

Liikennöivän rautatiekaluston liikennetärinää ja runkomelua aiheuttavien voimien suuruuksien tutkimus

MELUNTORJUNTAPÄIVÄT 22.3.2023

VESA VÄHÄKUOPUS, SITOWISE



SITOWISE

Tutkimuksen tausta ja motivaatio

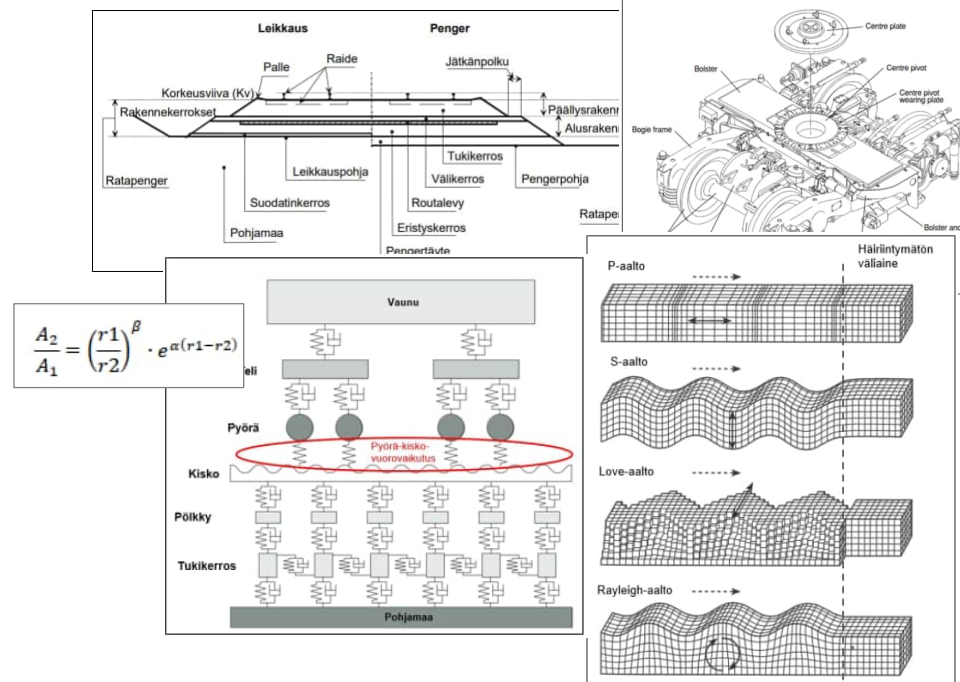
- Suomessa on tällä hetkellä suuri määrä ratahankkeita eri vaiheessa toteutusta. Merkittävimpiä mm. Tampere-Oulu ja Espoo-Turku välit joiden välillä useita osahankkeita.
- Liikennetärinän ja runkomelun hallinta ovat ratahankkeissa saamassa yhä suurempaa huomiota ja tietämystä tarvitaan.
- Tutkimus tehtiin Väyläviraston tilauksesta ja samassa yhteydessä syntyi diplomityö Tampereen Yliopistolle.



Lähde:
<https://vayla.fi/suunnittelu-rakentaminen/hankkeet-kartalla>

Tutkimuksen sisältö

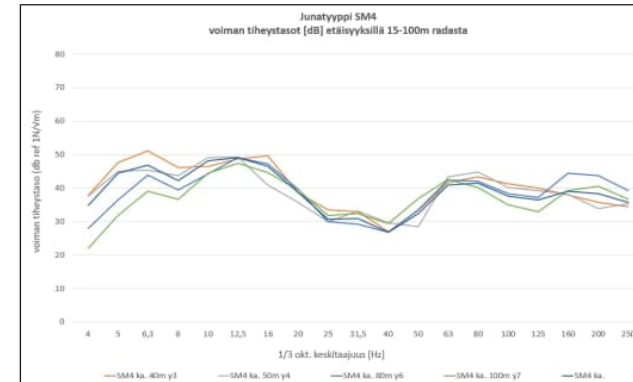
- Perehdyttiin rautatiekalustoon ja ratatekniikkaan.
- Perehdyttiin rautatiekaluston aiheuttamaan maaperän värähtelyyn ja siihen liittyviin ilmiöihin.
- Perehdyttiin värähtelyn ja tärinän arviointimenetelmiin.
- Toteutettiin Federal Transit Administrationin ohjeistuksen mukainen ns. voiman tiheyden määrittäminen.
- Esitettiin johtopäätökset, epävarmuudet ja kehityskohteet.



$$A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot R(f)$$

$$v_G = v_0 \cdot \left(\frac{D_0}{D}\right)^B \cdot \left(\frac{S}{S_0}\right)^A \cdot \frac{G}{G_0} \cdot k_r \cdot F$$

