nauha-anturan päällä, tai koko pinnan laajuinen, kuten laatoissa.



Kuva 6. Betoniteräслиittolaatta, joka odottaa valua. Sen alla on nauhamainen Sylomer-eristys. (RT-103116 2019)

Pistemäisiä ja nauhamaisia ratkaisuja käyttämällä on mahdollista saavuttaa pienempi materiaalimenekki, mikä on kustannusten kannalta eduksi. Betonirakenteen voi valaa suoraan Sylomer- tai Sylodyn -mattoa vasten. Sylomer ei tarvitse ylimääräistä tilaa sivuilleen, sillä se ei kuormittuessaan laajene sivusuunnassa.

#### 4.4.2 VibraFlex ja VibraSetex

VibraFlex on Suomen markkinoilla uudempi tuote kuin Sylomer tai Sylodyn. Sitä valmistaa Bramming Plast-Industri A/S Tanskassa ja Puolassa. Suomeen sitä tuo 3DI Akustiikkatuotteet Oy, joka on ruotsalaisen Vibratec Ab:n suomalainen tytäryhtiö. Seuraavat tiedot on saatu ja esitetty myös Bramming Plast Industrin VibraFlex & VibraSetex -tuote-esitteessä (s.a.).

VibraFlex on polyuretaanista valmistettava vaahtomuovimatto, jota voidaan käyttää tärinänvaimennuksessa niin rakentamisessa kuin rautateillä ja kone- ja LVI-alallakin. Se voi vaimentaa erittäin matalataajuistakin värähtelyä ja elastisuutensa ansiosta kestää suuriakin dynaamisia kuormia. Tuote kestää toistu-

via rasituksia pitkilläkin ajanjaksoilla myös matalissa lämpötiloissa pienellä koonpuristumalla, minkä takia sitä voidaan käyttää pohjoisessakin niin sisällä kuin ulkona.

VibraFlex-valikoimaan kuuluu kuusi eri laatua, jotka eroavat toisistaan staattisen kuormitettavuutensa suhteen. Laadut on merkitty värikoodein, ja niistä pienin staattinen kuormitettavuus on sinisellä (0,025 N/mm<sup>2</sup>) ja suurin vihreällä (0,9 N/mm<sup>2</sup>). Kuvassa 7 on ote VibraFlex- ja VibraSetex-eristeiden mitoitus-taulukosta.

Properties	Test Method	Unit	VF25	VF65	VF170	VM220	VM400	VM900	VS11	VS200
Color (core material)			Blue	Purple	Black	Orange	Grey	Green	Blue	Blue
Standard dimensions (other by request)	Length x width	mm	2000 x 1000	2000 x 1000	1000 x 1000	1000 x 500	1000 x 500	1000 x 500	2000 x 1000	1200 x 800
	Thickness	mm	12,5/25	12,5/25	12,5/25	12,5/25	12,5/25	12,5/25	12,5/25	12,5/25
Surface (other by request)			nonwoven/ nonwoven	nonwoven/ nonwoven	nonwoven/ nonwoven	skin/skin	skin/skin	skin/skin	nonwoven/ nonwoven	nonwoven/ nonwoven
Max. static load	Internal	N/mm <sup>2</sup>	0,025	0,065	0,170	0,220	0,400	0,900	0,011	0,200
Max. total load	Internal	N/mm <sup>2</sup>	0,050	0,125	0,370	0,500	0,800	1,800	0,070	0,450

Kuva 7. Ote VibraFlex- ja VibraSetex-tuotteiden mitoitus-taulukosta (BPI s.a.)

VibraSetex perustuu VibraFlex-materiaaliin, mutta se on elastinen komposiittituote, jolla on paremmat iskunvaimennusominaisuudet. Se soveltuu toistuviin ja pitkittyviin rasituksiin säilyttäen ja palauttaen muotonsa välittömästi. Sitä saa kahta eri laatua, joiden staattiset kuormitettavuudet ovat 0,11 N/mm<sup>2</sup> ja 0,2 N/mm<sup>2</sup>.

Molemmat tuotteet voidaan toimittaa tarpeen mukaan muotoon leikattuina. Standardimitat vaihtelevat laaduittain, mutta paksuus on joko 12,5 tai 25 mm. Mitoista ja paksuuksista voidaan myös räätälöidä asiakkaan tarpeen mukaisia. VibraFlex on myös mahdollista muokata erikoisiin muotoihin mahdollisten suuremman vapauden suunnittelussa.

## 5 TOTEUTETTUJA TÄRINÄNVAIMENNUSRATKAISUJA

Seuraavissa luvuissa esitellään tapauksittain värähtelytekniisiä haasteita eri rakennushankkeissa. Kaksi ensimmäistä kohdetta on helsinkiläisiä kerrostaloja, joista toinen on jo valmistunut. Kolmas on messukeskus Texasissa, joka on mukana erityislaatuisuutensa vuoksi. Tapauksista käydään läpi värähtelyn tuottaman ongelman pääpiirteet sekä siihen kehitetyn ratkaisun periaatteet. Tavoitteena on antaa esimerkkejä tyypillisistä rakennuksen perustuksessa käytettävistä keinoista vaimentaa maaperästä välittyvää värähtelyä.

### 5.1 Helsingin Villiviini

Asunto-osakeyhtiö Helsingin Villiviini on nelikerroksinen asuinkerrostalo Helsingin keskustassa Konepajassa (kuva 8). Sen rakentaja on YIT Rakennus Oy ja värähtelytekniisen työselityksen on laatinut Helimäki Akustikot Oy. Tässä ja seuraavissa luvuissa esitetyt tiedot rakennuksen värähtelyteknisestä suunnittelusta viittaavat kyseiseen raporttiin (2016).



Kuva 8. Havainnekuva Helsingin Villiviinistä etelästä Aleksis Kiven kadulta päin kuvattuna. (YIT Rakennus Oy 2016)

Helimäki Akustikot olivat tehneet kohteesta aikaisemmin selvityksen raitiovaunuliikenteen aiheuttamasta värähtelystä sekä pysty- että vaakasuunnassa. Tulokset on esitetty lausunnossa Helimäki 6642-3a. Rakennus sijaitsee tontilla Aleksis Kiven kadun ja Traverssikujan kulmassa ja risteyksessä raitiovaunukiskot kulkevat lähimmillään neljän metrin päässä valmiista rakennuksesta.

