

TAMPEREEN KANSI JA KESKUSAREENA RUNKOMELUSELVITYS KAAVAMUUTOSTA VARTEN



26.10.2010

1	Toimeksianto.....	3
2	Lähtötiedot ja menetelmät.....	3
2.1	Mittauskalusto	3
3	Runkomelumallin kuvaus.....	4
4	Tulokset.....	5
5	Rakentamisen aikainen runkomelu	11
6	Johtopäätökset	12

1 Toimeksianto

Työn tarkoituksena oli laatia runkomeluserelvitys asemakaavamuutostyön tueksi. Selvityksessä arvioitiin raideliikenteestä aiheutuvien värähtelyjen synnyttämiä runkomelutasoja rakennuksissa ja huoneistoissa ja tutkittiin millä keinoin syntyviä runkomelutasoja ja -häiriöitä voitaisiin asemakaava-alueella tarvittaessa vaimentaa.

Raportissa on lyhyesti tarkasteltu myös kannen rakentamisen aikana syntyvien värähtelyiden aiheuttamia runkomelutasoja läheisissä rakennuksissa.

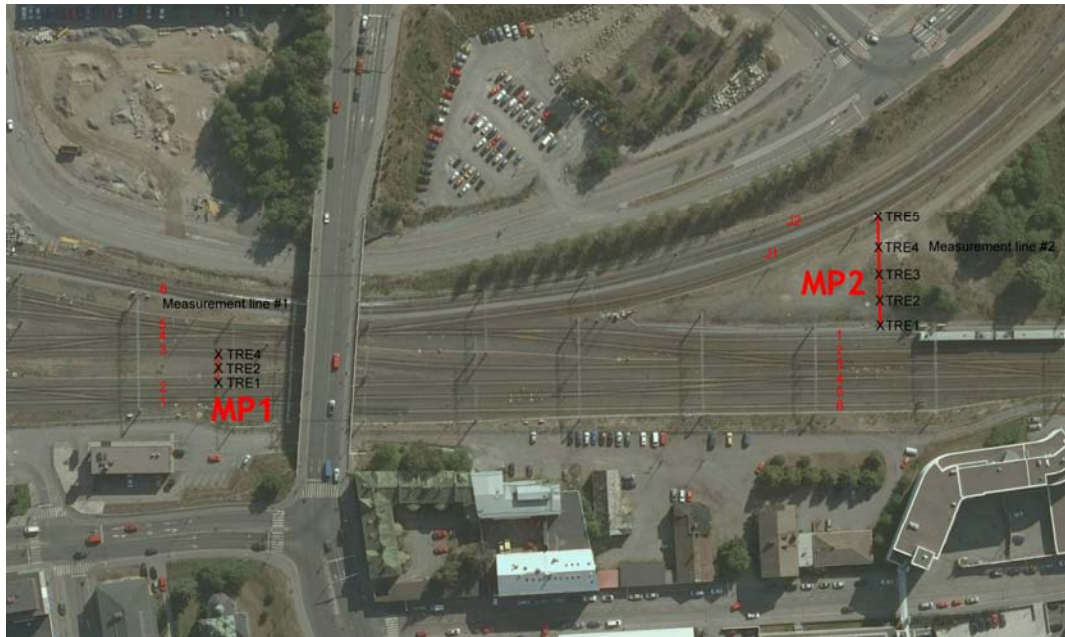
Selvitys on tehty NCC Rakennus Oy:n toimeksiannosta. FM Ilkka Niskanen ja DI Tuukka Lyly suorittivat Tampereella värähtelymittaukset ja viimeistelivät raportin. DI Anders Nordborg (WSP Sweden) käsitteli mittaustulokset ja teki arviot runkomelutasoista.

2 Lähtötiedot ja menetelmät

Tampereen keskusareenaa suunnitellaan Tampereen aseman eteläpuolelle osittain ratapihan päälle tulevalle kannelle. Keskusareenan lisäksi kannelle suunnitellaan rakennuksia, joihin tulee mm. hotelli, toimisto- ja liikerakentamista sekä asuntoja. Alueelle laaditaan asemakaavan muutosta, jonka tueksi tämä runkomeluserelvitys on tehty.

2.1 Mittauskalusto

Värähtelyn lähtötason mittaukset suoritettiin Tampereen ratapihalla 16.9.2010. Mittaukset suoritettiin Sigicom Infra mini-laitteistolla, johon voidaan kytkeä useita mittausantureita ketjuksi. Kun anturit asennetaan ketjuksi, voidaan tehdä arvio siitä kuinka paljon maaperä vaimentaa värähtelyä. Mittaukset suoritettiin kahdessa mittauspaikassa, jotka on esitetty kuvassa 1. Mittauspaikka 1 sijaitsee kahden raiteen välisellä alueella suhteellisen lähellä asemalaitureita. Tälle mittauspaikalle kyettiin asentamaan 3 värähtelyanturia noin 5 metrin etäisyydelle toisistaan. Mittauspaikalle 2 asennettiin yhteensä 5 värähtelyanturia, joiden välimatka toisistaan oli noin 7,5 metriä.

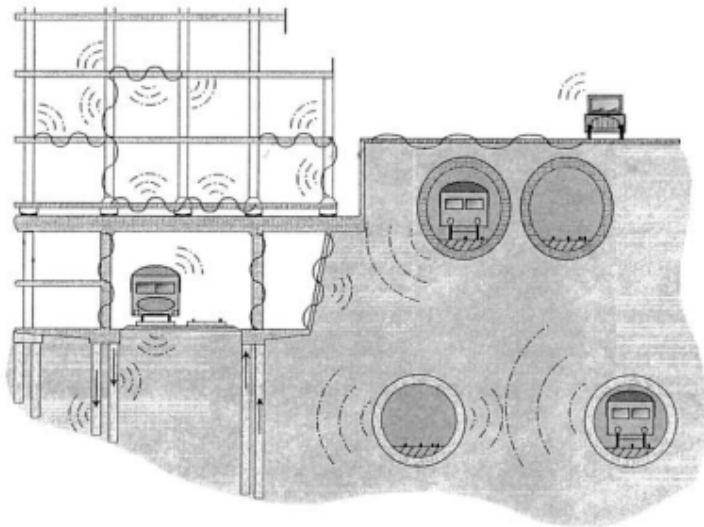


Kuva 1. Värähtelyn lähtötason mittauspaiikat.