$$FDL = L_v - LSTM$$



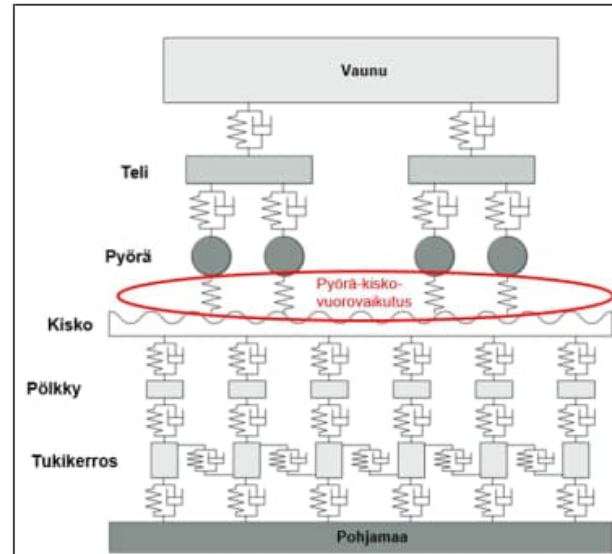
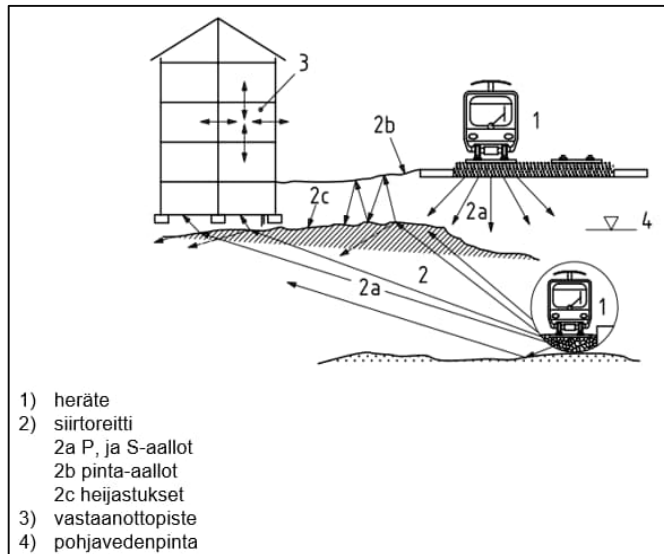
Värähtelyn ja tärinän arviointimallien perusta

- ISO-14837 mukaan rautatieliikenteen aiheuttamia värähtelyjä arvioitaessa jaetaan värähtelysteemi komponentteihin seuraavasti:

- $A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot R(f)$, missä

Vaste (A), heräte(S), siirtoreitti(P) ja vastaanotin(R)

- Periaatteessa jokainen värähtelyn arviointimalli noudattaa yllä olevaa jakoa.
- Suomessa yleisesti käytössä alun perin Madshusin ja muiden kehittämä laskentamalli.



Taustaa

VTT laskentamalli

Julkaisussa ”Liikennetärinä: Alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius”¹ esitetään kaava:

$$v_G = v_0 \left(\frac{D_0}{D} \right)^B \left(\frac{S}{S_0} \right)^A \frac{G}{G_0} k_R F ,$$

missä v_G on tarkastelupisteen värähtelytaso etäisyydellä D radasta ja v_0 junatyypin aiheuttama aiemmista mittauksista määritetty värähtelyn arvo 15 m etäisyydellä radasta. Termin v_0 yhteydessä käytetään myös nimitystä värähtelyn perusarvo.

Termi $\left(\frac{D_0}{D} \right)^B$ kuvaa värähtelyn vaimenemista maaperässä perustuen kokemuseräiseen tietoon. D_0 on aiemmin mainittujen vertailumittausten 15 m etäisyys radasta ja D tarkasteltavan pisteen etäisyys radasta. Eksponentti B kuvaa vaimentumisen suuruutta. Loput kaavan 20 termit ja niiden muuttujat ovat erilaisia korjaus- ja varmuuskertoimia seuraavasti:

S = junan nopeus, perusarvo $S_0 = 70$ km/h. Nopeuseksponentti A on 0,9-1,1.

G = junan kokonaispaino, perusarvo $G_0 = 2000$ tonnia.

k_R = radan kunnosta riippuva kerroin, keskimäärin 1,0.

F = varmuuskerroin

Laskentamenetelmän käyttää värähtelyn perusarvoa v_0 ”herätteenä”, ensimmäinen termi kuvaa siirtoreittiä sekä värähtelyn vaimenemista siinä ja loput yhtälön muuttujat ovat erilaisia korjauskertoimia.

Suurin eroavaisuus ISO-14837 mukaiseen jakoon on yksilukuarvon käyttäminen taajuuskohtaisten arvojen sijaan.

¹ Talja, A & Törnqvist, J. 2014. Liikennetärinä: Alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius. VTT Technical Research Centre of Finland.

Taustaa

FTA detailed vibration analysis – malli

- Perustuu Saurenmanin ja Nelsonin tutkimuspapereihin 1980-luvulta
- Käytetään 1/3 oktaavikaistoittain esitettyä voiman tiheyttä (*force density*) tai tiheystasoa (*force density level eli FDL*) esittämään värähtelyn lähteen eli herätevoiman ominaisuuksia.
- Tiheys tässä yhteydessä kuvaa junakaluston tuottamaa voimaa per yksikköpituus.
- Käytännössä kyseessä on maaperän mobiliteetin määrittäminen, missä systeemin herätteenä toimii pyörien ja kiskojen yhteisvaikutuksesta syntynyt voima, mobiliteettina on maaperän värähtelynjohtavuus ja vasteena on maaperän värähtelyn taso tarkastelupisteessä.

$$L_v = FD \quad LSTM \leftrightarrow FD = L_v / LSTM$$

tai yleisemmin käytetty logaritmisessa avaruudessa

$$L_v = FDL + LSTM \leftrightarrow FDL = L_v - LSTM$$

- L_v on tietyn kaluston aiheuttama värähtelytaso maaperässä, FDL on junan karakteristinen voiman tiheystaso ja $LSTM$ kuvaa viivamaisella lähteellä (keinoheräte) todettua maaperän värähtelynjohtavuuden tasoa. Kaikki suureet esitetään yleensä logaritmisesti sekä 1/3 oktaavikaistoittain.

Taustaa

Yhteys VTT:n mallin ja FTA menetelmän välillä

ISO-14837 mukainen
jako komponentteihin

$$A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot R(f)$$

$$v_G = v_0 \cdot \left(\frac{D_0}{D}\right)^B \cdot \left(\frac{S}{S_0}\right)^A \cdot \frac{G}{G_0} \cdot k_r \cdot F$$

Törnvqvistin ja muiden malli (alun perin Madshus & muut). Tunnetaan Suomessa VTT:n laskentamallina.

$$L_v = FDL + LSTM$$

Saurenmanin ja Nelsonin malli. Tunnetaan nykyään FTA ohjeistuksessa "detailed vibration analysis" nimellä.