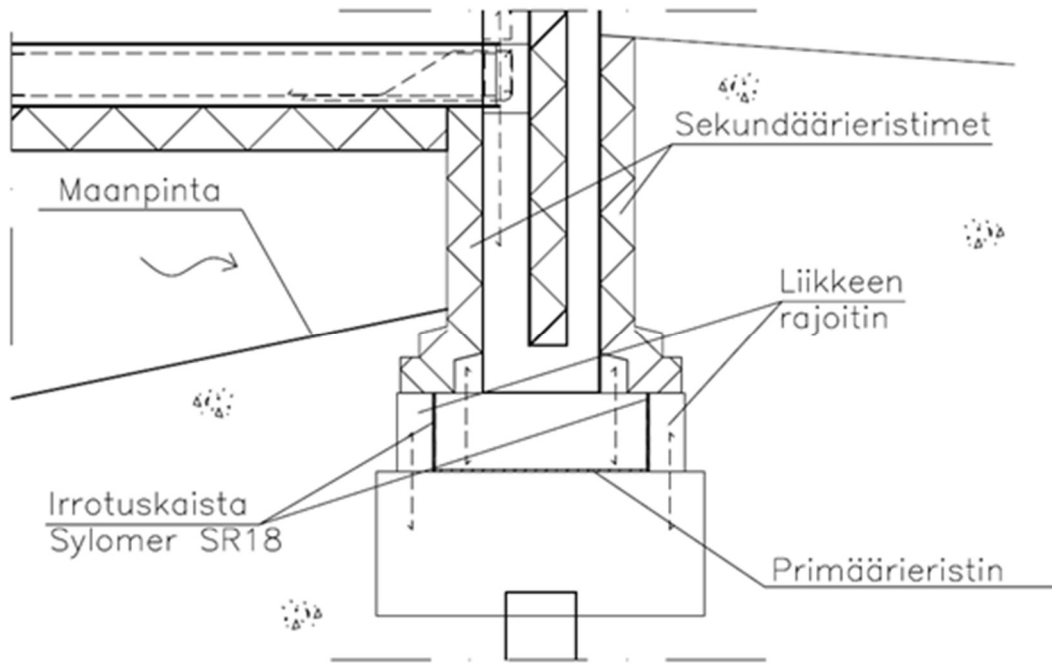
### 5.1.1 Lähtötilanne

Tontilla tehdyt mittaukset osoittivat, että raitiovaunuväylän läheisyydestä johdettu maaperän värähtely saa rakennuksen runkomelun ylittämään tavoitetasoa. Asunnoissa tavoitetasona on käytetty maksimia 30 dB ja katutaso liiketiloissa maksimia 40 dB. Värähtelyn raja-arvojen ylitykset olisivat olleet niin suuria, että huolimatta värähtelyn vaimenemisesta maasta perustuksiin siirryttäessä molemmat tavoitetasot ylittyisivät ilman erityistä eristystä. Kohteessa merkitsevä taajuuskaista runkomelun suhteen on 50...80 Hz, mutta runkomelun osalta huomattavaa värähtelyä esiintyi myös taajuusalueella 25...125 Hz.

Tärinän suhteen värähtely saavutti uudisrakentamisen vähimmäisvaatimukset eli värähtelyluokan C ilman erityistoimenpiteitä. Tärinän matalin merkitsevä taajuusalue oli 8...16 Hz. Tärinäarvojen määrittämisessä on huomioitu sekä tasainen voimistuminen että resonanssi. Runkomelueristimien mitoituksessa tuli varmistaa, ettei eristinsysteemin vaste vahvista tärinätasoa liikaa.

### 5.1.2 Runkomelun vaimennus

Runkomelua aiheuttavan värähtelyn vaimennus perustuu esimerkkikohteessa eristekaistoille, jotka eristävät rakennuksen rungon maaperästä. Eristys toteutettiin niin sanotuilla primääri- ja sekundäärieristimillä. Primäärieristimillä tarkoitetaan paaluanturan päälle asennettavaa eristinmattoa, jonka päälle valetavalle vasta-anturalle rakennus perustetaan. Eristekaista irrottaa rakennuksen akustisesti maaperästä pystysuunnassa. Sekundäärieristimet ovat pystysuuntaisia eristeitä, joiden tarkoitus on irrottaa rakennus maaperästä myös vaakasuunnassa. Lisäksi paikoittain primäärieristimet saattavat vaatia vaakasuuntaisen liikkeen rajoittimia irrotuskaistoineen (kuva 9).



Kuva 9. Periaatekuva kohteen perustusten värähtelyeristyksestä (Taina 2016)

Irrotuskaistoja käytettiin myös muiden rakennusosien eristämiseen asuinrakennuksesta. Sylomer-kaistaa käytettiin sisäänkäyntien laattojen eristämisessä, piha-alueen paalulaatan irrottamisessa rakennuksesta sekä kellarikerroksen maanvaraisen laatan alla koko sen pinta-alalla. Rakennuksen alapohjaan tuli perusvesipumppaamo, jonka saattoi toteuttaa eristämättömänä, kun se liitososineen tehtiin irralliseksi rakennuksen rungosta ja perustuksista.

### 5.1.3 Primääri- ja sekundäärieristimet

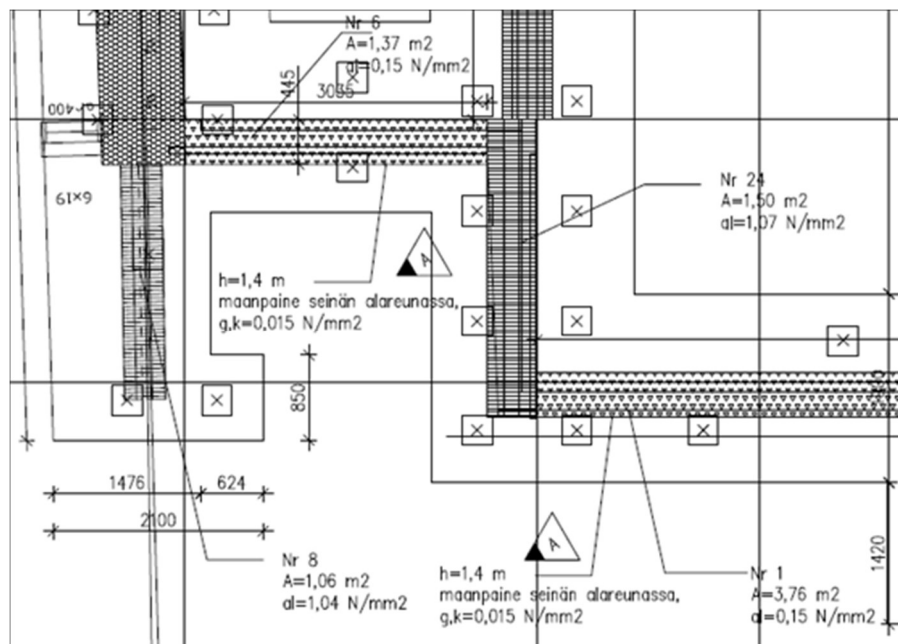
Tässä kohteessa primäärieristiminä käytettiin Sylomer-eristeitä. Perusteena tälle oli vaihtoehtoisten tuotemerkkien puute vielä vuonna 2016 Sylomerin tarjotessa ainoana riittävät tiedot akustiseen mitoitukseen. Rakennesuunnittelijan vastuulla oli laskea perustuksiin kohdistuvat akustiset kuormat ja laatia niiden pohjalta pohjakuva perustuksista (kuva 10), josta ilmenivät eristimiin kohdistuvat kuormitukset ja niiden pinta-alat sekä sijainnit. Akustinen kuorma on todennäköisin tarkka kuorma, joka eristimiin oikeassa käyttötilanteessa kohdistuu. Se lasketaan lisäämällä rakenteiden omaan painoon, ilman varmuuskerroimia, neljännes hyötykuorman painosta (kaava 1).

$$a_l = g + 0,25 q \quad (1)$$

jossa	$a_l$	akustinen kuorma	[kN/m <sup>2</sup> ]
	$g$	rakenteen oma paino	[kN/m <sup>2</sup> ]
	$q$	hyötykuorma	[kN/m <sup>2</sup> ]

Mikäli rakennesuunnittelijalla on syytä epäillä, että edellinen yleisesti käytetty arvio ei vastaa kyseisen kohteen todellista käyttötilannekuormaa, tulee hänen tarkistaa mitoitus eri tavalla. Kyseinen arvio muun muassa olettaa, että mitoituksessa käytetyt hyötykuorman arvot ovat suurimman mahdollisen hyötykuorman mukaisia.