Mittausten aikainen kirjanpito pitää sisällään tiedot ohiajaneiden junien tyypistä, nopeudesta, vaunujen määrästä ja siitä millä raiteella ohiajo tapahtui. Junista otettiin myös valokuvat.

3 Runkomelumallin kuvaus

Raiteilla etenevä juna synnyttää värähtelyä maaperään. Värähtely etenee maaperässä ja kytkeytyy rakennusten perustuksiin. Värähtelyt etenevät rakennuksen perustuksissa ja rakenteissa ja vapautuessaan huonepintoista, värähtelyt synnyttävät ilmaääntä eli runkomelua (kuva 2).



Kuva . Runkomelun syntyminen.

Runkomelun synnyttämiä melutasoja sisätiloissa voidaan arvioida mallilla, joka ottaa huomioon seuraavat tekijät:

- Etenevän junan aiheuttama värähtely maaperään (lähde)
- Värähtelyn vaimeneminen maaperässä
- Värähtelyiden eteneminen ja vaimeneminen maaperän ja rakennuksen perustusten välisessä kytkeytymisessä
- Runkoäänivärähtelyiden eteneminen rakennuksen rakenteissa
- Runkoäänien säteily toissijaisena äänilähteenä huonetilassa (vastanotto)

4 Tulokset

Lähde – etenevän junan aiheuttama värähtely

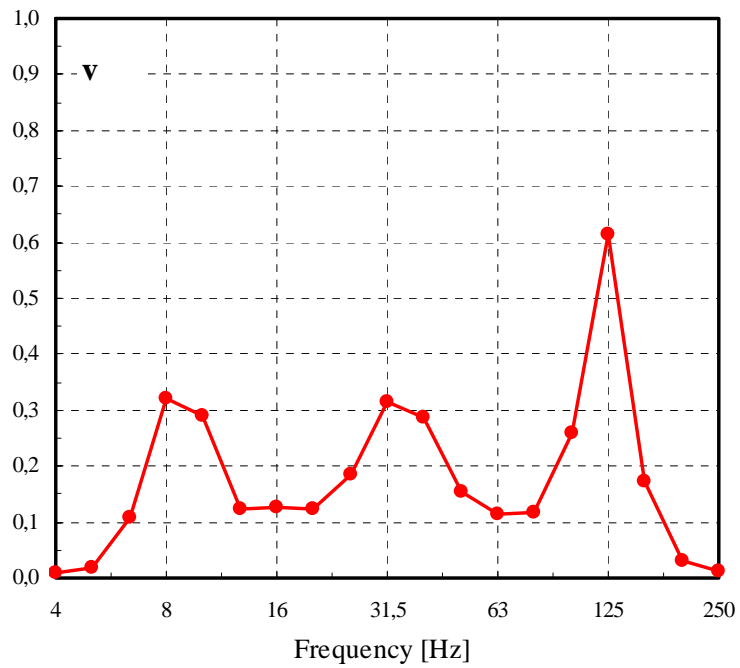
WSP Finland on mitannut Tampereella maaperän värähtelyä raiteiden läheisyydessä. Mitattu värähtelyn nopeus kuvaa lähteen voimakkuutta ja värähtelyn lähtötasoa. Mittaukset suoritettiin kahdessa eri mittauspaikassa, joissa mittaukset suoritettiin kolmella (mittauslinja 1) ja viidellä (mittauslinja 2) värähtelymittausanturilla. Näistä mittauspaikoista saavutetut tulokset on esitetty alla.

Kuvassa 3 on esitetty esimerkki maaperän värähtelystä tavarajunan ohituksen aikana. Junan nopeus mittauskohdassa oli noin 20 km/h, mittauspaikan ja radan välinen etäisyys noin 7 metriä ja ratapölkkyjen väli 0,6 m. Ratapölkkyjen ylityksen ominaistajuus on mahdollista las-

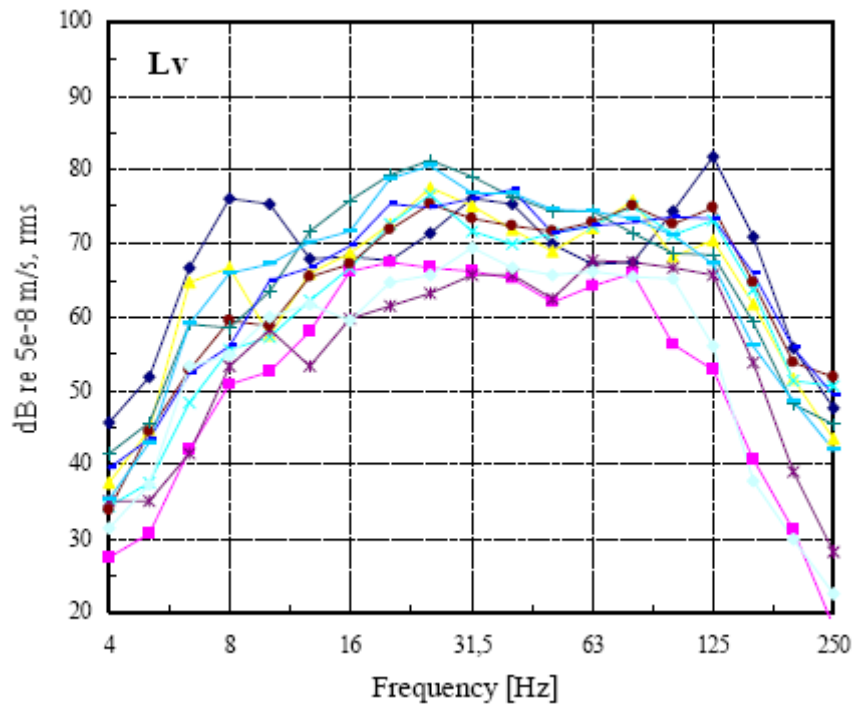
kea kaavalla $f_s = \frac{v}{l} = 9 \text{ Hz}$, jossa kohdassa koinsidenssitajuus syn-

