



# Liikennetärinän monitorointi- ja analysointiympäristö

Jukka Koskinen | Asko Talja



# Liikennetärinän monitorointi- ja analysointiympäristö

---

Jukka Koskinen & Asko Talja

ISBN 978-951-38-7832-0 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)  
ISSN 2242-122X (URL: <http://www.vt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2012

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT  
PL 1000 (Vuorimiehentie 5, Espoo)  
02044 VTT  
Puh. 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT  
PB 1000 (Bergsmansvägen 5, Esbo)  
FI-2044 VTT  
Tfn +358 20 722 111, telefax +358 20 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland  
P.O. Box 1000 (Vuorimiehentie 5, Espoo)  
FI-02044 VTT, Finland  
Tel. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

## Liikennetärinän monitorointi- ja analysointiympäristö

[Wireless sensor platform for monitoring traffic induced vibrations]. **Jukka Koskinen & Asko Talja.** Espoo 2012. VTT Technology 19. 60 s. + liitt. 6 s.

### Tiivistelmä

Projektissa kehitettiin uudenlaista liikennetärinän arviointiin tarkoitettua langatonta mittaus- ja analysointiympäristöä. Tavoitteena oli kehittää mittalaitteesta langaton sensoriverkkosovellus, joka olisi yleiskäyttöinen soveltuena myös muihin sovelluksiin. Lisäksi projektissa kehitettiin ohjeistus liikennetärinän arviointiin, jota tarvittiin signaalikäsitteily- ja analyysimenetelmien kehittämisessä. Projektissa toteutettiin sensoriverkosta sovellus liikenteen aiheuttamien värähtelyjen mittaamiseen. Kehitetty langaton sensoriverkko on monikäyttöinen mittaussovellus, joka on laskenta-tehokas, uudelleen konfiguroitavissa ja energiatehokas. Sen suunnittelu ja toteuttaminen perustuvat projektissa kehitettyyn laitetekniikkaan. Sensoriverkon avulla mitattuja tuloksia ja niistä laskettuja tunnuslukuja varten kehitettiin analysointi- ja visualisointityökalut, joiden avulla tulokset voidaan esittää karttapohjilla GIS-paikkatietojärjestelmää hyödyntäen.

Mittalaite testattiin kenttätestein liikenneväylien läheisyydessä. Testin tuloksia verrattiin langallisen mittalaitteen antamiin tuloksiin. Tulosten perusteella kehitetyn konseptin (mittaus, mittausten jälkikäsitteily ja visualisointi) todettiin olevan toimiva. Kehitetty langaton sensoriverkko antaa hyvät mahdollisuudet hyödyntää sitä jatkossa myös muissa sovelluksissa, joita ovat esimerkiksi ympäristömittaukset ja rakenteiden monitorointi (rakennukset, sillat, tunnelit yms.). Julkaisussa esitetään myös tulosten hyödyntämismahdollisuudet sekä selvitykset kansainvälisistä markkinoista liikennetärinän sovellusalueelta.

**Avainsanat** wireless sensor networks, traffic induced vibrations, geographical information system

## **Wireless measuring and visualisation platform for monitoring traffic induced vibrations**

[Liikennetärinän monitorointi- ja analysointiympäristö]. **Jukka Koskinen & Asko Talja**. Espoo 2012. VTT Technology 19. 60 p. + app. 6 p.

### **Abstract**

This report presents results from a research project which developed a consistent measuring and visualisation as well as decision platform tool for evaluation of traffic-induced vibrations. Another goal was to develop a wireless sensor network platform suitable for different monitoring applications. The developed wireless sensor network is re-configurable, has high computation capacity and has low energy consumption. The platform was tested in monitoring of traffic induced ground vibrations.

For analysis and visualisation of the measured traffic induced vibrations a software tool was developed. The results of the analysis are visualised in geographical maps using Geographical Information systems (GIS). Also simplified design guidelines for assessment of traffic-induced vibrations in land use were developed in the project.

The developed platform and software were tested by measuring traffic-induced vibrations in an area locating near a railway and highway. The measurements of the platform were compared to measurements of a wired measuring platform designed especially for measuring traffic induced vibrations. In addition, a survey of market potential of the developed platform and impacts reviews of traffic induced vibrations in land use in several countries was carried out by an international enquiry.

**Keywords** wireless sensor networks, traffic induced vibrations, geographical information system

## Alkusanat

Tämä loppuraportti liittyy projektiin Liikennetärinän langaton mittaus- ja analysointiympäristö (Vibplat, 2009–2011). Projektissa kehitettiin uudenlaista liikennetärinän arviointiin tarkoitettua langatonta mittaus- ja analysointiympäristöä. Projektissa oli tavoitteena kehittää langaton sensoriverkkosovellus, joka olisi yleiskäyttöinen soveltuen myös muihin sovelluksiin. Julkaisussa esitetään tulokset liittyen mittalaitteeseen ja analysointiympäristöön. Lisäksi projektissa on kehitetty ohjeistus liikennetärinän arviointiin, jota tarvittiin myös signaalikäsitteily- ja analyysimenetelmien kehittämisessä. Ohjeistus on julkaistu erillisenä raporttina. (Talja, Asko. Ohjeita liikennetärinän arviointiin 2011. VTT, Espoo. 35 s. + liitt. 9 s. VTT Tiedotteita - Research Notes 2569).

Projektia on ohjannut pääasiassa sen rahoittajien edustajista koostuva johtoryhmä, johon ovat kuuluneet seuraavat henkilöt:

Tom Warras, Tekes  
Tuomo Viitala, Liikennevirasto  
Jani Kankare, Promethor Oy  
Janne Göös, Vibsolas Oy  
Anne Määttä, Sito Oy  
Jarkko Karttunen, Helsingin kaupunki  
Kalevi Salonen, Tampereen kaupunki  
Aila Elo, Keravan Kaupunki  
Ilkka Holmila, Järvenpään kaupunki  
Heikki Kangas, Vantaan kaupunki  
Mikko Sallinen, VTT  
Ari Saarinen, Ympäristöministeriö

Johtoryhmän puheenjohtajana on toiminut ylitarkastaja Tuomo Viitala Liikennevirastosta. Vastuullisena johtajana on VTT:ssä toiminut teknologiapäällikkö Mikko Sallinen ja projektipäällikkönä tutkija Jukka Koskinen.

Julkaisun ovat laatineet tutkija Jukka Koskinen ja erikoistutkija Asko Talja. Raportin tekoon ovat osallistuneet myös VTT:ltä Matti Halonen (paikkatieto ympäristö), Juha T. Kurkela (mittaukset ja tulosten analysointi), Tero Peippola (sensoriverkon toteutus), Jari Rehu (sensoriverkon suunnittelu ja toteutus) ja Kalle Määttä (sensoriverkon signaalikäsitteily). Kyseiset henkilöt ovat vastanneet suluissa mainittujen toimintojen toteutuksesta. Projektiin ovat osallistuneet lisäksi Jouko Törnqvist ja Pirkka Tuveva.

Kansainvälisen markkinaselvitysosuuden teksti perustuu Eero Nippalan (Tampereen ammattikorkeakoulu) tekemään projektin sisäiseen raporttiin.

Julkaisuun on lisäksi saatu kommentteja johtoryhmän jäseniltä.

Kiitämme projektin rahoittajia, johtoryhmän jäseniä ja kaikkia työhön osallistuneita henkilöitä aktiivisuudesta ja hyvästä yhteistyöstä.

Oulu 3.2.2012

Jukka Koskinen, Asko Talja



# Sisällysluettelo

Tiivistelmä .....	3
Abstract .....	4
Alkusanat.....	5
Symboliluettelo.....	9
<b>1. Johdanto .....</b>	<b>10</b>
<b>2. Liikenteen aiheuttamien maaperävärähtelyjen mittaus ja analysointi ...</b>	<b>12</b>
2.1 Värähtelymittausten käyttö liikennetärinän arvioinnissa .....	12
2.1.1 Mittausten tarkoitus.....	12
2.1.2 Värähtelyn mittaaminen.....	13
2.1.3 Mitatun värähtelyn tunnusluvun ja taajuussisällön määrittäminen ....	14
2.2 Sisätilojen värähtelyn arviointi .....	15
2.2.1 Suositus värähtelyrajaksi asuintiloissa .....	15
2.2.2 Arvio rakennuksen perustukseen siirtyvästä värähtelystä .....	15
2.2.3 Tasaiseen voimistumiseen perustuva arvio sisätilojen värähtelystä .....	16
2.2.4 Resonanssiin perustuva arvio sisätilojen värähtelystä.....	16
2.2.5 Tarkennettu värähtelysuunnittelu .....	16
<b>3. Kehitetty mittaustulosten analysointiympäristö.....</b>	<b>18</b>
3.1 Kehitystyön tarkoitus.....	18
3.2 Mittaustulosten jälkikäsittely .....	20
3.3 Mittaustulosten visualisointi.....	21
<b>4. Langaton sensoriverkko .....</b>	<b>25</b>
4.1 Yleistä langattomista sensoriverkoista .....	25
4.2 Sensorisolmujen osat.....	27
4.2.1 Mittauskortti .....	27
4.2.2 Prosessorikortti .....	28
4.2.3 WPAN-kortti.....	28
4.2.4 Tehonlähde .....	29

4.3	Maaperävärähtelyjä mittaavien langattomien sensoriverkkojen vaatimukset liikennevärähtelyjen monitoroinnissa .....	29
<b>5.</b>	<b>Kehitetty langaton sensoriverkko.....</b>	<b>32</b>
5.1	Sensorisolmu .....	33
5.1.1	Mittauskortti .....	33
5.1.2	Proessorikortti .....	33
5.1.3	WPAN-kortti.....	34
5.2	Keskusyksikkö.....	34
5.3	Langattoman sensoriverkon liikennetärinäsovellus.....	35
<b>6.</b>	<b>Langattoman sensoriverkon testaus .....</b>	<b>38</b>
6.1	Vertailumittalaitteisto.....	38
6.2	Testit sisätiloissa .....	38
6.3	Testit ulkona.....	40
6.4	Kenttätetit Järvenpäässä.....	43
6.4.1	Vertailumittauksen toteutus .....	43
6.4.2	Mittauspaikka.....	43
6.4.3	Mittausten suoritus.....	44
6.4.4	Langattoman tiedonsiirron luotettavuus.....	45
6.4.5	Mittaustulosten analysointi .....	47
6.4.6	Mittaustulosten visualisointi .....	49
6.5	Testitulosten arviointi .....	51
6.5.1	Langattoman sensoriverkon suorituskyky.....	51
6.5.2	Langattoman sensoriverkon mittaustarkkuus.....	52
<b>7.</b>	<b>Hyödyntämismahdollisuudet .....</b>	<b>53</b>
7.1	Jatkokehitysmahdollisuudet .....	55
7.1.1	Langaton sensoriverkko .....	55
7.1.2	Päätöksentekoympäristö.....	56
<b>8.</b>	<b>Yhteenveto .....</b>	<b>58</b>
	<b>Lähdeluettelo.....</b>	<b>59</b>

## Liitteet

Liite A: Tiedostoformaatit

# Symboliluettelo

GIS	Geographic Information System
FFT	Fast Fourier Transform
FPGA	Field-Programmable Gate Array
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
RMS	Root Mean Square
YVA	Ympäristön Vaikutusten Arviointi
UHF	Ultra High Frequency
WPAN	Wireless Personal Area Network

## Mittaustuloksiin liittyvät tärkeimmät käsitteet

MITTAUSJAKSO	on aikaväli, jonka aikana esiintyviä tapahtumia tarkastellaan (yleensä 1 viikko)
MITTAUSTAPAHTUMA	on jakso, jonka aikana yksittäinen mittausta on käynnissä (yleensä 30 s)
MITTAUSPISTE	on paikka, jossa värähtelyn pääsuuntia mittaavat kolme sensoria sijaitsevat
MITTAUSKANAVA	on väylä, joka seuraa värähtelyä yhdessä mittauspisteen kolmesta pääsuunnasta
MITATTU VÄRÄHTELYNÄYTE	on yhdeltä kanavalta mittaustapahtuman aikana mitattu signaali
MITATTU VÄRÄHTELY	on värähtelynäytteen suurin taajuuspainotettu tehollisarvo
MITATTU VÄRÄHTELYSPEKTRI	on mitattua värähtelyä vastaava värähtelyspektri terssikaistoin
VÄRÄHTELYN TUNNUSLUKU	on 15 mitatusta värähtelystä laskettu tilastollinen maksimi
VÄRÄHTELYN TAAJUUSSISÄLTÖ	on värähtelyn tunnuslukua vastaava värähtelyspektri
TAAJUUSKOMPONENTTI	on värähtelyspektrin yhden terssikaistan arvo

# 1. Johdanto

Liikennetärinän leviäminen väylän ympäristöön on vaikeasti arvioitavissa, koska tärinän haitallisuus riippuu monista epävarmuustekijöistä. Siksi arvioinnin perusteena käytetään yhä useammin maasta mitattua todellista värähtelyä. Pääsääntöisesti värähtely mitataan rakennuspaikalta väylää lähinnä olevan julkisivun kohdalta. Laajemman rakennusalueen suunnittelussa mittauspisteiden välimatkaan vaikuttaa rakennusten sijainnin lisäksi maaperän laatu sekä liikennetyyppi. Näennäisesti pienetkin erot maaperässä ja väylän rakenteessa vaikuttavat värähtelyn suuruuteen. Asuintilojen värähtelyn arvioinnissa tarvitaan värähtely kolmessa pääsuunnassa, joista yksi on pystysuunta ja kaksi muuta ovat vaakasuuntia.

Tutkittavan kentän riittävän kattava tärinäselvitys jää nykyisellään suurten kustannusten vuoksi yleensä puutteelliseksi. Kustannukset aiheutuvat langallisesta mittauksesta, tulosten analysoinnin työläydestä ja asiantuntijatyön tarpeesta. Langallisten mittausten menetelmien suurimpana haittana ovat antureiden ja mittausslaitteen väliset pitkät johtimet (jopa satoja metrejä) ja verkkovirran tarve. Teiden tms. esteiden vuoksi johtimien vetäminen maastoon voi käytännössä olla jopa mahdotonta. Johtimista voi myös aiheutua sähkömagneettisia häiriöitä, tai ne voivat vaurioitua, tai liittimet eivät toimi. Käytännössä mittaukset tehdäänkin vain muutamasta mittauspisteestä, ja siten tulokset eivät välttämättä kuvaa riittävän kattavasti liikenteen aiheuttamaa maaperän värähtelyä mittaushetkellä. Lisäksi mittauksiin liittyy paljon jälkikäsitteilytyötä, mikä edellyttää yleensä asiantuntijakonsulttien käyttöä. Modernit langattomat sensoriverkot tarjoavatkin mahdollisuuden käyttää mittausslaitteita, joiden asennus on nopeaa. Mittaukset voidaan suorittaa edullisimpien laitteiden avulla samalla kertaa laajemmalla alueella.

Tällä hetkellä mittaustulosten yleisin visualisointitapa on tulosten esittäminen taulukkona tai käyränä. Näiden visualisointien tulkintaan tarvitaan usein hyvin paljon asiantuntemusta niin mittaustekniikasta kuin mitatun kohteen ja ilmiön taustasta. Taulukoiden ja käyrien ymmärtämiseksi, ilman edellä mainittua asiantuntemusta, on laadittava useita sivuja selittävää tekstiä. Nykyiset käytössä olevat graafiset informaatiojärjestelmät, kuten esimerkiksi GIS, tarjoavat mahdollisuuden näyttää paikkatietoon sidottua informaatiota.

Tässä julkaisussa esitetään tuloksia projektista, jolla on tavoitteena:

- Kehittää ja päivittää ohjeistusta liikenteen aiheuttamien värähtelyjen mittausten suorittamiseen, analysointiin ja visualisointiin.

- Kehittää langaton sensoriverkko, josta toteutettiin sovellus liikenteen aiheuttamien värähtelyjen mittaamiseen. Tavoitteena oli monikäyttöinen mittaussovellus, joka on laskentatehokas ja uudelleen konfiguroitavissa. Langattoman sensoriverkon suunnittelu ja toteutus perustuu VTT:n kehittämään laitetekniikkaan.
- Kehittää analysointi- ja visualisointityökalut mittaustulosten ja niistä lasketujen tunnuslukujen esittämistä varten. Niiden avulla mittaustuloksia voidaan analysoida mahdollisimman automaattisesti ja analysoidut tulokset voidaan esittää karttapohjilla paikkatietojärjestelmää (GIS, Geographic Information System) hyödyntäen.

Julkaisun osiossa 2 on esitetty yhteenveto maaperävärähtelyjen mittausta ja analysointia varten kehitetystä ohjeistuksesta. Osioissa 3 on esitetty kehitetty mittaustulosten analysointiympäristö, joka sisältää mittaustulosten käsittelyyn tehdyn ohjelmiston sekä menetelmän tulosten esittämiseksi karttapohjilla. Osiossa 4 on esitetty johdanto langattomiin sensoriverkkoihin sovellusalueen näkökulmasta ja osiossa 5 on kuvattu kehitetty langaton sensoriverkkosovellus. Osiossa 6 on esitetty mittaustulokset kehitetyllä mittalaitteella. Julkaisun osiossa 7 esitetään projektin tulosten hyödyntämismahdollisuudet sekä selvitys kansainvälisistä markkinoista liikevärähtelyjen monitoroinnin sovellusalueelta. Yhteenveto on esitetty osiossa 8.

## **2. Liikenteen aiheuttamien maaperävärähtelyjen mittaus ja analysointi**

### **2.1 Värähtelymittausten käyttö liikennetärinän arvioinnissa**

#### **2.1.1 Mittausten tarkoitus**

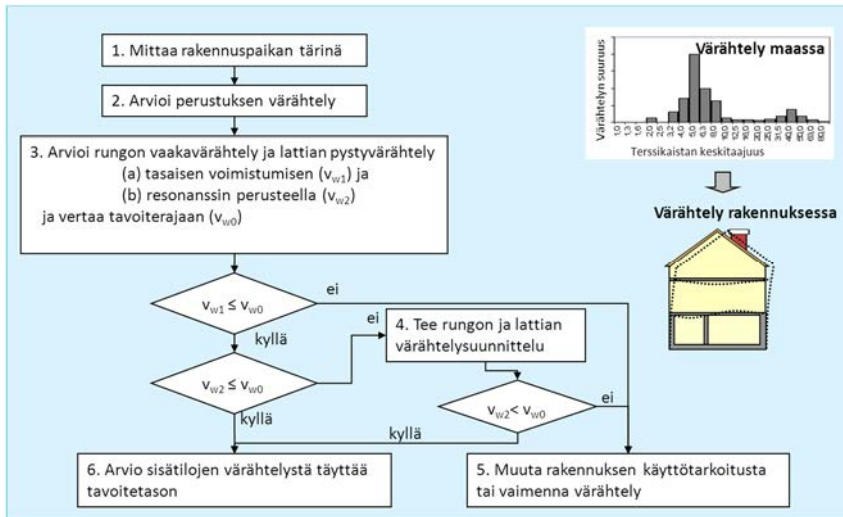
Liikennetärinä on haitta, joka aiheutuu liikenteen aiheuttaman maanperän värähtelyn siirtyessä rakennuksen sisätiloihin. Asuintiloissa esiintyvä värähtely voi olla suurempi kuin maanperän värähtely.

Liikenteen aiheuttama maan värähtely voi olla haitallista myös siitä aiheutuvan runkomelun vuoksi, vaikka tässä julkaisussa keskitytäänkin vain liikennetärinään.

Nykyinen lainsäädäntö edellyttää liikenteestä aiheutuvan tärinähaitan huomiointia kaava- ja rakennesuunnittelussa. Siksi liikennetärinän ja runkomelun vaikutusten arviointi on noussut yhdeksi tärkeäksi tekijäksi maankäytön suunnittelussa.

Suomessa tiet ja radat sijaitsevat tyypillisesti tasaisilla savikkoalueilla, joita ympäröivät kallioiset mäki-alueet. Tällaisilla pehmeikköalueilla matalataajuuksinen värähtely (usein 4–10 Hz) leviää tehokkaasti. Maanperän kerroksellisuuden, paksuusvaihtelujen ja rajapinnoissa tapahtuvan heijastumisilmiön takia värähtelyn leviämistä on laskennallisesti vaikea arvioida.

VTT on tehnyt ehdotuksen kokeellisesta arviointikäytännöstä, joka käsittää sekä maanperän värähtelyn mittaamisen, värähtelyn tunnuslukujen määrittämisen, tulosten esittämistavan ja rakennukseen siirtyvän värähtelyn arvioimisen. Seuraavissa kappaleissa kuvataan lyhyesti ehdotuksen pääsisältö (Kuva 1). Yksityiskohdasta käytäntö on kuvattu VTT Tiedotteessa 2569 [1].



Kuva 1. Liikennetärinän arvioinnin vaiheet.

Ensimmäinen vaihe tärinän arvioinnissa on selvittää liikenteestä aiheutuva maaperän värähtelyn suuruus ja sen taajuussisältö. Värähtelymittaus on tällä hetkellä helpoin ja luotettavin tapa arvioida tärinää etenkin, kun erilaisilla rakenneteknisillä valinnoilla pyritään vaikuttamaan rakennuksen sisätiloihin siirtyvään värähtelyyn.

