

# NUMEERISEEN LASKENTAMALLIIN PERUSTUVA RAIDELIIKENTEEN RUNKOMELUN ARVIOINTIMENETELMÄ

**Benjamin Oksanen, Jesse Lietzén, Timo Huhtala, Mikko Kylliäinen**

A-Insinöörit  
Akustiikkasuunnittelu  
Puutarhakatu 10  
33210 Tampere  
etunimi.sukunimi@ains.fi

## Tiivistelmä

Tutkimushankkeessa kehitettiin numeeriseen laskentamalliin perustuva raideliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointimenetelmä. Menetelmässä yhdistetään rakennuspaikalla tehtävät raideliikenteen värähtelymittaukset ja rakennuksesta luotavalla elementtimenetelmää (FEM) hyödyntävällä laskentamallilla lasketut värähtelyn siirtofunktiot. Tutkimuskohteena toimi tavanomainen viisikerroksinen betonielementtirakenteinen asuinkerrostalo, joka sijaitsi noin 100 m etäisyydellä junaradasta. Rakennuksesta ja ympäröivästä maaperästä luotiin rakenne- ja arkkitehtipiirustusten sekä pohjatutkimusten perusteella 3D-malli. Tutkimuskohteessa mitattiin raideliikenteen aiheuttama värähtelyä maaperässä ja rakennuksen kaikissa kerroksissa kantavista rakenteista sekä asuinhuoneen välipohjan keskeltä. Mittaustuloksilla validoitiin tutkimuskohteesta luotua laskentamallia sekä vertailtiin mittaustuloksia, yleisesti käytettyä runkomelun arviointimenetelmää ja laskentamalliin perustuvaa arviointimenetelmää. Tutkimuskohteesta saatujen tulosten perusteella numeeriseen laskentamalliin perustuvalla arviointimenetelmällä runkomelun arviointia voidaan tehdä yleisesti käytössä olevia menetelmiä tarkemmin rakennuksen eri osissa. Haasteina laskentamalleissa on materiaaliparametrien ja mallin vaatimien yksinkertaistuksien aiheuttama epävarmuus sekä ratkaisun vaatima laskentateho. Tutkimuksen tulosten perusteella laskentamallit soveltuvat raideliikenteen värähtelyn mallintamiseen myös suunnittelukäytössä.

## 1 JOHDANTO

Raideliikenteen aiheuttamat värähtelyilmiöt, värähtely ja runkomelu, vaativat yhä useammin tarkastelua rakennushankkeissa kaupungistumisen ja uusien raideliikenneyhteyksien myötä. Suomessa yleisesti käytettävä runkomelun arviointimenetelmä [1] ei kaikissa tilanteissa tarjoa riittävän yksityiskohtaisia työkaluja runkomelutasojen arviointiin rakennushankkeissa. Arviointimenetelmässä kentällä mitatuista raideliikenteen värähtelytasoisista luodaan runkomeluarvio rakennuksen eri kerroksissa käyttäen yksilukuarvoisia korjauskertoimia. Korjauskertoimilla ei voida kuitenkaan tarpeeksi tarkasti ottaa huomioon



© 2021 Benjamin Oksanen, Jesse Lietzén, Timo Huhtala ja Mikko Kylliäinen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisiteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

erilaisten runkoratkaisujen tai muiden rakennuksen ominaisuuksien vaikutusta arvioitiin runkomelutasoihin.

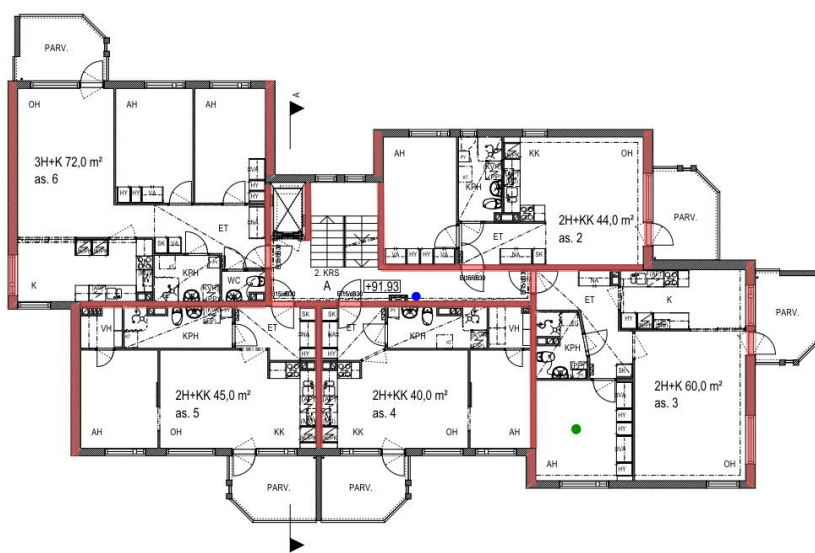
Erilaisilla numeerisilla laskentamenetelmillä voidaan mallintaa rakennuksen värähtelyä yksityiskohtaisesti [2]. Erityisesti elementtimenetelmä (FEM, *finite element method*) soveltuu hyvin rakennusrungossa etenevän värähtelyn mallintamiseen.

