METROLIIKENTEEN JA HERKKIEN TUTKIMUSLAITTEIDEN TÄRINÄSELVITYS

Timo Peltonen[1)], **Timo Markula**[1)], **Mats Backholm**[2)]

[1)] Insinööritoimisto Akukon Oy
Kornetintie 4 A, 00380 HELSINKI
timo.peltonen@akukon.fi, timo.markula@akukon.fi

[2)] Vibkon Oy
Kornetintie 4 A, 00380 HELSINKI
mats.backholm@vibkon.fi

1 JOHDANTO

Länsimetron suunnittelun yhteydessä on haluttu varmistaa, ettei metroliikenteestä kallioperään kytkeytyvä värähtely tule häiritsemään Otaniemen alueilla tapahtuvaa tieteellistä toimintaa. Alueilla on runsaasti sellaisia tutkimuslaitteita ja toimintoja, jotka ovat erittäin tärinäherkkiä. Länsimetron tavoitteena on, että metroliikenteestä kallioperään aiheutuva värähtely ei tule häiritsemään näitä toimintoja.

Mahdollisten värähtelyhaittojen ennakoimiseksi ja tarvittavien torjuntaratkaisuiden löytämiseksi Otaniemen ja Keilaniemen alueista on tehty herkkien laitteiden tärinäselvitys. Koska selvityksen kohteena olevaa metrorataa ei vielä ole, tarkastelun lähtökohtina on käytetty Helsingin metrosta ja metroradan ympäristöstä tehtyjä värähtelymittauksia, joiden avulla pientaajuisen värähtelyn kytkeytymistä ja etenemistä on voitu mallintaa Otaniemessä.

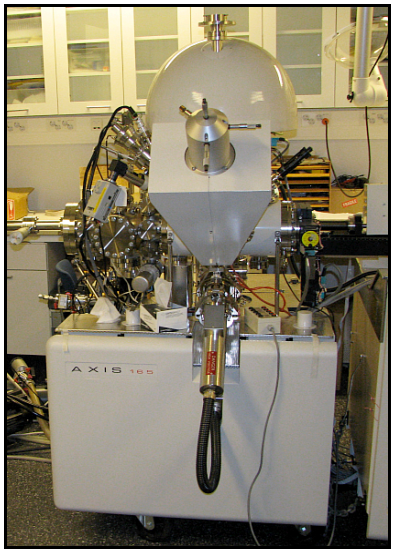
Herkissä kohteissa sallittua tärinää on selvitetty perustuen laitekohtaisiin vaatimuksiin, herkkien laitteiden yleisiin tärinäkriteereihin sekä herkimmissä tutkimustiloissa tehtyihin nykytilanteen taustatärinän mittauksiin. Selvityksen osana on tarkasteltu myös metroradan tärinäeristyksen tarvetta sekä ratarakenteisiin sijoitettavan runkomelueristyksen vaikutusta metron pientaajuiseen tärinäherätteeseen.

Tässä paperissa esitetään kooste työssä käytetyistä menetelmistä sekä tarkastellaan työn tuloksia ja niistä tehtyjä johtopäätöksiä.

2 HERKKIEN LAITTEIDEN KARTOITUS

Selvitystyö käynnistyi Otaniemen ja Keilaniemen tärinäherkkien toimintoja ja tilojen kartoituksella ja tunnistamisella. Tämä sisälsi laitevärähtelyyn liittyvän kirjallisuusselvityksen, louhinnan alustavien riskikartoitusten läpikäynnin, kyselykirjeet lähes 50 kohteeseen sekä joukon kohdekäyntejä.

Tavoitteena oli tunnistaa kaikki ne kohteet, joissa on erittäin tärinäherkkiä laitteistoja tai toimintoja, ja selvittää niille asetettavat kohde-, tila- tai laitekohtaiset tärinärajat.



Kuva 1. Esimerkki herkän tutkimuslaitteen taustatärinämittauksesta. Kolme seismisen luokan kiihtyvyysanturia (x/y/z) on kiinnitetty laitteen taakse lattiaan.

Lähtötietoina käytettiin kohteiden käyttäjien ja laitevalmistajien ilmoittamia tärinävaatimuksia sekä tutkimuslaitteiden taustavärähtelyolosuhteiden arvioinnissa käytettäviä yleisiä tärinäkriteerejä (vibration criteria) [1]. Lähtötietojen ja toimijoilta saadun palautteen perusteella käytiin paikan päällä 11 kohteessa arvioimassa niissä sijaitsevat herkät laitteet ja toiminnot.