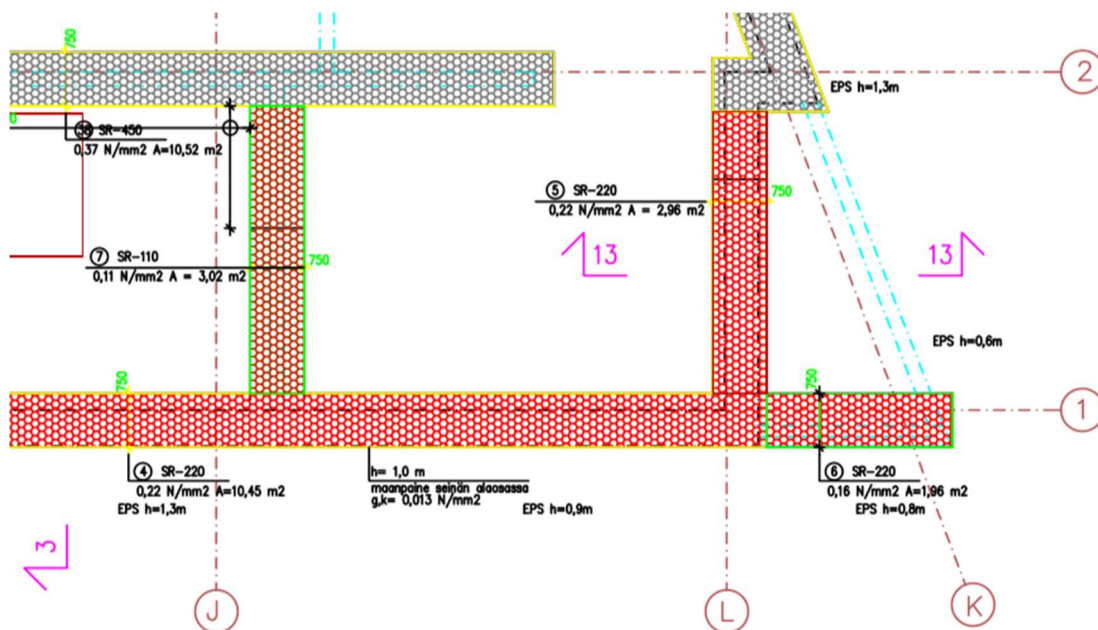
Värähtelyeristimiä mitoittaessa ei mitoiteta varmalle puolelle, vaan eristys toimii parhaiten, kun kuormitus on lähellä eristimen kuormituskapasiteetin ylärajaa. Jos kuormitusraja ylittyy, värähtely voi päästä etenemään liikaa kokoon puristuneen eristeen läpi. (Savolainen 2019.)



Kuva 10. Esimerkki rakennesuunnittelijalta vaadittavista tiedoista (Taina 2016)

Muita tietoja, jotka akustiikkasuunnittelija tarvitsee kuvan 10 tyyppisestä piirustuksesta, ovat eristimelle käytettävä pinta-ala, eristimien numerot sekä maanpainearvot. Samat tiedot tarvitaan maanvaraisten laattojen osalta. (Taina 2016.) Eristimien numerointi plaanissa ja niiden toimitus valmiiksi leikattuna helpottaa työmaan toimintaa.

Akustiikkasuunnittelija sijoittaa rakennesuunnittelijan eristinkuvaan kuormitukseen soveltuvat eristimet värikoodeineen (kuva 11). lisäksi laaditaan materiaali-taulukko, josta selviää plaanin osoittamien eristeiden laatu, mitat sekä määrät. Eristimien suunnittelussa on oleellista akustiikka- ja rakennesuunnittelijan yhteistyö, mikäli esimerkiksi eristimen materiaalia, pinta-alaa tai sille suunniteltua kuormaa joudutaan muuttamaan.



Kuva 11. Ote Helsingin Villiviinin eristinkuvasta eristinsuunnittelun jälkeen (Helimäki Akustikot Oy 2016)

Asennuksessa tulee ottaa huomioon anturan pinnan tasaisuusvaatimus, joka on  $\pm 3$  mm. Pinnassa ei saa olla teräviä epätasaisuuksia, jotka voisivat paikallisella ylikuormituksella aiheuttaa eristinmateriaalin puhkeamisen. Eristimiä ei saa muutenkaan ylikuormittaa edes hetkellisesti. Normaalisessa kuormituksessa normaali kokoonpuristuminen on noin 10 % eristeen paksuudesta. Eristimet tulee kiinnittää asennuspintaan valmistajan hyväksymällä liimalla tai elastisella kitillä ja kaistojen väliset saumat teipata umpeen.

Rakennesuunnittelijan tulee myös varmistaa, ettei eristimiin kohdistu suurempaa vaakasuuntaista kuormaa kuin ne kestävät. Mikäli vaakasuuntainen kuormitus ylittää eristimen kapasiteetin, eli sen siirtymä on yli 1,25 mm, tulee kyseisessä kohdassa käyttää liikkeenrajoittimia. Liikkeenrajoitin on betonipieli,

joka estää eristetyn vasta-anturan vaakasuuntaisen liikkeen. Ne voidaan sijoittaa pistemäisesti tarpeellisiin paikkoihin anturoiden viereen.



Kuva 12. Kuvassa näkyy Helsingin Villiviinin vasta-antura, irrotuskaista ja liikkeenrajoitin, joka odottaa valua. (Savolainen 2016)

Pieli tulee irrottaa eristetystä anturasta Sylomer-eristinkaistalla, jonka tyyppi valitaan pielen pinta-alan sekä kuormituksen mukaan. Kuvassa 12 on keltainen eristinkaista, joten kuvan liikkeenrajoittimen pystyirrotuskaistassa käytetty eriste on Sylomer SR11. Liikkeenrajoittimet voidaan valaa pystyirrotuskaistaa vasten, mutta etukäteen tulee varmistaa, ettei valu pääse vuotamaan eristyksen läpi ja muodosta kytköstä.

Sekundäärieristimien tehtävä on irrottaa primäärieristimien yläpuoleinen rakennuksen osa yhteisestä maaperään. Tässä kohteessa tarkoitukseen riitti pystyirrotuskaistana sekä lämpöeristeenä toimiva tavallinen 50 mm EPS60S-kerros. Maaperä ei saa jääntyneenkään kytkeytyä rakennuksen runkoon. Tätä varten suunniteltiin routamaton ja pellin avulla detalji pystyirrotuskaistojen yläreunasta. Myös sekundäärieristinten saumat täytyi teipata ja kaistat liimata pystypintoihin. Mekaaniset kiinnikkeet muodostaisivat akustisen kytkennän eristeen läpi, joten niitä ei voi tällaisessa tapauksessa käyttää.