nyttää ensimmäisen havaittavan piikin kuvan 3 kuvaajassa. Toinen piikki aiheutuu junan pyörien ja sepelin välisestä resonanssista, joka syntyy junan pyörarakenteiden ja raiteiden jäykkyyden välisestä resonanssista. Kolmas piikki aiheutuu todennäköisesti junan akseleista. Jos junan nopeus kasvaa 80 km/h:iin, kasvaa ratapölkkyjen ylitystajuus ja on mahdollista, että tämä ominaistajuus kohtaa pyörän ja sepelin välisen resonanssitajuuden, joka edelleen johtaa kohonneisiin värähtelytasoihin kyseisellä taajuudella.

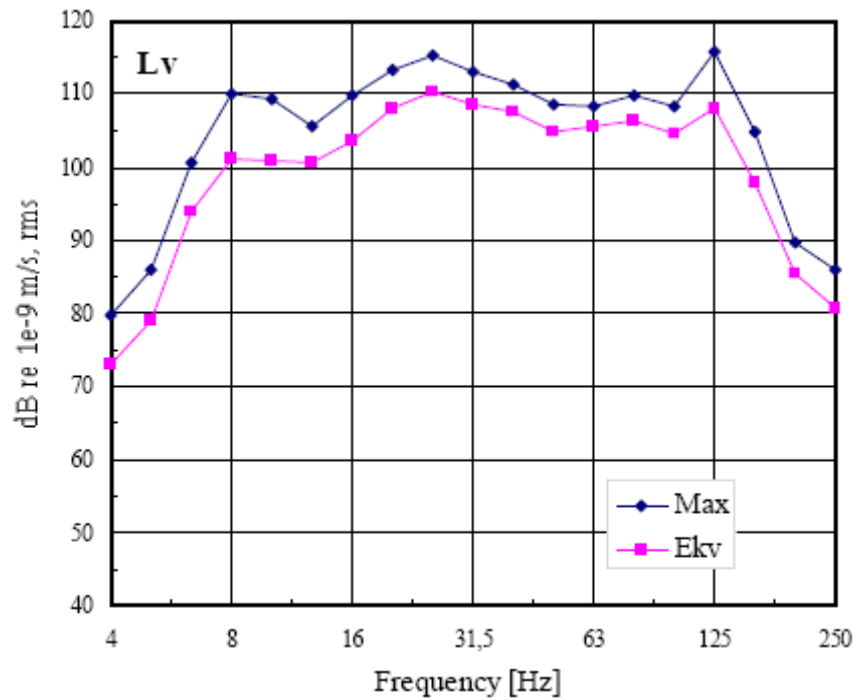
Kuvassa 4 on esitetty maaperän värähtelyn taso kymmenelle junan ohitukselle mittauspaikassa 1. Mittausetäisyys oli noin 7 metriä. Junien aiheuttamat värähtelytaso voivat vaihdella jopa 10 dB, riippuen esimerkiksi ohittavan junan akselimassasta, eri ominaistajuuksista ja pyörien sekä radan kunnosta. Kuvan 4 ohiajot on summattu kuvassa 5. Kuvassa 5 on esitetty värähtelyiden ekvivalentti (keskiarvo) ja maksimitasot mittauspaikalla 1. Kuvissa 6 ja 7 on samat tiedot esitetty mittauspaikalle 2.



Kuva 3. Maaperän värähtelyn nopeus (mm/s, rms) junan ohituksen aikana. (Tavarajuna, 20 km/h, mittausetäisyys 7 m).

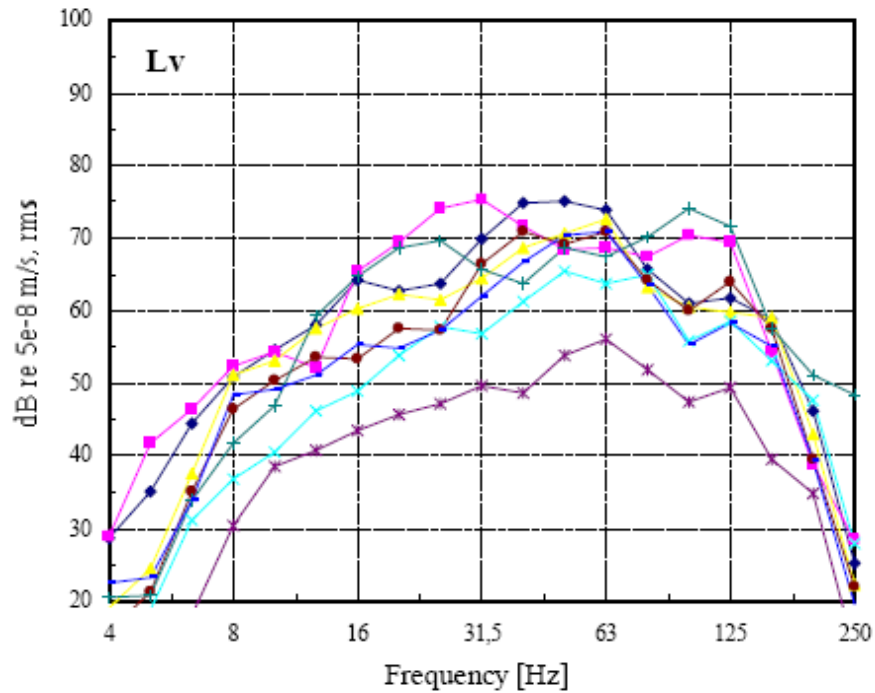


Kuva 4. Junien ohitusten aiheuttamat värähtelytasot mittauspaikassa 1 (MP1 kuvassa 1). Mittausetäisyys 7 m.