Värähtelyvaste (tärinän tai runkomelun lukuarvo)



Herätevoima tai värähtelyn perusarvo



Siirtoreitin vaikutus

Kumpikin malli kunnioittaa ISO-14837 mukaista komponentteihin jakoa. VTT mallissa värähtelyn perusarvo korvaa herätevoiman ja siirtoreitin vaikutus huomioidaan laskentaparametreilla. FTA menetelmässä siirtoreitin vaikutus mitataan. FDL (herätevoima) määritetään muualla tai hyödynnetään aikaisemmin määritettyä tietoa.

Tutkimuksen sisältö ja toteutus

Voiman tiheystasojen määrittäminen FTA mukaan

$$FDL = L_v - LSTM$$

- FTA:n ohjeen mukaan muodostettiin viivalähdemäiseen herätykseen perustuva maaperän värähtelynjohtavuuden taso, jota kuvataan termillä *LSTM* tai *Line Source Transfer Mobility*.

$$LSTM_{y2} = 10 \log_{10} \left[d \sum_{i=1}^n 10^{\frac{\gamma_{xi}}{10}} \right]$$

- Kaavassa $LSTM_{y2}$ on maaperän värähtelynjohtavuuden taso tarkastelupisteessä $y2$. γ_{xi} on herätteen x_i ja tarkastelupisteeseen $y2$ välinen mobiliteetti keinoherätyksellä määritettynä. n on herätteen määrä ja d herätteen välimatka toisistaan.
- Kun maaperän värähtelynjohtavuus (*LSTM*) on selvitetty, voidaan sitä hyödyntää junakaluston voiman tiheyden määrittämisessä
- Junien aiheuttamien värähtelyvasteiden mittaaminen on triviaali toimenpide.

$$L_v = FDL + LSTM$$

Saurenmanin ja Nelsonin malli.
Tunnetaan nykyään FTA ohjeistuksessa "detailed vibration analysis" nimellä.

Tutkimuksen sisältö ja toteutus

Voiman tiheystasojen määrittäminen FTA mukaan

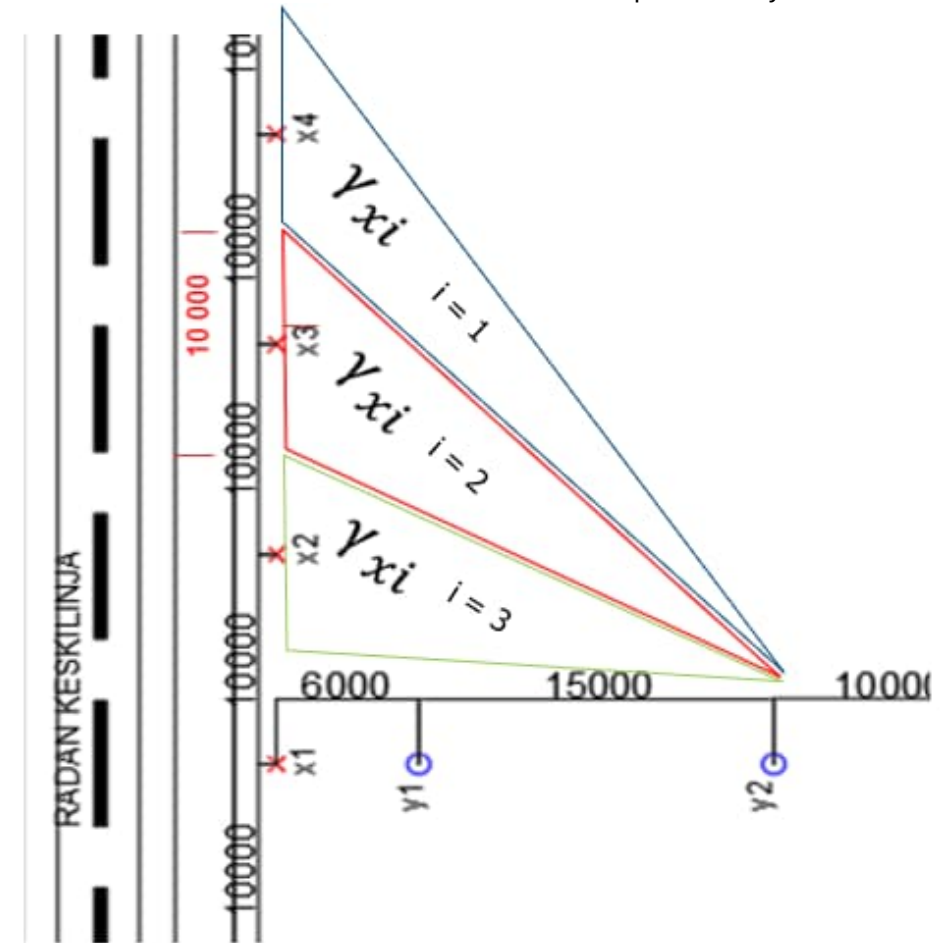
Yksinkertaistettuna värähtelynjohtavuus tai mobiliteetti γ_{xi} on voimassa välimatkan d (tässä tutkimuksessa 10 metriä) määrittelemällä alueella. Pistemäisellä herätteellä todetut värähtelynjohtavuudet lisätään edellisellä sivulla esitetyn kaavan

$$LSTM_{y2} = 10 \log_{10} \left[d \sum_{i=1}^n 10^{\frac{\gamma_{xi}}{10}} \right]$$

mukaisesti epäkoherentteina pistelähteinä yhteen, muodostaen viivamaisella lähteellä määritetyn maaperän värähtelynjohtavuuden.

Kuvassa esitetty kolmesta keinoherätepisteestä muodostettu maaperän värähtelynjohtavuuden taso $LSTM_{y2}$. Tutkimuksessa käytössä oli 9 keinoherätepistettä.