A-Insinöörien akustiikkasuunnitteluyksikössä kehitettiin numeeriseen laskentamalliin perustuva raideliikenteen runkomelun arviointimenetelmä. Tutkimushankkeessa [3] mallinnettiin sekä mitattiin raideliikenteen aiheuttamaa värähtelyä tutkimuskohteena toimineessa asuinkerrostalossa.

## 2 TUTKIMUSKOHDE

Tutkimuskohteena toimi viisikerroksinen asuinkerrostalo Tampereen Jankassa. Rakennus on rakenteiltaan tyypillinen betonielementtirakennus, jonka välipohjat ovat ontelolaattoja ja ulkoseinät betonisandwich-elementtejä. Vuonna 1991 valmistunut rakennus sijaitsee noin 100 metrin etäisyydellä Tampere–Jyväskylä-radasta.

Tutkimuskohteessa mitattiin kolmiakselisesti raideliikenteen aiheuttamaa värähtelyä maaperässä, rakennuksen kantavissa rakenteissa kaikissa kerroksissa sekä välipohjasta asuinhuoneen keskeltä. Rakennuksen pohjapiirros on esitetty Kuva 1. Pohjapiirroksen on merkitty kantavat seinärakenteet punaisella värillä sekä mittauspisteet kantavassa runkossa sinisellä, asuinhuoneen keskellä välipohjassa vihreällä sekä maaperässä punaisella pisteellä. Junarata sijaitsee kuvassa oikealla puolella olevasta julkisivusta noin 100 metrin etäisyydellä julkisivun suuntaisesti.



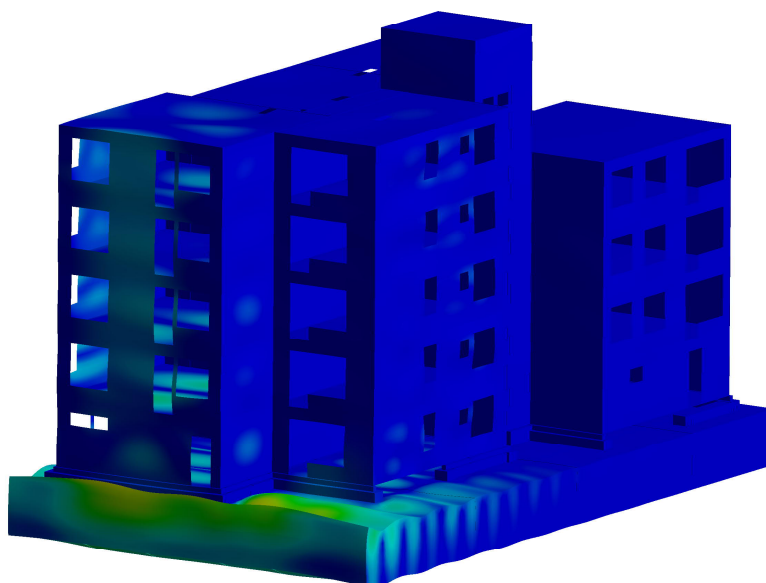
**Kuva 1** Tutkimuskohteena toimineen rakennuksen pohjapiirros. Kantavat seinät on esitetty punaisella värillä. Mittauspisteet maaperässä on esitetty punaisella, kantavissa rakenteissa sinisellä ja välipohjassa vihreällä pisteellä.

Tutkimuskohde oli mittausten aikaan normaalissa asuinkäytössä, josta johtuvien häiriöiden vuoksi mittausten otanta oli rajallinen. Lisäksi asuinhuoneesta äänitasomittarilla mitattuja runkomelutasoja ei voitu erotella luotettavasti taustamelusta. Näin ollen mittaus- ja

mallinnustuloksia tarkasteltiin vain värähtelytasoina. Tuloksia tarkasteltiin terssikaistojen 16–100 Hz taajuusalueella, jolla oli kohteesta mitattujen värähtelytasojen merkitsevä taajuussisältö.