### 2.1.2 Värähtelyn mittaaminen

Pääsääntöisesti värähtely tulee mitata rakennuspaikalta väylää lähinnä olevan julkisivun kohdalta. Suunniteltavalla kaava-alueella mittauspisteiden väliseen etäisyyteen vaikuttavat rakennusten sijainti, maaperän laatu sekä liikennetyppi. Tapauksesta riippuen mittauspisteiden välimatka on väylän suunnassa yleensä 20–60 m ja väylään nähden kohtisuorassa suunnassa 20–50 metriä. Mittauspisteiden etäisyyden valinnassa tulee ottaa huomioon myös se, että näennäisesti pienet erot maaperässä (pehmeikön paksuus ja reuna-alueet) ja väylän ominaisuuksissa (epätasaisuudet, sillat, rummut, risteävät väylät) voivat vaikuttaa merkittävästi värähtelyn suuruuteen.

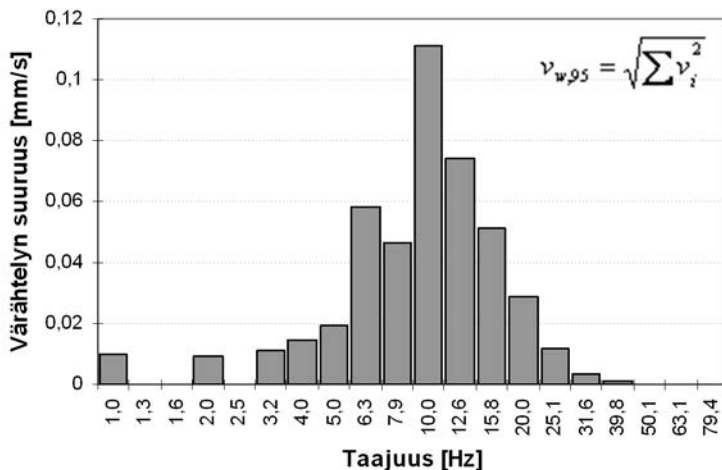
Liikenteestä mitataan värähtelyä niiden tapahtumien aikana, jotka ylittävät asetetun kynnsarvon. Mittausjakson pituus on yleensä yksi viikko, ellei poikkeustapauksessa lyhyemmän tai pidemmän jakson käyttö ole perusteltua. Mittausjakson aikana tulee liikenteen ja väylän kunnon edustaa mahdollisimman hyvin normaali-tilannetta. Mittaukset suositellaan tehtäväksi sulan maan aikaan, ensisijaisesti keväät- ja syyskaudella, jolloin maaperän kosteus on suuri.

Värähtely mitataan erikseen kolmessa suunnassa, joista yksi on pystysuunta ja kaksi muuta ovat vaakasuuntia. Mitatun värähtelyn eri suunnat tarkastellaan erillisinä. Mitatun värähtelyn suuruus ilmoitetaan tapahtumasta lasketun taajuuspainotetun

suurimman hetkittäisen kiihtyvyyden tehollisarvon ( $a_w$ , mm/s<sup>2</sup>) avulla. Taajuuspainotuksen tarkoitus on muuttaa värähtelyn eri taajuuskomponentit ihmisen herkkyyden suhteen samanarvoisiksi. Taajuuspainotus tehdään ISO 8041:n [2]  $W_m$ -painotuksen mukaan. Tarkasteltava taajuusalue on 1–80 Hz. Tulokset ilmoitetaan taajuuspainotetun nopeuden tehollisarvon ( $v_w$  mm/s) avulla. Muunnos tehdään lausekkeella  $v_w = a_w / 35,7$  [3]. Lisäksi tapahtumasta lasketaan ilmoitettua tehollisarvoa vastaava värähtelyn värähtelyspektri 1/3-oktaavikaistoittain (terssikaistoittain) taajuusalueella 1–80 Hz.

### 2.1.3 Mitatun värähtelyn tunnusluvun ja taajuussisällön määrittäminen

Kunkin värähtelykomponentin suuruus ilmoitetaan värähtelyn tunnusluvun  $v_{w,95}$  ja sitä vastaavan värähtelyn taajuussisällön avulla (kuva 2). Tunnusluku kuvaa mittausjakson aikana esiintyvää värähtelyn tilastollista maksimiarvoa, joka perustuu mittausjakson aikana mitattuun 15 suurimpaan värähtelyyn. Valitut tapahtumat ositetaan liikenteen aiheuttamiksi kuva-aineiston, eri pisteissä tapahtuvien tapahtumien samanaikaisuuden ja liikenteen aikataulujen avulla. Haluttaessa voidaan nämä näytteet valita kalustotyypeittäin (esim. tavarajunat lastattuna, tavarajunat tyhjinä, pikajunat, IC-junat, Pendolinot, lähijunat, kuorma-autot, linja-autot, paketti-autot). Lisäksi määritetään tunnuslukua vastaava värähtelyn taajuussisältö niistä 15 värähtelyspektristä, jotka ovat värähtelyn tunnusluvun perusteena. Värähtelyspektri määritetään siten, että siitä laskettava värähtelyn suuruus on sama kuin värähtelyn tunnusluku ( $v_{w,95}$ ).



**Kuva 2.** Esimerkki värähtelyspektristä, joka vastaa värähtelyn tunnuslukua  $v_{w,95} = 0,18$  mm/s.



## 2.2 Sisätilojen värähtelyn arviointi

Sisätilojen värähtely riippuu sekä maaperästä mitatun värähtelyn suuruudesta että sen taajuussisällöstä. Arvioinnissa käytetään kahta eri lähestymistapaa, joista toinen perustuu värähtelyspektrin eri terssikaistojen tasaiseen voimistumiseen ja toinen tietyn taajuusalueen voimistumiseen resonanssissa. Molempien arvioiden on oltava asetettua värähtelyrajaa pienempiä. Resonanssitarkastelussa mm. rakennuksen kerrosmäärä ja lattioiden jänneväli vaikuttavat sisätilojen värähtelyn suuruuteen.

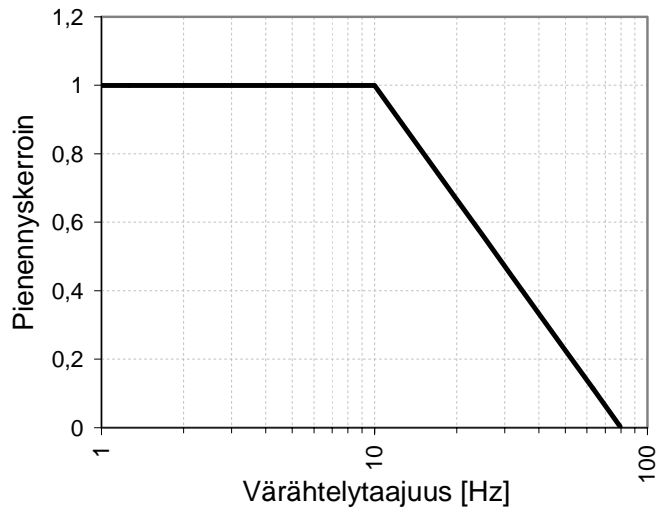
### 2.2.1 Suositus värähtelyrajaksi asuintiloissa

Suosittelava tavoitteellinen värähtelyraja sisätilojen värähtelylle on uusilla asuinalueilla 0,3 mm/s ja vanhoilla asuinalueilla 0,6 mm/s ([4]). Tämä suositus enimmäisarvoksi on otettu käyttöön myös Liikenneviraston ohjeistuksessa [5]. Tavoite koskee sekä asuintiloissa esiintyviä pysty- että vaakavärähtelyjä. Mikäli kyse ei ole asuinrakennuksesta, ja tilojen käyttötarkoitus on sellainen, että liikenteen ei katsota haittaavan lepoa (esim. toimistot), värähtelyraja voi olla kaksinkertainen esitettyihin arvoihin nähden.

Värähtely, jonka tehollisarvo on 0,6 mm/s, koetaan yleensä hyvin epämiellyttäväksi, ja sen aiheuttamasta häiriöstä usein myös valitetaan. Myös rajaa 0,3 mm/s vastaava värähtely voi olla selvästi havaittavaa, mutta häiriöstä valitetaan harvoin. Vasta arvoa 0,1 mm/s pienemmät värähtelyt ovat niin pieniä, että ihminen ei niitä yleensä havaitse.

### 2.2.2 Arvio rakennuksen perustukseen siirtyvästä värähtelystä

Rakennuksen värähtelyn arviointi aloitetaan määrittämällä perustuksen värähtelyspektrit kolmessa pääsuunnassa. Ne saadaan kertomalla maan eri suuntia vastaavat värähtelyspektrit kuvassa 3 esitetyllä pienennyskertoimella. Niiden avulla lasketaan värähtelyn perustuksen värähtelyn tunnusluvut eri suunnissa kuvan 2 ylänurkassa esitetyn summalausekkeen avulla.



**Kuva 3.** Pienennyskerroin maasta perustukseen siirtyvän värähtelyn arvioimiseksi.

### 2.2.3 Tasaiseen voimistumiseen perustuva arvio sisätilojen värähtelystä

Tasaiseen voimistumiseen perustuva arvio rakennuksen värähtelystä saadaan kertomalla perustuksen värähtelyn suurin tunnusluku arvolla 1,5. Jos lattia on kuitenkin suorassa yhteydessä maahan, kuten esimerkiksi yksikerroksinen talon maanvarainen alapohja, voidaan käyttää pienempää kerrointa 1,0.

### 2.2.4 Resonanssiin perustuva arvio sisätilojen värähtelystä

Lattian värähtelyn suuruus mahdollisessa resonanssissa lasketaan kertomalla perustuksen pystysuuntaista värähtelyä esittävän värähtelyspektrin suurin taajuuskomponentti kertoimella 6. Vastaavasti rungon värähtelyn suuruus mahdollisessa resonanssissa saadaan kertomalla vaakasuuntaisten värähtelyspektrien suurin taajuuskomponentti kertoimella 4.

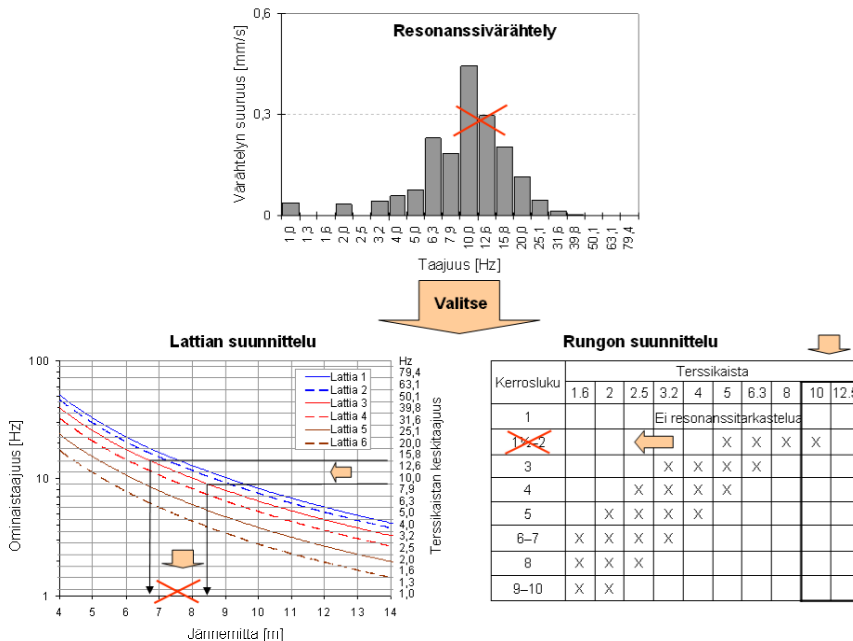
### 2.2.5 Tarkennettu värähtelysuunnittelu

Tarkennettua värähtelysuunnittelua voidaan hyödyntää, mikäli laskettu mahdolliseen resonanssiin perustuva värähtelyn tunnusluku on suurempi kuin asetettu rakennuksen värähtelyn tavoiteraja, mutta laskettu tasaiseen voimistumiseen perustuva värähtelyn tunnusluku täyttää asetetun vaatimuksen.

Tarkennetussa värähtelysuunnittelussa rakennuksen kerrosluku ja lattioiden jänneväli valitaan siten, että rakenteen alin ominaistaajuus ei satu perustuksen värähtelyspektrissä hallitsevalle taajuusalueelle. Kuvan 4 esimerkissä yläkuva esittää

## 2. Liikenteen aiheuttamien maaperävärähtelyjen mittaus ja analysointi

arvioita sisätilojen värähtelystä, jos resonanssi pääsee syntymään, ja alakuvat esittävät lattian ja rungon ominaistaajuuksia. Esimerkin tapauksessa värähtely on tavoiterajaa 0,3 mm/s pienempi, jos taajuus ei satu tertsikaistoille 10,0 Hz tai 12,6 Hz. Jos kuvan värähtelyspektri mahdollisessa resonanssissa esittää lattian pystysuuntaista värähtelyä, ja jos lattiaksi valitaan lattiatyypin 3, jänneväli ei saa olla 6,7–8,4 m. Jos taas esimerkin värähtelyspektri mahdollisessa resonanssissa kuvaa rungon vaakavärähtelyä, rakennuksen ei tule olla kaksikerroksinen.



**Kuva 4.** Periaatekuva värähtelyspektrin vaikutuksesta kerrosluvun ja lattian jännemitan valintaan.

## 3. Kehitetty mittaustulosten analysointiympäristö

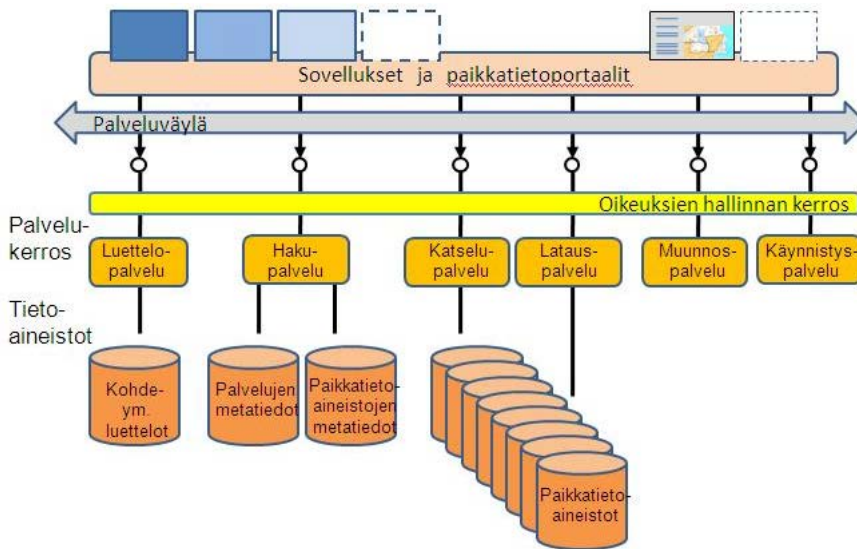
### 3.1 Kehitystyön tarkoitus

Kehitettyllä sovellusesimerkillä pyritään havainnollistamaan, miten liikennetärinän arvioinnissa voidaan hyödyntää paikkatietojärjestelmän mahdollisuuksia.

Paikkatietoympäristön (GIS) käyttö on voimakkaasti yleistymässä. Paikkatiedolla tarkoitetaan kaikkea tietoa, joka sisältää välittömän tai välillisen viittauksen tiettyyn paikkaan tai maantieteelliseen alueeseen. GIS tarjoaa erinomaisen vaihtoehdon erityyppisten aineistojen yhdistämiseen ja tulosten esittämiseen visuaalisesti. Sen suurin hyöty on yleisen tiedon yhdistäminen spesifiseen tietoon. Paikkatiedon mahdollisuuksia esitellään mm. Paikkatietoikkuna-verkkosivustolla (<http://www.paikkatietoikkuna.fi>), jonka kehittämisestä vastaa Maanmittauslaitos yhteistyössä usean muun paikkatiedon tarjoajan kanssa.

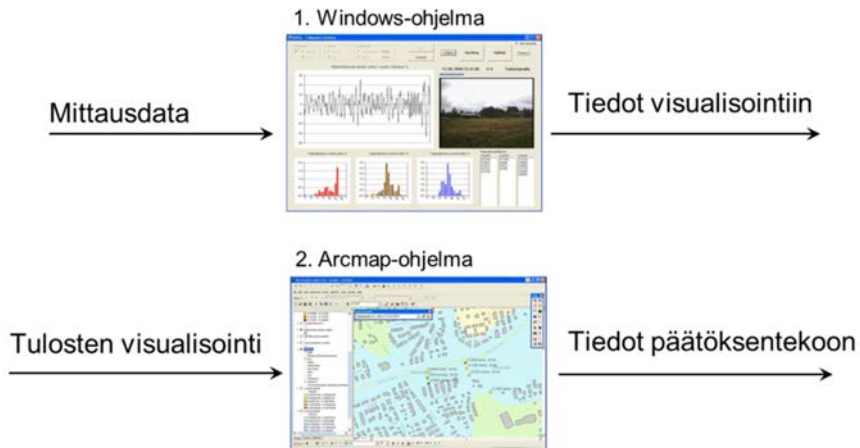
GIS-kartat ovat interaktiivisia. Käyttäjät pystyvät liikuttelemaan niitä tietokoneen ruudulla, tarkentamaan haluamaansa kohteeseen ja valitsemaan, mitä tietoja kartalla on näkyvissä. Paikkatietomarkkinat ovat kehittyneet kohti verkkopalveluja. Niin kaupalliset kuin hallinnonkin verkkopalvelut tähtäävät paikkatietoaineistojen helppoon saavuttamiseen tietojen selailussa ja eri sovelluksia varten. Verkkopalvelut mahdollistavat hajautetusti eri tahoilla ylläpidettyjen paikkatietoaineistojen teknisen yhdistämisen, kun aineistot ovat saatavilla yhtenäisten palvelurajapintojen avulla (kuva 5).

Paikkatietoinfrastruktuuri tarjoaa paikkatiedot yhtäältä katselupalvelussa karttakuvina ja toisaalta latauspalvelussa paikkatietokohteina joko kyselykäytössä tai ladattavina tiedostoina. Karttakuvapalvelussa eri paikkatietoteemat ovat tarjolla omina kuvatasoina, joita käyttäjä voi valintansa mukaan katsoa päällekkäin eri mittakaavoissa. Kyselykäytössä käyttäjä voi rajata alueen, josta poimitaan kohteet annettujen ehtojen mukaan. Latauspalvelun perinteinen muoto on paikkatietoaineiston kopion lataaminen ennalta määritellyinä tiedostoina esimerkiksi karttalehdittäin (<http://www.paikkatietoikkuna.fi>).



**Kuva 5.** Paikkatietoinfrastruktuurin kokonaisuus eri palveluineen (<http://www.paikkatietoikkuna.fi>).

Kehitetty mittaustulosten analysointiympäristö käsittää interaktiivisen Windows-ohjelman mittaustulosten käsittelyä varten sekä tulosten visualisoinnin Arcmap-ohjelmalla (kuva 6).



**Kuva 6.** Periaatekuva mittaustulosten käsittelystä ja visualisoinnista.

## 3.2 Mittaustulosten jälkikäsitely

Mittaustulosten tarkistus ja valinta, sekä tulosten jälkikäsitely visualisointia varten, tehtiin tarkoitusta varten laaditulla interaktiivisella Windows-ohjelmalla (kuva 7). Ohjelman avulla arvioidaan mittauksen tuottamaa informaatiota tapahtumasta. Mittauslaitteisto tallentaa ajanhetken, värähtelyn suuruudet kanavittain, värähtelyspektrit kanavittain, näytteen mitatusta signaalista sekä kuvan tapahtumasta.



Kuva 7. Mittaustulosten tarkistus ja valinta.

Ohjelma käy läpi mittaustapahtumat ja näyttää niiden tulokset. Tulosten vertailun perusteella käyttäjä hylkää tai hyväksyy tapahtuman. Mittaustapahtumista voidaan käydä läpi kaikki tai vain värähtelyn tunnuslukujen määrittämistä varten tarvittava määrä. Mittaustapahtumia on yleensä enemmän kuin 15, koska eri kanavien suurimmat värähtelyt eivät aina aiheudu samasta tapahtumasta. Kesken oleva tarkastus voidaan tallentaa tiedostoon, josta sitä voidaan jatkaa myöhemmin.

Ohjelmassa mittausdatalle tehdään kanavakohtaisesti seuraavat toimenpiteet:

- Tarkistetaan jokaisen tapahtuman oikeellisuus. Tarkastaminen on tarpeellista, jotta virheelliset tapahtumat voidaan poistaa lopullisista tuloksista.
- Lasketaan mitatun värähtelyn tunnusluku ja sitä vastaava taajuussisältö (värähtelyspektri).
- Lasketaan tasaiseen voimistumiseen perustuva arvio sisätilojen värähtelystä.

- Lasketaan mahdollisen lattian resonanssiin perustuva arvio (värähtelyspektri) sisätilojen pystyvärähtelystä (lattia).
- Lasketaan mahdolliseen rungon resonanssiin perustuva arvio (värähtelyspektri) sisätilojen vaakavärähtelystä.
- Kirjoitetaan tulokset teksti- ja kuvatiedostoiksi visualisointiohjelman ymmärtämään muotoon.

