

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Timo Huhtala

**Mittausjakson pituuden vaikutus maaperästä mitatun
raideliikenteen värähtelyn asuntoihin aiheuttaman haitan
arvioinnissa**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-
insinöörin tutkintoa varten Espoossa 31.10.2006

Työn valvoja: Professori Matti Karjalainen

Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri Heikki Helimäki

Tekijä:	Timo Tapani Huhtala		
Työn nimi:	Mittausjakson pituuden vaikutus maaperästä mitatun raideliikenteen värähtelyn asuntoihin aiheuttaman haitan arvioinnissa		
Päivämäärä:	31.10.2006	Sivumäärä:	105+29
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto		
Professori:	S-89 Akustiikka ja äänenkäsittelytekniikka		
Valvoja:	Professori Matti Karjalainen		
Ohjaaja:	Diplomi-insinööri Heikki Helimäki		
<p>Tässä työssä on tarkasteltu mittausjakson pituuden vaikutusta rautatieliikenteen aiheuttaman värähtelyhaitan arvioinnissa. Työn teoriaosassa käydään läpi värähtelyn fysikaalinen luonne, sen syntyminen lähteessä sekä eteneminen lähteestä asuntoon. Työssä on selostettu lisäksi tekijät, jotka vaikuttavat ihmisen kokemaan tärinähaittaan ja miten ne voidaan ottaa huomioon värähtelyhaitan arvioinnissa. Värähtelyn vaimennuskeinot esitellään ja niiden kustannus- sekä vaimennusvaikutuksia arvioidaan.</p> <p>Kokeellisessa osassa on aloitettu VTT:n ohjeen mukaisesta viikon pituisesta mittausjaksosta ja vaiheittain lyhentämällä mittausjakson pituutta tutkittu saavutettuja tunnuslukuja. Tutkimus on suoritettu nelivaiheisesti ensimmäisen vaiheen ollessa viikon pituinen. Toisessa vaiheessa viikko jaettiin arkipäiviin ja viikonloppuun. Toisen vaiheen perusteella todettiin, että arkipäiviltä laskettu tunnusluku vastasi kaikissa kohteissa täysin koko viikon ajalta määritettyä tunnuslukua.</p> <p>Tämän perusteella siirryttiin vaiheeseen kolme, jossa mittausjaksoksi valittiin yksi kokonainen vuorokausi. Vaihe kolme rajattiin edellisen vaiheen perusteella koskemaan vain arkivuorokausia. Vaiheen kolme tuloksista havaittiin, että yleensä yhdeltä arkivuorokaudelta määritetty tunnusluku oli enimmillään noin 20 prosenttia koko viikon ajalta määritettyä tunnuslukua alhaisempi. Muutamassa tapauksessa arkivuorokaudelta määritetty tunnusluku oli vieläkin alhaisempi mutta tämän todettiin johtuvan yleensä ulkopuolisten häiriölähteiden vaikutuksesta.</p> <p>Neljännessä vaiheessa jaettiin suurimman tunnusluvun tuottanut arkivuorokausi aikaväleille 06-18 ja 18-06. Jälkimmäisellä aikavälillä oletettiin häiriölähteiden vaikutusten olevan vähäisempiä. Neljännen vaiheen tulosten todettiin kuitenkin olevan ristiriitaisia. Lisäksi eri vaiheissa saatuja tuloksia verrattiin eri mittauspistein välillä ja havaittiin, että mittauspisteiden välillä saattoi olla jopa suurempia eroja kuin mittausjakson pienentäminen viikosta yhteen arkipäivään aiheutti.</p> <p>Kaikilta arkipäiviltä laskettu tunnusluku riittää täysin kuvaamaan koko viikolta määritettyä tunnuslukua ja yhdeltä arkivuorokaudelta määritetty kohtalaisen hyvin, kunhan mittausvuorokausi valitaan huolella etukäteen. Lisäksi ehdotettiin kertoimet, joita käyttämällä lyhyemmältä mittausjaksolta saatu tunnusluku voidaan skaalata vastaamaan koko viikon ajalta määritettyä tunnuslukua.</p>			
Avainsanat:	rautatieliikenne, tärinähaitta, värähtely, tunnusluku, mittausjakso		

Author:	Timo Tapani Huhtala		
Title of thesis:	Measuring housing vibration problems caused by railway traffic: Duration of measurement and its impact on evaluation		
Date:	31 October 2006	Number of pages:	105+29
Department:	Electrical and Communications Engineering		
Professorship:	S-89 Acoustics and audio signal processing		
Supervisor:	Professor Matti Karjalainen		
Instructor:	Heikki Helimäki M.Sc.(Tech)		
<p>This thesis investigates the measurement of vibration problems caused by railway traffic and the ideal duration of the measurement period. The theory section describes the physical nature of vibration, its sources, and its progress from source to receiver. The thesis looks at factors causing vibration to be perceived as a disturbance by residents and presents measurement methods that take these factors into account. Methods of mitigating vibration are assessed with respect to their cost and isolation efficiency.</p> <p>In the initial stages of the experiment, railway vibration was measured for a period of one week in accordance with recommendations issued by the Technical Research Centre of Finland. The measurement period was studied in four phases. In the second phase, a distinction was made between weekdays and weekends. The results showed that the statistical maximum value of vibration measured on weekdays fully corresponded to that of a weeklong measurement period.</p> <p>In phase three, the measurement period was shortened to one weekday. The results revealed that the statistical maximum values of vibration measured for one weekday were no more than about 20 percent lower than those defined for a whole week. In a few cases, the results were lower but this was largely explained by disturbances from other nearby sources.</p> <p>In phase four, the measurements focused solely on the weekday for which the greatest statistical maximum vibration value was measured at every site. The measurement period was divided into time intervals of 06.00-18.00 and 18.00-06.00. Fewer disturbances were anticipated in the latter interval than in the former. The results were inconsistent, however. The results achieved using different measurement channels in different phases were also compared. This revealed that the statistical maximum values of different measurement points achieved using a week long measurement period were subject to greater variation than those derived after shortening the measurement period from one week to one weekday.</p> <p>We may thus conclude that the statistical maximum value achieved when performing measurements only on weekdays gives a reliable result, and that performing measurements only on one weekday produces moderately reliable results. This entails, however, that the weekday is chosen carefully beforehand. The thesis proposes a correction coefficient for statistical maximum values based on one weekday.</p>			
Keywords:	railway traffic, vibration problem, vibration, statistical maximum value, measurement period		

ESIPUHE

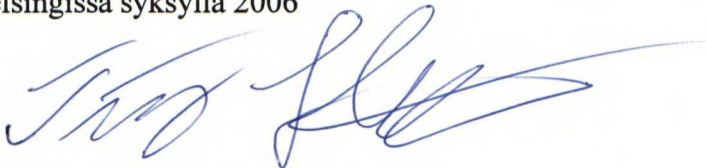
Tämä työ on tehty Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy:n palveluksessa vuoden 2006 aikana. Työn valvojana on toiminut professori Matti Karjalainen Teknillisestä korkeakoulusta ja ohjaajana diplomi-insinööri Heikki Helimäki Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy:stä. Heille haluan lausua lämpimät kiitokset työn ammattitaitoisesta ohjaamisesta sekä erityiskiitokset Heikki Helimäelle tämän työn mahdollistamisesta sekä rahoittamisesta.

Kaikkia työtovereitani haluan kiittää avusta ja tuesta, jota olen nauttinut työtä tehdessäni. Lisäksi olen saanut apua sekä arvokkaita tietoja useilta eri alojen ammattilaisilta sekä viranomaistahoilta.

Sydämelliset kiitokset tahdon osoittaa myös Iidalle tuesta, työn kommentoinnista sekä lätyistä. Isäni, äitini, siskoni sekä isovanhempani ovat uskollisesti jaksaneet tukea opiskeluani useiden vuosien ajan. Heille rakkaimmat kiitokset kaikesta myötävaikutuksesta sekä luottamuksesta, unohtamatta taloudellisesta tukea.

Kiitos.

Helsingissä syksyllä 2006



Timo Huhtala

SISÄLLYSLUETTELO

Esipuhe	4
Sisällysluettelo.....	5
Symboliluettelo	6
Johdanto.....	8
1 Värähtely fysikaalisena ilmiönä	10
1.1 Deterministinen ja satunnainen värähtely	13
1.2 Kvasi-staattinen ja dynaaminen värähtely.....	14
1.3 Eteneminen maaperässä	15
1.4 Vaimeneminen.....	18
2 Rautatieliikenteen aiheuttama värähtely	22
2.1 Värähtelyn syntyminen ja eteneminen lähteessä.....	24
2.2 Värähtelyn eteneminen väliaineessa	26
2.3 Värähtelyn eteneminen kohteessa	29
3 Värähtelyn aiheuttamat haitat.....	42
3.1 Värähtely asunnoissa.....	45
3.2 Runkoääni asunnoissa	49
3.3 Rakennusten vaurioituminen.....	52
4 Värähtelyn vaimennuskeinot.....	57
4.1 Vaimennuskeinot lähteessä	58
4.2 Vaimennuskeinot väliaineessa	64
4.3 Vaimennuskeinot kohteessa	71
5 Tehdyt mittaukset.....	77
5.1 Mittausten tavoite	77
5.2 Mittausmenetelmä	78
5.3 Mittauslaitteisto ja kohteet	79
5.4 Tulokset.....	83
5.4.1 Tunnuslukujen vertailu eri ajanjaksoilla	86
5.4.2 Tunnuslukujen vertailu eri mittauskanavissa	94
5.4.3 Tulosten epävarmuudet	98
6 Johtopäätökset	99
Lähdeluettelo	102
Liitteet	106

SYMBOLILUETTELO

$(El)_l$	lattian pituussuuntainen jäykkyys			
$(El)_b$	lattian leveysuuntainen jäykkyys			
A	amplitudi			
a	kiihtyvyys			
\hat{a}	kiihtyvyyden huippuarvo			
a_{95}	lineaarisen kiihtyvyyden tunnusluku			
a_{RMS}	kiihtyvyyden tehollisarvo			
a_w	taajuuspainotettu kiihtyvyys			
$a_{w,95}$	taajuuspainotettu kiihtyvyyden tunnusluku			
$a_{w,RMS}$	taajuuspainotetun kiihtyvyyden tehollisarvo			
$\hat{a}_{w,RMS}$	taajuuspainotetun kiihtyvyyden tehollisarvon huippuarvo			
$\bar{a}_{w,RMS}$	taajuuspainotettujen kiihtyvyyden tehollisarvojen huippuarvojen keskiarvo			
c	aaltoliikkeen etenemisnopeus			
E	kimmomoduli			
e	Neperin-luku			
f	taajuus			
f_0	ominaistaajuus			
$f_{0,L}$	lattiakannattimien ominaistaajuus			
$f_{0,l}$	lattiapalkin ominaistaajuus			
G	leikkausmoduli			
k	jousivakio			
$L_{A,F,eq}$	äänen A-taajuuspainotettu	fast-aikavakiota	käyttämällä	määritetty
	ekvivalenttitaso			
$L_{A,S,eq}$	äänen A-taajuuspainotettu	slow-aikavakiota	käyttämällä	määritetty
	ekvivalenttitaso			
$L_{A,F,max}$	äänen A-taajuuspainotettu	fast-aikavakiota	käyttämällä	määritetty
	hetkellinen enimmäistaso			
$L_{A,S,max}$	äänen A-taajuuspainotettu	slow-aikavakiota	käyttämällä	määritetty
	hetkellinen enimmäistaso			
m	massa			
R_n	perustuksista mitatun värähtelyn suhde maaperästä mitattuun			
r	etäisyys			
T	aaltoliikkeen jaksonaika			
v	nopeus			
\hat{v}	nopeuden huippuarvo			
v_{95}	lineaarisen nopeuden tunnusluku			
v_{long}	nopeuden junaradan suuntainen komponentti			
v_M	nopeuden määräävä komponentti			
\hat{v}_{res}	resultoivan nopeuden huippuarvo			
v_{RMS}	nopeuden tehollisarvo			
v_s	leikkausaallon etenemisnopeus			
v_{tran}	nopeuden junarataa vastaan kohtisuora komponentti			
v_{vert}	nopeuden pystysuuntainen komponentti			
v_w	taajuuspainotettu nopeus			
$v_{w,95}$	taajuuspainotettu nopeuden tunnusluku			
$v_{w,RMS}$	taajuuspainotetun nopeuden tehollisarvo			

$\hat{v}_{w,RMS}$	taajuuspainotetun nopeuden tehollisarvon huippuarvo
$\bar{v}_{w,RMS}$	taajuuspainotettujen nopeuden tehollisarvojen huippuarvojen keskiarvo
$W_a(f)$	kiihtyvyyden painotusfunktio
$W_v(f)$	nopeuden painotusfunktio
x	siirtymä
\hat{x}	siirtymän huippuarvo
α	väliaineen absorptiokerroin
γ	liukuma
λ	aaltoliikkeen aallonpituus
λ_R	Rayleigh-aallon aallonpituus
ρ	tiheys
σ	keskihajonta
σ_m	keskimääräinen jännitystila
τ	aikavakio integroinnissa
ν	Poisson-luku

JOHDANTO

Suomessa on viime aikoina ollut havaittavissa asutuksen keskittymistä rautateiden varsille. Olemassa olevat asuinalueet ovat tiivistyneet ja uusia asuinalueita kaavoitetaan. Samanaikaisesti rautatieliikenne on tullut merkittävämmäksi joukkoliikennemuodoksi, jolloin liikennemäärät ovat kasvaneet. Pääkaupunkiseudun työmatkalaisista yhä suurempi osa saapuu yhä kauempaa työpaikalleen, jolloin junien nopeuksia on pyritty nostamaan. Nämä tekijät yhdessä ovat altistaneet yhä useampia ihmisiä tärinälle. Junaradan läheisyydessä asuvat tai oleskelevat ihmiset altistuvat päivittäin melulle sekä siihen ympäristönsuojelullaista rinnastettavalle tärinälle. On arvioitu, että katu- ja tieliikenteen aiheuttamalle tärinälle altistuu Suomessa tällä hetkellä noin 80 000 asukasta ja rataliikenteen aiheuttamalle tärinälle jopa kaksinkertainen määrä. Rautatieliikenteen aiheuttamalle värähtelylle altistuvat ihmiset kokevat yleensä tärinän ärsyttävänä ja asumisviihtyvyyttä alentavana, mutta pahimmillaan se voi jopa vaurioittaa rakennuksia. Mikäli värähtely kohdistuu asuinrakennukseen yöaikaan, häiritsee se lepoa, jolloin se voidaan mieltää myös terveyshaitaksi.

Koska vaimennusrakenteiden lisääminen olemassa olevaan ratarakenteeseen tai rakennukseen on jälkikäteen erittäin kallista ja vaikeaa, on tarpeen kehittää luotettavat arviointityökalut, joita voidaan käyttää jo suunnitteluvaiheessa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että värähtelyn haitallisuus arvioidaan mittaamalla maaperästä joko olemassa olevaa suunniteltua rataosaa vastaavan alueen ympäristössä tai suunnitellun rakennuksen kohdalta. Toistaiseksi Suomessa ei ole olemassa mittaustandardia, jonka mukaan rautatieliikenteen aiheuttamaa värähtelyä tulisi mitata ja arvioida. Sen sijaan VTT on julkaissut mittaus- ja arviointiohjeen, jota suositellaan käytettäväksi rautatieliikenteen asuntoihin aiheuttaman värähtelyn arvioinnissa. Ohje sisältää kuvauksen mittaustavasta sekä tulosten analysoinnista. Ohjeen mukainen värähtely arviointi tuottaa yksinumeroisen lukuarvon, jota kutsutaan värähtelyn tunnusluvuksi.

Tunnusluku voidaan määrittää joko maaperästä mitatun kiihtyvyyden tai nopeuden suhteen. Maaperästä mitattu signaali suodatetaan painotussuotimen avulla vastaamaan ihmisen herkkyyttä tärinälle eri taajuuksilla. Ohjeessa annetaan lisäksi värähtelylle tunnusluvun suhteen arviointiluokat A, B, C ja D, joista A on paras. Mittaustapa, tunnusluvun määrittäminen sekä värähtelyluokat on VTT:n ohjeeseen otettu suoraan Norjassa vuonna 1999 julkaistusta standardista. Norjalainen mittaustandardi sekä siinä annettu värähtelyluokitus perustuvat laajoihin kysely- ja mittausselvityksiin. VTT:n ohjeessa vaaditaan kuitenkin huomattavasti pidempää mittaussjaksoa kuin norjalaisessa standardissa, johon ohje perustuu.

Käytettäessä VTT:n ohjeen mukaista pidempää mittaussjaksoa on havaittu, että se saattaa eräissä tilanteissa tuottaa mittauksiin enemmän epävarmuutta. Etenkin pääkaupunkiseudulla uusia rakennuksia sijoitetaan nykyisin usein radan läheisyyteen jo rakennettuun tai rakenteilla olevaan kaupunkiympäristöön. Tällaisessa ympäristössä on lukuisia ulkopuolisia häiriölähteitä, joiden vaikutusten eliminointi mittauksista on käytännön kenttäolosuhteissa hankalaa, jos ei mahdotonta. Häiriölähteet pilaavat suuren osan mittauksista sekä saattavat

pahimmassa tapauksessa antaa virheellisen kuvan arvioitavan tärinälähteen ominaisuuksista. Tästä syystä on tärkeää selvittää, voidaanko Norjan standardin mukaisella lyhyemmällä mittausjaksolla päästä vastaavaan lopputulokseen, ja miten ylipäättänsä mittausjakson pituus vaikuttaa lopputulokseen. Lyhyemmän mittausjakson etuna on, että häiriölähteiden vaikutus voidaan minimoida valitsemalla mittausjakso etukäteen suotuisaksi sekä varmistamalla mittaustulosten häiriöttömyys paikan päällä.

Suomi on poikkeuksellinen, ellei jopa ainoa maa, jossa rautatieliikenteen värähtelyn arviointiin on suositeltu käytettäväksi viikon pituisia mittausjaksoa. Rautatieliikenne toistuu useimmiten matkustajaliikenteen osalta päivittäin samanlaisen sillä poikkeuksella, että lauantai ja sunnuntaipäivillä osa arkipäivisin liikennöivistä junista on peruutettu. Värähtelyn kannalta ongelmallisimpia ovat yleensä tavarajunat, joiden liikennöinti tapahtuu tarpeen mukaan. On oletettavaa, että valitsemalla lyhyempi mittausjakso, johon sisältyy myös tavarajunaliikennettä, tuottaa luotettavan arvion kohteessa esiintyvistä värähtelystä. Mittausjakson pituuden vaikutuksesta ei kuitenkaan lähdeaineiston perusteella ole tehty selvityksiä. Tässä työssä tutkitaan, miten mittausjakson pituus vaikuttaa värähtelyn tunnuslukuun, ja mitä epävarmuuksia mittaamiseen näin ollen sisältyy.

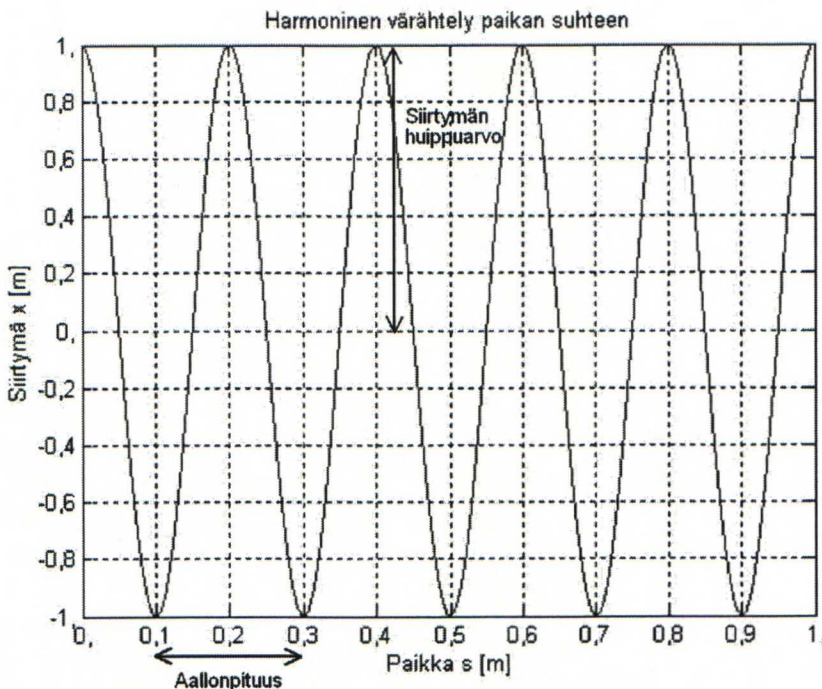
1 VÄRÄHTELY FYSIKAALISENA ILMIÖNÄ

Tärinä on mekaanista värähtelyä tasapainoaseman suhteen. Värähtelyssä materiaalin tietty, kuviteltavissa oleva piste hetkellisesti poikkeaa tasapainoasemasta palatakseen värähtelylähteen vaikutuksen lakattua vaikuttamasta takaisin alkuperäiseen asemaansa. Värähtely syntyy siitä, että materiaalissa kulkeva paineaalto aikaansaa materiaaliin hetkellisiä muodonmuutoksia, jotka ilmenevät mm. materiaalin pinnan siirtyminä. Värähtelylähteenä voi toimia esimerkiksi junaliikenne, joka aiheuttaa raiteen pintaan muodonmuutoksia eli materiaalin partikkeleiden siirtymiä tasapainoaseman suhteen.

Tärinä voi muodostua useista eri taajuuskomponenteista tai vain yhdestä tietyn taajuudesta värähtelystä, jolloin sitä kutsutaan harmoniseksi värähtelyksi. Värähtelyn taajuus määritetään yhdessä sekunnissa tapahtuvien kokonaisten siirtymäjaksojen lukumääränä. Yhden kokonaisen siirtymäjakson aikana kuluvaa aikaa kutsutaan jaksonajaksi T [s]. Tällöin värähtelyn etenemää matkaa kutsutaan aallonpituudeksi λ [m]. Tällöin värähtelyliikkeen etenemisnopeus saadaan kaavasta

$$(1.1) \quad c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f,$$

jossa f [Hz] on värähtelyn taajuus. Kuvassa 1.1 on esitetty harmoninen värähtely, jonka aallonpituus $\lambda = 0,2$ metriä ja siirtymän huippuarvo $\hat{x} = 1,0$ metriä.

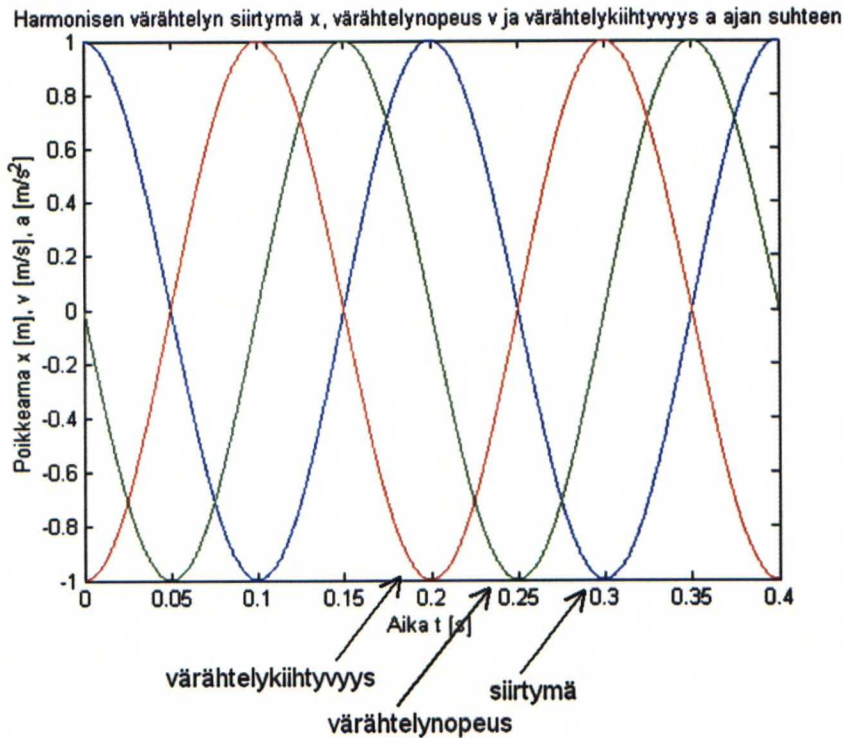


Kuva 1.1. Harmoninen värähtely paikan suhteen. Kuvasta nähdään, että värähtelyn aallonpituus on 0,2 metriä ja siirtymän huippuarvo \hat{x} on 1 metri.

Värähtelyliikettä voidaan mitata joko siirtymänä, värähtelynopeutena tai värähtelykiihtyvyytenä. Värähtelynopeus saadaan derivoimalla siirtymä ajan suhteen ja värähtelykiihtyvyys puolestaan derivoimalla värähtelynopeus ajan suhteen. Eri suureiden suhteet toisiinsa aikatasossa on esitetty kuvassa 1.2. Harmonisella värähtelyllä tämä voidaan esittää huippuarvojen suhteen seuraavasti

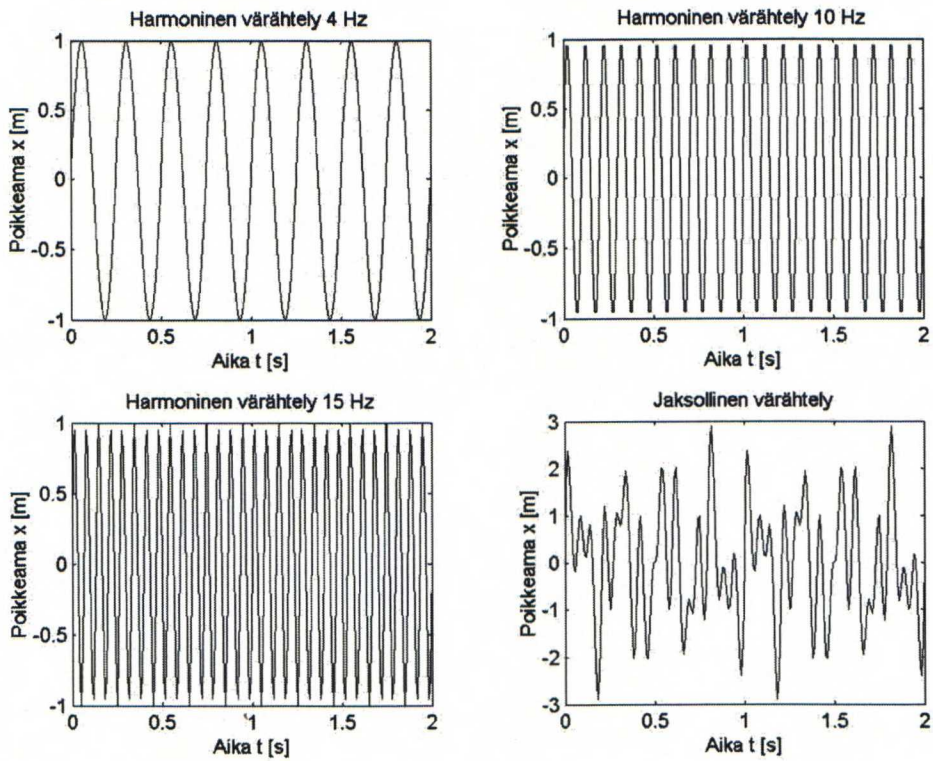
$$(1.2) \quad \hat{x} = \frac{1}{2\pi f} \hat{v} = \frac{1}{(2\pi f)^2} \hat{a},$$

jossa \hat{x} on siirtymän, \hat{v} on värähtelynopeuden ja \hat{a} on värähtelykiihtyvyyden huippuarvo (Törnqvist ja Nuutilainen, 2002).

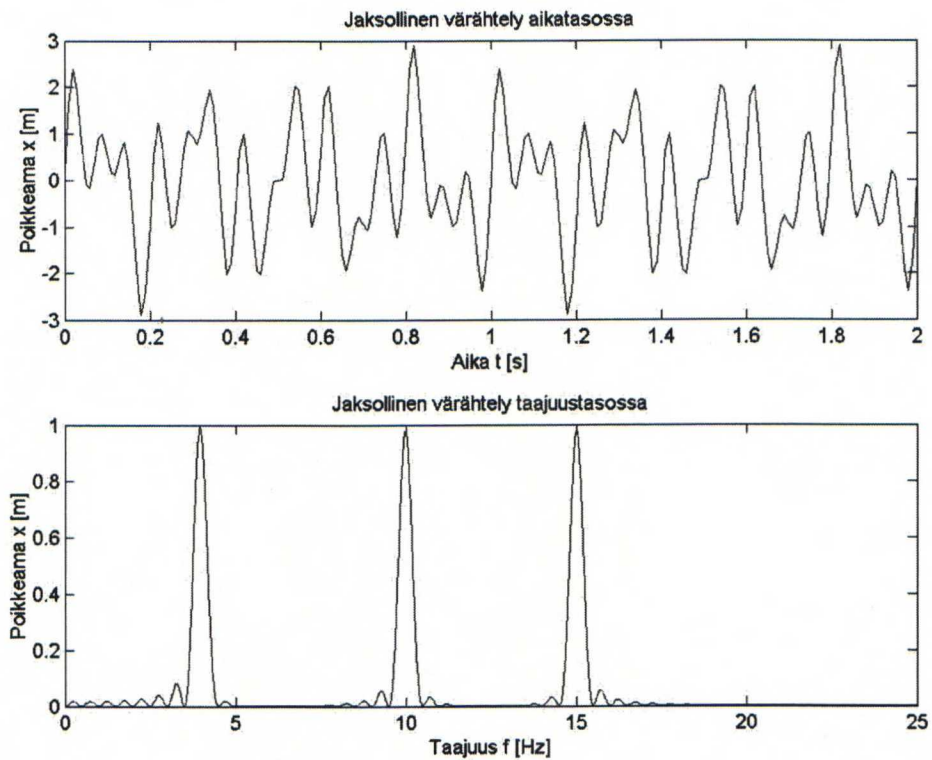


Kuva 1.2. Harmonisen värähtelyn siirtymä, värähtelynopeus ja värähtelykiihtyvyys ajan suhteen. Kuvasta nähdään, että käyrät ovat samanmuotoisia mutta vaihe on siirtynyt.

Liikennetärinä koostuu aina useammasta kuin yhdestä taajuudesta ja siten se ei ole harmonista värähtelyä. Värähtelyä, joka sisältää useita eri taajuisia harmonisia komponentteja, kutsutaan jaksolliseksi värähtelyksi. Kuvassa 1.3 on esitetty, miten kolmen eri taajuisen harmonisen värähtelyn summautuessa syntyy jaksollinen värähtely. Jaksollisen värähtelyn taajuussisältöä voidaan analysoida tekemällä Fourier-muunnos. Kuvassa 1.4 on esitetty kuvan 1.3 jaksollisen värähtelyn Fourier-spektri. Spektristä voidaan havaita jaksollisen värähtelyn kolmen harmonisen komponentin taajuudet.



Kuva 1.3. Kolmesta eri taajuisesta harmonisesta värähtelystä summautuva jaksollinen värähtely.

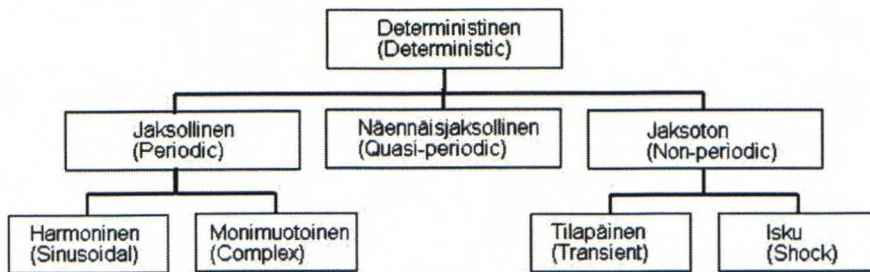


Kuva 1.4. Jaksollinen värähtely esitettyä aika- sekä taajuustasossa. Taajuustason spektriesityksestä voidaan havaita taajuuskomponentit, joista jaksollinen värähtely koostuu.

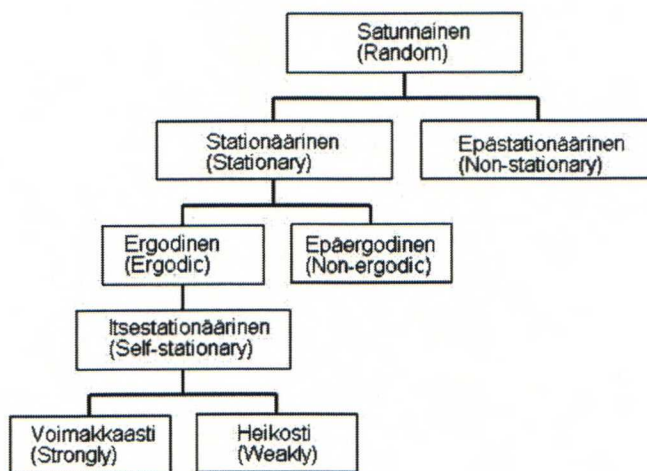
Useista taajuuskomponenteista koostuvalle jaksolliselle värähtelylle ei päde kaava (1.2), vaan suureiden muuntaminen toisiksi pitää tehdä numeeristen signaalinkäsittelymenetelmien avulla. Näin ollen mitatusta värähtelykiihtyvyydestä voidaan numeerisen integroinnin avulla määrittää värähtelynopeus ja tästä samalla tavalla siirtymä.

Koska signaalinkäsittelyssä syntyy aina virhettä, joka voi olla suurempi kuin mittauslaitteistolle tai –menetelmälle sallitaan, on aina suositeltavaa esittää tulokset ensisijaisesti mitatun suureen suhteen ja erottaa numeerisilla menetelmillä määritellyt tulokset suorista mittaustuloksista (Törnqvist ja Nuutilainen, 2002).

1.1 Deterministinen ja satunnainen värähtely



A) Deterministinen data



B) Satunnainen data

Kuva 1.5. Värähtelyn jakaminen ominaisuuksien perusteella eri luokkiin. Kuvasta nähdään, että karkeimmillaan jako tehdään deterministiseen ja satunnaiseen värähtelyyn (ISO 4866, 1990).

Värähtely voidaan jakaa sen ominaisuuksien mukaan moniin eri luokkiin (kuva 1.5). Erityyppinen värähtely voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan; deterministinen ja satunnainen värähtely. Deterministisen värähtelyn tapauksessa on mahdollista

arvioida edellisten näyttöiden perusteella seuraavia näytteitä. Tällöin värähtely on periaatteessa mahdollista kuvata yksiselitteisesti matemaattisella funktiolla. Deterministisen värähtelyn tapauksessa yksinkertaiset analyysimenetelmät riittävät yleensä kuvaamaan riittävällä tarkkuudella värähtelyn ominaisuuksia, joita tarvitaan esimerkiksi karkeassa värähtelyhaitan arvioinnissa. Tällaisia tunnuslukuja ovat mm. tehollisarvo, huippuarvo sekä keskiarvo. Rautatieliikenteen aiheuttama värähtely on monia taajuuksia sisältävää monimuotoista determinististä värähtelyä (vrt. kuva 1.5). Edellä mainittuihin tunnuslukuihin palataan kappaleessa kaksi.

Satunnaisesta värähtelystä tulee aina analysoida, täyttääkö se stationäärisyysovaatimukset. Mikäli satunnainen värähtely on stationääristä, pitää värähtelyn mittaamiseen käytettävän mittausjakson pituus valita huolellisesti. Vaadittu mittausjakson pituus voidaan arvioida esimerkiksi standardin ISO 4866 informatiivisessa liitteessä C esitetyllä tavalla. Samaisessa liitteessä on myös annettu ohjeita analysoinnin suorittamiseksi (ISO 4866, 1990).

Koska epästationääristen mittaussignaalien vaatimat analyysimenetelmät ovat keskimäärin huomattavasti vaativampia, pyritään yleensä mittaustilanteessa saattamaan kaikki mittaussignaalit stationäärisiksi. Tarkalleen ottaen se ei ole mahdollista muualla kuin laboratorio-olosuhteissa, jolloin olosuhteet voidaan pitää vakioina. Käytännön kenttämittauksissa stationääristen mittaustulosten saaminen onnistuu, mikäli mittausta voidaan luotettavasti toistaa samoissa olosuhteissa useita kertoja peräkkäin pienen ajan sisällä. Joissakin tapauksissa mitattava ilmiö voi tapahtua harvoin, esimerkiksi junan ohiajo, jolloin stationääristen mittaustulosten saaminen voi olla hankalaa (Lahti, 1997).

1.2 Kvasi-staattinen ja dynaaminen värähtely

Junan aiheuttama värähtely voidaan jakaa kahteen eri luokkaan sen syntymekanismien perusteella. Junan massa poikkeuttaa kiskoja ja ratapenkereen välityksellä maanpintaa, jolloin maaperään kytkeytyy värähtely. Tällaista junan massasta aiheutuvaa värähtelyä kutsutaan kvasi-staattiseksi eli näennäisstaattiseksi värähtelyksi. Nimitys kuvaa ilmiötä junassa olevan havaitsijan suhteen. Junan massan maanpintaan kohdistama poikkeama voidaan kuvata muodonmuutoskenttänä. Kyseisessä tapauksessa muodonmuutoskenttää kutsutaan ns. painaumasuppiloksi, joka etenee junan mukana samalla nopeudella kuin juna. Näin ollen junassa oleva tarkkailija ei havaitse painaumasuppiloa, mutta radan varrella maanpinnalla seisova tarkkailija aistii painaumasuppilon maanpinnan värähtelynä (Välikylä, 2005).

Näennäisstaattisen värähtelyn suuruuteen sekä painaumasuppilon muotoon vaikuttavat ratapenkereen pystysuuntainen jäykkyys, junan akselien sijainti sekä akselipainot (Törnqvist ja Komulainen, 1993). Tarkemmin värähtelyyn syntyy ja ominaisuuksiin vaikuttavista tekijöistä kerrotaan kappaleessa kaksi.

Toinen värähtelyn syntymekanismi on junan liikkeen maaperään aiheuttama poikkeama. Junan liikkeen synnyttämää värähtelyä kutsutaan dynaamiseksi värähtelyksi. Tällöin maaperään kohdistuu staattisen kuorman lisäksi hetkellisesti junan pysty- tai vaakasuuntaisen liikkeen aiheuttama dynaaminen voima. Näin tapahtuu esimerkiksi junan ylittäessä epätasaisuuden kiskossa. Toisin kuin staattinen

kuorma, dynaaminen kuorma voi kohdistua myös ylöspäin. Raiteen epätasaisuuksista aiheutuva dynaaminen kuorma voi olla jopa kolminkertainen verrattuna staattiseen kuormaan. (Törnqvist ja Komulainen, 1993). Koska dynaaminen kuorma ei liiku junan mukana samalla nopeudella, kuten staattisen kuorman aiheuttama painaumasuppilo, havaitsevat molemmat sekä junan sisällä oleva että radan varrella maanpinnalla oleva tarkkailija värähtelyn (Välkylä, 2005).

Mikäli dynaaminen kuorma aiheutuu säännöllisin välimatkoin ja junan nopeus on vakio, syntyy värähtelyheräte, jonka taajuus on vakio. Dynaamisen kuorman muutos tapahtuu esimerkiksi jokaisen junaradan tuentaan käytetyn ratapölkyn kohdalla, koska tällöin radan pystysuuntainen jäykkyys muuttuu (Dawn ja Stanworth, 1979). Näin syntyvän jaksollisen värähtelyn taajuus saadaan kaavasta

$$(1.3) \quad f = \frac{v}{l},$$

jossa v on junan nopeus ja l on ratapölkkyjen välimatka. Pölkkyjen ohitustaajuus on suomalaisissa radoilla ja kalustolla noin 35...65 Hz (Törnqvist ja Komulainen, 1993).

1.3 Eteneminen maaperässä

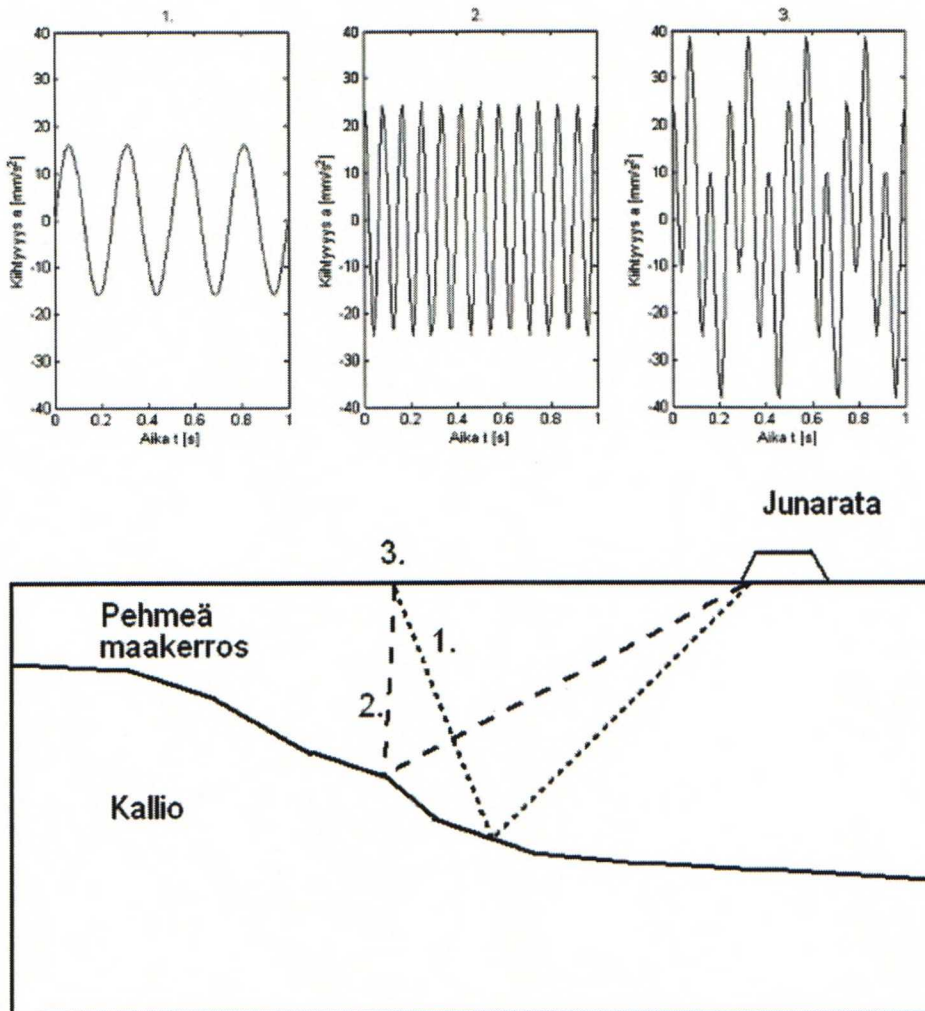
Värähtelyn eteneminen maaperässä tapahtuu normaalina mekaanisena värähtelynä, jolloin väliaineen eli maaperän kimmo-ominaisuudet määrittelevät aaltoliikkeen ominaisuudet. Junan maaperään kohdistaman voiman aiheuttama poikkeama on pienempi jäykillä ratarakenteilla ja karkearakeisilla maapohjilla tai kalliopohjilla. Mikäli junarata on rakennettu maanvaraisesti pehmeälle maapohjalle, kuten savimaalle, on voiman aiheuttama poikkeama suurimmillaan ja siten myös maaperässä etenevän värähtelyn amplitudi (Törnqvist ja Nuutilainen, 2002). Tarkemmin eri maaperätyyppien vaikutuksia on esitetty kappaleessa kaksi.

Junaliikenteen aiheuttama värähtely maaperässä on aaltoliikettä, aivan kuten esimerkiksi valon eteneminen väliaineessa. Näin ollen sille voidaan soveltaa aaltoliikkeille olemassa olevia fysiikan lakeja. Mikäli aaltoliike kohtaa maaperässä väliaineen rajapinna, osa aaltoliikkeestä heijastuu ja osa taittuu samoin kuin valon saapuessa ilmasta veden pintaan. Taittuminen noudattaa Snellin lakia jolloin pätee kaava

$$(1.4) \quad \frac{\sin(\phi_1)}{v_1} = \frac{\sin(\phi_2)}{v_2},$$

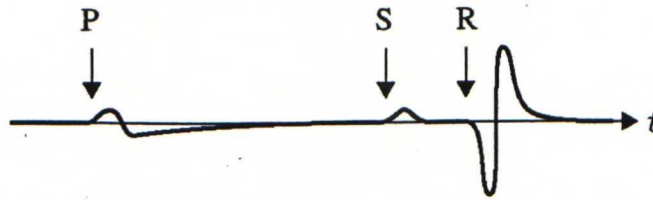
jossa ϕ_1 ja ϕ_2 ovat aaltorintaman tulo- ja lähtökulma pinnan normaalin suhteen sekä v_1 ja v_2 tulevan ja taittuneen aaltoliikkeen nopeudet.

Aallot myös interferoivat keskenään, jolloin kovasta kalliopinnasta takaisin maanpinnalle heijastuneet aallot voivat kasvattaa värähtelyn amplitudia tietyssä pisteessä. Junaliikenteen tapauksessa tämä ilmenee, mikäli pehmeän maaperän alapuolella oleva kalliokerros nousee lähemmäs maanpintaa etäisyyden junaradasta kasvaessa (kovera kalliopinta). Ilmiö on havainnollistettu kuvassa 1.6. Tärinäaaltojen interferenssi voi ilmetä myös pitkien tavarajunien tapauksessa, jolloin junan etu- ja takapäin synnyttämät värähtelyt voivat summautua junan puolesta välissä (Välikylä, 2005), (Törnqvist ja Nuutilainen, 2002).



Kuva 1.6. Kovasta kalliopinnasta heijastuneiden värähtelyiden yksi ja kaksi interferenssi tietyssä pisteessä. Kuvasta havaitaan, että maanpinnalla pisteessä kolme värähtelyn amplitudi kasvaa.

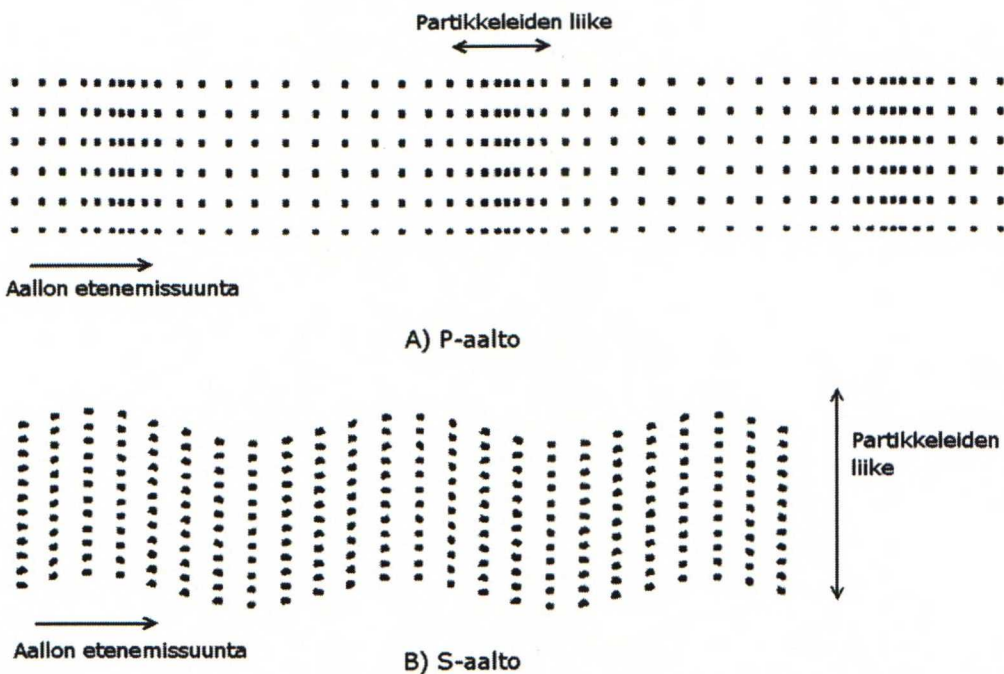
Rautatieliikenteen herättämä maaperän värähtely voidaan luokitella kolmeen eri luokkaan P-, S- ja R-aallot, niiden esiintymisjärjestyksen perusteella. Kuvassa 1.7 on kaavamaisesti esitetty eri aaltotyyppien esiintymisjärjestys sekä karkeat amplitudisuhteet.



Kuva 1.7. Eri aaltotyyppien ajallinen esiintymisjärjestys. Kuvasta nähdään, että ensimmäisenä havaitaan P-aallot ja viimeisenä saapuvat yleensä voimakkaimmat R-aallot (Talja, 2004c).

Ajallisen esiintymisen lisäksi värähtelyt voidaan jakaa myös sen perusteella, etenevätkö ne pitkittäisinä vai poikittaisina aaltona vai molempina. Kolmas tärkeä lajitteluperuste on, eteneekö värähtely maan pinnalla pinta-aaltona vai maan sisässä runkoaaltona. Runkoaallot ulottuvat pitkälle maan sisään ja voivat kulkea jopa maapallon läpi (Välikylä, 2005).

Ensimmäiseksi tarkkailija havaitsee P-aallot, joiden liike muodostuu maaperän pitkittäisistä paine-eroista aiheutuvasta laajenemisesta ja puristumisesta. Näin ollen P-aallon etenemistä vastaa äänen etenemistä ilmassa. P-aallon jälkeen saapuva S-aalto etenee leikkausaaltona ja voidaan siten jakaa vaaka- sekä pystysuuntaiseen komponenttiin. Kuvassa 1.8 on esitetty P- ja S-aaltojen eteneminen.



Kuva 1.8. P- ja S-aallon eteneminen tasossa. P-aalto etenee partikkeleiden välisinä paine-eroina ja s-aalto partikkeleiden välisinä leikkausvoimina.

Viimeisenä saapuva R-aalto (Rayleigh-aalto) liikkuu sekä puristus- että leikkausaaltona. R-aallot ovat rautatieliikenne tärinän kannalta usein haitallisimpia, koska ne sisältävät suurimman osan energiasta. Pistemäisen tärinälähteen paksuun homogeeniseen maaperään tuottamasta värähtelyenergiasta 67 % on pinta-aaltoja, 25 % S-aaltoja ja 7 % P-aaltoja.

Värähtelyn kohdatessa maanpinnan tai toisen maakerroksen tapahtuu heijastumisen ja taantumisen lisäksi P-aaltojen muuntumista S-aalloiksi ja päinvastoin. P- ja S-aaltojen kohdatessa maanpinnan joutuu maanpinta vedenpinnan kaltaiseen värähtelyyn. Tämän seurauksena syntyy R-aaltoja, joiden energiasta noin 98 % etenee enintään aallonpituuden syvyydellä maanpinnasta. Näin ollen R-aaltojen energiasta suurin osa etenee korkeintaan kymmenien metrien syvyydellä maanpinnasta. Yhteenvedon voidaan todeta, että suurin osa rautatieliikenteen aiheuttamasta värähtelystä etenee R-aaltona, joiden energiasta suurin osa etenee maanpintakerroksissa. Tästä syystä R-aaltoja pidetään yleisesti myös aaltomuodoista haitallisimpana (Talja, 2004c), (Törnqvist ja Komulainen, 1993), (Levomäki, 1999), (Välikylä, 2005). Eri aaltotyyppien ominaisuudet on koottu taulukkoon 1.1.