Kuvassa esitetty herätepisteiden (pistelähde) x_2 , x_3 ja x_4 avulla muodostettu maaperän värähtelynjohtavuus $LSTM_{y2}$ tarkasteltuna pisteessä y_2 .



Kuva: Viivalähteen muodostaminen FTA mukaisesti.

Tutkimuksen sisältö ja toteutus

Voiman tiheystasojen määrittäminen FTA mukaan

$$FDL = L_v - LSTM$$

- Tutkimuksessa suurin työ liittyi maaperän värähtelynjohtavuuden määrittämiseen.
- Periaatteessa maaperän värähtelynjohtavuus (mobiliteetti) pistelähteellä määritettynä saadaan kaavasta

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad ,$$

- jossa H on systeemin taajuusvastefunktio (värähtelynjohtavuus), X on värähtelyvaste ja F on systeemiin syötetty voima. Kaikki termit esitetään taajuuden funktiona.
- Melun vaikutusta arvioon voidaan pienentää käyttämällä suoran voiman ja vasteen suhteen sijasta ns. H-estimaattoreita. $H_1(\omega)$ estimaattori sopii käytettäväksi, kun herätepään signaalin oletetaan olevan häiriövapaata ja melua on pelkästään vastesignaalissa.

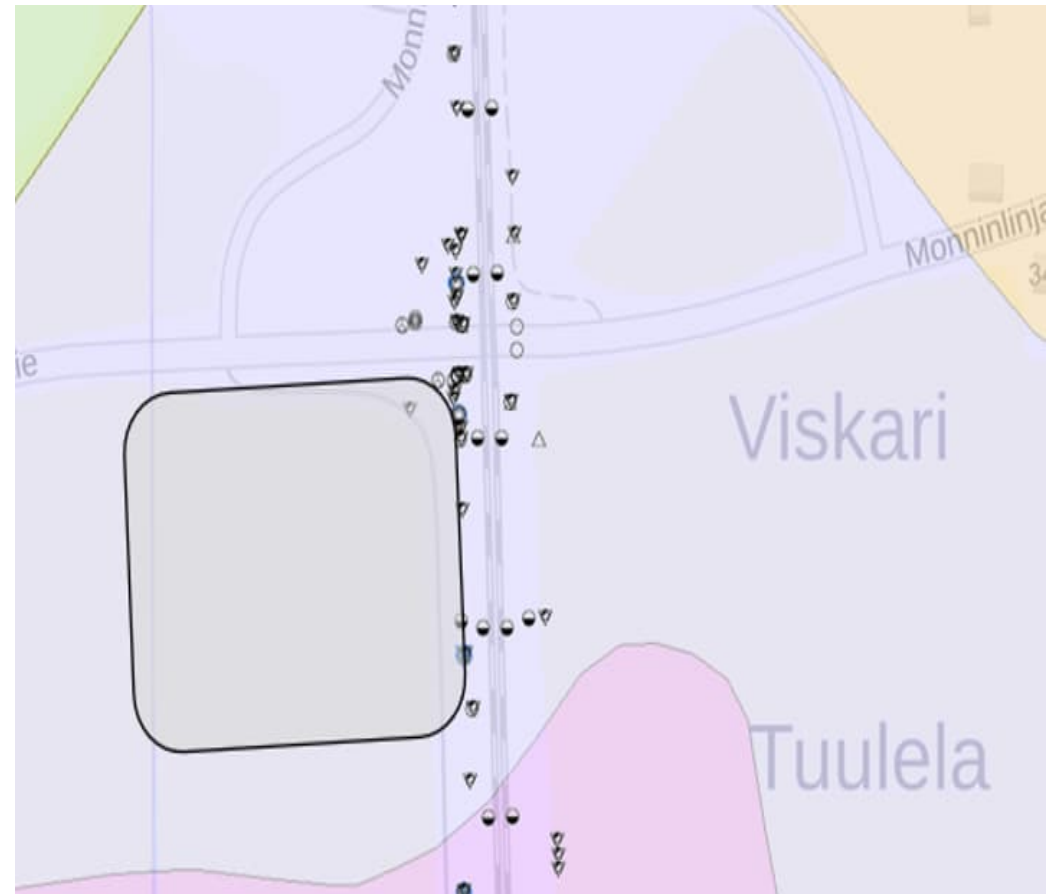
$$H_1(\omega) = \frac{G_{fx(\omega)}}{G_{ff(\omega)}}$$

- Kaavassa $G_{fx(\omega)}$ ja $G_{ff(\omega)}$ ovat herätteen ja vasteen välinen ristispektri ja herätteen autospektri vastaavassa järjestyksessä.

Tutkimuksen sisältö ja toteutus

Mittausjärjestelyt

- Tutkimukseen liittyvät mittaukset suoritettiin Helsinki-Tampere pääradan varrella Monnin kylässä Hausjärvellä.
- Tutkimusalueen kohdalla sähköistetty kaksoisraide kulkee noin 2,5 metriä korkean ja 15 metriä leveän penkereen päällä, jonka rakennetta ei tarkemmin tutkittu.
- Liikenneviraston vanhan suunnitelmaselostuksen mukaan mittauspaikan kohdalla radan alusrakenneluokka on 3 ja päällysrakenneluokka D. Mitoittavana akselipainona on 250 kN.
- Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) ylläpitämän pohjatutkimusrekisterin mukaan tutkimusalueen pinta- ja pohjamaalajina on hiesu.