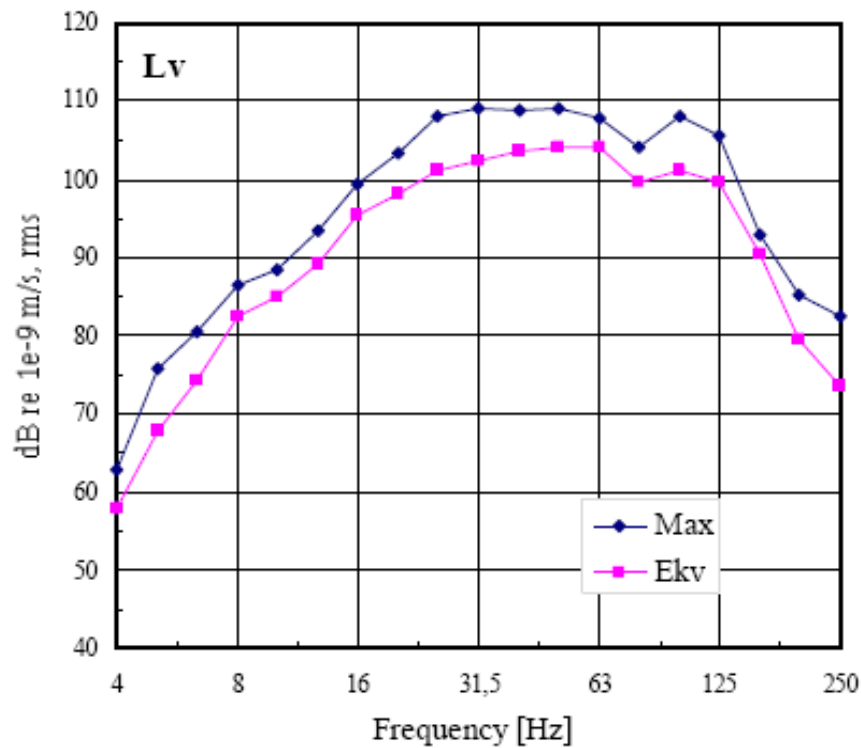


Kuva 5. Junien ohitusten aiheuttamat värähtelyn ekvivalentti (keskiarvo)- ja maksimitasot mittauspaikassa 1 (MP1 kuvassa 1). Mittausetäisyys 7 m.

m.



Kuva 6. Junien ohitusten aiheuttamat värähtelytasot mittauspaikassa 2 (MP2 kuvassa 1). Mittausetäisyys 7-11 m.



Kuva Junien ohitusten aiheuttamat värähtelyn ekvivalentti (keskiarvo)- ja maksimitasot mittauspaikassa 2 (MP2 kuvassa 1). Mittausetäisyys 7-11 m.

Värähtelyn vaimeneminen maaperässä

Värähtelyn amplitudi pienenee etäisyyden kasvaessa värähtelyn lähteestä. Vaimeneminen riippuu värähtelyn taajuudesta sekä maaperän ominaisuuksista. Värähtelyt vaimenevat nopeammin pehmeissä maaperissä kuin esimerkiksi kalliassa. Yleensä, vaimeneminen on noin 10 dB, kun etäisyys kaksinkertaistuu.

Suunnittelukohteessa rakennukset tullaan rakentamaan käytännössä radan päälle kannen pilareiden sijoituessa raiteiden läheisyyteen. Tämän vuoksi arvioinnissa ei ole otettu huomioon etäisyyden aiheuttamaa värähtelyn vaimentumista. Värähtelytasojen arvioinnissa on otettu lisäksi huomioon varmuusmarginaali.

Värähtelyiden kytkeytyminen ja vaimeneminen maaperän ja rakennuksen välisessä rajapinnassa

Värähtelyt etenevät maaperästä rakennuksen perustuksiin. Samanlaisesti värähtelyn amplitudit voivat kasvaa tai vaimentua riippuen maaperän ominaisuuksista, rakennuksen perustuksista ja näiden kytkeytymisestä. Perusajatuksena on, että kivi ja kallio välittävät runkomelua aiheuttavia värähtelyitä tehokkaammin rakennuksen perustuksiin kuin pehmeä maaperä. Tässä tapauksessa teemme oletuksen suuresta paaluille perustetusta rakennuksesta pehmeällä maaperällä. Matalilla taajuuksilla (alle 20 Hz) vaimeneminen on noin 5 dB ja korkeammilla taajuuksilla 10 dB.

Runkoäänivärähtelyn eteneminen rakennuksessa

Värähtelyt vaimenevat arviolta noin 1-2 dB per kerros niiden edetessä rakennuksessa kerroksia ylöspäin. Esimerkkitalanteessa tarkastelemme huonetilaa rakennuksen alimmassa kerroksessa, joten tätä vaimennusta ei tarkastelussa ole otettu huomioon.

Vastaanotin – Värähtelyn vapautuminen huonepinnoista ja ilma-äänien syntyminen

Huonetilassa ääni säteilee ensisijaisesti lattioista (ja katosta). Säteilyn tehokkuus riippuu säteilevien pintojen ja niissä käytettävien materiaalien ominaisuuksista. Yksinkertaisuuden (ja varmuuden) vuoksi esimerkiksi oletuksemme on betoninen lattia ilman pintamateriaalia. Säteilytehokkuus on 1,0 suurimmilta osin tarkasteltavaa taajuusaluetta eli lattiapinnan ei ole oletettu vaimentavan värähtelyä.