3 HERKKIEN LAITTEIDEN TAUSTATÄRINÄN MITTAUKSET

Osa tarkastelluista herkistä kohteista osoittautui sellaisiksi, ettei niistä ollut saatavilla tärinäherkkyyden arviointiin soveltuvia raja-arvoja, tai laitteistot olivat niin uniikkeja tai herkkiä, ettei niihin voitu soveltaa yleisiä värähtelykriteerejä. Näissä tapauksissa tarkastelun lähtökohdaksi otettiin kohteissa nykytilanteessa vallitseva taustatärinätaso, jossa tärinäherkät laitteet toimivat normaalisti ja häiriöttä.

Taustatärinää aiheutuu mm. käyttäjien liikkumisesta huonetilassa ja ympäröivässä rakennuksessa, samassa tilassa mahdollisesti olevista pumpuista tai jäähdytyslaitteista, ympäröivän rakennuksen talotekniikan laitteista sekä mahdollisista muista ympäristön lähteistä (esimerkiksi tieliikenteen hidastetöyssyt).

Mitattujen kohteiden tapauksessa tavoitteeksi asetettiin, ettei metroliikenteestä aiheutuva värähtely tule ylittämään kohteissa nyt mitattuja jatkuvia taustatärinätasoja.

Nykytilanteessa vallitsevat taustatärinätasot selvitettiin Otaniemessä seitsemässä eri kohteessa tehdyillä mittauksilla.

3.1 Mittausmenetelmät ja -laitteet

Herkkien laitteiden taustatärinää mitattiin laitetilojen lattioilla herkkien laitteistojen välittömässä läheisyydessä (*kuva 1*). Mittaukset tehtiin käyttäen tätä tarkoitusta varten erityisesti hankittuja seismisen luokan kiihtyvyysantureita, joilla kyettiin luotettavasti mittaamaan pientaajuista ja amplituditaan erittäin pientä värähtelyä.

Taulukko 1. *Kiihtyvyysanturien herkkyydet, tässä tarkastelussa käyttökelpoiset taajuusalueet ja anturin sisäinen taustakohina tällä taajuuskaistalla.*

laite	herkkyys	taajuusalue	taustakohina
Wilcoxon Research 731A	10 V/g	2–300 Hz	0,2 μm/s
Brüel & Kjær 4370	1 V/g	16–500 Hz	0,4 μm/s
Vibra-Metrics 8000HS	500 mV/g	40–500 Hz	1,0 μm/s

Anturien valinnassa huomioitiin, että anturien sisäinen taustakohina on riittävän alhainen myös laitetärinän kannalta merkittävillä erittäin pienillä taajuuksilla.

Kohteissa mitattiin taustatärinää tyypillisesti noin vuorokauden ajan, jolloin saatiin edustava kuva tilojen ja laitteiston käytöstä mahdollisesti aiheutuvasta taustatärinästä sekä yöajasta, joka tyypillisesti edusti tilan taustatärinää hiljaisimmillaan.

3.1 Esimerkki mittaustuloksista

Kuvassa 2 on esimerkki herkän laitteen vierestä seismisellä anturilla mitatusta taustatärinän pystysuuntaisesta värähtelynopeudesta v kahden tunnin ajanjaksolta. Laitetilassa vallitseva taustatärinä on jatkuvasti selvästi alle 0,5 μm/s lukuunottamatta yksittäistä häiriötapahtumaa, joka nostaa tärinän hetkellisesti luokkaan 1 μm/s. Värähtelyn suuruusluokan vertailukohtana voidaan pitää ihmisen tuntoaistin havaintokynnystä, joka on noin 100 μm/s.