Liitteessä A on esitetty tiedostoformaattit tuloksista laadittaville tekstitiedostoille.

### 3.3 Mittaustulosten visualisointi

GIS-ohjelmistoista käytetyimpiä ovat ESRIn ArcGIS, MapInfo, Intergraphin Geomedia ja Tekla GIS Basic. Jokainen näistä tarjoaa työkalut tehokkaiisiin paikkatietoanalyysiin sekä visualisointiin. Visualisointiesimerkki on toteutettu ArcGIS-ohjelmistolla, koska suuri osa kunnista ja kaupungeista ovat ArcGISin käyttäjiä.

Visualisointia varten tehdään Arcmap-dokumentti, jonka lähtötiedot luetaan mittaustulosten jälkikäsitteilyohjelman tallentamista tiedostoista. Tulokset esitetään Arcmapin eri kerroksina (layer). Tuloksista esitetään vain ne oleelliset tiedot, joita tarvitaan päätöksenteossa (taulukko 1).

Arcmap-dokumenttiin voidaan yhdistää läpinäkyvästi muita kerroksia, kuten tiestö, rakennukset ja maaperätieto tai satelliittikuva. Kaupungeilla ja kunnilla on lisäksi omia taustakarttojansa, joihin tulokset voidaan liittää. Esimerkiksi pääkaupunkiseudun rakennus löytyy HSY:n SeutuCD:stä (<http://www.hsy.fi/seututieto/kaupunki/paikkatiedot>), joka on vuosittain koottava kuntien suunnittelijoiden, tutkijoiden ja päätöksentekijöiden käyttöön tarkoitettu tietopaketti. Maaperätieto on saatavilla paikkatietomuodossa ArcGISiin GTK:n sivuilta.

### 3. Kehitetty mittaustulosten analysointiympäristö

**Taulukko 1.** Arcmap-dokumentin liikennetärinä-osioon liittyvät kerrokset. Yksi kerros käsittää kaikkien mittauspisteiden tiedot.

Kerroksen nimi	Kuvaus
Mittauspisteet	- Mittauspisteiden numerot
Mittaus – x-suunta Mittaus – y-suunta Mittaus – z-suunta	- Mitatun värähtelyn tunnusluku ja värähtelyssä dominoiva taajuuskomponentti. - Pisteeseen liitetyn ponnaudusikkunan avulla voidaan lukea värähtelyn taajuussisältö.
Mittaus – suurin	- Suurin x-, y- ja z-suuntien värähtelyn tunnusluvuista
Lattian pystyväärähtely Rungon vaakavärähtely	- Arvio sisätilojen värähtelystä tasaiseen voimistumiseen perustuen. Rungon vaakasuunnan värähtely on suurempi x- ja y- suuntaisista arvoista. - Pisteeseen liitetyn ponnaudusikkunan avulla voidaan lukea arvio sisätilojen värähtelystä mahdollisessa resonanssissa. Rungon vaakasuunnan värähtelyspektrissä tietyn terssikaistan taajuuskomponentti edustaa suurempaa x- ja y- spektrin arvoista.
Mittaus – Tasa-arvo – x Mittaus – Tasa-arvo – y Mittaus – Tasa-arvo – z	- Tasa-arvokäyrät, jotka perustuvat mitattuihin värähtelyjen tunnuslukuihin x-, y- ja z-suunnissa.

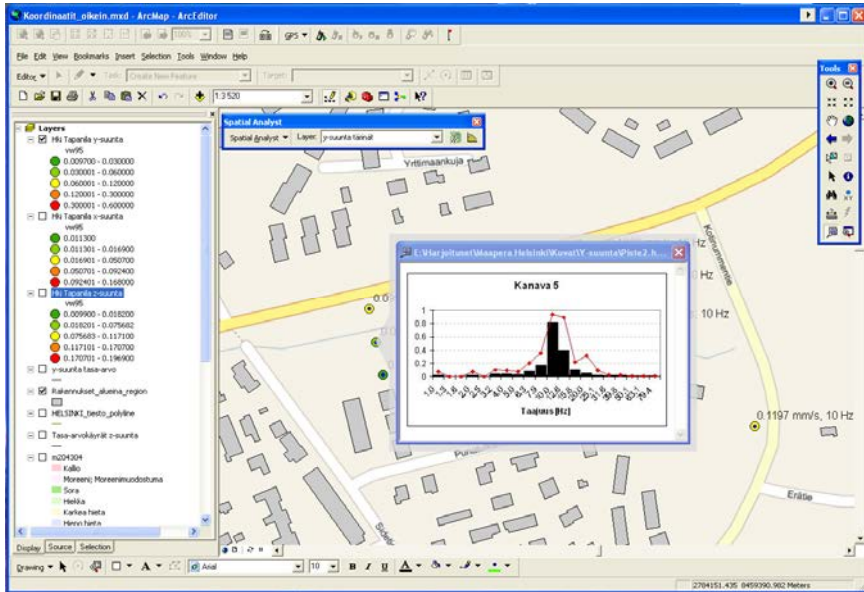
Mitattuja värähtelyn tunnuslukuja sekä arvioituja rungon ja lattian värähtelyjä tarkastellaan omina kerroksinaan. Valittu kerros valitaan näytöllä olevista valitsimista. Värähtely esitetään lukuarvona, jota havainnollistetaan mittauspisteen värillä. Lukuarvoa vastaava värähtelyspektri luetaan mittapisteeseen liitetyn ponnaudusikkunan avulla (kuva 8).

Arcmap-dokumentissa esitettyjen tietojen avulla voidaan päätellä, millaiseen käyttöön tiettyyn mittauspisteeseen sijoitettu rakennus soveltuu ja milloin rakennuksen rungolle tai lattialle pitää tehdä tarkennettu värähtelysuunnittelu. Kaava-suunnittelun päätöksenteossa voidaan käyttää apuna VTT:n ohjeiden [1] kuvaa 9 (rungon resonanssi, kerrosten määrä) ja saman julkaisun liitettä B (lattian resonanssi, jännevälin valinta).

Mittaustuloksista laaditaan Arcmap-dokumentin lisäksi myös tavanomainen mittausraportti johtopäätöksineen ja suosituksineen.



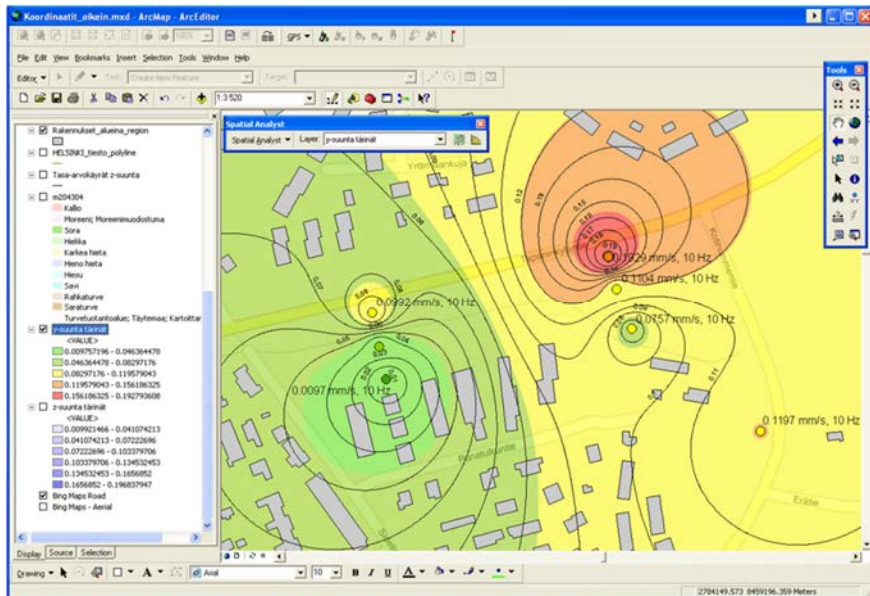
### 3. Kehitetty mittaustulosten analysointiympäristö



**Kuva 8.** Mittaustulokset yhdistettynä tiestö-, rakennus- ja maaperätietoihin (eri värit).

Arcmapin Spatial Analyst -lisäosa mahdollistaa tasa-arvokäyrien piirtämisen XY-pisteaineiston pohjalta. Pisteaineistona voidaan käyttää mittauspisteitä ja niissä mitatun värähtelyn tunnuslukuja. Spatial Analystin työkalu Interpolate to Raster tarjoaa mahdollisuuden mittapisteiden väliarvon interpoloinnille. Demotapauksen vähäinen mittapistemäärä ja pitkät välit pisteiden välillä eivät riitä tuottamaan luotettavaa tasa-arvokäyrästä (kuva 9). Käyrät eivät myöskään ota huomioon rakennuksia, maaperätietoa tai tärinälähdettä (tietä), vaan pohjautuvat pelkästään interpolointiin pisteiden välillä.

### 3. Kehitetty mittaustulosten analysointiympäristö

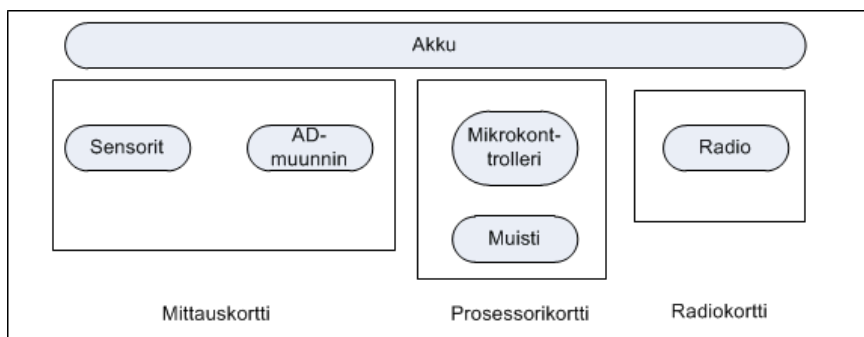


Kuva 9. Tasa-arvokäyrät ja interpoloitu tärinäkartta.

## 4. Langaton sensoriverkko

### 4.1 Yleistä langattomista sensoriverkoista

Langaton sensoriverkko muodostuu sensorisolmuista, jotka on levitetty tietylle alueelle tai kohteeseen mittaamaan haluttuja suureita. Sensorisolmut ovat pienikokoisia akuilla varustettuja yksiköitä. Sensorisolmujen sensorien mittaukset välitetään joko sellaisenaan tai käsiteltynä sensorisolmuilta verkon keskusyksikölle langattomasti. Sensoriverkko koostuu siis keskusyksiköstä ja sensorisolmuista (kuvat 10 ja 11), jotka puolestaan koostuvat mittauksen suorittavasta sensoreista, mittauskortista (sensorit, analoginen/digitaalinen (A/D-muunnin), prosessorikortista (prosessori, muisti), akusta ja radiokortista (WPAN). Komponenttien valintaan vaikuttaa mitattava suure, mittaustaajuus, mitä mittauksista lasketaan, tarvitaanko mittausten tallennusta sensorisolmuun ja miten paljon mittauksia tai niistä laskettuja tunnuslukuja siirretään solmujen ja keskusyksikköön välillä. Verkon keskusyksikköön talletetaan mittauksia tai niistä laskettuja tunnuslukuja, joista ne voidaan siirtää edelleen loppukäyttäjien palvelimille esimerkiksi operaattoriverkkojen kautta tai ne voidaan lukea myöhemmin esimerkiksi keskusyksikköön kytketyllä PC:llä.



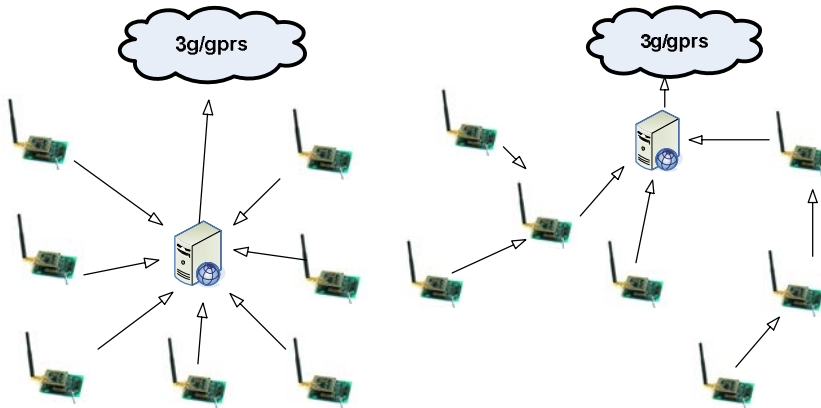
**Kuva 10.** Langaton sensorisolmu.



**Kuva 11.** Esimerkki sensorisolmun elektriniikasta.

Langattomissa sensoriverkkosovelluksissa pyritään toteuttamaan mahdollisimman pienikokoisia ja vähän tehoa kuluttavia sensorisolmuja. Sensoriverkon solmut saavat yleensä virtansa akuista, joita voidaan ladata esimerkiksi pienitehoisilla energiaharvestereilla. Vaatimus pienestä tehonkulutuksesta asettaa rajansa käytettäville radiotekniikoille ja tiedonkäsittelykapasiteetille.

Langattomissa sensoriverkoissa solmujen etäisyydet toisistaan tai keskusyksikössä voivat vaihdella muutamista metristä aina jopa kilometreihin asti riippuen käytettävästä radiotekniikasta ja siirrettävästä informaatiomäärästä. Langattoman sensoriverkon rakenteelle eli topologialle on useita vaihtoehtoja. Kuvassa 12 on esitetty kaksi tyypillisintä topologiaa. Sen valintaan vaikuttavat mm. käytettävä radiotekniikka, siirrettävä tiedon määrä ja solmujen määrä. Kuvassa esitettyä tähti-verkkotopologiaa käytetään yleensä silloin, kun siirrettävä tiedon määrä on iso ja solmujen etäisyys keskusyksiköstä on radion kantaman rajoissa. *Mesh*-verkko-tyypistä rakennetta voidaan käyttää silloin, kun siirrettävä tiedon määrä on pieni ja sensorin solmut ovat laajemmalla alueella. Näin solmujen välittämää tietoa voidaan välittää keskusyksikölle muiden solmujen kautta. Sensoriverkko voi koostua myös useammasta aliverkosta, jolloin sensoriverkolla voidaan kattaa laajempi alue.



**Kuva 12.** Langattoman sensoriverkon topologioita. Tähtiverkko vasemmalla ja oikealla *mesh*-verkko.

## 4.2 Sensorisolmujen osat

Langattoman sensoriverkon sensorisolmu koostuu sensorien lisäksi neljästä eri komponentista: mittauskortti, prosessorikortti, WPAN-kortti (radio) ja tehonlähde (akku). Lisäoptiona voidaan tarvita datan tallennukseen tarkoitettu muisti sekä reaaliaikakello, jos mittaukset halutaan varustaa aikaleimalla ja tallentaa sensorisolmuun.

### 4.2.1 Mittauskortti

Haluttuja suureita mittaavat sensorit on kytketty mittauskorttiin. Mittauskortin tehtävänä on tyypillisesti suodattaa signaalia ja muuttaa analogiset signaalit digitaaliseen muotoon AD-muuntimella signaalien jatkokäsittelyä varten prosessorikortille. Analogisia signaaleja suodatetaan joko analogisella suodattimilla tai tähän tarkoitukseen suunnitelluilla uudelleen konfiguroitavilla signaaliprosessoreilla. Esimerkkejä signaaliprosessoreista ovat Quickfilter Technologiesin ja Anadigmin valmistamat signaaliprosessorit. Analogiset suotimet ovat toteutettu mittauskorteilla elektroniikkakomponenttien eivätkä ne siten ole uudelleen konfiguroitavia. AD-muuntimen valintaan vaikuttavat mittausresoluutiovaatimukset. AD-muuntimen resoluutio ilmaistaan bittienä. Yleisesti käytettyjä ovat 10, 12, 14 ja 16 bittiä. Mitä korkeampi lukema on, sitä parempi on resoluutio.

### 4.2.2 Prosessorikortti

Laitteistoalustan ytimen, prosessorikortin, laskentaa ja datansiirtoa suorittavan prosessorin valinta riippuu tehon-, virrankulutus-, oheisliitântä-, koko- ja hintavaatimuksista. Markkinoilta löytyy hyvin laaja skaala tällaiseen käyttöön soveltuvia eritehoisia suorittimia järeistä FPGA-piireistä ja dsp-prosessoreista aina pieniin 8-bittisiin ja jopa 4-bittisiin kontrollereihin. FPGA-piireillä voidaan toteuttaa erittäin suorituskykyinen ja joustavasti konfiguroitava prosessorikortti. FPGA-piiri kuluttaa kuitenkin tehoa ja vaatii enemmän oheiskomponentteja kuin mikrokontrolleri.

Mikrokontrolleri sisältää tyypillisesti prosessorin lisäksi tarvittavan flash-ohjelmamuistin ja sram-työmuistin. Mikrokontrollerit sisältävät usein myös sisäisen oskillaattorin, joten ne eivät vaadi toimiakseen juuri mitään oheiskomponentteja. Usein mikrokontrollereihin on integroitu myös AD-muunnin, joskin sen tarkkuus on usein vaatimaton (8–12bit). Lisäksi mikrokontrollerit sisältävät erilaisia valmiita sarjaliitântöjä, joihin voidaan liittää oheiskomponentteja tai digitaalisia sensoreita. Markkinoilta löytyy myös mikrokontrollereita, joihin on integroitu erilaisia radiopiirejä. Tällaisella ratkaisulla päästään hyvin pieneen kokoon. Myös virrankulutus saadaan pieneksi, koska radion ja kontrollerin virransäästöominaisuudet toimivat optimoidusti.

Joissakin tapauksissa voi olla järkevää yhdistää pienitehoinen mikrokontrolleri ja suuritehoinen FPGA-piiri, jolloin järjestelmä voidaan rakentaa niin, että FPGA-piiri hoitaa mittauksen sekä laskennan ja on aktiivisena vain tähän tarvittavan ajan. Muut toiminnot, esim. tiedonsiirto ja järjestelmän monitorointi, voidaan hoitaa mikrokontrollerilla.

### 4.2.3 WPAN-kortti

Markkinoilta löytyy useita erilaisia langattomaan mittaukseen soveltuvia radiomoduulivaihtoehtoja. Vaihtoehtoja löytyy luvanvaraisista sekä luvasta vapaista radioista. Radiomoduulin valinta riippuu lähinnä virrankulutus-, kaistanleveys- ja kantomatkavaatimuksista. Myös radion liityntärajapinta voi asettaa erityisvaatimuksia. Tyypillisesti radiomoduulit liitetään mikrokontrolleriin. Osassa radiomoduuleissa on sisäänrakennettu protokollapino, ja toiset taas toimivat pelkinä lähetin/vastaanottimina, jolloin protokolla voidaan toteuttaa vapaasti.

Maaperävärähtelyjen mittausta ajatellen kiinnostavimpia ovat IMS (luvasta vapaalla) -taajuusalueella toimivat muutaman sadan metrin kantomatkan kykenevät radiomoduulit. Tällaiseen kantomatkan päästään hyvinkin pienitehoisilla radioilla, mutta silloin täytyy käyttää vahvistavia suunta-antenneja, joka taas asettaa vaatimuksia sensorisolmun sijoitukselle. Kaistaleveysvaatimusta on vaikea määritellä vielä tarkasti, koska se riippuu mittaustaajuudesta sekä datan esikäsittelystä sensorisolmussa. Todennäköisesti maaperävärähtelyjen mittaussovellukseen riittävät 433 tai 868 MHz:n IMS-taajuudella toimivat kapeakaistaiset radiomoduulit, joilla vaadittu kantomatkka saavutetaan helposti ilman suunta-antennia.

#### 4.2.4 Tehonlähde

Akkutekniikan kehittymisestä huolimatta pitkiin sensorisolmujen toiminta-aikoihin päästään käyttämällä pienitehoisia komponentteja, minimoimalla komponenttien päälläoloajat, käyttämällä isokokoisia akkuja tai keräämällä energiaa ympäristöstä. Tyypillisimpiä ympäristön energianlähteitä ovat aurinkoenergia ja tuuli. Muita energialähteitä ovat esimerkiksi värähtelyt, lämpötilamuutokset ja radio-aallot. Tosin viimeksi mainitut ovat vielä kehitysasteella eivätkä ne ole vielä tällä hetkellä riittävän kehittyneitä tehonlähteiksi langattomiin sensoriverkkosovelluksiin. Aurinkokennot ovat tyypillisin keinot kerätä energiaa ympäristöstä.

Tyypillisessä langattomassa sensoriverkon sovelluksessa verkon sensorisolmut ovat valta-osan ajasta erittäin vähän virtaa kuluttavassa lepotilassa. Langattomissa akkukäyttöisissä sensoriverkoissa pyritään käyttämään mahdollisimman pienitehoisia komponentteja. Lisäksi langattoman sensoriverkon tehonkulutusta pyritään hallitsemaan ohjelmistotasolla minimoimalla sensorisolmujen päälläoloajat. Silloin kuin ei ole mitattavaa tai siirrettävää tietoa, solmua pyritään pitämään lepotilassa, jolloin energiakäyttö on erittäin vähäistä. Valtaosan tehontarpeesta sensorisolmussa vievätkin radio ja prosessori. Sovelluksissa, joissa sensorit mittaavat pidemmän jakson, sensorien tehontarve voi olla huomattavan iso. Kaikista pienitehoisin kontrolleri tai radio ei ole välttämättä aina paras valinta, vaan parempaan aktiivi-lepotila-suhteeseen voidaan päästä hiukan tehokkaammilla piireillä, jotka suoriutuvat nopeammin tarvittavista tehtävistä.