Syntyvä äänenpainetaso riippuu myös huonetilassa olevasta absorptiosta, eli ääntä vaimentavista pinnoista. Esimerkkitalauksessa teemme oletuksen, että huonetilan absorptio vastaa jälkikäiunta-ajan arvoa $T = 0,5$ s.

Syntyvät äänenpainetasot

Syntyvät äänenpainetasot on laskettu edellä mainituin oletuksin. Tuoksissa ei ole huomioitu minkäänlaisia meluntorjuntatoimenpiteitä. Taulukossa 1 on esitetty arvioidut äänenpainetasot rakennuksissa mittauspaikkojen 1 ja 2 läheisyydessä.

Taulukko 1: Laskennallisesti arvioidut äänenpainetasot huonetiloissa mittauspaikkojen 1 ja 2 läheisyydessä ilman meluntorjuntatoimenpiteitä.

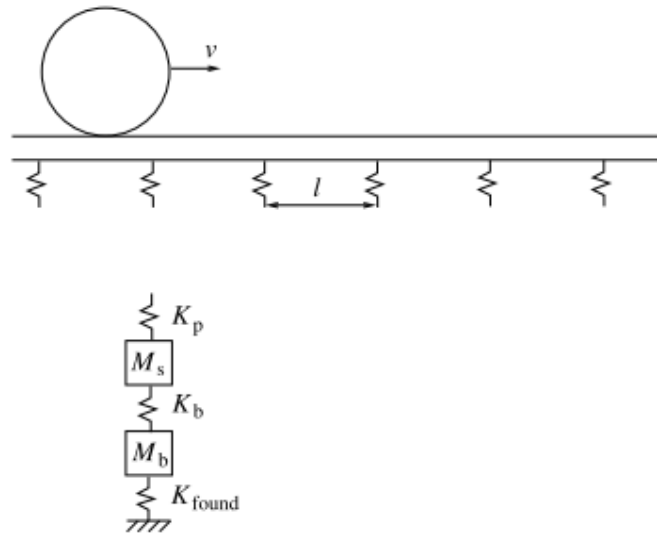
Mittauspaikka	dB(A)
#1	57
#2	51

Laskennallisesti arvioidut runkomelutasot rakennuksen sisällä olivat noin 51–57 dB, jos meluntorjuntatoimenpiteitä ei toteuteta. Tähän projektiin soveltuva ohjearvo ekvivalenttiäänepainetasolle on 25 dB(A). Näin ollen meluntorjuntatoimenpiteitä tarvitaan, jotta tämä ohjearvo on mahdollista saavuttaa.

Meluntorjuntatoimenpiteet lähteessä

Runkomelun tasoa on mahdollista pienentää tekemällä muutoksia radan ja raiteiden ominaisuuksissa ja rakenteissa. Radan rakenne ja ko. ominaisuudet on esitetty kuvassa 8. Seuraavilla toimenpiteillä on yleensä mahdollista pienentää runkomelun tasoa rakennuksissa:

- Ratapölkkyjen välimatkan l lyhentäminen
- Raiteen taivutusjäykkyyden kasvatus
- Raiteen ja pölkyn välissä olevien kiinnikkeiden jäykkyyden K_p vähentäminen
- Radanalusmaton asentaminen sepelin alle (K_{found}).
- Yleisesti radan parannettu kunto



Kuva 8: malli, joka kuvaa maaperän värähtelyiden syntymistä junan ohiajon aikana.

Eräs yleinen toimenpide runkomelun vähentämiseksi huoneistoissa on runkomelumaton asentaminen ratarakenteisiin. Tätä vaihtoehtoa on tarkasteltu myös laskentamallilla. Tarkastelun tulokset on esitetty taulukossa 2.



Kuva 9. Ratarakenteisiin asennettu runkomelumatto (esitettyinä sinisellä värillä).

Taulukko 2: Arvioidut äänenpainetasot rakennuksessa, kun ratarakenteissa on käytetty runkomelun vaimennusmattoa.

Mittauspaikka	dB(A)
#1	32
#2	26

Laskentatulokset osoittavat, että runkomelun aiheuttamia äänenpainetasoja rakennuksessa voidaan vaimentaa noin 26–32 dB:iin, lähelle esitettyä ohjearvoa 25 dB. Runkomelun tasoa voidaan yhä pienentää suorittamalla useampia eri meluntorjuntatoimenpiteitä tai kasvattamalla runkomelumaton paksuutta. Runkomelun vaimennusten tarkempi suunnittelu tulee tehdä simulointimallilla rakennussuunniteluvaiheessa.

5 Rakentamisen aikainen runkomelu

Kannen rakentamisesta syntyy runkomelua, kun kantta kannattelevat paalut tai ponttiseinän levyt lyödään maaperään. Laskennallisen arvi-
on lähtökohtana on käytetty paalutuskoneen vasaran massaa (noin 30–50 kg) ja taajuutta (noin 40 Hz). Muut ominaisuudet ja muuttujat ovat samat kuin raideliikenteen aiheuttaman runkomelun tapauksessa. Rakentamisen aikainen runkomelu läheisissä rakennuksissa on esitetty taulukossa 3, jossa runkomelutaso on suhteutettu rakennuksen etäisyyteen.

Taulukko 3. Rakentamisen aikainen runkomelutaso rakennuksessa.

Etäisyys rakennukseen	10 m	20 m	50 m	100 m
Lp, dB(A), rakennuksen sisällä	46	41	34	30

Porauksen ja paalutuksen aiheuttamat värähtely- ja melutasot ovat todennäköisesti matalammat kuin mitä laskennassa on käytetty, jolloin laskennan muodostavat tulokset antavat arvion ylärajan.

6 Johtopäätökset

Alustavien laskennallisten arviointien perusteella junaliikenteen aiheuttama värähtely saattaa aiheuttaa vaimentamattomana suunniteltujen rakennusten alimmissa kerroksissa yli 50 dB tasoista melua. Värähtely vaimenee ylempiin kerroksiin 1-2 dB / kerros, jolloin värähtelyn synnyttämä melu on häiritsevää myös ylemmissä kerroksissa.