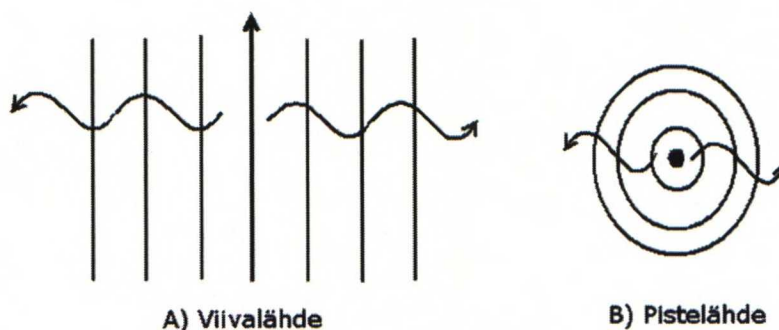
Taulukko 1.1. Värähtelyn jaottelu eri luokkiin sekä näiden ominaisuudet. Taulukosta nähdään, että R-aallot sisältävät junaliikenteen aiheuttaman tärinän energiasta suurimman osan ja ovat siten haitallisimpia.

	P-aalto	S-aalto	R-aalto
ajallinen esiintymisjärjestys	ensimmäinen	toinen	kolmas
puristusaalto / leikkausaalto	puristusaalto	leikkausaalto	puristus- sekä leikkausaalto
pinta-aalto / runkoaalto	runkoaalto	runkoaalto	pinta-aalto
nopeus suhteessa P-aaltoon	1	noin 0,5 kertainen	noin 0,45 kertainen
osuus pistemäisen tärinälähteen homogeeniseen maaperään tuottamasta energiasta	noin 7 %	noin 25 %	noin 67 %

1.4 Vaimeneminen

Värähtelyn vaimeneminen materiaalissa muodostuu kahdesta eri ilmiöön perustuvasta osasta. Geometriseksi vaimennukseksi kutsutaan täryaallon energian leviämistä suuremmalle pinta-alalle etäisyyden kasvaessa. Näin ollen yhdessä pisteessä havaittavan värähtelyn amplitudi pienenee siirryttäessä kauemmas värähtelylähteestä. Hystereettiseksi eli sisäiseksi vaimennukseksi kutsutaan värähtelyenergian absorboitumista väliaineeseen. Absorboituminen tarkoittaa tässä materiaalin aaltoliikkeen sisäisestä kitkasta aiheutuvaa energiahäviötä.

Geometrinen vaimennus on erisuuruinen runko- ja pinta-aalloilla. Runkoaalto leviää pistemäisestä värähtelylähteestä pallomaisesti jolloin sen intensiteetin vaimennus maanpinnalla on verrannollista lausekkeeseen $\frac{1}{r^2}$, missä r on tarkastelupisteen etäisyys lähteestä. Pinta-aalto sen sijaan ei leviä pallomaisesti vaan sen vaimennus on muotoa $\frac{1}{\sqrt{r}}$. Mikäli värähtelylähte on pistelähteen sijasta ääretön viivalähde, syntyy sylinterisymmetrinen aaltorintama. Tällöin runkoaallon intensiteetin geometrinen vaimennus maanpinnalla on lausekkeen $\frac{1}{r}$ mukaista. Pinta-aaltojen geometrinen vaimennus muuttuu äärettömän viivalähteen tapauksessa etäisyydestä riippumattomaksi. Näin asia ei tietenkään käytännössä koskaan ole, vaan edellä esitetty väite koskee vain äärettömän viivalähteen geometrista vaimennusta. Viiva- ja pistelähteen periaatekuvat on esitetty kuvassa 1.9.



Kuva 1.9. Viiva- ja pistelähteestä loittonevat aaltorintamat. Kuvasta nähdään, että äärettömällä viivalähteellä ei ole teoriassa geometrista vaimennusta ollenkaan, koska aaltorintaman ala ei kasva etäisyyden kasvaessa.

Pitkät tavarajunat ovat värähtelylähteinä viivalähteitä. Kappaleessa 1.3 todettiin, että junaliikenteen aiheuttaman värähtelyn energiasta suurin osa etenee pinta-aaltoina ja se on siten haitallisinta. Nyt todettiin, että samainen värähtely vaimenee etäisyyden mukaan kaiken hitaimmin, mikä lisää kyseisen värähtelyn haitallisuutta (Levomäki, 1999), (Välikylä, 2005), (Törnqvist ja Talja, 2006). Eri aaltomuotojen vaimennukset etäisyyden funktiona on koottu taulukkoon 1.2.

Taulukko 1.2. Eri aaltotyyppien intensiteettivaimennus etäisyyden suhteen. Taulukosta nähdään, että äärettömän viivalähteen tapauksessa pinta-aallon vaimeneminen ei riipu etäisyydestä.

värähtelylähte	aaltotyyppi	
	pinta-aalto	runkoaalto
pistelähde	$\frac{1}{\sqrt{r}}$	$\frac{1}{r^2}$
ääretön viivalähde	1	$\frac{1}{r}$

Värähtelyn absorboituminen etäisyyden funktiona materiaaliin on eksponentiaalista ja vaimeneminen saadaan kaavasta

$$(1.5) \quad A(r) = A_0 e^{-\alpha(f)r},$$

jossa $A(r)$ on värähtelyaallon amplitudi etäisyydellä r , A_0 on herätteen värähtelyaallon amplitudi eli amplitudi pisteessä $r=0$ ja $\alpha(f)$ on väliaineen absorptiokerroin taajuudella f . Materiaalivaimennus riippuu siis myös värähtelyn taajuudesta, toisin kuin geometrinen vaimennus. Materiaalivaimennus on korkeilla taajuuksilla yleensä suurempaa kuin matalilla taajuuksilla. Junaliikenteen synnyttämät merkittävät taajuuskomponentit ovat kaikki alle 100 Hz taajuuksilla, koska tätä korkeammat taajuudet vaimenevat maaperässä erittäin tehokkaasti. Absorptiokertoimet ovat yleensä suuruusluokkaa 0,01...0,1 [1/m] pehmeillä mailla ja matalilla taajuuksilla (Törnqvist ja Komulainen, 1993), (Välikylä, 2005).

Materiaalisen sekä geometrisen vaimennuksen yhteisvaikutusta on kuvattu niiden tulona (Törnqvist ja Talja, 2006) jolloin kokonaisvaimennus etäisyyden funktiona saadaan kaavasta

$$(1.6) \quad \frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^\beta e^{\alpha(r_1-r_2)},$$

jossa A_1 on värähtelyamplitudi etäisyydellä r_1 ja A_2 vastaavasti värähtelyamplitudi etäisyydellä r_2 . Eksponentti β on geometrisen vaimennuksen tekijä ja eksponentti α sisäisen vaimennuksen tekijä. Yleensä analyttisissä menetelmissä tyydytään tutkimaan vaimennusta vain R-aallon suhteen maanpinnalla. Tällöin kaavan (1.6) geometrista vaimennusta kuvaava eksponentti β on aina 0,5. Tämä on usein riittävä tarkkuus analyttisissä menetelmissä, koska R-aallot omaavat eri aaltotyypeistä eniten energiaa sekä vaimenevat hitaimmin ja ovat siten kauempana kohteesta selkeästi värähtelyn suuruuden kannalta merkittävin aaltomuoto. Kaavan (1.6) oletuksiin kuuluu, että maaperä on homogeeninen ja isotrooppinen jatkumo. Näin ei kuitenkaan luonnossa yleensä ole, joten kaavalla saatavat tulokset ovat yksinkertaistettuja likimääräisiä arvioita (Törnqvist ja Talja, 2006). Taulukkoon 1.3 on kerätty eri maapohjatyypeille ominaisia absorptiokertoimia α .

Taulukko 1.3. Eri maapohjien absorptiokertoimia ja leikkausnopeuksia (Törnqvist ja Talja, 2006).

maapohjatyyppe	sisäinen vaimennus pienillä muodonmuutostasoilla (liukuma $\gamma < 10^{-4} \dots 10^{-5}$) ja keskimääräisessä jännitystilassa $\sigma_m = 100$ kPa, absorptiokerroin α [1/m]	leikkausaallon etenemisnopeus v_s [m/s]
pehmeä savi, vesipitoisuus 50...120 %	0,01...0,04	< 80
pehmeä savi	0,02...0,04	80...120
sitkeä savi	0,03...0,06	100...200
kova savi	0,05...0,07	150...400
löyhät välimaajit (siltit, siltiset hiekat)	0,02...0,05	80...250
tiivit välimaajit (siltit, siltiset hiekat)	0,01...0,04	150...400
löyhät hiekat	-	100...200
tiivit hiekat ja löyhät keskittiivit sorat	0,004...0,035	150...250
tiivit sorat ja moreenit	0,003...0,06	200...500
iskostuneet moreenit	0,01...0,11	400...800
kallio	0,01	> 700

Ominaisaajuudella maaperä pyrkii voimistamaan värähtelyä ja sitä suuremmilla taajuuksilla värähtely vaimentuu. Ominaisaajuutta pienemmillä taajuuksilla maaperä ei vaimenna värähtelyä. Leikkausaallon nopeus maaperässä on suoraan verrannollinen maaperän ominaisaajuuteen ja sitä voidaan arvioida kaavan (1.7) avulla. Maaperän vaimennusominaisuudet riippuvat siis materiaalivaimennuksen osalta myös taajuudesta. Näin ollen maaperä muokkaa herätevärähtelyä ominaisuuksiensa mukaisesti vaimentaen toisia taajuuksia tehokkaammin kuin toisia. Kauempana radasta selvästi tärkein värähtelyn taajuussisältöön vaikuttava ominaisuus on kuitenkin maaperän ominaisaajuus.

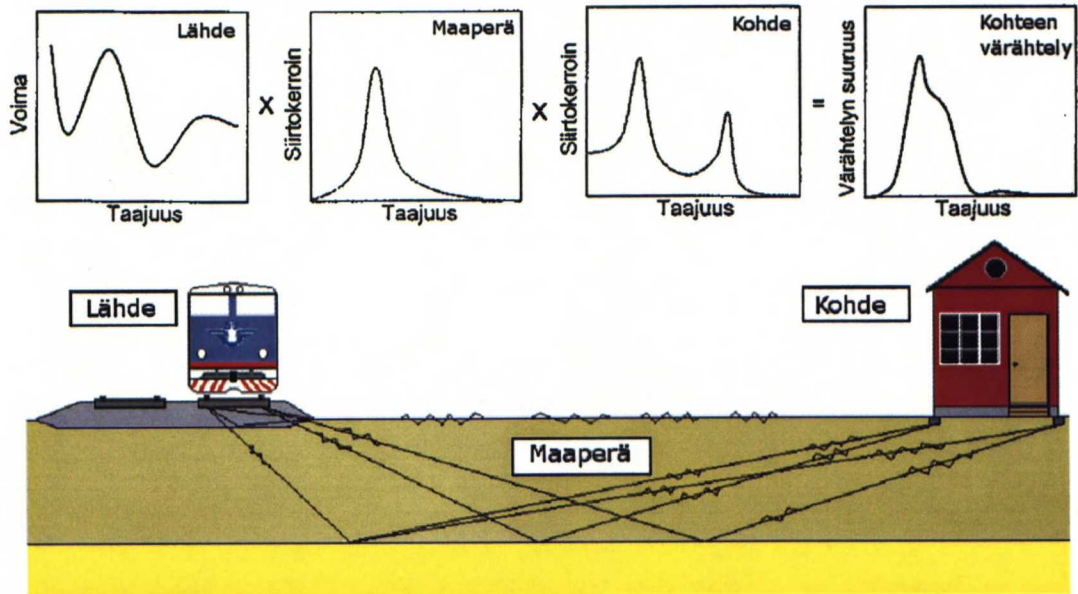
Maan ominaisaajuus f_0 pystysuuntaiselle värähtelylle voidaan arvioida kaavasta

$$(1.7) \quad f_0 = \frac{v_s}{(4...5)d},$$

jossa d on maakerroksen paksuus (Törnqvist ja Nuutilainen, 2002). Taulukon 1.3 perusteella pehmeillä mailla leikkausaallon etenemisnopeus on pienempi ja siten myös niiden ominaisaajuus on alhaisempi. Suomessa yleisillä pehmeillä savimailla ovat yleensä hallitsevia taajuudet 5...15 Hz ja kovilla soramailla taajuudet 10...25 Hz (Välikylä, 2005).

2 RAUTATIELIIKENTEEN AIHEUTTAMA VÄRÄHTELY

Rautatieliikenteen aiheuttamaa värähtelyä tarkastellaan tässä kappaleessa kolmessa eri osassa: lähde, väliaine eli maaperä sekä kohde (kuva 2.1). Kaikilla kolmella edellä mainituista on lukuisia ominaisuuksia, joiden yhteisvaikutus voi tuottaa läheisiin rakennuksiin ihmisten aistittavissa olevia värähtelytasoja. Ennen kuin tarkastellaan kunkin tekijän ominaisuuksia, esitellään yleisimmät tärinän voimakkuuden kuvaamiseen käytetyt suureet. Tässä esiteltäviä suureita ei ole mitenkään suhteutettu ihmisen kokemaan haitan suuruuteen. Ihmisen aistimaa tärinää sekä sen kuvaamista käsitellään kappaleessa 3.



Kuva 2.1. Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä. Tärinä voidaan tarkastelun helpottamiseksi pilkkoa kolmeen osaan: lähde, maaperä sekä kohde (Bahrekazemi, 2004), (Talja, 2004c).

Kuten ensimmäisessä kappaleessa todettiin, voidaan värähtelyjä kuvata joko siirtymä-, nopeus- tai kiihtyvyyssuureiden suhteen. Käytännön mittausteknisistä syistä mittaukset tehdään yleensä joko nopeuden tai kiihtyvyyden suhteen. Mikäli värähtelyamplitudi kasvaa todella suureksi, on mahdollista, että rakenteet vaurioituvat. Tällöin on vaurioitumisriskin kannalta oleellista mitata värähtelyn huippuamplitudia, koska se korreloi parhaiten rakenteisiin syntyvien rasitusten kanssa (ISO 4866. 1990), (Törnqvist ja Nuutilainen, 2002). Värähtelykiihtyvyyden huippuarvo saadaan aikatason signaalista kaavalla

$$(2.1) \quad \hat{a} = \max(|a(t)|),$$

jossa $a(t)$ on mitattu kiihtyvyyssignaali aikatasossa. Huippuarvo on siis värähtelyn itseisarvoltaan suurin arvo. Huippuarvo ei kuitenkaan korreloi kovinkaan hyvin värähtelyn siirtämän energian määrän kanssa. Tähän tarkoitukseen sopii paremmin värähtelystä määriteltävä tehollisarvo, joka lasketaan yli tietyn ajanjakson τ . Kiihtyvyyden tehollisarvo a_{RMS} kyseisellä ajanjaksolla saadaan kaavasta

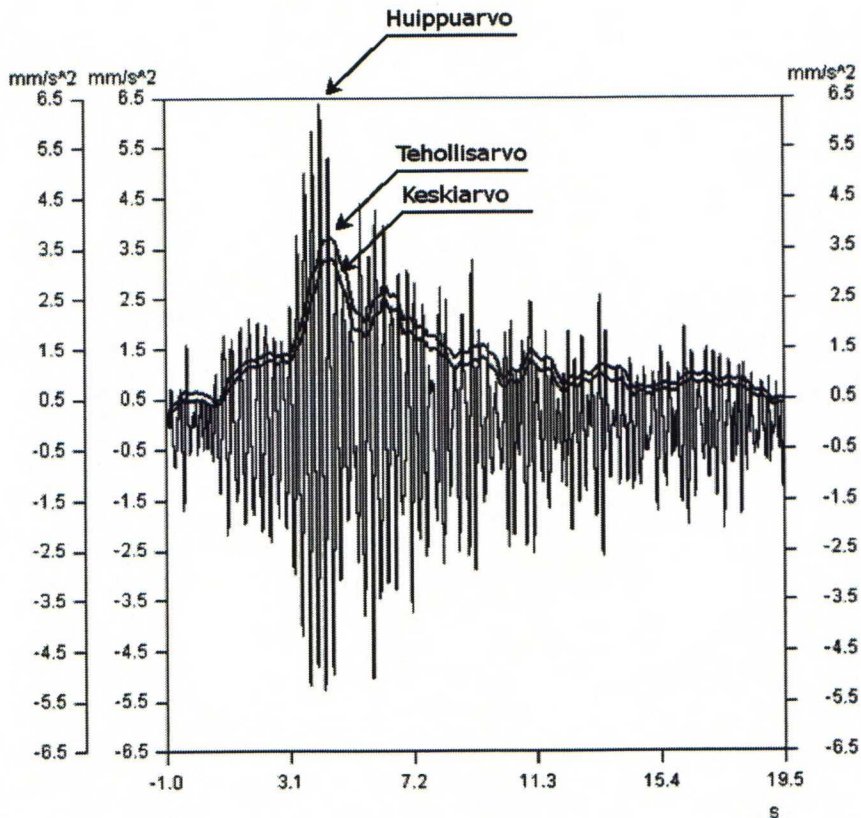
$$(2.2) \quad a_{RMS}(\tau_0) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{\tau_0-\tau}^{\tau_0} a^2(t) dt}.$$

Tehollisarvo eli ns. RMS-arvo saa nimensä englanninkielisistä sanoista root-mean-square. Värähtelyn analysoinnissa käytetään aikaikkunan pituutena yhtä sekuntia. Sinimuotoiselle signaalille, jonka amplitudi on vakio, on tehollisarvo $\sqrt{0,5}$ kertainen signaalin amplitudiin nähden.

Signaalin itseisarvolle voidaan laskea ajanjaksolta τ keskiarvo, joka on aina pienempi kuin tehollisarvo. Keskiarvo saadaan kaavasta

$$(2.3) \quad \bar{a}(\tau_0) = \frac{1}{\tau} \int_{\tau_0-\tau}^{\tau_0} |a(t)| dt.$$

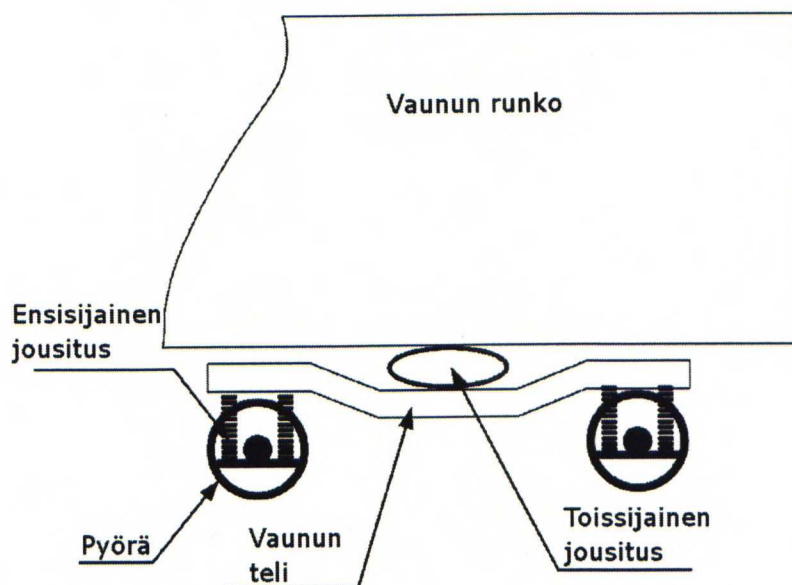
Keskiarvo ei ole värähtelyn arvioinnin kannalta yhtä hyödyllinen kuin kaksi ensimmäistä. Useimmiten käytetäänkin joko huippuarvoa tai tehollisarvoa (Törnqvist ja Nuutilainen, 2002), (Törnqvist ja Talja, 2006). Kiihtyvyyssignaalista määritetty huippu-, tehollis- ja keskiarvo on esitetty kuvassa 2.2.



Kuva 2.2. Junan ohituksesta mitattu kiihtyvyyssignaali sekä kaavalla (2.2) laskettu tehollisarvo ja kaavalla (2.3) laskettu keskiarvo. Huippuarvoa käytetään vaurioitumisriskin arviointiin ja tehollisarvoa värähtelyn sisältämän energian arviointiin.

2.1 Värähtelyn syntyminen ja eteneminen lähteessä

Juna kohdistaa maahan sekä staattisen että dynaamisen voiman, jotka poikkeuttavat maanpinnan tasapainoasemasta aiheuttaen tärinää. Junan pyörät kohdistavat kiskoon voiman, joka välittää sen pölkytyksen välityksellä penkereeseen. Junan pyörät sijaitsevat vaunun akseleilla, joita on yleensä neljä vaunua kohden. Erilaisissa junakokoonpanoissa on vaihtelevia määriä erityyppisiä vaunuja, joilla kullakin on värähtelyn kannalta omat ominaisuutensa. Juna voidaan mieltää siis pitkäksi nauhamaiseksi tärinälähteeksi (Levomäki, 1999).



Kuva 2.3. Junavaunun värähtelyn synnyn kannalta tärkeimmät rakenteet. Kuvasta voidaan havaita, että nykyaikaisissa matkustajajunissa on ensisijainen jousitus pyörien ja telin välissä sekä toissijainen jousitus telin ja rungon välissä (Bahrekazemi, 2004).

Kuvassa 2.3 on esitetty junavaunun rakenteita, jotka vaikuttavat värähtelyn syntyyn. Nykyaikaisissa matkustajajunissa vaunun runko on erotettu telistä toissijaisella jousituksella ja teli pyörästä ensisijaisella jousituksella. Tavarajunien värähtely on yleensä lähes poikkeuksetta alle 15 Hz taajuusalueella, kun taas henkilöjunilla värähtelystä huomattava osa on myös 40...60 Hz taajuusalueella. Syynä tähän on ehdotettu mm. vaunujen jousitusta. Jousitus on usein toteutettu kitkaiskuvaimentimilla, joiden ominaistaajuus on yli 20 Hz eli ne eivät vaimenna ollenkaan tätä alempia taajuuksia. Koska vain korkeat taajuudet vaimenevat, on vaunulla suurempi jousittamaton massa matalilla taajuuksilla kuin korkeilla. Toisaalta matkustajajunat käyttävät usein suurempia ajonopeuksia ja tuottavat siten herätteen, jonka spektri sisältää korkeampia taajuuksia. Lisäksi tavarajunien jousitus on usein huonokuntoisempi ja niillä on suurempi massa, jolloin ne eivät ehdi mukaan korkeampitaajuiseen värähtelyyn (Välikylä, 2005).

Kuten kappaleessa 1.2 todettiin, junaradan tukemisessa käytetyt pölkyt aiheuttavat säännöllisesti radan jäykkyyden muutoksen. Tämä aiheuttaa kaavan (1.3) mukaisesti jollekin taajuudelle herätteen, joka riippuu junan nopeudesta ja pölkyjen välimatkasta. Pölkyjen ohitustaajuus Suomessa on noin 35...65 Hz, joka useimmiten

ei ole haitallista, koska maaperä vaimentaa näin korkeita taajuuksia tehokkaasti (Levomäki, 1999). Englannissa on kuitenkin onnistuttu mittaamaan 42 metrin päässä junaradasta asunnon sisäpinnoilta ratapölkkyjen ohitustaajuuden aiheuttama komponentti. Värähtelyn todettiin kuitenkin olleen niin vähäistä, että sitä ei pystytty mittausten aikana aistimaan, vaikka se mittaamaan pystyttiin (Dawn ja Stanworth, 1979). Junan liikuessa alhaisella nopeudella esimerkiksi $v = 15$ [m/s] ja pölkkyvälin l ollessa 0,65 metriä, saadaan kaavan (1.3) perusteella pölkkyjen ohitustaajuudeksi noin 23 Hz. On mahdollista, että akseliston pystysuuntainen ominaistaajuus osuu samalle taajuudelle, jolloin värähtelyn amplitudi saattaa kasvaa voimakkaasti (Törnqvist ja Komulainen, 1993).

Ratapölkkyjen ohitustaajuuden lisäksi on olemassa myös muita kaluston ominaisuuksiin ja junan nopeuteen liittyviä taajuuskomponentteja, jotka syntyvät värähtelylähteessä. Mikäli vaunujen akselivälit ovat samanpituisia ja junan nopeus vakio, syntyy tietyssä pisteessä jokaisen akselin ylityksen seurauksena tietyn taajuista värähtelyä. Mikäli junan nopeus kasvaa, nousee akseliston ohituksista aiheutuvan herätteen taajuus. Tavarajunissa voi usein olla akselimitoiltaan erikokoisia vaunuja, jolloin syntyviä taajuuksia on myös useita (Levomäki, 1999). Vanhemmissa tutkimuksissa on epäilty jopa, että kiskojen valmistuksessa käytetyn suoristamiskoneen pyörän kehän pituuden mukainen aaltoilu kiskoissa aiheuttaa mitattavissa olevia värähtelyjä tietyllä taajuudella (Dawn ja Stanworth, 1979).

Junan alustaansa kohdistamasta voimasta suurin osa on vertikaalisuuntaista, mutta esimerkiksi radan kaarteissa myös horisontaalisuuntaiset voimat kasvavat. Myös junan kiihdytys ja jarrutus kasvattavat horisontaalisuuntaisia voimia. Horisontaalisuuntaisten voimien kasvaessa poikkeaa myös maaperä normaalia enemmän kyseiseen suuntaan tasapainoasemastaan. Muun muassa näistä syistä johtuen voivat horisontaalisetkin värähtelyt joskus kasvaa oletettua suuremmiksi (Holm et al. 2002), (Bahrekazemi, 2004). Edellä mainitut tekijät kasvattavat horisontaalisten voimien lisäksi myös vertikaalisia voimia.

Taulukko 2.1. Eri tekijöiden pyöristä kiskoihin aiheuttamien vertikaalivoimien suuruuksia. Voimat on normalisoitu staattisen pyöräkuorman suhteen (Bahrekazemi, M. 2004).

vaikuttava tekijä	suuruus
staattinen pyörävoima	100 %
puolistaattinen voima kaarteissa	0...40 %
dynaaminen voima raiteen epätasaisuudesta	0...300 %
dynaaminen voima pyörän tasaisesta kohdasta	0...300 %
jarrutuksesta aiheutuva voima	0...20 %
epäsymmetriasta aiheutuva voima	0...10 %

Edellä mainitut tekijät ilmenevät myös hyväkuntoisella kalustolla. Näiden lisäksi lähteessä on monia tekijöitä, jotka voivat aiheuttaa huomattavia värähtelytasoja ympäristöön. Tärkeimpiä näistä ovat epäjatkuvuuskohdat joko kiskossa tai pyörässä. Tällöin syntyy impulssi, joka voi herättää tehokkaasti koko taajuusalueen värähtelyt. Vertikaalivoimien suuruuteen vaikuttavien tekijöiden suuruussuhteita on esitetty taulukossa 2.1 Mikäli useampi kuin yksi tekijöistä ilmenee samaan aikaan, saadaan yhteisvaikutus niiden summana.

Avoimet kiskojoitkokset, vaihteet, alustastaan irronneet pölkkyt ja sillat ovat esimerkkejä epäjatkuvuuskohdista, jotka yleensä kasvattavat värähtelyn amplitudia. Pyörissä tai kiskoissa esiintyvän kuluneisuuden on kuitenkin eräässä saksalaisessa tutkimuksessa todettu aiheuttavan enemmän matalataajuista värähtelyä kuin yksittäisen epäjatkuvuuden. Syynä tähän on oletettavasti se, että yksittäinen epäjatkuvuus, kuten lovipyörä, herättää pääasiassa maanperässä nopeasti vaimenevia korkeita taajuuksia (Levomäki, 1999), (Välikylä, 2005) (Törnqvist ja Nuutilainen, 2002), (Massarsch, 2004).

Kaluston vaikutus värähtelyn suuruuteen vähenee, jos rata on perustettu tiiviiden maakerrosten päälle. Parhaaseen tulokseen päästään paaluttamalla radan perustus tai rakentamalla rata betonilaatan päälle. Tällöin rakenne on jäykempi ja junan alustansa aiheuttama poikkeama pienempi. Näin ollen myös värähtelyn amplitudi on pienempi, lisäksi jäykempi alusta vaikuttaa myös värähtelyn taajuussisältöön. Jäykempi rata aiheuttaa ympäristöönsä korkeampia taajuuksia kuin joustavasti perustettu rata. Korkeammat taajuudet vaimenevat maaperässä nopeammin kuin matalat ja myös tätä kautta jäykempi rata pienentää ympäristöön leviävää tärinää (Törnqvist ja Nuutilainen, 2002), (Holm et al. 2002).

2.2 Värähtelyn eteneminen väliaineessa

Rataa ympäröivällä maaperällä on suuri vaikutus junaliikenteen aiheuttaman värähtelyn leviämiseen. Maaperätyyppi säätelee värähtelyn voimakkuutta, vaimentumista sekä taajuussisältöä. Värähtelyn suuruus riippuu maaperän pehmeimpien kerrosten lujuudesta, jota voidaan mitata dynaamisen kimmokertoimen avulla. Tämän perusteella maalajit luokitellaan hyvin pehmeiksi, pehmeiksi, sitkeiksi, koviksi tai hyvin koviksi. Hyvin pehmeillä ja pehmeillä maalajeilla, jotka ovat hienorakeisia, kuten kivennäismaalajit savi ja siltti sekä eloperäiset maalajit turve ja lieju, junaliikenteen aiheuttaman värähtelyn vaikutusalue on laajin. Vastaavasti vaikutusalue on pienimmillään kovilla ja iso rakeisilla maalajeilla, kuten kivennäismaalajit sora ja hiekka sekä moreenimaalajeissa siltti-, hiekka-, ja soramoreeni sekä kallio. Kimmokertoimen ollessa pieni ovat muodonmuutokset maaperässä suuria, jolloin siis värähtely on myös voimakasta. Pehmeillä maalajeilla joilla värähtely on suurempaa, kimmokerroin on siis pienempi kuin kovilla maalajeilla.

Maaperän kimmokerroin eli –moduuli E_0 (initiaalikkimmomoduuli) saadaan laskettua leikkausmoduulin G_0 ja Poisson-luvun ν avulla kaavalla

$$(2.4) \quad E_0 = 2(1 + \nu)G_0.$$

Leikkausmoduuli puolestaan saadaan laskettua kaavalla

$$(2.5) \quad G_0 = \rho v_s,$$

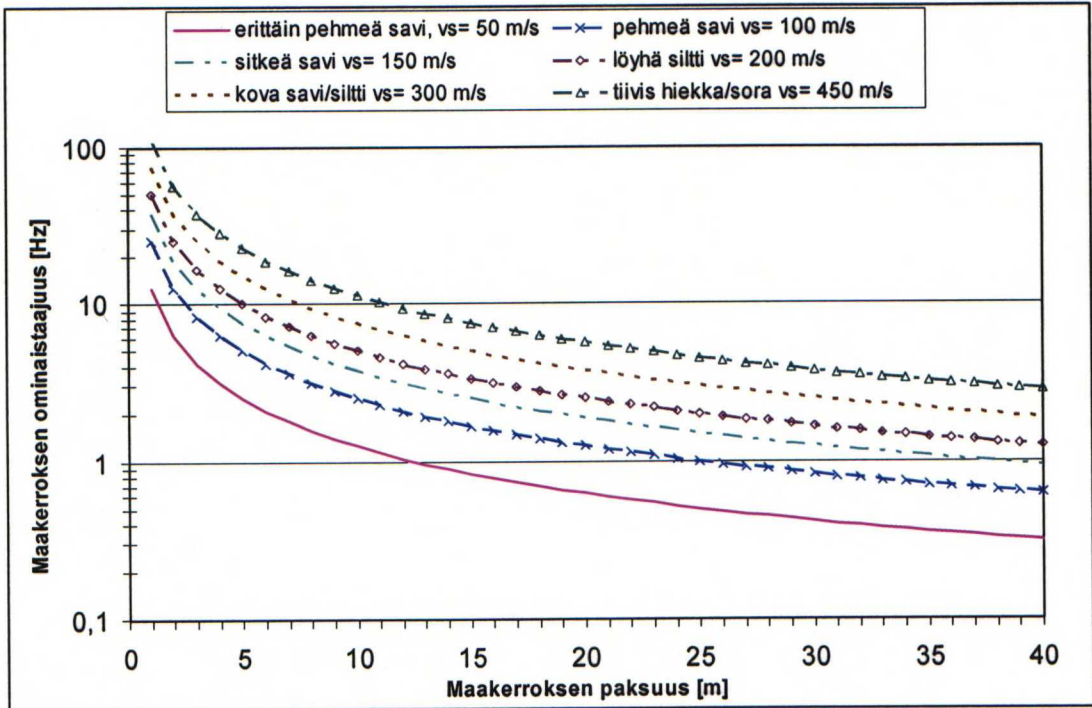
jossa v_s on leikkausaallon etenemisnopeus maaperässä ja ρ on maaperän tiheys. Taulukossa 2.2 on esitetty eri maapohjatyypin Poisson-lukuja ja

kimmomoduuleita. Taulukossa 1.3 on esitetty vastaavien maalajien leikkausaallon nopeuksia. Leikkausaallon nopeus, kuten muutkin ominaisuudet, voidaan määrittää myös suoraan maaperästä mittaamalla.

Taulukko 2.2. Eri maapohjatyypin kimmomoduuleita ja Poisson-lukuja. Pehmeillä maalajeilla kimmomoduuli on pienempi kuin kovilla maalajeilla (Törnqvist ja Talja, 2006).

maapohjatyypin	kimmomoduuli pienillä muodonmuutostasoilla liukuma $\gamma < 10^{-4}$, [MPa]	Poisson-luku
pehmeä savi, vesipitoisuus 50...120 %	< 3	0,45...0,5
pehmeä savi	3...5	0,45...0,5
sitkeä savi	4...10	0,3
kova savi	10...100	0,3
löyhät välimaalajit (siltit, silttiset hiekat)	15...40	0,2...0,4
tiivit välimaalajit (siltit, silttiset hiekat)	20...80	0,2...0,4
löyhät hiekat	30...60	0,2...0,35
tiivit hiekat ja löyhät keskitiiviit sorat	90...180	0,2...0,35
tiivit sorat ja moreenit	400...1000	0,2...0,3
iskostuneet moreenit	1000...3000	0,3...0,4
kallio	5000...20000	0,45

Liikennetärinä leviää laajalle alueelle pehmeillä ja veden kyllästyttämällä maalualueilla, koska jo alun perinkin poikkeama junaradan alla on suuri, sisäinen vaimennus on varsin pientä ja värähtely muodostuu taajuussisällöltään pääasiassa hitaasti vaimentuvista matalista taajuuksista. Kaikilla maalajeilla suodattuvat korkeat yli 50...60 Hz taajuudet pois jo kohtalaisen lähellä rataa, koska kyseisillä taajuuksilla maaperän sisäinen vaimennus on suuri. Pehmeissä ja paksuissa maakerroksissa suurin osa värähtelystä sijaitsee yleensä 2...8 Hz taajuusalueella, kun taas jäykissä ja ohuissa maakerroksissa 8...40 Hz alueella. Kalliopohjaisilla alueilla värähtely on yleensä merkityksetöntä jo välittömästi junaradan vierellä. Tällöin ongelmaksi voi tosin nousta kalliota pitkin rakennuksiin välittyvä runkoääni, jota käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.2. Kuvassa 2.4 on esitetty kaavan (1.7) mukaan laskettuja eri maalajien ominaistaajuuksia maakerroksen paksuuden funktiona. Laskennassa on käytetty taulukon 1.3 perusteella arvioituja leikkausaallon etenemisnopeuksia eri maalajeille. Maaperän koostuessa useasta maakerroksesta, jokaisen ominaistaajuus vaikuttaa siirtyvän värähtelyn taajuussisältöön (Törnqvist ja Talja, 2006).



Kuva 2.4. Eri maakerrosten kaavalla (1.7) arvioituja ominaistajuuksia kerroksen paksuuden suhteen. Kuvasta nähdään, että 5 metriä paksulla erittäin pehmeällä savella ominaistajuus on vain noin 2,5 Hz.

Kappaleessa 1.3 todettiin, että aaltoliikkeiden, kuten paineaallon ilmassa eli äänen tai junaliikenteen aiheuttaman värähtelyn, törmätessä jäykemmän aineen rajapintaan tapahtuu heijastumista ja taittumista. Näin esimerkiksi pehmeän maakerroksen alla olevasta kalliosta heijastuvat värähtelyt voivat kohdistua samaan pisteeseen maanpinnalla jolloin niiden amplitudit summautuvat. Pitkillä tavarajunilla on mahdollista, että junan etu- ja takapäin aiheuttamat värähtelyt saapuvat samanaikaisesti tarkastelupisteeseen jolloin värähtelyiden amplitudit jälleen summautuvat. Pitkien tavarajunien tapauksessa on siis mahdollista, että tarkastelupisteessä vaikuttaa samanaikaisesti suoraan junan lähimmästä pisteestä tullut värähtely, eri maakerroksista heijastunut sekä eri kohdista junaa syntyneet värähtelyt. Lopulta tarkastelupisteessä mitattu värähtely on siis näiden kaikkien summa. Pitää kuitenkin muistaa, että värähtelyt voivat olla myös vastakkaisvaiheisia jolloin ne kumoavat toisensa. Voidaan kuitenkin todeta, että maanpinnan värähtelyamplitudi voi paikallisesti kasvaa noin kaksinkertaiseksi muuta aluetta suuremmaksi. Suurimmillaan interferenssin vaikutus on maaperän ominaistajuudella, jolloin eri suunnista tulevat värähtelyt eivät juuri ole vaimentuneet (Törnqvist ja Nuutilainen, 2002), (Levomäki, 1999).

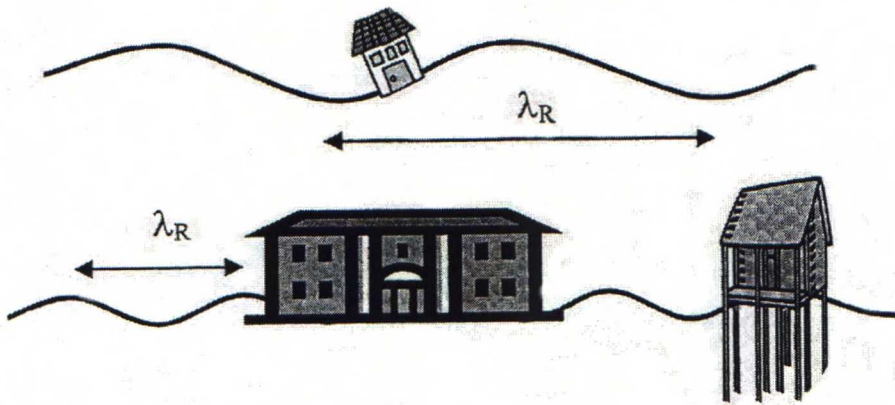
Junan nopeuden vaikutuksesta värähtelyn voimakkuuteen on lähdeaineistossa ristiriitaista tietoa. Varmaa on kuitenkin se, että se vaikuttaa tietyissä tapauksissa maaperään siirtyvän värähtelyn taajuussisältöön. Esimerkiksi pölkkyjen ohituksesta syntyvän värähtelyn taajuus on suoraan junan ajonopeudesta riippuvainen (Törnqvist ja Komulainen, 1993), (Dawn ja Stanworth, 1979). Varmaa on kuitenkin, että junan nopeuden saavuttaessa ns. kriittisen nopeuden, joka on sama kuin leikkausaallon nopeus maaperässä, syntyy shokkiaalto. Shokkiaalto syntyy myös, kun lentokone saavuttaa ilmassa äänennopeuden samaisessa materiaalissa. Ruotsissa

tehdyissä tutkimuksissa on havaittu, että junan nopeuden noustessa 140 km/h nopeuteen 180 km/h, kasvoi raiteesta mitattu värähtelyn amplitudi jopa kymmenkertaiseksi shokkiaallon johdosta. Raiteen värähtelyn kasvaminen luonnollisesti kasvattaa maaperässä etenevän värähtelyn amplitudia, vaikkakaan ei välttämättä aivan yhtä paljoa (Talja, 2004b), (Holm et al. 2002).

Norjalaisten tutkimusten mukaan maaperän värähtely on yleensä pienempää talvella maan ollessa jäässä. Näin olleen rautatieliikenteen aiheuttaman tärinän mittaamista ei tulisi suorittaa maan ollessa jäässä. Tästä voidaan kuitenkin poiketa, mikäli on syytä olettaa tärinän olevan jostakin syystä suurempaa maan ollessa jäässä (NS 8176. 1999). Toisaalta on myös väitetty, että radan jäykkyys on talvella suurempi ja siten maaperään kohdistuva dynaaminen voima on talvella suurempi. Tällöin värähtelyn pitäisi maaperään kohdistuvan dynaamisen voiman suhteen tarkasteluna olla suurempi talvella (Levomäki, 1999). Ruotsalaisessa tutkimuksessa todetaan, että varmaa tietoa maaperän jäätyminen vaikutuksista värähtelyyn ei ole saatavilla, koska ilmiötä ei ole tutkittu riittävästi. Tutkimuksessa todetaan kuitenkin, että kokemusten perusteella molemmat sekä värähtelytaso että maaperän vaimennus laskevat maaperän jäätyessä (Massarsch et al. 2002). Käytännön mittausteknisten syiden suhteen, kuten esimerkiksi anturien asentaminen maahan, olisi mielekkäämpää suorittaa mittaukset maan ollessa sula.

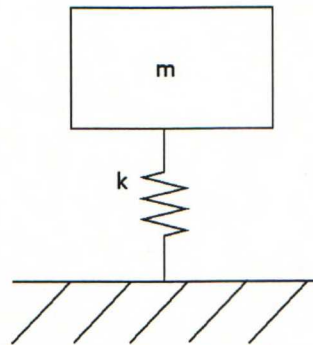
2.3 Värähtelyn eteneminen kohteessa

Kuten kappaleissa 1.3 ja 1.4 todettiin, maaperässä etenevän värähtelyn energiasta suurin osa etenee maanpintakerroksissa R-aaltolina. Pystysuuntainen värähtely siirtyy maaperästä rakennukseen miltei samansuuruisena, jos R-aallon aallonpituus on suuri verrattuna perustuksen mittasuhteisiin ja perustus on matala. Tällöin asukkaat saattavat havaita myös rakennuksen kallistelevalta (vrt. kuva 2.5). Kallistuminen on suurinta, kun rakennuksen perustus on samankokoinen siihen kohdistuvan värähtelyn aallonpituuden puolikkaan tai sen monikerran kanssa. Rakennuksen kallistuessa on poikkeama tasapainoasemaan nähden sitä suurempi mitä korkeammalla rakennuksessa ollaan. Näin ollen erityisesti värähtelyn vaakasuuntainen komponentti voi kasvaa korkeiden rakennusten ylimmissä kerroksissa. Koska maassa etenevän värähtelyn aallonpituus riippuu kaavan (1.1) mukaisesti leikkausaallon etenemisnopeudesta sekä taajuudesta, voidaan päätellä, että rakennuksen kallistelu riippuu oleellisesti maaperän tyypistä. Taulukossa 1.3 esitettiin eri maalajeille tyypillisiä leikkausaallon etenemisnopeuksia. Jos värähtelyn taajuus maaperässä on 10 Hz, niin taulukon arvojen avulla havaitaan, että esimerkiksi pehmeällä savella aallonpituus on tällöin alle 8 metriä, kun taas moreenilla samalla taajuudella aallonpituus olisi noin 40 metriä (Talja, 2004b), (Dawn ja Stanworth, 1979).



Kuva 2.5. Rakennuksen perustusten ollessa matalat sekä dimensioiden ollessa pienet verrattuna R -aallon aallonpituuteen voi rakennus kallistua värähtelyn seurauksena (Talja, 2004c)

Mikäli jonkin rakennuksen osan ominaistajuus, kuten esimerkiksi perustuksen, rungon tai välipohjan, osuu samalle taajuudelle kuin maaperän värähtelyn hallitseva taajuus, voi värähtely voimistua rakenteissa moninkertaiseksi maanpinnan värähtelyyn verrattuna. Maanperän värähtelyn ollessa taajuudeltaan korkeampaa kuin rakenneosan ominaistajuus, vaimenee värähtely sen siirtyessä rakenteeseen. Jos maanperän värähtely on matalataajuisempaa kuin rakenneosan ominaistajuus, etenee värähtely maasta rakenteeseen vaimentumatta.



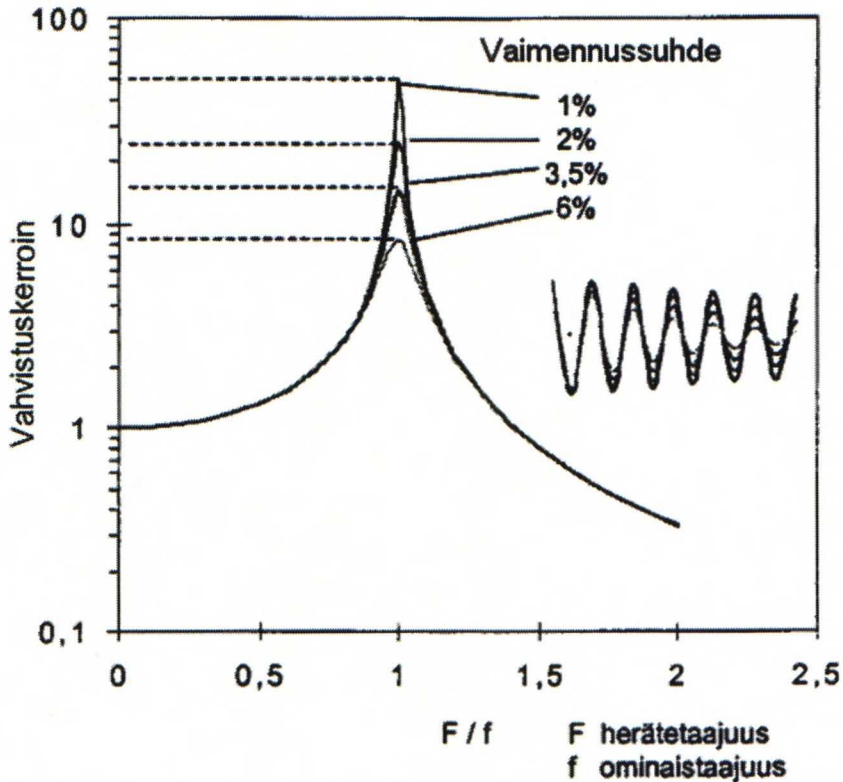
Kuva 2.6. Yksinkertainen jousi-massajärjestelmä, jossa k on jousivakio ja m kappaleen massa. Massaa lisättäessä ominaistajuus laskee, kun taas jousen jäykkyyden kasvattaminen puolestaan nostaa ominaistajuutta.

Resonanssi-ilmiö voidaan esittää kuvan 2.6 mukaisella yksinkertaisella jousi-massajärjestelmällä. Yksinkertaisen jousi-massajärjestelmän ominaistajuus f_0 saadaan kaavasta

$$(2.6) \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}},$$

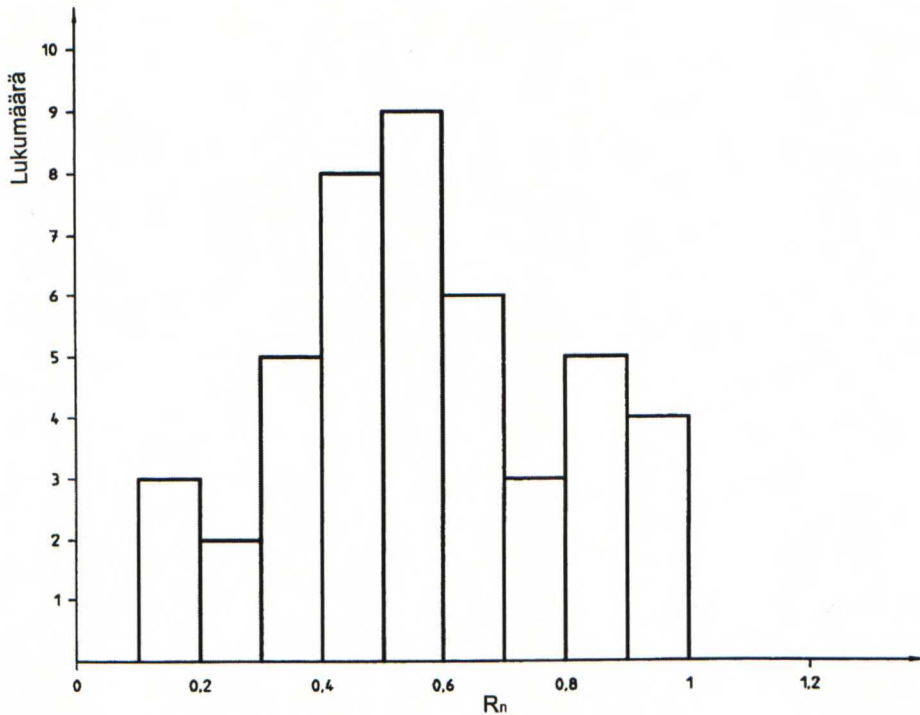
jossa k on jousivakio ja m kappaleen massa. Resonanssi-ilmiön voimakkuutta rakennuksissa rajoittaa rakenneosan vaimennus. Vaimennus on yleensä

rakennuksissa muutaman prosentin luokkaa. Kuvassa 2.7 on esitetty jousi-massasysteemin vahvistuskertoimen taajuuden funktiona.

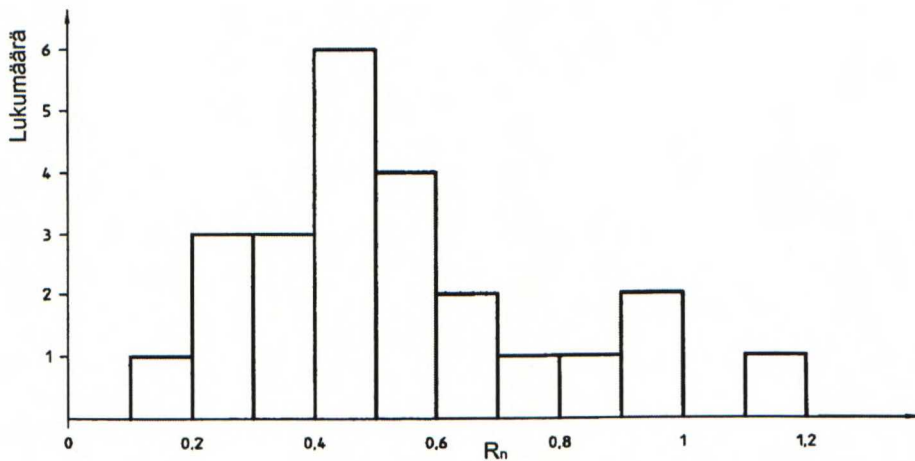


Kuva 2.7. Värähtelyn vahvistuskertoimen riippuvuus herätetaajuuden suhteesta ominaistajuuteen. Tyypillisesti rakennusten vaimennussuhde on muutaman prosentin luokkaa (Talja, 2004c).