#### 4.3 Maaperävärähtelyjä mittaavien langattomien sensoriverkkojen vaatimukset liikennevärähtelyjen monitoroinnissa

Liikennevärähtelyjen mittaaminen maaperästä on hyvin lähellä rakenteiden kunnon monitorointia, johon liittyen on tehty lukuisia sovelluksia. Niissä langattoman sensoriverkon hyödyt tulevat esille; langaton sensoriverkko on nopea asentaa, ei tarvita pitkiä johdotuksia ja siten langattoman sensoriverkon käyttöönotto on huomattavasti halvempaa ja nopeampaa kuin langallisen verkon. Aiheesta on tehty sovelluksia erityisesti siltojen kunnon monitoroinnissa, joissa tarkoitus on monitoroida siltojen kuntoa ja mahdollisia liikenteen, maanjäristysten ja myrskyjen aiheuttamia vaurioita. Monet kehitetyistä sovelluksista [7-14] ovat syntyneet tutkimustyön tuloksena ja niissä on pyritty hyödyntämään MEMS-tekniikkaan perustuvia kiihtyvyyssensoreita värähtelyjen mittauksessa.

Merkittävin ero tässä työssä kehitettävässä sovelluksessa ja esimerkiksi siltojen ja rakennusten kunnon monitoroinnissa löytyy mitattavasta kohteesta. Sovelluksella mitataan liikenteen aiheuttamia värähtelyjä maaperästä, jossa monitoroitavat värähtelyjen amplitudit ovat heikompia kuin rakenteissa, ja siten erityinen huomio on käytettävissä sensoreissa. Lisäksi mittauksista laskettavat tunnusluvut poikkeavat rakenteiden monitorointisovelluksista. Projektin sovelluksessa signaalikäsittelyä tehdään jo verkon sensorisolmuissa. Tosin solmuissa tehtävä laskentaka-

pasiteetti on rajallinen, eikä kovin pitkäkestoista laskentaa voi tehdä verkon toiminta-ajan kärsimättä.

Matalataajuisia maaperävärähtelyjä mitataan tyypillisesti noin 100–200 Hz:n taajuuksilla. Pienestä mittaustaajuudesta huolimatta laskentaa voidaan joutua tekemään jo sensoriverkon solmuissa siirrettävän tiedonmäärän pienentämiseksi, mikäli käytetään pidemmän kantaman radioita, joilla on pienempi tiedonsiirtokapasiteetti. Laskenta kasvattaa tehontarvetta, ja tarvitaan tehokkaampi prosessori. Tosin tehontarve ei välttämättä aina kasva, koska nopeampi prosessori suoriutuu laskennasta nopeammin ja aktiiviaika suhteessa solmun lepoaikaan pienenee. Sama pätee langattomaan tiedonsiirtoon: mitä nopeampi radio, sitä nopeammin se suoriutuu tiedonsiirrosta. Käytettävältä radiotekniikalta edellytetään myös reilua kantamaa ja hyvää häiriönsietokykyä, varsinkin solmujen etäisyyksien kasvaessa (tähtiverkkotopologia). Liikennetärinäsovelluksessa solmujen etäisyydet keskusyksikköön voivat olla jopa satoja metrejä. Pitkät etäisyydet rajoittavat tiettyjen radioteknologioiden käyttöä. Myös sensorisolmujen sijainti hyvin lähellä maan pintaa vaikuttaa käytettävän radioteknologian valintaan; maastoesteet kuten esimerkiksi pensaat, ruohikot ja puut estävät radio-aaltojen etenemistä.

Lyhyen kantaman radiotekniikoista rakenteiden monitoroinnissa käytetään pääasiassa standardia IEEE 802.15.4 hyödyntäviä radioteknologioita. Syynä on standardiin perustuvien komponenttien pieni tehonkulutus sekä riittävän pitkä kantama ja suuri tiedonsiirtokapasiteetti. Tällä radioteknologialla päästään tyypillisesti 100 metrin kantamaan 250 kbs:n kapasiteetilla. Käytettävän radiotekniikan ja komponentinvalmistajan valintaan vaikuttaa myös se, mikä tulee olemaan verkon topologia sekä tarvittava tiedonsiirtokapasiteetti. Esimerkiksi, mikäli tiedonsiirtokapasiteetti voidaan pitää riittävän alhaisena, voidaan käyttää pienemmän tiedonsiirtokapasiteettiin ja pienen tehonkulutuksen UHF-tekniikkaan perustuvia pidemmän kantaman radioita.

Tässä työssä mitataan pienitaajuuksisia värähtelytasoja, mikä tarkoittaa, että käytettäviltä sensoreilta vaaditaan suurta herkkyyttä ja pientä kohinasoaa. Sensorien pitäisi olla riittävän herkkiä mittaamaan pienitaajuisia (4–10 Hz) ja pieniamplitudisia värähtelyjä. Mikäli sovellusta käytettäisiin myös runkomelun arviointiin, sensoreilta edellytettäisiin, että ne pystyisivät mittaamaan värähtelyjä aina 500 Hz asti.

Tässä työssä kehitettävällä langattomalla sensoriverkolla on tarkoitus mitata värähtelyjä noin hehtaarin suuruiselta alueelta 10–15 solmulla. Verkon keskusyksikön sijainti ei voi olla aina keskellä verkkoa. Sen sijainti voi olla jopa verkon peittoalueen ulkopuolella. Etäisyys keskusyksikön ja kauimmaisen solmun välillä voi olla jopa 300 metriä.

Langattoman sensoriverkon solmun toiminta-ajaksi akkukäyttöisenä odotetaan vähintään yhden viikon toiminta-aikaa. Lisäksi sensorisolmujen paikkatieto (kartta-koordinaatit) on tiedettävä, jotta tulokset voidaan esittää karttapohjilla.

Markkinoilta löytyy valmiita integroituja sensorisolmuja, joihin on integroitu prosessori- ja WPAN-kortti. Monissa valmiissa ns. mote-ratkaisuissa käytetään pieniresoluutioista (10 bit) AD-muuntimia omien sensorien liittämiseksi, eivätkä ne sovi korkearesoluutioisten mittausten tekemiseen. Tässä projektissa vaaditaan käytettävältä AD-muuntimelta vähintään 16 bitin resoluutioita. Myös prosessorilta vaaditaan



riittävän suurta tehoa suorittaa signaalikäsittelytoiminnot. Lisäksi tehonhallinta, eli radion ja prosessorien lepo- ja päälläoloaikojen hallinta, vaatii omat ratkaisunsa, joita monet kaupalliset valmiit mote-ratkaisut eivät välttämättä tue. Näiden syiden takia projektissa kehitetään omat sensori-, prosessori- ja WPAN-kortit. Näiden komponentit (mikrokontrolleri, radiopiiri, AD-muunnin jne.) valitaan valmiista kaupallisista komponenteista.

Sensoriverkkojen energialähteenä toimivat patterit tai ladattavat akut. Akkujen lataamiseksi verkon toiminnan aikana voidaan käyttää periaatteessa esimerkiksi aurinkokennoja ja pienikokoisia tuulimyllyjä. Tämän projektin tarkoituksiin aurinkokennot ja minikokoiset tuulimyllyt eivät välttämättä sovellu kovin hyvin, koska sensorisolmut asennetaan hyvin lähelle maanpintaa. Esimerkiksi maastoesteet, pitkä ruohikko ja pensaat, haittaavat auringon ja tuulen hyödyntämistä. Lisäksi todellisessa käytössä niiden riittävän suuresta määrästä (auringonpaiste, riittävän suuri tuulen nopeus) ei ole aina takeita. Toisaalta tässä työssä kehitettävältä sovellukselta vaaditaan noin yhden viikon toiminta-aika, johon riittävän isokokoiset akut riittänevät. Sensoriverkon energiankäytön optimointi onkin tehtävä komponenttivalinnoissa sekä tehonhallinnassa ohjelmistotasolla.

## 5. Kehitetty langaton sensoriverkko

Projektin tavoitteena oli kehittää yleiskäyttöinen langaton sensoriverkko ja toteuttaa siitä sovellus liikenteen aiheuttamien värähtelyjen mittaamiselle. Kehitystyössä huomioitiin kehitetyn langattoman sensoriverkon uudelleen konfiguroitavuus. Sovelluksen toteuttaminen tapahtuu siis pääasiassa ohjelmistotasolla. Sovelluksen vaatimukset ovat seuraavat:

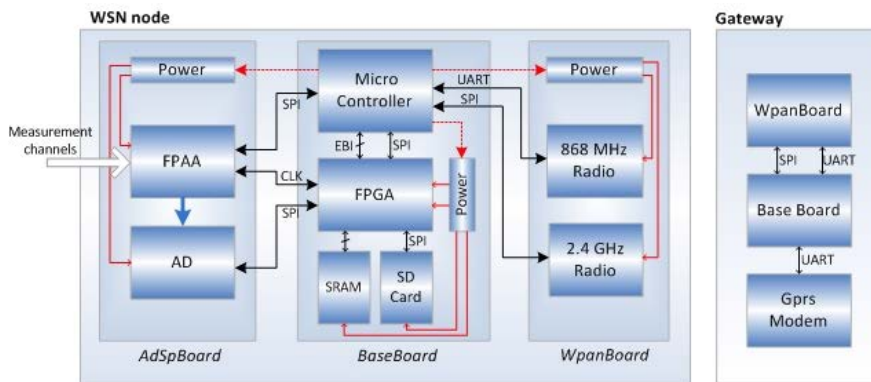
- Värähtelyjen mittaus kiihtyvyyssensoreilla kolmiakselisesti.
- Mittaustaajuus vähintään 250 Hz.
- Mitatun tiedon prosessointi paikallisesti sensorisolmussa.
- Langattoman tiedonsiirron kantama vähintään 300 metriä.
- Toiminta-aika vähintään yksi viikko.
- Sensoriverkon hallinta ja valvonta etäyhteydellä, vähintään Gprs-modeemilla.
- Sensoriverkon topologia on tähtiverkko.
- Mittaustapahtuma aiheuttaja täytyy varmentaa esimerkiksi kuvalla.

Kehitetyn sensoriverkon sensorisolmut koostuvat sensorien lisäksi neljästä eri komponentista: mittauskortti, prosessorikortti, WPAN-kortti ja akku (kuva 13). Tämänkaltaisen lähestymistavan uutuusarvo on uudelleen konfiguroitavuudessa (ohjelmoitavat signaaliprosessorit, uudelleen ohjelmoitavat prosessorit), tehokkaassa laskentakapasiteetissa (pienivirtainen mikrokontrolleri ja FPGA) ja pitkän kantaman radiossa (868 MHz:n radio). Olennainen osa suunnittelua on ollut tehonhallinnan suunnittelu. Ilman hyvää tehonhallintaa virrankulutus voi muodostua ongelmaksi tällä lähestymistavalla, joten tehonhallintaan on kiinnitetty toteutuksessa erityistä huomiota

## 5.1 Sensorisolmu

### 5.1.1 Mittauskortti

Mittauskortti koostuu ohjelmoitavasta, uudelleen konfiguroitavasta analogisesta signaaliprosessorista (Anadigm) ja 16 bitin AD-muuntimesta (kuva 13). 16 bitin resoluutio on minimivaatimus matalimpien värähtelytasojen mittaamiseksi, muutoin AD-muunnoksen aiheuttama kohina voi tulla hallitsevaksi. Analogisella signaaliprosessorilla voidaan tehdä signaalien suodatus. Tämä prosessori takaa sen, että mittauskortti on helposti käytettävissä myös muissa sovelluksissa. Signaaliprosessorin uudelleen konfigurointi tehdään prosessorikortin kautta ohjelmallisesti.



**Kuva 13.** Sensoriverkon solmun ja keskusyksikön rakenne. Solmu koostuu mittauskortista (AdSpBoard), prosessorikortista (BaseBoard) ja WPAN-kortista.

### 5.1.2 Prosessorikortti

Prosessorikortti koostuu muistista, SD-muistikortista, mikrokontrollerista ja FPGA-prosessorista. Tehokkaan laskentatehon takaamiseksi prosessorikortti on koottu pienen tehokulutuksen mikrokontrollerista ja tehokkaaseen laskentaan kykenevästä uudelleen konfiguroitavasta FPGA:sta, joka on Actelin valmistama malli AGL 1000 (flash-based). Mikrokontrolleri on Atmelin valmistama pienivirtainen AVR Atxmega 128A1. Mikrokontrolleri on ohjelmoitavissa C-kielillä.

Mikrokontrolleri lukee digitaaliset mittaukset mittauskortilta ja tekee mittauksille mahdollisesti peruslaskentaa tai ohjaa mittaukset FPGA:lle, jos algoritmit vaativat tehokasta laskentaa. Mikrokontrollerin tehtävä on vastata mittaussolmujen perustoiminnoista, kuten mittausten käynnistämisestä, kommunikoinnista ja mittaussolmujen lepo- ja aktiivivaikeiden hallinnasta. Mikrokontrolleri huolehtii kommunikointiviestien käsittelystä ja tiedon siirtämisestä sekä lukemisesta radiorajapinnan kautta keskusyksikön kanssa. Mittaussolmujen komponentit tai niiden toimintolohkot (sensorit, FPGA, radio, mikrokontrolleri) voidaan kytkeä tarvittaessa nopeasti lepo-

ja aktiivittaan tehonkulutuksen minimoimiseksi. FPGA-prosessorilla voidaan suorittaa laskentatehoa vaativat toiminnot, kuten spektrilaskenta. SD-muistikortille voidaan tallentaa informaatiota, jota ei kannata siirtää radioteitse.

### 5.1.3 WPAN-kortti

WPAN-kortin kautta tapahtuu sensorisolmun ja keskusyksión välinen kommunikointi. Radiopiirinä käytetään Radiocrafts 868 MHz:n taajuudella toimivaa komponenttia. Sen etu esimerkiksi 2.4 GHz:n taajuudella toimiviin radioihin verrattuna on parempi esteiden läpäisykyky. Kantama voi olla useita kilometrejä esteettömällä yhteydellä ja suunta-antennilla. Radion tiedonsiirtokapasiteetti on 76,8 kilobittiä (kbs). Radion rajapintaprotokollat eivät perustu tiettyyn standardiin. WPAN-kortilla on myös NanoTronin 2,4 GHz:n taajuudella toimiva radio, jolla saavutetaan jopa 1 Mbs:n tiedonsiirtokapasiteetti ja 200 metrin kantomatka.

## 5.2 Keskusyksikkö

Keskusyksikön tehtävänä on hallinnoida ja ohjata koko verkon toimintaa. Se lähettää mittaussolmuille viestin siitä, koska mittaustapahtuma aloitetaan. Keskusyksikkö voi tallentaa mittaussolmuilta lähetetyn informaation SD-muistikortille ja hoitaa kommunikoinnin verkon ulkopuolelle.

Keskusyksikön kokoonpano on periaatteessa sama kuin mittaussolmujen ilman sensoreita ja mittauskorttia. Lisäksi keskusyksikössä on Gprs-modeemi ja antenni etäyhteyksille. Modeemin kautta voidaan suorittaa sensoriverkon valvonta ja etähallinta. Sen kautta voidaan lähettää internetissä olevalla palvelimelle mittaussolmujen laskemia mittaustietoja ja sen avulla voidaan vastaanottaa myös keskusyksikölle ja sensorisolmuille konfigurointiparametreja. Jokaisen verkon solmun toiminnallinen parametri (esim. mittaustapahtuman pituus, kynnyksarvot) on konfiguroitavissa reaali-aikaisesti keskusyksikön kautta.

Sensoriverkon synkronointi suoritetaan lähettämällä synkronointiviesti keskusyksióstä sensorisolmuille. Tarkoitus on synkronoida sensorisolmujen ja keskusyksikön kellot. Tällä taataan se, että eri solmujen välillä olevat mittaukset ovat synkronoituja, jolloin eri solmujen mittaukset ovat ajallisesti vertailukelpoisia. Synkronointi suoritetaan ennalta määritetyin väliajoin. Synkronointialgoritmi [15] on VTT:n kehittämä. Kommunikointiprotokollana on TDMA, jossa jokaiselle verkon solmulle on varattu aikaikkuna kommunikointiin keskusyksión kanssa.

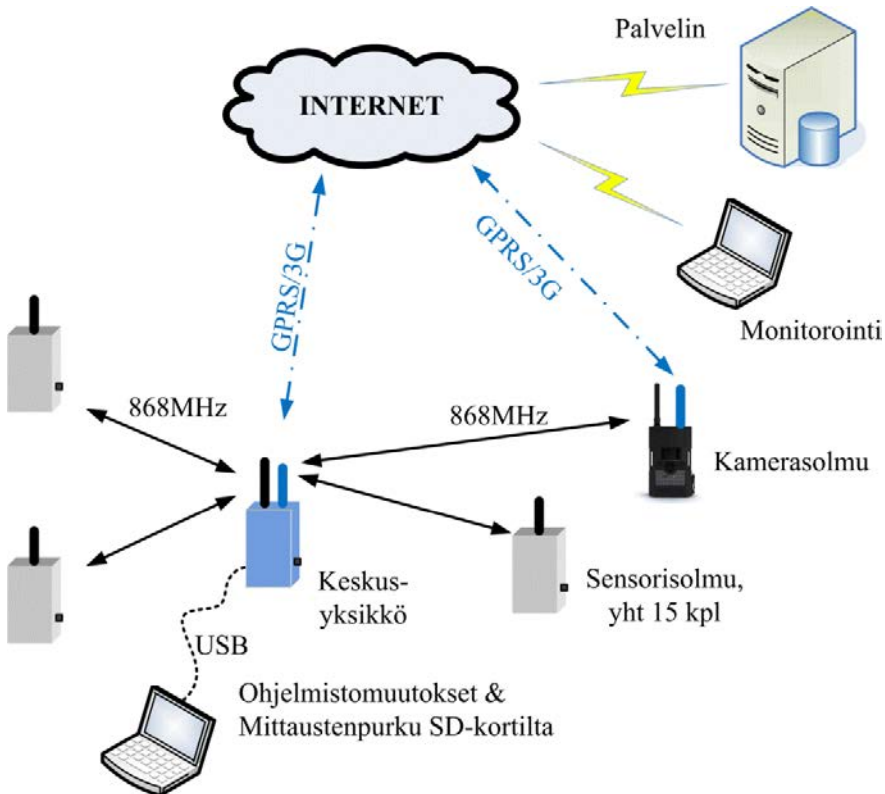
Keskusyksikkö voi ottaa yhteyden tiettyin väliajoin (esimerkiksi kerran päivässä) Gprs-modeemilla internetissä sijaitsevalla palvelimelle, josta voidaan hakea verkon ja solmujen konfigurointiparametreja. Keskusyksiköstä voidaan samalla lähettää myös mittaustietoja palvelimelle. Palvelelilta ne voidaan lukea web-selaimen kautta. Keskusyksiköltä ei ole tarkoituksenmukaista pitää jatkuvaa yhteyttä ulkoiselle palvelimelle modeemin virrankulutuksen takia.

### 5.3 Langattoman sensoriverkon liikennetärinäsovellus

Liikennetärinäsovelluksen sensoriverkon rakenne on havainnollistettu kuvassa 14 ja toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 15. Sensorisolmujen lisäksi verkkoon on lisätty kameran solmu, joka ottaa kuvan mittaustapahtuman aiheuttajasta liikenneväylän suunnasta.

Värähtely solmuissa mitataan kolmella 1-akselisella kiihtyvyyssensorilla. Liikennetärinäsovellusta varten valittiin sensorivertailun perusteella Silicon Designsin valmistama malli SD 1221-2g. Sensorimallin valintaan vaikutti sen suorituskyky ja hinta.

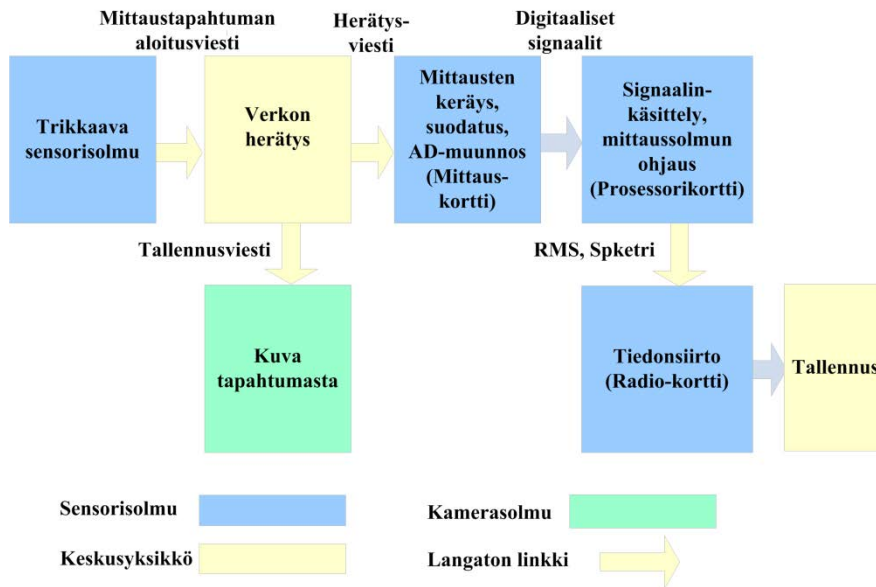
Kaikki verkon sensorisolmut mittaavat maaperävärähtelyä koko ajan. Värähtelyn ylittäessä kynnsarvon ns. triikkaava solmu lähettää viestin keskusyksikölle ja tämä edelleen heräteviestin kaikille sensorisolmuille mittatapahtuman tallentamisen käynnistämiseksi. Sensorisolmut mittaavat mittaustapahtumaan ennalta määrätyn ajan, suorittavat signaalien suodatuksen ja muuntavat signaalit digitaalisiksi.