Hankkeen jatkosuunnittelussa tulee kiinnittää huomiota runkomelun syntymiseen ja pyrkiä vaimentamaan junaliikenteen aiheuttama värähtely siten, että runkomelutasot alimmissa kerroksissa jäävät alle 25 dB tason. Vaimennus voidaan kohdistaa raiteiden alapuolisiin rakenteisiin tai rakennusten perustuksiin tai kannen pilareihin. Tekniset vaimennusratkaisut tarkentuvat varsinaisen rakennussuunnittelun edetessä pidemmälle.

Rakentamisen aikana paalujen ja ponttiseinien paalutus aiheuttaa lähimpien rakennusten etäisyydellä (20 – 50 m) todennäköisesti runkomelua, joka voi kuulua sisälle 35 – 40 dB tasoisena. Paalutuksen aiheuttamat ilmaäänät kuuluvat todennäköisesti kuitenkin voimakkaampina kuin runkoäänät.

Helsinki 26.10.2010

WSP Finland Oy

Ilkka Niskanen

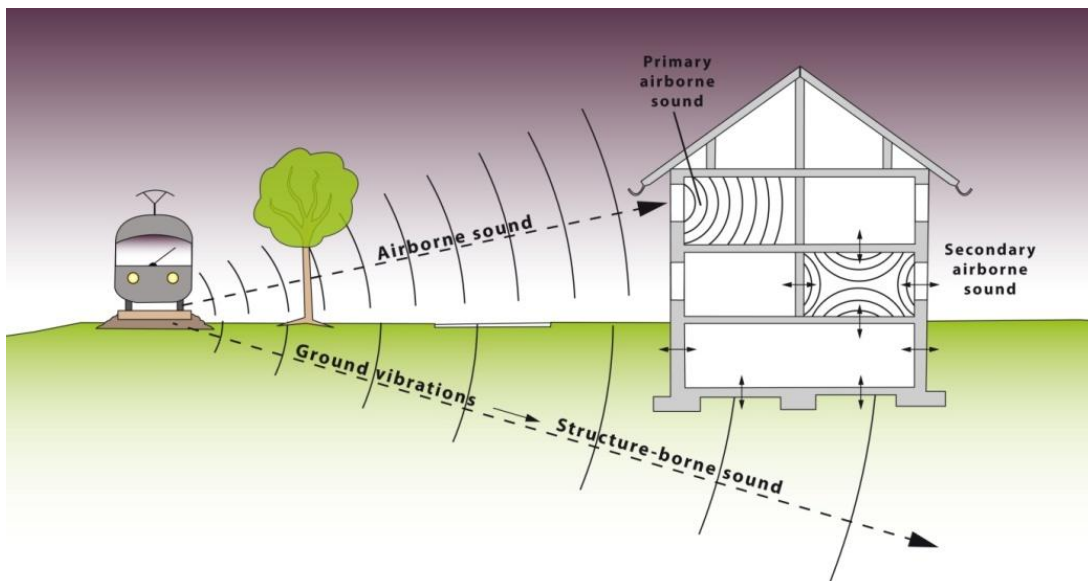
Tuukka Lyly

Tampereen keskusareena ja kansi.

Runkomeluselvityksen täydennys

Johdanto

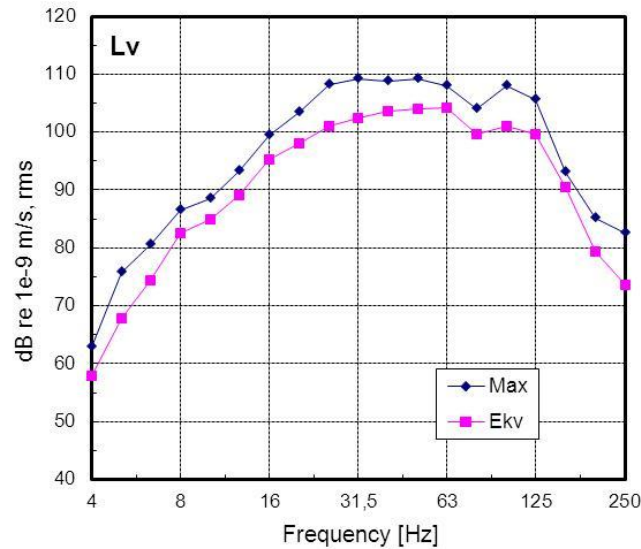
On yleisesti tiedossa, että raiteilla liikkuvan junan nopeuden kasvaessa, myös junan aiheuttama melu ja värinä saavat korkeampia arvoja. Tässä raportissa tarkastelemme rakennuksen sisällä esiintyvän juna-liikenteen aiheuttaman runkomelun tason kasvua, kun ohiajavan junaliikenteen nopeus kasvaa 30 km/h:sta 80 km/h:iin.



Kuva 1. Maaperän värähtelyn ja raideliikenteen aiheuttaman runkomelun synty radan läheisyydessä.

Mittaukset

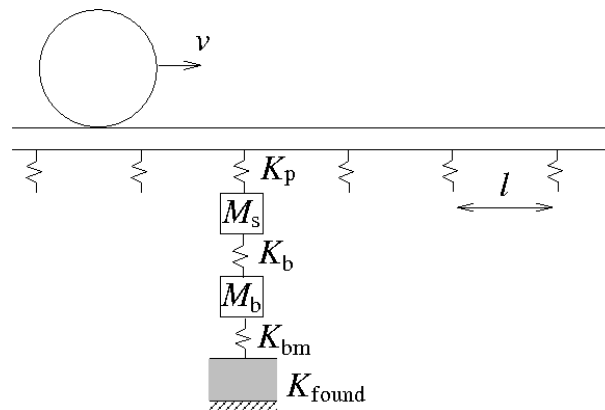
Tampereella on tehty syksyn 2010 aikana maaperän värähtelymittauksia, joista mittauslinjan numero 2 tulokset on esitetty kuvassa 2. Mikäli minkäänlaisiin meluntorjuntatoimenpiteisiin ei alueella ryhdytä, on läheisissä rakennuksissa syntyvän runkomelun äänenpainetaso odotusarvoisesti jopa 50 dB. Meluntorjuntaan on syytä kiinnittää huomiota, sillä näiden tasojen ei tulisi ylittää kaavamääräyksissä annettuja tasoja 30 dB (asuinhuoneistoille ja majoitustiloille) ja 40 dB (toimisto- ja liiketiloille).