#### 5.1.4 LVIS-asennukset

Kun tehdään läpivientejä eristettyyn rakennusosaan LVIS-asennuksille, on mahdollista, että värähtely pääsee etenemään jäykkää kytköstä pitkin. Tämän

välttämiseksi asennukset katkaistiin joustokappaleella eristämättömän ja eristetyn rakennusosan rajalla. Selkeyden vuoksi näitä siirtymiä on paras tehdä vain kerran yhden asennuksen kohdalla. Joustokappaletta käytettäessä kannakkeet voidaan tehdä jäykkänä. Poikkeukset kannatuksiin tulee tärinäeristää ja hyväksyttää akustiikkasuunnittelijalla.

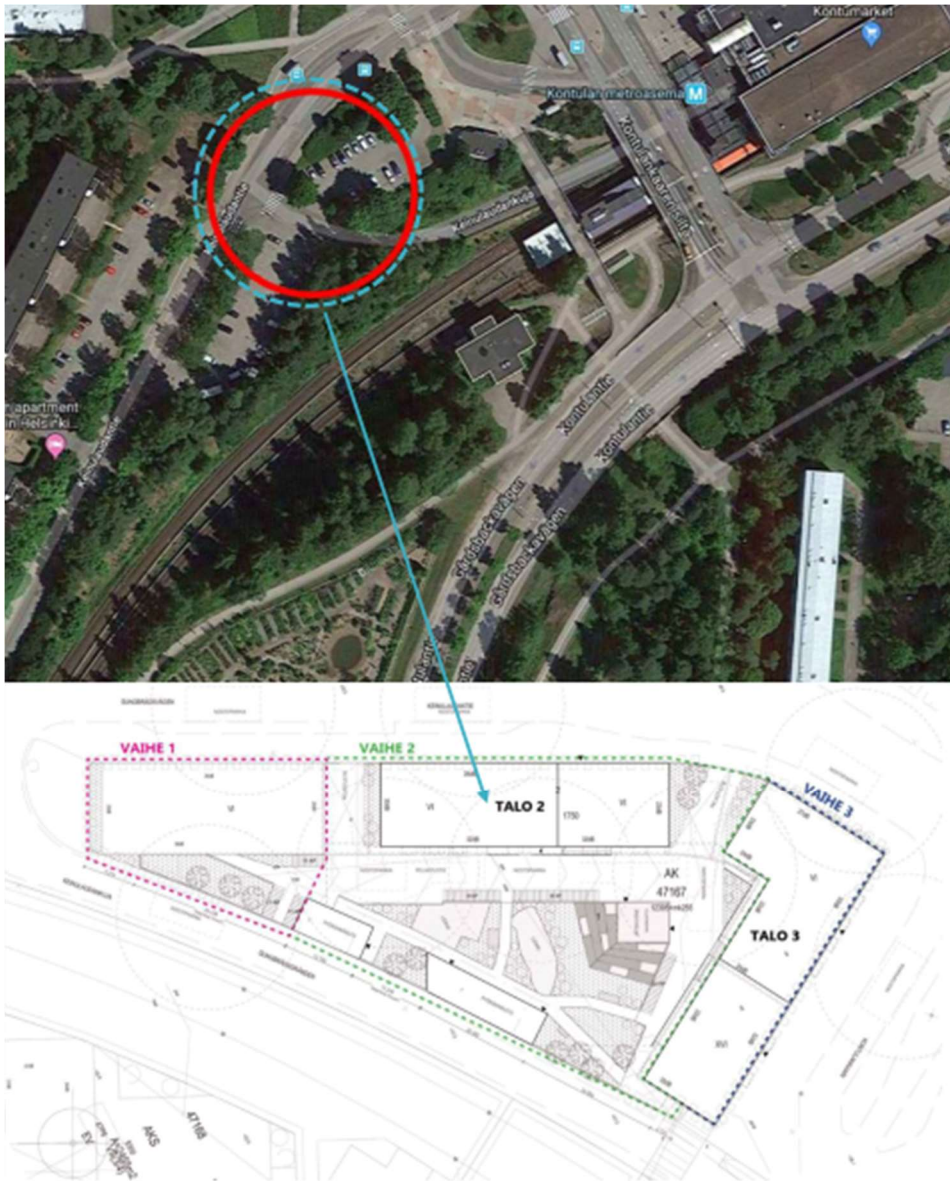
Viemäriputket kannattaa toteuttaa muovisena ja sokkeleiden alapuolisena sokkeliläpivientien välttämiseksi. Viemäreiden joustokappaleena käytettiin erikoisvalmisteista WC-suorayhdettä. Jos alapohjan korvausilmakanavat kulkevat osaksi maan alla, täytyy ne eristää samalla materiaalilla kuin primäärieristimien liikkeenrajoittimien pystyirrotuskaistat. Korvausilmakanavan voi myös suunnitella kulkemaan maan päältä rakennuksen sisälle ja alapohjaan, jolloin sitä ei tarvitse eristää.

Kaukolämpölaitteille tulee suunnitella oma eristyksensä, ellei kaukolämpöputkiin voida tehdä ääniteknistä katkaisua ennen rakennusta. Laitteet voidaan eristää esimerkiksi kelluvalla betonilaatalla, jonka alla on kokopintainen Sylomer-matto. Laitteistoon tulevat tai siitä lähtevät putket eivät saa olla jäykässä yhteydessä eristettyyn rakennusosaan. Ne voidaan tukea eristämättömiin rakenteisiin tai kelluvaan laattaan. Lähteviin putkiin on laitettava joustoliittimet ennen siirtymistä eristettyyn rakennusosaan.

Akustiikkasuunnittelija teki ehdotuksia käytettäväksi joustoliittimiksi. Muitakin tuotteita oli mahdollista käyttää, mutta niiden täytyi olla akustiikkasuunnittelijan hyväksymiä. LVIS-suunnittelijan tehtävänä oli vielä varmistua liittimien sopivuudesta sekä niiden merkitseminen piirustuksiin.

## 5.2 Helsingin Keinulaudantie 2 a

Asunto-osakeyhtiö Helsingin Keinulaudantie 2 a on yksi Helsingin Kontulaan rakennettavan suurkorttelin taloista. Hankkeessa metroradan pohjoispuolelle, metroaseman länsipuolelle, rakennetaan kolme asuinkerrostaloa, joista yhteen kuuluu 16-kerroksinen torni ja muut ovat 6-kerroksisia. Yksi talo rakennetaan myös radan eteläpuolelle. Kuvassa 13 näkyy suurkorttelin suunniteltu ympäristö satelliittikuvassa.



Kuva 13. Ilmakuva kohteesta sekä ote arkkitehdin asemapiirroksesta (A-Insinöörit 2019)

Tässä työssä käsitellään Sitowisen suunnittelemaa taloa 2, joka on taloista keskimäinen ja jossa on kuusi kerrosta. Seuraavien lukujen tiedot rakennuksesta viittaavat A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n laatimaan värähtelytekniiseen työselitykseen (2019). Työn kirjoitusaikana rakennus on vielä rakenteilla.