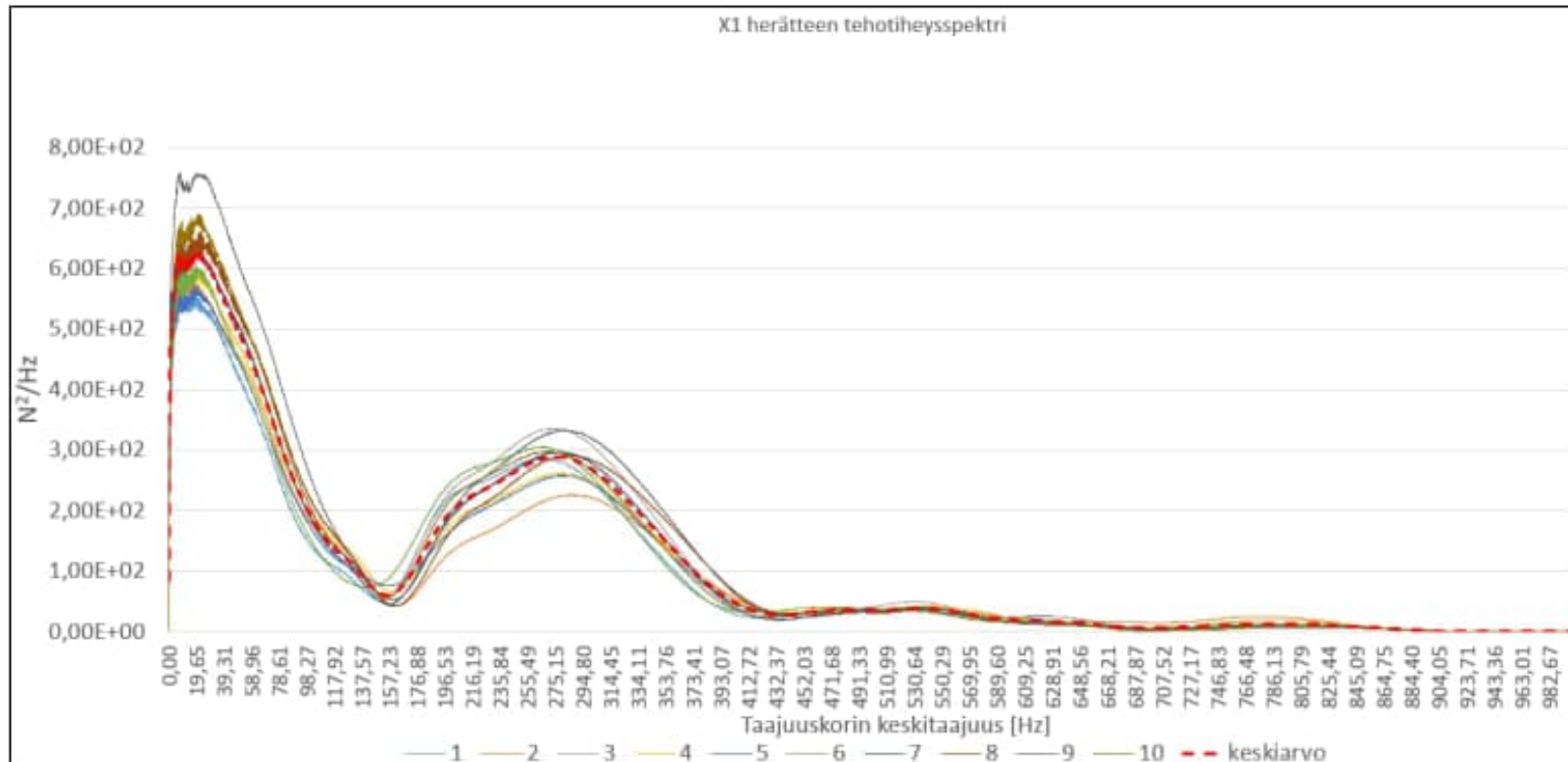
Tutkimuksen sisältö ja toteutus

Mittausjärjestelyt

Herätteen luomiseen tarvitaan periaatteessa vain massaltaan määritetty kappale, jolla tutkittava kappale herätetään värähtelemään. Yleensä käytössä on impulssivasara tai vastaava mittauslaite. Vasaran lyöntipäähän on integroitu laite, joka kykenee määrittämään törmäyshetkellä siihen vaikuttavan voiman.

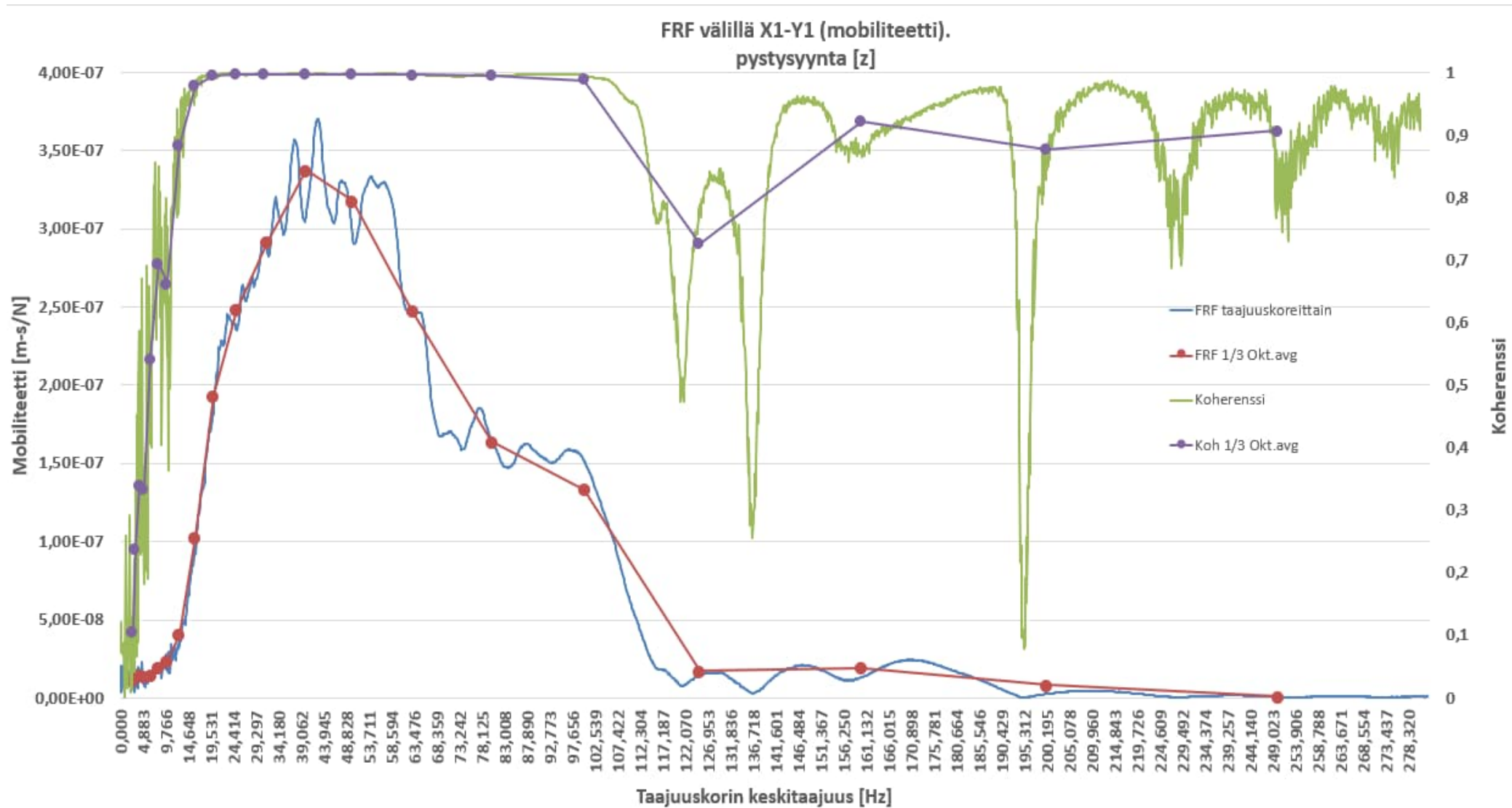
- Hidastuvuus 500-700g
- Voiman huippuarvo 27-37 kN