Kuva 14. Langattoman sensoriverkon liikennetärinöiden mittaamiseen.

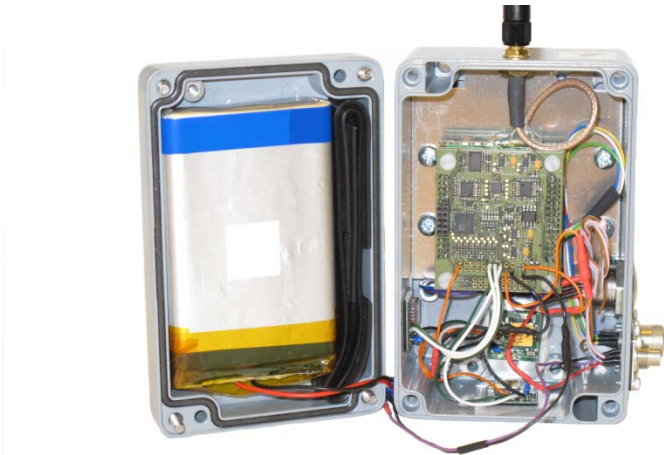
## 5. Kehitetty langaton sensoriverkko

Digitaalimuunnoksen jälkeen prosessorikortti laskee mittaustapahtumasta signaalien RMS (Root Mean Square) -arvot, maksimikihtyvyyden ja -nopeuden jokaiselle (kolmelle) mittaussunnalle. Lisäksi jokaiselle mittaussunnalle lasketaan 1/3-oktaavispektri. Nämä tunnusluvut lähetetään edelleen radion kautta keskusyksikölle tallennettavaksi. Liikennetärinäsovelluksen vaatimuksista johtuen, kuten esimerkiksi jatkuva mittaus yhdistettynä hyvin herkkien sensorien korkeahkoon virransäätöön, liikennevärähtelymittauksissa on vaikea saavuttaa pitkiä toiminta-aikoja ilman isohkoa akkukapasiteettia.



**Kuva 15.** Liikennetärinäsovelluksen toimintaperiaate.

Kaikki mittauskortit, kiihtyvyyssensorit (kolme) ja akut asennettiin metallilaatikkoon (kuva 16). Akkuina käytetään 10 Ah Li-ion -akkuja. Kotelossa on liitin, johon voidaan liittää lisää akkukotelo, jossa on 3\*10 Ah Li-ion -akut. Kotelo on IP 65 -luokiteltu.



**Kuva 16.** Liikennetärinäsovelluksen sensorisolmu.

Liikennetärinäsovellusta varten sensoriverkkoon kehitettiin ja toteutettiin kamerasolmu (kuva 17). Kamerasolmu koostuu kamerasta ja Gprs-modeemista. Keskusyksikkö triikkaa kameran ottamaan kuvan samalla kun keskusyksikkö käynnistää verkon solmut mittaamaan. Kamera tallentaa kuvan mittaustapahtuman aiheuttajasta muistikortille ja tarvittaessa lähettää sen Gprs-modeemin kautta sähköpostilla tai GSM-viestillä.



**Kuva 17.** Kamerasolmu.

## 6. Langattoman sensoriverkon testaus

Langatonta sensoriverkkoa testattiin sisätiloissa, ulkona ja lopullisessa kenttätestissä maastossa maantien ja rautatien läheisyydessä. Langallinen vertausmittauslaitteisto asennettiin samalle mittauspäikälle langattoman laitteiston kanssa. Kehitetyn laitteiston mittaustuloksia verrattiin langallisen mittalaitteiston tuloksiin. Testien tarkoituksena oli arvioida kehitetyn langattoman sensoriverkon toimintaa (langattoman datasiirron luotettavuus, virrankulutus yms.) sekä verrata langattoman sensorisolmun mittaustarkkuutta. Lisäksi testimittauksen avulla demonstroidaan kehitettyä liikennevärähtelyn arvioinnissa hyödynnettävää visualisointikonseptia.

### 6.1 Vertailumittalaitteisto

Vertailumittauslaitteena on PC-tietokoneeseen liitetty USB-liitäntäinen National Instruments NI cDAQ-9172-moduuli, johon on kytketty 1–4 kappaletta 24-bittisiä National Instruments NI 9234 nelikanavaisia ICP-vahvistinmoduuleja. Vahvistinmoduuli tekee AD-muunnoksen ja syöttää myös käyttöjännitteen antureille. Sensoreina käytetään PCB Piezotronics 393A03 ICP-kiihtyvyyssantureita. Digitaaliset signaalit siirretään cDAQ-räkillä kaapelilla tietokoneeseen, joka tekee tarvittavat laskennat (taajuuspainotettu suodatus, värähtelyn nopeuden maksimiarvot, 1/3 oktaavispektrit). Tietokoneessa laskenta tehdään LabView 8.6 -ohjelmistolla. Sensorit on liitetty mittaustalaitteeseen koaksiaalikaapeleilla.

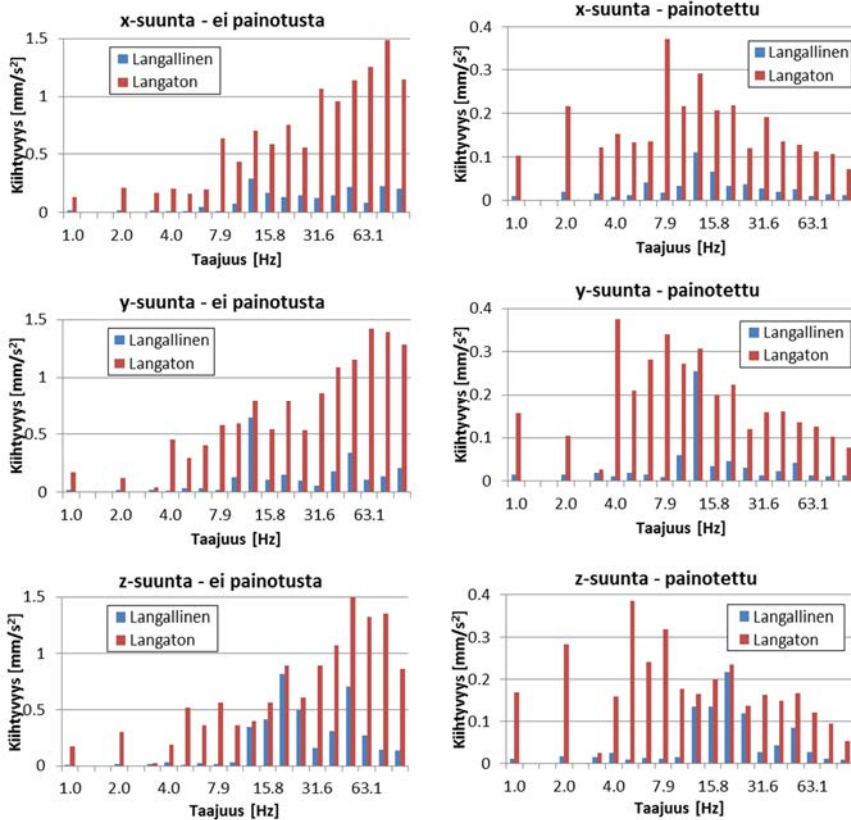
### 6.2 Testit sisätiloissa

Sisätestit tehtiin toimistorakennuksen kolmannen kerroksen kuntosalissa. Langallisen laitteiston anturit oli asennettu tukevaan metalliseen kolmijalkaan ja langaton mittaussolmu oli lattialla. Mittauksia tehtiin laitteistojen taustakohinasta ja erilaisista värähtelyistä. Lattia oli tukeva betonilattia. Osa mittauksista tehtiin teräsportaiden päällä. Langattoman laitteiston arvot on laskettu mittaussolmun tallentamasta datanäytteestä. Langallisen laitteiston tarvitsema sähkö otettiin pistorasiasta.

Taustakohinan aiheuttama kiihtyvyyden 1/3-oktaavispektri näkyy kuvassa 18 ja tehollisarvot taulukossa 2. Langattomalla laitteistolla kohina kasvaa taajuuden kasvaessa. Korkeilla taajuuksilla kuitenkin taajuuspainotus pienentää sen merkitystä. Langattoman laitteiston kohina on suurempaa kuin langallisen laitteiston,



mutta ei kuitenkaan kovin suurta, sillä painotettu kiihtyvyys  $0,4 \text{ mm/s}^2$  vastaa painotettua värähtelyä  $0,011 \text{ mm/s}$ . Mittaustilassa saattoi olla myös todellista esim. ilmastointikoneista peräisin olevaa värähtelyä, joka näkyy langattoman laitteiston taajuusarvoissa.

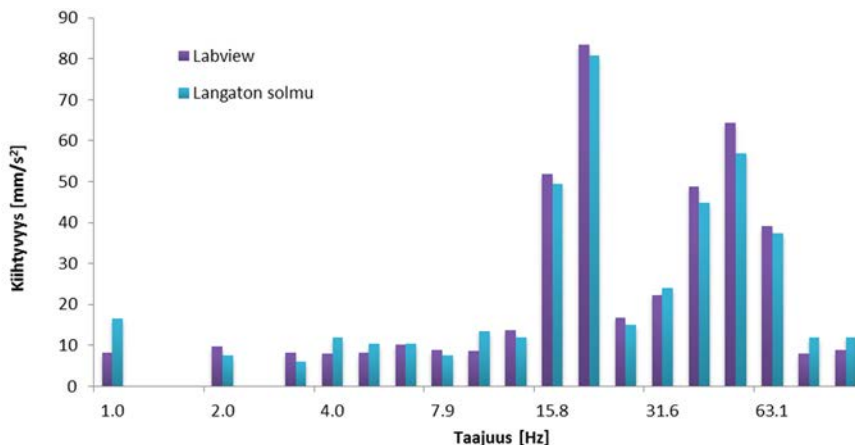


**Kuva 18.** Taustakohinan aiheuttama kiihtyvyyden 1/3-oktaavispektri, mittaus sisätiloissa betonilattian päällä (langaton sensorisolmu ja vertailulaitteisto). Vasemmalla ilman taajuuspainotusta ja oikealla painotettuna.

**Taulukko 2.** Taustakohinan aiheuttama kiihtyvyyden tehollisarvo, mittaus sisätiloissa.

Laitteisto	Suunta	Kiihtyvyyden tehollisarvo [mm/s <sup>2</sup> ]	
		Ei painotusta	Painotettu
Langaton	X	3,28	0,77
	Y	3,47	0,89
	Z	3,31	0,83
Langallinen	X	0,58	0,16
	Y	0,85	0,28
	Z	1,40	0,33

Langattomassa sensorisolmussa laskenta suoritetaan pienitehoisilla prosessoreilla ja laskenta tehdään C-kielillä toteutetulla ohjelmistolla. Laskenta tehdään ns. *fixed point* -laskentana kokonaisluvuilla. PC:llä toteutetussa ohjelmassa (Labview) laskenta tehdään desimaaliluvuilla. Tästä johtuen voi laskentatarkkuudessa olla pieniä eroja. Kuvassa on esitetty langattoman sensoriverkon solmussa mitatusta värähtelysignaalista sensorisolmussa laskettu 1/3-oktaavispektri sekä samasta signaalista PC:llä laskettu 1/3-oktaavispektri. Kuvassa 19 näkyy, että spektreissä on pienet erot pyöristystarkkuudesta johtuen.

**Kuva 19.** Langattoman sensorisolmun laskentatarkkuus verrattuna Labview-ohjelmaan.

### 6.3 Testit ulkona

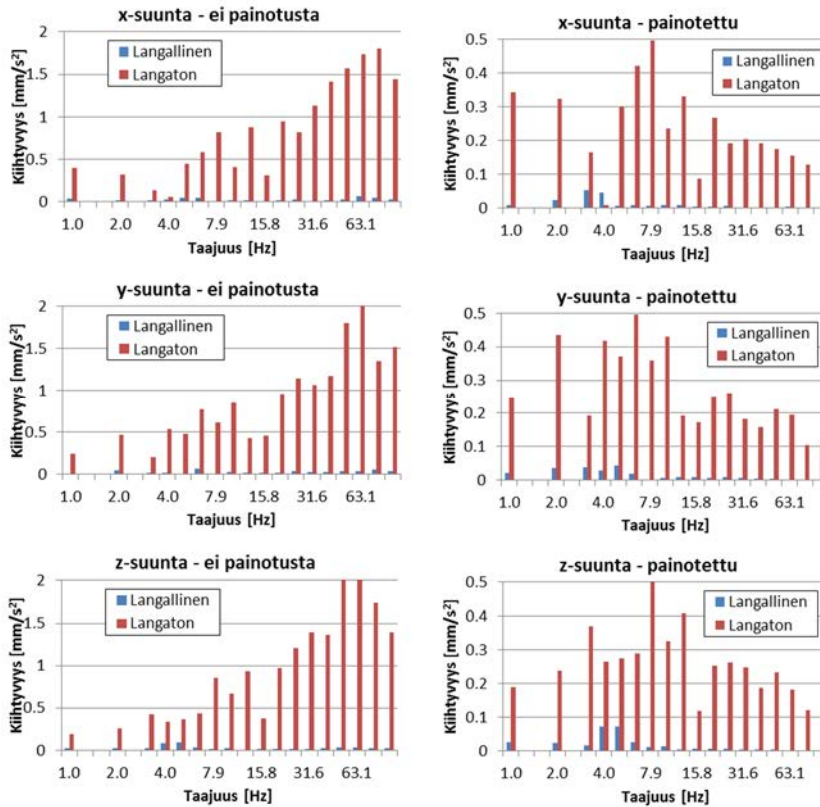
Ulkotestit tehtiin Limingassa Ouluun menevän rautatien vieressä. Molemmat mitta-laitteistot oli asennettu maahan noin 30 m:n etäisyydelle rautatiestä. Mittausta tarkkailtiin autossa istuen. Mittauksia tehtiin laitteistojen taustakohinasta ja junien

aiheuttamista värähtelyistä. Langattoman laitteiston arvot on laskettu mittaussolmun tallentamasta datanäytteestä. Langallinen mittauslaitteisto sai virtansa mittauksen aikana kannettavan tietokoneen akusta. Langallisen laitteiston anturit oli asennettu tukevaan metalliseen kolmijalkaan ja langaton mittaussolmu oli kiinnitetty maahan työnnettyyn teräsputkeen.

Taustakohinan aiheuttama kiihtyvyyden 1/3-oktaavispektri näkyy kuvassa 20 ja tehollisarvot taulukossa 3. Langattomalla laitteistolla kohina kasvaa taajuuden kasvaessa samoin kuin sisätilan kokeissa (kuva 18). Kohina oli kuitenkin noin 30 % suurempaa. Kohinataso on edelleen kohtuullinen varsinkin taajuuspainotus huomioiden. Langattoman laitteiston suurin taajuuspainotettu kiihtyvyyden tehollisarvo oli  $1,22 \text{ mm/s}^2$ , joka vastaa nopeuden tehollisarvoa  $0,034 \text{ mm/s}$ . Langallisen laitteiston kohina oli tässä mittauksessa selvästi pienempää kuin sisätilan mittauksessa.

Mittauksia tehtiin myös pitkän tavarajunan aiheuttamasta tärinästä. Langattomalla laitteistolla ei saatu luotettavia tuloksia, mutta taajuusjakauman korkeimmat piikit (5–6 Hz taajuus) vaikuttivat olevan noin 50 % pienemmät kuin langallisella laitteistolla. Syyt tähän ei tiedetä.

## 6. Langattoman sensoriverkon testaus



**Kuva 20.** Taustakohinan aiheuttama kiihtyvyyden 1/3-oktaavispektri, mittaus ulkona (langaton sensorisolmu ja vertailulaitteisto). Vasemmalla ilman taajuuspainotusta ja oikealla painotettuna.

**Taulukko 3.** Taustakohinan aiheuttama kiihtyvyyden tehollisarvo, mittaus ulkona.

Laitteisto	Suunta	Kiihtyvyyden tehollisarvo [mm/s <sup>2</sup> ]	
		Ei painotusta	Painotettu
Langaton	X	4,91	1,10
	Y	6,99	1,22
	Z	4,69	1,15
Langallinen	X	0,13	0,08
	Y	0,20	0,08
	Z	0,19	0,12

## 6.4 Kenttätestit Järvenpäässä

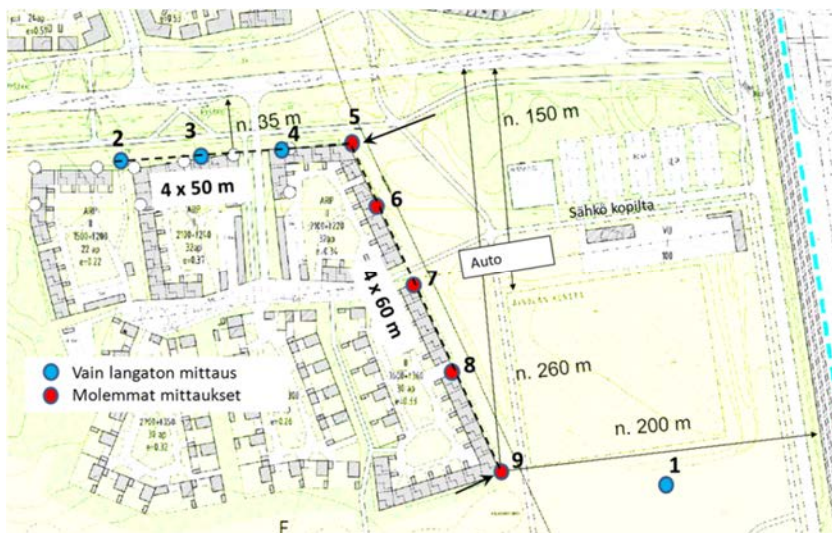
### 6.4.1 Vertailumittauksen toteutus

Langattoman sensoriverkon mittaustuloksia verrattiin langalliseen mittalaitteeseen, jossa käytettiin viittä mittaussolmua. Jokainen mittaussolmu koostuu kolmesta alumiinikoteloon sijoitetusta ICP-kiikkyvyssensorista. Tietokone saa virtansa verkkovirrasta, joka pitää olla saatavilla mittauspaikalla.

Tietokoneeseen oli lisäksi kiinnitetty videokamera, joka ottaa videota liikenneväylän suunnasta mittaustapahtuman aikana. Mittauslaitteet oli sijoitettu mittausajaksi pakettiauton tavaratilaan ja verkkovirta saatiin läheisestä rakennuksesta. Mittausta valvottiin 3G-etäyhteyden avulla. Sensorit liitettiin mittauslaitteeseen 50–150 m:n koaksiaalikaapeilla. Videokuvan avulla varmistetaan, että mittaustapahtuma on liikenteen aiheuttama.

### 6.4.2 Mittauspaikka

Mittaukset suoritettiin mittaamalla tie- ja junaliikenteen aiheuttamia värähtelyjä maastossa. Mittauspaikka oli Järvenpäässä Ainolan kentän ympäristössä. Kuvassa 21 on esitetty kartalla mittauspisteiden sekä keskusyksiköiden sijainnit. Kuvassa esitetylle alueelle on kaavoitettu asuintaloja ja mittauspisteiden sijainti on valittu talojen sijainnin perusteella, kuten tämän raportin luvussa 2.1.2 on mainittu.



**Kuva 21.** Testauskohteen langattoman ja langallisen sensoriverkon solmujen ja keskusyksiköiden sijainnit. Kuvassa oikealla rautatie ja ylhäällä on maantie.

Keskusyksikön ja kauimmaisen solmun etäisyys oli noin 300 metriä. Langallinen mittaus tehtiin ainoastaan solmuissa 5–9. Maasto on avointa, pääasiassa peltoa. Solmujen 5–9 ja keskusyksikön välissä on noin yhden metrin korkuinen maavalli. Mittaukset suoritettiin 5.12–12.12.2011. Lämpötila vaihteli -5 ja +3 °C asteen välillä. Testijakson sää oli vaihteleva: vesi- ja lumisadetta sekä ajoittain kovaa tuulta.