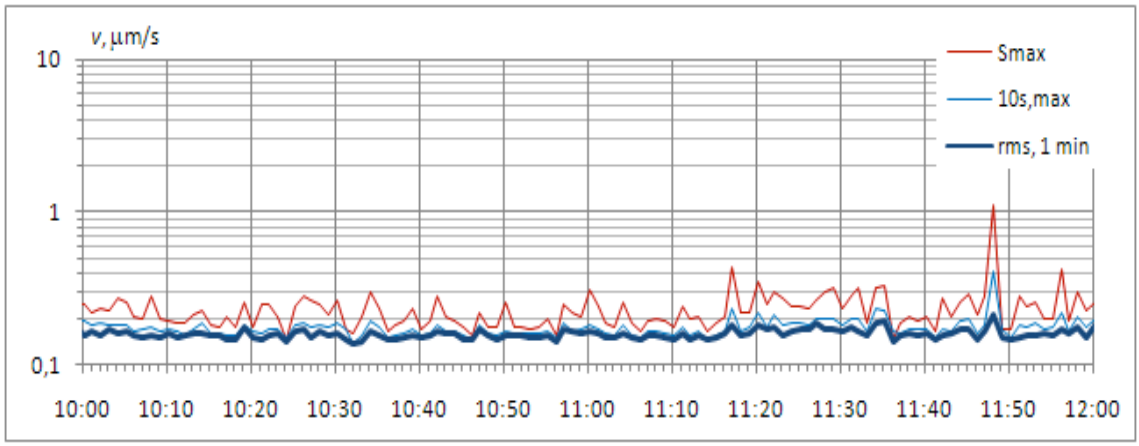
4 METROLIIKENTEESTÄ AIHEUTUVAN VÄRÄHTELYN ARVIOINNISSA TARVITUT LÄHTÖTIEDOT

Otaniemen ja Keilaniemen herkkiin kohteisiin metroliikenteestä aiheutuvan värähtelyn voimakkuuden ja taajuussisällön arvioimiseksi tarvittiin lisätietoa myös metroliikenteen ympäristöönsä aiheuttamasta pientaajuisesta tärinäherätteestä ja sen leviämisestä kallioperässä. Lisäksi tarvittiin tietoa radan kaarteiden ja vaihteiden vaikutuksista tärinään. Tämän vuoksi selvitykseen sisällytettiin laajahko joukko nykyisestä metrosta ja sen ympäristöstä tehtyjä värähtelymittauksia.

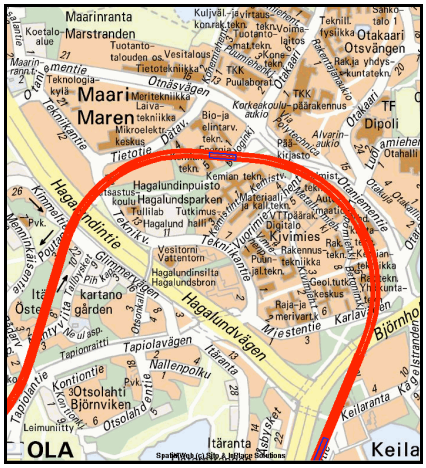
4.1 Metrojunan pientaajuinen tärinäheräte

Vaikka metron kallioperään aiheuttama tärinäheräte tunnettiin runkomelun osalta jo varsin hyvin, herkkien laitteiden tarkastelussa tarvittiin uutta tietoa metron herätespektristä. Herkkien laitteiden tärinän tarkastelussa taajuusalue keskittyy huomattavasti pienemmille taajuuksille (tyypillisesti 1-100 Hz) kuin runkomelun tapauksessa (noin 30-250 Hz).

Radasta ympäristöön kytkeytyvän tärinäherätteen kannalta olennainen kysymys oli myös, miten radassa oleva runkomelueristys vaikuttaa herätteeseen laitetärinän kannalta merkittävillä pienillä taajuuksilla. Vaikka runkomelueristyksessä käytetty sepelinalusmatto vaimentaa tärinää tehokkaasti runkomelun taajuusalueella, eristysrakenne voi myös vahvistaa tärinäherätettä oman resonanssitaajuutensa läheisyydessä. Koska laitetärinän tarkastelu alkaa hyvin pienistä taajuuksista, lisätietoa tarvittiin myös eristyksen vaikutuksesta herätteeseen oman resonanssitaajuutensa alapuolella.



Kuva 2. Esimerkki herkän laitteen kohdalta mitatusta taustatärinän pystysuuntaisesta värähtelynopeudesta kahden tunnin ajanjaksolta.



Kuva 3a. *Esimerkki raiteenvaihtopaikan vaihteissa esiintyvistä kiskon epäjatkuvuuskohdista.*
Kuva 3b. *Yleiskuva Otaniemen metrolinjauksessa olevista kaarteista.*

4.2 Värähtelyn leviäminen pienillä taajuuksilla ja suurilla etäisyyksillä

Metroliikenteen värähtelyn leviämismallinnusta varten tarvittiin uutta tietoa myös kallioperässä etenevän värähtelyn etäisyysvaimennuksesta sekä suurten etäisyyksien että pienten taajuuksien suhteen. Runkomeluun liittyvissä aiemmissa värähtelytarkasteluissa mittaus- ja tarkastelualue on yleensä ulottunut enimmillään noin 100 m etäisyydelle radasta. Koska osa Otaniemen herkistä kohteista sijaitsee useiden satojen metrien etäisyydellä tulevasta metroradasta, kallioperässä esiintyvästä värähtelystä haluttiin vastaavasti mittaustuloksia myös näillä etäisyyksillä.