### 3 LASKENTAMALLI

Tutkimuskohteesta luotiin arkkitehti- ja rakennuspiirustusten perusteella kolmiulotteinen geometriamalli. Värähtelyn etenemistä maaperästä rakennukseen ja rakennuksen sisällä simuloitiin elementtimenetelmää hyödyntäen Ansys-simulointiohjelmistossa. Kuva 2 on esitetty visualisointi värähtelystä laskentamallissa eräällä taajuudella.



**Kuva 2 Visualisoitu värähtely eräällä taajuudella laskentamallissa.**

Laskentamallilla laskettiin värähtelyn siirtofunktioita maaperästä rakennuksen eri osiin. Värähtelyn siirtofunktiot laskettiin taajuustasossa rakennuksen harmonisista värähtelyvasteista. Siirtofunktioiden avulla laskentamallin tulokset voidaan yhdistää maaperästä mitattuihin värähtelytasoihin runkomelun arviointia varten.

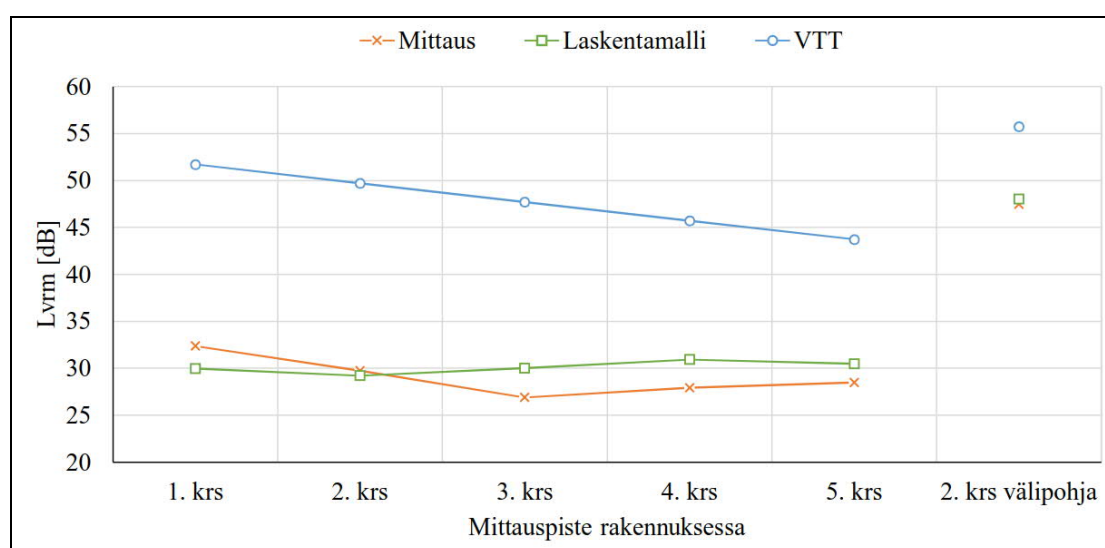
### 4 LASKENTAMALLIIN PERUSTUVA ARVIOINTIMENETELMÄ

Numeeriseen laskentamalliin perustuvassa arviointimenetelmässä yhdistyy suunnittelu-kohteen rakennuspaikalla tehtävät raideliikenteen värähtelymittaukset ja kohteesta luotu 3D-laskentamalli. Kenttämittausten avulla voidaan luotettavasti määrittää kohteeseen kohdistuvat värähtelytasot ja raideliikenteen aiheuttaman runkomelun tilastollinen tunnusluku  $L_{\text{prm}}$ . Laskentamallilla määritetään värähtelyn siirtofunktiot terssikaistoittain maaperästä rakennuksen eri tiloihin. Huonetilan rakenteiden värähtelyn muuttumista ilmäänenä kuultavaksi runkomeluksi voidaan arvioida yksilukuarvoisilla kertoimilla [4] tai muilla, esimerkiksi numeerisilla laskentamenetelmillä [5].

Runkomeluarviot eri huonetiloissa muodostetaan maaperästä mitattujen värähtelytasojen, laskentamallilla laskettujen siirtofunktioiden sekä rakenteiden värähtelyn muuntumista ilmaääneksi kuvaavien muuntokertoimien summana. Runkomeluarvio tehdään terssikaistoittain mittaustulosten määrittämällä taajuusalueella. Huonetiloihin arvioidut runkomelutasot muodostetaan terssikaistojen summana.