Kuvasta nähdään, että rakennuksissa tyypillisillä vaimennuksilla, jotka ovat yleensä muutaman prosentin luokkaa, voi ominaistajuudella vahvistuminen olla yli kymmenkertaista (Talja, 2004c). Vahvistuminen tapahtuu kuitenkin vain yhdellä tietyllä taajuudella, kun taas rautatieliikenteen aiheuttama heräte koostuu useista eri taajuisista sekä eri vaiheessa olevista komponenteista. Näin ollen käytännössä rakennuksista mitattu värähtelyn tehollisarvo ei kasva yhtä paljoa kuin teoreettinen maksimiarvo (Talja, 2004b), (Talja, 2004c).



Kuva 2.8. Rakennuksen perustuksista mitatun pystysuuntaisen värähtelyn suhde rakennuksen läheltä maaperästä mitattuun värähtelyyn. Suhteen ollessa alle yksi on maaperästä mitattu värähtely suurempi. Mittaustuloksia on yhteensä 45 (ISO 4866. 1990. 2. lisäys 1996).



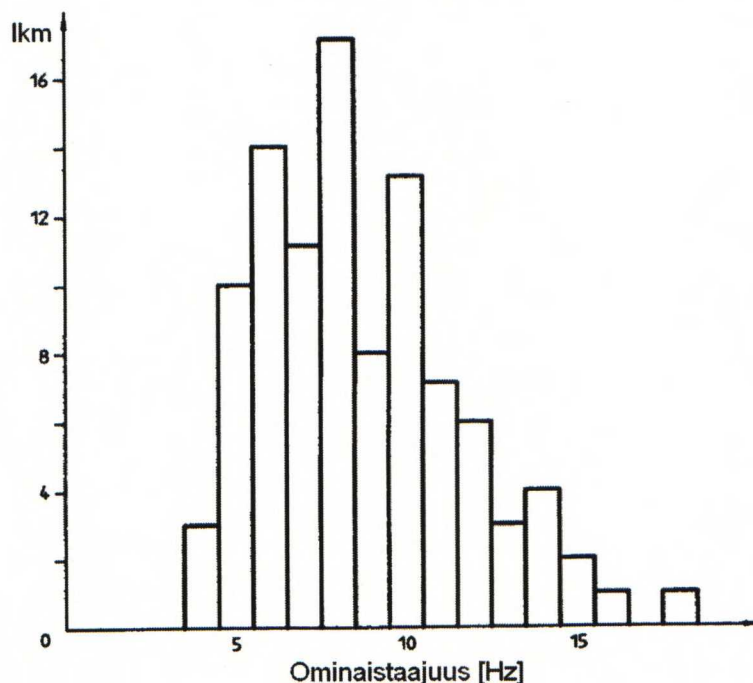
Kuva 2.9. Rakennuksen perustuksista mitatun vaakasuuntaisen värähtelyn suhde rakennuksen läheltä maaperästä mitattuun värähtelyyn R_n . Mittaustuloksia on yhteensä 24 (ISO 4866. 1990. 2. lisäys 1996).

Kuvassa 2.8 on esitetty rakennuksen perustuksista mitatun pystysuuntaisen värähtelyn suhde rakennuksen läheltä mitattuun. Tuloksista voidaan havaita, että rakennuksen perustuksissa värähtely on yleensä pienempää kuin sen lähellä maaperässä. Rakennuksen läheltä maaperästä mitattaessa tulee kuitenkin huomioida, että perustuksista heijastuva värähtely saattaa vaikuttaa mittaustuloksiin. Siksi onkin suositeltavaa, että mittauspiste on vähintään 2 metrin tai dominoivan aallonpituuden

kymmenesosan etäisyydellä rakennuksesta. Vaakasuuntaisella värähtelyllä on havaittu, että läheltä rakennusta mitattu vaakasuuntainen värähtely saattaa olla jopa pienempää kuin perustuksesta mitattu värähtely (vrt. kuva 2.9). Kuvissa 2.8 ja 2.9 rakennuksen perustuksesta mitatun värähtelyn suhde rakennuksen lähistöltä maaperästä mitattuun värähtelyyn on merkitty termillä R_r . Suhde on laskettu huippuamplitudeja käyttäen (ISO 4866. 1990. 2. lisäys 1996).

Yksikerroksisen rakennuksen vaakasuuntaista värähtelyä voidaan mallintaa kuvan 2.6 mukaisella yhden massa ja jousen muodostamalla järjestelmällä. Monikerroksiset rakennukset muodostavat useamman massan järjestelmän. Värähtelyn kannalta rakennuksen rungon oleelliset osat ovat seinät, lattiat, katto sekä jäykistävät rakenteet. Rakennusten jäykkyys muodostuu seinistä ja massa on yleensä keskittynyt vaakarakenteisiin, kuten välipohjiin. Seinätason suuntainen jäykkyys, jonka muodostavat seinälevyt sekä vinositeet, on merkitsevintä värähtelyn kannalta. Eri rakennusten jäykkyydet ja massat voivat vaihdella suuresti riippuen käytetyistä materiaaleista. Maanpinnan aaltoilusta seuraavan kallistelun sekä perustuksen vaakasuuntaisen liikkeen lisäksi rakennuksessa voi esiintyä myös pysty akselin ympäri tapahtuvaa kiertovärähtelyä, mikäli rakennuksen jäykistys on epäsymmetrinen (Talja, 2004c).

Yleisesti ottaen pientalojen runkojen ominaistajuuudet ovat korkeammat kuin kerrostalojen. Kuvassa 2.10 on esitetty pientaloista mitatut alimmat ominaistajuuudet ja kuvassa 2.11 kerrostalojen. Korkeammissa rakennuksissa havaittiin olevan hieman matalammat ominaistajuuudet, mutta rakennusten iällä, sijainnilla sekä mittasuhteilla ei havaittu olevan vaikutusta (Talja, 2004c), (ISO 4866. 1990. 1. lisäys 1994).

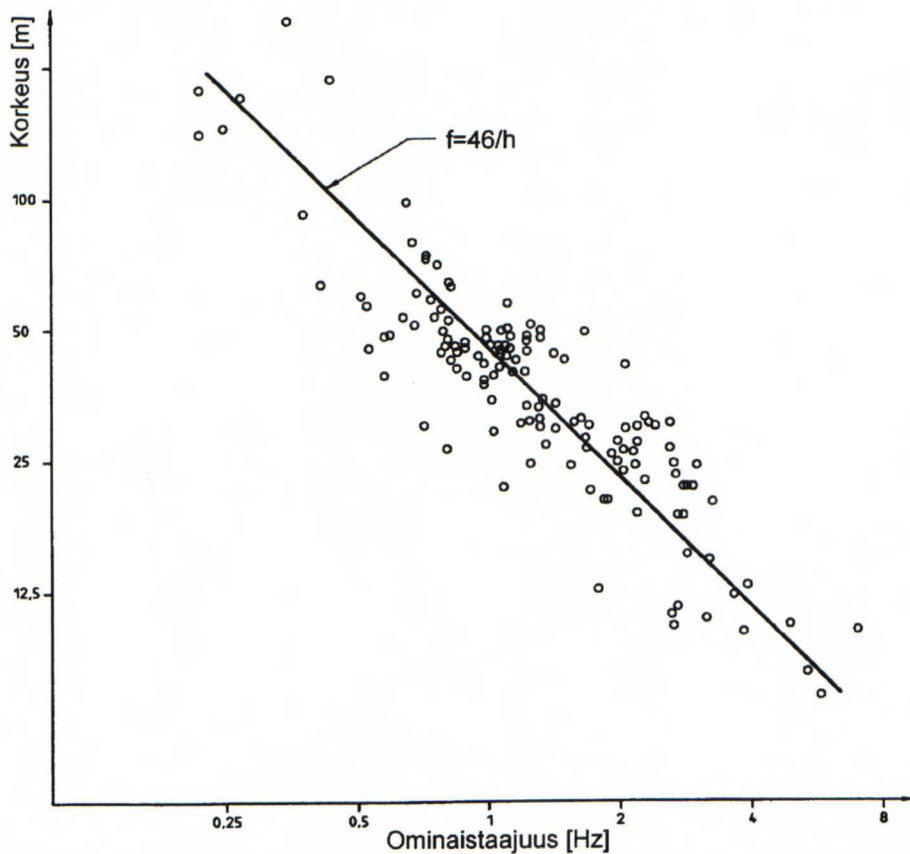


Kuva 2.10. Pientalojen runkojen alimmat mitatut ominaistajuuudet. Mitattuja pientaloja on yhteensä 96 (ISO 4866. 1990. 1. lisäys 1994)

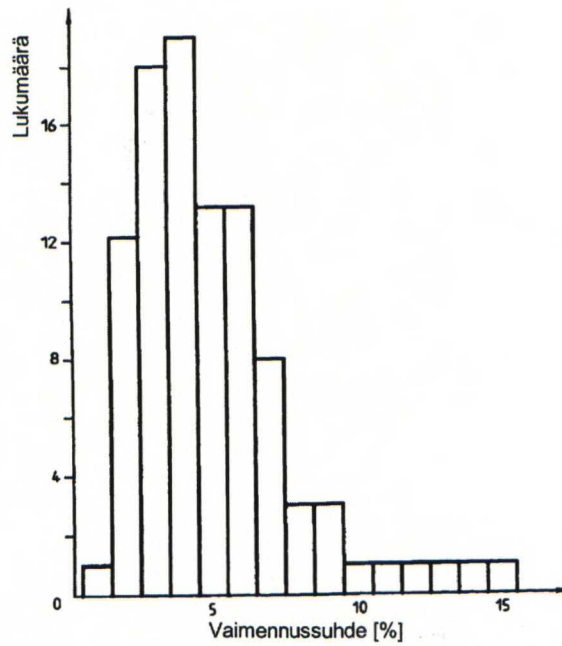
Kerrostalojen runkojen ominaistajuuksia suhteessa rakennuksen korkeuteen on esitetty kuvassa 2.11. Tuloksien perusteella on esitetty, että kerrostalon rungon ominaistajuus on kääntäen riippuvainen rakennuksen korkeudesta. Tällöin ominaistajuutta voidaan arvioida likimääräisesti kaavalla

$$(2.7) \quad f_0 = \frac{46}{h},$$

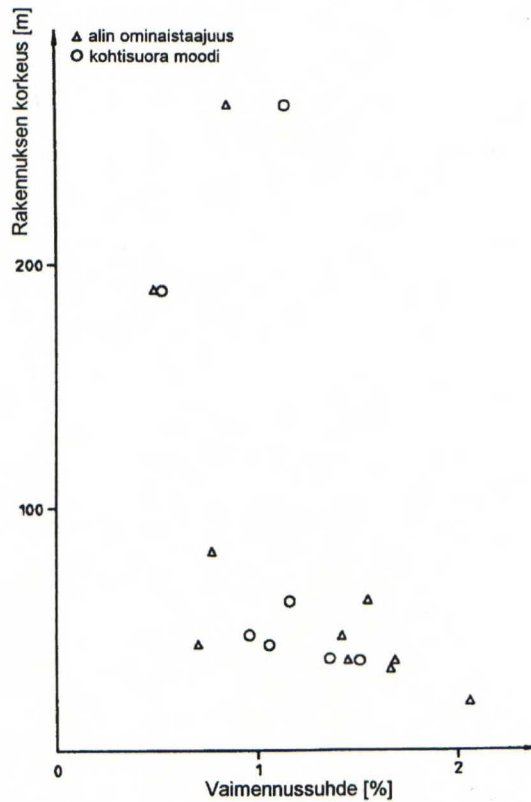
jossa h on rakennuksen korkeus metreinä. Kaavalla saatavat arvot voivat kuitenkin heittää todellisesta ominaistajuudesta $\pm 50\%$. Kerrostalojen ominaistajuuksia on pyritty laskemaan myös FEM-menetelmillä, mutta näin saatavat tulokset ovat heittäneet mittaustuloksiin verrattuna jopa enemmän kuin kaavalla (2.7) saatavat arvot. Tästä syystä on suositeltavaa aina määrittää mittausten avulla rakennuksen rungon todellinen ominaistajuus. Alin ominaistajuus on yleensä oletettu merkitsevimmäksi, mutta korkeilla rakennuksilla voi esiintyä myös korkeampia ominaismuotoja, jotka ovat siis alimman ominaistajuuden monikertoja. Tällöin rakennuksen eri kohdat voivat värähdellä voimakkaammin kuin toiset (Talja, 2004c), (ISO 4866. 1990. 1. lisäys 1994).



Kuva 2.11. Kerrostalojen runkojen ominaistajuuksia suhteessa rakennuksen korkeuteen. Vertaamalla tuloksia kuvan 2.7 tuloksiin havaitaan, että kerrostalojen ominaistajuudet ovat selvästi matalampia kuin pientalojen. Mitattuja kerrostaloja on yhteensä 163 (ISO 4866. 1990. 1. lisäys 1994).



Kuva 2.12. Pientalojen mitattuja vaimennussuhteita. Pientalojen vaimennussuhteet ovat suurempia kuin kerrostalojen (kuva 2.13). Mitattuja pientaloja on yhteensä 96 kappaletta (ISO 4866. 1990. 1. lisäys 1994).



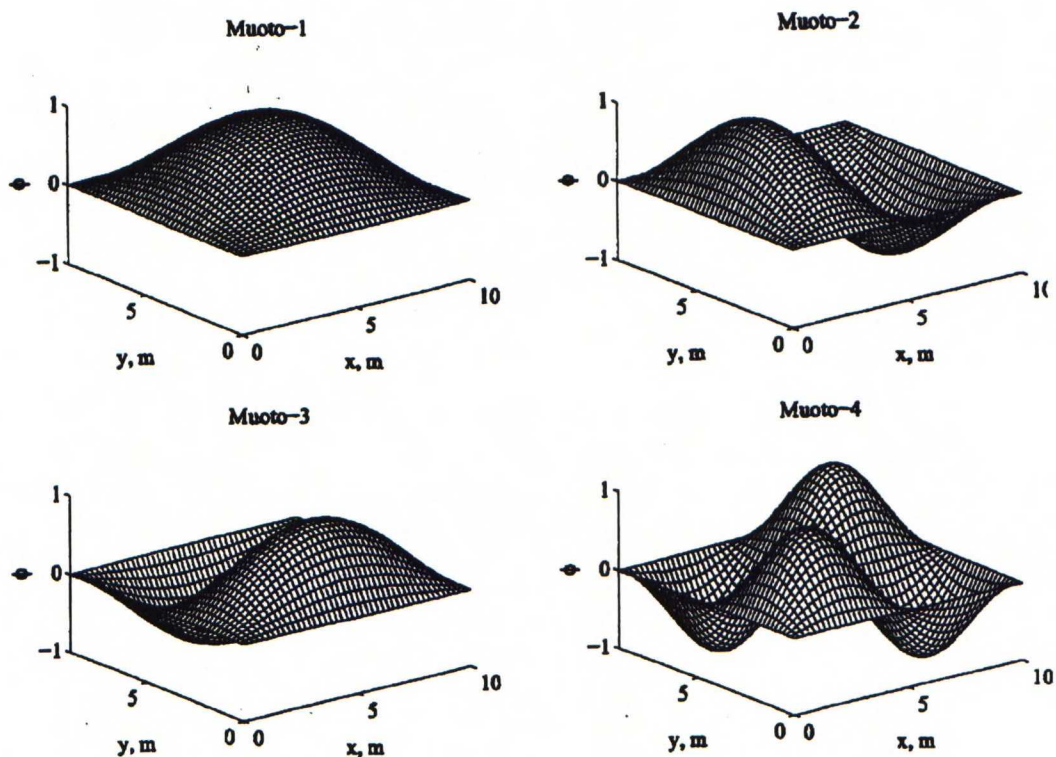
Kuva 2.13. Kerrostalojen mitattuja vaimennussuhteita. Mittaustuloksia on yhteensä 10 kappaletta (ISO 4866. 1990. 1. lisäys 1994).

Kuvassa 2.12 on esitetty pientalojen ja kuvassa 2.13 kerrostalojen vaimennussuhteita. Pientaloilla vaimennussuhteet ovat yleensä välillä 2...7 % ja kerrostaloilla välillä 0,5...2,1 % eli pientaloilla vaimennussuhteet ovat suurempia. Vaimennussuhteiden määrittämisessä on huomioitu vain kerrostalot joiden maaperän ja rakenteen välinen vuorovaikutus oli merkityksellinen. Vaimennussuhteen ei ole havaittu riippuvan rakennusten dimensioista tai korkeudesta ja siksi sen ennustaminen on erittäin vaikeaa, ellei mahdotonta. VTT on mitannut Suomessa 34 pientalon ominaistajuuden ja 4 pientalon vaimennussuhteen. VTT:n mittaamat vaimennussuhteet vastasivat hyvin tässä aiemmin esitettyjä arvoja mutta ominaistajuuden olivat hieman alhaisempia. Pientaloiksi molemmissa lähteissä on laskettu 1-, 1,5- ja 2-kerroksiset talot (Talja, 2004c), (Talja, 2004b), (ISO 4866. 1990. 1. lisäys 1994).

Seinien pystysuuntainen jäykkyys on suuri ja siten maaperästä perustuksiin siirtynyt värähtely etenee lähes samansuuruisena perustuksista kantavien seinien kautta toiseen kerrokseen. Kantavien seinien värähtely aiheuttaa välipohjaan pystysuuntaisen herätteen, jolloin asukas voi aistia asunnossaan välipohjan värähtelyn. Välipohjan värähtely on yleensä häiritsevämpää kuin muiden rakenteiden, koska asukkaat ovat siihen suoraan kosketuksissa ja siten voivat aistia sen värähtelyn kaiken tehokkaimmin. Muiden rakenteiden, kuten seinien, värähtely aistitaan yleensä niihin kiinnitettyjen kalusteiden esimerkiksi taulujen liikkeenä tai helinänä. Tällöin asukas ei varsinaisesti aisti värähtelyä vaan se asunnossa tuottamaa ääntä (Talja, 2004c). Värähtelyn yhteydessä ilmenevää runkoääntä asunnoissa käsitellään myöhemmin kappaleessa 3.2.

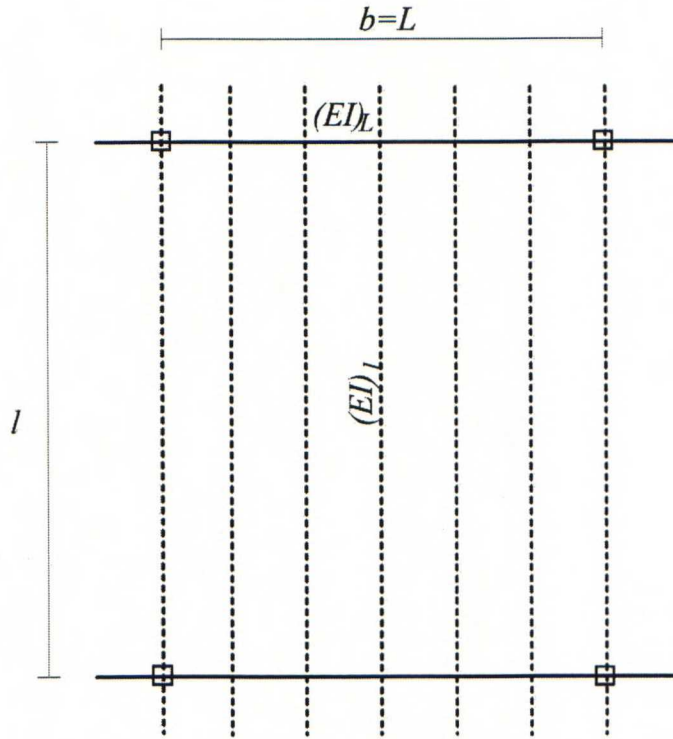
Pystysuuntainen värähtely vaimenee kerrosteloissa hieman siirryttäessä korkeammalle. Ruotsalaisessa lähteessä on esitetty, että nyrkkisääntönä kerrostaloille korkeilla taajuuksilla voidaan pitää värähtelyn vaimenemista 3 dB/kerros (Bahrekazemi, 2004). USA:ssa on esitetty, että värähtely vaimenee 2 dB/kerros siirryttäessä perustuksista 1...5 kerrosta ylöspäin ja tämän jälkeen 1 dB/kerros siirryttäessä välillä 5...10 kerrosta (FRA. 1998). Kyseisessä julkaisussa on esitetty laskentamalli, jossa värähtelyn käyttämä etenemisväylä junasta asuntoon on paloittain huomioitu kullekin palalle ominaisia kertoimia käyttäen.

Lattioilla on monia värähtelymuotoja joista alinta pidetään yleisesti haitallisimpana. Kuvassa 2.14 on esitetty isotrooppisen reunoiltaan jäykästi tuetun kappaleen neljä alinta ominaismuotoa.



Kuva 2.14. Reunoiltaan jäykästi tuetun isotrooppisen laatan neljä alinta ominaismuotoa. Lattian ominaismuotoja on sitä enemmän mitä suurempi on lattian pituus- ja poikittaissuuntaisen jäykkyyden ero (Talja, 2004c).

Lattian värähtelyn taajuussisältö riippuu sen ominaismuodoista. Ominaismuotojen lukumäärä kasvaa, mikäli lattian pituus- ja poikittaissuuntaisen jäykkyyden suhde kasvaa. Ominaismuodot, jotka heräävät siihen kohdistuvan herätteen johdosta, voimistuvat eniten ja muokkaavat siten lattian värähtelyn taajuussisältöä. Lattian alin ominaistajuus laskee lattian jännevälin kasvaessa. Lattioiden alimmat ominaistajuudet vaihtelevat yleensä taajuusvälillä 3...30 Hz (Talja, 2004c).



Kuva 2.15. Lattia kappale josta näkyy lattiapalkit $(EI)_l$, pääkannattimet $(EI)_L$ sekä pintalaatta. Lattian ominaistaajuus laskee lattian jännevälin l kasvaessa (Talja et al. 2002).

Kuvassa 2.15 on esitetty lattiakappale, josta näkyvät lattiapalkit, pääkannattimet sekä pintalaatta. Yksinkertaisen neljältä reunalta tuetun suorakaiteen muotoisen lattian alin ominaistaajuus voidaan laskea kaavalla

$$(2.8) \quad f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \sqrt{1 + \left[2\left(\frac{l}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{b}\right)^4 \right] \frac{(EI)_b}{(EI)_l}},$$

jossa l on lattian pituus, $(EI)_l$ on lattian suurempi pituussuuntaa l vastaava jäykkyys, $(EI)_b$ on lattian pienempi leveysuuntaa b vastaava jäykkyys ja m on välipohjan massa lattian pinta-alayksikköä kohden. Lattian massaan sisällytetään hyötykuormaa 30 kg/m^2 . Usein lattiapalkkien suuntaisen reunan tuennalla ei ole merkitystä ominaistaajuuteen. Tällöin ominaistaajuus voidaan laskea kaavalla

$$(2.9) \quad f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}.$$

Kaavalla (2.9) saatava ominaistaajuus aliarvioi ominaistaajuutta korkeintaan 5 % ehdoilla $b/l > 1,0$ ja $(EI)_l / (EI)_b > 30$ mutta jos $b/l > 0,5$ samaan tarkkuuteen päästään vasta kun $(EI)_l / (EI)_b > 200$. Jos lattiapalkit, joiden pituus on l , tukeutuvat pääkannattimiin, joiden pituus $L=b$, voidaan systeemin alin ominaistaajuus arvioida lattiapalkin ja pääkannattimen ominaistaajuuksista kaavalla

$$(2.10) \quad f_0 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{0,I}^2} + \frac{1}{f_{0,L}^2}}},$$

jossa $f_{0,I}$ on lattiapalkin ominaistajuus ja $f_{0,L}$ on pääkannattimen ominaistajuus. Lattiapalkin ominaistajuus saadaan kaavalla (2.9) ja pääkannattimien kaavalla

$$(2.11) \quad f_{0,L} = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}},$$

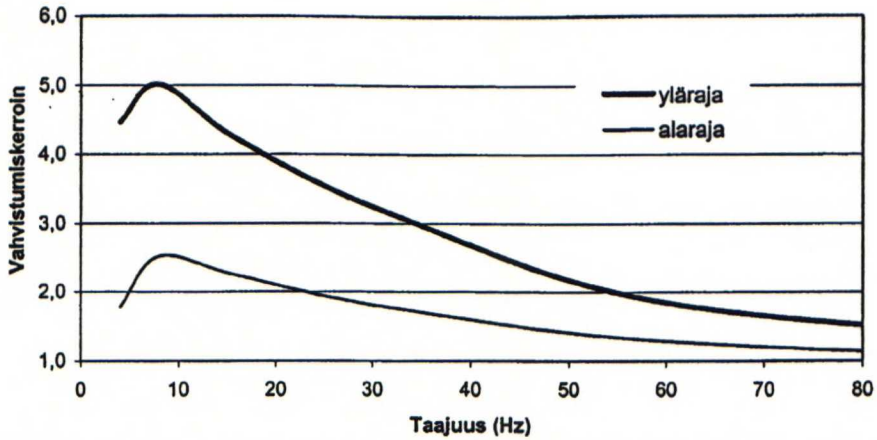
jossa $(EI)_L$ on pääkannattimien ja pintalaatan yhteinen taivutusjäykkyys pituusyksikköä kohden (Talja et al. 2002).

Kevyillä puu- ja teräsrunkoisilla lattioilla on suositeltavaa, että lattian ominaistajuus on yli 10 Hz. Muutoin kävelyn aiheuttama heräte (1,6...2,2 Hz) ja sen synnyttämä toinen, kolmas ja neljäs monikerta (3,2...8,8 Hz) ovat liian lähellä ominaistajuutta ja johtaisivat siten haitalliseen resonanssiin. Taulukkoon 2.3 on kerätty eräiden lattiarakenteiden yleisiä ominaistajuuksia ja vaimennussuhteita (Talja, 2004c), (Talja et al. 2002).

Taulukko 2.3. Eri lattiarakenteille tyypillisiä ominaistajuuksia sekä vaimennussuhteita. Vanhoissa taloissa pitkällä jänneväleillä ominaistajuudet voivat olla hieman alhaisempia (Talja, 2004c).

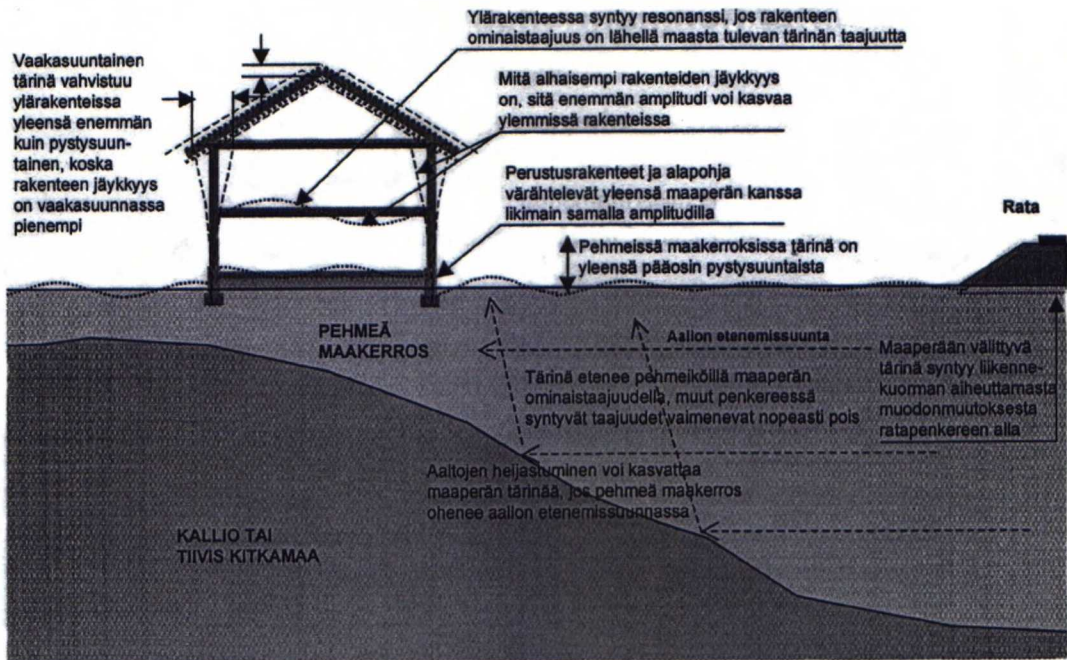
lattiarakenne	ominaistajuus	vaimennussuhde
uudet kevyet puu- tai teräsrunkoiset lattiat	yli 10 Hz	3...7 %
ontelolaattalattia	6...20 Hz	2...4 %
teräsbetoniliittorakenne (pitkä jänneväli)	3...8 Hz	2...4 %

Lopullinen värähtelyn vahvistuminen riippuu ominaistajuuden lisäksi myös paljon rakennetyypistä. Ominaistajuuden alapuolella ei voimistumista juuri tapahdu, mutta lattioiden tapauksessa useiden ominaismuotojen seurauksena voivat useat eritaajuiset komponentit voimistua. Lisäksi esimerkiksi kalusteet sekä väliseinät vaikuttavat todellisessa asunnossa esiintyvään värähtelyyn.



Kuva 2.16. Värähtelyn vahvistuskertoimen minimi- sekä maksimiarvot siirryttäessä kantavalta seinältä lattian keskelle. Kuvaajasta voidaan havaita, että värähtely vahvistuu eniten 10 Hz taajuudella, joka on siis oletettavasti lattian ominaistaajuus (Talja, 2004c).

Kuvassa 2.16 on esitetty värähtelyn vahvistumiskertoimen minimi- sekä maksimiarvot taajuuskaistoittain siirryttäessä kantavalta seinältä lattian keskelle. Kuvasta havaitaan, että lattian ominaistaajuus on noin 10 Hz, ja että kyseisellä taajuudella värähtely vahvistuu enimmillään viisinkertaiseksi.



Kuva 2.17. Värähtelyn syntyminen ja eteneminen maaperän kautta asuntoon (Törnqvist ja Nuutilainen, 2002).

Kuvassa 2.17 on havainnollistettu koko värähtelyreitti syntypaikalta aina asuntoon asti. Tässä kappaleessa esitettyjen seikkojen perusteella on selvää, että värähtelyn syntyminen, eteneminen eri väliaineissa ja rakenteissa sekä ilmeneminen asunnossa on erittäin monen tekijän yhteisvaikutuksen tulos. Tästä syystä nykyiset laskentamenetelmät eivät kykene antamaan tarkkoja tuloksia, vaan ainoa varma tapa

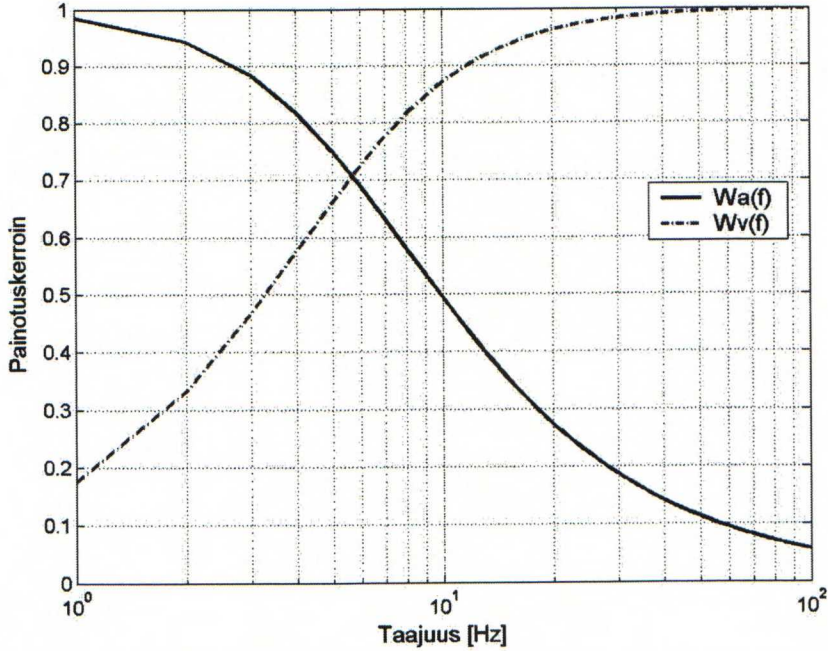
selvittää tärinätasoa asunnossa on mitata todellisten tärinälähteiden synnyttämiä tärinätasoa todellisissa rakenteissa. Eräänlainen kompromissi on mitata todellisen tärinälähteen aiheuttamat tasot suunnitellun rakennuksen paikalta ja arvioida tämän jälkeen tulevan rakennuksen tärinätasoa mittaustulosten perusteella. Tämä on välttämätöntä, sillä suunnitteluvaiheessa ei luonnollisestikaan voida mitata valmiiden rakenteiden värähtelyä, ja rakennuksen valmistuttua se olisi jo myöhäistä.

3 VÄRÄHTELYN AIHEUTTAMAT HAITAT

Edellisessä kappaleessa todettiin, että värähtelyn huippuamplitudia, kaava (2.1), voidaan käyttää avuksi määriteltäessä rakenteiden vaurioitumisriskiä. Huippuamplitudi korreloi hyvin rakenteissa esiintyvien rasiutusten kanssa ja sopii siten parhaiten vaurioitumisriskin kuvaamiseen. Toinen edellisessä kappaleessa esitelty värähtelyn kannalta hyödyllinen suure on värähtelyn tehollisarvo, kaava (2.2), joka kuvaa paremmin värähtelyn sisältämän energian määrää. Kumpikaan edellisistä suureista ei sovellu kovin hyvin ihmisen aistiman värähtelyn kuvaamiseen, sillä ne eivät huomioi mitenkään esimerkiksi ihmisen erilaista herkkyyttä eri taajuuksille. Tästä syystä värähtelyn häiritsevyyden arvioimiseksi pitää määritellä muutamia uusia termejä ennen kuin voidaan käsitellä värähtelyn aiheuttamia haittoja.

Jotta mitattu värähtelysignaali vastaisi ihmisen herkkyyttä eri taajuuksilla, pitää mitatulle aikatason kiihtyvyyssignaalin $a(t)$ tehdä taajuuspainotus. Taajuuspainotus värähtelysignaalin yhteydessä on samantapainen kuin mitatulle äänenpainetasolle tehtävä ns. A-taajuuspainotus. A-taajuuspainotuksella saatava äänitaso vastaa kohtalaisella tarkkuudella ihmisen kuulon herkkyyttä eri taajuuksilla. Samalla tavalla voidaan mitatun kiihtyvyyssignaalin eri taajuuksia painottaa vastaamaan ihmisen herkkyyttä.

Taajuuspainotus on mahdollista tehdä myös nopeussignaalin vastaavalla tavalla kuin kiihtyvyyssignaalin. Tässä on kuitenkin esitelty kaavat vain kiihtyvyyssignaaleille, mutta ne soveltuvat sellaisinaan myös nopeussignaaleille, kunhan muistetaan käyttää nopeussignaalin tarkoitettua taajuuspainotusta. Kiihtyvyy- ja nopeussignaalien taajuuspainotuskäyrät on esitelty kuvassa 3.1. Mitä isompi painotuskerroin on, sitä herkempi ihminen on kyseisellä taajuudella mitatulle suurelle. Kuvassa esitetty taajuuspainotus on standardin ISO 2631-2 vuodelta 2003 mukainen yhdistetty x-, y- ja z-suuntainen painotus. Samaa painotusta on käytetty myös norjalaisessa standardissa NS 8176.E sekä saksalaisessa standardissa DIN 4150-2. Molemmat standardit ovat vuodelta 1999. Taajuuspainotus koskee vain taajuusalueita 1...80 Hz. Kyseisen alueen ulkopuolelle jäävät osat suodatetaan pois signaalista (Talja, 2003), (Talja, 2004a), (ISO 2631-2. 2003), (NS 8176.E. 1999).



Kuva 3.1. Standardin ISO 2631-2 vuodelta 2003 mukainen eri suuntien yhdistetty taajuuspainotus. Kiihtyvyydelle ja nopeudelle on olemassa omat taajuuspainotukset $W_a(f)$ ja $W_v(f)$, jotka on laskettu kuvaajan kaavojen (3.1), (3.2) ja (3.3) mukaan (ISO 2631-2. 2003).

Värähtely on mahdollista mitata myös kolmeen akselisuuntaan erikseen ja sen jälkeen suorittaa jokaiselle suunnalle oma taajuuspainotus. Eri akselisuuntien taajuuspainotukset on määritelty standardissa ISO 2631-1 vuodelta 1997. Standardissa on lisäksi määritelty mm. ohjeet värähtelyn arvioimisesta matkapahoinvointiin liittyen. Mikäli mittaus sekä painotukset tehtäisiin jokaiseen suuntaan erikseen, olisi datan kerääminen sekä analysointi monimutkaisempaa. Asunnoissa esiintyvän värähtelyn arvioinnissa tämä ei ole tarkoituksenmukaista, koska asukkaat sekä istuvat, seisovat että makaavat asunnoissa. Tällöin on värähtelyn arvioinnin kannalta järkevämpää käyttää yhdistettyä taajuuspainotusta (ISO 2631-1. 1997), (ISO 2631-2. 2003).

Yhdistetty taajuuspainotus tehdään taajuustasossa kertomalla taajuustason kiihtyvyyssignaali $A(f)$ painotusfunktiolla $W_a(f)$, joka määritellään kaavalla

$$(3.1) \quad W_a(f) = \sqrt{\frac{f_0^2}{f^2 + f_0^2}},$$

jossa f_0 on vakio ja määritellään kaavalla

$$(3.2) \quad f_0 = \frac{1}{0,028 * 2\pi} \approx 5,684.$$

Kiihtyvyyssignaalin painotusfunktiolla $W_a(f)$ ja nopeussignaalin painotusfunktiolla $W_v(f)$ on olemassa kaavan (3.3) mukainen yhteys.

$$(3.3) \quad W_a(f) = \frac{35,7}{2\pi f} W_v(f)$$

Taajuuspainotettua kiihtyvyyssignaalia aikatasossa merkitään $a_w(t)$. Yleensä taajuuspainotetusta signaalista lasketaan sen tehollisarvo kaavalla

$$(3.4) \quad a_{w,RMS}(\tau_0) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{\tau_0-\tau}^{\tau_0} a_w^2(t) dt},$$

jossa siis aikaikkunan pituus $\tau = 1$ sekunti. Eri värähtelyitä verrattaessa käytetään usein vertailuarvona taajuuspainotetun värähtelyn tehollisarvon maksimiarvoa, joka saadaan kaavalla

$$(3.5) \quad \hat{a}_{w,RMS} = \max(a_{w,RMS}(t)).$$

Mikäli mittaustuloksia on useita, on mahdollista määrittää tietyllä todennäköisyydellä tietyn rajan sisällä olevat tulokset. Raideliikenteen aiheuttaman värähtelyn taajuuspainotetut tehollisarvon maksimiarvot muodostavat log-normaalijakauman. Kyseistä jakaumaa käytetään tilastomatematiikassa hyväksi, kun satunnaismuuttujan arvot eivät voi mennä nollan alapuolelle, mutta jakaumassa voi esiintyä suuriakin positiivisia arvoja. Tällöin muuttujan luonnollinen logaritmi saattaa olla normaalijakautunut, jolloin ongelma palautuu normaalijakauman tapaan laskettavaksi. Tätä ominaisuutta hyväksikäyttämällä saadaan laskettua kiihtyvyydelle tilastollinen tunnusluku kaavalla

$$(3.6) \quad a_{w,95} = \bar{\hat{a}}_{w,RMS} + 1,8 * \sigma,$$

jossa taajuuspainotettujen kiihtyvyyssignaalien tehollisarvojen keskiarvo lasketaan yleensä 15 ($N=15$) suurimman arvon perusteella kaavalla

$$(3.7) \quad \bar{\hat{a}}_{w,RMS} = \frac{\sum_{j=1}^N \hat{a}_{w,RMS,j}}{N}$$

ja keskihajonta kaavalla

$$(3.8) \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\hat{a}_{w,RMS,j} - \bar{\hat{a}}_{w,RMS})^2}.$$

Kiihtyvyyden tilastollinen tunnusluku on arvo, jota satunnainen mitattu kiihtyvyyssignaali ei 95 prosentin varmuudella ylitä. Toisin sanoen on vain 5 prosentin mahdollisuus, että satunnaisesti mitattu kiihtyvyyssignaalin ylittäisi kiihtyvyyden tilastollisen tunnusluvun. Kun taajuuspainotus tehdään tässä esitetyllä tavalla, on kiihtyvyyden ja nopeuden tilastollisten tunnuslukujen välillä yhteys

$$(3.9) \quad v_{w,95} = \frac{a_{w,95}}{35,7}.$$

Kaava (3.9) on voimassa tunnuslukujen lisäksi kaikille kyseistä painotusta käyttämällä saaduille painotetuille nopeus- ja kiihtyvyyssignaaleille. Tilastollisen tunnusluvun tarkoituksena on tuottaa yksi lukuarvo, joka kuvaa ihmisen aistiman värähtelyn häiritsevyyttä, ja jota vertaamalla pystytään eri mittaustuloksia nopeasti vertaamaan keskenään. (ISO 2631-2. 2003), (NS 8176.E. 1999), (Talja, 2003), (Törnqvist ja Talja, 2006), (Välikylä, 2005), (Laininen, 1998).

Rakenteiden vaurioitumisriskiä määriteltäessä värähtelyn tunnusluku voidaan määrittää myös värähtelyn lineaarisista huippuarvoista. Tällöin huippuarvot määritetään kaavan (2.1) mukaisesti ja tilastollinen tunnusluku lasketaan samaan tapaan kuin painotetun kiihtyvyyden tehollisarvollekin. Lineaarisilla huippuarvoilla laskettu värähtelyn tunnusluku a_{95} on yleensä noin kaksinkertainen tehollisarvoista laskettuun painotettuun tunnuslukuun nähden. Mikäli tiedetään värähtelyn hallitseva värähtelytaajuus f , saadaan tehollisarvoon perustuva tunnusluku arvioitua kaavalla

$$(3.10) \quad a_{w,95} \leq 0,55 * a_{95} \sqrt{1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2},$$

jossa referenssitaajuus f_0 on 3,5 Hz (Törnqvist ja Talja, 2006), (Talja, 2004a).

3.1 Värähtely asunnoissa

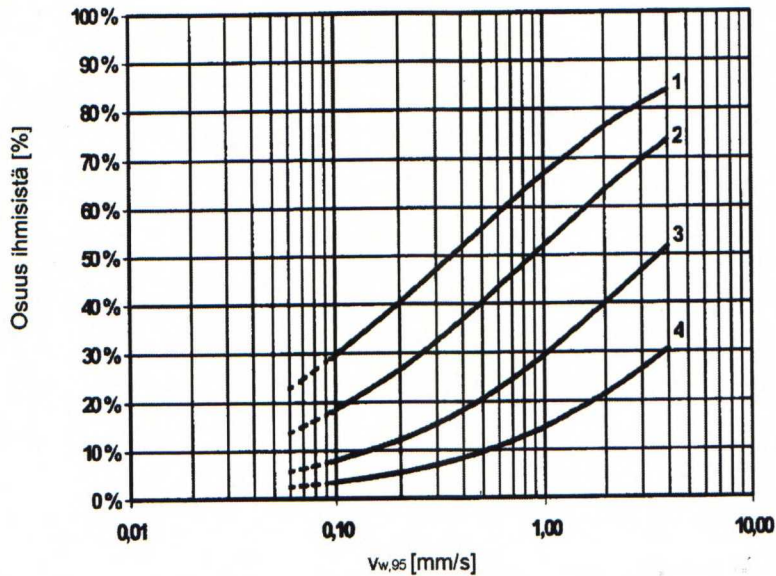
Asunnon värähtely, jonka asukas aistii häiritsevinä kehon tuntemuksina, voi pitkään jatkuessa tai usein toistuessa alentaa asumisviihtyvyyttä tai aiheuttaa jopa terveyshaitan. Arvioitaessa värähtelyn vaikutusta asumisviihtyvyyteen käytetään yleensä kaavan (3.5) mukaista taajuuspainotetun tehollisarvon huippuarvoa tai kaavan (3.6) mukaista taajuuspainotettua värähtelyn tunnuslukua. Ihminen havaitsee tärinää tunto-, näkö-, kuulo- sekä tasapainoaistien avulla. Pienillä taajuuksilla tärkeimpiä ovat näkö-, tasapaino- sekä sisäelinten tuntoaisti. Raideliikenteen aiheuttaman tärinän aistimisessa oletettavasti tärkeimmäksi nousee sisäelinten tuntoaisti (Törnqvist ja Talja, 2006), (Välikylä, 2005).

Pystysuuntainen värähtely aistitaan epämukavaksi taajuusvälillä 0,5...60 Hz. Yleensä värähtely aistitaan voimakkaimmin alle 10 Hz taajuuksilla, mutta selvästi häiritsevintä se on 5 Hz taajuudella. Tämän johtuu siitä, että se on ihmiskehon ominaistaajuus, jolloin kyseisellä taajuudella tärinä voimistuu kehossa ja aistitaan siten tehokkaimmin. Värähtely, jonka taajuus on 0,2 Hz, kiihtyvyyden tehollisarvo a_{RMS} on 1 mm/s² ja poikkeama huipusta huippuun on 2 m, tuntuu ihmisestä laivan

keinumiselta. Värähtely, jonka kiihtyvyyden tehollisarvo on sama, mutta taajuus 5 Hz, tuntuu ihmisestä samalta kuin nauraminen tai ajaminen vanhalla huonolla autolla huonokuntoisella tiellä. Kun värähtelyn taajuus nousee 20 Hz:iin ja kiihtyvyyden tehollisarvo pysyy samana, tuntuu värähtely samalta kuin esimerkiksi istuttaessa helikopterissa. Tällöin värähtelyn amplitudi on enää noin 0,2 mm (Välikylä, 2005).

Ihmisten värähtelyn aistimiskynnys vaihtelee suuresti. Noin 50 prosenttia ihmisistä, jotka osaavat odottaa värähtelyä, aistivat värähtelyn, jonka taajuuspainotetun kiihtyvyyden huippuamplitudi \hat{a}_w on 15 mm/s^2 . Kyseinen arvo on siis mediaani suuren ihmisryhmän värähtelyn aistimiskynnykselle. Yleensä aistimiskynnys vaihtelee välillä $10\text{--}20 \text{ mm/s}^2$. Havaitsemiskynnys laskee vähän, mikäli värähtelyn kesto pitenee. Keston pidentyessä havaittavan värähtelyn aiheuttama häiritsevyys puolestaan kasvaa (ISO 2631-1. 1997).

Norjassa tehdyssä laajassa tutkimuksessa mitattiin värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$ asunnossa sekä suoritettiin asukkaille kyselytutkimus. Tunnusluku määritettiin kaavan (3.6) mukaisesti viidentoista mittaustuloksen perusteella. Nämä viisitoista mittaustulosta valittiin suurimman painotetun tehollisarvon perusteella. Nopeuden tunnusluku voidaan muuttaa kiihtyvyyden tunnusluvuksi kertomalla se luvulla 35,7 kaavan (3.9) mukaisesti. Mittauksissa värähtelyn aiheuttajana oli joko maantie-, rautatie-, metro- tai raitiovaunuliikenne. Värähtelyn häiritsevyyden ei ole havaittu olevan riippuvainen värähtelyn aiheuttajasta, ja siten tulokset sopivat täysin rautatieliikenteen aiheuttaman värähtelyn häiritsevyyden arviointiin. Tutkimus käsitti yhteensä yli 1400 mittauskohdetta, ja ne sijaitsivat 14 eri paikassa Norjassa (Talja, 2003), (NS 8176.E. 1999).



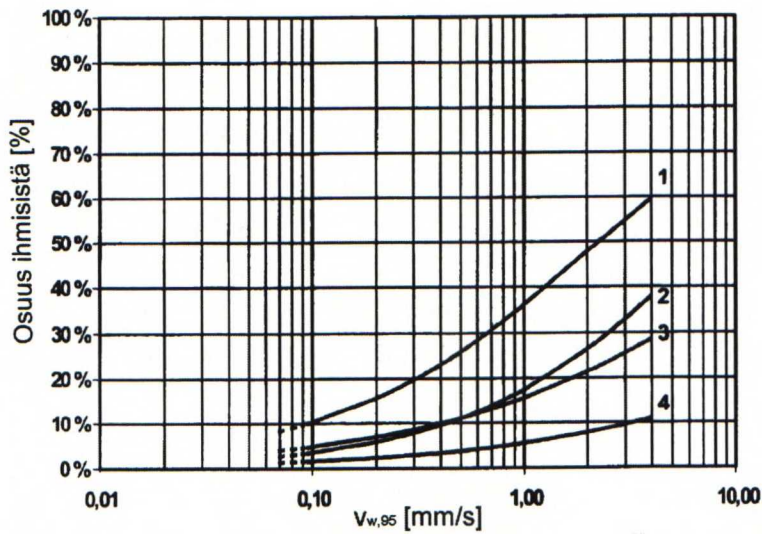
- 1 aistii värähtelyn
- 2 paljon, kohtuullisesti ja vähän häiriintynyt värähtelystä
- 3 paljon ja kohtuullisesti häiriintynyt värähtelystä
- 4 paljon häiriintynyt värähtelystä

Kuva 3.2. Osuus ihmisistä, jotka kokevat tietyn suuruisen värähtelyn eri häiritsevyystasoilla. Nopeuden suhteen määritetty tunnusluku voidaan muuttaa kiihtyvyyden tunnusluvuksi kertomalla se luvulla 35,7 (NS 8176.E. 1999).

Mittaustulosten sekä kyselytutkimusten perusteella määritettiin miten häiritsevinä asukkaat kokivat tietyn suuruisen värähtelyn. Kuvassa 3.2 on esitetty asukkaiden osuus, joka koki värähtelyn eri häiritsevyystasoilla. Tulokset ovat keskiarvoja suuresta määrästä ihmisiä, eli ne eivät siten vastaa herkimpien ihmisten kokemaa haittaa. Lisäksi on mahdollista, että ihmiset ovat altistuneet samanaikaisesti myös muille häiriöille, kuten melulle, ja siten kokeneet haitan suuremmaksi kuin se olisi pelkälle värähtelylle altistuttaessa. Kuvaan katkoviivalla merkityillä alhaisilla värähtelytasoilla tuloksia ei voida pitää luotettavina, koska ihmisten reaktiot vaihtelevat suuresti (NS 8176.E. 1999).