Fysikaalisesti oli myös odotettavissa, että kallioperässä esiintyvä väliaineen vaimennus jää laitetärinän kannalta merkittävillä pienillä taajuuksilla vähäisemmäksi kuin runkomelun tapauksessa. Pientaajuisen värähtelyn etenemistä haluttiin näin ollen tarkastella useilta eri etäisyyksiltä tehdyillä mittauksilla, joista myös värähtelyn vaimennuskertoimien taajuusriippuvuuden merkitys olisi määritettävissä.

Kuva 4a. *Metrojunasta tehtyjen värähtelymittausten valmistelua metrovarikolla.*
Kuva 4b. *Metron telirakenteisiin kiinnitettyjä värähtelyantureita.*

4.3 Kaarreajon vaikutukset

Koska suurin osa Otaniemeen tulevasta metroradasta on jyrkkää kaarretta, tarvittiin mittaustietoa kaarreajossa syntyvästä värähtelyherätteestä sekä siitä, miten se mahdollisesti poikkeaa suorilla rataosuuksilla syntyvästä herätteestä.

4.4 Vaihteiden tärinäheräte

Keilaniemeen sijoittuvan raiteenvaihtopaikan vuoksi metron värähtelyherätteen ja värähtelyn leviämisen tutkimuksiin sisällytettiin myös vaihteet. Vaihteet muodostavat metrorataan paikallisia pistemäisiä värähtelylähteitä, jotka aiheutuvat kiskon epäjatkuvuuksista vaihteen kärkien, risteävän kiskon ylimenon ja mahdollisten ristikoiden kohdalla.

Tarkasteluun otettiin sekä tavalliset että kääntyväkärkiset vaihteet, koska tavoitteena oli selvittää, paljonko kääntyväkärkisten vaihteiden käyttö vähentää metroradasta kallioperään kytkeytyvää tärinää ja runkomelua.

5 METRON AIHEUTTAMAN VÄRÄHTELYN MITTAUKSET

5.1 Metrojunasta tehdyn mittaukset

Metrojunan rataan aiheuttamaa tärinäherätettä selvitettiin metrojunan teleistä tehdyillä mittauksilla. Mittaukset tehtiin 200-sarjan metrojunalla, jolla ajettiin Helsingin nykyinen metrolinjasto kauttaaltaan läpi. Ajon aikana mitatuista värähtelysignaaleista analysoitiin suorilla rataosuuksilla ja kaarreajossa esiintyvän värähtelyn voimakkuutta ja taajuussisältöä. Telien akseleilta mitatun värähtelyn myötä päästiin tarkentamaan myös metrojunasta rataan kohdistuvaa värähtelyherätettä.

Metrojunan teleistä tehdyt mittaustulokset osoittivat, että kaarreajolla ei ole merkittävää vaikutusta metrojunasta rataan aiheutuvaan tärinäherätteeseen, eikä radan kaarteita tarvitse näin ollen tarkastella erikseen myöskään Otaniemen kohdalla. Vaihdeajon osalta saatiin myös viitteitä siitä, että kääntyväkärkiset vaihteet aiheuttavat odotetusti vähäisempää tärinää kuin tavalliset vaihteet.

Kuva 5. *Esimerkkejä nykyisen metroradan ympäristössä kallioperästä tehdyistä värähtelymittauksista. Seismiset värähtelyanturit kiinnitettyinä avokallioon noin 160 m ja 260 m etäisyyksillä metroradasta.*

5.2 Metron ympäristössä tehdyt mittaukset

Metron ympäristöönsä aiheuttamaa tärinäherätettä selvitettiin Puotilan ja Rastilan alueilla tehdyillä mittauksilla. Mittauksissa tarkasteltiin tärinäherätteen taajuussisältöä ja etenemisvaimenemista laitetärinän kannalta merkittävillä pienillä taajuuksilla. Lisäksi vertailtiin runkomelueristetyn ja eristämättömän radan ympäristöistä mitatun tärinäherätteen taajuussisältöä ja voimakkuutta etäisyyden funktiona.

Kalliotunnelissa kulkevan eristetyn ja eristämättömän radan osalta mittauksia tehtiin Puotilan ja Rastilan välisen rataosuuden yläpuolella kallio- ja maaperästä ja rakennuksista. Eristetyn radan mittauksia täydennettiin eri etäisyyksillä Rastilan aseman itäpuolella avoradan varrella sekä Vartiokylän yläasteella Puotinharjussa, jossa metrorata kulkee kalliotunnelissa.