### **5.2.1 Lähtötilanne**

Metroradan läheisyys tuottaa haasteita rakennusten värähtelytekniiseen suunnitteluun. Ostoskeskuksen lähellä sijaitsevan radan kattamistakin on mietitty, mutta siitä on luovuttu kattamisen liiallisten kustannusten vuoksi (Karilas 2016, Vehkasalon 2016, mukaan). Myös siinä tapauksessa, että metrorata olisi kalettu, runkomelu ja liikennetärinä olisi täytynyt ottaa huomioon. Avorata tuottaa maaperän värähtelyn lisäksi liikennemeluongelman. Siihen on varauduttu melumuurilla korttelin radan puoleisella sivulla (Vehkasalo 2016).

A-Insinöörien toteuttaman tärinä- ja runkomelumittauksen mukaan kohde saavuttaa tärinäluokan C eli uudisrakennusten vähimmäisvaatimuksen tavanomaisella rakentamistavalla, mutta runkomelu ylittää tavoitetason 35 dB. Runkomelun vaimentamista varten perustuksiin on suunniteltu eristimet.

### **5.2.2 Runkomelun vaimennus**

Tässä kohteessa käytetään Helsingin Villiviinin tapaan vaaka- ja pystysuuntaisia irrotuskaistoja. Vaakatasoon, paaluanturoiden yläpinnalle, asennetaan primäärieristimet. Niiden päälle valetaan vasta-anturat, joille rakennus rakennetaan normaalisti.

Primäärieristimien yläpuolinen rakennusosa tulee irrottaa maaperästä kokonaan, jottei värähtelyllä olisi reittiä maaperästä rakennukseen. Rakennuksen alapohja on suurimmaksi osaksi tuulettuva ja maanpinnan yläpuolella, eikä siinä tarvita irrotuskaistoja, mutta maanvaraiset rakenteet on eristettävä. Tämä tehdään sekundäärieristimillä, joita ovat pystyirrotuskaistat rakennuksen sivuilla sekä vaakairrotuskaistat väestönsuojan ja kaapelitilan maanvaraisten laattojen alapuolella. Myöskään autohalli, pihakansi tukimuuri tai muu eristämätön rakennusosa ei saa olla eristämättömässä yhteydessä eristettyyn rakennusosaan.

Eristimet suunnitellaan niin, että niiden ominaistaajuus poikkeaa paikalta mita-  
tuista runkomelun merkitsevimmistä taajuuskaistoista. Näin saavutetaan ha-  
luttu vaimennus runkomelua vastaan. Eristyksen suunnittelua varten rakenne-  
suunnittelijan tulee laskea eristimille käyttötilanteessa tulevat todelliset kuor-  
mat mahdollisimman tarkkaan. Tässä kohteessa eristinkuorma on laskettu li-  
säämällä rakenteiden omaan painoon, ilman varmuuskertoimia, 30 % hyöty-  
kuormasta (kaava 2).

$$e_l = g + 0,3 q \quad (2)$$

jossa	$e_l$	eristinkuorma	[kN/m <sup>2</sup> ]
	$g$	rakenteen oma paino	[kN/m <sup>2</sup> ]
	$q$	hyötykuorma	[kN/m <sup>2</sup> ]

Esitetty prosenttiosuus on arvio käytännössä toteutuvasta hyötykuorman mää-  
rystä. Eristimien mitoituksen ja toiminnan kannalta on oleellista, että eristin-  
kuorma on mahdollisimman tarkkaan määritetty. Jos kuormitus jää suunnitel-  
tua pienemmäksi, järjestelmän ominaisuustaajuus on korkeampi ja runkome-  
lun vaimennus kärsii.

Eristinkuormat sijoitetaan eristinplaaniin, jossa näkyvät niiden sijainnit sekä  
suuruudet. Kuormien perusteella valitaan sopivat eristelaadut, jotka merkitään  
myös eristinplaaniin sijainteineen. Eristinplaaniin lisäksi on laadittava materiaa-  
liluettelo, josta ilmenee muun muassa eristeiden määrät sekä laadut.

Eristettyyn rakennusosaan voidaan joutua tekemään läpivientejä, joita pitkin  
värähtely saattaa edetä. Värähtelyn rakennukseen johtumisen estämiseksi lä-  
pivienneille on laadittu asennusdetalji, jossa käytetään 2 x 10 mm soluku-  
mieristettä läpivientien irrottamiseen eristetystä rakennusmassasta. LVIS-ve-  
doissa käytetään joustoliitintä kohdassa, jossa kannatukset vaihtuvat eristä-  
mättömästä rakennusosasta eristettyyn. Ennen joustoliitintä tehtävät, eristet-  
tyyn osaan liittyvät kannakkeet tulee eristää tärinää vastaan erikseen.

### 5.2.3 Primäärieristimet

Kohteessa käytettiin primäärieristiminä VibraFlex-eristinkaistoja. Mitoituksen perusteella riittävä paksuus eristeelle on 12,5 mm. Eristeelle kohdistuva pinta-alakuorma ei saa muuttua suunnitellusta, sillä se voisi johtaa eristyksen heikkenemiseen. Eristimen päällisen anturan tulee siis olla eristimen levyinen. Kaikki muutokset anturoiden pinta-aloissa vaativat pinta-alakuormien tarkistamista ja hyväksyttämistä akustiikkasuunnittelijalla.

Jotta eristimet pysyisivät työn aikana paikallaan, kannattaa ne liimata tai kitata pistemäisesti kiinni. Eristimien asennuspinnan eli paaluanturan tulee olla tasainen korkeintaan kolmen millimetrin poikkeamalla, eikä siitä saa muodostua akustisia kytkentöjä eristettyyn rakennusosaan. Myös eristimien raot tulee kitata umpeen, jottei valubetoni muodostaisi kytkentää. Tämän lisäksi eriste peitetään muovikalvolla, joka voi olla tavallista höyrynsulkumuovia.

### 5.2.4 Sekundäärieristimet

Pystysuuntaisten sekundäärieristimien tehtävä on vaimentaa vaakasuuntaista värähtelyä ja eristää primäärieristimien yläpuoleinen rakennusosa maaperästä. Tähän tarkoitukseen käytetään 50 mm paksua EPS Routa 120 -levyä. Samaa tuotetta käytetään väestönsuojatilan sekä kaapelitilan alapohjalaatan eristämiseen, mutta 150 mm paksuna. Vaakairrotuskaistan alle voidaan asentaa lisälämmöneristeitä, mikäli rakennesuunnittelija niin haluaa.

Pystyirrotuskaistat tulee kiinnittää liimaamalla, mekaanisten kiinnikkeiden sijaan. Perusmuurilevyn voi tarvittaessa asentaa eristimen ja sokkelin väliin. Eristelevyt on pyrittävä asentamaan mahdollisimman tiiviisti, mutta tarvittaessa saumat voi vielä teipata.

### 5.3 Dallasin messukeskus

Texasin Dallasissa sijaitseva Kay Bailey Hutchison Convention Center sisälsi 2000-luvun alun laajennustyön valmistuttua maailman suurimman pilarittoman näyttelytilan. Näyttelytilan katon suuren jännevälän mahdollisti teräskaarista ja ristikoista koostuvat rakenteet, jotka näkyvät kuvassa 14. Tämä laajennusosa on rakennettu osittain kuuden rautatiekiskon yläpuolelle pilareiden varaan.