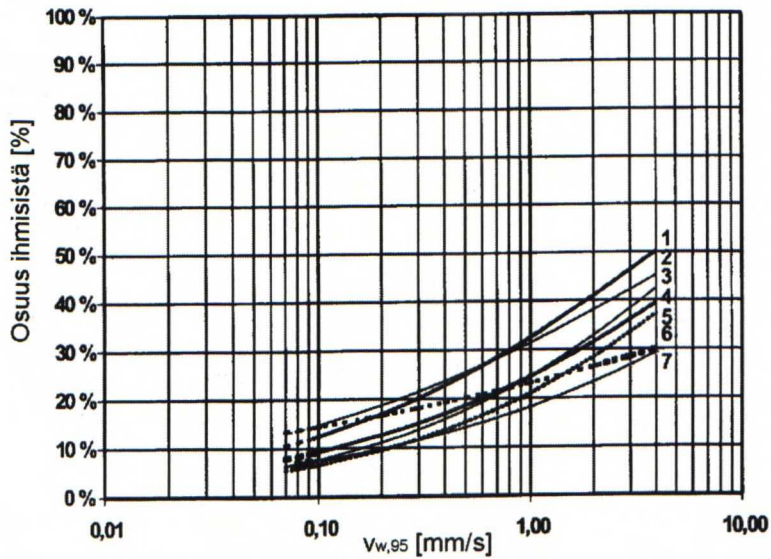
Kuvasta voidaan havaita, että 10 prosenttia ihmisistä kokee värähtelyn voimakkaasti häiritseväksi, kun kiihtyvyyden tunnusluku ylittää arvon $17,9 \text{ mm/s}^2$ joka on vain hieman suurempi kuin aiemmin esitetty mediaanin havaitsemiskynnys 15 mm/s^2 . Toisaalta kuvasta voidaan havaita, että kyseisessä tutkimuksessa ihmisistä 50 % havaitsee värähtelyn jo nopeuden tunnusluvun ollessa $0,35 \text{ mm/s}$, jota siis vastaa kiihtyvyyden tunnusluku $12,5 \text{ mm/s}^2$. Uusien rakennusten ja väylien rakentamisessa on Suomessa suositeltu tavoitteeksi nopeuden tunnusluku $0,3 \text{ mm/s}$, jota vastaa kiihtyvyyden tunnusluku $10,7 \text{ mm/s}^2$ (Törnqvist ja Talja, 2006).

Useissa lähteissä on todettu, että ihmisten häiriintyminen värähtelyistä alkaa pian aistimiskynnyksen jälkeen. Tämä voidaan havaita myös kuvasta 3.2 vertaamalla käyriä 1 ja 2. Esimerkiksi värähtely, jonka aistii alle 60 prosenttia ihmisistä, häiritsee noin 40 prosenttia ihmisistä joko paljon, kohtuullisesti tai vähän (NS 8176.E. 1999), (Talja, 2003).



- 1 rakennus usein värähtelee
- 2 tuntee värähtelyn usein kehossa
- 3 kalusteet ja varusteet usein helisevät
- 4 tavarat usein siirtyvät

Kuva 3.3. Osuus ihmisistä, jotka kokevat tietyn suuruisen värähtelyn erilaisina häiriöinä. Herkimmin ihmiset aistivat rakennuksen värähtelevän (NS 8176.E. 1999).



- 1 radion ja television käyttö häiriintyy
- 2 lepo häiriintyy
- 3 herää liian aikaisin
- 4 herää yöllä
- 5 puhelimen käyttö häiriintyy
- 6 keskustelu häiriintyy
- 7 vaikeuksia nukahtaa

Kuva 3.4. Osuus ihmisistä, jotka kokevat tietyn suuruisen värähtelyn häiritsevän eri toimintoja. Mikäli värähtelyn kanssa samanaikaisesti esiintyy melua, on koettu haitta yleensä suurempi (NS 8176.E. 1999).

Kuvissa 3.3. ja 3.4 on esitetty värähtelyn tunnusluku suhteessa ihmisten kokemuksiin erilaisiin haittoihin ja häiriöihin. Kuvan 3.3 perusteella voidaan havaita, että rautatieliikenteen aiheuttama värähtely havaitaan useimmiten asunnoissa rakennuksen värähtelynä. Jopa suurilla värähtelyarvoilla vain harvat ihmisistä kokevat, että tavarat ovat usein siirtyneet paikoiltaan. Värähtelyn tunnusluvun ollessa noin $14,3 \text{ mm/s}^2$ noin 10 prosenttia ihmisistä tuntee usein värähtelyn kehossaan. Suunnilleen saman verran ihmisiä ilmoitti tällöin myös kalusteiden ja varusteiden usein helisevän. Kuvan 3.4 perusteella suurin osa ihmisistä havaitsee värähtelyn useimmiten television tai radion käytön yhteydessä. Noin 10...15 prosenttia ilmoitti kokevansa häiriöitä levon tai unen aikana tunnusluvun ollessa $3,6 \text{ mm/s}^2$ (NS 8176.E. 1999).

Yllä esitettyihin tunnuslukuun perustuviin arvoihin sisältyy epävarmuutta, sillä tunnusluku ei huomioi mitenkään värähtelyn kestoa tai esiintymistiheyttä. Yleisesti ottaen koettu haitta kasvaa, mikäli ilmiö kestää pitkään tai esiintyy usein. Toisaalta tunnusluku lasketaan aina suurimpien tehollisarvojen perusteella, jolloin se kuvaa värähtelyn voimakkuutta värähtelyn ollessa pahimmillaan. Asukkaan kokemana haitta lisääntyy myös, mikäli samaan aikaan on havaittavissa melua, ilmansaasteita tai muita värähtelylähteeseen liitettäviä tekijöitä. Nämä tekijät eivät vaikuta mitenkään tunnuslukuun (NS 8176.E. 1999). Koettu haitta kasvaa oletettavasti myös, mikäli värähtelylähteeseen on olemassa näköyhteys.

Muutos värähtelyn suuruudessa ei ole suoraan verrannollinen ihmisen kokeman värähtelyn suuruuteen. Muutoksen tulee olla verrattain suuri, jotta ihminen aistii värähtelyn pienentyneen tai kasvaneen. Värähtelyongelmien yhteydessä on havaittu, että vasta värähtelyn puolittuessa on parannuksella merkitystä. Ihmisen herkkyyys värähtelylle vastaa siis suurin piirtein kuuloaistin herkkyyttä. Äänitehotason laskeminen kolmella desibelillä vastaa tehon puolittamista, jolloin ihminen aistii äänenvoimakkuuden hieman laskeneen (Talja, 2004a), (Karjalainen, 1999).

3.2 Runkoääni asunnoissa

Rautatieliikenteen aiheuttaman värähtelyn asuntoihin tuottamaa ääntä kutsutaan runkoääneksi. Runkoääni syntyy siis maaperän kautta rakenteisiin kytkeytyneen värähtelyn säteillä ääntä asuntoon. Runkoääntä ei ole raideliikenteestä aiheutuvan melun kuuluminen ulkokuoren rakenteiden läpi asuntoon. Raideliikenteestä voidaan katsoa siis aiheutuvan kolmenlaista haittaa asuntoon: värähtely, runkoääni ja melu. Vaikka kaksi viimeistä aistitaan samaan tapaan kuuloaistilla ja ovat siten asukkaan kannalta samanarvoisia, ovat ne syntyneet eri tavoin täysin erilaisia. Tässä työssä käsitellään pääasiassa runkoääntä, koska se oleellisesti liittyy raideliikenteen aiheuttamaan maaperän värähtelyyn.

Mikäli lukija on kiinnostunut raideliikennemelusta, löytyy tietoa ympäristöministeriön julkaisemasta yleisestä ohjeesta raideliikennemelun laskemiseksi (Ympäristöopas 97. 2002). Laskentamalli on muokattu Suomen oloihin sopivaksi yhteispohjoismaisesta raideliikennemelun laskentamallista. Laskentamalli on kehitetty suunnittelun ja ennustamisen avuksi ja sen avulla voidaan määrittää junien ohituksen aiheuttamat keski- ja enimmäisäänitasot. Malli on tarkoitettu ohjeeksi arvioitaessa raideliikenteen aiheuttamaa melukuormitusta ympäristö-

suojelulain täytäntöönpanossa ja soveltamisessa (Ympäristönsuojelulaki n:o 86. 2000). Päivä- sekä yöajan melutasojen ohjearvot on puolestaan määritelty valtioneuvoston päätöksessä n:o 993 vuodelta 1992. Kyseiset arvot on esitetty taulukossa 3.1.

Taulukko 3.1. Raideliikennemelua koskevat melutason ohjearvot. Arvoja käytetään meluhaittojen ehkäisemiseksi sekä ympäristön viihtyvyyden turvaamiseksi. Arvot tarkoittavat fast-aikavakiota käyttämällä mitattuja arvoja (Valtioneuvoston päätös n:o 993. 1992).

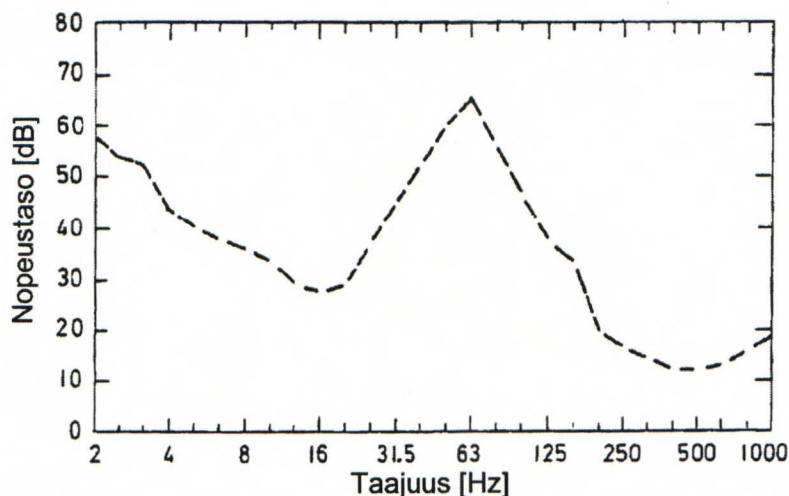
paikka	keskiäänitaso $L_{A,F,eq}$ [dB]	
	päiväohjearvo klo 7-22	yöohjearvo klo 22-7
ulkona asumiseen käytettävillä alueilla, virkistysalueilla taajamissa ja taajamien välittömässä läheisyydessä sekä hoito- tai oppilaitoksia ¹ palvelevilla alueilla	55	50 / 45 ²
sisällä asuin-, potilas-, ja majoitushuoneissa	35	30
opetus- ja kokoontumistiloissa	35	-
liike- ja toimistohuoneissa	45	-
1) Oppilaitoksia palvelevilla alueilla ei sovelleta yöohjearvoa. 2) 45 dB on melutason ohjearvo uusilla alueilla.		

Raideliikenteen aiheuttama värähtely etenee parhaiten pehmeissä maaperissä. Runkoääni puolestaan etenee parhaiten kallioisessa maaperässä. Runkomelun äänitasoja voidaan arvioida rakenteiden värähtelyiden perusteella. Runkomelun äänitaso asettuu yleensä noin 5...15 dB rakenteiden A-taajuuspainotetun tärinätason yläpuolelle (Peltonen et al. 2005). Rakenteiden äänensäteilykykyyn vaikuttavat niiden materiaalit ja dimensiot. Lopullinen asunnossa vallitsevaa äänitaso riippuu lisäksi myös huonevaimennuksesta eli käytännössä vaimennusmateriaalin määrästä asunnossa. Esimerkiksi paksut matot, täydet kirjahyllyt sekä huonekalut kasvattavat vaimennusmateriaalin määrää ja laskevat siten asunnossa vallitsevaa äänitasoa. Äänitasoa ei kuitenkaan käytännössä kannata yrittää laskea loputtomasti huonevaimennusta kasvattamalla.

Raideliikenteen aiheuttaman runkomelun suhteen Suomessa ei ole voimassa olevia virallisia suositusarvoja. Yleisesti runkomelun häiritsevyyttä on kuitenkin ollut tapana arvioida yhden ohituksen aikaisen enimmäisäänitason perusteella. Avoradalla suurimpana sallittuna rajan on pidetty A-taajuuspainotuksella sekä slow-aikavakiolla mitattua enimmäisäänitasoa $L_{A,S,max}$ 35 dB. Asuntojen sisämelulle on olemassa taulukon 3.1 mukainen yöaikaisen sisämelun suurin sallittu arvo $L_{A,F,eq}$ 30 dB. Kun avoradalla runkomelun enimmäisäänitaso $L_{A,S,max} \leq 35$ dB, on sen vaikutus edellä mainittuun yöaikaiseen ohjearvoon käytännössä merkityksetön. Tunneleista kantautuvat runkomelun osalta ollaan siirtymässä kuitenkin kohti raja-arvoa $L_{A,S,max}$ 30 dB. Kyseinen raja-arvo vastaa suurin piirtein Norjassa standardissa NS 8175 määritettyä raja-arvoa $L_{A,F,max}$ 32 dB. Norjan raja-arvo mitataan siis käyttäen fast-aikavakiota, kun taas täytäntö Suomessa on käyttäen runkomelun mittaamiseen slow-aikavakiota. Ruotsissa runkomelulle sovelletaan suoraan suurinta sisätiloissa sallittua keskiäänitasoa $L_{A,F,eq}$ 30 dB. Kyseinen arvo vastaa suurin piirtein

slow-aikapainotuksella saatua arvoa $L_{A,S,eq}$ 28 dB (Peltonen et al. 2005), (Banverket ja Naturvårdsverket, 2006).

Koska runkoääni etenee parhaiten kallioisessa maaperässä, on havaittu, että runkoäänien kannalta ongelmallisimpia ovat kallioon louhitut rautatietunnelit. Usein myös kaupungeissa metrot on louhittu kallioon, jolloin maanpinnalla tunneleiden yläpuolella olevissa rakennuksissa saattaa esiintyä runkoäänestä häiriöitä. Junan ohituksen aiheuttamat pystysuuntaiset nopeustasot (referenssinopeus $5 \cdot 10^{-8}$ m/s) 13 metrin etäisyydellä junaradasta on esitetty kuvassa 3.5. Mittaukset on suoritettu Ruotsissa osana raideliikenteen aiheuttaman runkoäänien tutkimusta.



Kuva 3.5. Terssikaistoittain mitatut nopeustasot 13 metrin etäisyydellä junaradasta paljaalla kalliopinnalla. Nopeustasot on mitattu pystysuuntaan ja referenssiarvona on käytetty nopeutta $5 \cdot 10^{-8}$ m/s. Kuvasta voidaan havaita, että tärkein osa spektristä rajoittuu välille 25...500 Hz ja että spektrissä on havaittavissa korostuma 63 Hz taajuuden ympärillä (Ljunggren, 1991)

Tutkimuksissa on havaittu, että taloissa, joissa on betoniset kantavat seinät, runkoääni vaimenee hitaasti ylöspäin siirryttäessä. Yleensä vaimennus on kyseisissä rakennuksissa luokkaa 1...2 dB/kerros (Ljunggren, 1991). Tuoreemmissa julkaisuissa on tutkittu runkoäänien etenemistä sekä vaimennuskeinoja. On havaittu, että sijoittamalla ensimmäisessä kerroksessa kantavat pilarit eri kohtaan kuin ylemmissä kerroksissa voidaan onnistua alentamaan runkoääntä 5...10 dB (Hassan, 2002). Myöhemmissä tutkimuksissa on tarkasteltava taajuusalue rajattu välille 25...250 Hz (Hassan, 2001).

Toistaiseksi missään päin maailmaa ei ole kehitetty mitta- ja arviointimenetelmää jolla, voitaisiin arvioida runkoäänien sekä värähtelyn yhdessä aiheuttamaa kokonaisuhahta asunnoissa. Maasta mitatun värähtelyn avulla on mahdollista pyrkiä arvioimaan asunnoissa esiintyvä runkoääni, mutta tarkkoihin tuloksiin pääseminen vaatisi erittäin tarkkaa ja yksityiskohtaista mallia. Jotta asukkaan kokema kokonaisuhahta saataisiin arvioitua, tulisi sekä laboratorio- että kenttäolosuhteissa suorittaa tutkimuksia ilmiöiden yhteisvaikutuksista sekä kehittää niille laskenta- ja arviomallit.

Norjalaisten tutkimusten mukaan varmaa on kuitenkin, että melun ollessa voimakasta ja tärinä vähäistä aistii asukas lähinnä vain meluhaittaa. Mikäli tärinä taas on voimakasta ja melu vähäistä, aistii asukas lähinnä vain tärinähaitan. Muissa suhteissa ilmetessään melun ja tärinän yhdessä aiheuttama kokonaishaitta on siis toistaiseksi vaikeaa, ellei mahdotonta arvioida. Varmaa on vain, että värähtelyhaitta koetaan suurempana, mikäli melua esiintyy samaan aikaan. Toisaalta voidaan myös todeta, että pelkkään värähtely- tai meluhaitan alentaminen ei välttämättä johda asuinmukavuuden paranemiseen, mikäli ne ilmenevät samanaikaisesti (NS 8176.E. 1999).

3.3 Rakennusten vaurioituminen

Koska junan ohiajon kesto ja siten myös siitä aiheutuvan tärinän kesto ylittää lähes aina viisinkertaisesti lähimmissä rakennuksissa esiintyvien ominaisjaksojen pituudet, luokitellaan junaliikenteen aiheuttama tärinä jatkuvaksi. Jatkuvan tärinän katsotaan yleisesti aiheuttavan helpommin vaurioita kuin ei-jatkuvan, koska jatkuva värähtely ehtii herättämään rakennuksen värähtelyn ominaistajuudella. Ominaisajuudella rakennuksen värähtely on voimakkainta ja siten aiheuttaa suurimman rasituksen rakenteille. Resonanssi-ilmiötä ei luonnollisesti ilmene, mikäli maanperän värähtelyn spektri ei sisällä ominaistajuutta (ISO 4866. 1990).

Rakennuksen tai rakenneosan vaurioituminen tapahtuu, kun värähtelyn aiheuttama rasitus ylittää kestokyvyn. Standardin ISO 4866 liitteessä B on esitetty, miten rakenteesta mitatun nopeuden huippuarvon perusteella voidaan määrittää rakenteessa esiintyvä huippurasitus. Rakenteiden vaurioitumistarkastelu edellyttää kuitenkin niin laajaa tietämystä rakenneksityiskohdista sekä olosuhteista, ettei niiden hankkiminen käytännössä ole yleensä mahdollista. Värähtelyn haitallisuus rakenteelle riippuu lisäksi sen dynaamisista ominaisuuksista, kuormitushistoriasta, materiaaleista, rakennemuodoista sekä kunnosta yleensä. Koska tekijöitä on paljon ja rasituksen tarkka arvioiminen hankalaa, on mahdotonta antaa yksiselitteisiä raja-arvoja värähtelylle (ISO 4866. 1990), (Törnqvist ja Nuutilainen, 2002).

Sveitsissä voimassa olevaan standardiin sekä standardiin ISO 4866 pohjautuen on Suomessa VTT esittänyt taulukon 3.2 mukaiset raja-arvot rakennusten vaurioitumisalttiuden arvioimiseen.

Taulukko 3.2. VTT:n esittämät raja-arvot rakennusten vaurioitumisalttiuden arvioimiseksi (Törnqvist ja Nuutilainen, 2002).

tärinäalttiusluokka	dominoiva taajuus [Hz]	värähtelyn nopeuden resultantin huippuarvo \hat{v}_{res} [mm/s]
I. Normaalikuntoiset hyvin jäykistetyt rakennukset. Teräs- ja teräsbetoniset teollisuusrakennukset, muut teräsrakenteet, sillat ja muut niihin rinnastettavat rakenteet.	< 10	8
	10...30	10
	> 30	12
II. Perinteisesti rakennetut betoni-, tiili- tai puurakenteiset asuin- ja liikerakennukset tai muut niihin rinnastettavat rakennukset ja rakenteet. Luokan I. rakenteet, joissa on muurattuja kellariseiniä tai tiiliverhoilu.	< 10	4
	10...30	5
	> 30	6
III. Erityisen herkät rakennukset tai rakenteet ja kulttuurihistoriallisesti tai yhteiskunnallisesti merkittävät rakennukset.	< 10	2
	10...30	3
	> 30	4

VTT suosittelee, että mikäli taulukon 3.2 raja-arvot ylittyvät, tulkitaan rakennus merkittävästi alttiiksi vaurioille, jolloin jatkotoimenpiteet pitää arvioida sen perusteella. Värähtelyn nopeuden resultantin huippuarvo, joka on esitetty arviointikriteeriksi taulukossa 3.2, saadaan kolmikomponenttimittauksen tuloksena. Mittaus suositellaan tehtäväksi nopeuden pystysuuntaista v_{vert} , radan suuntaista v_{long} sekä rataa vastaan kohtisuoraa v_{tran} komponenttia käyttäen. Kolmisuuntaisesta mittauksesta saadaan resultoiva värähtelyn nopeus kolmen komponentin vektorisummana kaavalla

$$(3.11) \quad v_{res}(t) = \sqrt{v_{vert}^2(t) + v_{long}^2(t) + v_{tran}^2(t)}.$$

Kolmen suunnan mittausta tulee käyttää rakennusten vaurioitumisriskin arvioinnissa, koska värähtelyn rakennukseen aiheuttamat siirtymät tapahtuvat aina kolmiulotteisessa avaruudessa. Kolmisuuntaista mittausta voidaan jatkaa yksisuuntaisena mittauksena määräävän suunnan suhteen, mikäli ensin on kolmisuuntaisella mittauksella todettu määräävä suunta. Mikäli määräävää suuntaa ei ole, tulee mittaukset suorittaa kaikissa pisteissä kolmeen suuntaan ja niistä määrittää resultoiva värähtelynopeus.

Määrääväksi suunnaksi voidaan arvioida suunta, johon amplitudi on vähintään kaksikertainen seuraavaksi suurimpaan suuntaan nähden. Tällöin resultoiva värähtelynopeus on korkeintaan 20 % suurempi kuin määräävään suuntaan mitattu komponentti. Yksikomponenttisena mittauksena määräävään suuntaan mitatusta värähtelynopeudesta voidaan resultoiva värähtelynopeus arvioida kaavalla

$$(3.12) \quad v_{res}(t) = 1,2 * v_M(t),$$

jossa v_M on määräävään suuntaan mitattu värähtelynopeus. Yleensä pystysuuntainen komponentti on määräävä. Resultoivasta värähtelynopeudesta määritetään huippuarvo kaavalla

$$(3.13) \quad \hat{v}_{res} = \max(|v_{res}(t)|).$$

Raja-arvot rakennusten vaurioalttiudelle on määritelty VTT:n suosituksessa vain resultoivan värähtelynopeuden huippuarvon suhteen. Mikäli mittaukset tehdään kiihtyvyyden suhteen, saadaan tuloksista määritettyä värähtelynopeus numeerista integrointia käyttäen (Törnqvist ja Nuutilainen, 2002).

Rakennukset on yleensä suunniteltu siten, että ne ottavat vastaan pääasiassa pystysuuntaisia voimia. Tästä syystä vaakasuuntainen värähtely saattaa helpommin aiheuttaa vaurioita rakenteissa. Eräässä tutkimuksessa altistettiin betoniseinä laboratorio-olosuhteissa 60 päivän ajan 13 Hz:n taajuiselle värähtelylle, jonka nopeuden huippuamplitudi \hat{v} oli 14 mm/s. Kokeen loputtua havaittiin, että seinän rapatulla puolella oli havaittavissa pieniä murtumia, mutta rappaamattomalla puolella ei ollut havaittavissa vaurioita (Levomäki, 1999).

Koska tutkimuksessa käytetty signaali oli yhdensuuntaista värähtelyä, jonka huippuamplitudi \hat{v} oli vakio 14 mm/s, on värähtelyn resultoiva huippunopeus \hat{v}_{res} myös 14 mm/s. Näin ollen tutkimuksessa käytetty 13 Hz:n signaali ylittää kaikissa taulukon 3.2 luokissa taajuusalueelle 10..30 Hz annetut raja-arvot. Tämän perusteella rakenne alistui merkittäväälle vaurioitumisriskille ja siten vaurioiden ilmeneminen oli odotettua.

Kuten kappaleessa kaksi todettiin, on harmonisen värähtelyn tehollisarvo noin 0,7-kertainen huippuamplitudiin nähden. Vakioamplitudisella värähtelyllä myös tehollisarvo on vakio eli tehollisarvo on samalla tehollisarvon huippuarvo. Kaavojen (3.1), (3.2) ja (3.3) perusteella saadaan 13 Hz:n taajuiselle nopeussignaaliille taajuuspainotuskertoimeksi 0,917. Näin ollen taajuuspainotettu nopeus v_w saadaan kertomalla nopeus luvulla 0,917. Kokeessa käytetyn nopeuden suhteen

lausuttu taajuuspainotettu huippuarvo \hat{v}_w on noin 12,8 mm/s sekä tehollisarvo $\hat{v}_{w,RMS}$ 9,0 mm/s. Taajuuspainotettujen nopeuksien sekä kiihtyvyyksien välillä on kaavan (3.9) mukainen yhteys, eli tutkimuksessa käytetyn herätteen kiihtyvyyden suhteen lausuttu taajuuspainotettu huippuarvo \hat{a}_w on noin 460 mm/s² sekä tehollisarvo $\hat{a}_{w,RMS}$ on noin 320 mm/s².

Kappaleessa 3.1 todettiin, että Suomessa VTT on antanut suosituksen, jonka mukaan uusien väylien ja rakennusten rakentamisessa tulisi tavoitteena olla, että asunnoissa ei ylitetä kiihtyvyyden tunnuslukua $a_{w,95}$ 10,7 mm/s². Kuten kaavassa (3.6) esitettiin, lasketaan tunnusluku käyttäen taajuuspainotettuja tehollisarvojen huippuarvoja. Tutkimuksessa käytetty taajuuspainotettu tehollisarvo on miltei 30 kertaa suurempi kuin uusille rakennuksille asetettu ohjearvo. Tästä syystä on erittäin epätodennäköistä, että raideliikenteen aiheuttama värähtely saisi aikaiseksi vaurioita uusissa rakennuksissa. Ennen kuin vaurioita olisi odotettavissa, ylitettäisiin myös asukkaiden valituskyynnys moninkertaisesti. Tämä voidaan perustella vertaamalla kuvan 3.2 käyrän 3 arvoja tutkimuksessa käytetyn herätteen nopeuden taajuuspainotettuun tehollisarvoon $\hat{v}_{w,RMS}$, joka oli noin 9,0 mm/s. Kuvasta voidaan havaita, että nopeuden tunnusluvun $v_{w,95}$ ollessa noin 0,6 mm/s noin 25 % asukkaista pitää värähtelyä joko paljon tai kohtuullisesti häiritsevä. Todennäköisempää lieneekin, että rakenteiden vaurioitumista tapahtuu ennemmin esimerkiksi räjäytystöiden kuin raideliikenteen aiheuttamista värähtelyistä.

Tutkimuksessa, jossa käytiin läpi värähtelyyn liittyviä vaurioita, pääteltiin, että on vain 5 prosentin todennäköisyys rakennusten vaurioitumiselle, mikäli värähtelynopeus ei ylitä arvoa 50 mm/s. Tutkimuksessa rakennusten vaurioitumiseksi laskettiin lasin rikkoutuminen ja vakavat rappauksen halkeamat mukaan lukien rappauksen irtoaminen. Tuloksissa todettiin lisäksi, että yhdessäkään tapauksessa, jossa värähtelyn nopeus oli alle 25 mm/s, ei havaittu rakenteellisia vaurioita. Tutkimuksen mukaan rakenteellisiin vaurioihin ei ole normaaleissa rakennuksissa vaaraa värähtelyn nopeuden ollessa alle 15 mm/s. Edellä mainitut arvot ovat oletettavasti nopeuden huippuarvoja ja ne ovat huomattavasti suurempia kuin VTT:n suosittamat raja-arvot tai edellä kuvatun laboratoriotutkimuksen arvot. Tästä syystä ne ovat ristiriidassa aiemmin esitettyjen arvojen kanssa ja siten niihin tulee suhtautua varauksella (Bahrekazemi, 2004).

VTT:n ohje ei huomioi mitenkään värähtelyn kestoa, joka olennaisesti vaikuttaa ominaistuuksien heräämiseen rakennuksissa. Standardissa ISO 4866 tämä kuitenkin on suositeltu huomioitavaksi. Tämän lisäksi se huomioi monipuolisemmin rakennuksen ominaisuudet ja kunnon, vaimennuksen, rakennuksen perustuksen dimensiot ja maaperän. Myös Norjassa standardi NS 8141 ja Ruotsissa standardi SS 460 48 66 ottavat nämä seikat laajemmin huomioon kuin tässä käsitelty VTT:n suositus (ISO 4866. 1990), (Bahrekazemi, 2004).

Värähtely saattaa aiheuttaa asuinmukavuuden laskun, runkomelun ja vaurioitumisriskin lisäksi haittaa myös rakennuksessa oleville herkille laitteille. Rakennukset, joissa on värähtelylle erityiden herkkiä instrumentteja, kuten esimerkiksi elektronimikroskoopi, tulee aina huomioida suunnittelussa erikseen. Lisäksi jotkin tilat voidaan luokitella värähtelylle herkemmiä kuin toiset. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi teatterit, TV studiot, konserttisalit ja laboratoriot. Tällöin suunnittelussa tulee yhdessä alan ammattilaisten kanssa asettaa vaativammat tavoitteet kuin normaalien rakennusten yhteydessä (Bahrekazemi, 2004).

4 VÄRÄHTELYN VAIMENNUSKEINOT

Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, aiheuttaa värähtely monenlaisia haittoja. Useimmiten värähtely laskee asunnoissa asuinmukavuutta ja voi pahimmassa tapauksessa jopa aiheuttaa terveydellistä haittaa esim. häiritsemällä lepoa. Tällöin värähtelyä on syytä pyrkiä vaimentamaan. Jo rakennetuilla alueilla värähtelyn vaimentaminen on taloudellisesti usein kallista ja vaikeaa. Uusia alueita ja rakennuksia suunniteltaessa värähtelyn vaimentaminen on helpompaa ja se voidaan toteuttaa tehokkaammin (Välikylä, 2005), (Törnqvist ja Talja, 2006).

Suomessa on useissa määräyksissä ja laeissa määritelty liikennetärinä otettavaksi huomioon sekä määritelty eri tahojen vastuu. Seuraavaksi käydään näistä tärkeimmät läpi, ennen kuin siirrytään varsinaisten vaimennuskeinojen esittelyyn.

Liikennetärinästä aiheutuvat haitat on määritelty otettaviksi huomioon Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa B3 vuodelta 2004. Määräyksessä todetaan, että ennen rakentamista on tarvittaessa selvitettävä liikennetärinä. Se ei saa aiheuttaa vaurioita rakennuksille eikä kohtuutonta häiriötä rakennuksessa oleville ihmisille. Lisäksi määräyksessä on ohje, jossa todetaan, että liikennetärinän suuruutta voidaan arvioida aikaisemmin samanlaisissa olosuhteissa tehtyjen mittauksen perusteella. Kun tärinää aiheuttava liikenneväylä on jo olemassa rakennuspaikan läheisyydessä, voidaan tärinämittauksia tehdä rakennuspaikalla. Kun tärinää joudutaan mittaamaan maasta, tärinän vahvistuminen rakennuksessa arvioidaan erikseen (SRakMK, B3. 2004).

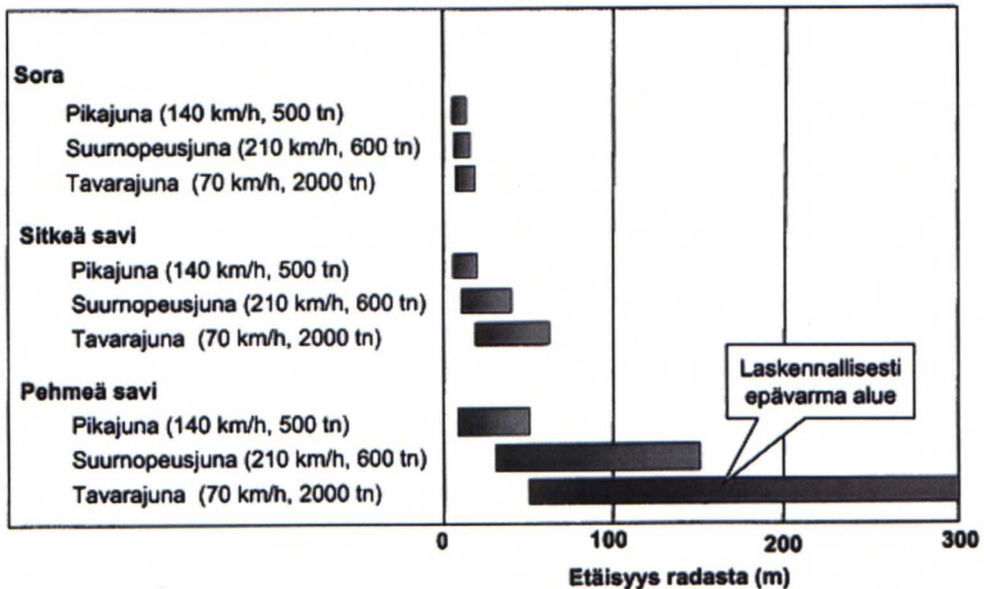
Yleisesti tärinä rinnastetaan ympäristönsuojelussa ja lainsäädännössä meluun. Ympäristönsuojelulaissa n:o 86 vuodelta 2000 on periaatteena, että toiminnanharjoittajan tulee ehkäistä ennakolta ympäristöhaittoja ja rajoittaa ne mahdollisimman vähäisiksi. Laki koskee tärinän päästämistä ja jättämistä ympäristöön, mikäli siitä aiheutuu yleisen viihtyvyyden laskua, haittaa omaisuudelle tai terveyshaittaa (Ympäristönsuojelulaki n:o 86. 2000).

Laissa ympäristövahinkojen korvaamisesta otetaan huomioon kaavoittajien ja vahingonaiheuttamiseen osallistuvien vastuu. Lain nojalla yksityisillä henkilöillä on oikeus saada korvaus esimerkiksi raideliikenteen aiheuttamasta tärinästä. Korvausvelvollinen on taho, jonka aiheuttamasta toiminnasta vahinko aiheutuu (Laki ympäristövahinkojen korvaamisesta n:o 737. 1994).

Värähtelyn vaimentaminen voidaan periaatteessa toteuttaa kolmessa eri kohdassa. Aiempien kappaleiden tapaa jatkaen, on tässä kappaleessa jaettu värähtelyn vaimennuskeinojen tarkastelu kolmeen eri lukuun vaikutusalueen suhteen.

4.1 Vaimennuskeinot lähteessä

Raideliikenteen tärinälähteeksi mielletään ensisijaisesti juna ja sen vaunut sekä raiderakenne penkereineen. Erityisesti penkereen rakennetta on kallista ja vaikeaa muokata jälkikäteen. Kaavoitusvaiheessa riittävän välimatkan jättäminen rakennusten ja radan väliin on halvin ja helpoin tapa suojata tulevat rakennukset raideliikenteen aiheuttamalta tärinältä. Riittävän suojavyöhykkeen leveys riippuu kuitenkin liikennöivän kaluston lisäksi maaperästä ja voi savimailla ja raskailla junilla olla erittäin suuri. Kuvassa 4.1 on esitetty arviot etäisyyksistä, joilla tärinä voi olla haitallista eri maalajeille ja junatyypeille.



Kuva 4.1. Arvioidut etäisyydet joilla raideliikenteen aiheuttama tärinä voi olla haitallista. Vaaleampi alue on laskennallisesti epävarma (Talja, 2004a).

Kuvan palkkien vasemmassa laidassa on todennäköistä, että kaavan 3.6 mukainen kiihtyvyyden taajuuspainotettu tunnusluku $a_{w,95}$ ylittää arvon 21 mm/s^2 , jolloin tärinä on asukkaiden mielestä haitallista. Palkkien oikeassa reunassa kyseisen arvon ylittyminen on epätodennäköistä. Norjan standardi NS 8176 vuodelta 1999 suosittelee uusilla alueilla suurimmaksi sallituksi värähtelyn tunnusluvuksi $a_{w,95}$ arvoa 11 mm/s^2 . Kyseinen arvo saavutetaan, kun kuvan etäisyydet kerrotaan soramailla luvulla 1,5, sitkeillä savimailla luvulla 3 ja pehmeillä savimailla luvulla 6. Kertoimet tarkoittavat etäisyyttä, jolla kyseisellä maalajilla arvioidaan rautatieliikenteen aiheuttaman värähtelyn puolittumista. Kertoimet huomioimalla voidaan havaita, että pisimmillään etäisyys, jolla saavutetaan uusille alueille suositeltu tunnusluku voi olla jopa 1000 metriä. Etäisyys on pehmeillä savimailla raskailla tavarajunille, jotka kulkevat nopeudella 70 km/h (Talja, 2004a), (NS 8176.E. 1999).

Kuvan 4.1 arvot ovat vain suuntaa-antavia, eikä niitä pidä käyttää suunnittelun perustana, vaan suositeltavaa on arvioida värähtelyn haitallisuus paikallisesti mittauksilla. Esimerkiksi pehmeillä savimailla pika- tai suurnopeusjunat voivat

saavuttaa kriittisen nopeuden, jolloin maaperässä etenevä leikkausaalto ja juna etenevät lähes samalla nopeudella. Tällöin syntyy ns. shokkiaalto, jolloin värähtely voimistuu, kuten kappaleessa 2.2 todettiin. Tällöin tarvittava suojaetäisyys on suurempi kuin kuvassa 4.1 on esitetty (Talja, 2004a).

Raideliikenteen aiheuttamaan värähtelyyn voidaan vaikuttaa kohtalaisen paljon huoltotoimenpiteillä, kuten kiskojen hiomisella ja pyörien pinnan tasaisuudesta huolehtimisella. Lisäksi kiskoatkokset tulee tehdä yhteen hitsaamalla. Suhteessa muihin toimenpiteisiin ylläpito on kohtuullisen edullinen ja tehokas tapa vähentää värähtelyhaittaa. Yleensä ylläpidosta ja jatkoksista on Suomessa huolehdittu riittävässä määrin (Välikylä, 2005). Yhdysvaltalaisen tutkimuksen mukaan huonokuntoisilla pyörillä ja raiteilla värähtelytaso voi olla 20 dB korkeampi kuin uudella tai hyvin hoidetulla kalustolla (FRA. 1998).

Paikallisesti voidaan värähtelyn aiheuttamaa tärinää vähentää myös ajonopeuksia laskemalla. Ajonopeuden lasku ei kuitenkaan yleensä ole liikennöitsijälle mieluinen vaihtoehto. Vaihtoehto voi kuitenkin olla mahdollinen, mikäli haitta on suuri ja tilanteeseen tarvitaan lopullista ratkaisua etsittäessä tilapäistä helpotusta, tai suurimman värähtelyn aiheuttavat yöaikaan raskaat tavarajunat. Yöaikaan nopeuden lasku ei välttämättä ole yhtä ongelmallista, koska liikennöinti muutenkin on vähäisempää. On esitetty, että ajonopeuden puolittaminen alentaisi värähtelyä 50 prosenttia (Massarsch, 2004). Tähän tulee kuitenkin suhtautua varauksella, sillä kuten kappaleessa 2.2 todettiin, on lähdeaineistoissa hieman ristiriitaista tietoa ajonopeuksien vaikutuksesta.

Liikennöintiin käytetyn kaluston jousituksen ja pyörien rakennetta muuttamalla voidaan myös pienentää maaperään kytkeytyvän värähtelyn suuruutta. Vaunun jousituksessa olennaisinta on mahdollisimman pieni jousittamaton massa, pehmeä ensisijainen jousitus (vrt. kuva 2.3) sekä liikkuvien osien vähäinen metalli vasten metallia kosketus. Kaluston kokonaan uusiminen on kuitenkin liian kallista ja lisäksi Suomessa liikennöi paljon huonokuntoista venäläistä vaunukalustoa (Välikylä, 2005), (FRA. 1998), (Bahrekazemi, 2004). Koska liikennöivään kalustoon ei yleensä voida vaikuttaa tai sen uusiminen on liian kallista, ei siihen ole tarkoituksenmukaista syventyä tämän enempää tässä työssä.

Mikäli rataa ollaan vasta suunnittelemassa, voidaan radan epäjatkuvuuskohtien, kuten esimerkiksi vaihteiden, sijoittelulla vaikuttaa paikallisesti värähtelyn voimakkuuteen. Sijoittelussa tulisi huomioida alueelle suunnitellut rakennukset ja niiden käyttötarkoitus sekä maaperätyypit. Mahdollisuuksien mukaan radan epäjatkuvuuskohdat tulisi sijoittaa värähtelyn kannalta edullisille maaperäalueille sekä mahdollisimman kauas asuinrakennuksista (Massarsch, 2004).

Jäykäksi tehty ratarakenne taipuu vähemmän ja kohdistaa junan painon laajemmalle alueelle. Näin ollen maaperään kohdistuva painaumasuppilo on pienempi ja siten myös maaperään kytkeytyvä värähtely on pienempää. Ratarakenteen jäykkyyttä voidaan kasvattaa joko muuttamalla perustamistapaa tai penkereen paksuutta.

Eri maissa on tehty tutkimuksia ratapenkereen korkeuden kasvattamisen vaikutuksesta maaperän värähtelyyn. Saksassa penkereen kasvattaminen 300:sta 750 millimetriin (2,5 kertainen) vaimensi värähtelyä 6 dB taajuusalueella 1...17 Hz. Ranskassa penkereen kasvattaminen 200:sta 800 millimetriin (4 kertainen) vaimensi värähtelyä jopa 20 dB. Hollantilaisessa tutkimuksessa todettiin, että värähtely säilyi ennallaan penkereen kasvaessa 250:stä 500 millimetriin (2 kertainen) (Levomäki, 1999). Yllä esitetyt tulokset ovat ristiriitaisia mutta yleisesti on oletettu, että penkereen kasvattamisella pystytään vaimentamaan värähtelyä, etenkin jos alkutilanteessa rata on maanpinnan tasolla (Välikylä, 2005).

Ratapenkereen kasvattaminen olemassa olevilla rataosuuksilla ei yleensä ole järkevää, koska saavutettu vaimennus ei välttämättä ole riittävän suuri ja korjaustyön aikana liikennöinti on rajoitettua tai kokonaan estynyt. Lisäksi Suomessa muun muassa routamitoituksesta johtuen ratapenger on yleensä jo suhteellisen korkea jolloin sen kasvattamisella ei saavuteta yhtä suurta vaikutusta (Levomäki, 1999).

Ratarakenteen jäykistäminen on suositeltavampaa tehdä radan perustamistapaa muuttamalla. Tällöin saavutettava vaimennus on suurempi ja toimintavarmuudesta on enemmän luotettavaa tietoa. Taulukossa 4.1 on esitetty eri toimenpiteillä saavutettavat tyypilliset vaimennukset sekä niiden kustannukset ratametria kohden. Kustannukset taulukossa ovat Norjan kruunuissa vuodelta 1995. Taulukosta nähdään kuitenkin miten paljon eri vaimennuskeinot maksavat suhteessa toisiinsa ja miten suuri vaimennusteho niillä saavutetaan.

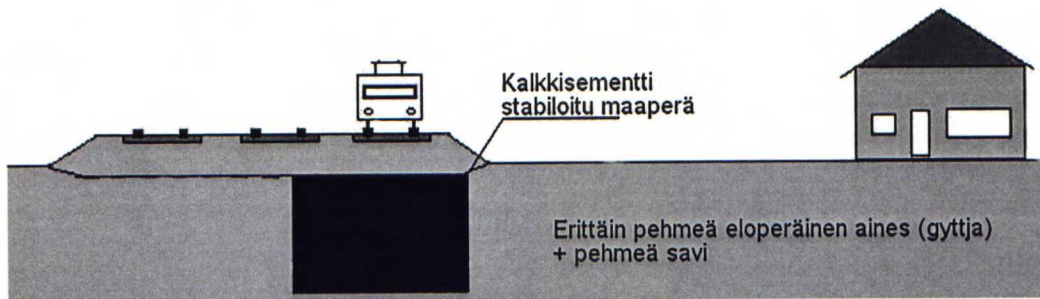
Taulukko 4.1. Eri vaimennusmenetelmillä saavutettava vaimentuminen sekä sen kustannukset (suuruusluokka arvio). Yleensä järkevänä minimitavoitteena on pidetty tärinän alentamista 40 %. Ratapenkereen kasvattamisella ei tähän päästä (Hakulinen, 1999).

vaimennusrakenne	värähtelyn vaimentuminen [%]	kustannus raidetta kohden [kr/m] ¹⁾
rata perustettu kalkki/sementtipilareille	50	2500
ratapenkereen kasvattaminen	30	2500
rata perustettu teräsbetonilaatalle	60...80	5000...10000
rata perustettu paalulaatalle	90	15000

1) kustannus on Norjan kruunuissa vuodelta 1995

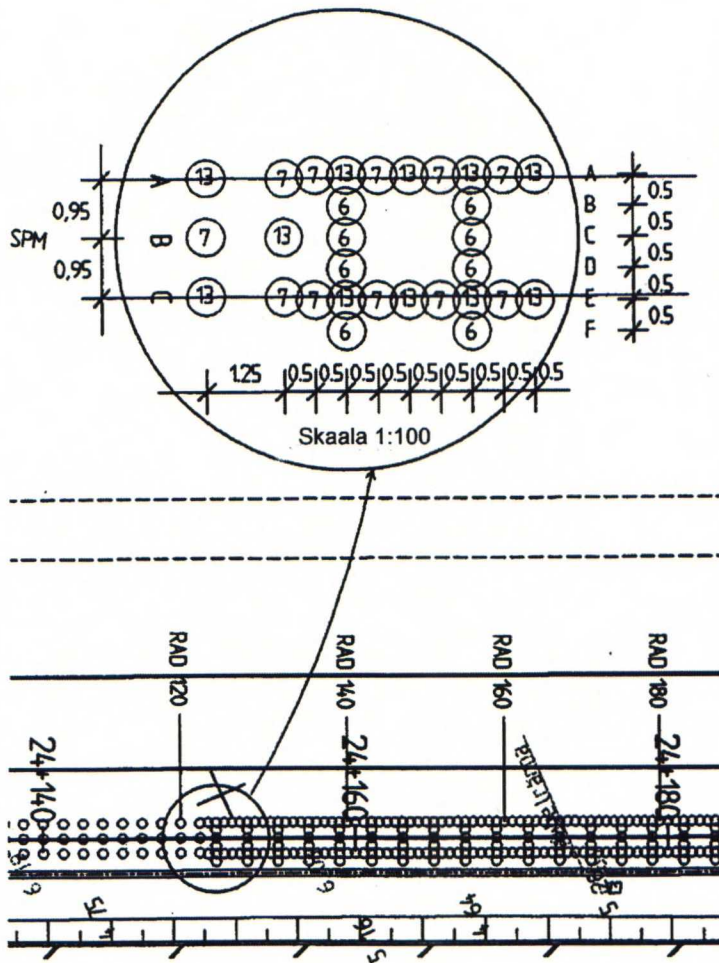
Koska yleensä minimitavoitteena pidetään värähtelyn vaimentamista 40 prosentilla, voidaan taulukon 4.1 arviosta havaita, että penkereen kasvattamisella ei tähän tavoitteeseen päästä. Sen sijaan radan perustaminen teräsbetonilaatalle tai paalulaatalle vaimentaa värähtelyä tehokkaasti. Yleisesti saavutettava vaimennusteho kasvaa kustannusten kasvaessa. Ainakin Ruotsissa betonilaattarakenteen ongelmana on, että se määritellään sillaksi ja siten sitä koskevat myös kaikki silloille asetetut määräykset (Levomäki, 1999), (Välikylä, 2005), (Hakulinen, 1999).

Ruotsissa Ledsgårdin alueella on suoritettu mittauksia ennen ja jälkeen vaimennusrakenteiden asentamista. Alueella kulkee kolme rataa läntinen: keskimmäinen, josta käytetään nimeä itäinen; asema rata, joka oikeasti on itäisin mutta sillä eivät suurnopeusjunat liikennöi. Läntisellä ja itäisellä radalla kulkevien suurnopeusjunien suurin sallittu nopeus on 200 km/h. Kuivan maanpinnan alla on erittäin pehmeä orgaanisista aineksista koostuva kerros (ruotsiksi gyttja), jonka alla on pehmeää savea. Erittäin pehmeä maakerros on oletettavasti perua rata-alueella aiemmin kulkeneesta joesta. Kyseisen kerroksen leikkausaallonnopeudeksi on mitattu 40 m/s (144 km/h) ja savikerroksen 60...90 m/s (216...324 km/h). Koska suurnopeusjuna etenee alueella leikkausaallon nopeudella, esiintyy maaperässä erittäin voimakasta värähtelyä jota on pyritty vaimentamaan perustamalla rata kalkkisementtipaalutuksen varaan. Paalutus tehtiin vain läntisen radan alle kuvan 4.2 mukaisesti, koska sillä liikennöinti aiheutti suurimmat haitat alueella (Holm et al. 2002), (Massarsch et al. 2002).



Kuva 4.2. Ruotsissa Ledsgårdissa toteutettu suurnopeusjunien vaimennusrakenne. Rata perustettiin kalkkisementtipaalujen varaan (Holm et al. 2002).

Kuvan 4.2 mukaisella kalkkisementtipaalutuksella saadaan raideliikenteen maaperään aiheuttamia muodonmuutoksia pienennettyä. Maaperän ja ratarakenteen jäykkyys nousee, jolloin painaumasuppilo maaperässä on pienempi ja siten myös värähtely. Rakenteella saavutetaan toinenkin etu. Koska rakenne kasvattaa maaperän jäykkyyttä, nousee kriittinen nopeus, jolloin junat eivät enää aiheuta shokkiaaltoja. Kuvassa 4.3 on esitetty miten paalujen sijoittelu toteutettiin asutusalueella ja suurnopeusalueella. Suurnopeusalueella paalut muodostavat ristikon ja asutusalueella kolme riviä (Holm et al. 2002).



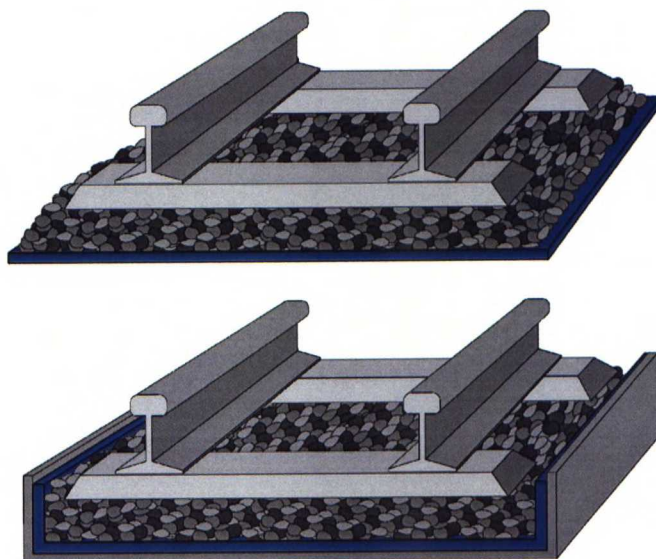
Kuva 4.3. Paalujen sijoittelu asutusalueella (vasen reuna) ja suurnopeusalueella (oikea reuna). Suurennetussa kuvassa paalut on merkitty ympyröillä, joiden sisällä oleva luku on paalun pituus metreinä (Holm et al. 2002).

Kuten kuvasta 4.3 havaitaan, käytettiin kolmea eri paalupituutta 6, 7 ja 13 metriä. Paalujen halkaisija oli 600 mm ja asutusalueella ne täyttivät alasta 21 prosenttia sekä suurnopeusalueella 54 prosenttia. Ennen ja jälkeen vaimennustoimenpiteitä suoritettiin mittauksia, joiden perusteella havaittiin, että alhaisilla nopeuksilla radan perustuksen poikkeamat pienivät noin viidesosaan ja suurilla nopeuksilla (200 km/h) noin viidestoistaosaan. Vaikutus oli voimakkaampi suurilla nopeuksilla, koska junat eivät enää saavuttaneet kriittistä nopeutta (Holm et al. 2002).