Mittaustulokset osoittavat, että Helsingin metrossa runkomelueristyksenä käytetty sepelinalusmatto ei merkittävästi kasvata metroradan ympäristössä esiintyvää pienitaajuista tärinää verrattuna eristämättömään rataan. Vaikka runkomelueristys odotetusti vahvistaa pienempiä taajuuksia jonkin verran, se samalla myös vaimentaa suurempia taajuuksia, jolloin tärinän kokonaistaso hieman pienenee. Otaniemen ja Keilaniemen tapauksessa tämä tulos tarkoittaa, että metrorataan voidaan asentaa runkomelueristystä ilman, että tärinä lisääntyy herkkien laitteiden kannalta.

Rastilan alueella tehdyistä kaukomittauksista saatiin olennaista tietoa värähtelytasoista pitkillä (100-300 m) etäisyyksillä radasta. Värähtely oli odotetusti hyvin pientä, mutta kuitenkin mitattavissa herkillä kiihtyvyysantureilla. Tuloksia voitiin näin ollen hyödyntää arvioitaessa metroliikenteen aiheuttamia värähtelytasoja vastaavilla etäisyyksillä olevissa Otaniemen herkissä kohteissa.

5.3 Metron vaihteiden mittaukset

Vaihteissa ajon ympäristöön aiheuttamaa värähtelyä sekä kääntyväkärkisen vaihteen etua suhteessa tavalliseen vaihteeseen selvitettiin Siilitien ja Rastilan asemien länsipuolilla olevien vaihdealueiden ympäristöissä tehdyillä mittauksilla.

Kääntyväkärkinen vaihde aiheuttaa jonkin verran vähemmän tärinää ja runkomelua kuin tavallinen vaihde. Runkomelun kannalta edullisin torjuntaratkaisu on tavallisten vaihteiden käyttö yhdessä vaihteen alle sijoitetun tehokkaan runkomelueristyksen kanssa. Pientaajuisen laitetärinän vaimentamisen kannalta runkomelueristyksestä ei kuitenkaan ole apua, vaan torjuntakeinona on tällöin käytettävä kääntyväkärkisiä vaihteita.

6 VÄRÄHTELYN MALLINNUS JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Metron värähtelyherätteen ja värähtelyn leviämisen mittaustulosten avulla päästiin tarkastelemaan kallioperässä esiintyvää metroliikenteen värähtelyn voimakkuutta ja taajuussisältöä eri etäisyyksillä radasta. Näiden lähtötietojen pohjalta muodostettiin laskennallinen tarkastelumalli, jonka avulla on arvioitu Otaniemen herkkiin kohteisiin aiheutuvaa metroliikenteen värähtelyä herkkien laitteiden kannalta. Malli perustuu raideliikenteen runkomelun leviämisen tarkastelua varten kehitettyyn laskentamalliin [2].

Mallin avulla laskettiin metroliikenteestä aiheutuvat värähtelyn kokonaistasot herkkien kohteiden kohdalle kallion pintaan. Laitetiloihin kohdistuvan tärinän tarkastelussa huomioitiin myös rakennusten rakenteissa esiintyvän resonanssivahvistuksen vaikutusta. Koska useimmat herkkien laitteiden tärinävaatimukset on esitetty spektrien muodossa, värähtelynopeuden kokonaistason lisäksi tarkasteltiin myös värähtelyn spektriä. Spektrejä arvioitiin korjaamalla herätespektrin muotoa vastaamaan kallioperästä mitattua etäisyysvaimennuksen taajuusriippuvuutta.

Työn tulokset osoittavat, että runkomelueristetyllä radalla kulkevan metroliikenteen aiheuttama värähtely ei tule merkittävästi lisäämään alueella nykyään esiintyvää taustatärinää, eikä näin ollen tule häiritsemään värähtelyherkkien tutkimus- ja mittauslaitteiden toimintaa. Metrorataan mitoitettavalla runkomelueristyksellä voidaan samalla varmistaa, ettei metroliikenteen kallioperään aiheuttamasta värähtelystä pääse muodostumaan ihmisiä häiritsevää runkomeluhaittaa metrolinjan ympäristössä oleviin meluherkkiin sisätiloihin.

VIITTEET

1. GORDON C., Generic Vibration Criteria for Vibration-Sensitive Equipment. *Proc. SPIE* Vol. 3786, p. 22-33, Optomechanical Engineering and Vibration Control, 1999.
2. PELTONEN T. & BACKHOLM M., Raideliikenteen runkomelun mallintaminen ja arviointi. *Akustiikkapäivät 2009*, 14.-15.5.2009, Tampere, 276–283.