Kuva 14. Kay Bailey Hutchison Convention Centerin näyttelyhalli Dallasissa (Bosworth 2014)

Kuudesta rautatiestä, jotka kulkevat messukeskuksen alapuolella, neljä on raskaan tavaraliikenteen junille ja kaksi Dallasin alueen paikallisliikenteelle. Niistä aiheutuu värähtelyä messukeskuksen perustusten välittömässä läheisyydessä, mikä aiheuttaa olennaisen riskin värähtelyn aiheuttamien ongelmien ilmaantumiselle rakennuksessa. Tässä luvussa käytetään Hassanin (2006) tietoja messukeskuksen värähtelystä, jotka puolestaan pohjautuvat Carnesin (2003) esittämiin.

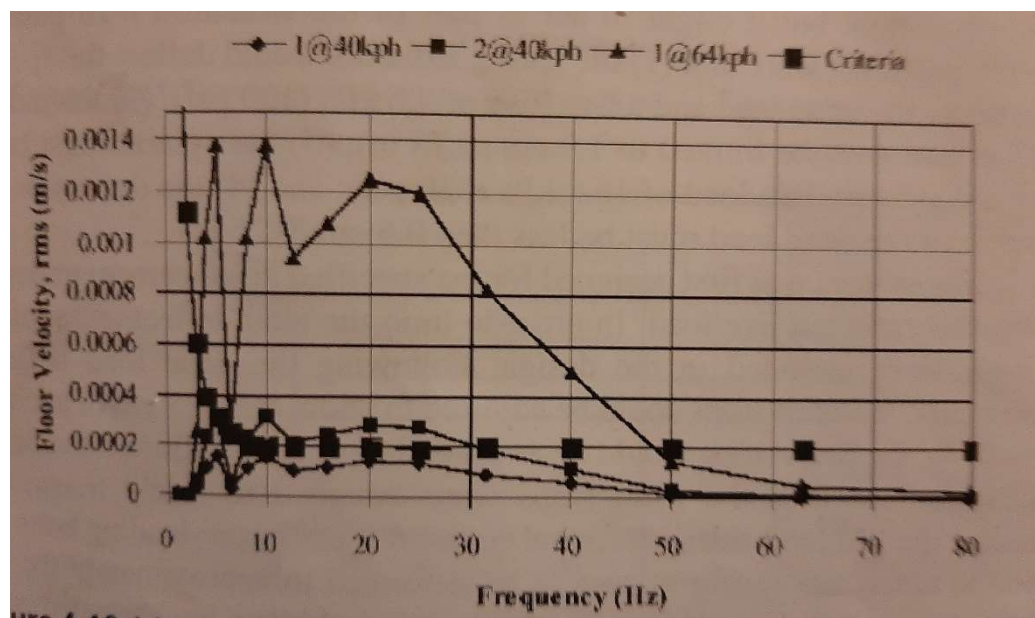
#### 5.3.1 Lähtötilanne

Ennen laajennusosan rakentamista mitattiin junien maaperään aiheuttamaa värähtelyä. Tulokset osoittivat varsin matalataajuisen värähtelyn, 4... 5 Hz, vallitsevan maaperässä. Tällainen värähtely aiheuttaisi värähtelyä messukeskuksen lattiarakenteissa, joten oli selvää, että värähtelyvaimennuskeinoja tarvittaisiin. Tavanomainen rakennustapa olisi myös johtanut meluongelmiin junaradan läheisyydestä johtuen, joten kohteessa käytettiin erikoismateriaaleja kuten

akustista lasia. Raja-arvojen määrittämisessä hankkeessa käytettiin amerikkalaista ANSI-standardia S3.29-83, joka ei kuitenkaan sekään tarjonnut tarkkoja kriteerejä tärinän subjektiivisen kokemuksen arviointiin.

Tärinä mitattiin tavarajunien rataa lähimmäksi tulevien pylväiden kohdalta ja lattian värähtely arvioitiin analyttisin menetelmin. Värähtelyn suuruuteen vaikutti tässä tapauksessa muun muassa perustamistapa, jossa pilarit perustettiin peruskallioon asti. Maaperässä vallitsevan värähtelyn ollessa huomattavan matalataajuista, kallioperä ei johtaisi rakennukseen runkomelua, vaan tällainen perustamistapa jäykistäisi rakennusta vaimentaen matalia taajuuksia. Värähtely myös vaimenisi edetessään pilareissa, mutta voimistuisi lattioiden ominaistajuuksilla.

Kohteesta tehdyt laskelmat osoittivat, että taajuusalue 3... 11 Hz olisi lattioiden värähtelyn kannalta ongelmallisimman. Pylväiden jännevälillä 22,8 m lattian ominaistajuus on 3... 4 Hz ja 9,1 m jännevälillä lattiolla 11 Hz. Tämä näkyy kuvan 15 kuvaajassa lattian värähtelyn nopeuden piikkeinä erityisesti maksiminopeudella kulkevan junan aiheuttamana.



Kuva 15. Lattian värähtelyn nopeus taajuudesta riippuen ja erilaisilla junien nopeuksilla sekä lukumäärillä (Hassan 2006, 379)

Kuvassa 15 kuvaajan arvot osoittavat, millaisella tasolla lattian värähtely arviolta olisi ilman vaimennusta. 64 km/h (40 mph) kulkeva juna aiheuttaa selvästi

suuremman tärinän kuin 40 km/h kulkeva, vaikka niitä ajaisi kaksi ohitse samaan aikaan. Arvioitu tärinä ylittäisi jopa 1,4 mm/s lukemiin.

### 5.3.2 Tärinänvaimennus

Vaimentaakseen tärinää rakennesosalla täytyy olla tärinän taajuutta matalampi ominaistaajuus. Tavarajunien raiteiden yllä kulkevat kotelopalkit, joiden jännevälillä 22,8 m ratkaiseva taajuus on 3... 4 Hz. Näin matala ominaistaajuus voidaan alittaa teräsrousilla, joiden jousto on 5 cm. Tällaisella rousella ominaistaajuus on 2,2 Hz ja saavutettava vaimennus on laskennallisesti 40 ja 70 prosentin välillä. Viereinen pilariväli ylittää paikallisliikenteen junaradan. Siihen kohdistuu samanlainen värähtelyrasite, mutta koska jänneväli on vain 9,1 m, ominaistaajuus sillä on 11 Hz. Tämän vuoksi toisen puolen pilareihin riittää jousi, jonka joustavuus on puolet edellisestä, eli 2,5 cm. Ominaistaajuudella 3,13 Hz se saavuttaa jopa 85 prosentin vaimennuksen.

Poispäin junaradasta tultaessa värähtely vaimenee noin puoleen matkan kaksinkertaistessa. 5 cm rousilla varustetusta pilaririvistä seuraavassa on 2,5 cm rouset ja kolmannessa rivissä on pelkkä neopreenimatto. Myös rousielementteihin kuuluu neopreenimatto, sillä ne vaimentavat värähtelyä ainakin korkeammilla taajuuksilla tilanteessa, jossa rousien liikkeenrajoitin on toiminnassa.