Radan välittömässä läheisyydessä vaimennus oli selvästi havaittavissa, mutta kauempana radasta vaikutuksen suuruus ei välttämättä ole yhtä suuri. Mittauksia suoritettiin vain 35 metrin etäisyyteen asti ja tuloksissa havaittiin, että kyseisellä etäisyydellä poikkeama pieneni vain noin viidenneksen. Varmaa tietoa ei siis ole tätä suuremmilta etäisyyksiltä. Lisäksi havaittiin, että vaikka itäisen radan perustus säilyi ennallaan, vaimensi paalutus myös tällä liikennöivien junien värähtelyitä heti paalutuksen takana. Paalutus toimi siis eräänlaisena värähtelyä estävänä aitarakenteena, josta enemmän seuraavassa kappaleessa. Etäisyyden paalutuksesta kasvaessa vaimennusteho itäisen radan osalta kuitenkin pieneni. Kalkkisementti-

paalutuksen huono puoli on, että se ei sovellu happamalle maaperälle, ja että paalutuksen alkamiskohdassa värähtely voi voimistua maaperän jäykkyyden äkillisesti muuttuessa (Holm et al. 2002), (Bahrekazemi, 2004), (Välikylä, 2005).

Värähtelyä voidaan kohteessa vaimentaa myös pyrkimällä katkaisemaan värähtelyn eteneminen. Ensimmäinen tapa on asentaa elastinen matto pölkkyjen ja penkereen alle kuvan 4.4 mukaisesti.



Kuva 4.4. Vaimennusmaton asentaminen pölkkyjen ja penkereen alle. Vaimennusmatoilla ei voida vaimentaa matalia taajuuksia, sillä niiden ominaistaajuus on alimmillaan noin 10...15 Hz (Getzner Werkstoffe GmbH. 2006a).

Rakenteen ongelmana on, että vaimennusmattojen ominaistaajuus on alimmillaankin noin 10...15 Hz. Tällöin siis ominaistaajuutta alempi taajuiset värähtelyt, jotka ovat yleisesti pehmeillä maaperillä ongelma, eivät vaimene. Lisäksi ominaistaajuudella värähtely voimistuu, jolloin vaimennusmatosta saatava hyöty alkaa vähintäänkin olla kyseenalainen pehmeillä maaperillä. Sen sijaan luolassa etenevien junien, jotka aiheuttavat asuntoon runkoääntä kappaleessa 3.2 kuvatulla tavalla, aiheuttamaa haittaa voidaan pienentää vaimennusmatoilla. Asennuksen onnistumisen kannalta on suositeltavaa, että vaimennusmatot asennetaan kovalle pinnalle, kuten asfaltille tai betonille. Tämä onnistuu helposti esimerkiksi kallioon louhitun tunnelin tapauksessa. Vaimennusmatto koostuu pintakerroksesta, joka jakaa kuormitusta laajemmalle alalle, sekä joustavasta aluskerroksesta (Välikylä, 2005), (Getzner Werkstoffe GmbH. 2006a), (Massarsch et al. 2002).

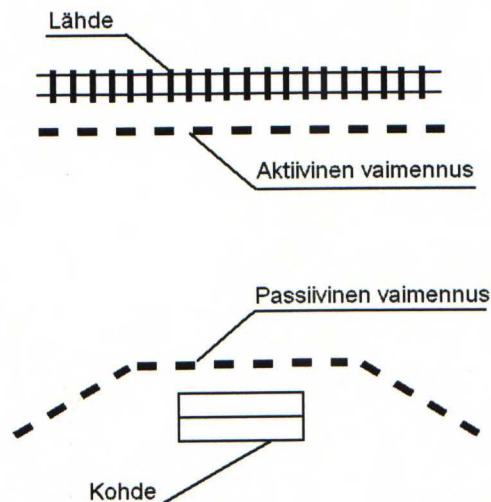
Toinen tapa katkaista värähtelyn eteneminen on asentaa rata kelluvan betonilaatan päälle. Tällöin ratarakenne erotetaan alustastaan betonilaatan ja alustan väliin asennettavalla erotuskaistalla. Erotuskaista voidaan toteuttaa joko teräsjousilla tai esimerkiksi samanlaisella Sylomer- tai Sylodyn-kerroksella kuin edellä kuvattu vaimennusmatto. Rakenteen erona on, että erotuskaistan ja ratarakenteen väliin lisätään betonilaatta, jonka ansiosta kuormitus jakautuu tasaisesti laajalle alueelle ja rakenne toimii puhtaasi kappaleessa 2.3 kuvatun jousi-massajärjestelmän tavoin. Kyseisellä rakenteella on saavutettu jopa noin 6 Hz ominaistaajuuksia. Tämäkään ei

kuitenkaan ole riittävä, koska useissa mittauksissa on Suomessa pehmeillä maaperillä havaittu raideliikenteen herättävän maaperässä taajuuksia aina alas 3 Hz asti (Getzner Werkstoffe GmbH. 2006b), (Välikylä, 2005).

Kelluvien laattarakenteiden ongelmana on, että ominaistajuuden saaminen alhaiseksi edellyttää raskasta rakennetta ja verrattuna muihin vaimennuskeinoihin ne ovat yleensä miltei kalleimpia (Massarsch et al. 2002).

4.2 Vaimennuskeinot väliaineessa

Maaperässä etenevän värähtelyn vaimennukseen on toistaiseksi vain värähtelyn etenemisen katkaisemiseen perustuvia vaimennusrakenteita. Värähtelyn eteneminen maaperässä katkeaa tai vähenee merkittävästi, kun maan impedanssissa tapahtuu äkillinen suuri muutos. Käytännössä tämä tarkoittaa ojaa, joka voi olla joko avoin tai täytetty. Toiminnaltaan rakenne vastaa ilmaäänän torjunnassa käytettävää meluestettä. Täytetty oja voidaan toteuttaa täyttämällä kaivanto esimerkiksi betonilla tai vaihtoehtoisesti paaluttamalla maaperä varsin tiheään. Jälkimmäistä rakennetta kutsutaan myös tärinäaidaksi ja toiminnaltaan se vastaa täytettyä ojaa (Välikylä, 2005), (Massarsch et al. 2002).



Kuva 4.5. Passiivinen sekä aktiivinen värähtelyn vaimentaminen. Aktiivisessa vaimennuksessa eristävä rakenne sijoitetaan lähelle lähdettä ja passiivisessa lähelle kohdetta (Massarsch et al. 2002).

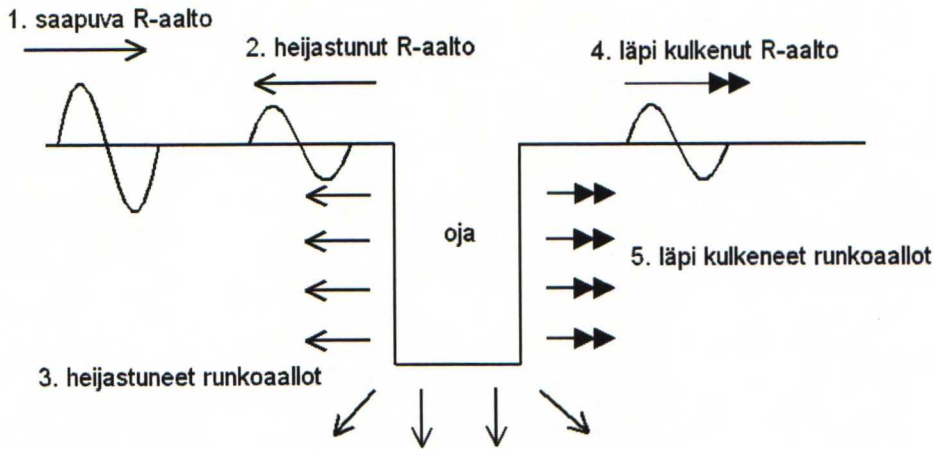
Sen lisäksi onko oja avoin tai täytetty voidaan ne jakaa myös sijoituksen perusteella kahteen eri luokkaan. Lähelle värähtelylähdettä sijoitettua estettä kutsutaan aktiiviseksi ja lähelle vastaanottajaa tai suojattavaa kohdetta sijoitettua kutsutaan passiiviseksi esteeksi (vrt. kuva 4.5). Esteen dimensiot riippuvat pääasiassa estettävän värähtelyn ominaisuuksista. Yleisesti ojien ongelmana on, että niiden tulee olla syviä toimiakseen tehokkaasti. Nyrkkisääntönä voidaan todeta, että esteen syvyyden tulee vastata torjuttavan taajuuden aallonpituutta maaperässä. Esteen etuna muihin värähtelyn vaimennuskeinoihin nähden on, että se on helpoin tehdä jo rakennettujen ratojen ja rakennusten väliin. Se ei vaadi muutoksia rakennuksessa eikä häiritse liikennöintiä radalla. Yleensä on suositeltavaa pyrkiä sijoittamaan este lähellä värähtelylähdettä eli aktiiviseen vaimennukseen. Mikäli este sijoitetaan

rakennuksen läheisyyteen eli pyritään passiiviseen vaimennukseen, voi olla tarpeen, että este jatkuu myös rakennuksen sivuille (Bahrekazemi, 2004), (Massarsch et al. 2002).

Kappaleissa 1.3 ja 1.4 esitettiin, että R-aallot ovat haitallisin värähtelymuoto, koska rautatieliikenteen maaperään aiheuttamasta värähtelystä suurin osa etenee maaperän pintakerroksissa R-aaltona. R-aaltojen energiasta taas 98 prosenttia todettiin etenevän enintään sen aallonpituutta vastaavalla syvyydellä maanpinnasta. R-aaltojen edetessä pinta-aaltona on myös niiden teoreettinen vaimentuminen vähäisempää etäisyyden funktiona. Näistä syistä johtuen riippuvat värähtelyä vaaditut dimensiot lähinnä R-aallon aallonpituudesta. Usein värähtelyä aiheuttavien lähteiden yhteydessä ei lähdeaineistossa puhuta värähtelyä aiheuttavien lähteiden absoluuttisina metriarvoina vaan värähtelyä aiheuttavien lähteiden dimensiot ilmoitetaan suhteessa R-aallon aallonpituuteen. Tämän katsotaan olevan hyödyllisempi tapa, koska tällöin tulokset ovat vertailukelpoisia eri maalajien ja kohteiden välillä. Maaperässä etenevän värähtelyn aallonpituus riippuu taajuuden lisäksi maalajista leikkausaallon nopeuden kautta.

Mikäli kohde on jo rakennettu, on suositeltavaa mitata rakennuksesta värähtelyt ja mitattujen voimakkaimpien taajuuksien perusteella määrittää alin taajuus, jota vaimennusrakenteella pyritään estämään. Tämän lisäksi tulee määrittää seismisiä mittauksia käyttäen leikkausaallon etenemisnopeus maaperässä kyseisellä taajuudella, jotta saadaan selville häiritsevän taajuuden aallonpituus. Vasta tämän jälkeen voidaan määrittää tarvittavan esteen dimensioita (Massarsch, 2004). Maaperän dynaamisten ominaisuuksien, kuten kimmo- ja leikkausmoduulin, Poisson-luvun ja leikkausnopeuden välisiä riippuvuuksia käsiteltiin kappaleessa 2.2.

Ensimmäisiä käytännön värähtelyesteitä tehtiin jo 1960-luvulla. Avoimia ojia sijoitettiin erittäin lähelle värähtelylähdettä, jolloin runkooalto dominoi, sekä kauemmas, jolloin R-aalto puolestaan dominoi. Tulosten perusteella annettiin suunnitteluohjeita, joiden avulla arvioitiin saavutettavan noin 75 prosentin vaimennus värähtelyn amplitudissa. Koska ojien testaaminen todellisissa dimensioissa käytännössä on varsin työlästä sekä kallista ja pienemmissä mitoissa tehtyjen testien laajentaminen käytäntöön on vaikeaa, on vaimennuskeinojen vaikutuksia pyritty mallintamaan laskennallisesti. 1970-luvulla ensimmäiset laskennalliset mallit tehtiin joko FDM-laskentaa (finite difference method) tai FEM-laskentaa (finite element method) hyödyntämällä. 1980-luvulla siirryttiin käyttämään BEM-laskentaa (boundary element method), jonka etuna on, että se sisältää vähemmän tuntemattomia muuttujia kuin kaksi aiemmin mainittua (Ahmad ja Al-Hussaini, 1991), (Al-Hussaini ja Ahmad, 1991).



Kuva 4.6. Ojan toiminnallinen periaatekuva. Oja voi olla avoin tai täytetty. Toiminnallinen ero on, että avoin oja ei kykene välittämään läpikulkeneita aaltoja 4. ja 5. (Ahmad ja Al-Hussaini, 1991).

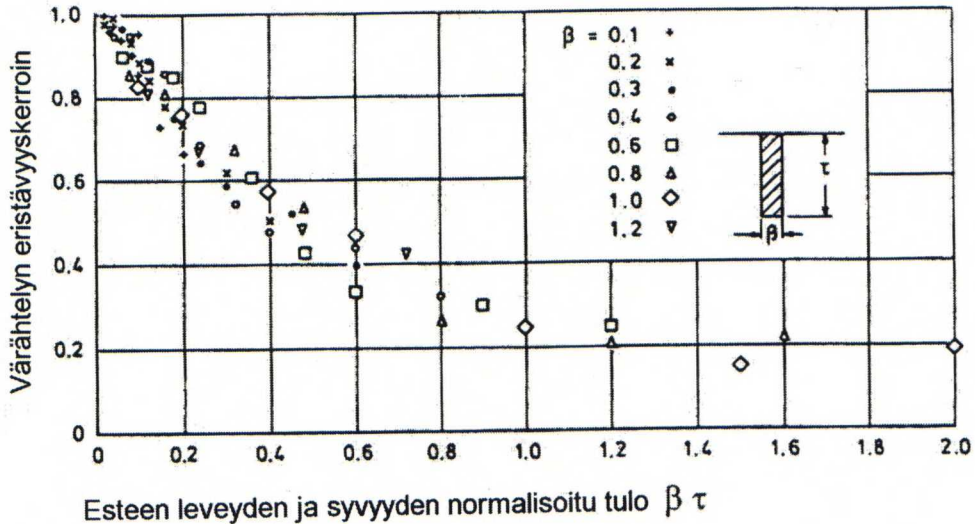
Kuvassa 4.6 on esitetty ojan toiminnallinen periaate R-aallon kohdatessa joko avoin tai täytetty oja. R-aallon kohtaamisessa energia jakautuu heijastuneisiin R-aaltoon 2 ja runkooaltoihin 3 sekä läpikulkeneisiin R-aaltoon 4 ja runkooaltoihin 5. Runkooallot ovat P- ja S-aaltoja, jotka syntyvät R-aallon heijastuessa ja taittuessa rajapinnassa. Ojan takana havaittavat värähtelyt muodostuvat läpi kulkeneista R-aallosta ja runkooalloista. Ojan toiminnallisuuden kannalta oleellista on siis miten paljon sen taakse kulkeutuu näitä aaltoja. Avoimen ja täytetyn ojan toiminnallinen ero on, että avoin oja estää näitä aaltoja tehokkaammin ja on siten tehokkaampi värähtelyn vaimennuksessa. Avoimen ojan tapauksessa heijastuneet R-aalto ja runkooallot sisältävät siten myös enemmän energiaa kuin täytetyn ojan tapauksessa (Ahmad ja Al-Hussaini, 1991).

Koska avoin oja estää tehokkaammin läpi kulkevat aallot, ei sen leveydellä ole havaittu olevan suurta merkitystä, kunhan sen syvyys on vähintään 0,8 kertainen R-aallon aallonpituuteen nähden. Täytetyillä ojilla riittävään vaimennuksen saavuttaminen edellyttää yleensä 1,5 kertaa syvempää ojaa, eli ojan syvyyden tulisi olla 1,2 kertainen R-aallon aallonpituuteen nähden. Täyteaineen leikkausmoduuli ja tiheys suhteessa ympäröivän maaperän vastaaviin ominaisuuksiin vaikuttavat täytetyn ojan tehokkuuteen (Ahmad ja Al-Hussaini, 1991), (Bahrekazemi, 2004).

Täytetyillä ojilla syvyyden lisäksi myös ojan leveydellä on havaittu olevan olennainen vaikutus esteellä saavutettavaan tehokkuuteen. Kuvassa 4.7 on esitetty täytetyllä ojalla saavutettava värähtelyn eristävyyskertoimen riippuvuus ojan dimensioista. Vaaka-akselilla on ojan leveyden ja syvyyden tulo normalisoituna R-aallon aallonpituuden neliön suhteen. Normalisointi on tehty siis kaavalla

$$(4.1) \quad \beta\tau = \frac{BT}{\lambda_R^2},$$

jossa B on ojan leveys, T on syvyys ja λ_R on R-aallon aallonpituus (Massarsch, 2004).



Kuva 4.7. Täytetyn ojan leveyden ja syvyyden vaikutus saavutettavaan vaimennukseen. Laskennassa on oletettu oja betonilla täytetyksi (Ahmad ja Al-Hussaini, 1991).

Kuvasta 4.7 havaitaan, että saavutettava vaimennus täytetyllä ojalla riippuu vahvasti leikkauksen pinta-alasta. Esimerkiksi normalisoidun leveyden ollessa 0,8 saavutetaan miltei sama eristävyyskerroin arvoilla $\beta\tau=0,8$ ja $\beta\tau=1,6$ eli syvyyden kaksinkertaistaminen tässä tapauksessa ei tuonut juurikaan hyötyä.

Kerrostuneilla maaperillä alemmalla kerroksella ei ole vaikutusta, mikäli alemman kerroksen lujuus on pienempi kuin ylemmän kerroksen. Jos alempi kerros kuitenkin on lujempi kuin ylempi, vähentää se ojan tehokkuutta. Tämä pätee sekä täytetyille että avoimille ojalle. Tällöin arvioidaan, että ojan syvyyden tulisi olla jopa kaksinkertainen R-aallon aallonpituuteen nähden, jotta saavutettava amplitudin vähennyssuhde olisi 0,2 tai vähemmän. Esimerkiksi Suomessa on mitattu raideliikenteen herättävän 3 Hz taajuuksia pehmeillä savimailla. Kyseiselle maaperälle voidaan arvioida taulukon 1.3 perusteella etenemisnopeudeksi 80 m/s, jolloin maaperässä etenevän R-aallon aallonpituus on noin 27 metriä. Tarvittavan ojan syvyydeksi tulisi tässä pahimmassa mahdollisessa tapauksessa jopa yli 50 metriä, joka ei enää ole käytännön syistä järkevää (Ahmad ja Al-Hussaini, 1991), (Levomäki, 1999), (Välikylä, 2005).

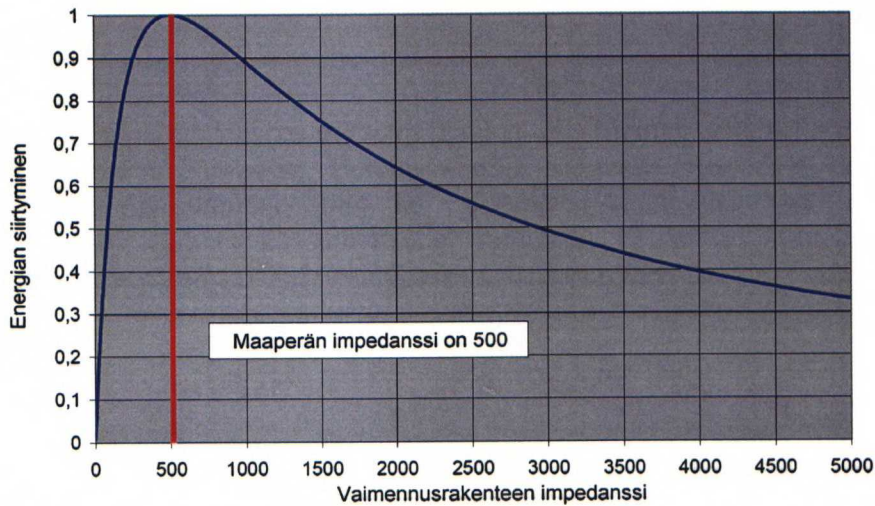
Verrattaessa vaimennusta suhteessa vertikaali ja horisontaalivärähtelyyn on havaittu, että samankokoinen este vaimentaa tehokkaammin vertikaali- kuin horisontaalivärähtelyä. Mahdollinen selitys tälle on, että vertikaalivärähtelyn tapauksessa partikkeiden liike täytetyssä ojassa siirtää tehokkaasti energiaa syvälle ympäröivään puoliavaruuteen eli maaperään. Horisontaalivärähtelyn tapauksessa puolestaan partikkeiden liike esteessä siirtää tehokkaammin värähtelyä esteen toiselle puolelle eli eri puolelle kuin värähtelylähde. Tämä on helpompi ymmärtää, jos ajatellaan esimerkiksi nestetäyteistä ojaa. Tällöin vertikaalinen värähtely vaimenee tehokkaammin, koska neste välittää huonosti leikkausvoimia. Sen sijaan horisontaalinen värähtely etenee puristusaaltoina tehokkaasti myös nesteessä (Al-Hussaini ja Ahmad, 1991), (Massarsch, 2004).

Kuten jo edellisessä kappaleessa mainittiin Ledsgårdin tapauksen yhteydessä, on värähtelyä mahdollista vaimentaa myös aitarakenteilla. Aitarakenne vastaa täytettyä ojaa sillä erotuksella, että aita ei ole yhtenäinen täytetyn ojan tapaan. Aitarakenne voidaan toteuttaa esimerkiksi paaluttamalla tietyin välimatkoin maaperä betonipaaluilla. Tällöin rakenne myös fyysisesti muistuttaa aitaa. Värähtelyn vaimentaminen aitarakenteella ei häiritse liikennöintiä radalla. Taulukossa 4.2 on esitetty kyseisellä rakenteella saavutettava vaimennus sekä sen kustannukset ratametriä kohden. Kustannukset taulukossa ovat Norjan kruunuissa vuodelta 1995. Taulukosta nähdään kuitenkin miten paljon eri vaimennuskeinot maksavat suhteessa toisiinsa ja miten suuri vaimennusteho niillä saavutetaan. Taulukon 4.2 arvot ovat suoraan verrattavissa edellisessä kappaleessa esitetyn taulukon 4.1 arvoihin (Hakulinen, 1999).

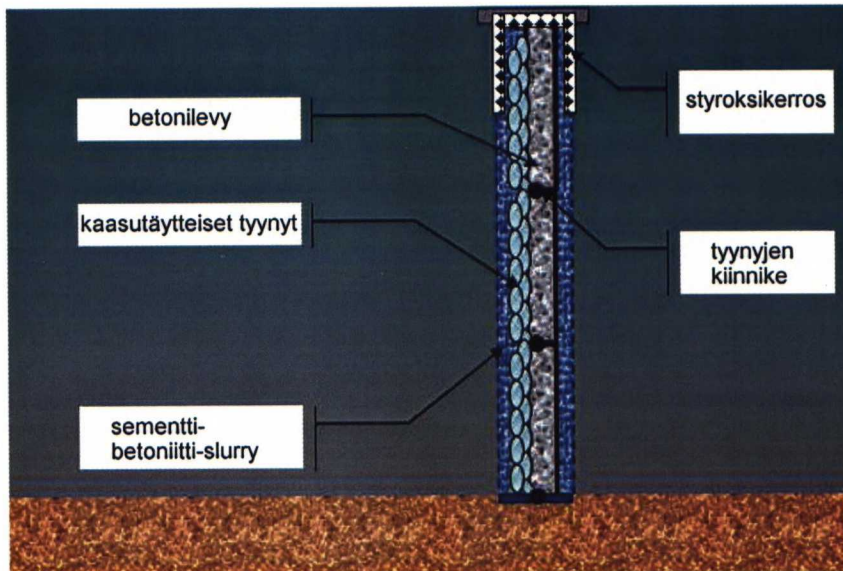
Taulukko 4.2. Eri vaimennusmenetelmillä saavutettava vaimentuminen sekä kustannukset (suuruusluokka arvio). Arvot ovat suoraan verrannollisia taulukon 4.1 arvoihin (Hakulinen, 1999).

vaimennusrakenne	värähtelyn vaimentuminen [%]	kustannus raidetta kohden [kr/m]¹⁾
kalkki/sementtipilari lokerikkoseinät	40	8000
kuplaseinä ²⁾ radan vieressä	50	?
1) kustannus on Norjan kruunuissa vuodelta 1995		
2) esitelin seuraavalla sivulla		

Avoin oja on parempi värähtelyn vaimennuksen kannalta kuin täytetty oja, mutta vaikeampi toteuttaa käytännössä. Käytännön ongelmia ovat muun muassa reunojen riittävä tukeminen, maan valuminen, maan painuminen jossain muualla ja ojan täytyminen vedellä. Edellä mainituista syistä johtuen on kehitelty erilaisia avoimen ja täytetyn ojan välimuotoja. Tällöin pyrkimyksenä on siis rakentaa oja, joka on täytetty materiaalilla, joka vastaisi mahdollisimman paljon ilmaa eli omaisi mahdollisimman pienen impedanssin. Ensimmäiset kokeilut tehtiin kevyillä materiaaleilla, kuten esimerkiksi styroksilevyillä. Ongelmaksi muodostui, että maaperään asennettuina niihin kohdistuu vaakasuuntainen paine, jonka seurauksena niiden dynaamiset ominaisuudet muuttuivat. Paineen kasvaessa nousivat materiaalin tiheys sekä jäykkyys. Kuten kappaleessa 2.2 todettiin, jäykkyyden noustessa nousee myös kyseisessä materiaalissa etenevän leikkausaallon nopeus, joka puolestaan kasvattaa materiaalin impedanssia. Tällöin ympäröivän aineen eli maaperän ja vaimennusmateriaalin impedanssit lähenevät toisiaan, jolloin vaimennuskyky heikkenee. Tästä syystä on pyritty kehittämään ojantäyttömateriaali, jolla on mahdollisimman pieni impedanssi, ja joka säilyttäisi dynaamiset ominaisuutensa myös maaperään asennettuna. (Välikylä, 2005), (Massarsch, 2004), (Massarsch, 2005). Kuvassa 4.8 on esitetty täytetyn ojan vaimennusmateriaalin ja maaperän impedanssin vaikutus energian siirtymiseen. Avointa ojaa voidaan verrata tilanteeseen, jossa vaimennusrakenteen impedanssi on erittäin pieni.



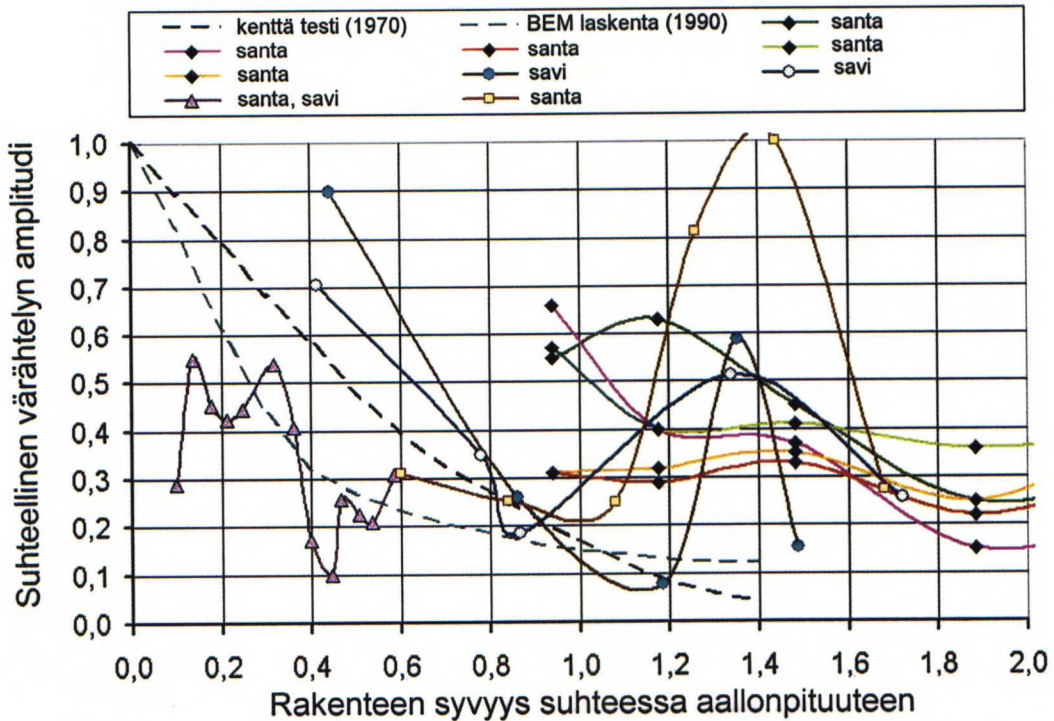
Kuva 4.8. Täytetyn ojan impedanssin vaikutus energiaan siirtymiseen. Kuvasta voidaan havaita, että mikäli maaperän impedanssi on sama kuin vaimennusmateriaalin, etenee värähtely vaimentumatta esteen toiselle puolelle (Massarsch, 2005).



Kuva 4.9. Kaasutäytteisiin tyynyihin perustuvan täytetyn ojan rakenne. Pintakerros toimii lämpö- ja värähtelyeristeenä. Vaimennuskyky perustuu kaasutyynyjen pieneen impedanssiin (Massarsch, 2004).

Ruotsissa on jo 20 vuotta sitten kehitetty ensimmäiset versiot maahan asennettavista kaasutäytteisistä rakenteista, joissa on pyritty yhdistämään alhainen impedanssi sekä kestävyys käytössä. Nykyisin käytössä olevat rakenteet muodostuvat peräkkäisistä kaasutäytteisistä tyynyistä, jotka muodostavat pystysuunnassa ketjun. Jotta rakenne olisi vaakaleikkaukseltaan yhtenäinen, muodostuu se kahdesta lomittain asennetusta tyynyketjusta. Tyynyt kiinnitetään betonilevyyn, jonka tarkoituksena on ottaa vastaan vaakasuuntainen kuormitus. Lisäksi betonilevy aiheuttaa ylimääräisen impedanssimuunnoksen eli kasvattaa rakenteen vaimennuskykyä. Betonilevyyn kiinnitetyt tyynyt lasketaan maaperään sementti-betoniitti-slurryyn, joka suojaa rakennetta mekaanisesti sekä kemiallisesti (Massarsch, 2004). Kuvassa 4.9 on esitetty edellä kuvattu rakenne.

Edellä kuvattuun periaatteeseen perustuvia rakenteita hieman erilaisella toteutuksella on käytetty ainakin Ruotsissa, Belgiassa sekä Saksassa. Ruotsissa ensimmäinen projekti toteutettiin vuonna 1984 ja vaimennusrakenne on yhä toiminnassa. Kuvassa 4.10 on esitetty kaasutäytteisen seinämän 12:ssa eri kohteessa mitatut vaimennukset rakenteen syvyyden suhteessa aallonpituuteen.



Kuva 4.10. Kaasutäytteisillä seinämällä saavutetut amplitudin vaimennussuhteet eri kohteissa. Vertailun vuoksi mukana on vuonna 1970 tehdyn betoniitti-slurry täytteisen ojan testaustulos sekä BEM-laskennalla vuonna 1990 saadut teoreettiset tulokset (Massarsch, 2004).

Kuvasta 4.10 voidaan havaita, että eri kohteissa saatujen tulosten välillä on eroa, mutta mikäli seinämän syvyys vastaa aallonpituutta, voidaan odottaa vaimennusta väliltä 50...80 prosenttia. Kaikki kuvan kaasutäytteisten seinämien tulokset ovat peräisin todellisista täysimittaisista kenttäsovelluksista ja siten tuloksissa on mukana kaikki lopputulokseen vaikuttavat tekijät, kuten aaltojen taipuminen ja vaimennusrakenteen rajallinen koko verrattuna lähteen (rautatien) pituuteen. Kaasutäytteisillä seinämällä on suositeltavaa käyttää rakenteita, jotka ovat vähintään R-aallon aallonpituuden syvyisiä (Massarsch, 2004), (Massarsch, 2005).

Suunniteltaessa vaimennusratkaisuja on suositeltavaa ensin selvittää mittauksin maaperässä vaikuttavat vaimennettavat taajuudet. Vasta tämän jälkeen voidaan suunnitella vaimennusratkaisuja. Myöskään edellä kuvattujen kuvan 4.10 kaltaisten mittaustulosten perusteella ei ole suositeltavaa valita vaimennusrakenteen dimensioita tai muita ominaisuuksia. Ratkaisut tulisi aina perustaa taajuustason

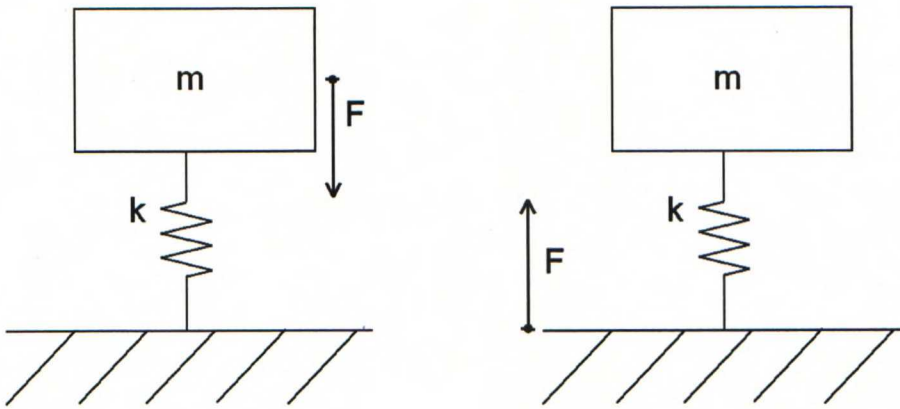
tarkasteluihin vertaamalla vaimennettavia taajuuksia tietyn vaimennusratkaisun taajuuskaistaisiin vaimennuksiin. Muutoin on olemassa riski, että vaikka vaimennusratkaisu olisi osoittautunut toimivaksi tietyissä tilanteissa, ei sen avulla välttämättä päästä samoihin tuloksiin, mikäli vaimennettavat taajuudet ovat eri alueella. Valitettavasti eri ratkaisuista ja niiden taajuuskaistaisista vaimennusarvoista ei juuri ole olemassa luotettavaa tietoa (Massarsch, 2005).

Suomessa ei juuri ole tehty vaimennusrakenteita maaperään, vaikka nopeusrajoituksiin johtaneita ongelmallisia rataosuuksia oli vuoden 2006 elokuussa 12 kappaletta. Koriolla on kuitenkin vuoden 2006 aikana tehty kaksi 400 metriä pitkää syvästabilointiseinämää, mutta niistä ei vielä ole saatavilla mittaustuloksia. Toinen seinämistä on toteutettu pilareilla, joiden pituus on 15 metriä, ja toisen 21 metriä. Koriolla värinäongelma on johtanut 30 km/h nopeusrajoitukseen. Lisäksi Ratahallintokeskus saattaa aloittaa toisenkin värinäivaimennuskohteen lähiaikoina. Toijala-Turku-välille on suunniteltu kokeiltavan vaimennusrakenteena teräsponttiseinää (Rakennuslehti, 17.8.2006).

4.3 Vaimennuskeinot kohteessa

Kappaleessa 2.3 käsiteltiin värähtelyn etenemistä rakennuksissa ja todettiin, että erityisesti välipohjan ominaistajuus vaikuttaa asunnossa asukkaan kokemaan värähtelyyn. Välipohja vaikuttaa olennaisesti, koska asukas on suorassa yhteydessä siihen ja siten aistii sen värähtelyn tehokkaimmin. Lisäksi välipohjarakenteella on useita ominaistajuuksia, joista matalinta pidetään yleisesti haitallisimpana. Koska myös matalinta ominaistajuutta ylemmillä taajuuksilla voi olla ominaismuotoja, jotka voivat vahvistaa välipohjaan kytkeytynyttä herätettä, on suositeltavaa, että välipohjarakenteen alin ominaismuoto on korkeampi kuin siihen kytkeytyvän värähtelyn voimakkain komponentti. Alinta ominaismuotoa matalammilla taajuuksilla värähtely ei vahvistu, toisin kuin saattaa käydä sitä korkeammilla taajuuksilla. Välipohjarakenteen ominaistajuuden mitoittaminen siihen kytkeytyvän värähtelyn perusteella ei ole varsinainen vaimennuskeino, mutta mitoituksella voidaan huolehtia, että värähtely ei kyseisessä rakenteessa voimistu. Samalla tavalla voidaan mitoittaa myös muut rakenteet, kuten esimerkiksi runko ja väliseinät (Talja, 2004c), (Talja, 2004b).

Rakennuksen kallistelu on voimakkaimmillaan, kun maaperän pintakerroksessa etenevän R-aallon aallonpituus on suuri verrattuna rakennuksen perustuksen mittasuhteisiin. Kallistelua voidaan vähentää suunnittelemalla rakennuksen perustuksen mittasuhteet oikein kohteessa esiintyvän värähtelyn perusteella tai perustamalla rakennus paalujen varaan. Rakennus voidaan myös toteuttaa värinäeristimien varaan, jolloin periaate on sama kuin värähtelylähteen erottamisessa maaperästä. Erotuksena on, että rakennusten värinäeristyksessä heräte pyrkii kytkeytymään alustan kautta massaan, kun taas radan tapauksessa heräte pyrkii kytkeytymään massan kautta alustaan. Ero on esitetty yksinkertaistettujen periaatekuvien avulla kuvassa 4.11 (Talja, 2004c), (Välikylä, 2005).



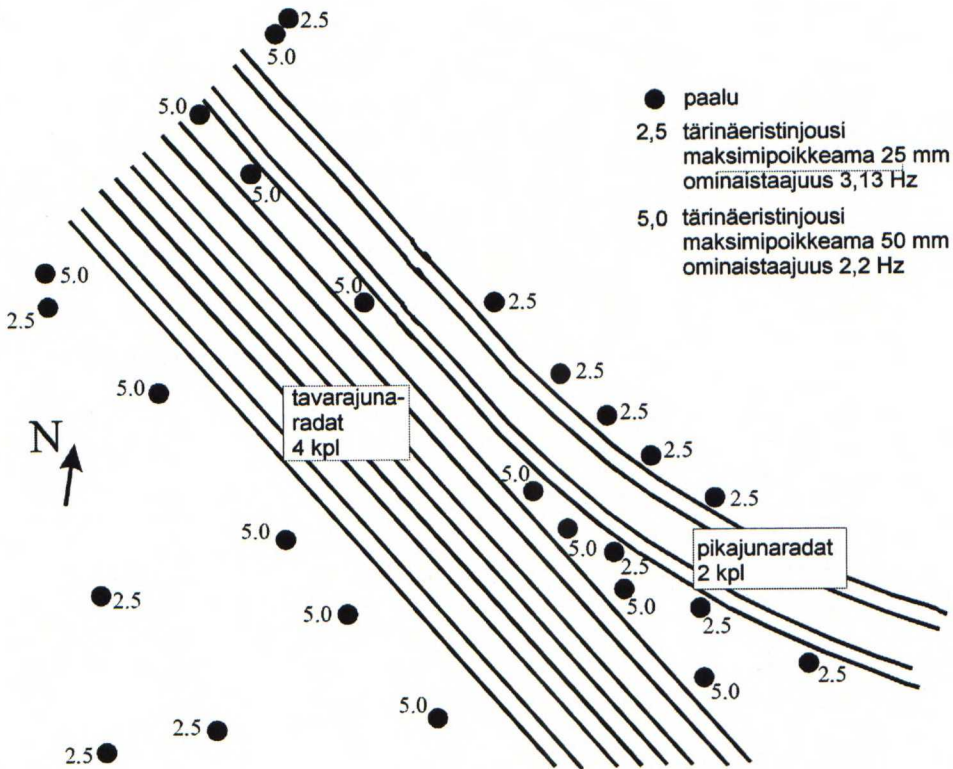
Kuva 4.11. Yksinkertaistetut periaatekuvat junan värinäeristämisestä maaperästä vasemmalla sekä rakennuksen värinäeristämisestä maaperästä. Yksinkertaiset jousi-massasysteemit eroavat vain voiman kytkeytymispisteen suhteen toisistaan.

Olemassa olevien kokonaisten rakennusten värinäeristäminen on erittäin kallista ja vaikeaa. Mikäli rakennus halutaan asentaa värinäeristinten varaan, tulee siihen varautua jo hyvissä ajoin suunnitteluvaiheessa. Tällöin pitäisi myös suorittaa värinämittaukset suunnittelun tueksi, mikäli se on mahdollista. Esimerkiksi suunnittelun mutta vielä toteuttamattoman rautatien tapauksessa mittauksia ei voida suorittaa kyseisellä paikalla. Tällöin mittaukset tulisi suorittaa jossakin olosuhteiltaan vastaavalla paikalla.

Rakennusten värinäeristäminen tehdään yleensä käyttämällä värinäeristysmattoja tai -jousia. On myös mahdollista käyttää näiden yhdistelmiä. Värinäeristimet vaativat toimiakseen lujan alusta, joten värinäeristimet kannattaa asentaa esimerkiksi paalutuksen ja rakennuksen väliin. Suomessa ei toistaiseksi ole yhtään rakennusta asennettu värinäeristinjousien varaan, mutta tällä hetkellä on suunniteltu aloitettavaksi pilottiprojekti asian tiimoilta. Projektin toteutumisesta ei toistaiseksi ole kuitenkaan varmuutta (Välikylä, 2005), (SRakMK, B3. 2004).

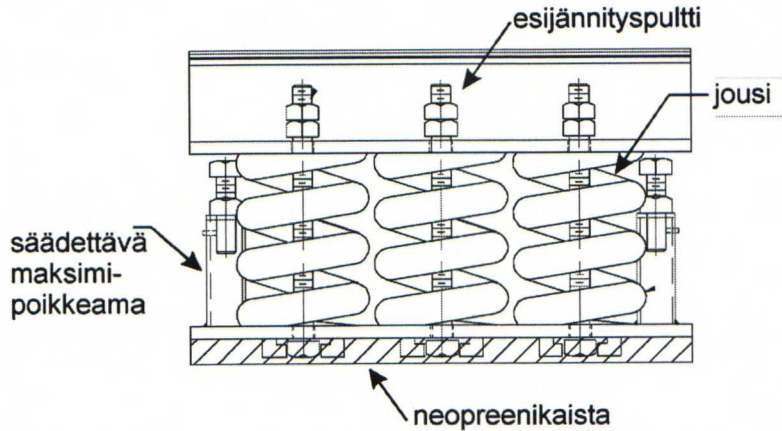
Ulkomailla on toteutettu useita kohteita värinäeristinjousien varaan. Rautatieliikenteen aiheuttaman värähtelyn tapauksessa on useimmiten päädytty toteuttamaan värinäeristys jousilla. Jousien etuna on, että niillä päästään alhaisempiin ominaistajuuksiin kuin värinäeristysmatoilla. Jousilla päästään jopa noin 2,2 Hz ominaistajuuksiin, jolloin niillä voidaan saavuttaa noin 50 prosentin vaimennus yli 6...10 Hz taajuusalueella. Saavutettava vaimennus riippuu tapauskohtaisesti muun muassa vaimennussuhteesta. Suomessa yleisillä pehmeillä maaperillä on rautatieliikenteen raportoitu herättäneen mittauksissa jopa 3 Hz taajuuksia. Näin alhaisien taajuuksien torjunnassa edes jousista ei ole juurikaan hyötyä (Talja, 2004c), (Välikylä, 2005), (Carnes et al. 2003).

Esimerkiksi Yhdysvalloissa Dallasissa kokouskeskuksen laajennusosa on rakennuttu jousien sekä tärinämattojen varaan, jotta rautatien aiheuttama tärinä sekä runkoääni saatiin vaimennettua. Laajennusosa on suoraan rautatien yläpuolella tuettuna pilareilla. Ratoja alla kulkee yhteensä kuusi kappaletta, joista neljä on varattu tavarajunille ja kaksi pikajunille. Pilareiden ja rakennuksen väliin on asennettu yhteensä 23 kappaletta tärinäeristinjousia, joiden ominaistaajuus on 2,2 Hz ja maksimipoikkeama 50 mm, sekä 18 kappaletta tärinäeristinjousia, joiden ominaistaajuus on 3,13 Hz ja maksimipoikkeama 25 mm. Systemin dynaamisen kuormituksen suurin poikkeama on rajoitettu 19 mm:iin ja staattisen kuormituksen laskettiin aiheuttavan 6 millimetrin poikkeaman. Pilarien sekä vaimennusjousien sijainnit on esitetty kuvassa 4.12.

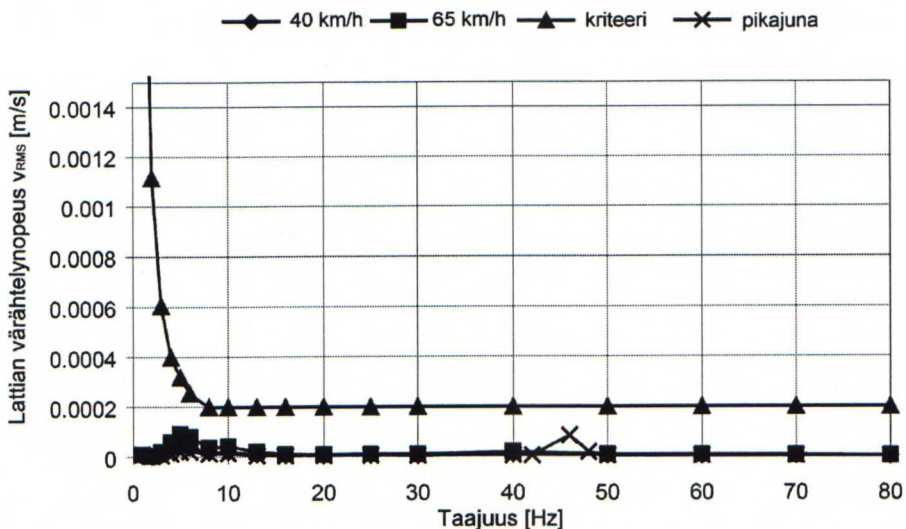


Kuva 4.12. Dallasin kokouskeskuksen tärinäeristys. Junaradan yläpuolella oleva laajennusosa on suojattu rautatien tärinältä tärinäjousien varaan (Carnes et al. 2003).

Kuvassa 4.13 on esitetty käytettyjen tärinäeristinjousien rakenne. Esijännityspultteja käyttämällä on mahdollista säätää pilareiden päälle asennetut jouset etukäteen staattisen kuormituksen aiheuttamaan puristumaan. Kun jousien päälle on rakennettu rakennus, avataan esijännityspultit. Rakentamiskäytön ajan tosin rakennus on tuettava väliaikaisilla rakenteilla, jotka sitten lopuksi poistetaan. Jousirakenne sisältää myös säädettävän maksimipoikkeaman, joka ohjaa kuormituksen täysin pilareille, mikäli maksimipoikkeama saavutetaan. Neopreenikaista systeemin alla varmistaa, että ainakin jonkin verran vaimennusta saavutetaan korkeimmilla taajuuksilla, mikäli maksimipoikkeama saavutetaan.



Kuva 4.13. Dallasin kokouskeskuksen tärinäeristiminä käytettyjen jousien periaatekuva. Jousissa on säädettävissä oleva maksimipoikkeama sekä mahdollisuus esijännittää jouset etukäteen staattista kuormitusta vastaavaan poikkeamaan (Carnes et al. 2003).



Kuva 4.14. Dallasin kokouskeskuksen lattiasta mitatut värähtelynopeudet v_{RMS} . Kriteerinä käytettiin Yhdysvaltalaisen standardin ANSI S.3.29-83 mukaisia arvoja. Tuloksista havaitaan, että ne jäivät 5 Hz taajuudella selkeästi alle 1,4 mm/s värähtelynopeuden, joka kohteeseen oli arvioitu, mikäli se toteutettaisiin ilman tärinäeristimiä (Carnes et al. 2003).

Ennen kuin tärinäeristimiä alettiin suunnitella, mitattiin kyseisellä paikalla maaperästä värähtelynopeudet, joiden perusteella pyrittiin arvioimaan suunnitellussa rakennuksessa esiintyvät värähtelyt. Tuloksissa arvioitiin, että alin värähtely rakennuksen lattiassa tapahtuu noin 4 Hz taajuudella ja on nopeuden tehollisarvoltaan v_{RMS} noin 1,4 mm/s. Alin taajuus on pituudeltaan 22,8 metriä olevan jänteen ominaistajuuden (välillä 3...4 Hz) aiheuttama. Tästä syystä oli selvää, että rakennuksessa piti varautua rautatien aiheuttamiin värähtelyihin tärinäeristimin. Värähtelyn kriteeriksi päätettiin valita Yhdysvaltalaisen standardin ANSI S3.29-83 mukaiset arvot jotka on esitetty kuvassa 4.14. Kuvassa on lisäksi esitetty valmiin rakennuksen lattiasta mitatut värähtelyt eri junanopeuksilla (Carnes et al. 2003).

Suunnitteluvaiheessa ennustettiin rakennukseen 5 Hz taajuudella noin 14 mm/s värähtelynopeus, mikäli se toteutettaisiin ilman tärinäeristimiä. Mitatut tasot kyseisellä taajuudella jäävät selkeästi alle ennustetun ja siten tärinäeristimet näyttävät toimivan erinomaisesti kyseisellä taajuudella. Tuloksia tarkasteltaessa tulee kuitenkin muistaa, että ennustetut arvot eivät ole todellisesta rakennuksesta mitattuja arvoja, ja siten tärinäeristinten suorituskykyä ei voida täysin tämän perusteella arvioida. Kirjallisuudessa ei ole juurikaan olemassa tutkimustuloksia, joissa olemassa olevasta rakennuksesta olisi mitattu ennen ja jälkeen tärinäeristinjousien asentamista värähtelytasot. Tästä syystä niiden suorituskyvyn arviointi perustuu yleensä osittain laskennallisiin tuloksiin. Varmaa on kuitenkin, että tärinäeristinjousilla saavutetaan yleensä alimmat ominaistajuudet ja siten niillä on mahdollista saavuttaa hyviä vaimennustuloksia rakennuksissa.

Koska olemassa olevien rakennusten tärinäeristäminen jälkeinpäin on erittäin kallista ja hankalaa, voi olla tarkoituksenmukaista eristää vain osa rakennuksesta. Rakennuksessa olevien herkkien laitteiden, kuten esimerkiksi elektronimikroskooppien toiminta voi häiriintyä värähtelystä. Tällöin ei välttämättä ole järkevää yrittää eristää koko rakennusta vaan riittää, jos pystytään eristämään vain esimerkiksi kyseinen huonetila tai sen lattiarakenne. Lattiarakenteen eristäminen edellyttää vahvaa pintalaattaa ja joustavaa välikerrosta pintalaatan ja tukirakenteen väliin. Joustava välikerros voidaan toteuttaa esimerkiksi Sylomer- tai Sylodyn-kerroksella, jota käytetään muun muassa radan ja kantavan rakenteen erottamiseen toisistaan. Kuten kappaleessa 4.1 todettiin, kyseisillä rakenteilla ei välttämättä päästä riittävän alhaisiin ominaistajuuksiin. Lisäksi ominaistajuuden alentaminen edellyttää aina raskaampaa rakennetta (FRA. 1998), (Massarsch et al. 2002), (Getzner Werkstoffe GmbH. 2006a).