### 6.4.3 Mittausten suoritus

Langattomien sensorisolmujen kotelot kiinnitettiin noin yhden metrin pituiseen metalliputkeen. Putki työnnettiin maahan, niin että vain kotelo jäi maan pinnalle (kuva 22). Langattomiin sensorisolmuihin kytkettiin lisäakkukotelo. Kotelon antennien korkeudet vaihtelivat noin 25–30 cm maapinnasta. Solmuja oli käytössä yhdeksän kappaletta. Langallisen mittalaitteen mittaussolmut kiinnitettiin 30 cm:n maaruuviin (kuva 22) ja ne johdotettiin (PC-) mittaussolmuun 50–150 m:n koaksiaalikaapeleilla. Mittauslaite sekä pöytäkone PC sijaitsivat pakettiautossa, jossa oli myös langattoman sensoriverkon keskusyksikkö. Tietokoneeseen oli lisäksi kiinnitetty videokamera, joka ottasi videota liikenneväylän suunnasta mittaustapahtuman aikana. Mittauslaitteet oli sijoitettu mittausten ajaksi pakettiauton tavaratilaan ja verkkovirta saatiin läheisestä rakennuksesta. Mittausta valvottiin 3G-etäyhteyden avulla. Laitteistot käynnistettiin ja ne käytiin hakemassa viikon kuluttua. Mittausta valvottiin etäyhteyden avulla ja tarvittaessa säädettiin asetuksia

Koska kyseessä oli kehitetyn langattoman laitteiston ensimmäinen laajamittainen testaus, tarvittiin etähallintaa varten reaaliaikainen etävalvonta. Tämän takia käytettiin keskusyksikkönä kannettavaa tietokonetta, jossa oli 3G-modeemi ja etäkäyttöohjelmisto. Näiden avulla voitiin Windows XP-ympäristössä suorittaa langattoman sensoriverkon keskusyksikön ohjelmiston hallinta ja uudelleenohjelmointi milloin tahansa.



**Kuva 22.** Langaton mittaussolmu lisäakkukoteloineen on vasemmalla. Langallisen mittalaitteen solmu on oikealla.

Kannettavassa tietokoneessa sensoriverkon ohjelmisto oli periaatteessa täysin sama kuin sulautetussa versiossa. Reaaliaikaisessa valvonnassa seurattiin mm. akkujen käyttöjännitteitä ja langattoman tiedonsiirron luotettavuutta. Kannettavaan tietokoneeseen kiinnitettiin langattomassa sensoriverkossa käytettävä radiovastaanotin.

Sekä langallisen että langattoman laitteen sensorisolmut mittasivat koko ajan. Langattomat solmut 1 ja 4 toimivat triikkaavina solmuina eli ne käynnistivät tarvittaessa laskennan ja herättivät muut solmut tallentamaan mittaustapahtumaa. Värähtelyn RMS-arvon ylittäessä asetetun kynnyksen mittaustapahtuman tallennus aloitettiin ja mittauksia kerättiin 20 sekunnin jakso. Tämä jälkeen kummasakin laitteessa laskettiin mittaustapahtumasta värähtelynopeuden ja -kiihtyvyyden huippuarvot sekä 1/3-oktaavispektri kaikille sensoreille. Langallisessa laitteessa kaikki laskenta tapahtui tietokoneessa ja langattomassa laitteessa sensorisolmuissa, joista ne siirrettiin tallennettavaksi keskusyksikölle. Mittaustapahtumasta otettiin myös kuva, joka tallennettiin langallisessa laitteessa tietokoneelle.

### 6.4.4 Langattoman tiedonsiirron luotettavuus

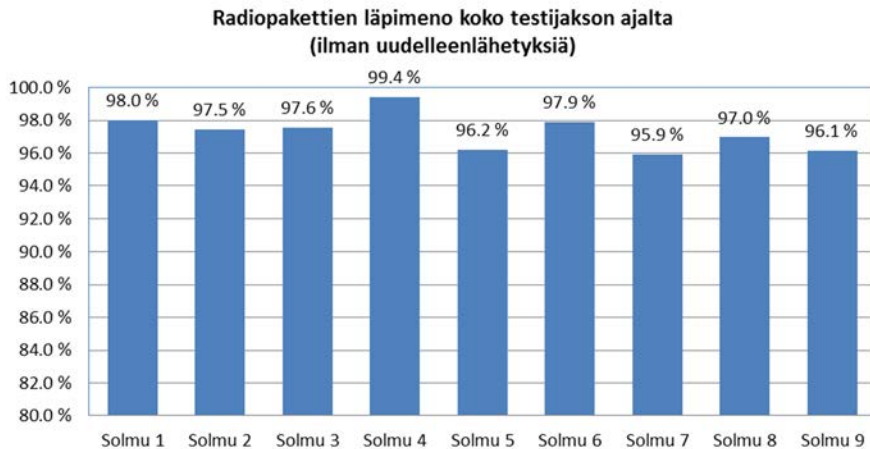
Langattomassa tiedonsiirrossa voi esiintyä ns. pakettihäviöitä, joka tarkoittaa että kaikki lähetetty data ei saavu perille. Pakettihäviöt johtuvat mm. ympäristöstä (esteet) ja tiedonsiirron etäisyydestä. Pakettihäviöitä voi vähentää uudelleen lähettämällä data pakettihäviön esiintyessä.

Testijakson pakettihäviöitä on havainnollistettu kuvassa 23. Uudelleen lähetys ei ollut käytössä tässä sovelluksessa. Langattomasti lähetetyistä datasta keskimäärin noin 97 % saapui perille. Tätä lukemaa voidaan pitää erittäin hyvänä. Li-

## 6. Langattoman sensoriverkon testaus

---

säksi täytyy huomioida, että keskusyksión radiovastaanotin oli sijoitettu pakettiauton ohjaamon sisälle ja auton rakenteet toimivat esteenä.

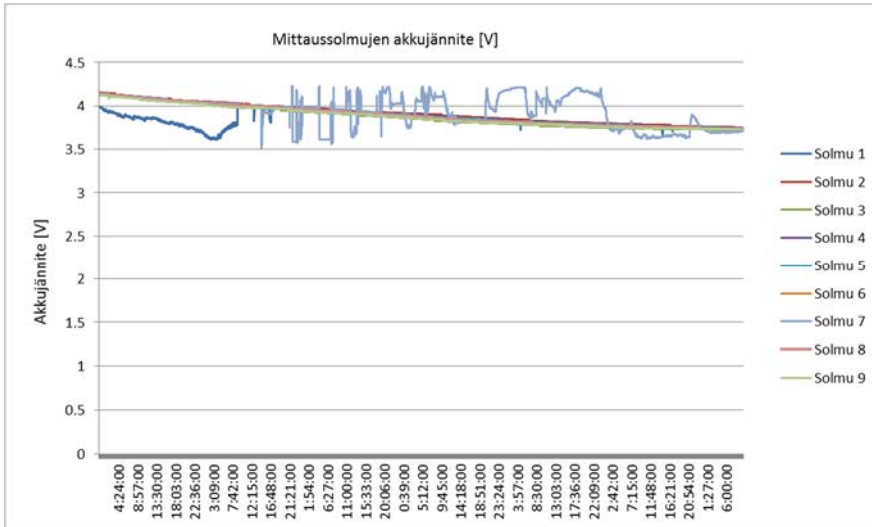


**Kuva 23.** Langattomassa tiedonsiirrossa solmuilta keskusyksikölle saapuneiden datapakettien osuus lähetetyistä datapaketeista.

Maksimi tiedonsiirtoetäisyys keskusyksikön ja kauimmaisen solmun välillä oli noin 300 metriä avoimessa maastossa. Jotkin solmuista olivat lisäksi noin metrinhölkisen maavallin takana. Lisäksi huomioiden se, että mittaussolmut olivat lähes maapinnassa, langatonta tiedonsiirtoa voidaan pitää erittäin luotettavana, ja se toimii vaaditun määrittelyn mukaisesti (300 metrin kantama).

Kuvassa 24 on esitetty akkujen jännitetasot testiviikon aikana. Kuten kuvasta näkyy, langattomien solmujen jännitetaso ovat riittävän korkeat koko testijakson ajan, eikä laske alle 3,5 voltin käyttöjännitteen, jolloin solmu lakkaa toimimasta. Kuvasta voidaan havaita, että solmun 7 akussa on ollut jokin ongelma. Tällä on todennäköisesti ollut myös vaikutus solmun toimintaan ja mittauksiin.





Kuva 24. Solmujen akkujen jännitetasot mittausjakson aikana.

#### 6.4.5 Mittaustulosten analysointi

Testijakson aikana langaton mittalaite tallensi kuusi mittaustapahtumaa ja langallinen mittalaite tallensi yli 30. Suurimmat värähtelyt tulivat rautatien suunnasta. Maantien suunnasta tulevat värähtelytasot jäivät hyvin mataliksi. Langattomissa solmuissa 2, 3 ja 4 värähtelyt peittyivät pääosin mittauskohinan alle, eikä niistä siten saatu riittävästi tuloksia. Mittaussolmut oli sijoitettu yli 200 metrin päähän rautatiestä. Tämän takia värähtelytasot olivat mittauskohdissa jo vaimentuneet eivätkä langattomat solmut tallentaneet korkeamman kohinatason takia mittaustapahtumia samaa määrää kuin langalliset.

Langaton mittalaite tallensi viisi mittaustapahtumaa rautatien suunnasta. Mitatut värähtelynopeudet on esitetty taulukossa 4. Värähtelynopeudet ovat keskiarvoja neljästä mittaustapahtumasta langalliselle ja langattomalle laitteelle mittaussolmuille 6–9 tapahtumasta. Taulukossa esitetyt arvot ovat taajuuspainottamattomia. Langallisen solmun viisi johdot olivat menneet poikki (alueella liikkinut traktori) testijakson aikana, eikä niistä siten ole esitetty tuloksia. Langattomassa solmussa 7 ollut akkuongelma näkyy myös mittaustuloksissa, jotka poikkeavat muista eivätkä ole siten vertailukelpoisia.

Kuvassa 25 on esitetty yhden mittauksen taajuusjakaumat langattomalla ja langallisella laitteistolla. Molemmilla laitteistoilla näkyy 40 Hz:n kohdalla olevat korkeat taajuuspiikit, mutta piikkien korkeudet eivät ole täysin samat. Muilla taajuuksilla langattomalla laitteistolla on havaittavissa kohina, joka peittää heikot värähtelyt. Tämä kohina (5–8 mm/s<sup>2</sup>) on selvästi suurempi kuin mitä mitattiin aikaisemmissa lyhytaikaisissa testeissä (kuvat 18 ja 20). Myös taulukon 4 tuloksista voidaan päätellä,

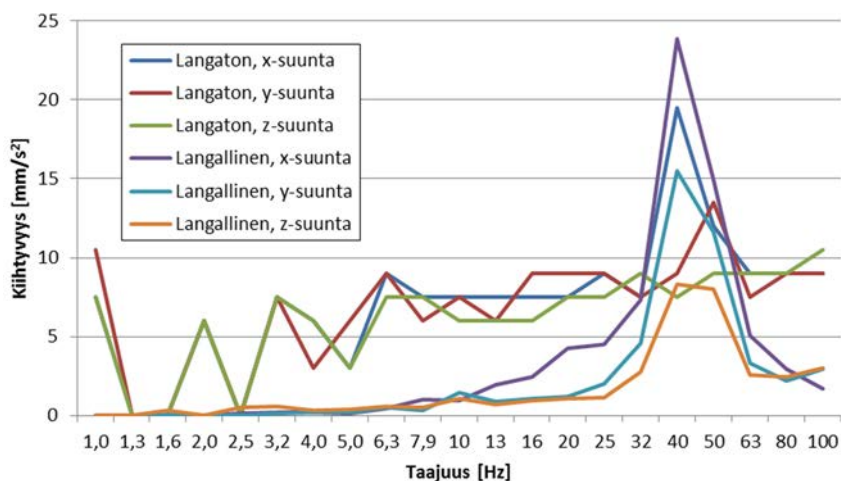
## 6. Langattoman sensoriverkon testaus

että kohina suurentaa saatavaa tehollisarvoa. Syytä tähän aikaisempaa suurempaan kohinaan ei tiedetä.

Toisaalta langallisessa mittalaitteessa on tehokkaat signaalin esikäsittelytoiminnot, korkeamman resoluution AD-muunnin sekä erittäin herkäät kiihtyvyyssensorit, joten tätä taustaa vasten oli odotettavissa, ettei aivan samaan mittaustarkkuuteen päästä.

**Taulukko 4.** Langattoman ja langallisen mittalaitteen mittaustapahtumista määritetyt värähtelyn ( $\text{mm/s}^2$ ) painottamattomien tehollisarvojen keskiarvot (ka.) ja tulosten standardipoikkeamat (std).

Solmu	6			7			8			9		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Langaton, ka.	42,5	32,0	25,5	62,9	63,5	73,4	36,6	26,5	22,9	43,7	34,1	25,7
Langaton, std	11,9	10,5	2,9				4,8	2,4	1,4	9,6	4,2	2,0
Langallinen, ka.	25,8	17,7	14,8	26,2	14,8	8,3	32,3	16,2	9,3	10,3	6,4	
Langallinen, std	11,5	8,7	4,1	15,0	8,4	4,5	16,0	9,7	5,1	8,4	4,2	



**Kuva 25.** Pisteessä 6 mitattu (9.12.2011 klo 11.42) taajuusjakauma langattomalla ja langallisella laitteistoilla. Taajuusjakaumaa ei ole painotettu.

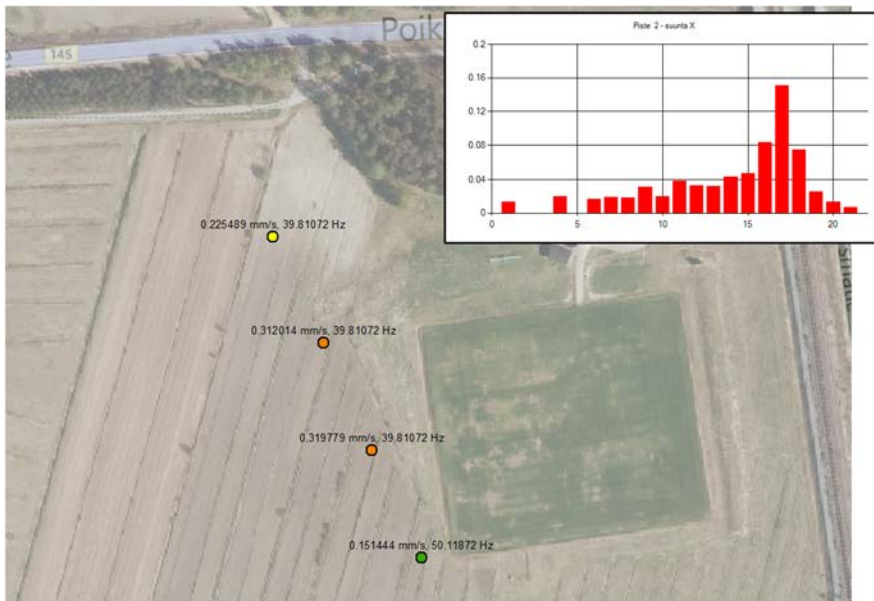
Tässä julkaisussa esitettyjen värähtelymittausten käsittelyn ja tulosten visualisointikonseptin testaamiseksi visualisointitulokset esitetään langallisen laitteen mittaus-tuloksilla. Taulukossa 5 on esitetty langallisen laitteen mittaustuloksista määritetyt värähtelyn tunnusluvut.

**Taulukko 5.** Langallisella laitteella mitatut värähtelyn tunnusluvut ( $V_{w,95}$ ) (mm/s).

	6			7			8			9		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
$V_{w,95}$	0,23	0,16	0,12	0,31	0,14	0,07	0,32	0,16	0,09	0,15	0,07	0,06

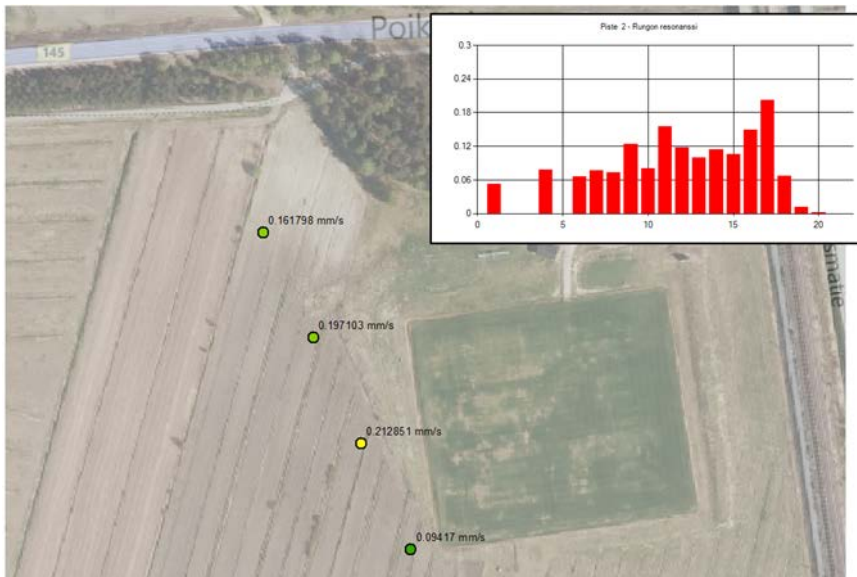
#### 6.4.6 Mittaustulosten visualisointi

Mitattujen maaperän värähtelyjen perusteella arvioitiin asuntoon siirtyvä ja voimistuva värähtely. Arviointi tehtiin luvun 2 mukaisesti. Visualisointi tehtiin ArcGIS-ohjelman avulla. Arcmap-dokumenttiin yhdistettiin eri kerroksiin tie-, ilmapu- ja maaperäkartat ja taulukon 1 mukaiset kerrokset. Visualisointi tehtiin ainoastaan langallisella mittauslaitteistolla saatuihin tuloksiin pisteistä 5–9. Kuvissa 26–28 on esimerkkejä ArcGIS-ohjelmalla tehdyistä visualisoinneista karttapohjilla.

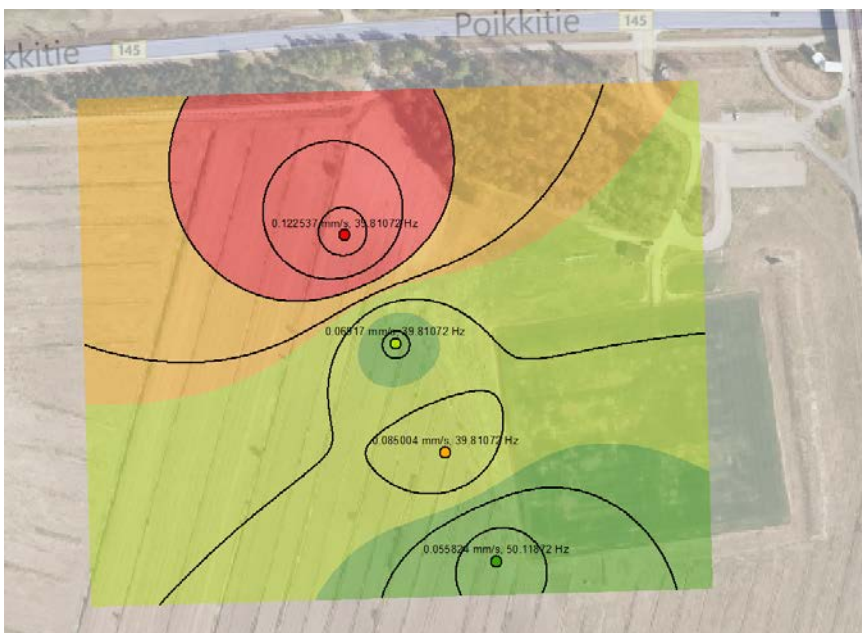


**Kuva 26.** Mitatun värähtelyn x-suuntainen tunnusluku  $v_{w,95}$  ja värähtelyssä dominoiva taajuuskomponentti karttapohjalla sekä ponnahdusikkuna pisteen 2 taajuusjakaumasta.

## 6. Langattoman sensoriverkon testaus



**Kuva 27.** Arvio sisätilojen vaakavärhtelystä  $v_{w,95}$  tasaiseen voimistumiseen perustuen ja ponnahdusikkuna pisteestä 2, josta voidaan lukea arvio sisätilojen vaakavärhtelystä mahdollisessa resonanssissa.



**Kuva 28.** Värhtelyn tunnusluvun  $v_{w,95}$  (z-suunta) tasa-arvokäyrät karttapohjalla.

Tutkitulla alueella värähtelyn tunnusluvut  $v_{w,95}$  olivat niin pienet, että ne eivät rajoita alueen käyttöä rakentamiseen. Mitatut maaperän värähtelyt ylittivät kahdessa pisteessä rajan 0,3 mm/s, mutta rakennuksiin siirtyvä värähtely jää kaikissa tapauksissa tavoiterajan 0,3 mm/s alle. Värähtely ei myöskään rajoita kerros määrää tai lattioiden jänneväliä ja jäykkyyttä.

## 6.5 Testitulosten arviointi

### 6.5.1 Langattoman sensoriverkon suorituskyky

Testit osoittivat, että langattomaan sensoriverkon langaton tiedonsiirto valitulla radiotekniikalla toimii luotettavasti vähintään 300 metriin asti. Tätä pidempään kantamaan voidaan päästä esimerkiksi käyttämällä suunta-antenneja ja sijoittamalla antennit ylempiin maasta esimerkiksi jatkokaapelin ja tukivarren avulla. Lisäksi valittu tähtiverkkotopologia yhdessä pitkän kantaman radion kanssa mahdollistavat yksinkertaisemman protokollan käytön ja siten luotettavan kommunikoinnin verkon solmujen ja keskusyksikön välillä.