## 5 TULOKSET

Tutkimuskohteesta mitattuja värähtelytasoja, VTT:n ohjeen mukaista empiiristä arviointimenetelmää sekä numeeriseen laskentamalliin perustuvaa arviointimenetelmää verrattiin. Molemmilla arviointimenetelmillä arvioitiin värähtelytasoja mittauspisteitä vastaavissa kohdissa rakennusta maaperästä mitattujen värähtelytasojen perusteella. Kuva 3 on esitetty vertailun tulokset pystysuuntaisen värähtelyn osalta. Mittauspiste 2. kerroksen välipohjassa on verrannollinen runkomeluarvioon kyseisessä huonetilassa.



Kuva 3 Pystysuuntainen värähtely eri mittauspisteissä

Tuloksista havaitaan, että VTT:n esiselvityksen mukainen empiirinen arviointimenetelmä tuottaa sekä mittaukseen että numeeriseen laskentamalliin verrattuna yliarvion erityisesti kantavien rakenteiden mittauspisteissä. Yksi selittävä tekijä yliarviolle on mittauspisteiden sijainti rakennuksen keskellä eikä rataa lähimmällä julkisivulla. Arviointimenetelmässä ei oteta huomioon värähtelyn vaimenemista sen edetessä rakennuksessa sivuttaisuunnissa.

Numeeriseen laskentamalliin perustuvalla menetelmällä pystyttiin puolestaan arvioimaan hyvin tarkasti värähtelytaso rakennuksessa. Erityisesti välipohjassa sijainneen mittauspisteen osalta laskentamallin arvio ja mittaustulos erosivat vain 0,5 dB. Muiden kerrosten mittauspisteiden osalta erot laskentamallin ja mittauksen välillä ovat muutamia desibelejä.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimushankkeen tavoitteena oli tutkia ja kehittää runkomelun arviointiin menetelmä, jolla voidaan tehdä nykyisin käytössä olevia menetelmiä yksityiskohtaisempia ja tarkempi runkomeluarvioita rakennushankkeissa. Lisäksi tavoitteena oli selvittää, onko numee-

risten menetelmien hyödyntäminen akustiikkasuunnittelun työkaluna rakennushankkeissa käytettävissä olevien resurssien puitteissa mahdollista.

Tulosten perusteella tutkimushankkeessa kehitetty numeeriseen laskentamalliin perustuva arviointimenetelmä soveltuu käytettäväksi rakennushankkeissa, kun halutaan selvittää tarkemmin suunnittelun rakennuksen värähtelyominaisuuksia. Nykyaikaisilla tietokoneilla isojenkaan laskentamallien ratkaiseminen ei vie kohtuuttomasti aikaa.

Tulosten perusteella numeeriseen laskentamalliin perustuvalla arviointimenetelmällä runkomelun arviointia voidaan tehdä yleisesti käytössä olevia menetelmiä tarkemmin rakennuksen eri osissa. Numeerisissa laskentamalleissa käytettyjen materiaaliominaisuuksien, malliin tehtävien yksinkertaistuksien ja muiden lähtötietojen epävarmuuksien vaikutus laskennan epävarmuuteen voi olla suuri. Merkittävimpien materiaaliominaisuuksien osalta on hyödyllistä tehdä herkkyyksianalyysia, jonka avulla voidaan määrittää mallinnuksen epävarmuutta.

## VIITTEET

- [1] Talja A. ja Saarinen A., Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi. Esiselvitys. VTT Tiedotteita 2468, Espoo, 2009
- [2] Thompson D.J., Kouroussis G. ja Ntotsios E., Modelling, simulation and evaluation of ground vibration caused by rail vehicles. *Vehicle System Dynamics* 57, 2019, s. 936–983
- [3] Oksanen B., Raideliikenteen aiheuttaman runkomelun mallintaminen rakennuksessa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu. Espoo, 2021
- [4] Villot M., Jean P., Grau L. ja Bailhache S. Predicting railway-induced ground-borne noise from the vibration of radiating building elements using power-based building acoustics theory. *International Journal of Rail Transportation*, 6, 1, 2018, s. 38-54
- [5] Colaço A., Alves Costa P., Amado-Mendes P. ja Godinho L., Predictions of vibrations and reradiated noise due to railway traffic: A comprehensive hybrid model based on a finite element method and method of fundamental solutions approach, *Journal of Vibration and Acoustics*, 139, 10, 2017