Mikäli koko huonetila pelkän lattiarakenteen sijaan eristetään, tulee myös seinät ja katto toteuttaa tärinäeristimien varaan ripustettuina. Tällöin puhutaan niin sanotusta huone-huoneessa-järjestelmästä. Tällöin tärinäeristimillä ei yleensä päästä kovin alhaisiin ominaistajuuksiin, vaan ne lähinnä riittävät vaimentamaan vain runkoäänien etenemistä rakenteissa. Kuten kappaleessa 3.2 todettiin, aiheutuu runkoääni yleensä korkeampitaajuisista värähtelyistä kuin tärinähaitta. Runkoääni etenee yleensä yli 30 Hz taajuusalueella eli oleellisesti korkeammilla taajuuksilla kuin matalimmat raideliikenteen aiheuttamat värähtelyt. Huone-huoneessa järjestelmässä sisemmän huoneen kaikki rakenteet ovat vain tärinäeristimien välityksellä yhteydessä ympäröivään rakennuksen runkoon. Mitkään talotekniset

rakenteet, kuten LVIS-asennukset (ilmanvaihtokanavat, viemäröinti), eivät saa myöskään kytkeä sisempää huonetta ympäröiviin rakennuksiin, vaan myös ne pitää toteuttaa tärinäeristimien varaan tai varustaa joustavilla liittimillä huoneiden välissä (Ljunggren, 1991), (Halme ja Seppänen, 2002).

Suomessa viime aikoina eräs vaativimmista rakennuksista tärinäeristykseen suhteen on mittatekniikan keskuksen (MIKES) vasta Espoon Otaniemeen valmistunut toimitalo. Kyseisissä tiloissa suoritetaan äärimmäistä tarkkuutta vaativia mittauksia, kuten esimerkiksi nanoskaalan metrologisia mittauksia, jotka sietävät huonosti ulkopuolisia tärinöitä. Ennen rakentamisen käynnistämistä Helsingin yliopisto suoritti paikalla mittauksia, joiden perusteella määritettiin kohteessa vallitsevia tärinäolosuhteita. Tulosten perusteella suunniteltiin kohteelle vaimennusratkaisut. Muun muassa pituus- ja massametrologian laboratoriot on louhittu kallion sisään. Kyseisten tilojen mittalaitteet on sijoitettu joko aktiivisen tai passiivisen tärinävaimennuksen päälle. Passiivinen tärinävaimennus kohteessa tarkoittaa, että laitteet on sijoitettu valtavan betonilaatan päälle, joka on kiinni peruskalliolla. Aktiivinen tärinävaimennus on tehty käyttämällä 140 ja 70 tonnin painoisia teräsbetonipetejä jotka tuetaan ilmajousien varaan (Rakennuslinja-lehti, 2004).

Tässä kappaleessa on esitetty lukuisia värähtelyn vaimennuskeinoja, jotka soveltuvat eri vaiheisiin värähtelyn etenemisreitillä. Eri lähteissä esitetyt tulokset eivät useinkaan ole helposti vertailtavissa, koska tuloksia on esitetty eri suureiden suhteen. Lisäksi tulokset riippuvat suuresti maaperästä, liikennöivästä kalustosta sekä mittauskohteesta. Ongelmallisimmissa paikoissa on myös mahdollista käyttää useampaa kuin yhtä vaimennusratkaisua, jotta saavutetaan vaadittavat värähtelytasot.

Useimmat vaimennusmenetelmistä on vaikea ja kallis suorittaa, jos liikenneväylä tai rakennus on jo olemassa. Tästä syystä vaimennustarve tulisi aina selvittää hyvissä ajoin ennen rakennustöiden aloittamista mittauksin, jotta voidaan valita kohteeseen parhaiten sopivat vaimennusratkaisut sekä ehditään varautua niiden vaatimuksiin suunnittelussa. Mahdollisen tärinähaitan huomiotta jättäminen voi tulla myös taloudellisesti kalliiksi, mikäli siitä joutuu myöhemmin edesvastuuseen. Ruotsissa Banverket on tehnyt päätöksen, että se lunastaa kaikki asunnot, joiden makuuhuoneessa yöaikaan raideliikenteen aiheuttama nopeuden tehollisarvo v_{RMS} 2,5 mm/s ylittyy taajuusalueella 1...80 Hz. Suomessa ei samanlaista päästöstä ole tehty, mutta Ratahallintokeskus pitää nykyisin toimenpiderajana värähtelynopeuden huippuarvoa \hat{v} 3,6 mm/s (Nordvib, 2001), (Rakennuslehti, 17.8.2006).

5 TEHDYT MITTAUKSET

5.1 Mittausten tavoite

Suomessa ei toistaiseksi ole voimassa olevaa mittausstandardia, jonka mukaan raideliikenteen aiheuttamaa värähtelyä tulisi mitata maaperästä ja sen aiheuttamaa haittaa rakennuksissa arvioida. Sen sijaan Norjassa on julkaistu jo vuonna 1999 standardi NS 8176.E, jossa kuvataan mittaus- ja laskentamenetelmä, joka tuottaa yksinumeroisen tunnusluvun kuvaamaan värähtelyä kohteessa. Standardissa on lisäksi määritelty raja-arvot kohteiden luokitteluun värähtelyn haitallisuuden suhteen (NS 8176.E. 1999). VTT on vuonna 2004 julkaissut Norjan standardiin pohjautuvan suosituksen liikennetärinän mittaamisesta ja arvioinnista. Julkaisu on siis suositus, eikä toistaiseksi ole olemassa virallista standardia mittausten suorittamisesta sekä haitan arvioinnista. Norjan standardi ja VTT:n ohje eroavat toisistaan kahdessa kohdassa.

VTT:n ohje vaatii vähintään viikon pituisen mittausjakson, jolta värähtelyn tunnusluku määritetään vastaavalla tavalla kuin Norjan standardissa. Norjan standardi edellyttää vähintään 15 ohituksen mittaamista sillä edellytyksellä, että vähintään 30 prosenttia mitatuista värähtelylähteistä edustaa etukäteen pahimmiksi tärinälähteiksi arvioituja tärinälähteitä. Käytännössä tämä yleensä tarkoittaa raskaita tavarajunia tai erittäin pehmeillä maaperillä suurnopeusjunia. Toinen ero on, että Norjan standardissa mittaus pitää tehdä valmiin rakennuksen lattiapinnasta, kun taas VTT:n ohjeessa mittaus voidaan suorittaa myös suunnitellun rakennuksen paikalta maaperästä. Ohjeessa annetaan erilaisille rakennustyypeille eri kertoimet, joiden avulla voidaan arvioida suunnitellussa rakennuksessa esiintyvien värähtelyn voimakkuus.

Käytännön suunnittelutyössä on havaittu, että mittaukset tulee ehdottomasti suorittaa ennen rakennustöiden aloittamista, jotta mahdolliset vaimennustoimenpiteet voidaan suunnitella etukäteen. Tällöin mittaukset on pakko tehdä maaperästä ja arvioida tulosten perusteella rakennettavissa rakennuksissa esiintyvät värähtelyt. VTT:n ohjeen mukainen vähintään viikon mittainen mittausjakso on osoittautunut käytännön mittauksissa epävarmaksi, koska mittaaja ei kykene valvomaan mittausjaksoa jatkuvasti. Näin ollen jo tiiviiksi rakennetussa ympäristössä, kuten esimerkiksi pääkaupunkiseudun asutuskeskuksissa, joissa tärinälähteitä on useita, arvioitavan raideliikenteen lisäksi on havaittu, että viikonpituisen mittauksen luotettavuus ei ole taattu. Ongelmaa on pyritty ratkaisemaan teknisesti esimerkiksi lisäämällä mittauslaitteistoon video- ja äänivalvonta, mutta näiden perusteellakaan ei päästä samaan luotettavuuteen kuin mittaajan paikalla ollessa. Mikäli mittaukset suoritettaisiin lyhyemmällä ajanjaksolla siten, että mittaaja on itse läsnä, olisi mittausten luotettavuus huomattavasti parempi. Lisäksi pääkaupunkiseudulla esimerkiksi Leppävaaran asemalla kulkee viikon aikana miltei 2200 junaa, jolloin liikennöintitiheys on niin suuri, että lyhyemmälläkin mittausjaksolla on oletettavaa saada luotettava tulos raideliikenteen värähtelystä, mikäli mittausjakso valitaan

etukäteen esimerkiksi liikennöintitietojen perusteella siten, että mittausjaksolla esiintyy riittävästi etukäteen suurimmiksi värähtelylähteiksi arvioituja junia.

Norjalaisessa standardissa esitetty mittausmenetelmä ja värähtelyluokituksen raja-arvot perustuvat mittaustuloksiin ja asukkaiden haastatteluihin, joita on tehty yhteensä yli 1400 kohteessa (Talja, 2003). VTT:n ohjeessa on esitetty samat raja-arvot yhdistettynä erilaiseen mittausmenetelmään. Norjalaisen standardin mukainen mittausmenetelmä edellyttää vähintään 15 ohituksen mittaamista, mutta VTT:n ohjeen mukainen mittaaminen edellyttää vähintään viikon pituista mittausjaksoa. Norjalaisessa mallissa suositellaan lisäksi, että vähintään 30 prosenttia laskennassa käytettävistä tuloksista tulee olla junista, joiden ennustetaan aiheuttavan voimakkaimmat värähtelyt. Käytännössä tämä tarkoittaa siis lähinnä tavarajunia. Mikäli mitatuista junista vähemmän kuin 30 prosenttia on tavarajunia, voidaan mittaustuloksista osa sisällyttää laskentaan useaan kertaan, jotta 30 prosenttia saadaan täyteen.

Näistä syistä johtuen on tarpeen tutkia miten pitkä mittausjakso todella on tarpeen, jotta raideliikenteen aiheuttama tärinä voidaan luotettavasti arvioida, ja miten paljon suurempia tunnuslukuja VTT:n ohjeen mukaan mitattaessa saadaan. Lisäksi tiiviisti rakennetuissa ympäristöissä mittausten luotettavuus kasvaa jo lyhyempää mittausjaksoa käyttämällä, koska tällöin mittaaja voi olla itse läsnä ja varmistaa tulosten laadun.

5.2 Mittausmenetelmä

Tässä työssä on käytetty VTT:n ohjeen 2278 ”Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksista” mukaista mittausmenetelmää (Talja, 2004a). Mittausmenetelmä edellyttää vähintään viikon pituista mittausjaksoa, jolta määritettiin värähtelyn tilastollinen tunnusluku $a_{w,95}$ mittaustuloksista kaavan (3.6) mukaisesti. Kaavassa esiintyvä keskiarvo $\bar{a}_{w,RMS}$ ja -hajonta σ laskettiin 15 suurimman mittaustuloksen perusteella kaavojen (3.7) ja (3.8) mukaisesti. Mittaustuloksista määritettiin tilastollinen tunnusluku lisäksi erimittaisia lyhyempiä ajanjaksoja käyttäen. Tämä vastaa siis Norjan standardin mukaista mittausmenetelmää. Mittauksissa käytettiin kaavan (3.1) mukaista taajuuspainotusta $W_a(f)$ taajuusalueella 1...80 Hz. Alueen ulkopuolelle jäävä osa suodatettiin pois. Taajuuspainotetusta signaalista määritettiin tehollisarvon huippuarvo $\hat{a}_{w,RMS}$, kaavoja (3.4) ja (3.5) käyttäen.

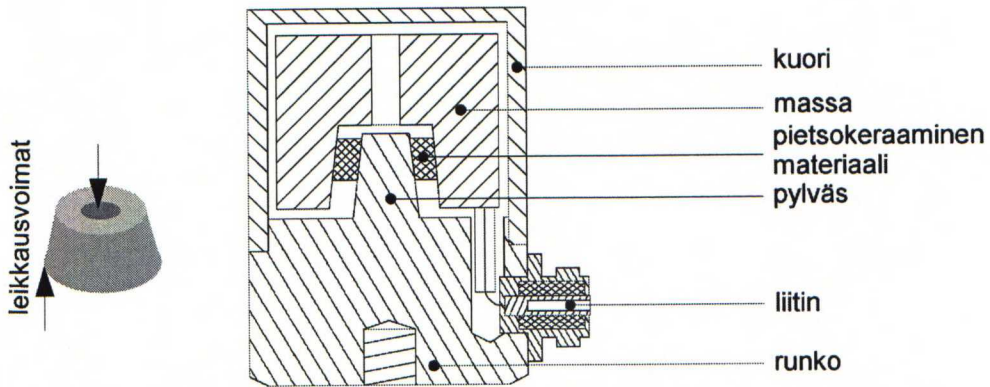
Mittauksissa tarkasteltiin vain pystysuuntaista värähtelyä, koska kuten kappaleissa 2.3 ja 3.1 todettiin, se on yleisesti arvioitu haitallisimmaksi sekä yleensä se on myös hallitseva suunta.

Mittauslaitteisto suoritti reaaliaikaisesti taajuuspainotuksen mitatulle signaalille ja käynnisti tallennuksen aina, kun käyttäjän ennalta asettama kiihtyvyyden taajuuspainotettu kynnyсарvo ylittyi. Tallennetuista mittaustuloksista etsittiin aikataulujen sekä videovalvonnan perusteella junien aiheuttamat mittaustulokset. Koska mittauksia tehtiin rakennetussa ympäristössä, oli mukana myös lukuisia mittaustuloksia, jotka eivät olleet rautatieliikenteen aiheuttamia. Laskentaan

kelpuutettujen mittaustulosten aikatazon käyrämuodot tarkastettiin vielä manuaalisesti, jotta voitiin varmistua, että signaali silmämääräisesti vaikutti junaliikenteen aiheuttamalta. Tällä pyrittiin varmistamaan, että signaaliin ei ollut summautunut ylimääräisiä komponentteja esimerkiksi räjäytystöistä tai muusta vastaavasta johtuen.

5.3 Mittauslaitteisto ja kohteet

Kaikkiin mitattuihin kohteisiin aiottiin rakentaa asuinrakennuksia ja tästä syystä mittaukset tehtiin suunniteltujen rakennusten kohdalta maaperästä. Vähintään yksi mittauspiste valittiin aina suunniteltujen rakennusten junarataa lähinnä olevalta julkisivulta, yleensä mahdollisimman läheltä junarataa. Koska mittaukset suoritettiin tiiviisti rakennetuissa ympäristöissä, pyrittiin mittauspisteet valitsemaan siten, että ympäristön muiden tärinälähteiden mahdolliset vaikutukset mittaustuloksiin olisivat mahdollisimman vähäiset. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että esimerkiksi mittaustontin lähellä kulkevan maantien viereen ei sijoitettu mittauspistettä.



Kuva 5.1. Mittauksissa käytetyn anturin toimintaperiaate. Leikkausvoimien vaikutuksesta pietsosähköinen ilmiö tuottaa vaihtelevan jännitteen, jonka avulla määritetään kiihtyvyys (MMF. 2006a).

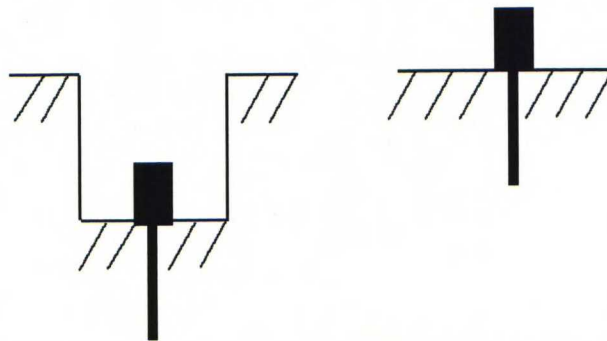
Mittaukset suoritettiin käyttämällä saksalaisen Metra Mess- und Frequenztechnik Radebeul valmistamia kiihtyvyyssantureita. Valmistajalla on useita eri ominaisuuksilla varustettuja kiihtyvyyssantureita, joista mallia KS 48B on käytetty tämän työn mittauksissa. Kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 5.1. Pietsokeraaminen materiaali on asennettu anturin rungon ja niin sanotun pylvään väliin, jolloin siihen kohdistuu leikkausvoima rungon liikkeessä anturin sisällä olevan massan suhteen. Toiminta perustuu pietsokeraamisen materiaalin tuottamaan vaihtelevaan jännitteeseen, joka on verrannollinen siihen kohdistuvaan voimaan. Lopulta jännitteen muutoksen perusteella saadaan selville anturiin kohdistunut kiihtyvyys. Pietsosähköiseen ilmiöön perustuva anturi tarvitsee syöttövirran toimiakseen. Mittauslaitteiston tulee siis kytkeä syöttämään virtaa anturille. Mittauksissa käytetyn anturin hyvinä puolina on, että se toimii lineaarisesti taajuusalueella 0,15...4000 Hz ja omaa alhaisen taustakohinan <math>< 14 \mu\text{g}</math> taajuusalueella 0,5...1000 Hz ja se voidaan kytkeä muuhun laitteistoon jopa yli sata metriä pitkää koaksiaalijohdinta käyttämällä (MMF. 2006a), (MMF. 2006b), (MMF. 2006c). Kiihtyvyyssanturien teknisiä ominaisuuksia on listattu taulukkoon 5.1.

Taulukko 5.1. Mittauksissa käytettyjen anturien tekniset ominaisuudet (MMF. 2006b).

valmistaja	Metra Mess- und frequentztechnik Radebeul
malli	KS 48B
toimintalämpötila	-20...80 °C
dynamiikka alue	±5 g
taustakohina	< 14 µg (0,5...1000 Hz)
valmistusmateriaali	ruostumaton teräs
massa	165 g
lineaarinen taajuusalue f_{3dB}	0,15..4000 Hz

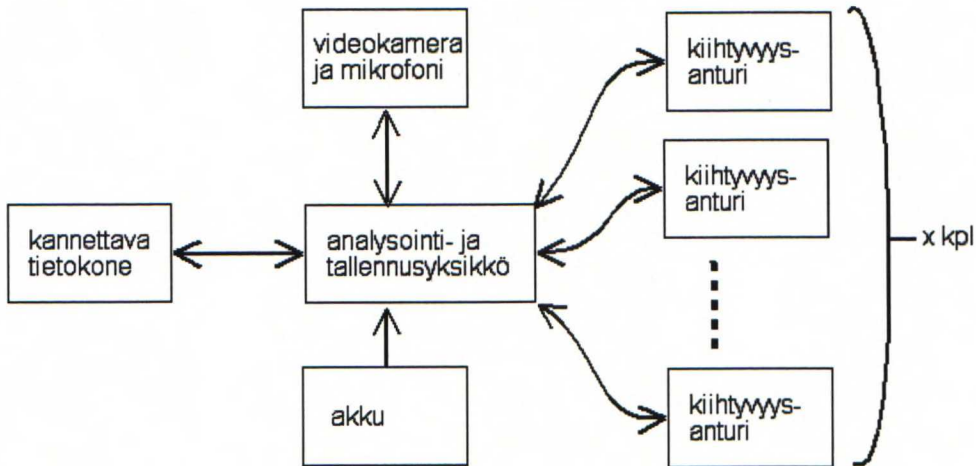
Ennen mittausten aloittamista kiihtyvyyssanturit kalibroitiin käyttämällä referenssi-värähtelijää eli kalibraattoria. Kalibrointi suoritettiin koko mittausväylälle eli anturit oli kytketty mittauslaitteistoon samoja välijohdoja käyttäen kuin lopullisessa mittaustilanteessa.

Anturit asennettiin joko maahan kaivetun kuopan pohjalle tai maanpinnalle. Ensimmäinen asennustapa osoittautui huonoksi etenkin kosteilla maaperillä, johtaen kosteusongelmiin jotka saattavat häiritä anturien toimintaa. Antureihin kiinnitettiin noin 500 mm pitkät tangot, joiden halkaisija oli noin 10 mm. Näin taattiin antureiden kunnollinen kiinnittyminen maaperään. Kyseisellä kiinnitystavalla ominaistaajuus on noin 1 kHz luokkaa eli selvästi mittausalueen yläpuolella, jolloin se ei vaikuta mitenkään mittaustulokseen (MMF. 2006d). Antureiden vaihtoehtoiset asennustavat on esitetty kuvassa 5.2. Kun anturi oli asennettu maaperään, suojattiin se vielä hiekkakerroksella, jotta anturiin kiinnittyvä signaalijohto ei aiheuttanut jännitystä anturiin. Lopuksi anturit suojattiin vielä muovisuojuksella sateen varalta.



Kuva 5.2. Kiihtyvyyssantureiden vaihtoehtoiset asennustavat maaperään. Ensimmäinen asennustapa johti kosteusongelmiin ja siten sitä ei voi suositella. Molemmista tapauksista anturit peitettiin lopuksi käyttäen noin 15 kg hienoa hiekkaa, jonka yläpuolelle asetettiin muovisuoja.

Mittauslaitteisto koostui kiihtyvyyssantureiden lisäksi analysointi- ja tallennusyksiköstä, kannettavasta tietokoneesta, akusta, tarvittavista johtimista, videokamerasta sekä mikrofonista. Akkua käytettiin mittauksissa, jotta välttyttäisiin verkkosähkön kautta syntyvältä maasilmulta. Maasilmukka saattaa aiheuttaa häiriöitä muun muassa 50 Hz taajuudelle, joka on mittausalueella ja siten erittäin haitallinen. Videokamera ja mikrofoni olivat kytkettyinä mittauslaitteistoon ja myöskin kytkeytyivät nauhoittamaan aina, kun tietty mittajaan ennalta asettama taajuuspainotettu värähtelytaso ylittyi. Video- ja äänisignaaleita käytettiin myöhemmin tulosten analysointivaiheessa varmistamaan, että mitattu signaali oli todella junaliikenteen tuottama. Kuvassa 5.3 on esitetty mittausjärjestelmän lohkokkaavio.



Kuva 5.3. Työssä käytetyn mittausjärjestelmän yksinkertaistettu lohkokkaavio. Järjestelmä ohjasi myös video- ja äänisignaalien tallennusta samaan tapaan kuin kiihtyvyyssignaalien tallennusta. Näin kyettiin jälkikäteen kuva- ja äänitallenteista varmistamaan, oliko mittaushetkellä junaliikennettä.

Mittauksia suoritettiin kolmessa eri kohteessa. Kohteista ensimmäisessä käytettiin vain yhtä mittauspistettä, koska mittausalue oli varsin pieni ja sen välittömässä läheisyydessä oli toimintaa, jonka läheisyyteen ei kannattanut antureita asentaa. Kohteissa kaksi ja kolme käytettiin kolmea mittauspistettä. Kaikkiin kohteisiin suunniteltiin rakennettavaksi asuinkäyttöön tulevia kerrostaloja, jolloin mittauksilla oli tarkoitus selvittää kyseisten rakennusten kohdalla raideliikenteen maaperään aiheuttaman värähtelyn haitallisuus. Mittauspisteet sijaitsivat kohteissa kaksi ja kolme suunniteltujen rakennusten junarataa lähinnä olevien julkisivujen linjalla. Koska julkisivut olivat radan suuntaisia, sijaitsivat mittauspisteet siis samalla etäisyydellä junaradasta. Näin ollen eri mittauspisteissä saadut arvot ovat suoraan verrannollisia toisiinsa.

Kaikki kohteet sijaitsivat pääkaupunkiseudulla jo rakennetussa ympäristössä, jolloin mittausalueiden läheisyydessä on aina myös muita värähtelylähteitä kuin rautatieliikenne. Tästä syystä mittauslaitteisto varustettiin myös äänen- ja kuvantallennusvälineillä. Kohteiden maaperien kuvaukset on esitetty taulukossa 5.2. Kuvaukset perustuvat ulkopuolisen geotekniikkayrityksen maaperätutkimuksiin tai arvioihin maaperästä.

Taulukko 5.2. Mittauskohteiden maaperäkuvaukset. Kaikissa kohteissa on värähtelyn etenemisen kannalta ongelmallisia pehmeitä maakerroksia.

kohde 1	kohde 2	kohde 3
<ul style="list-style-type: none"> • 0...1,5 metriä humuspitoinen pintakerros • 4...6 metriä savi • 1...10 metriä siltti ja hiekka • kallio 	<ul style="list-style-type: none"> • noin 3 metriä pintakerros • noin 7 metriä savi • kallio 	<ul style="list-style-type: none"> • 0...3 metriä kuivakuori • 3...7 metriä savi • 1...8 metriä hiekkavaltainen kitkamaa • kallio

Kaikissa kohteissa on maaperässä pehmeitä kerroksia, joissa värähtely etenee tehokkaasti. Siten mitatut kohteet ovat rautatieliikenteen aiheuttaman värähtelyn kannalta riskialueita. Eri kohteiden mittauspisteiden lukumäärät, etäisyydet junaradasta sekä raiteiden lukumäärät on koottu taulukkoon 5.3. Kohteissa kaksi ja kolme kaikki mittauspisteet olivat samalla etäisyydellä junaradasta.

Taulukko 5.3. Mittauspisteiden lukumäärät ja etäisyydet junaradasta sekä raiteiden lukumäärät eri kohteissa. Kohde yksi sijaitsi lähellä juna-asemaa, jossa on 4 raidetta.

	kohde 1	kohde 2	kohde 3
mittauspisteiden etäisyys junaradasta	110 metriä	25 metriä	55 metriä
mittauskanavien lukumäärä	1	3	3
raiteiden lukumäärä	4 ¹⁾	2	2

1) mittauspaikka aseman lähellä, jossa 4 raidetta

Kaikissa kohteissa liikennöinti oli tiheää ja tavarajunien osuus vähäinen. Valtion rautateiltä saatujen aikataulutietojen perusteella kootut liikennemäärät on esitetty kohteittain taulukossa 5.4. Kuten taulukosta 5.4 havaitaan, on liikennöinti erittäin vilkasta ja siten on oletettavaa, että myös viikon pituista mittausjaksoa lyhyemmällä aikavälillä on mahdollista saada luotettavasti arvioitua raideliikenteen aiheuttaman värähtelyn haitallisuus. Taulukon 5.4 arvoja tarkasteltaessa tulee muistaa, että tavarajunien lukumäärä on saatu aikataulutietojen perusteella. Tämä tarkoittaa sitä, että tavarajunalle on vain varattu paikka aikataulussa, vaikka se ei välttämättä liikennöisikään, eli todellinen tavarajunien lukumäärä on todennäköisesti jonkin verran pienempi kuin taulukossa 5.4 esitetty arvo. Taulukon arvojen perusteella tavarajunien teoreettinen osuus on isoimmillaan kohteessa kaksi, noin 8,8 prosenttia koko viikon liikennemäärästä.

Taulukko 5.4. Liikennemäärät eri kohteissa. Kaikissa kohteissa liikennöinti on runsasta ja tavarajunien osuus vähäinen. Tavarajunien lukumäärät on arvioitu aikatauluista niille varattujen paikkojen perusteella. Todellisuudessa siis tavarajunien määrät ovat pienempiä.

	junatyyppe	kohde 1	kohde 2	kohde 3
lukumäärä	matkustajajuna	331	201	201
arkipäivänä	tavarajuna	18	18	16
lukumäärä	matkustajajuna	242	160	160
lauantaina	tavarajuna	16	16	14
lukumäärä	matkustajajuna	155	107	107
sunnuntaina	tavarajuna	16	16	14
lukumäärä	matkustajajuna	2052	1272	1272
viikon aikana	tavarajuna	122	122	108

5.4 Tulokset

Tulokset laskettiin ensiksi VTT:n ohjeen 2278 ”Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokitukselta” mukaisesti käyttäen viikon pituisia mittausjaksoja. Tunnusluku määritettiin 15 suurimman taajuuspainotetun tehollisarvon huippuarvon perusteella. Eri kohteista saadut tulokset on esitetty taulukossa 5.5. Viikon pituiselta mittausjaksolta laskettiin tunnusluku lisäksi sisällyttämällä laskentaan vähintään 30 prosenttia eli 5 kappaletta tavarajunia, mikäli tavarajunia oli 15 suurimman mittaustuloksen joukossa.

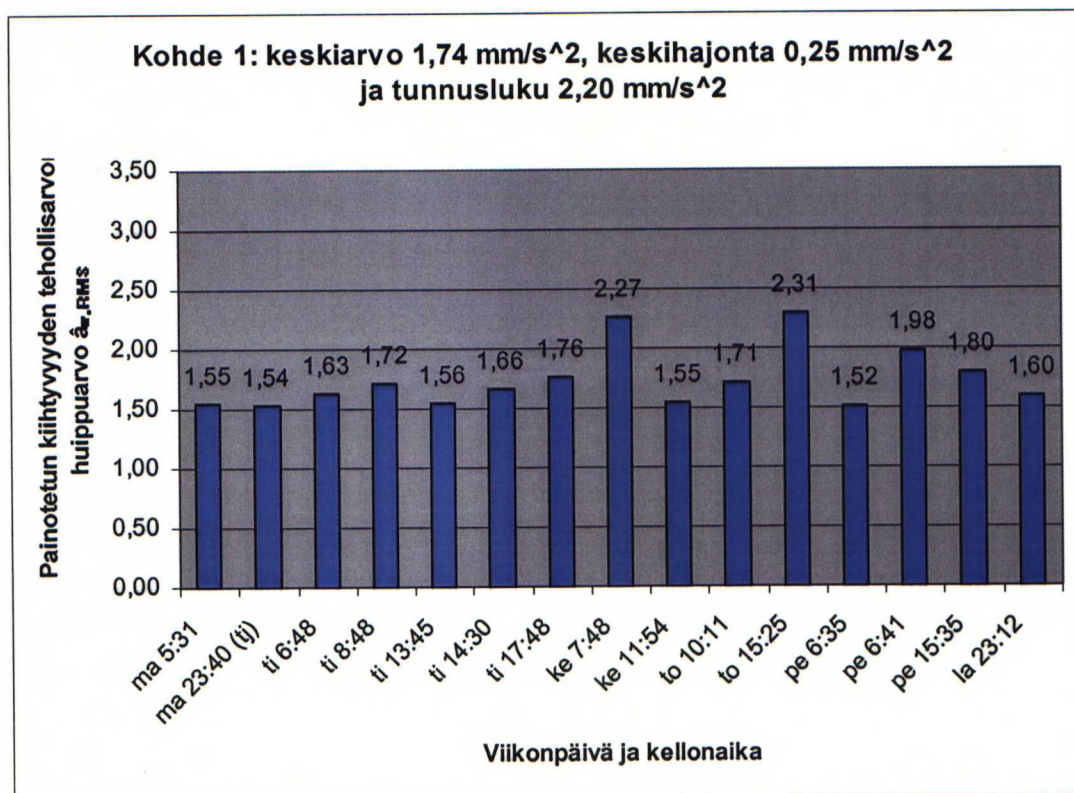
Taulukko 5.5. Viikon pituiselta mittausjaksolta määritetyt tunnusluvut eri kohteissa. Tunnusluvut on määritetty myös valitsemalla 15 suurinta siten, että niiden joukossa on vähintään 30 prosenttia tavarajunia norjalaisen standardin suosituksen mukaisesti. Käytännössä siis vähintään 5 tavarajunaa on sisällytetty laskentaan.

kohde	laskentaan valitut mittaustulokset	tavarajunien lukumäärä	keskiarvo μ [mm/s ²]	keskihajonta σ [mm/s ²]	tunnusluku $a_{w,95}$ [mm/s ²]
1	15 suurinta	1	1,74	0,25	2,20
	15 suurinta (30 % tavarajunia)	5	1,74	0,25	2,20
2	15 suurinta	4	2,70	0,18	3,02
	15 suurinta (30 % tavarajunia)	5	2,71	0,17	3,02
3	15 suurinta	1	2,41	0,30	2,95
	15 suurinta (30 % tavarajunia)	5	2,47	0,23	2,89

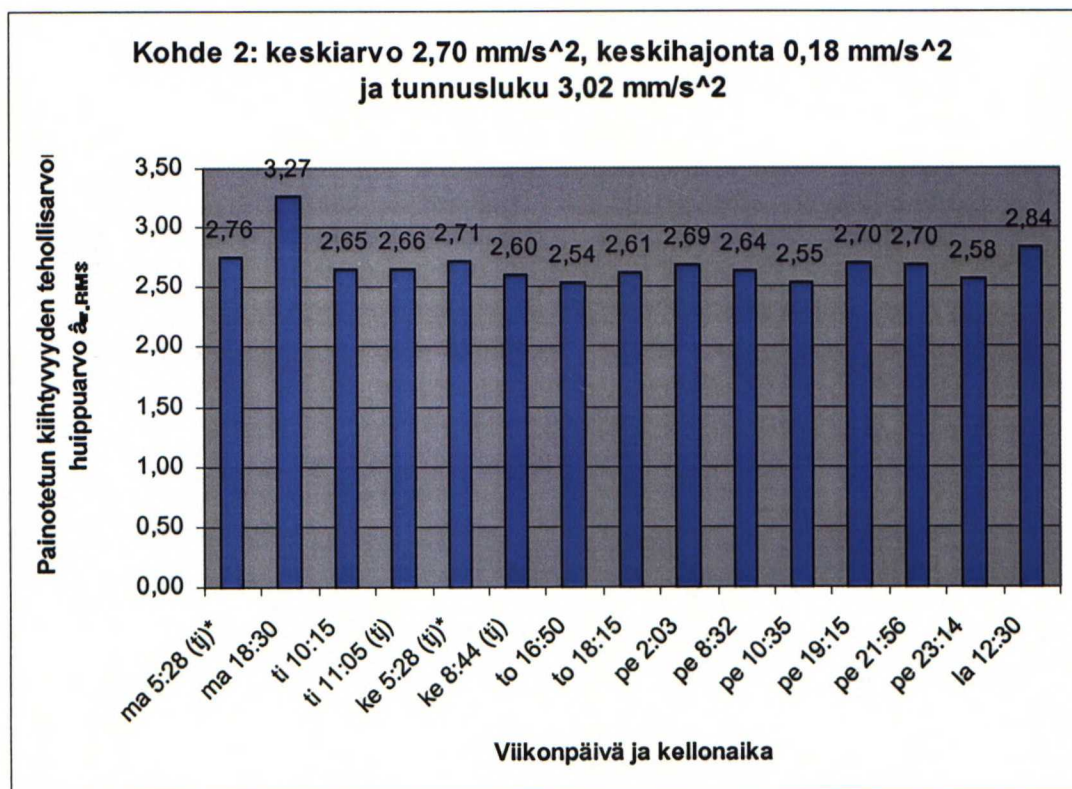
Kohteiden kaksi ja kolme tuloksia laskettaessa on huomioitu yhden junan ohituksesta mitatut tasot vain sen kanavan osalta, joka tuotti suurimman arvon. Laskennassa ei siis ole mukana yhden ohituksen aiheuttamia arvoja useaan kertaan. Eri kanavista saatujen mittaustulosten vertailu on suoritettu kappaleessa 5.4.2. Tuloksia vertaamalla voidaan havaita, että tavarajunien lukumäärän lisääminen ei vaikuta olennaisesti tuloksiin. Tavarajunien lisäämisellä on oletettavasti pyritty kasvattamaan tunnuslukua, mikäli mittausjakso on lyhyt ja mitattujen tavarajunien määrä vähäinen. Näin ei kuitenkaan käy esimerkiksi kohteen 3 kohdalla, vaan saatu tunnusluku on

pienempi tavarajunien lisäyksen jälkeen. Tämä johtuu siitä, että tavarajunat eivät välttämättä aina aiheuta suurimpia värähtelyjä nyt mitatuissa kohteissa. Syynä tähän voi olla, että tavarajunat voivat ajaa kyseisillä rataosuuksilla matkustajajunia hiljempaa ja lisäksi kohteen 3 tapauksessa matkustajajunista osa jarrutti mittauskohdalla, joka saattaa kasvattaa niiden aiheuttamaa värähtelyä. Lisäksi taulukossa 5.4 esitettyjen liikennemäärien perusteella tavarajunaliikenne on suhteellisen vähäistä mitatuissa kohteissa.

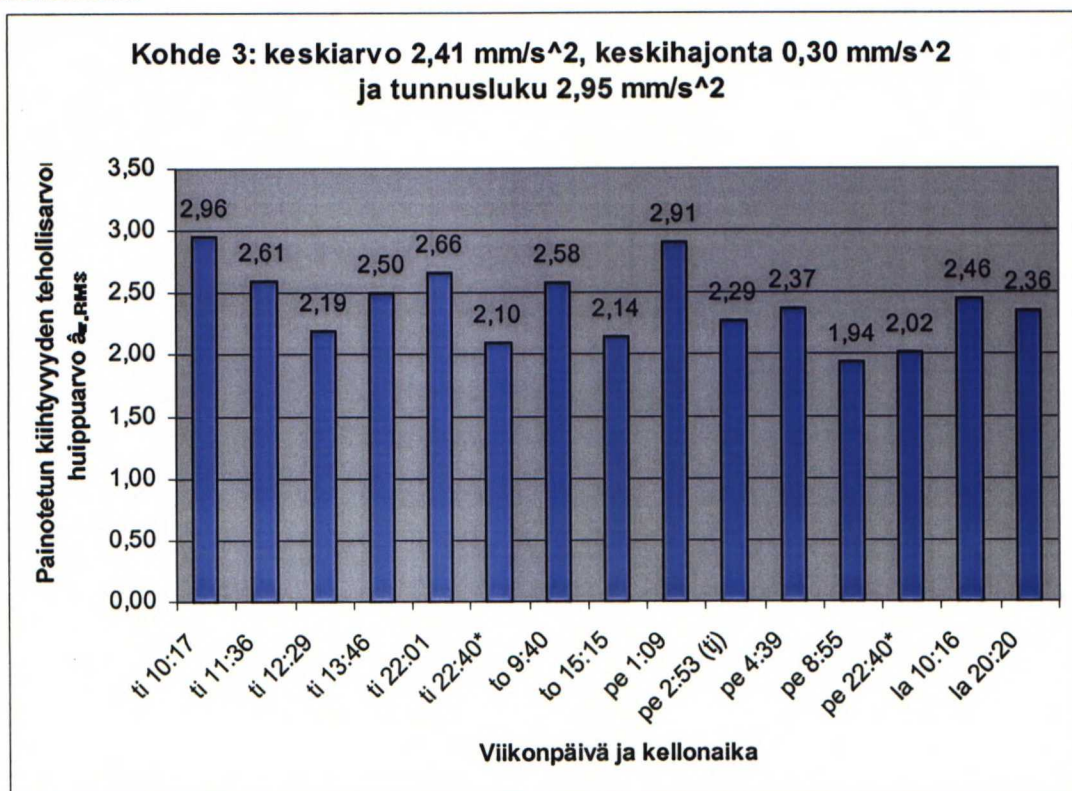
Koska mittausjakso on viikon pituinen, on mahdollista, että saman junan ohituksesta eri päivinä aiheutuneet arvot ovat mukana 15 suurimman joukossa. Kuvissa 5.4, 5.5 ja 5.6 on esitetty viikon mittaiselta jaksolta tunnusluvun laskentaan käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Tavarajunat on merkitty kuviin viikonpäivän ja kellonajan perään lyhennettä (tj) käyttäen. Tähdellä merkityt mittaustulokset ovat saman junan ohituksia eri päivältä.



Kuva 5.4. Kohteen yksi 15 suurinta mittaustulosta, joita käytettiin tunnusluvun laskentaan.



Kuva 5.5. Kohteen kaksi 15 suurinta mittaustulosta, joita käytettiin tunnusluvun laskentaan.

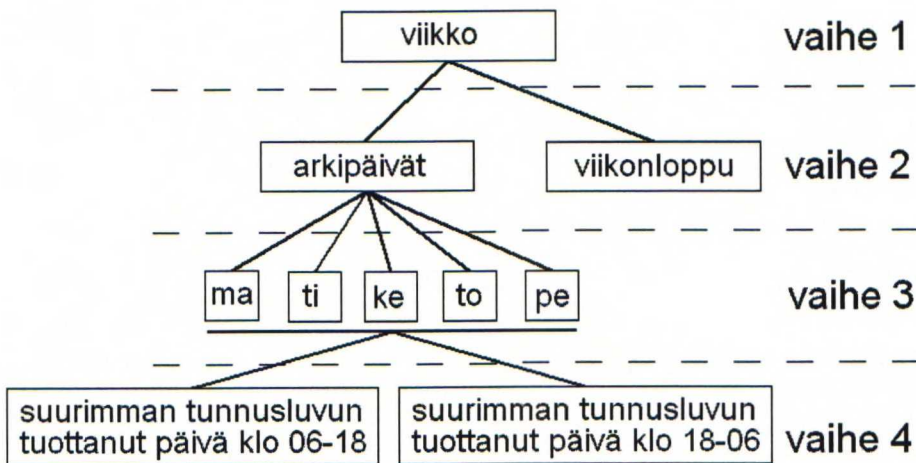


Kuva 5.6. Kohteen kolme 15 suurinta mittaustulosta, joita käytettiin tunnusluvun laskentaan.

Kuvien 5.4, 5.5 ja 5.6 tuloksia vertaamalla havaitaan, että kohteissa kaksi ja kolme on 15 suurimman mittaustuloksen joukossa sama juna kahdelta eri päivältä. Mittaustulokset ovat varsin lähellä toisiaan, jolloin voidaan kyseenalaistaa, onko hyödyllistä ja tarkoituksenmukaista mitata saman junan ohituksen aiheuttamat tasot seitsemään eri kertaan viikon ajalta? Tämä luonnollisesti koskee junia, jotka kulkevat joka viikonpäivä. Esimerkiksi kohteen kolme eri päivältä määritettyjen 15 suurimman mittaustuloksen joukossa on kuudella päivällä seitsemästä sama juna, joka esiintyy myös kahteen kertaan viikon tunnusluvun laskennassa. Tavarajunat eivät välttämättä liikennöi joka päivä, vaikka niille olisikin varattu paikka aikatauluissa. Tästä syystä on oletettavaa, että valitsemalla etukäteen mittausajankohta, jolloin tavarajunat varmasti liikennöivät, saadaan luotettavasti mitattua suurimmat värähtelyt aiheuttavien junien tasot myös lyhyempää ajanjaksoa käyttäen. Seuraavissa vaiheissa palataan samojen junien aiheuttamiin värähtelytasoihin eri päivinä.

5.4.1 Tunnuslukujen vertailu eri ajanjaksoilla

Mittausjakson pituuden lyhentäminen on työssä jaettu eri vaiheisiin, jotka on kuvattu kuvassa 5.7. Ensimmäinen vaihe on siis VTT:n ohjeen mukainen viikon pituiselta mittausjaksolta laskettu tunnusluku, jonka tulokset esitettiin taulukossa 5.5 sekä kuvissa 5.4, 5.5 ja 5.6. Lyhyemmiltä mittausjaksoilta tunnusluvut on laskettu samaan tapaan kuin viikon pituiseltakin mittausjaksolta, käyttäen 15 suurinta mittaustulosta kyseiseltä ajanjaksolta.



Kuva 5.7. Mittausjakson lyhentäminen vaiheittain. Ensimmäinen vaihe edustaa VTT:n ohjeen mukaista viikon pituisesta mittausjaksosta.

Vaiheessa kaksi viikon ajanjaksolta saadut mittaustulokset jaoteltiin kahteen ajanjaksoon, arkipäivät sekä viikonloppu. Perusteluna jaolle on, että mittaustuloksia saatiin lukumäärällisesti vähemmän päivää kohden viikonlopun ajalta verrattuna arkipäiviin. Kuten taulukosta 5.4 voidaan havaita, on mitatuissa kohteissa päivittäinen liikennemäärä viikonloppuisin vain noin kaksi kolmasosaa arkipäivän vastaavasta. Taulukossa 5.6 on esitetty eri kohteissa mittaustulosten lukumäärän jakautuminen eri päiville mittauskanavaa kohden. Koska kohteissa kaksi ja kolme käytettiin kolmea mittauskanavaa, saadaan mittaustulosten kokonaislukumäärä kertomalla taulukon arvot kolmella.

Kussakin mittauksessa oli mittauslaitteisto säädetty aloittamaan tallennus, kun tietty taajuuspainotetun kiihtyvyyden kynnsarvo ylittyi. Kynnsarvo oli kussakin kohteessa valittu erisuuruiseksi ja lisäksi sitä saatettiin vaihtaa mittausten aikana. Tästä syystä taulukon 5.6 luvut eivät ole suoraan verrattavissa toisiinsa, eikä niitä voida verrata taulukon 5.4 liikennemääriin. Arvojen perusteella havaitaan kuitenkin, että kaikissa kohteissa saatiin selkeästi enemmän mittaustuloksia arkipäiviltä kuin lauantailta tai sunnuntailta. Toisaalta tuloksia tarkastettaessa oli mittaustulosten joukossa arkipäivisin myös enemmän muusta syystä kuin junaliikenteestä aiheutuneita mittaustuloksia. Liikennemäärien ja mittaustulosten lukumäärän perusteella on kuitenkin perusteltua ajoittaa mittausajankohta arkipäiville.

Taulukko 5.6. Mittaustulosten lukumäärän jakautuminen eri kohteissa eri päiville mittauskanavaa kohden. Kohteessa yksi käytettiin yhtä mittauskanavaa ja kohteissa kaksi ja kolme puolestaan kolmea mittauskanavaa.

	kohde 1	kohde 2	kohde 3
lukumäärä arkipäivänä	85	161	137
lukumäärä lauantaina	30	97	50
lukumäärä sunnuntaina	20	69	42
lukumäärä viikon aikana	477	969	775

Taulukko 5.7. Arkipäiviltä sekä viikonlopulta lasketut tunnusluvut eri kohteissa sekä niiden suhteet viikon ajalta laskettuun tunnuslukuun.

kohde	laskentaan valitut mittaustulokset	tavarajunien lukumäärä	keskiarvo μ [mm/s ²]	keskihajonta σ [mm/s ²]	tunnusluku $a_{w,95}$ [mm/s ²]	osuus viikon ajalta lasketusta tunnusluvusta
1	koko viikko	1	1,74	0,25	2,20	100 %
	arkipäivät	1	1,74	0,26	2,20	100 %
	viikonloppu	0	1,24	0,18	1,55	71 %
2	koko viikko	4	2,70	0,18	3,02	100 %
	arkipäivät	4	2,68	0,18	3,00	99 %
	viikonloppu	0	2,26	0,22	2,66	88 %
3	koko viikko	1	2,41	0,30	2,95	100 %
	arkipäivät	1	2,34	0,35	2,97	101 %
	viikonloppu	0	1,47	0,42	2,22	75 %

Taulukossa 5.7 on esitetty arkipäiviltä (5 vuorokautta) ja viikonlopulta (2 vuorokautta) lasketut tunnusluvut. Viikonlopulta lasketut tunnusluvut ovat kaikissa kohteissa selkeästi alhaisemmat kuin koko viikon ajalta laskettu tunnusluku. Koska liikennemäärät ja tunnusluvut viikonlopun ajalta määritettyinä ovat selkeästi alhaisempia kaikissa kohteissa, on perusteltua valita lyhyempi mittausjakso ennemmin arkipäiviltä kuin viikonlopulta. Tuloksia tarkasteltaessa havaitaan, että kohteessa kolme on arkipäiviltä laskettu tunnusluku hieman suurempi kuin koko viikon ajalta laskettu. Tämä on mahdollista, koska tunnusluvun laskenta kaavan (3.6) mukaisesti huomioi keskihajonnan 1,8 kertaisena ja keskiarvon sellaisenaan.

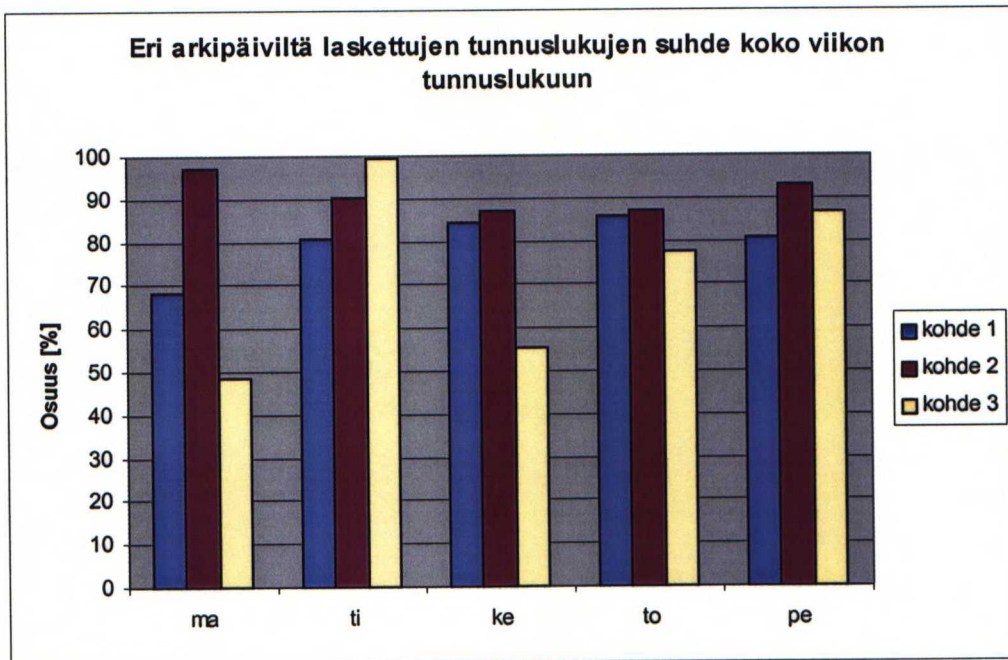
Näin ollen keskihajonnan kasvaminen yhdessä keskiarvon pienen laskun kanssa saattaakin tuottaa suuremman tunnusluvun. VTT:n ohjeessa todetaan ilman perusteluja, että tunnusluvun määrittämisessä tulee käyttää vähintään viikon pituista mittausjaksoa, toisin kuin norjalaisessa standardissa. Taulukossa 5.7 esitettyjen tulosten perusteella voidaan todeta, että arkipäiviltä määritetty tunnusluku riittää tuottamaan luotettavan arvion kohteessa esiintyvän värähtelyn haitallisuudesta. Liitteissä 1, 2 ja 3 on esitetty kuvien 5.4, 5.5 ja 5.6 tapaan tunnusluvun laskennassa käytetyt mittaustulokset kohteittain.

Vaiheessa kolme laskettiin tunnusluku kultakin arkipäivältä erikseen. Koska arkipäiviltä laskettu tunnusluku vastasi hyvin koko viikolta laskettua tunnuslukua, selvitettiin millä tarkkuudella eri arkipäiviltä lasketut tunnusluvut vastaavat koko viikolta laskettua tunnuslukua. Taulukossa 5.8 on esitetty eri kohteista kultakin arkipäivältä laskettu tunnusluku sekä sen suhde koko viikon ajalta laskettuun tunnuslukuun. Jotta eri arkipäiviltä laskettujen tunnuslukujen vertailu olisi helpompaa, on kyseisten tunnuslukujen osuudet esitetty päivittäin myöhemmin myös kuvassa 5.8.