Sensorisolmujen akkukapasiteetti (30 Ah/solmu) riitti hyvin yhden viikon toiminta-ajalle. Langattomissa sensorisolmuissa oli mittaus koko ajan päällä. Jokaisessa solmussa oli kolme kiihtyvyyssensoria mittausmoodissa muodostaen ison osan virrankulutuksesta. Lisäksi sensorisolmut lähettivät yhden sekunnin välein tilatietoa keskusyksikölle. Tätä ominaisuutta tarvittiin tässä vaiheessa verkon toiminnan seurantaan. Virrankulutuksesta muodostivatkin suurimman osan radio ja sensorit. Langattomassa sensoriverkossa tehtiin laskentaa sensorisolmussa mikrokontrollerilla ja FPGA-prosessorilla. Laskenta (esimerkiksi 1/3-oktaavispektrin laskenta) pystyttiin tekemään pääosin mikrokontrollerilla ja vain osa FPGA-laskentatehosta oli käytössä. Esimerkiksi taajuuspainotettu suodatus olisi mahdollista tehdä täysin digitaalisesti FPGA-prosessorilla. FPGA:n etuna olisi myös, että *fixed point* -laskenta voidaan tehdä suuremmalla tarkkuudella kuin mikrokontrollerissa.

Projektissa kehitetyn laitteiston ensimmäinen prototyypiversio mahdollistaa käytön myös tavoitteiden mukaisesti muissa kuin liikennetärimittaussovelluksissa. Sensorit ovat vaihdettavissa tarpeen mukaan. FPGA ja mikrokontrolleri ovat täysin käyttäjän ohjelmoitavissa. Käytännössä komponenttimuutoksia tarvitaan vain mittauskorttiin. Tarvittavat muutokset riippuvat käytettävistä sensoreista ja suodatimen tyypistä (analoginen/digitaalinen) sekä valitusta AD-muuntimesta. Esimerkiksi venymäliuskamittaukset vaativat muutoksia mittauskorttiin. Tässä projektissa kehitetty mittauskortti muodostuu ohjelmoitavasta FPAA-prosessorista ja 16-bittisestä AD-muuntimesta, jotka mahdollistavat joustavan mittaussovellusten kehittämisen. Lisäksi laitteessa on SD-muistikortti mittausten tallentamiseksi.

### 6.5.2 Langattoman sensoriverkon mittaustarkkuus

Kehitetyn laitteiston ensimmäisen prototyypiversion mittaustarkkuus ei ole vielä riittävä. Järvenpään kenttätesteissä liian suuri taustakohina aiheutti tuloksiin epätarkkuutta. Lisäksi laitteiston tuloksissa oli havaittavissa taustakohinan vaihtelua eri testimittauksissa. Pienimmillään taustakohina oli riittävän pientä tarpeisiin nähden. Tämän vaihtelun syytä ei ole vielä selvitetty tässä projektissa. Suuri kohina kasvattaa myös laitteiston laskemaa tehollisarvoa, vaikka mitattava värähtely olisikin taustakohinan yläpuolella.

Kehitetyn langattoman sensoriverkon liikennetärinäsovelluksessa haasteet liittyvät solmun MEMS-kiihtyvyyssensoreihin ja mittauskorttiin. Haasteena on erityisesti saada mittaussignaalien kohinataso riittävän alhaiseksi. Tässä sovelluksessa käytettiin anturin valmistajan tekemää anturipiirilevyä, jossa anturin referenssijännite tehdään kahden resistanssin muodostamalla jännitejaolla. Referenssijännite tulisi tehdä erillisellä referenssikomponentilla, jolle anturin valmistajan kortilla ei kuitenkaan ollut tilaa. Toinen kohinaan vaikuttava seikka on mittauskortilla oleva varauspumppu, jolla 3,6 V:n akkujännite nostetaan anturin vaatimaan 5 V:iin. Varauspumpun häiriöitä ei pystytty kokonaan suodattamaan pois.

Herkempien sensorien, kuten vertailulaitteessa käytetyn ICP-tyyppisten sensorien, haasteena ovat mm. korkeahko hinta, iso koko ja korkea käyttöjännite. Tämä tarkoittaisi jo huomattavan isokokoisten akkujen ja sensorikotelojen käyttöä. Lisäksi virrankulutuksen kasvu voi muodostua ongelmaksi. Akkukäytössä tarvittava kaksipuoleinen jännitesyöttö voi lisätä niiden kohinatasoa. Liikennetärinäsovelluksessa MEMS-sensorin valintaperuste oli kompromissi suorituskyvyn ja hinnan välillä.

## 7. Hyödyntämismahdollisuudet

Projektissa suoritettiin kansainvälinen markkinaselvitys kyselemällä eri maista mielipiteitä liittyen liikennetärinän ja runkomelun arviointiin, lainsäädäntöön, tärinämittausten markkinoihin sekä GIS-järjestelmän hyödyntämiseen. Etukäteen valmisteltu kyselyaineisto lähetettiin asiantuntijoille kymmeneen maahan (Suomi, Ruotsi, Norja, Tanska, Saksa, Hollanti, Ranska, Iso-Britannia, Venäjä ja Japani). Vastaukset esitettiin kysymyksiin hankittiin puhelimitse. Työn toteutti Tampereen ammattikorkeakoulu. Taulukossa (taulukko 6) on esitetty kyselyn aiheet ja yhteenveto tuloksista.

Nykyisin ympäristövaikutusten arviointi tehdään lähes kaikissa tarkastelukohteena olleissa maissa, mutta mittausten käyttö tärinän ja runkomelun arvioinnissa on harvinaista. Vain Venäjällä ja Hollannissa on tärinää ja runkomelua koskevia lakeja.

Paikalliset viranomaiset vastaavat lähes kaikissa maissa liikennetärinään ja runkomeluun liittyvistä selvityksistä. Useissa tapauksissa vastuussa on myös väylien hallinnoinnista vastaava valtion virasto. Virastot tilaavat selvitykset ja niihin liittyvät mittaukset niitä tekeviltä asiantuntijakonsulteilta.

Vastaukset osoittavat, että maaperän värähtelymittauksia tärinän ja runkomelun arviointiin käytetään laajasti Ruotsissa, Britanniassa ja Ranskassa. Näissä maissa myös ympäristövaikutusten arviointia on käytetty jo kauan. Näissä maissa on myös arvioitu, että värähtelymittauksien käyttö ei juuri lisäännä, mutta muissa maissa käytön arvioidaan lisääntyvän. Maaperävärähtelyn mittausten tarve tärinän ja runkomelun arvioinnissa on rajoitettu. Kussakin Pohjoismaassa on noin 10–25 ja Keski-Euroopassa yhteensä noin 30–100 tällaisia värähtelymittauksia suorittavaa konsulttia. Venäjällä ja Japanissa on molemmissa noin 200 konsulttia. Määrät ovat kuitenkin merkittävästi suuremmat, mikäli mukaan otetaan myös muut sellaiset värähtelymittaukset, joissa tarvitaan langatonta mittausta.

Mittalaitteelta toivottiin viikkoa pidempää toiminta-aikaa. Tarpeellisena pidettiin myös käyttöliittymää, jolla voidaan päivittäin seurata mittauksen etenemistä ja tulosten muuttumista. Suorituskykyyn liittyviä toiveita olivat mittauspisteiden määrän kasvattaminen kaksinkertaiseksi (30 mittaussolmua). Lisäksi laitteiden hinnan olisi oltava nykyistä halvempi. Mittausjärjestelmää kohtaan osoitettiin myönteistä kiinnostusta etenkin yrityksissä, jotka tekevät värähtelymittauksia. Jotkut niistä olivat valmiita ostamaan laitteen heti, kun se on saatavilla, jos vain hinta on kohtuullinen. Lisäksi esitettiin paljon kysymyksiä liittyen mittaustulosten käsittelyyn, erityisesti

## 7. Hyödyntämismahdollisuudet

virheellisten tapahtumien poistamiseen. Monet haastattelijat pitivät tärkeänä ottaa videokuvaa mittausalueelta, sillä se helpottaa virhetapahtumien löytymistä.

**Taulukko 6.** Yhteenveto markkinaselvityskyselyn vastauksista (värit: vihreä – kyllä, punainen – ei, harmaa – tieto puuttuu).

	Sweden	Finland	Denmark	Norway	St. Petersburg	Moscow	Germany	France	UK	Netherlands	Japan
1.1 Is traffic vibration taken into consideration in planning new residential building areas	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Green
1.2 Is EIA made in planning of railways, roads or street network	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Green
1.3 Have You regulation concerning EIA	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
1.5 a Have You legislation regarding to whole body vibration	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Red
1.5 b Have You legislation regarding to structure borne noise	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Red
2.1 a Have you whole body vibration standards or codes	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Grey	Green	Green	Grey
2.1 b established practice	Green	Red	Red	Grey	Green	Green	Green	Grey	Green	Green	Grey
2.1 c fixed vibration limits (official or unofficial)	Red	Green	Red	Red	Green	Red	Green	Green	Green	Green	Grey
2.2 a Have You structure borne noise standards or codes	Red	Red	Green	Red	Green	Green	Red	Green	Red	Green	Grey
2.2 b structure borne noise established practices	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Grey
2.2 c fixed structure borne noise vibration limits (official or unofficial)	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Grey	Red	Green	Grey
2.3 a Guidance measuring ground or building vibration	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Grey
2.3 b Guidance estimating whole body vibration in building	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Grey
2.3 c Guidance estimating structure borne noise in buildings	Green	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Grey
2.4 a Measuring vibration at phase of land use planning	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Grey
2.4 b Measuring vibration during construction work	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Grey	Red	Green	Grey
2.4 c Measuring vibration only when problem arise	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Grey
2.5 Measurement amount change during next 10 years	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
3.1 Measure tools to traffic vibration are today sufficient	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Green	Green
3.1 Need for better tools to measure traffic vibration	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Green
3.3 Is described tool useful as it is currently	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
3.3 Is described tool useful with modifications	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Green	Green



Tulosten visualisointia eri karttatasoilla pidettiin erityisesti päätöksenteon kannalta tärkeänä. Visualisoitavia asioita voisivat olla esimerkiksi mittauspisteiden sijainnit, tulokset ja tapahtuma-ajat. Kaikissa maissa paikkatietojärjestelmä (GIS) ei kuitenkaan ole vielä riittävän kehittynyt, vaikka alan kehitys ja GIS-sovellusten käyttöönotto on nopeaa. Myös erilaiset ohjelmistot ja niihin liittyvät päivitykset voivat olla ongelmallisia.

Paikkatietojärjestelmien käyttö on levinnyt nopeasti Yhdysvalloissa, Euroopassa, Etelä-Afrikassa, Kiinassa, Venäjällä ja Japanissa. Mittakaava on usein 1:10 000, mutta monissa maissa se on 1:50 000 tai suurempi. Tarkat (1:10 000) topografiakartat ovat saatavilla lähinnä pääkaupungeista ja suurista kaupungeista. Muualla maassa mittakaava voi olla 1:50 000 tai 1:100 000. Rautatie-, maantie- ja tiekartat ovat yleensä tarkimpia. Rakennuksien sijainnit ovat melko hyvin saatavilla, mutta muita rakennuksiin liittyviä tietoja löytyy erittäin huonosti. Suomessa on yksi maailman parhaista rakennustietorekistereistä, joka tarjoaa erittäin yksityiskohtaista tietoa rakennuksista. Samanlaista rakennustietorekisteriä käytetään myös Baltian maissa uusille rakennuksille.

## **7.1 Jatkokehitysmahdollisuudet**

### **7.1.1 Langaton sensoriverkko**

Langattomasta sensoriverkosta kehitettiin prototyyppi, joka on testattiin kenttäolosuhteissa liikennetärinäsovelluksessa. Kehitetyn prototyypin viemiseksi liikenneväärähtelyjen mittaamiseen tarkoitetuksi tuotteeksi asti edellyttäisi joko muutoksia sensorikäyttöjärjestelmän hallintaan mittauskortille ja/tai MEMS-kiikityvyssensorien vaihtamiseksi toisen tyyppiseksi, jolloin muutoksia tarvitaan myös mittauskortille. Myös geonien käyttö on periaatteessa mahdollista.

Kansainvälinen markkinaselvitys osoitti, että tämänkaltaista mittalaitesovellusta liikenteen aiheuttamien värähtelyjen mittauksissa pidetään erittäin hyvänä. Olenasta kansainväliselle markkinoille pääsyssä on, että tämän tyyppinen tuote tai palvelu saadaan ensin kotimaassa testattua ja todennettua hyväksi. Lisäksi tuotteen on oltava parempi kuin jo olemassa olevat tuotteet. Tosin monissa maissa vaaditaan tämäntyyppisten laitteiden sertifiointia, joka lisää kustannuksia ja voi viivästyttää markkinoille tuloa.

Kehitetyn yleiskäyttöisen langattoman sensoriverkon etu muihin vastaaventyypisiin on se, että se yhdistää uudelleen konfiguroitavuuden (ohjelmoitava analoginen signaaliprosessori, ohjelmoitavat mikrokontrolleri ja FPGA-prosessori), tehokkaan laskennan ja pitkän kantama langattoman tiedonsiirron. Sensoriverkko soveltuu erityisesti nopeiden ilmiöiden mittaussovelluksiin, joissa tarvitaan joustavuutta ja luotettavaa langatonta tiedonsiirtoa. Kehitetty sensoriverkko mahdollistaa sen, että sovelluskehittäjät tekevät itse sovelluksen joustavalla arkkitehtuurilla. Sensoriverkon solmu tarjoaa pienen energiankulutuksen mikrokontrollerin ja tehokkaan rinnakkaiseen laskentaan kykenevän uudelleen konfiguroitavan FPGA-prosessorin. Yleiskäyttöisenä langattomana sensoriverkkona hyödyntämismahdol-

lisuudet ovat huomattavasti isommat kuin pelkkänä liikennevärtelyn monitorointi-työkaluna. Sovelluskohteita ovat esimerkiksi teollisuusautomaatio ja rakenteiden monitorointi (rakennukset, sillat, tunnelit yms.).

### 7.1.2 Päätöksentekoympäristö

IT:n hyödyntäminen on kunta-alalla voimakkaassa kasvussa. Vuonna 2010 saatiin loppuun Kuntaliiton ja Tekesin rahoittama KuntaGML-projekti, johon osallistui 195 kuntaa. KuntaGML lähti liikkeelle vuonna 2006 tarpeesta standardimuotoisiin tietopalvelurajapintoihin kuntien käytössä oleviin paikkatietojärjestelmiin. KuntaGML mahdollistaa tiedonsiirron eri paikkatieto-ohjelmistojen välillä XML-skeemojen avulla. Tällä hetkellä KuntaGML on toteutettu kantakarttojen ja asemakaavojen osalta, mutta jatkohankkeet, kuten KRYSP (kuntien rakennetun ympäristön sähköiset palvelut,) tuovat yhteisiä rajapintoja esimerkiksi rakennusvalvonnalle, ympäristötoimelle ja opaskartoille.

Myös ArcGIS-ohjelmistossa on mahdollista julkaista paikkatietoaineistoa KuntaGML:n tukemissa WMS (Web Map Service) ja WFS (Web Feature Service) -palveluissa. WMS käsittää rasterimuotoista dataa ja on käytännössä kuva, johon liittyy paikkatieto. WFS puolestaan käsittelee vektorimuotoista paikkatietoa. Julkaisemalla liikennetärinän visualisoinnit näissä muodoissa hävitetään kuitenkin suuri osa toiminnallisuudesta, jota itse Arcmap-dokumentti pitää sisällään, kuten mittauspisteisiin liittyvät ponnahdusikkunat taajuussisältöineen. WMS-formaatissa julkaistu kuva voi pitää sisällään visualisointeja, kuten tasa-arvokäyrät, mutta rasteriformaatista johtuen materiaali näyttää hyvältä vain siinä mittakaavassa, mihin se on alun perin tehty. Skaalaus suurempaan tai pienempään mittakaavaan on kömpelöä. WFS-formaatti skaalautuu vektorimuotoisuuden ansiosta kaikkiin mittakaavoihin, mutta tässä formaatissa suuri osa visualisoinnista jää loppukäyttäjän tehtäväksi.

Paikkatietoon liittyvät verkkopalvelut ovat yleistyneet viime aikoina nopeaa tahtia. Koikeilemisen arvoisia esimerkkejä ovat Vantaan kartta- ja paikkatietopalvelu SpatialWeb (<http://kartta.vantaa.fi/>), Paikkatietoikkuna (<http://www.paikkatietoikkuna.fi/web/fi/kartta>) ja GTK:n uusi Pohjatutkimusrekisteri (<http://www.geo.fi/pohjatutkimusrekisteri.html>). Ympäristöhallinnon OIVA Ympäristö- ja paikkatietopalvelu (<http://www.p2.ymparisto.fi/scripts/oiva.asp>) sekä GTK tarjoavat paikkatietojen latauspalvelua. Molemmilla ladattava materiaali on ESRIn shape-formaatissa. Myös Paikkatietoikkunalla on latauspalvelu, mutta palvelun sisältämät paikkatiedot ovat sekalaisissa formaateissa.

Jatkoa silmällä pitäen käyttäjäystävällisin ratkaisu visualisoinnin kannalta olisi siirtyä liikennetärinässäkin verkkokäyttöliittymän yli toimivaan ratkaisuun. Kehitettävä sovellus olisi Liikennetärinärekisteri ja siihen olisi mahdollista saada täysin sama toiminnallisuus kuin projektissa kehitettyyn Arcmap-dokumenttiin. Loppukäyttäjä pystyy valitsemaan kartalle haluamansa tiedot ja taustakartat (esim. ilma-kuva, maaperä, tiestö). Mittauspisteet ja niihin liittyvät tärinäarvot pystyy valitsemaan näkymään suunnittain (X, Y tai Z) tai päätöksentekoa varten jokaisen suunnan

maksimiarvona. Myös tasa-arvokäyrät on mahdollista saada näkymään kartalla. Jos mittauskohteita on useampia, loppukäyttäjä voi valita haluamansa kohteen tai kohteet kartalle valikosta. Mittauspistettä klikkaamalla saadaan näkymään ponnahdusikkuna, jossa on esitetty pistettä vastaava tärinän taajuussisältö ja muuta pisteeseen liittyvää informaatiota.

Verkkopalvelu voi pitää sisällään myös aineiston latauspalvelun. Jos loppukäyttäjä haluaa yhdistää mittaus tulokset omaan paikkatietojärjestelmäänsä, olisi palvelusta mahdollista ladata aineistot mittauskohteittain ESRIn shape-formaatissa. Myös kohteen mittausraportti on lisättävissä latauspalveluun.

Paikkatietoinfrastruktuurin hyödyntäminen on Suomessa voimakkaassa kasvussa sekä kunnissa että valtion virastoissa. Lisäksi meillä on hyvä ohjeistus liikennetärinän haittojen arvioimiseksi. Nämä luovat hyvät edellytykset Liikennetärinärekisterin luomiselle ja ohjelmistoriippumattoman päätöksentekoympäristön kehittämiseksi Suomessa. Muissa maissa on usein kuitenkin omia tärinäselvitysten tekemiseen liittyviä käytäntöjä, jotka vaativat usein myös erityisasiantuntemusta. Tällöin meillä hyväksyttävää yksinkertaistettua arviointikäytäntöämme ei hyväksytäne siellä päätöksenteon perusteena, ainakaan ainoana arviointimenetelmänä. Lisäksi paikkatietorekisterit eri alueilla eroavat toisistaan. Nämä tekijät voivat muodostaa ylipääsemättömän esteen päätöksentekosovelluksen kansainväliselle kaupallistamiselle.

## 8. Yhteenveto

Julkaisussa on esitetty tulokset projektista, jossa kehitettiin liikenteen aiheuttamien tärinöiden mittaamiseen tarkoitettu monitorointi- ja analysointiympäristö. Raportissa on esitetty tärinöiden mittaamiseen ja mittausten tulosten analysointiin kehitetyt ohjeistukset ja työkalut. Mittalaitteesta kehitettiin langaton sensoriverkkosovellus, joka hyödyntää langattomia sensoriverkkoja, ja laite kykenee tekemään mittausten keräämisen lisäksi myös laskentaa mittauksille. Langattomasta sensoriverkkosovelluksesta kehitettiin yleiskäyttöinen uudelleen konfiguroitava mittausalusta, jota voidaan hyödyntää myös muissa sovelluksissa. Mittaustulosten analysointiin kehitettiin ohjelmisto, jolla tehdään mittalaitteella mitattujen ja esikäsiteltyjen mittausten tilastollinen käsittely. Näiden hyödyntämiseksi kehitettiin lisäksi keinot, joilla tulokset voidaan visualisoida karttapohjilla GIS-ohjelmistoa hyödyntäen. Lisäksi laadittiin ohjeistus siitä, miten mittauksia pitäisi suorittaa ja mitä niistä pitäisi laskea sekä miten kehitetyn järjestelmän tuloksia voidaan hyödyntää kaava-suunnittelun apuna maaperäkäytön suunnittelussa.