$$F = ma$$



Tuloksia

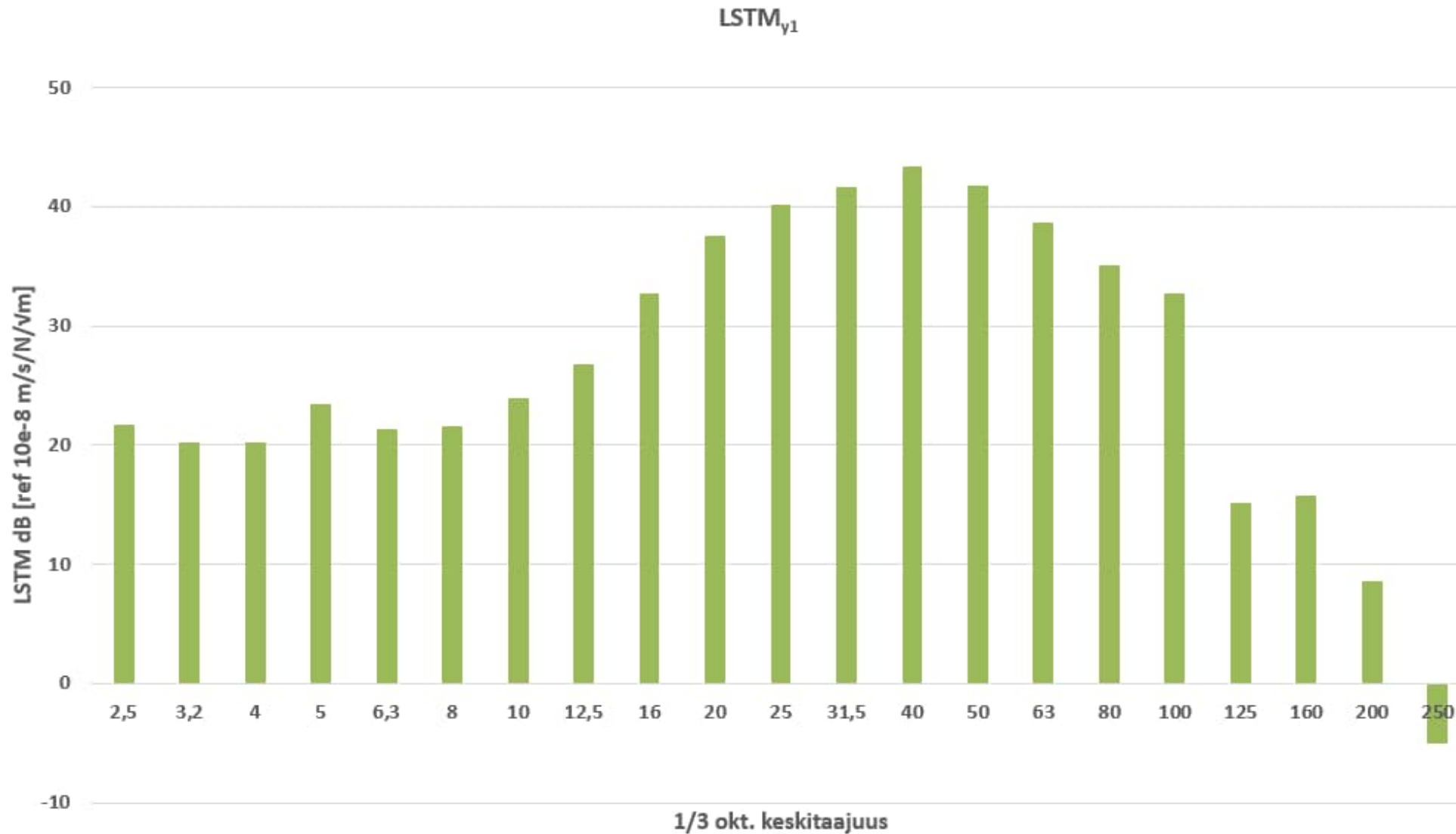
Pistemäinen värähtelynjohtavuus (etäisyys 10 metriä)