Taulukko 5.8. Eri arkipäiviltä lasketut tunnusluvut eri kohteissa sekä niiden suhteet koko viikon ajalta laskettuun tunnuslukuun.

kohde	laskentaan valitut mittaus- tulokset	tavara- junien luku- määrä	keskiarvo μ [mm/s ²]	keski- hajonta σ [mm/s ²]	tunnus- luku $a_{w,95}$ [mm/s ²]	osuus viikon ajalta lasketusta tunnusluvusta
1	koko viikko	1	1,74	0,25	2,20	100 %
	maanantai	1	1,25	0,14	1,50	68 %
	tiistai	2	1,42	0,19	1,77	81 %
	keskiviikko	3	1,34	0,29	1,86	84 %
	torstai	0	1,33	0,31	1,88	86 %
	perjantai	1	1,30	0,26	1,77	81 %
2	koko viikko	4	2,70	0,18	3,02	100 %
	maanantai	1	2,18	0,41	2,93	97 %
	tiistai	2	2,30	0,23	2,72	90 %
	keskiviikko	2	2,11	0,29	2,63	87 %
	torstai	1	2,20	0,24	2,63	87 %
	perjantai	1	2,39	0,23	2,81	93 %
3	koko viikko	1	2,41	0,30	2,95	100 %
	maanantai	0	1,16	0,15	1,44	49 %
	tiistai	0	1,92	0,56	2,93	99 %
	keskiviikko	0	1,25	0,22	1,64	56 %
	torstai	2	1,63	0,37	2,29	78 %
	perjantai	1	1,64	0,51	2,56	87 %

Kohteissa liikennöinti junaradalla on arkipäiväisin matkustajaliikenteen osalta identtistä eli samat junat liikennöivät samaan aikaan samoilla raiteilla. Tästä syystä voidaan olettaa, että myös eri päiviltä saatavat mittaustulokset ovat samansuuruisia, jolloin yhden arkivuorokauden pituinen mittaustulokset antaa luotettavan arvion kyseisessä kohteessa esiintyvistä rautatieliikenteen aiheuttamista värähtelyistä. Taulukon 5.8. tuloksia tarkastelemalla havaitaan, että parhaimmillaan yhden arkivuorokauden pituisella mittaustuloksella saavutetaan jopa 99 prosentin osuus koko viikon ajalta määritetystä tunnusluvusta. Toisin kuin oletettiin, on osa eri päiviltä määritetyistä tunnusluvuista selvästi alhaisempia kuin voitaisiin olettaa matkustajaliikenteen identtisyyden perusteella. Osaltaan tähän saattaa hieman vaikuttaa se, että tavarajunien määrä eri päivinä vaihtelee, mutta huomattavasti enemmän tuloksiin vaikuttaa se, että eri päivinä oli kohteissa eri määrä häiriölähteitä. Koska kohteissa esiintyi tiettyinä ajankohtina enemmän häiriölähteitä, jouduttiin tiettyinä päivinä hylkäämään selkeästi suurempi osa mittaustuloksista kuin toisina. Tästä syystä myös tunnusluku jää helposti alhaisemmaksi. Kohteessa kaksi esiintyi koko viikon aikana selkeästi vähemmän raideliikenteen ulkopuolisia värähtelylähteitä, jolloin yksittäisistä mittaustuloksista vähäisempi määrä jouduttiin hylkäämään. Kohteen kaksi tuloksia tarkastelemalla voidaankin havaita, että eri arkipäiviltä lasketut tunnusluvut eivät vaihtele läheskään yhtä paljoa kuin kohteiden yksi ja kolme eri arkipäiviltä lasketut tunnusluvut. Tunnuslukujen vaihtelu eri päivillä ilmenee selkeästi kuvasta 5.8.



Kuva 5.8. Eri arkipäiviltä laskettujen tunnuslukujen osuus koko viikon ajalta lasketusta tunnusluvusta. Suurimman arvon tuottanut päivä on otettu mukaan vaiheeseen neljä.

Kuten kuvasta 5.8 nähdään, ovat kohteessa kolme maanantailta ja keskiviikolta määritetyt tunnusluvut selkeästi alhaisemmat kuin muilta arkipäiviltä määritetyt tunnusluvut. Kohteessa kaksi oli selkeästi vähemmän häiriölähteitä kuin kohteissa yksi ja kolme. Kohteen kaksi eri arkipäiviltä saaduista mittaustuloksista pienin osuus koko viikon ajalta määritetystä tunnusluvusta on 87 prosenttia. Tämän ja liikenteen

arkipäivästä riippumattomuuden perusteella voidaan todeta, että pahimmassakin tapauksessa yhdeltä arkipäivältä saatava tunnusluku vastaa kohtalaisen hyvin koko viikon ajalta määritettyä tunnuslukua. Parhaimmillaan eri kohteissa päästiin eri arkipäivinä seuraaviin osuuksiin koko viikon tunnusluvusta kohde 1: 86 %, kohde 2: 97 % ja kohde 3: 99 %. Parhaiten koko viikon arvoa vastaavan tuloksen saavuttamiseksi on olennaista selvittää, minä arkipäivänä suunnitellulla mittausviikolla kulkee eniten/raskaimmat tavarajunat ja milloin kohteessa esiintyy mittauksen kannalta vähiten ulkopuolisia häiriölähteitä.

Liitteiden 1, 2 ja 3 kuvissa 1.9, 2.9 ja 3.9 on esitetty eri kohteissa suurimman tunnusluvun tuottaneiden arkipäivien osalta mittaustulosten jakautuminen ajallisesti kyseiselle vuorokaudelle. Kuvien perusteella voidaan todeta, että tunnusluvun laskennassa käytettävät 15 suurinta kyseisen arkipäivän ohitusta jakautuvat lähes koko vuorokaudelle. Vain aamuyöllä ennen kello viittä ei ole yhdestäkään kolmesta kohteesta mittaustulosta, joka ylittäisi 15 suurimman joukkoon. Kyseisellä ajanjaksolla matkustajajunaliikenne on vähäistä, mutta mahdollisesti kulkevat tavarajunat liikennöivät usein juuri kyseisellä ajanjaksolla. Tästä syystä kuvissa esiintyvien mittausaikojen perusteella ei ole perusteltua jakaa mittausvuorokautta pienempiin mittausjaksoihin. Siitä syystä mittausjaksoksi päätettiin vaiheessa neljä valita kellonajat 06-18 sekä 18-06. Kyseiset ajanjaksot valittiin, koska yleensä eri häiriölähteiden, kuten esimerkiksi rakennustyömaiden, aiheuttamat häiriöt eivät ajoitu enää jälkimmäiselle mittausjaksolle.

Taulukko 5.9. Suurimman tunnusluvun tuottaneilta arkipäiviltä eri ajanjaksoilta lasketut tunnusluvut eri kohteissa sekä niiden suhteet koko viikon ajalta laskettuun tunnuslukuun. Vertailun vuoksi taulukossa on myös suurimman arkipäivän sekä koko viikon vastaavat arvot.

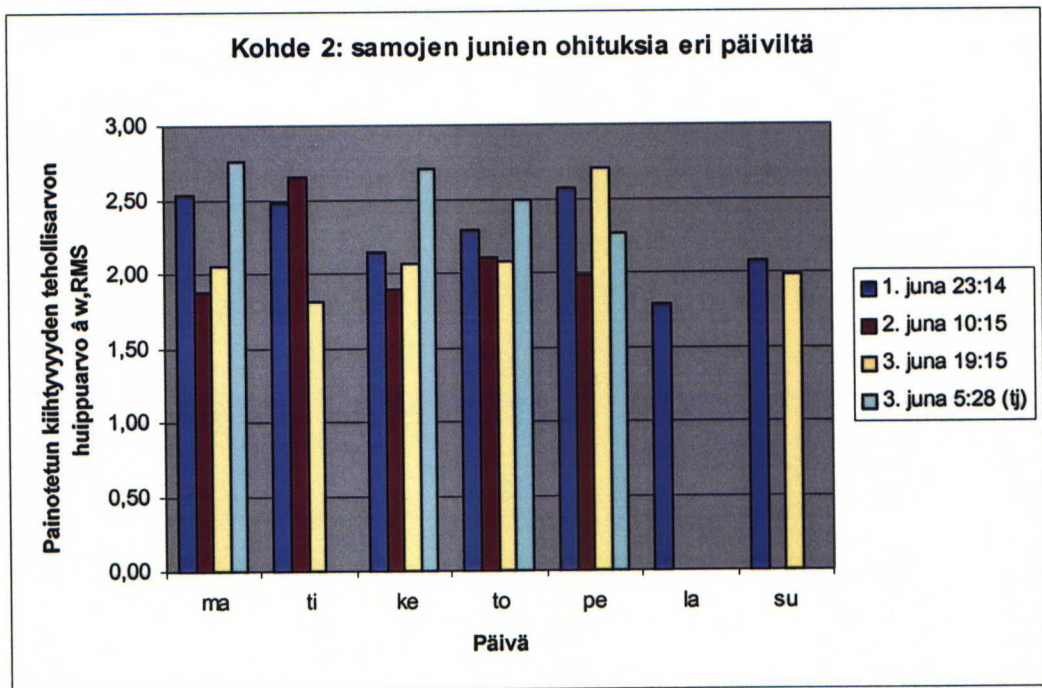
kohde	laskentaan valitut mittaus-tulokset	tavara-junien luku-määrä	keskiarvo μ [mm/s ²]	keski-hajonta σ [mm/s ²]	tunnus-luku $a_{w,95}$ [mm/s ²]	osuus viikon ajalta lasketusta tunnus-luvusta
1	koko viikko	1	1,74	0,25	2,20	100 %
	torstai	0	1,33	0,31	1,88	86 %
	torstai klo 06-18	0	1,32	0,31	1,88	86 %
	torstai klo 18-06	3	1,00	0,14	1,25	57 %
2	koko viikko	4	2,70	0,18	3,02	100 %
	maanantai	1	2,18	0,41	2,93	97 %
	maanantai klo 06-18	2	1,87	0,15	2,15	71 %
	maanantai klo 18-06	1	2,11	0,45	2,92	97 %
3	koko viikko	1	2,41	0,30	2,95	100 %
	tiistai	0	1,92	0,56	2,93	99 %
	tiistai klo 06-18	0	1,75	0,58	2,79	95 %
	tiistai klo 18-06	2	1,12	0,55	2,10	71 %

Taulukossa 5.9 on esitetty suurimman tunnusluvun tuottaneiden arkipäivien aikaväleiltä klo 06-18 ja klo 06-18 lasketut tunnusluvut. Tunnuslukujen laskenta on esitetty liitteiden 1, 2 ja 3 kuvissa 1.10, 1.11, 2.10, 2.11 sekä 3.10 ja 3.11. Kohteissa yksi ja kolme aikaväliltä 06-18 lasketut tunnusluvut vastasivat hyvin kyseiseltä arkipäivältä laskettua tunnuslukua, mutta kohteessa kaksi aikaväliltä 18-06 laskettu tunnusluku antoi paremman tuloksen. Liitteessä kaksi kuvassa 2.9 on esitetty kohteen kaksi suurimman tunnusluvun yhdeltä arkipäivältä tuottaneiden mittaustulosten jakauma vuorokaudelle. Vertaamalla näitä muiden kohteiden vastaaviin voidaan havaita, että kohteen kaksi tapauksessa suurempi osa mittaustuloksista on ajoittunut aikavälille klo 18-06.

Tässä kappaleessa on esitetty mittaustulokset, joiden perusteella voidaan todeta, että käyttämällä yhden arkivuorokauden mittaista mittaussjaksoa on mahdollista saavuttaa rautatieliikenteelle tunnusluku, joka on vain hieman viikon pituiselta mittaussjaksolta määritettyä tunnuslukua pienempi. Parhaaseen tulokseen päästään, jos mittaussvuorokausi voidaan valita siten, että kohteessa esiintyy mahdollisimman vähän ulkopuolisia häiriölähteitä ja tavarajunaliikenne on vilkkaimmillaan. Taulukossa 5.8 esitettyjen eri arkipäiviltä määritettyjen mittaustulosten perusteella voidaan havaita, että pahimmassakin tapauksessa yhden arkipäivän mittaustuloksen perusteella voidaan arvioida koko viikon ajalta saatava tunnusluku kertomalla kyseiseltä päivältä saatu tunnusluku kahdella. Taulukossa 5.7 esitettyjen tulosten

perusteella voidaan todeta, että kaikissa kohteissa saavutettiin arkipäiviltä määritetyn tunnusluvun avulla koko viikon tunnuslukua vastaava arvo. Vaiheessa neljä laskettiin tunnusluvut suurimman tunnusluvun tuottaneelta päivältä aikaväleillä klo 06-18 sekä 18-06. Näistä kumpikaan ei osoittautunut selkeästi paremmaksi.

VTT:n ohjeessa ei ole perusteltu viikon pituisia mittausjaksoja millään tavalla. Koska rautatieliikenteestä suurin osa ajoittuu arkipäiville, joiden osalta liikennöinti on päivittäin samanlaista, saadaan yhden vuorokauden aikana mitattua kaikki radalla viikon aikana liikennöivät matkustajajunat. Tavarajunaliikenne ei yleensä toistu päivittäin samanlaisena, vaan liikennöinti tapahtuu kulloisenkin tarpeen mukaan aikataulussa etukäteen tavarajunille varatuilla paikoilla. Näistä syistä on perusteltua valita mittausjaksoksi arkivuorokausi, jolla liikennesuunnittelun perusteella esiintyy eniten/raskaimmat tavarajunat. Viikon pituisella mittausjaksolla mitataan vain samoja junia useampaan kertaan eri päiviltä. Kuvassa 5.9 on esitetty kohteessa kaksi mitattuja samoja junia eri päiviltä. Kuvassa esitetyt junat on valittu siten, että ne edustavat kukin erilaista liikennöintijakaumaa viikon ajalta. 1. juna liikennöi kaikkina päivinä, 2. juna liikennöi vain arkipäivinä, 3. juna ei liikennöi lauantaisin ja 4. juna on tavarajuna, joka liikennöi tarpeen mukaan. Kuvasta voidaan havaita, että kyseisten junien osalta sopivia mittausvuorokausia ovat maanantai, keskiviikko, torstai ja perjantai, koska kaikki kuvan junat liikennöivät kyseisinä viikonpäivinä.



Kuva 5.9. Kohteessa kaksi samojen junien ohituksia eri päiviltä. 1. juna kulkee kaikkina viikonpäivinä, 2. juna kulkee vain arkipäivinä, 3. juna ei kulje ollenkaan lauantaisin ja 4. juna on tavarajuna, joka kulkee satunnaisina päivinä.

VTT:n ohjeeseen on suoraan otettu norjalaisen standardin ohjearvot sekä tunnusluvun määrittystapa tuloksista, mutta mittaustapa on erilainen. Norjan standardin ohjearvot perustuvat mittaus- sekä kyselytuloksiin yli 1400 kohteesta. Tästä syystä on oletettavaa, että norjalaisen standardin tapaan lyhyempää mittausjaksoa käyttämällä saavutetaan tunnusluku, joka on paremmin verrannollinen ohjearvoihin. VTT:n ohjearvot, jotka ovat siis samat kuin norjalaisen standardin, on esitetty taulukossa 5.10.

Taulukko 5.10. VTT:n ohjearvot rakennusten värähtelyluokituksesta. Luokista A on paras ja D huonoin (Talja, 2004a), (NS 8176.E. 1999).

värähtelyluokka	kuvaus värähtelyolosuhteista	suurin sallittu tunnusluku $a_{w,95}$ [mm/s ²]	suurin sallittu tunnusluku $v_{w,95}$ [mm/s]
A	Hyvät asuinolosuhteet. <i>Ihmiset eivät yleensä havaitse värähtelyitä.</i>	$\leq 3,6$	$\leq 0,10$
B	Suhteellisen hyvät olosuhteet. <i>Ihmiset voivat havaita värähtelyt mutta ne eivät ole häiritseviä.</i>	$\leq 5,4$	$\leq 0,15$
C	Suositus uusien rakennusten ja väylien suunnittelussa. <i>Keskimäärin 15 % asukkaista pitää värähtelyitä häiritsevinä ja voi valittaa häiriöistä.</i>	≤ 11	$\leq 0,30$
D	Olosuhteet, joihin pyritään vanhoilla asuinalueilla. <i>Keskimäärin 25 % asukkaista pitää värähtelyitä häiritsevinä ja voi valittaa häiriöistä.</i>	≤ 21	$\leq 0,60$

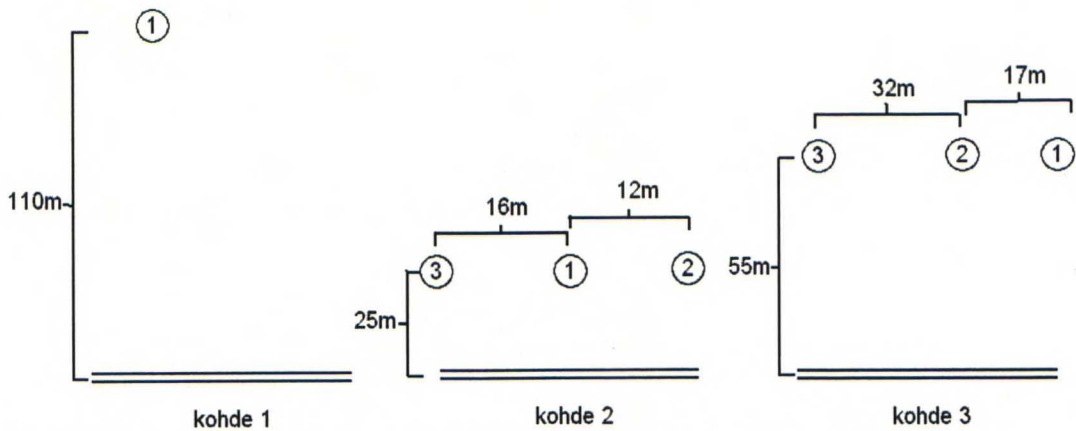
5.4.2 Tunnuslukujen vertailu eri mittauskanavissa

Kohteissa kaksi ja kolme käytettiin kolmea mittauskanavaa. Kohteessa yksi ei ollut mahdollista käyttää useampaa kuin yhtä mittauskanavaa, koska mittausalue oli pieni ja sen lähetyksillä oli toimintaa, joka olisi saattanut häiritä mittausta. VTT:n ohje ei ota kantaa mittauskanavien lukumäärään. Kohteissa kaksi ja kolme mittauspisteet sijaitsivat suunniteltujen rakennusten rataa lähinnä olevilla radan suuntaisilla julkisivuilla. Näin ollen mittauspisteet kohteissa olivat samalla etäisyydellä junaradasta, ja siten niistä saadut tulokset ovat vertailukelpoisia. Tuloksia tarkasteltaessa havaittiin, että mittauspisteiden välillä saattoi olla varsin suuria eroja.

Taulukko 5.11. Viikon pituiselta mittausjaksolta määritetyt tunnusluvut eri kanavissa.

kohde	kanava nro	keskiarvo μ [mm/s ²]	keski-hajonta σ [mm/s ²]	tunnusluku $a_{w,95}$ [mm/s ²]	osuus kaikkia kanavia käyttämällä saadusta tunnusluvusta
2	kaikki	2,70	0,18	3,02	100 %
	1	2,64	0,10	2,83	94 %
	2	1,35	0,08	1,50	50 %
	3	2,46	0,31	3,01	100 %
3	kaikki	2,41	0,30	2,95	100 %
	1	1,43	0,54	2,41	82 %
	2	1,70	0,45	2,51	85 %
	3	2,29	0,33	2,89	98 %

Taulukossa 5.11 on esitetty viikon pituisen mittausjakson tunnusluvut eri kanavista määritettyinä. Taulukossa kaikista kanavista tunnuslukua laskettaessa on kunkin junan aiheuttamat tasot huomioitu vain kanavasta, jossa värähtely oli voimakkainta. Anturien välimatka vaihteli välillä 12...49 metriä etäisyyden rataan pysyessä samana. Anturien sijainti toisiinsa ja junarataan nähden eri kohteissa on esitetty kuvassa 5.10. Taulukon 5.11 arvoja vertaamalla voidaan havaita, että kohteen kaksi kanava kaksi antaa jopa puolet pienemmän tunnusluvun viikon ajalta verrattuna kaikista kanavista määritettyyn tunnuslukuun. Taulukossa 5.8 esitettiin kohteen kaksi tunnusluvut eri arkipäiviltä. Laskenta on tehty kaikki mittauskanavat huomioimalla. Tuloksista pienin on 87 prosenttia verrattuna koko viikon tunnuslukuun kaikista kanavista. Havaitaan siis, että kohteessa kaksi mittauskanavien lukumäärästä voi seurata huomattavasti suurempi virhe lopputulokseen kuin mittausjakson lyhentämisestä yhteen arkipäivään. Kohteen kolme tapauksessa kanavat yksi ja kaksi tuottaisivat jonkin verran pienemmän tunnusluvun kuin kanava kolme. Molemmissa kohteissa kanava kolme tuotti hyvin kaikista kanavista määritettyä tunnuslukua vastaavan tunnusluvun. Tunnuslukujen laskenta eri kanavista on esitetty liitteiden kaksi ja kolme kuvissa 2.12, 2.13, 2.14 sekä 3.12, 3.13 ja 3.14.



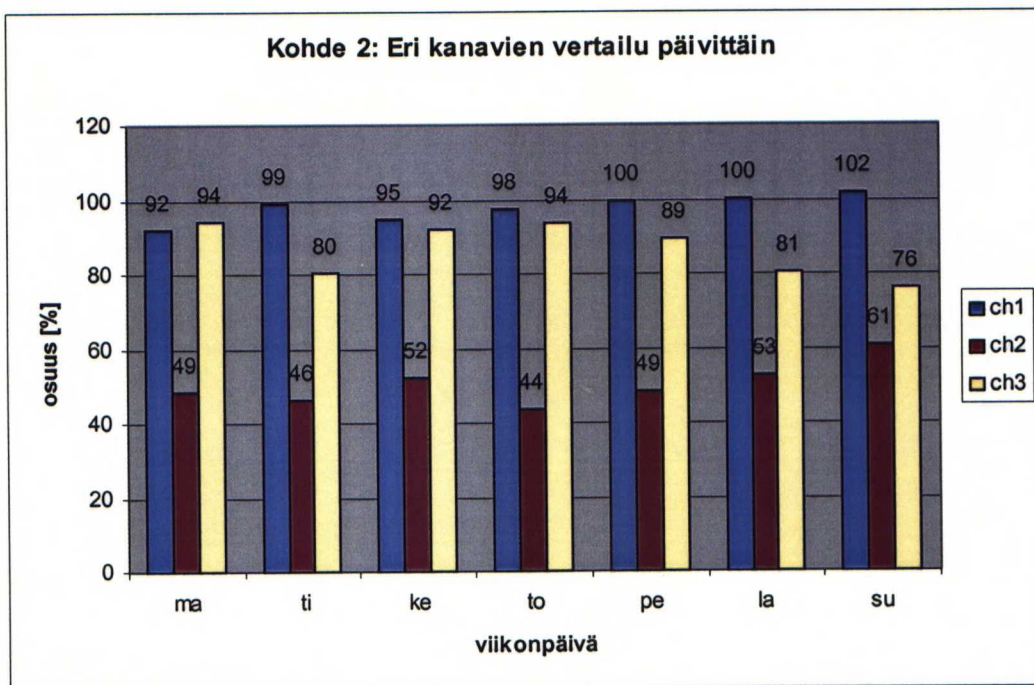
Kuva 5.10. Kiihtyvyyssantureiden sijainti toisiinsa ja junarataan nähden eri kohteissa. Kohteessa yksi käytettiin vain yhtä mittauspistettä ja kohteissa kaksi ja kolme käytettiin kolmea mittauspistettä.

Molemmissa kohteissa kaikki anturin oli asennettu samaan tapaan, eikä maanpintakerros eronnut silmämääräisesti tarkasteltuna mittauspisteiden välillä. Anturit sekä käytetyt kaapelit kalibroitiin ennen mittauksia. Asennuksessa, maanpintakerroksessa tai signaaliväylässä ei siten ollut eroja, jotka selittäisivät eri kanavista saatujen mittaustulosten eroavaisuuden. Oletettavasti mittaustulosten erilaisuus eri kanavissa selittyy värähtelyn erilaisena etenemisenä mittauspisteisiin. Kuten kappaleessa 1.3 esitettiin, voi esimerkiksi kovasta kalliopinnasta heijastuneen värähtelyn aiheuttama interferenssi kaksinkertaistaa värähtelyn amplitudin. Mikäli heijastunut värähtely on kuitenkin eri vaiheessa kuin suoraan vastaanottopisteeseen edennyt värähtely, saattaa värähtelyn amplitudi pienentyä. Tulosten perusteella on suositeltavaa käyttää useampaa kuin yhtä mittauspistettä.

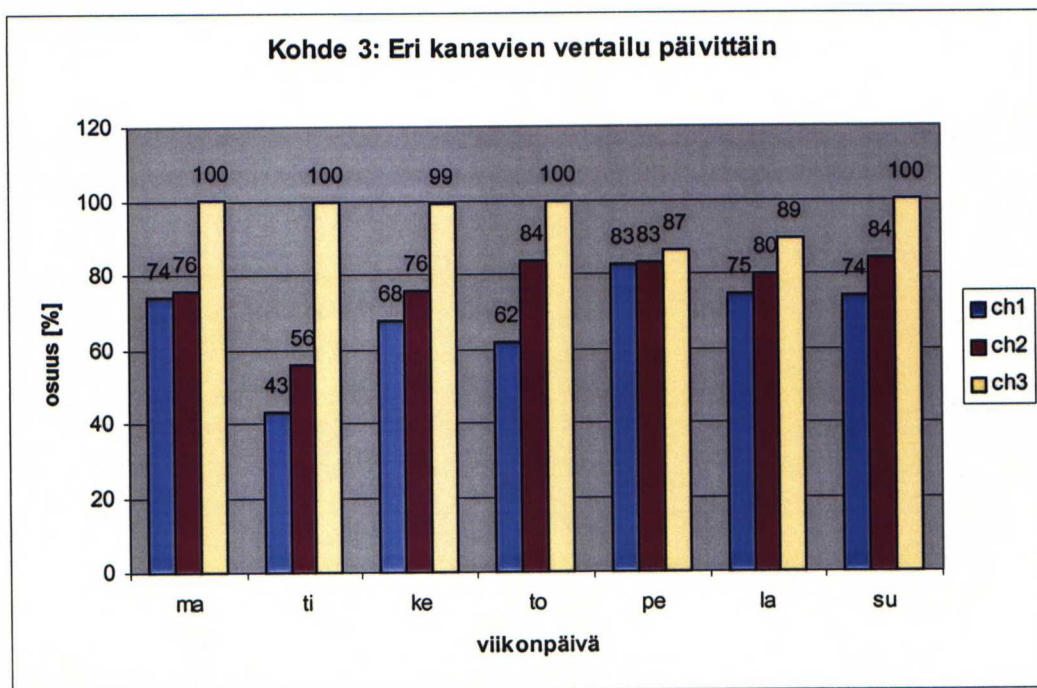
Taulukko 5.12. Kohteissa kaksi ja kolme eri vaiheissa laskettujen tunnuslukujen riippuvuus kustakin mittauskanavasta. Kohteessa kaksi mittauskanavan yksi arvot ovat useimmiten mukana tunnusluvun laskennassa, kun taas kohteessa kolme mittauskanavan kolme arvot ovat useimmiten mukana.

kohde	vaihe	laskentaan valitut mittaus- tulokset	mittaus- tulosten lukumäärä kanava 1	mittaus- tulosten lukumäärä kanava 2	mittaus- tulosten lukumäärä kanava 3
2	vaihe 1	koko viikko	10	0	5
	vaihe 2	arkipäivät	10	0	5
		viikonloppu	15	0	0
	vaihe 3	maanantai	12	0	3
		tiistai	14	0	1
		keskiviikko	13	0	2
		torstai	9	0	6
	vaihe 4	perjantai	11	0	3
		maanantai klo 06-18	14	0	1
		maanantai klo 18-06	11	0	4
3	vaihe 1	koko viikko	2	2	11
	vaihe 2	arkipäivät	1	2	12
		viikonloppu	1	4	10
	vaihe 3	maanantai	1	2	12
		tiistai	0	0	15
		keskiviikko	0	4	11
		torstai	0	3	12
	vaihe 4	perjantai	2	0	13
		tiistai klo 06-18	0	1	14
		tiistai klo 18-06	3	4	8

Taulukossa 5.12. on esitetty eri kanavista huomioitujen tulosten lukumäärä eri ajanjaksoilta laskettujen tunnuslukujen määrittämisessä. Kohteessa kaksi kanavan yksi ja kohteessa kolme kanavan kolme arvot ovat useimmiten mukana 15 suurimman mittaustuloksen joukossa. Kohteessa kaksi taulukon 5.11. perusteella kanava kolme antaa kuitenkin paremmin kaikista kanavista määriteltyä tunnuslukua vastaavan tuloksen. Tämä on mahdollista, vaikka kyseisen kanavan mittaustulosten keskiarvo onkin kanavan yksi keskiarvoa pienempi, koska kanavan kolme keskihajonta on huomattavasti kanavan yksi vastaavaa suurempi. Tunnusluvun laskennassa keskiarvo huomioidaan samansuuruisena mutta keskihajonta 1,8-kertaisena. Kuvissa 5.11 ja 5.12 on esitetty eri viikonpäiviltä kanavakohtaisesti määritetyn tunnusluvun osuus kyseisen päivän kaikista kanavista määritettyyn tunnuslukuun.



Kuva 5.11. Kohteesta kaksi päivittäin määriteltyjen kanavakohtaisten tunnuslukujen osuus kyseiseltä päivältä kaikista kanavista määritettyyn tunnuslukuun. Eri päivien arvot eivät nyt siis ole toisiinsa verrattavissa, vain mittauskanavien suhteet päivittäin.



Kuva 5.12. Kohteesta kolme päivittäin määriteltyjen kanavakohtaisten tunnuslukujen osuus kyseiseltä päivältä kaikista kanavista määritettyyn tunnuslukuun. Eri päivien arvot eivät nyt siis ole toisiinsa verrattavissa, vain mittauskanavien suhteet päivittäin.

Kuvissa 5.11 ja 5.12 esitettyjen arvojen perusteella voidaan selkeästi havaita, että kohteessa kaksi kanava yksi ja kohteessa kolme kanava kolme antavat päivittäin luotettavimman tuloksen värähtelystä. Tuloksista on selkeästi havaittavissa, että kanavien välillä on varsin suuriakin eroja. Erityisesti kohteessa kaksi kanava kaksi antaa jokaisella päivällä huomattavasti kanavia yksi ja kolme pienempiä arvoja. Kuten aiemmin todettiin, ei kanavien välillä havaittu asennuksesta, maanpintakerroksesta tai signaaliväylässä eroja. Koska mittauspaikalla ei silmämääräisesti ole mahdollista arvioida, missä kohdin värähtely mitattavalla alueella on voimakkainta, tulee mittausten luotettavuuden kannalta käyttää aina useampaa kuin yhtä mittauskanavaa.

5.4.3 Tulosten epävarmuudet

Mittauksissa suurin epävarmuus seuraa mittausjakson pituudesta. Koska mittausjakso oli valittu VTT:n ohjeen mukaisesti vähintään viikon pituiseksi, ei mittauksia voitu suorittaa miehitettynä. Tästä syystä mittauslaitteisto varustettiin äänen- sekä kuvantallennusvälineillä, jotka käynnistyivät aina mittauslaitteiston tallentaessa värähtelyä. Koska mittauskohteet sijaitsivat taajaan rakennetulla seudulla, oli mittaustulosten joukossa aina myös muiden kuin rautatieliikenteen aiheuttamia värähtelyitä. Mittaustulosten läpi käyminen on erittäin työlästä, eikä ääni- ja kuvatallenteiden avulla voida aukottomasti arvioida, onko mittauslaitteiden tallentama värähtely todella rautatieliikenteen aiheuttamaa. Usein viimeistään käyrämuodosta pystytään päättelemään, onko mittaustulokseen summautunut värähtelyitä jostakin muustakin lähteestä kuin rautatieliikenteestä. Täyttä varmuutta ei kuitenkaan voida koskaan saavuttaa. Joitakin tunnuslukuja laskettaessa jouduttiin näytteistä suuri osa hylkäämään, jolloin lopullinen tulos ei välttämättä enää ole yhtä luotettava kuin häiriöttömässä ympäristössä. Koska hylättyjen näytteiden joukossa osa on junien aiheuttamia, mutta joihin on summautunut ulkopuolinen häiriölähte, menetettiin myös osa tärkeistä mittaustuloksista. Lyhyemmällä mittausjaksolla mittaus on mahdollista suorittaa miehitettynä, jolloin mittaja pystyy varmistamaan mittaustulosten luotettavuuden.

Mittaustuloksien tarkastamiseen käytettiin lisäksi Valtion rautateiltä saatuja aikatauluja, joiden perusteella tarkistettiin, oliko mittaushetkellä kyseisessä kohteessa liikennöinyt matkustaja- vai tavarajuna. Mikäli junien liikennöinti ei jostain syystä tapahdu aikataulun mukaan, voi junien tunnistamisessa tulla virheitä. Koska aamuyöllä ei välttämättä liikennöi mahdollisten tavarajunien lisäksi muita junia, on mahdollista, että tavarajunat eivät välttämättä kulje tarkalleen aikatauluun merkittynä hetkenä.

Signaaliväylän sekä anturien toimivuus tarkistettiin aina ennen mittausten aloittamista kalibraattorin avulla. Kalibrointi suoritettiin, kun koko mittausketju kaikkine liittimineen, kaapeleineen ja antureineen oli kytketty mittausta vastaavaan kokoonpanoon. Näin saatiin varmistettua koko mittauksissa käytetyn signaaliketjun oikeanlainen toimivuus. Koska mikään osa käytetyssä signaaliketjussa ei muuttunut mittausten aikana eikä ympäristöolosuhteiden vaihtelun pitäisi vaikuttaa mittauslaitteistoon, voidaan olettaa, että käytetty signaaliväylä säilytti toimivuutensa koko mittausjakson ajan. Aiemmissa mittauksissa havaittiin, että anturien upottaminen maahan saattoi kosteilla maaperillä johtaa ongelmiin. Tässä työssä esitetyt mittaustulokset on kuitenkin saatu asentamalla anturi maanpinnan tasoon ja

kiinnittämällä se tangon avulla maaperään. Anturien asennusta käsiteltiin kappaleessa 5.3. Asennustavasta johtuva ominaistaajuus on selkeästi mittausalueen ulkopuolella, eikä siten aiheuta epävarmuutta mittaustuloksiin.

Norjassa on testattu standardin mukaista mittausmenetelmää ns. Round Robin-testillä. Testissä seitsemän eri yritystä kävi toisistaan riippumatta mittaamassa kaksi eri kohdetta. Standardissa todetaan, että eri mittaustahot voivat eri mittauslaitteistoilla saada hieman eri arvoja. Mittauslaitteiden, mittaajien ja mittaussajankohtien variaatioista johtuen sisältyy mittaukseen 20 prosentin epävarmuus (NS 8176.E. 1999), (Talja, 2003). Koska samat epävarmuustekijät sisältyvät myös viikon pituiseen mittausjaksoon, voidaan olettaa, että myös viikon pituisen mittausjakson epävarmuus on 20 prosentin luokkaa.

Koska mittaukset suoritetaan maanpinnasta, ei mittaustuloksissa voida havaita pinta-aallon amplitudin muutosta mittaussyvyyden suhteen. Tästä syystä on mahdollista, että rakennuksen perustukset altistuvat erisuuruiselle värähtelyllä kuin mittaustulos maanpinnalta antaisi odottaa. Ilmiön vaikutuksen suuruus riippuu maaperästä, rakennuksen perustuksista ja aallonpituudesta (ISO 4866. 1990). Lähdeaineistosta ei löydetty mainintoja tämän ilmiön vaikutuksesta.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn alkuosassa kuvattiin värähtelyn fysikaalinen luonne sekä sen etenemiseen ja vaimenemiseen yleisesti liittyvät tekijät. Osion tärkeimpiä asioita ovat värähtelyn luokittelu eri aaltotyyppeihin sekä näiden ominaisuudet. Aaltotyypeistä R-aalto (tunnetaan myös nimellä Rayleigh-aalto) sisältää suurimman osan energiasta, etenee maan pintakerroksissa ja vaimenee hitaimmin etäisyyden suhteen. Näistä ominaisuuksista johtuen sitä pidetään yleisesti haitallisimpana osana rautatieliikenteen aiheuttamasta värähtelystä. Haitallisinta värähtely on Suomessa yleisillä pehmeillä savimailla, joilla hallitsevat taajuudet ovat yleensä 5...15 Hz.

Työssä on tarkasteltu rautatieliikenteen aiheuttaman värähtelyn syntymistä, etenemistä ja vaimennuskeinoja kolmivaiheisesti. Tarkastelu on kunkin osalta jaettu lähteeseen, väliaineeseen sekä kohteeseen. Haittojen tarkastelussa keskityttiin vain kohteeseen. Yleistä kaikille tarkasteluvaiheille oli, että eri osien, esimerkiksi rakenteiden ja maaperän taajuustason ominaisuudet todettiin lopputuloksen kannalta merkitsevimmiksi. Värähtelyn haitallisuuden arvioinnissa värähtelyn sisältämän energian lisäksi tärkeimmäksi seikaksi todettiin värähtelyn taajuussisältö. Tästä syystä mittaustuloksien arvioinnissa on tärkeää käyttää ihmisen herkkyyttä eri taajuuksille vastaavaa taajuuspainotusta. Haitoista yleisimmäksi todettiin asumisviihtyvyyden laskeminen, mutta myös terveyshaitta ja jopa rakennusten vaurioituminen todettiin äärimmäisissä tapauksissa mahdollisiksi.

Vaimennuskeinojen tarkastelussa todettiin, että kaikki mahdolliset keinot ovat kalliita ja vaikeita toteuttaa jälkikäteen. Tästä syystä on tärkeää huomioida ja minimoida mahdolliset riskit jo suunnitteluvaiheen alussa. Olemassa olevan tilanteen ja suunnittelun tueksi tarvitaan aina värähtelymittauksia. Värähtelyn vaimennuskeinojen tuloksien todettiin olevan osittain ristiriitaisia ja tulosten vertailun vaikeaa.

Mittausjakson pituuden vaikutusta tutkittiin määrittämällä värähtelyn tunnuslukuja nelivaiheisesti. Ensimmäisessä vaiheessa tunnusluvut laskettiin VTT:n ohjeen mukaisesti viikon pituiselta mittausjaksolta. Toisessa vaiheessa tunnusluvut laskettiin samoja mittaustuloksia käyttämällä arkipäiviltä sekä viikonlopulta. Tuloksista havaittiin, että arkipäiviltä laskettu tunnusluku vastasi lähes täydellisesti koko viikon ajalta laskettua tunnuslukua. Viikonlopun ajalta laskettu tunnusluku oli noin neljänneksen pienempi kuin koko viikon ajalta laskettu tunnusluku.

Kolmannessa vaiheessa keskityttiin vain arkipäiviin ja jokaiselta arkivuorokaudelta laskettiin erikseen tunnusluvut. Yhden arkivuorokauden tunnusluvut olivat muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta enintään noin 20 prosenttia viikon ajalta määritettyä tunnuslukua alhaisempia. Poikkeukset johtuivat osittain häiriölähteistä, joiden vaikutuksesta suuri osa mittaustuloksista jouduttiin hylkäämään. Neljännessä vaiheessa suurimman tunnusluvun tuottanut arkivuorokausi jaettiin kahteen osaan. Aikavälit 06-18 ja 18-06 valittiin, koska jälkimmäisellä aikavälillä oletettiin häiriölähteiden vaikutusten yleensä olevan vähäisempiä. Neljännessä vaiheen tulokset olivat ristiriitaisia, koska kahdessa kohteessa aikaväli 06-18 tuotti paremmin vastaavan tuloksen ja yhdessä aikaväli 18-06.

Tässä työssä esitettyjen tulosten perusteella on suositeltavaa kertoa satunnaiselta arkivuorokaudelta määritetty tunnusluku luvulla kaksi, mikäli mittaukset on tehty runsaasti häiriölähteitä sisältävässä ympäristössä. Näin määritetty tunnusluku vastaa hyvin koko viikon ajalta määritettyä tunnuslukua siitakin huolimatta, että mittaustuloksista jouduttaisiin hylkäämään suuri osa häiriölähteiden vaikutuksen seurauksena.

Tulosten perusteella suositeltavampaa on kuitenkin valita mitattava arkivuorokausi siten, että mahdollisten häiriölähteiden vaikutus on joko minimoitu tai eliminoitu täysin. Näin saadusta tunnusluvusta, joka on määritetty vähän häiriöitä sisältävässä ympäristössä yhdeltä arkivuorokaudelta, voidaan määrittää koko viikon tunnusluku kertomalla se luvulla 1,25. Mitattavan arkivuorokauden aikana tulisi esiintyä mahdollisimman paljon tavarajunaliikennettä. Matkustajaliikenteen osalta liikennöinti on pääsääntöisesti vuorokaudesta riippumatonta lukuun ottamatta viikonloppuja, jolloin liikennöinti on yleensä vähäisempää. Näin ollen on oletettavaa, että arkivuorokauden pituisella mittausjaksolla saadaan kaikkien kohteissa liikennöivien matkustajajunien värähtelytasot mitattua. Tästä syystä viikon pituinen mittausjakso ei tuo lisäinformaatiota ja sen voidaan katsoa olevan perusteeton.

Mittaustuloksia eri mittauskanavien välillä verrattaessa havaittiin huomattavia eroja. Erot olivat jopa isompia kuin mittausjakson lyhentäminen viikosta arkivuorokauteen aiheutti. Tästä syystä on suositeltavaa käyttää useampaa kuin yhtä mittauskanavaa.

Koska VTT:n ohjeen suositusarvot ovat suoraan Norjan standardista, joka perustuu paljon lyhyempään mittausjaksoon, on oletettavaa, että suositusarvot korreloivat paremmin lyhyemmällä mittausjaksolla saatujen tulosten kanssa. Tästä syystä on tarpeen selvittää tulevaisuudessa tutkimuksissa, vastaavatko VTT:n ohjeen mukaisen mittausjakson tulokset suositusarvoja.

Rautatieliikenteen värähtelyn arvioinnin kannalta tulisi myös selvittää, miten suuri merkitys tärinähaitan kokemiseen on tärinälähteen esiintymistiheydellä ja kestolla. Meluhaittoja arvioitaessa määritetään usein ns. ekvivalenttitaso, joka tuottaa tietylle aikavälille keskimääräisen kohteessa esiintyvän äänitason sekä hetkellinen maksimiarvo, joka kuvaa kohteessa hetkellisesti esiintyvää suurinta äänitasoa. Värähtelyn arvioinnissa pitäisi pyrkiä yhden tunnusluvun sijasta meluhaitan arvioinnin tapaan kahteen arviointi kriteeriin, joista toinen huomioi värähtelylähteen keston ja esiintymistiheyden eli on ekvivalenttitaso, ja toinen huomioi hetkellisen huipputaso. Usein rautatieliikenteen värähtelystä koettu haitta kasvaa, mikäli samanaikaisesti esiintyy melua. Tästä syystä arviointimalli, joka huomioisi molemmat tekijät, kuvaisi vielä paremmin rautatieliikenteen ihmiselle tuottamaa haittaa.

Värähtelyhaitan arvioinnissa mittauskanavien lukumäärällä havaittiin olevan oleellinen merkitys. Tästä syystä on tarpeen määrittää, mikä on tarpeellinen määrä mittauskanavia eri tilanteissa luotettavan tuloksen saamiseksi. Tällä hetkellä mittausmenetelmät ovat keskittyneet mittaamaan värähtelyä maanpinnalta. Koska pinta-aallon amplitudi saattaa muuttua syvyyden suhteen, on tärkeää selvittää, miten suuri vaikutus tällä on haitan arvioinnissa.

Erilaisten vaimennusmenetelmien vertailun todettiin olevan hankalaa, koska niiden vaikutuksia on arvioitu usein täysin eri menetelmillä. Tärkeää olisi, että määritettäisiin mittaus tapa, jolla voidaan eri vaimennusmenetelmien tehokkuus arvioida. Tarkoituksenmukaista olisi, että tulokset ovat luotettavia ja vertailukelpoisia keskenään. Värähtelyn eteneminen väliaineessa ja rakenteissa riippuu taajuussisällöstä. Tästä syystä vaimennusmenetelmien tehokkuudet tulisi määrittää myös esimerkiksi oktaavikaistoittain. Vastaava käytäntö on yleisesti käytössä esimerkiksi ilmaston äänenvaimentimissa. Taajuuskaistaiset vaimennusarvot soveltuisivat erinomaisesti suunnittelutyön tueksi uusissa rakennuskohteissa.

LÄHDELUETTELO

Ahmad, S. ja Al-Hussaini T. M. 1991. Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117 p. 67-88.

Al-Hussaini, T. M. ja Ahmad, S. 1991. Design of wave barriers for reduction of horizontal ground vibration. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117 p. 616-636.

Bahrekazemi, M. 2004. Train-induced ground vibration and its prediction. Division of Soil and Rock Mechanics, Dept. of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm. 160+8 s.

Banverket ja Naturvårdsverket. 2006. Buller och vibrationer från spårburen linjetrafik – Riktlinjer och tillämpning. Tukholma: Banverket ja Naturvårdsverket. 58+40 s. Saatavilla:

http://www.banverket.se/upload/pdf/miljo/Buller/Buller_Vibr_riktlinj%20omarb%20version%202006-02-01.pdf [2006, 10/12]

Carnes, T. N., Meisel, P. W., Campell, S. D. ja Barutzki, F. 2003. Vibration and acoustic isolation of the Dallas convention center. Proceedings of building integration solutions, Architectural engineering 2003 conference. Austin, Texas, 17-20 September 2003. 4 s.

Dawn, T. M. ja Stanworth, C. G. 1979. Ground vibrations from passing trains. *Journal of Sound and Vibration*, 66, p. 355-362.

FRA. 1998. High-speed ground transportation noise and vibration impact assessment. Report no 293630-1. Washington: Federal Railroad Administration. 180+40 s.

Getzner Werkstoffe GmbH. 2006a. Ballast mats - Sylomer- ja Sylodyn-tuote-esite. 8 s. Saatavilla:

http://www.getzner.at/Werkstoffe/userupload/en/581_Unterschottermatte_Englisch.pdf [2006, 9/11].

Getzner Werkstoffe GmbH. 2006b. Elastic supports for slab tracks and ballast throughs – “Mass-spring” systems. 12 s. Saatavilla:

http://www.getzner.at/Werkstoffe/userupload/en/532_Masse-Feder-System_ENG.pdf [2006, 9/11].

Hakulinen, M. 1999. Rautatietärinän mittauskäytäntö pohjoismaissa, Ratahallintokeskuksen julkaisuja A5/1999. 23 s.

Halme, A. ja Seppänen, O. 2002. Ilmastoinnin äänitekniikka, Suomen LVI-yhdistysten liitto ry. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä 2002. 157 s.

Hassan, O. A. B. 2001. Transmission of structure-borne sound in buildings above railway tunnels. *Journal of building acoustics*, volume 8, number 4, 2001. p. 269-297.

Hassan, O. A. B. 2002. A tentative noise control method for buildings above railway tunnels. *Journal of building acoustics*, volume 9, number 3, 2002. p. 191-218.

Holm, G., Andréasson, B., Bengtsson, P.-E., Bodare, A., Eriksson, H. 2002. Mitigation of track and ground vibrations by high speed trains at Ledsgård, Sweden. Swedish deep stabilization research centre, report 10. 58 s.

ISO 2631-1. 1997. Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements. Geneva: International Organisation for Standardization. 31 s.

ISO 2631-2. 2003. Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz). Geneva: International Organisation for Standardization. 11 s.

ISO 4866. 1990. Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings. Geneva: International Organisation for Standardization. 18 s.

ISO 4866. 1990. 1. lisäys 1994. Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings. Amendment 1. Geneva: International Organisation for Standardization. 7 s.

ISO 4866. 1990. 2. lisäys 1996. Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings. Amendment 2. Geneva: International Organisation for Standardization. 8 s.

Karjalainen, M. 1999. Kommunikaatioakustiikka. Report 51, Helsinki University of Technology, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing. 237 s.

Lahti, T. 1997. Akustinen Mittaustekniikka. Raportti 38, 2. korjattu painos. Teknillinen korkeakoulu, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio. 153 s.

Laininen, P. 1998. Todennäköisyys ja sen tilastollinen soveltaminen. Otatiето 1998. 309 s.

Laki ympäristövahinkojen korvaamisesta n:o 737. 1994. Suomen säädöskokoelma. Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1994/19940737> [2006, 9/5].

Levomäki, M. 1999. Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisu A3/1999. 37+5 s.

Ljunggren, S. 1991. Transmission of structure-borne sound in buildings above railways. *Applied acoustics* 34. p. 193-205.

Massarsch, K. R., Bodare, A. ja Smekal, A. 2002. Vibrationsproblem från spårbunden trafik – Effects of vibrations from railway traffic. *PrognosVib. Prognos av vibrationer från spårbunden trafik, delrapport 1.* 113+38 s.

Massarsch, K. R. 2004. Keynote lecture, 11th International Conference on Soil Dynamics and 3rd on Earthquake Geotechnical Engineering, Berkley, January 7-9, 2004. 10 s.

Massarsch, K. R. 2005. Keynote lecture, GEOFRONTIERS 2005 – International Conference, American Society of Civil Engineers, January 24 – 26, 2005, Austin Texas. 20 s.

MMF. 2006a. Metra Mess- und Frequenztechnik in Redebeul e.K. AN3E Application note, Piezoelectric accelerometers, Accelerometer designs. 2s. Saatavilla: http://www.mmf.de/PDF/AN3E-Accelerometer_Designs.pdf [2006, 9/22]

MMF. 2006b. Metra Mess- und Frequenztechnik in Redebeul e.K. High sensitivity accelerometers. 2 s. Saatavilla: <http://www.mmf.de/PDF/1-5.pdf> [2006, 9/22]

MMF. 2006b. Metra Mess- und Frequenztechnik in Redebeul e.K. ICP compatible accelerometers. 2 s. Saatavilla: http://www.mmf.de/PDF/AN4E-ICP-Compatible_Accelerometers.pdf [2006, 9/22]

MMF. 2006d. Metra Mess- und Frequenztechnik in Redebeul e.K. AN8E Application note, Piezoelectric accelerometers, Accelerometer mounting. 3s. Saatavilla: http://www.mmf.de/PDF/AN8E-Accelerometer_Mounting.pdf [2006, 9/22]

Nordvib. 2001. Joint Nordic Railway Vibration Research Project. WP1 Existing regulations, Summary report of Swedish, Finnish and Norwegian Regulations. Banverket, Jernbaneverket, Ratahallintokeskus.16+51 s.

NS 8176.E 1999. Vibration and Shock – Measurement of vibration in buildings from landbased transport and guidance to evaluation of its effects on human beings. 28 s.