Rouset on suunniteltu edellä mainituille painumille rakennuksen oman painon ja 4,6 kN/m<sup>2</sup> hyötykuorman rasituksessa. Sen lisäksi rouset saivat myötää enintään 1,9 cm, joten niihin suunniteltiin säädettävät liikkeenrajoittimet. Liikkeenrajoittimien tuli kestää rakennuksen maksimikuorma, sillä ne alkaisivat toimia ennen kuin maksimihyötykuorma, 16,8 kN/m<sup>2</sup>, saavutettaisiin. Rouset oli myös esijännitetty vastaamaan lopullista painumaa. Rakennus rakennettiin niiden päälle, jolloin sen valmistuttua rouset voitiin vapauttaa minimaalisin muodonmuutoksin.

Messukeskuksen laajennusosan valmistuttua lattian värähtely mitattiin 40 kilometriä tunnissa kulkevan tavarajunan sekä paikallisliikenteen junan ohiajoista. Tuloksista selvisi, että hankalimmillakin taajuuksilla värähtely jää alle puoleen

tavoitetasosta. Suurin piikki värähtelyarvoissa on pitkän kotelopalkin ominais-  
taajuuden kohdalla, mikä olikin mitoituksessa pitkälle määräävä tekijä.

## 6 YHTEENVETO

Maaperästä siirtyvän värähtelyn aiheuttamiin ongelmiin on alettu Suomessa-  
kin pikkuhiljaa kiinnittää huomiota. Kaupunkien kasvaessa lisääntyy liikenne,  
niin yksityinen kuin julkinenkin, sekä asumiseen tarvittavan alueen määrä.  
Tämä johtaa väejäämättä liikenteen ja sen aiheuttamien haittojen siirtymiseen  
yhä lähemmäs asuinalueita, samaan aikaan kun ihmisten yleinen herkkyy-  
selulle, saasteille ja muille häiriöille kasvaa. Lisäksi voidaan olettaa, että laa-  
joissa metropoliympäristöissä välttämättömän, mutta usein raskaamman ja  
häiritsevemmän julkisen liikenteen osuus väylien käytöstä ainakin Suomen  
kaltaisessa maassa kasvaa. Tästä syystä tarve rakentamisen lainsäädännön  
ja ohjeistuksen päivittämiseksi värähtelyn huomioonottamiseksi on perusteltu.

Suomessa tutkimustyötä värähtelyn vaikutuksista rakentamisessa on tehnyt  
Teknologinen tutkimuskeskus VTT. Se on julkaissut monia ohjeita tärinän ja  
runkomelun mitoituksen helpottamiseksi, mutta yhdenmukainen ja virallinen  
sääntely alalta puuttuu. Laki ei määritä mittapuuta värähtelyn aiheuttamille  
haitoille, vaan käytössä olleet raja-arvot ja mittaukset ovat VTT:n julkaise-  
mista materiaaleista. Nämä materiaalit pohjautuvat tutkimuksiin sekä jossain  
määrin myös muissa maissa käytössä oleviin menettelyihin.

Liikenteen lisäksi tärinää aiheutuu monesta muusta tekijästä. Luonnolliseksi  
tapahtumaksi maanjäristykset ovat hyvin vaarallisia rakennuksille. Maankuo-  
ren jännityksistä vapautuva energia voi tuottaa todella voimakasta värähtelyä,  
mitä voidaan parhaiten torjua joustavilla perustoilla. Todennäköisempi ra-  
kennusta vaurioittavan tärinän lähde on kuitenkin maanpohjan rakennustyöt,  
esimerkiksi räjäytystyöt tai paalutus. Niistäkin aiheutuvan värähtelyn vaikutus  
rajoittuu kuitenkin lähinnä vain kosmeettisiin vaurioihin.

Rakenteiden värähtelyteknisessä mitoituksessa keskitytään usein ominaistaa-  
juuden määrittämiseen. Jäykällä rakenteella on korkeampi ominaistaa-  
juus. Jäykkyyteen voi vaikuttaa jänneväliillä, jäykistäväillä seinillä sekä pinta-aloilla.

Rakenteen ominaistaajuus halutaan yleensä maaperässä vallitsevan värähtelyn taajuutta matalammaksi, sillä materiaalin ominaistaajuutta korkeammat värähtelyt vaimenevat materiaalissa. Korkeammilla taajuuksilla on myös muistettava, että materiaaleilla voi olla muitakin resonanssitaajuuksia.

Kun mitoitetaan rakenne maaperän värähtelyn mukaan, tehdään myös oletta-  
mus, että värähtelyn taajuussisältö ei muutu. Jos kuitenkin lähelle rakenne-  
taan esimerkiksi uusi väylä tai vanhan väylän käyttötarkoitus muuttuu, on  
mahdollista, että maaperään siirtyvän värähtelyn taajuussisältökin muuttuu.  
Uuden värähtelylähteen synnyttämä taajuus saattaakin olla rakennuksen reso-  
nanssialueella. Silloin voi olla jo haastavaa ratkaista, miten saadaan rakennus  
eristettyä tärinältä uudelleen.

### **6.1 Jatkotutkimusmahdollisuuksia**

Varsinaiset tärinä- tai runkomelueristeet eivät ole ainoa keino rajoittaa väräh-  
telyn siirtymistä perustuksiin, runkoon tai rakennuksen kriittisiin tiloihin. Kuten  
edellä on kerrottu, myös rakenteiden massiivisuus ja eristeen päällä niin sano-  
tusti kelluvat lattiat ovat keinoja värähtelyn haittojen ehkäisyssä. Kummankaan  
käyttämistä erityisesti tärinän tai runkomelun eristämisessä laajemmassa  
mittakaavassa ei kuitenkaan ole mainittavasti tietoa. Aihe on kuitenkin tutkimi-  
sen arvoinen.

Tärinän tutkimiseen on myös olemassa menetelmä, joka perustuu suurno-  
peuskameran tuottamassa kuvassa näkyvän liikkeen vahvistamiseen. Näin  
saadaan esimerkiksi lattiaa kuvattaessa helposti selville tärinän vaikutusalue  
sekä värähtelyn laajuus. Tämä menetelmä kehitettiin alun perin konetekniikan  
tarpeisiin auttamaan koneiden tärinän kartoittamisessa ja ongelmakohtien pai-  
kannuksessa, mutta sitä voidaan soveltaa hyvin myös rakennetekniikkaan.  
Menetelmä yksinkertaisesti havainnollistaa, mitä eri taajuuksilla tapahtuva vä-  
räh-  
tely rakenteelle tekee moninkertaistamalla havaitsemansa liikkeen ihmissil-  
män erotettavaksi. Näin pystytään näkemään myös liikkeen suunta.

## 6.2 Pohdintaa

Rakennesuunnittelijalle liikenteen aiheuttaman värähtelyn huomioon ottaminen suunnittelussa voi olla uusi asia. Tämän opinnäytetyön tarkoitus on auttaa ymmärtämään värähtelyä liikenteen aiheuttamana ilmiönä sekä sen vaikutusta rakennuksen toimintaan ja suunnitteluun. Mitoituksesta tulee nopeasti melko monimutkaista, joten tässä työssä ei esitetty sen ohjeistusta pääpiirteitä lukuun ottamatta. Tarkemman värähtelysuunnittelun ohjeistuksen laatiminen vaatisi enemmän aikaa ja etenkin kokemusta, joten tähän yleiskatsaukseenkin voi olla tyytyväinen.