Kuva 2. Maaperän värähtelyn ekvivalentti- (keskiarvo) ja maksimitasot junan ohiajon aikana mittauslinjalla 2.

Laskentamalli

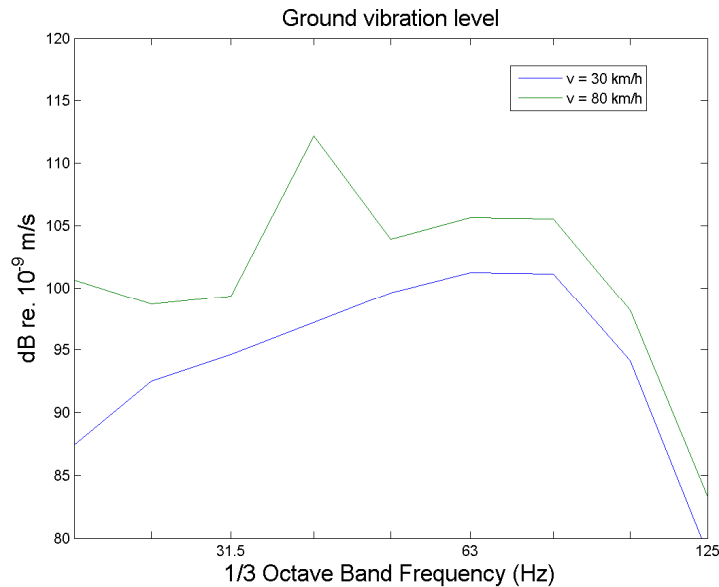
Junaratojen läheisyydessä ilmenevien runkomelutasojen arviointiin on olemassa eri mallinnus- ja arviointikeinoja. Kuvassa 3, sekä viitteissä 1-10 on esitetty tarkempia tietoja runkomelutasojen mallinnuksesta. Runkomelutasojen arviointiin tarvitaan lukuisia eri parametreja, jotka kukin osaltaan vaikuttavat lopulta runkomelun tasoon rakennuksen sisällä. Tutkitulla rataosuudella monet tarvittavista parametreista ei ole tiedossa (Tampere, mittauslinja 2), koska niiden määrittämiseksi tulisi tehdä lisämittauksia ja -selvityksiä. Tällaisia parametreja ovat mm. maaperään ja itse rataan liittyvät parametrit. Tässä tapauksessa voidaan kuitenkin turvautua kirjallisuudesta löydettyihin yleisiin parametreihin maaperälle ja radalle.



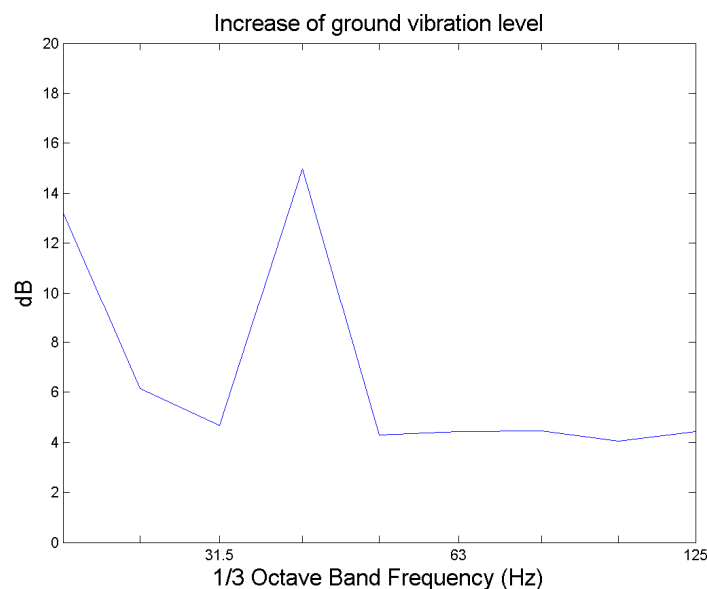
Kuva 3. Kaaviokuva, joka esittää raiteilla etenevän junan synnyttämän värähtelyn ja runkomelun syntymistä arviointimallissa.

Tulokset

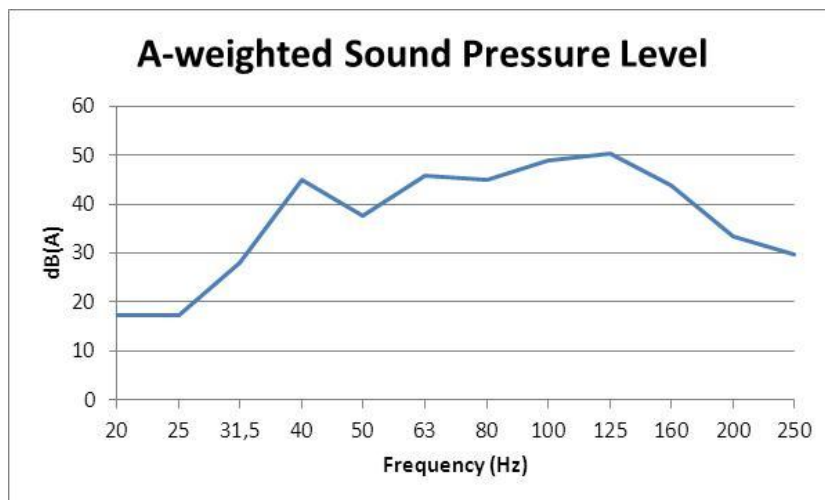
Laskentamallia on käytetty maaperän värähtelytasojen määrittämiseen kahdelle eri junan nopeudelle, 30 km/h ja 80 km/h (Kuva 4). Kuvassa 4 esitettyjen kahden käyrän merkittävin ero on melu- ja värähtelytasojen kohoaminen junan nopeuden kasvaessa (Kuva 5). Jos oletamme, että tutkittu rakennus sijaitsee hyvin lähellä mittauslinjaa 2, eikä minkäänlaisiin meluntorjuntatoimenpiteisiin ole turvauduttu, voi runkomelun äänenpainetaso nousta rakennuksen sisällä jopa 55 dB(A):iin junan ohiajon aikana, kun junan nopeus on 80 km/h (Kuva 6).