Tuloksia

Viivamainen värähtelynohtavuus (etäisyys 10 metriä)

$$LSTM_{y2} = 10\log_{10} \left[d \sum_{i=1}^n 10^{\frac{Y_{xi}}{10}} \right]$$



Tuloksia

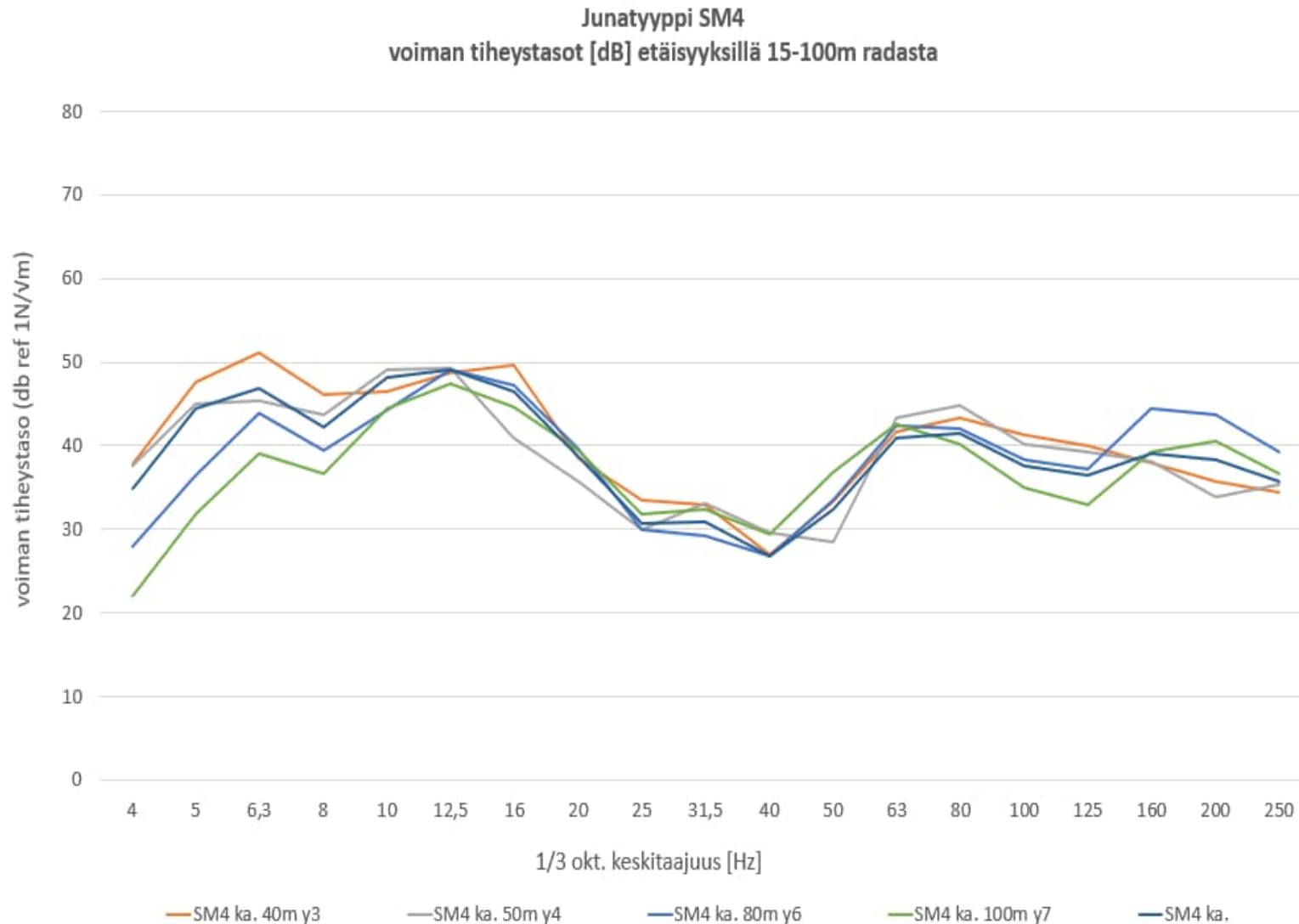
Junatyypin voimien tiheystasot (FDL)

$$FDL = L_v - LSTM$$

FDL = voiman tiheystaso

L_v = junan aiheuttama värähtelyvaste

LSTM = viivalähteen värähtelynjohtavuus



- Junatyyppin keskiarvo on energeettinen keskiarvo laskettuna kaikista junatyyppin ohituksista.
- Maaperän värähtelynjohtavuus perustuu jo määritelmän mukaisesti keskiarvoon kaikista keinoherähteistä.
- Voiman tiheystason (*FDL*) muodostaminen on triviaali miinuslasku logaritmisessa avaruudessa maaperän värähtelynjohtavuuden (*LSTM*) ja junien vasteiden (*L_v*) määrittämisen jälkeen.
- Teorian mukaan junien voimien tiheystasojen tulisi olla jokaisella etäisyydellä määritettynä sama. Käytännössä näin ei kuitenkaan ole.