Työssä on käytetty lähteenä erityisesti VTT:n materiaalia. Työn edetessä ilmeni, että aihetta käsittelevää kirjallisuutta oli saatavilla oletettua enemmän, mutta se käsitteli suurimmaksi osaksi junaliikenteen aiheuttamaa tärinää, joka oli vain yksi tässä työssä käsitellyistä osa-alueista. Tavoitteena oli luoda yleiskatsaus maaperän värähtelyn vaikutuksiin sekä niiden estämiseen rakennuksessa, mihin tämä työ keskittyykin.

## LÄHTEET

A-Insinöörit Suunnittelu Oy. 2019. 1615046.4 as. oy Helsingin Keinulaudantie 2 a – värähtelytekkinen työselitys.

Bramming Plast-Industri A/S s.a. VibraFlex & VibraSetex. Tuote-esite.

Haara, T. 2018. Betonitekniikan oppikirja. Helsinki: BY-koulutus Oy.

De Vos, P. 2017. Railway induced vibration – State of the art report. Pariisi: International Union of Railways (UIC).

Hassan, O. 2006. Train-induced Groundborne [sic] Vibration and Noise in Buildings. Brentwood, Essex: Multi-Science Publishing.

Helimäki Akustikot Oy. 2016. 6642-4a as. oy Helsingin Villiviini – värähtelytekkinen työselitys.

RakMk B3. 2004. Pohjarakenteet. Helsinki: Ympäristöministeriö.

RT 103116. 2019. Sylomer- ja Sylodyn -tärinäeristeet.

RT 83-10902. 2007. Välipohjarakenteita.

Savolainen, T. 2019. Projektipäällikkö. Haastattelu 19.11.2019. Sitowise Oy.

Suvanto, K. & Laajalehto, K. 2008. Tekniikan fysiikka 2. 1.-3. painos. Helsinki: Edita Prima Oy.

Taina, P. 2016. Projektipäällikkö. Sähköpostiviesti 30.6.2016. Helimäki Akustikot Oy.

Talja, A. 2004. Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. Espoo: VTT.

Talja, A. 2011. Ohjeita liikennetärinän arviointiin. Espoo: VTT.

Talja, A. & Saarinen, A. 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi. Espoo: VTT.

Talja, A. & Törnqvist, J. 2006. Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. Espoo: VTT.

Talja, A., Vepsä, A., Kurkela, J. & Halonen, M. 2008. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi. Espoo: VTT.

Vehkasalo, J. 2016. Kontula on saamassa oman tornitalonsa – katso havainnekuvat. Helsingin Uutiset. Saatavissa: <https://www.helsinginuutiset.fi/artikkeli/424292-kontula-on-saamassa-oman-tornitalonsa-katso-havainnekuvat> [viitattu 11.11.2019].

## KUVALUETTELO

Kuva 1. Liikenteestä aiheutuvan värähtelyn eteneminen rakennukseen. Talja, A. 2011. Ohjeita liikennetärinän arviointiin. Espoo: VTT.

Kuva 2. Värähtelyn etenemistavat maaperässä, liikkeen etenemissuunta vasemmalta oikealle. de Vos, P. 2017. Railway induced vibration – State of the art report. Pariisi: International Union of Railways (UIC).

Kuva 3. Ihmisen herkkyys värähtelylle. Talja, A. 2004. Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. Espoo: VTT.

Kuva 4. Helsingin Villiviinissä paaluanturoiden ja vasta-anturoiden eristämiseen käytetään Sylomer-eristimiä. Savolainen, T. 2016.

Kuva 5. Sylomer-eristeiden värikoodit ja kuormituskyvyt. RT 103116. 2019.

Kuva 6. Betoniteräслиittolaatta, joka odottaa valua. Sen alla on nauhamainen Sylomer-eristys. RT 103116. 2019.

Kuva 7. Ote VibraFlex- ja VibraSetex-tuotteiden mitoitusaulukosta. Bramming Plast-Industri A/S. s.a. VibraFlex & VibraSetex. Tuote-esite.

Kuva 8. Havainnekuva Helsingin Villiviinistä etelästä Aleksis Kiven kadulta päin kuvattuna. YIT Rakennus Oy. 2016. Saatavissa: [https://issuu.com/yit-group/docs/helsingin\\_villiviini\\_esite\\_yit\\_2016](https://issuu.com/yit-group/docs/helsingin_villiviini_esite_yit_2016) [viitattu 12.12.2019].

Kuva 9. Periaatekuva kohteen perustusten värähtelyeristyksestä. Taina, P. 2016. Sähköpostiviesti 30.6.2016. Helimäki Akustikot Oy.

Kuva 10. Esimerkki rakennesuunnittelijalta vaadittavista tiedoista. Taina, P. 2016. Sähköpostiviesti 30.6.2016. Helimäki Akustikot Oy.

Kuva 11. Ote Helsingin Villiviinin eristinkuvasta eristinsuunnittelun jälkeen. Helimäki Akustikot Oy. 2016. 6642-4a as. oy Helsingin Villiviini – värähtelytekni-  
nen työselitys.

Kuva 12. Kuvassa näkyy Helsingin Villiviinin vasta-antura, irrotuskaista ja liik-  
keenrajoitin, joka odottaa valua. Savolainen, T. 2016.

Kuva 13. Ilmakuva kohteesta sekä ote arkkitehdin asemapiirroksesta. A-Insii-  
nöörit Suunnittelu Oy. 2019. 1615046.4 as. oy Helsingin Keinulaudantie 2 a –  
värähtelytekni-  
nen työselitys.

Kuva 14. Kay Bailey Hutchison Convention Centerin näyttelyhalli Dallasissa.  
Bosworth Steel Erectors, Inc. 2014. Saatavissa: [https://bosworth-  
teel.com/project-list/kay-bailey-hutchison-convention-center/](https://bosworthsteel.com/project-list/kay-bailey-hutchison-convention-center/) [viitattu  
24.11.2019].

Kuva 15. Lattian värähtelynopeus taajuudesta riippuen ja erilaisilla junien no-  
peuksilla sekä lukumäärillä. Hassan, O. 2006. Train-induced Groundborne  
[sic] Vibration and Noise in Buildings. Brentwood, Essex: Multi-Science Pub-  
lishing.

**TAULUKKOLUETTELO**

Taulukko 1. Runkomelun hättavaikutusten raja-arvoja. Talja, A. & Saarinen, A. 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi. Espoo: VTT.

Taulukko 2. Liikennetärinän turvaetäisyydet. Talja, A. 2011. Ohjeita liikennetärinän arviointiin. Espoo: VTT.

Taulukko 3. Suositus tärinän raja-arvoista Talja, A., Vepsä, A., Kurkela, J. & Halonen, M. 2008. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi. Espoo: VTT.

Taulukko 4. Suositus raja-arvoista runkomelutason mitoituksessa. Talja, A. & Saarinen, A. 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi. Espoo: VTT.

Taulukko 5. Runkomelun kannalta turvalliset etäisyydet. Talja, A. & Saarinen, A. 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi. Espoo: VTT.