Kuva 4. Lasketut maaperän värähtelyn nopeuden arvot kahdelle eri junan nopeudelle (30km/h ja 80 km/h).



Kuva 5. Maaperän värähtelyn arvioitu kasvu junan nopeuden kasvaessa 30 km/h:sta 80 km/h:iin.



Kuva 6. Äänenpainetaso laskennallinen taso rakennuksessa lähellä mittauslinjaa 2 ilman meluntorjuntatoimenpiteitä, kun junan nopeus on 80 km/h. A-painotettu äänenpainetaso = 55 dB(A)

Johtopäätökset

Vaikkakaan arviointimallia ei tässä tapauksessa ole kalibroitu, ovat maaperän värähtelyn mitatut ja lasketut arvot yhtenäiset junan nopeudelle 30 km/h (vertaa kuvat 2 ja 4). Junan nopeuden kasvaessa 80 km/h:iin maaperän värähtelyn taso nousee keskimäärin 4 dB (Kuvat 4 ja 5). Poikkeuksen muodostaa 40 Hz taajuus, jolla tason nousu on jopa 15 dB. Syy tähän on se, että ratapölkyn ylityksessä syntyy ominaistaajuus on koinsidenssissä pyörän ja sepelin välisen resonanssitaajuuden kanssa. Ratapölkyn ylitystaajuus kuvaa taajuutta, jolla junan pyörä ylittää ratapölkyn. Mitä suurempi on junan nopeus, tai mitä lyhyempi on ratapölkkyjen välinen etäisyys, sitä korkeampi tämä ominaistaajuus on.

Kuvassa 6 on esitetty äänenpainetaso laskennallinen arvio läheisessä rakennuksessa. Äänenpainetaso on kohonnut arvosta 51 dB(A) (30km/h) arvoon 55 dB(A) (80 km/h). Kuvassa havaitaan piikki 40 Hz kohdalla, joka aiheutuu ratapölkyn ylityksessä syntyvästä ominaistaajuudesta.

Laskennallisen arvioinnin perusteella junaliikenteen aiheuttamat runkomelutasot kannella sijaitsevilla rakennuksissa ja keskusareenalla voivat nousta häiritsevän korkeiksi, mikäli runkomelua aiheuttavaa värähtelyä ei vaimenneta. Melu- ja värähtelytasojen pienentämiseksi on ryhdyttävä vaimennustoimenpiteisiin, jotta kaavamääräysten mukaiset tasot voidaan saavuttaa.

Maaperän värähtelyn tason pienentämiseksi on mahdollista muuttaa joitakin parametreja radan rakenteessa. Seuraavilla muutoksilla on yleisesti vaikutus myös runkomelutasojen pienemiseen rakennuksen sisällä.

- Ratapölkkyjen välisen etäisyyden l pienentäminen tai jatkuva tuki radassa.
- Kiskon taivutusjäykkyyden ja massan kasvatus.
- Ratakiinnikkeiden (rail pad) jäykkyyden K_p pienentäminen kiskon ja ratapölkyn välissä.
- Vaimennusmaton asentaminen sepelin alapuolelle (K_{bm}).
- Yleisesti, radan kunnon parantaminen ja huolellinen radan ylläpito.

Viitteet

1. Anders Nordborg. Rail receptance. In *14th International Congress on Acoustics - Beijing*, volume 2, September 1992.
2. Anders Nordborg. Vertikale Schwingungen einer Schiene beim Abrollen eines Rades. In *DAGA 94 - Dresden*, volume B, March 1994.
3. Anders Nordborg. *Vertical Rail Vibrations: Noise and Structure-Borne Sound Generation*. PhD thesis, Kungl Tekniska Högskolan, Stockholm, 1995.
4. Anders Nordborg. Parametererregung beim Rad-Schiene-System mit Gleislageunregelmäßigkeiten. In *DAGA 97 - Kiel*, pages 422–423, March 1997.
5. Anders Nordborg. Parametric excitations of a wheel rolling on a corrugated, sleeper-supported track. In *INTER-NOISE 97 - Budapest*, volume II, pages 119–122, August 1997.
6. Anders Nordborg. Parametererregung beim Rad-Schiene-System: Laborversuche an einer Einschienenrollbahn. In *DAGA 98 - Zürich*, March 1998.
7. Anders Nordborg. Parametrically Excited Rail/Wheel Vibrations due to Track-Support Irregularities. *ACUSTICA □ acta acustica*, 84(5): 854–859, 1998.
8. Anders Nordborg. Vertical Rail Vibrations: Parametric Excitation. *ACUSTICA □ acta acustica*, 84(2): 289–300, 1998.
9. Anders Nordborg. Vertical Rail Vibrations: Pointforce Excitation. *ACUSTICA □ acta acustica*, 84(2): 280–288, 1998.
10. Anders Nordborg. Rail/Wheel Parametric Excitation: Laboratory and Field Measurements. *ACUSTICA □ acta acustica*, 85(3): 355–365, 1999.