Tuloksia

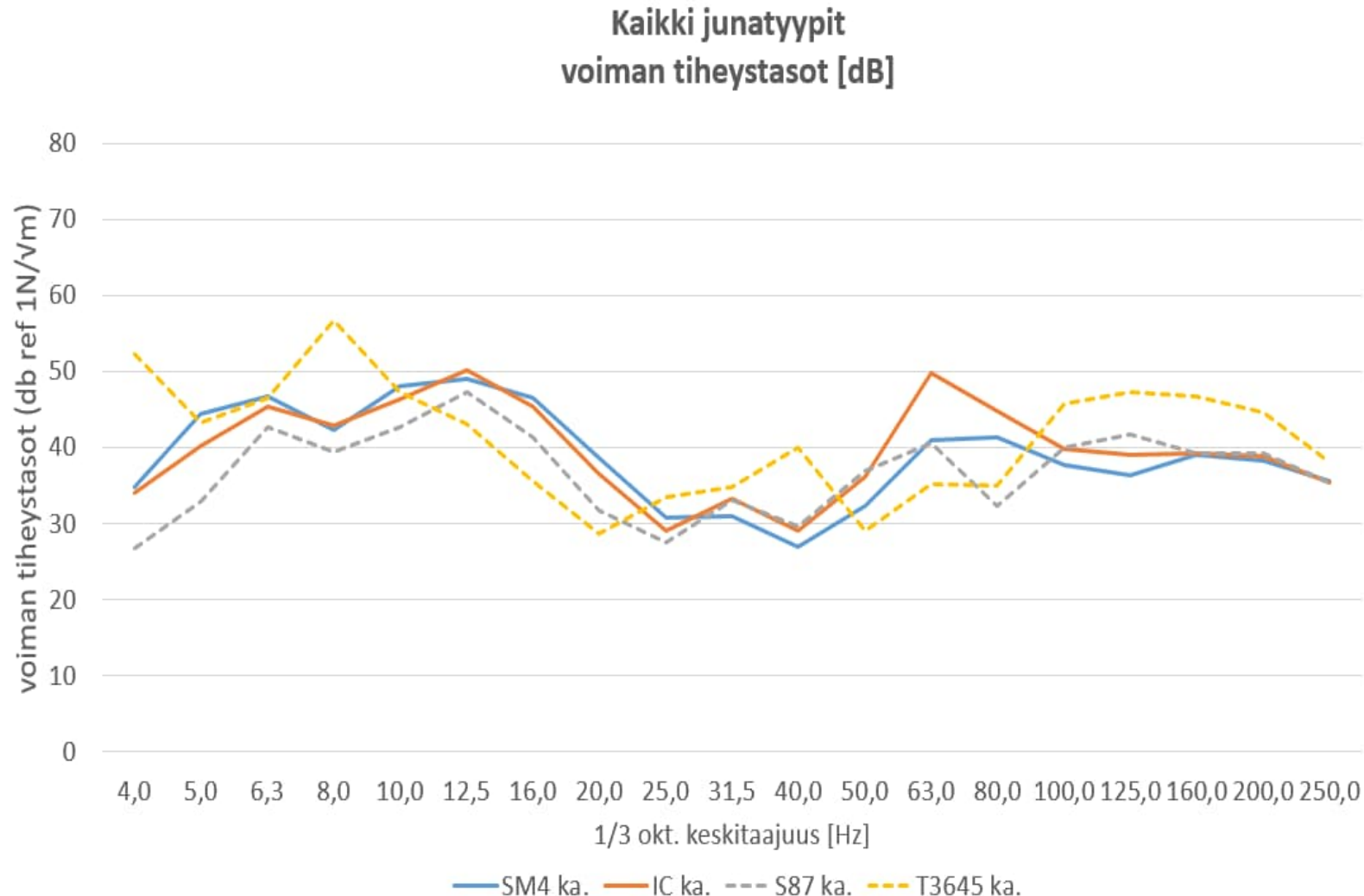
Junatyypin voimien tiheystasot (FDL)

$$FDL = L_v - LSTM$$

FDL = voiman tiheystaso

L_v = junan aiheuttama värähtelyvaste

LSTM = viivalähteen värähtelynjohtavuus



- Junatyytin keskiarvo on energeettinen keskiarvo laskettuna kaikista junatyytin ohituksista.
- Maaperän värähtelynjohtavuus perustuu jo määritelmän mukaisesti keskiarvoon kaikista keinoherähteistä.
- Voiman tiheystason (*FDL*) muodostaminen on triviaali miinuslasku logaritmisessa avaruudessa maaperän värähtelynjohtavuuden (*LSTM*) ja junien vasteiden (*L_v*) määrittämisen jälkeen.
- Teorian mukaan junien voimien tiheystasojen tulisi olla jokaisella etäisyydellä määritettynä sama. Käytännössä näin ei kuitenkaan ole.

Mitä hyötyjä? Mitä kehityskohteita?

- Junatyyppin voiman tiheystaso (FDL) on sille karakteristinen ominaisuus eli sitä voidaan hyödyntää muissa kohteissa vain määrittelemällä alueen värähtelynjohtavuus (keinoherätteellä). Olemassa olevaa raidetta ei tarvita.
- FDL tarvitsee muodostaa luotettavasti vain kerran. Ratarakenteen ja maaperäolosuhteiden olisi kuitenkin hyvä olla mahdollisimman samankaltaisia määrittely ja tarkastelualueella.
- Karttunutta tietoa voidaan hyödyntää mahdollisesti tutkittaessa rakennuksissa siirtyvää värähtelyä tai rakennukseen siirtyvää värähtelyä.
- *Vain yksi tutkimus. Tarvitaan suurempi näytemäärä luotettavampaan arvioon.*
- *Olisi hyvä kehittää keinoherätelaite suuremmalla voimansyötön kyvyllä.*
- *Signaalinkäsittelyyn oletettavasti löydettävissä tehokkaampia työkaluja.*

Tutkimus saatavilla

<https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202205245211>

(Tuni)

<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-405-043-2>

(Väylävirasto)

Kiitokset tutkimuksen mahdollistamisesta

Mikael Takala, Väyläviraston edustajana tutkimuksen tilaajana.

Kiitokset ohjaajille Pekka Tainalle ja Jarkko Punnoselle Sitowise Oy:stä ja Heikki Luomalalle sekä Antti Pelholle Tampereen Yliopistolta.

Kiitos

Vesa Vähäkuopus

Asiantuntija

vesa.vahakuopus@sitowise.com

+358 44 427 9590

SITOWISE.COM – THE SMART CITY COMPANY

SITOWISE