Kehitetty langaton sensoriverkko testattiin testein liikenneväylien läheisyydessä. Langattoman sensoriverkon mittaustuloksia verrattiin vertailulaitteeseen (langallinen mittalaitte). Langattoman tiedonsiirron todettiin olevan luotettava valituilla tekniikoilla ja asetettujen vaatimusten mukainen. Mittaustarkkuudessa ei päästy samaan tarkkuuteen kuin vertailulaitteessa.

Tulosten perusteella kehitetyn konseptin (mittaus, mittausten jälkikäsitteily ja visualisointi) todettiin olevan toimiva. Kehitetty langaton sensoriverkko antaa hyvät mahdollisuudet hyödyntää sitä jatkossa myös muissa sovelluksissa, joita ovat esimerkiksi ympäristömittaukset ja rakenteiden monitorointi (rakennukset, sillat, tunnelit yms.). Projektissa selvitettiin myös tuotteistamismahdollisuuksia mm. kansainvälisellä markkinaselvityksellä. Selvityksen perusteella kehitetyllä langattomalla sensoriverkolla olisi riittävän isot markkinat yleiskäyttöisenä mittalaitteena.

## Lähdeluettelo

- [1] Talja, A. 2011. Ohjeita liikennetärinän arviointiin. VTT Tiedotteita 2569. Espoo VTT. 35 s. + liitt. 9 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2569.pdf>
- [2] ISO 2005. SFS-EN ISO 8041. Tärinän vaikutus ihmiseen. Mittauslaitteisto. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 94 s.
- [3] NS 2005. Norwegian Standard NS 8176.E. Vibration and shock. Measurement of vibration in buildings from landbased transport and guidance to evaluation of its effects on human beings. Lysaker: Standards Norway. 30 s.
- [4] Talja, A. 2004. Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. VTT Tiedotteita 2278. Espoo VTT. 50 s. + liitt. 15 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2004/T2278.pdf>
- [5] RATO 2008. Ratatekniset ohjeet. Osa 3: Radan rakenne. Helsinki: Ratahallintokeskus. 89 s.
- [6] IEEE 802.15.4. 2006. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. 305 s.
- [7] Lynch, J. P. & Loh, K. J. 2006. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring, Shock and Vibration Digest. Vol. 38, s. 91–130.
- [8] Kim, S., Pakzad, S., Culler, D., Demmel, J., Fennes, G., Glaser, S. & Turon, M. 2007. Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks. Teoksessa: PSN '07: Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks. Cambridge MA. USA, 25–27 April, IEEE. S. 254 – 263. ISBN 978-1-59593-638-7.
- [9] Pakzad, S. N., Fennes, G. L., Kim, S. & Culler, D. E. 2008. Design and implementation of scalable wireless sensor network for structural monitoring. Journal of Infrastructure Systems. Vol. 14, s. 89–101.
- [10] Rice, J. A. & Spencer, B. 2009. Flexible smart sensor framework for autonomous full-scale structural health monitoring. Illinois: University of Illinois, Structural Engineering Laboratory. 154 s. + liitt. 13 s. (NSL Report 018 – Updated 06-01-2010.)
- [11] Loh, K. J., Lynch, J. P., Wang, Y., Law, K. H., Fraser, M. & Elgamal, A. 2007. Validation of a wireless traffic vibration monitoring system for the Voigt bridge. Teoksessa: World Forum on Smart Materials and Smart Structures

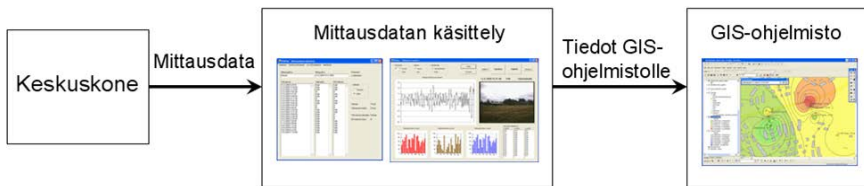
Technology. Chongqing & Nanjing, China. Nanjing, China, May 22–27. S. 102–103. ISBN: 978-041546845-9.

- [12] Bocca, M., Cosar, E., Salminen J. & Eriksson, L. M. 2009. A Reconfigurable Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring. Teoksessa: 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-4). Zurich, Switzerland, 22–24 July, International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. 9 s. ISBN 978-3-905594-52-2.
- [13] Picozzi, M., Milkereit, C., Zulfikar, C., Fleming, K., Ditommaso, R., Erdik, M., Zschau, J., Fischer, J., Şafak, E. & Özel, O. 2009. Wireless technologies for the monitoring of strategic civil infrastructures: an ambient vibration test on the Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge in Istanbul, Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*. Vol. 8, s. 671–691.
- [14] Whelan M. J. & Janoyan, K. D. 2009. Design of a Robust, High-Rate Wireless Sensor Network for Static and Dynamic Structural Monitoring. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. Vol. 20, s. 849–864.
- [15] Heikkilä, T. Rehu, J. Korkalainen, M. Määttä, K. & Pentikainen, V. 2009. Location aware multihop Wireless Sensor Network. Teoksessa: *Ultra Modern Telecommunications & Workshops*. ICUMT '09. St. Petersburg, Russia. October 12–14. S. 1–7. ISBN 978-1-4244-3942-3.

# Liite A: Tiedostoformaatit

## Yleistä

Tallennusformaateilla tarkoitetaan keskusyksikön tallentamaa sensorisolmujen (mittauspisteiden) mittausdataa sekä tietoja, jotka siirretään GIS-ohjelmistolle mittausdatan käsittelyn jälkeen (kuva A1). Kaikki mittausdata talletetaan tekstimuodossa. Tiedostot nimetään ohjeen mukaisesti.



**Kuva A1.** Periaatekuva mittausdatan siirtymisestä keskusyksiköltä GIS-ohjelmistolle.

## Mittausdatan talletusformaatit

Loki-tiedosto

Loki-tiedostoon talletetaan tietoja mittauksesta. Kun mittaus aloitetaan, keskusyksikkö tekee tekstitiedoston:

Mittaus pvm klo aika.txt  
Esim. Mittaus 21-01-2010 klo 10\_15\_32.txt

Tiedostoon talletetaan riveittäin (taulukko A1):

- mittauspaikka
- sensorisolmujen paikat, x- ja y-koordinaatit KKJ-järjestelmässä
- mittausjakson aloitushetki [pp.kk.vuosi h:min:s]
- jokaisen trikkauksen aika [pp.kk.vuosi h:min:s]
- mittausjakson lopetushetki [pp.kk.vuosi h:min:s].

Päivämäärät tiedostojen nimissä ovat muodossa pp-kk-vuosi ja ajat muodossa h\_min\_s. Taulukossa A1 on esitetty tietojen esitysmuoto tiedostossa.

**Taulukko A1.** Tekstiformaatti, johon tallennetaan tiedot mittauksesta (loki-tiedosto). Yhtäsuuruusmerkin vasemmalla puolella olevaa tekstiä ei saa muuttaa. Yksi rivi per tieto. Pystysuunnassa erottimena on rivinvaihto. Desimaalierottimena on piste.

Paikka = Helsinki Tapanila
Solmu 1 X-koordinaatti = 10.0000
Solmu 1 Y-koordinaatti = 20.0000
Solmu 2 X-koordinaatti = 10.0000
Solmu 2 Y-koordinaatti = 21.0000
jne ...
Start = 2.9.2010 13:24:32
Trikkkaus = 2.9.2010 22:07:00
Trikkkaus = 3.9.2010 07:47:51
Trikkkaus = 3.9.2010 13:19:37
jne ...
End = 9.9.2010 9:48:00

#### Mittausdata

Mittausdata tallennetaan kanavittain tekstitiedostoon (yksi tiedosto per kanava, kolme per solmu). Tiedostot nimetään seuraavasti:

*Solmu 1 kanava 1 suunta X.txt*  
*Solmu 1 kanava 2 suunta Y.txt*  
*Solmu 1 kanava 3 suunta Z.txt*  
*Solmu 2 kanava 4 suunta X.txt*  
*jne...*

Jokaisesta trikkauksesta tallennetaan tiedostoon seuraavat tiedot (taulukko A2):

- trikkauksen numero
- aika [pp.kk.vuosi h:min:s]
- tehollisarvo kiihtyvyytenä  $a_w$  [mm/s<sup>2</sup>]
- tehollisarvo nopeutena  $v_w$  [mm/s]
- 1/3-oktaavispektri (1–100 Hz, 21 kpl) suurimman tehollisarvon ajanhetkeltä [mm/s].

Lisäksi tallennetaan näyte signaalista triikkaushetkellä ja kuva, jos kamera on toiminnassa. Taulukossa A2 on esitetty tulosten esitysmuoto tiedostossa.



**Taulukko A2.** Mittausdatan esitysmuoto tekstitiedostossa. Yksi kanava per tiedosto ja yksi triikkaus per rivi. Vaakasuunnassa erottimena on tabulaattori, pystysuunnassa rivinvaihto (ylintä riviä ei tule tiedostoon). Desimaalierottimena on piste.

<b>Triikkausnumero</b>	<b>Aika</b>	<b>a<sub>w</sub></b>	<b>v<sub>w</sub></b>	<b>Hz_1</b>	<b>Hz_2</b>	<b>...</b>	<b>Hz_21</b>
1	21.1.2010 10:15:32	8.21	0.23	0.04	0.02	...	0.12
2	21.1.2010 12:46:09	7.50	0.21	0.03	0.02	...	0.18
3	22.1.2010 06:55:21	19.3	0.54	0.11	0.07	...	0.15
4	24.1.2010 18:38:11	12.9	0.36	0.09	0.05	...	0.16
...	...	...	...	...	...	...	...

Näytteet signaaleista

Laitteiston tallentamat näytteet signaaleista nimetään seuraavasti:

*Trig No kanava No näyte pvm klo aika.txt*

*Esim. Trig 1 kanava 3 näyte 21-01-2010 klo 10\_15\_32.txt*

Kuvat mittaustapahtumista

Kuvat voidaan nimetä halutusti. Mittausdatan käsittelyssä jokaiseen triikkaustapahtumaan liittyvä kuva etsitään tiedoston ajan perusteella.

### **Tallennusformaatti visualisoitaville tuloksille**

Lopulliset visualisoitavat tulokset tallennetaan mittausdatan käsittelyn jälkeen GIS-ohjelmistojen ymmärtämässä muodossa. Tallennettavia tiedostoja ovat:

- Mittauspisteiden numerot. Tiedostossa esitetään taulukkomuodossa mittapisteiden XY-koordinaatit ja mittapisteen numero. Tiedosto nimetään seuraavasti:

*GIS-tiedosto, mittauspisteiden numerot.txt*

- X, Y ja Z-suunnan tulokset. Tiedostossa esitetään taulukkomuodossa mittapisteiden XY-koordinaatit, värähtelyn tunnusluku, värähtelyn taa-juussisältö terssikaistoittain, värähtelyn vallitseva terssikaista sekä mittapisteen nimi (taulukko A3). Jokaiselle tarkastelusuunnalle (X, Y ja Z) tehdään erilliset tiedostot. Tiedostot nimetään seuraavasti:

*GIS-tiedosto, suunta X.txt*

*GIS-tiedosto, suunta Y.txt*

*GIS-tiedosto, suunta Z.txt*

- Kuva pisteen taajuusjakaumasta (kuva A2). Yksi kuva jokaista pistettä ja suuntaa kohden. Kuvat nimetään seuraavasti:

*Piste No – suunta.bmp*

*Esim. Piste 4 – suunta X.bmp*

- Suurin värähtely X, X ja Z-suunnista. Tiedostossa esitetään taulukko-  
muodossa mittapisteiden XY-koordinaatit, jokaisen pisteen suurin väräh-  
telyn tunnusluku ja mittapisteen nimi. Tiedosto nimetään seuraavasti:

*GIS-tiedosto, suurin värähtely.txt*

- Tasaiseen voimistumiseen perustuva arvio sisätilojen värähtelystä. Tie-  
dostossa esitetään taulukkomuodossa mittapisteiden XY-koordinaatit,  
voimistumiskertoimeen 1,5 perustuva arvio lattian ja rungon värähtelystä  
ja mittapisteen nimi (taulukko A4). Vaaka- ja pystysuunnalle tehdään eril-  
liset tiedostot. Jokaista pistettä kohti on yksi rivi kussakin tiedostossa.  
Tiedostot nimetään seuraavasti:

*GIS-tiedosto, tasainen voimistuminen, vaakasuunta.txt*

*GIS-tiedosto, tasainen voimistuminen, pystysuunta.txt*

- Kuva mittapisteen värähtelyspektreistä mahdollisessa resonanssissa  
(kuva A3). Jokaisessa mittapisteestä tallennetaan kuva ja lattian että  
rungon värähtelyä kuvaava spektri resonanssissa. Kuvat nimetään seu-  
raavasti:

*Piste No - Lattian resonanssi.bmp*

*Piste No - Rungon resonanssi.bmp*

*Esim. Piste 2 - Lattian resonanssi.bmp*

Kaikki GIS-tulokset tallennetaan omaan hakemistoonsa. Kuvien tiedostotyyppi voi olla mikä tahansa GIS-ohjelmien ymmärtämä tyyppi. Taulukossa A3 on esitetty tekstitiedoston formaatti X, Y ja Z-suunnan tuloksille ja taulukossa A4 vastaavasti tasaisen voimistumisen tuloksille. Kuvissa A2 ja A3 on esimerkit taajuusjakaumakuvista.

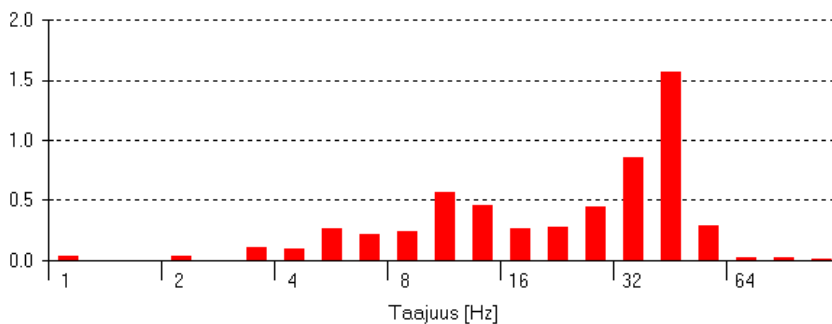
**Taulukko A3.** Tekstiformaatti, josta tiedot luetaan GIS-ympäristöön, X, Y tai Z-suunnan tulokset (ylin rivi tulee myös tiedostoon). Yksi rivi per mittauspiste. Vaakasuunnassa erottimena on tabulaattori, pystysuunnassa rivinvaihto. Desimaalierottimena on piste.

X	Y	vw95	Hz_1	Hz_2	...	Hz_21	Max_kaista	Nimi
3390060	6685596	1.226	0.1622	0.0000	...	0.0090	39.81	Piste1
3390064	6685574	1.242	0.0391	0.0000	...	0.0088	39.81	Piste2
3390313	6685532	1.110	0.0247	0.0000	...	0.0058	10.00	Piste3
...	...	...	...	...	...	...	...	...

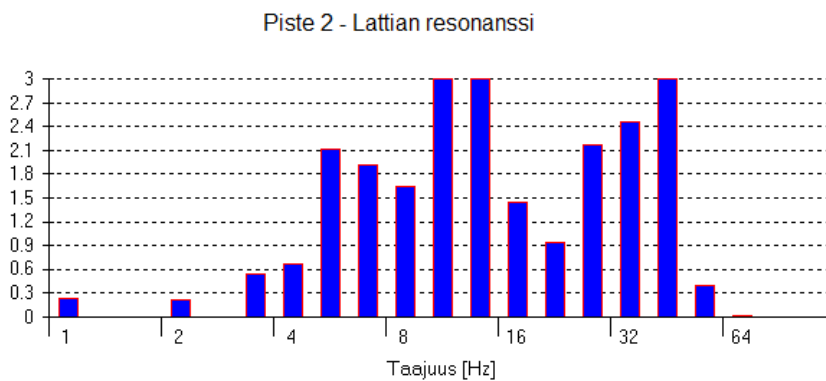
**Taulukko A4.** Tekstiformaatti, josta tiedot luetaan GIS-ympäristöön, tasaisen voimistumiseen perustuva arvio värähtelystä (ylin rivi tulee myös tiedostoon). Yksi rivi per mittauspiste. Vaakasuunnassa erottimena on tabulaattori, pystysuunnassa rivinvaihto. Desimaalierottimena on piste.

X	Y	Voimistuminen	Nimi
3390060	6685596	2.818	Piste1
3390064	6685574	2.433	Piste2
3390215	6685652	1.829	Piste3
...	...	...	...

Piste 2 - suunta X



**Kuva A2.** X-suunnan mitattu taajuussisältö terssikaistoittain pisteessä 2.



**Kuva A3.** Lattian resonanssia kuvaava värähtelyspektri pisteessä 2.

Nimeke	<b>Liikennetärinän monitorointi- ja analysointiympäristö</b>
Tekijä(t)	Jukka Koskinen & Asko Talja
Tiivistelmä	<p>Projektissa kehitettiin uudenlaista liikennetärinän arviointiin tarkoitettua langatonta mittaus- ja analysointiympäristöä. Tavoitteena oli kehittää mittalaitteesta langaton sensoriverkkosovellus, joka olisi yleiskäyttöinen soveltuen myös muihin soveluksiin. Lisäksi projektissa kehitettiin ohjeistus liikennetärinän arviointiin, jota tarvittiin signaalikäsitteily- ja analyysimenetelmien kehittämisessä. Projektissa toteutettiin sensoriverkosta sovellus liikenteen aiheuttamien värähtelyjen mitaamiseen. Kehitetty langaton sensoriverkko on monikäyttöinen mittaussovellus, joka on laskentatehokas, uudelleen konfiguroitavissa ja energiatehokas. Sen suunnittelu ja toteuttaminen perustuvat projektissa kehitettyyn laitetekniikkaan. Sensoriverkon avulla mitattuja tuloksia ja niistä laskettuja tunnuslukuja varten kehitettiin analysointi- ja visualisointityökalut, joiden avulla tulokset voidaan esittää karttapohjilla GIS-paikkatietojärjestelmää hyödyntäen.</p> <p>Mittalaitte testattiin kenttätesteihin liikenneväylien läheisyydessä. Testin tuloksia verrattiin langallisen mittalaitteen antamiin tuloksiin. Tulosten perusteella kehitetyn konseptin (mittaus, mittausten jälkikäsitteily ja visualisointi) todettiin olevan toimiva. Kehitetty langaton sensoriverkko antaa hyvät mahdollisuudet hyödyntää sitä jatkossa myös muissa sovelluksissa, joita ovat esimerkiksi ympäristömittaukset ja rakenteiden monitorointi (rakennukset, sillat, tunnelit yms.). Julkaisussa esitetään myös tulosten hyödyntämismahdollisuudet sekä selvitykset kansainvälisistä markkinoista liikennetärinän sovellusalueelta.</p>
ISBN, ISSN	ISBN 978-951-38-7832-0 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> ) ISSN 2242-122X (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )
Julkaisu-aika	Huhtikuu 2012
Kieli	Suomi, englanninkielinen tiivistelmä
Sivumäärä	60 s. + liitt. 6 s.
Projektin nimi	Liikennetärinän mittaus- ja analysointiympäristö
Toimeksiantajat	Tekes – teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus
Avainsanat	Wireless sensor networks, traffic induced vibrations, geographical information system
Julkaisija	VTT PL 1000, 02044 VTT, Puh. 020 722 111



Title	<b>Wireless measuring and visualisation platform for monitoring traffic induced vibrations</b>
Author(s)	Jukka Koskinen & Asko Talja
Abstract	<p>This report presents results from a research project which developed a consistent measuring and visualisation as well as decision platform tool for evaluation of traffic-induced vibrations. Another goal was to develop a wireless sensor network platform suitable for different monitoring applications. The developed wireless sensor network is re-configurable, has high computation capacity and has low energy consumption. The platform was tested in monitoring of traffic induced ground vibrations.</p> <p>For analysis and visualisation of the measured traffic induced vibrations a software tool was developed. The results of the analysis are visualised in geographical maps using Geographical Information systems (GIS). Also simplified design guidelines for assessment of traffic-induced vibrations in land use were developed in the project.</p> <p>The developed platform and software were tested by measuring traffic-induced vibrations in an area locating near a railway and highway. The measurements of the platform were compared to a wired measuring platform designed for measuring traffic induced vibrations. In addition, a survey of market potential of the developed platform and impacts reviews of traffic induced vibrations in land use in several countries was carried out by an international enquiry.</p>
ISBN, ISSN	ISBN 978-951-38-7832-0 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> ) ISSN 2242-122X (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )
Date	April 2012
Language	Finnish, English abstract
Pages	60 p. + app. 6 p.
Name of the project	Wireless sensor platform for monitoring traffic induced vibrations
Commissioned by	Tekes – the Finnish Funding Agency for Technology and Innovation
Keywords	Wireless sensor networks, traffic induced vibrations, geographical information system
Publisher	VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland, Tel. 020 722 111

ISBN 978-951-38-7832-0 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)  
ISSN 2242-122X (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