Peltonen, T. Backholm, M. ja Lahti, T. 2005. Raideliikenteen melu- ja värähtelytutkimuksia. Akustiikkapäivät 2005, Kuopio, 26.-27.9.2005. Otamedia Oy. s 135-140.

Rakennuslehti, 17.8.2006. Koriolla kokeillaan syvästabilointia ratatärinän estämiseksi. 40 vuosikerta. ISSN 0033-9121. 24 s.

Rakennuslinja-lehti, 1-2/2004. Mittatekniikan keskuksen toimitalo teknisesti vaativimpia rakennuskohteita Suomessa. Rakennusalan verkkoaikakausjulkaisu nro 1-2 2004. 7 s. Saatavilla: http://www.mikes.fi/documents/upload/mikesin_toimitalo.pdf [2006 9/21]

SRakMK, B3. 2004. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa B3. Ympäristöministeriön asetus pohjarakenteista. 29+1 s.

Talja, A., Toratti, T. ja Järvinen, E. 2002. Lattioiden värähtelyt – Suunnittelu ja kokeellinen arviointi, VTT tiedotteita 2124. 50+18 s.

Talja, A. 2003. Liikenneperäinen tärinä – Kirjallisuusselvitys raja-arvoista ja tärinän mittaamisesta, VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-5/2003. 46+6 s.

Talja, A. 2004a. Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta, VTT tiedotteita 2278. 50+22 s.

Talja, A. 2004b. Liikenneperäinen tärinä – Kirjallisuusselvitys tärinän arvioinnista, VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-13/2004. 41 s.

Talja, A. 2004c. Liikenneperäinen tärinä – Rakennuksen vaikutus värähtelyihin, VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-19/2004. 48+17 s.

Törnqvist, J. ja Komulainen, H. 1993. Junaliikennetärinä, tutkimusraportti nro 174/93, VTT Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. 82+145 s.

Törnqvist, J. ja Nuutilainen O. 2002. Rautatieliikenteen tärinän vaikutus rakenteisiin, vaurioalttiuden kartoittaminen ja mittaaminen, Luonnos, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 56+ 20 s.

Törnqvist, J. ja Talja, A. 2006. Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa, VTT working papers 50. 46+34 s.

Valtioneuvoston päätös n:o 993. 1992. Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista. Valtioneuvosto. Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1992/19920993> [2006, 8/28]

Välilikylä, T. 2005. Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä. 144 s.

Ympäristönsuojelulaki n:o 86. 2000. Ympäristönsuojelulaki. Ympäristöministeriö. Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2000/20000086> [2006, 8/28]

Ympäristöopas 97. 2002. Raideliikennemelun laskentamalli. Ympäristöministeriö, ympäristösuojeluosasto. 29+29 s. Saatavilla: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=5383&lan=fi> [2006, 8/28]

LIITTEET

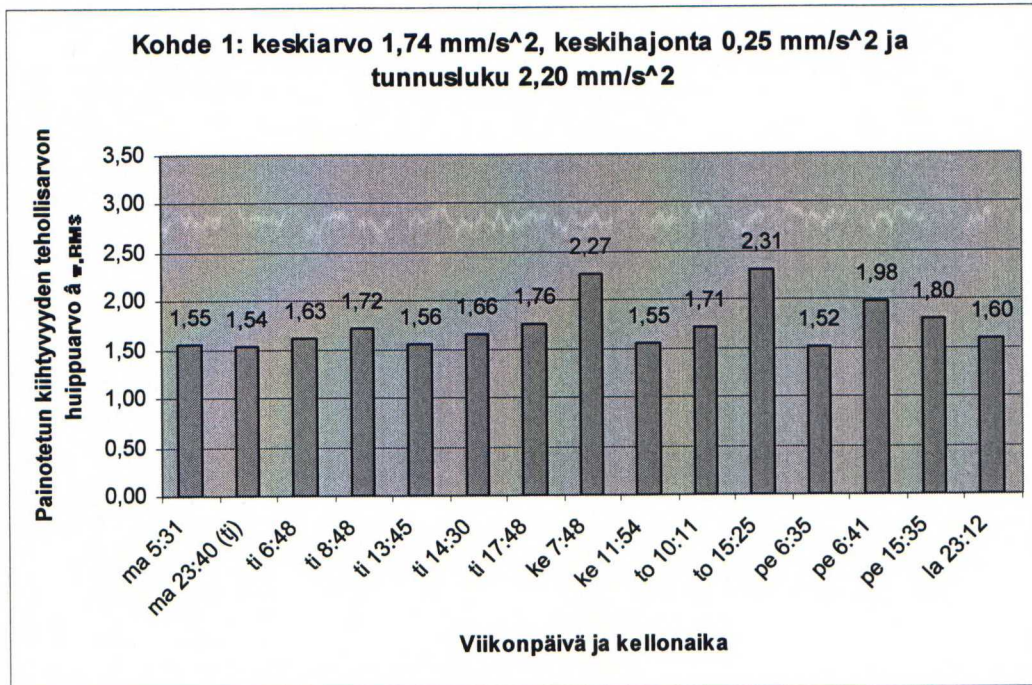
1 Kohde 1: Eri ajanjaksoilta määritettyjen tunnuslukujen laskennassa käytetyt tulokset	2
1.1 Vaihe 1	3
1.2 Vaihe 2	4
1.3 Vaihe 3	5
1.4 Vaihe 4	8
2 Kohde 2: Eri ajanjaksoilta määritettyjen tunnuslukujen laskennassa käytetyt tulokset	10
2.1 Vaihe 1	11
2.2 Vaihe 2	12
2.3 Vaihe 3	13
2.4 Vaihe 4	16
2.5 Eri kanavien vertailu	18
3 Kohde 3: Eri ajanjaksoilta määritettyjen tunnuslukujen laskennassa käytetyt tulokset	20
3.1 Vaihe 1	21
3.2 Vaihe 2	22
3.3 Vaihe 3	23
3.4 Vaihe 4	26
3.5 Eri kanavien vertailu	28

1 KOHDE 1: ERI AJANJAKSOILTA MÄÄRITETTYJEN TUNNUSLUKUJEN LASKENNASSA KÄYTETYT TULOKSET

Tässä liitteessä on esitetty eri ajanjaksoilta määritettyjen tunnuslukujen laskennassa käytetyt mittaustulokset kohteessa yksi. Tunnusluku on laskettu käyttämällä 15 suurimman taajuuspainotetun tehollisarvon huippuarvon tuottanutta mittaustulosta. Ensiksi esitetään vaiheen yksi mittaustulokset, jotka on laskettu käyttäen viikon pituista mittausjakso. Ensimmäinen vaihe vastaa siis VTT:n ohjeen ”Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta” mukaan määriteltyä tunnuslukua. Toisessa vaiheessa tunnusluvut on laskettu käyttämällä ajanjaksoina arkipäiviä sekä viikonloppua. Kolmannessa vaiheessa tunnusluvut on määritetty jokaiselta arkipäivältä erikseen. Neljännessä vaiheessa isoimman tunnusluvun tuottaneilta arkipäiviltä on laskettu tunnusluvut ottamalla laskentaan mukaan vain kyseisen päivän mittaustulokset tietyiltä ajanjaksoilta.

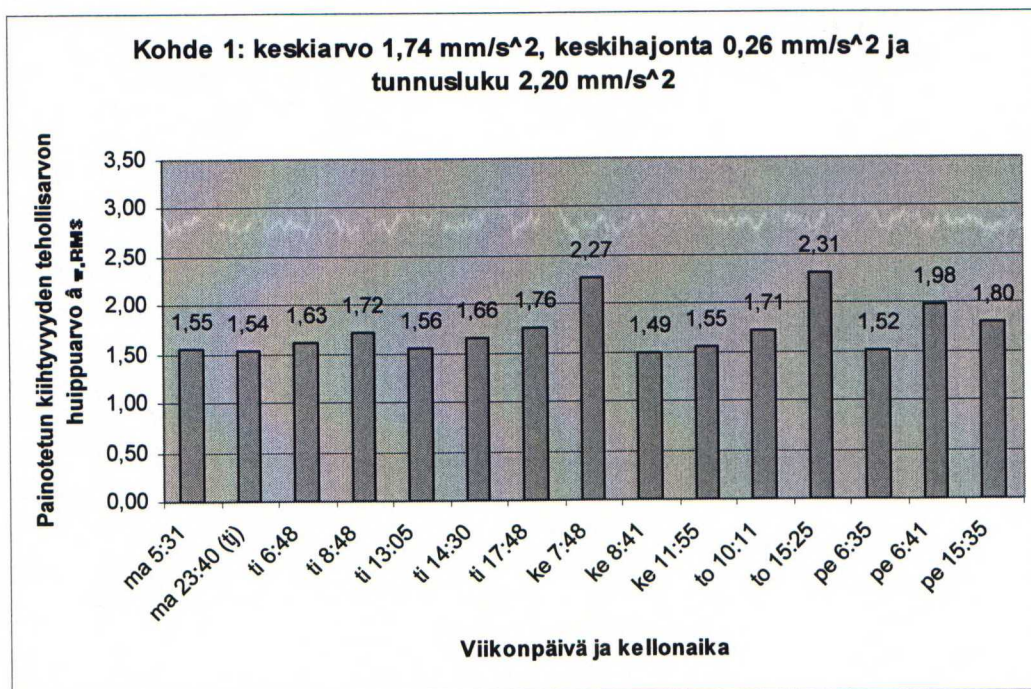
Kohteessa yksi käytettiin vain yhtä mittauskanavaa, koska mittausalue oli pinta-alaltaan pieni ja sitä ympäröi rakennettu kaupunkiympäristö. Useamman mittauskanavan sijoittamista aivan viereen ei pidetty järkevänä. Etäisyys junaradasta oli noin 110 metriä ja raiteiden lukumäärä 4. Raiteita oli monta, koska mittauspiste sijaitti aseman läheisyydessä. Tavarajunat on merkitty käyttämällä lyhennettä (tj) päivän ja kellonajan perässä. Mikäli jokin juna on laskennassa useampaan kertaan eri päiviltä mitattuna, on se merkitty *-merkillä.

1.1 Vaihe 1

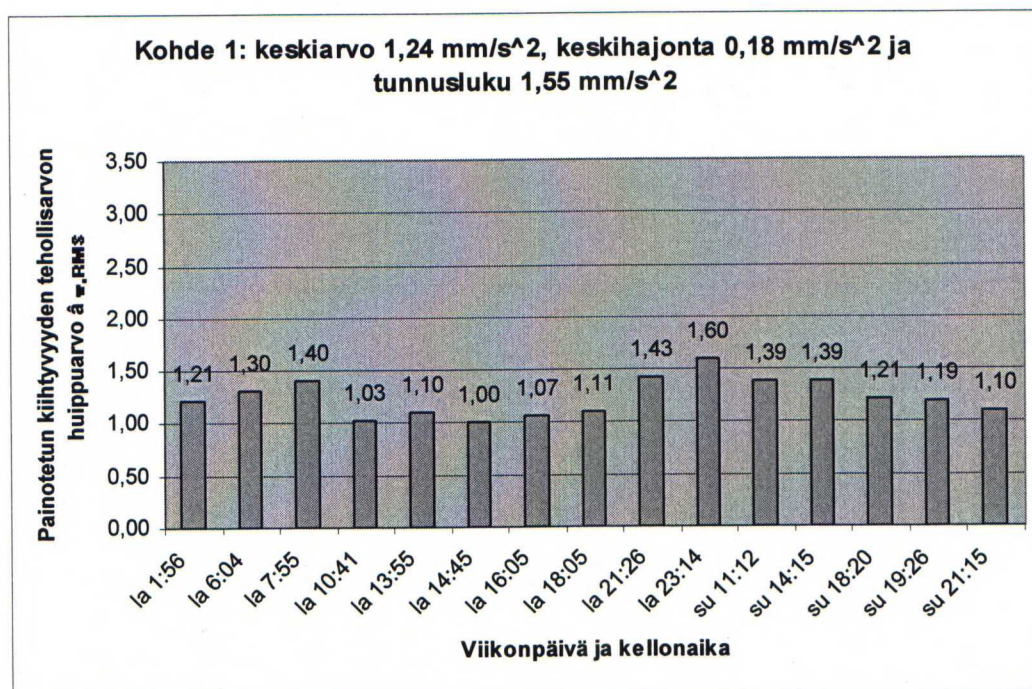


Kuva 1.1. Vaiheen yksi tunnusluvun laskennassa käytetyt 15 suurinta mittaustulosta.

1.2 Vaihe 2

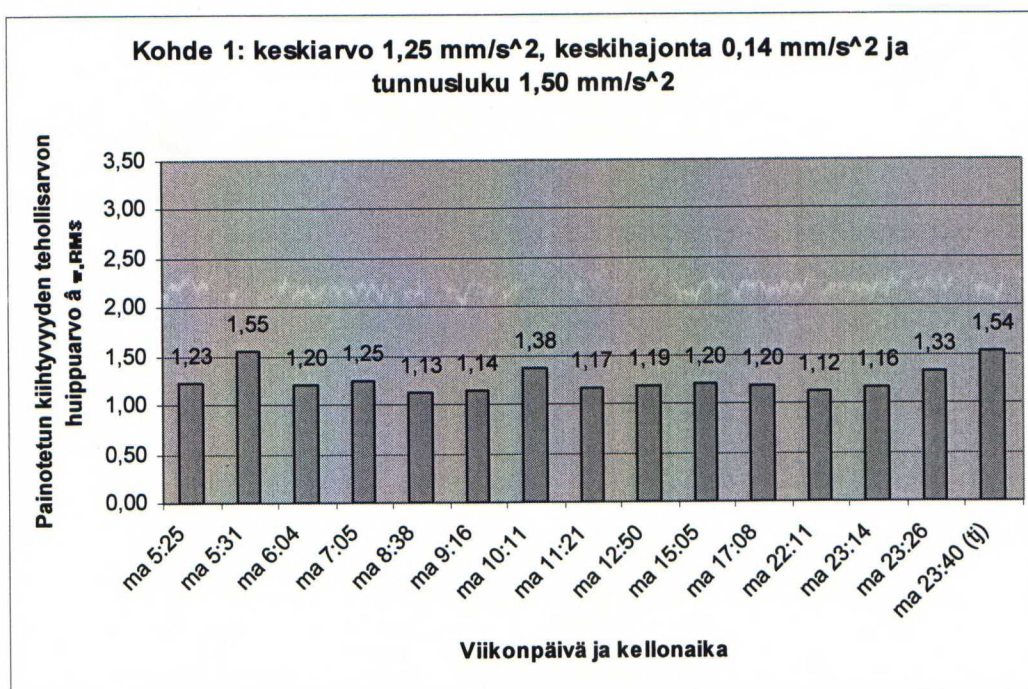


Kuva 1.2. Vaiheen kaksi tunnusluvun laskennassa arkipäiviltä käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 100 %.

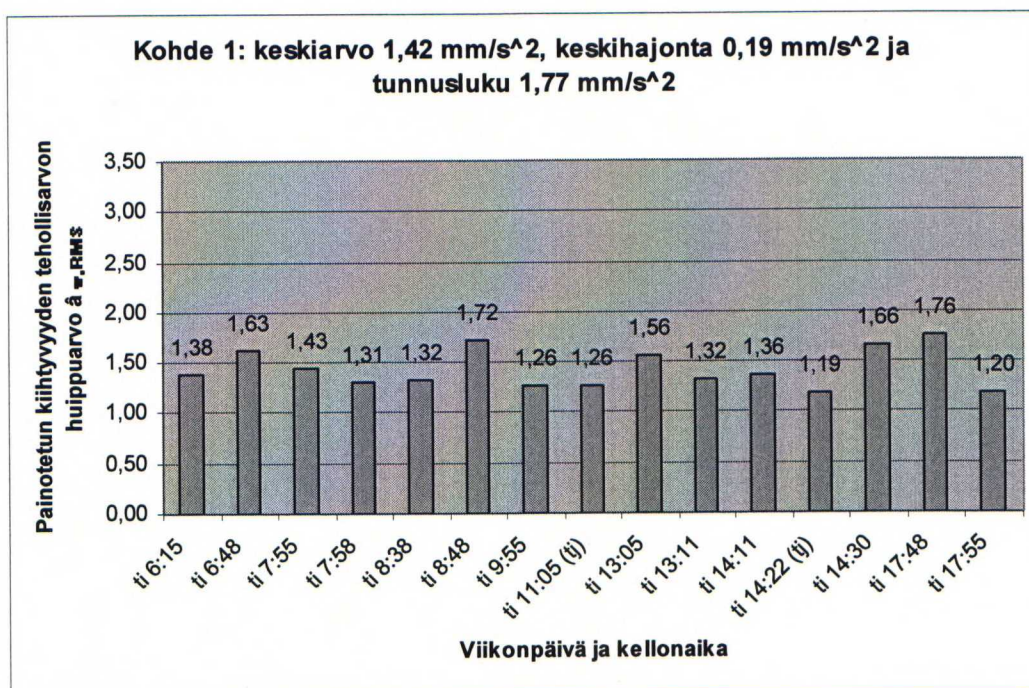


Kuva 1.3. Vaiheen kaksi tunnusluvun laskennassa viikonlopulta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 71 %.

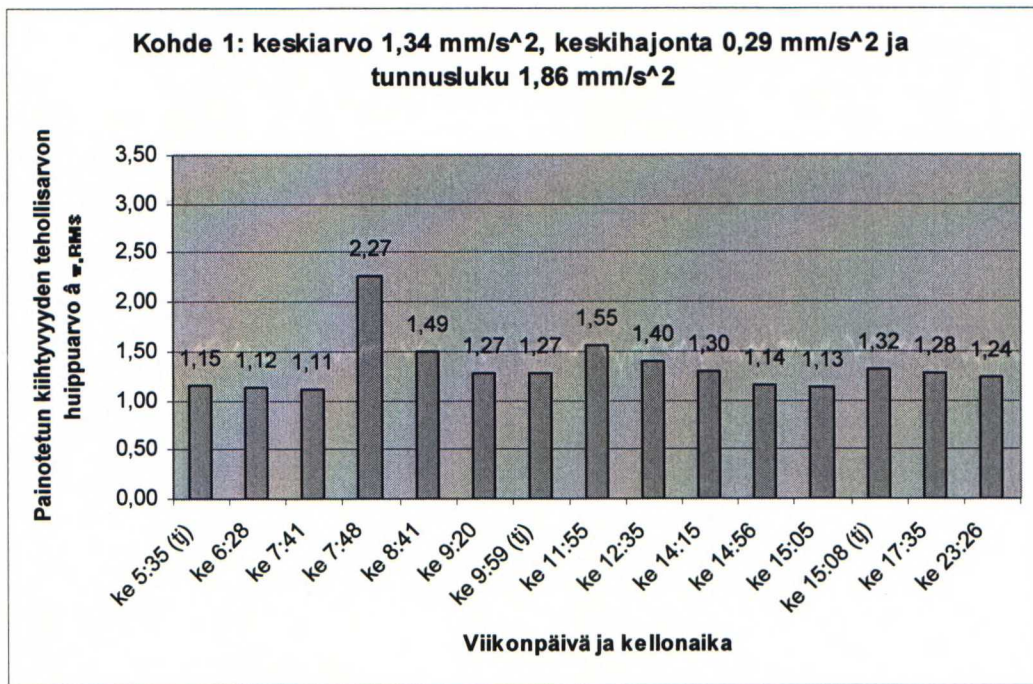
1.3 Vaihe 3



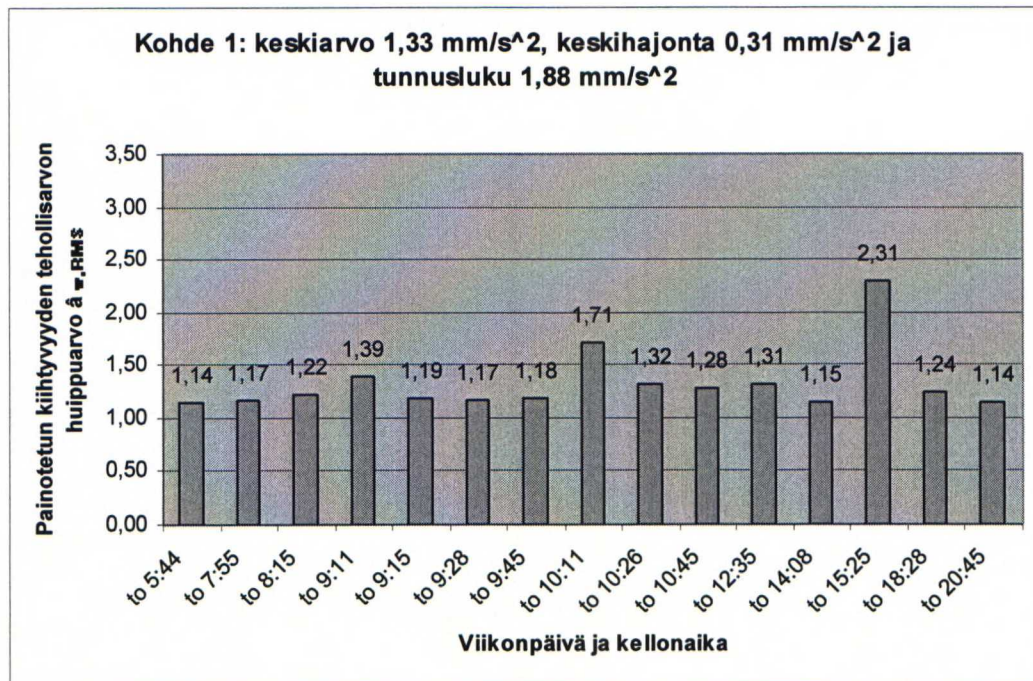
Kuva 1.4. Vaiheen kolme tunnusluvun laskennassa maanantailta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 68 %.



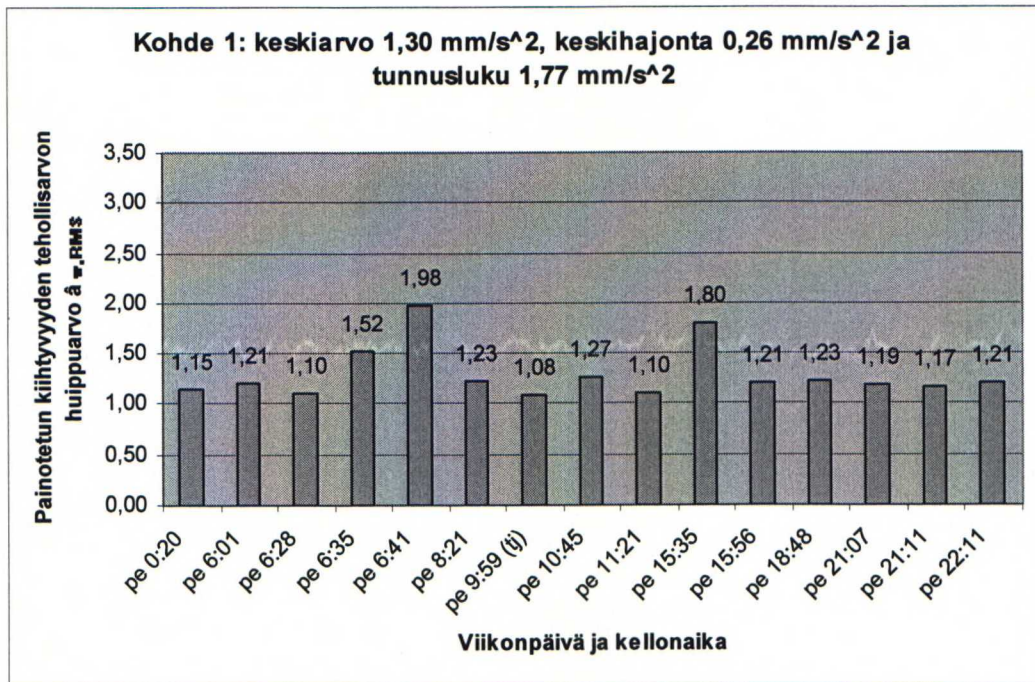
Kuva 1.5. Vaiheen kolme tunnusluvun laskennassa tiistailta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 81 %.



Kuva 1.6. Vaiheen kolme tunnusluvun laskennassa keskiviikolta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 84 %.

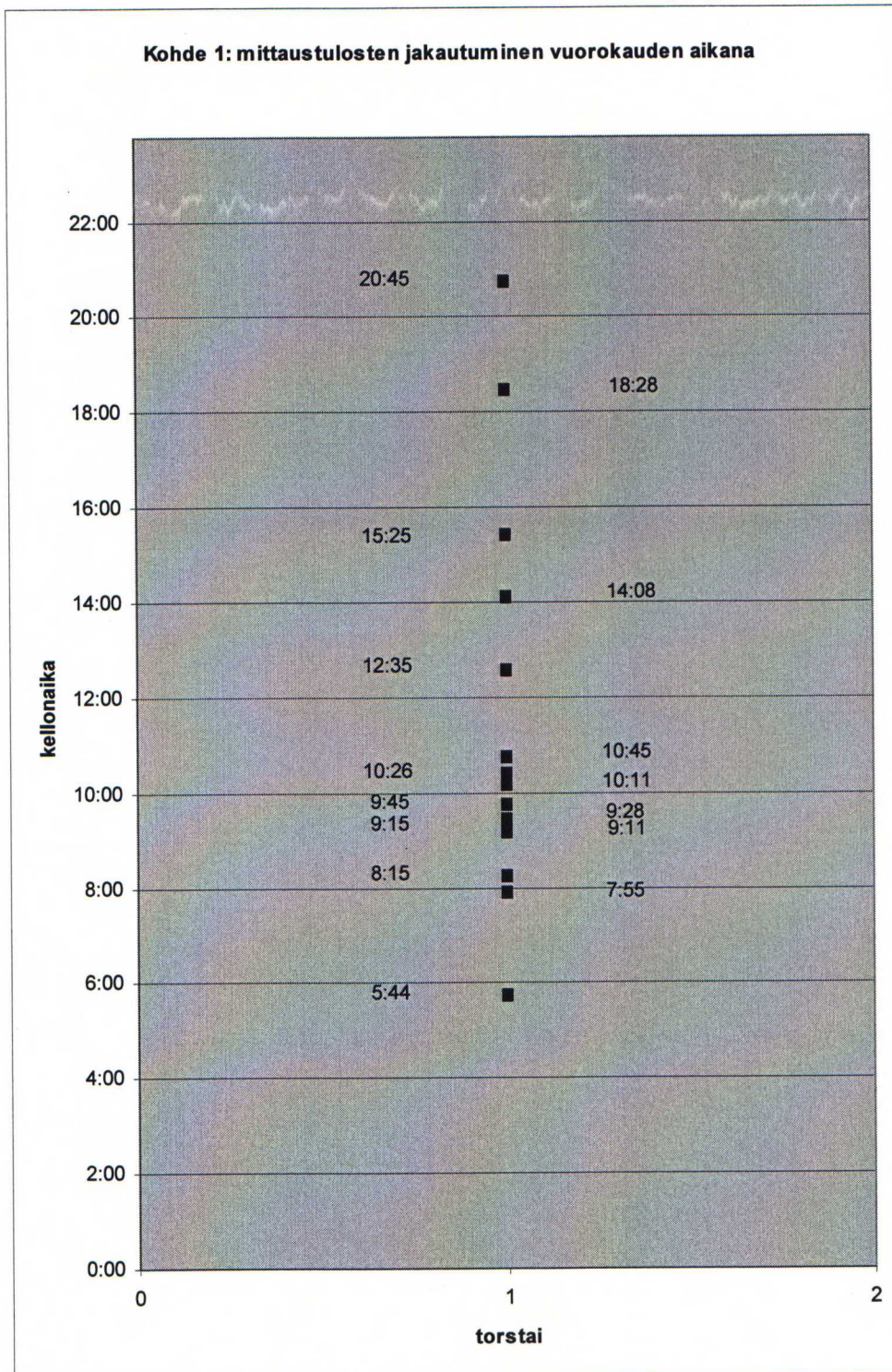


Kuva 1.7. Vaiheen kolme tunnusluvun laskennassa torstailta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 86 %.

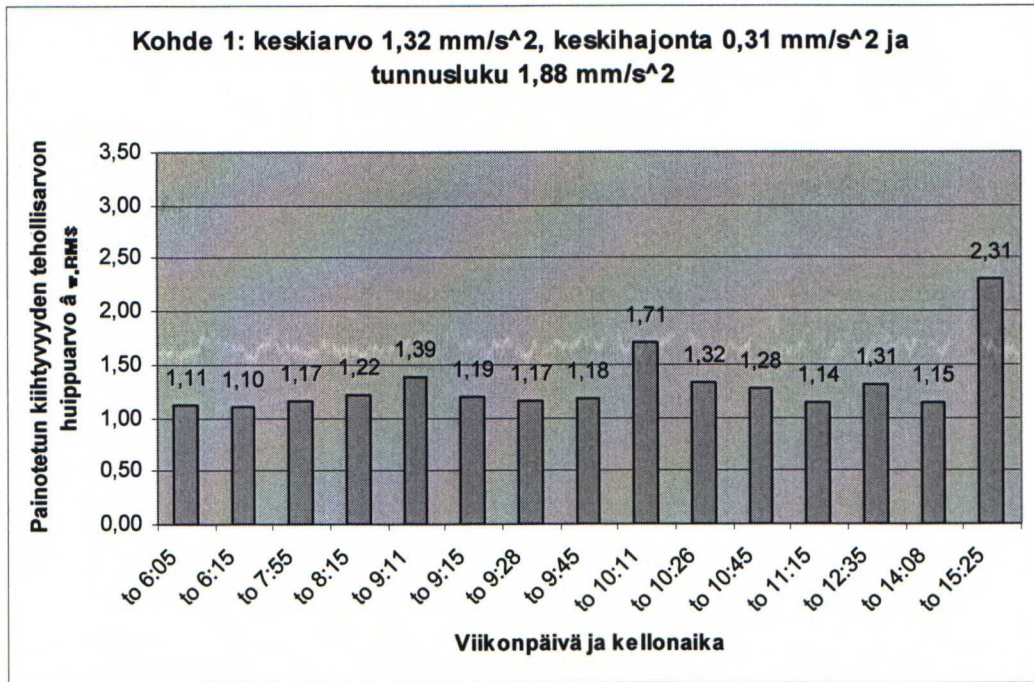


Kuva 1.8. Vaiheen kolme tunnusluvun laskennassa perjantailta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 81 %.

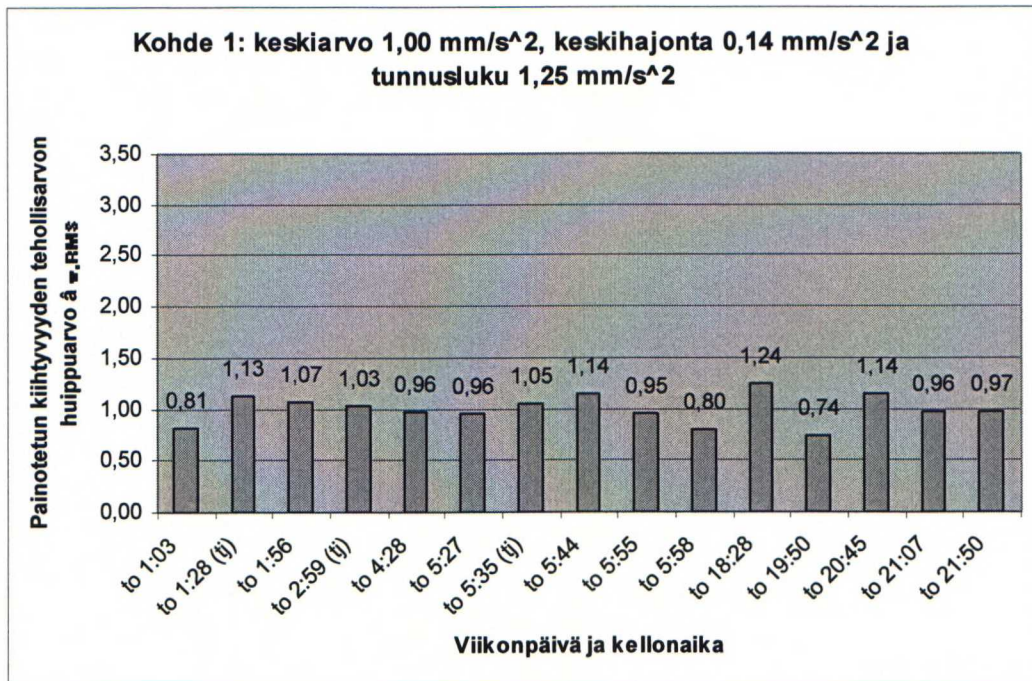
1.4 Vaihe 4



Kuva 1. 9. Suurimman tunnusluvun tuottaneen arkipäivän mittaustulosten jakautuminen vuorokaudelle.



Kuva 1.10. Vaiheen neljä tunnusluvun laskennassa torstailta klo 06-18 käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 86 %.



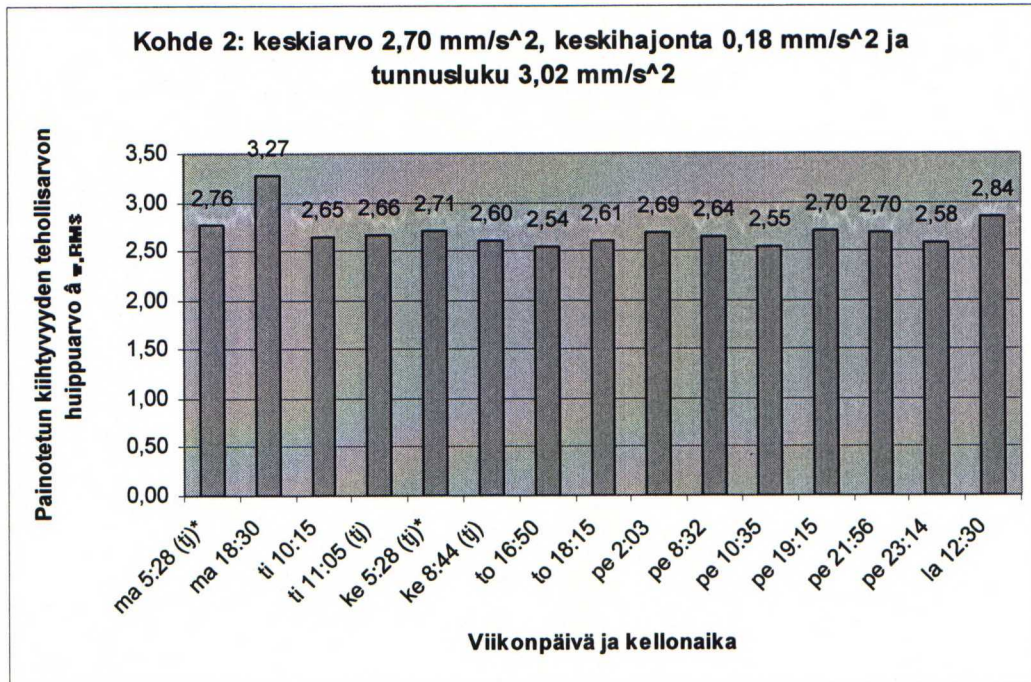
Kuva 1.11. Vaiheen neljä tunnusluvun laskennassa torstailta klo 18-06 käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 57 %.

2 KOHDE 2: ERI AJANJAKSOILTA MÄÄRITETTYJEN TUNNUSLUKUJEN LASKENNASSA KÄYTETYT TULOKSET

Tässä liitteessä on esitetty eri ajanjaksoilta määritettyjen tunnuslukujen laskennassa käytetyt mittaustulokset kohteessa kaksi. Tunnusluku on laskettu käyttämällä 15 suurimman taajuuspainotetun tehollisarvon huippuarvon tuottanutta mittaustulosta. Ensiksi esitetään vaiheen yksi mittaustulokset, jotka on laskettu käyttäen viikon pituista mittausjakso. Ensimmäinen vaihe vastaa siis VTT:n ohjeen ”Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta” mukaan määriteltyä tunnuslukua. Toisessa vaiheessa tunnusluvut on laskettu käyttämällä ajanjaksoina arkipäiviä sekä viikonloppua. Kolmannessa vaiheessa tunnusluvut on määritetty jokaiselta arkipäivältä erikseen. Neljännessä vaiheessa isoimman tunnusluvun tuottaneilta arkipäiviltä on laskettu tunnusluvut ottamalla laskentaan mukaan vain kyseisen päivän mittaustulokset tietyiltä ajanjaksoilta.

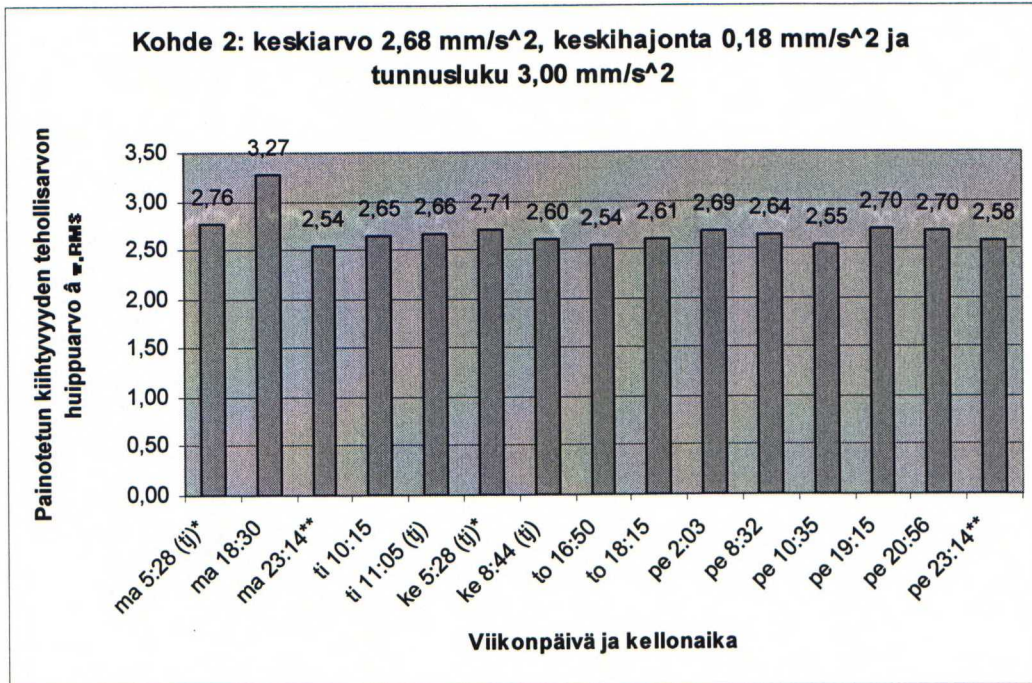
Kohteessa kaksi käytettiin kolmea mittauskanavaa. Etäisyys junaradasta oli noin 25 metriä ja raiteiden lukumäärä 2. Mittaustuloksista huomioitiin kunkin junan ohituksesta osalta suurimman tuloksen tuottanut mittauskanava. Näin ollen ei ole mahdollista, että sama ohitus huomioitaisiin tunnusluvun laskennassa jokaisesta kanavasta saadun tuloksen perusteella erikseen. Tavarajunat on merkitty käyttämällä lyhennettä (tj) päivän ja kellonajan perässä. Mikäli jokin juna on laskennassa useampaan kertaan eri päiviltä mitattuna, on se merkitty *-merkillä.

2.1 Vaihe 1

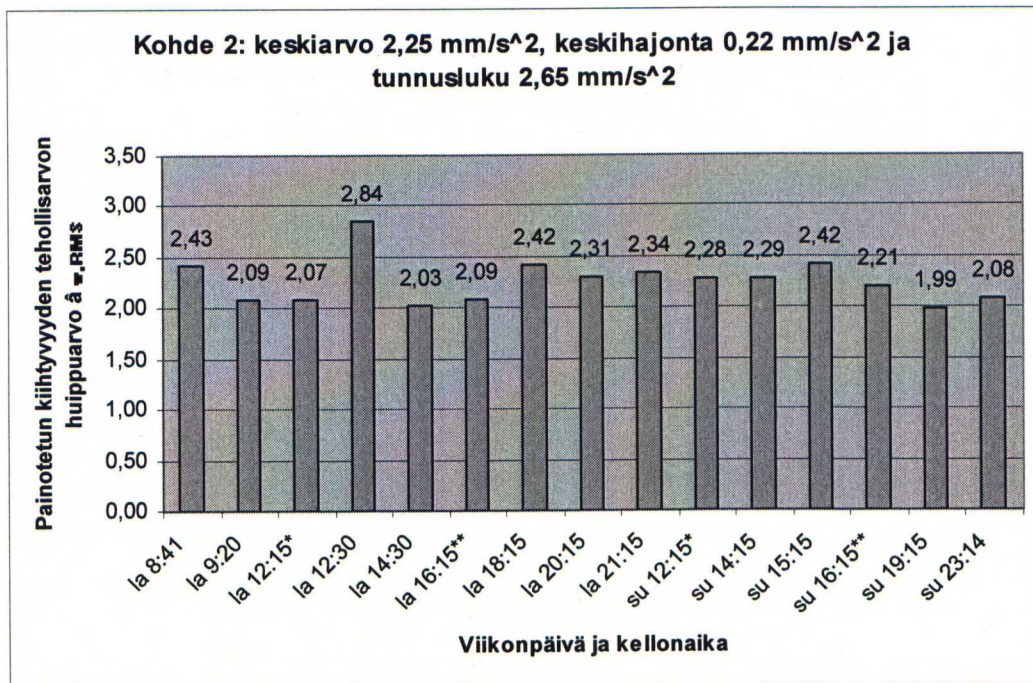


Kuva 2.1. Vaiheen yksi tunnusluvun laskennassa käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Tavarajunan mittaustulos on kahteen kertaan eri päiviltä.

2.2 Vaihe 2

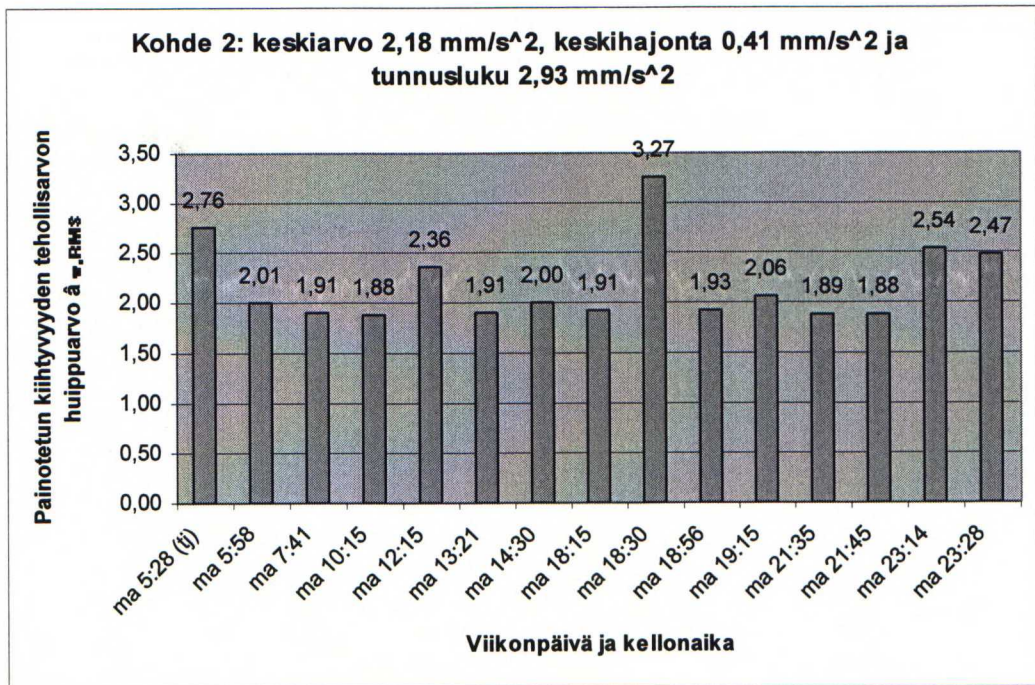


Kuva 2.2. Vaiheen kaksi tunnusluvun laskennassa arkipäiviltä käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Yhden tavara- ja matkustajajunan mittaustulos on kahteen kertaan eri päiviltä. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 99 %.

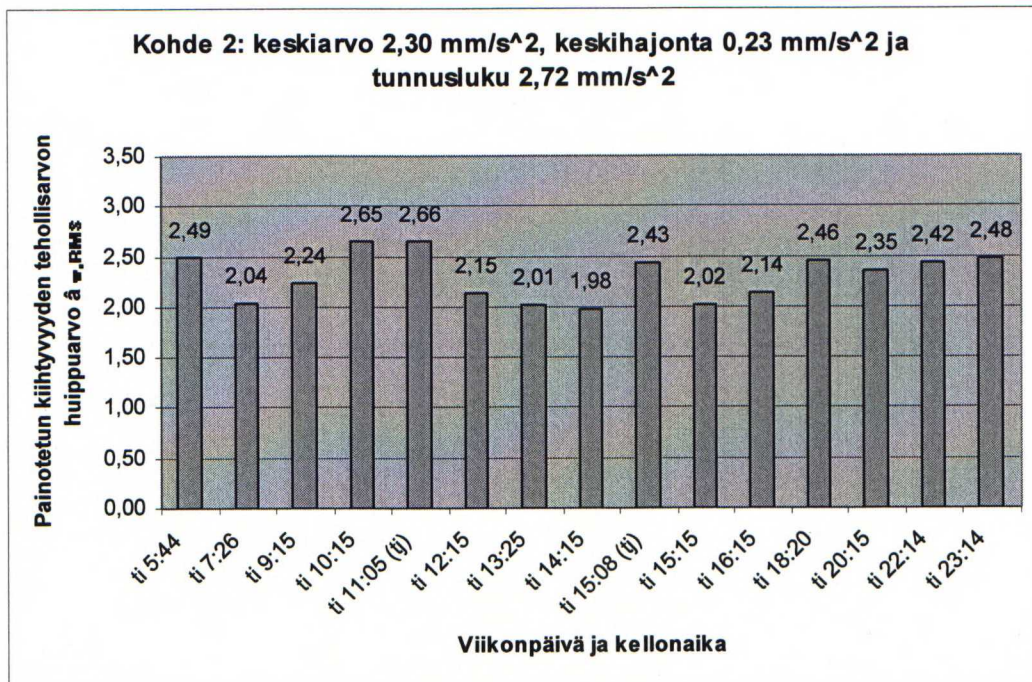


Kuva 2.3. Vaiheen kaksi tunnusluvun laskennassa viikonlopulta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kahden matkustajajunan mittaustulos on kahteen kertaan eri päiviltä. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 88 %.

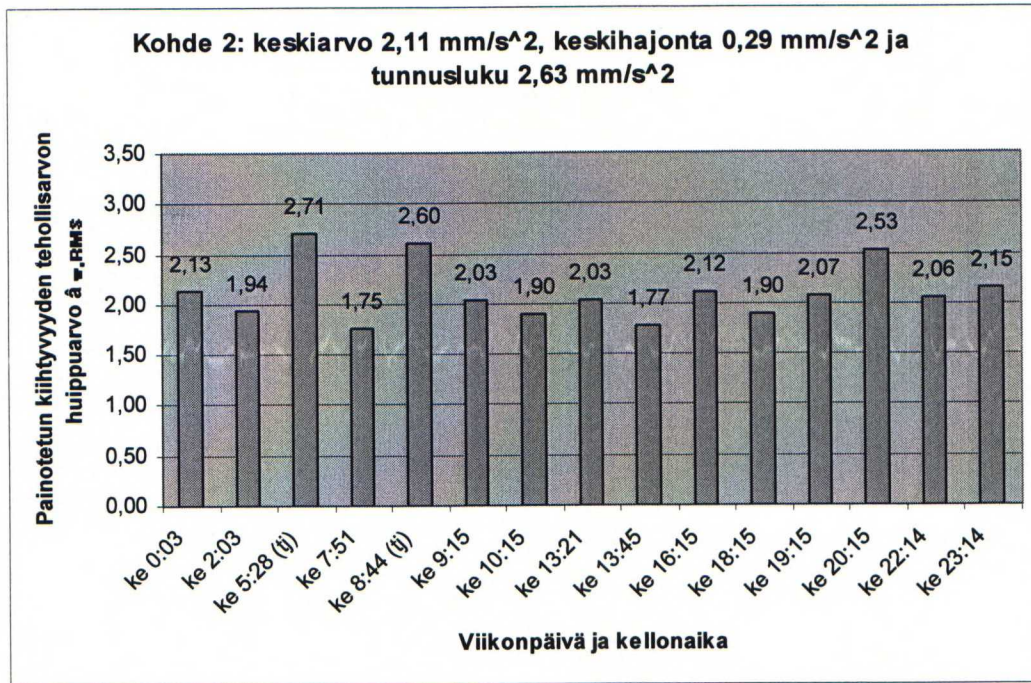
2.3 Vaihe 3



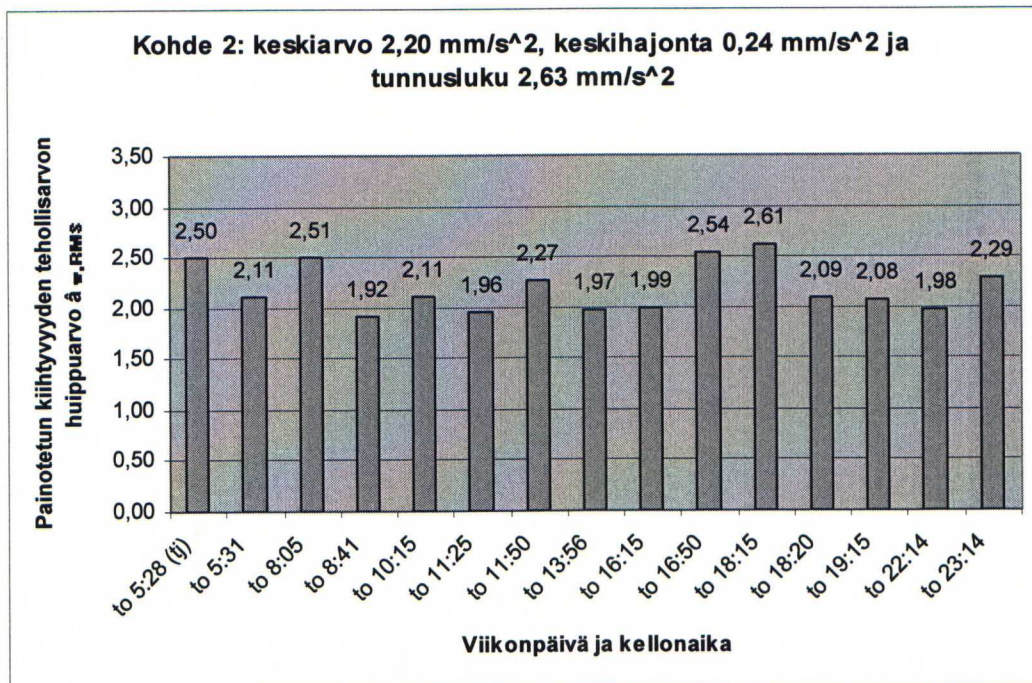
Kuva 2.4. Vaiheen kolme tunnusluvun laskennassa maanantailta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 97 %.



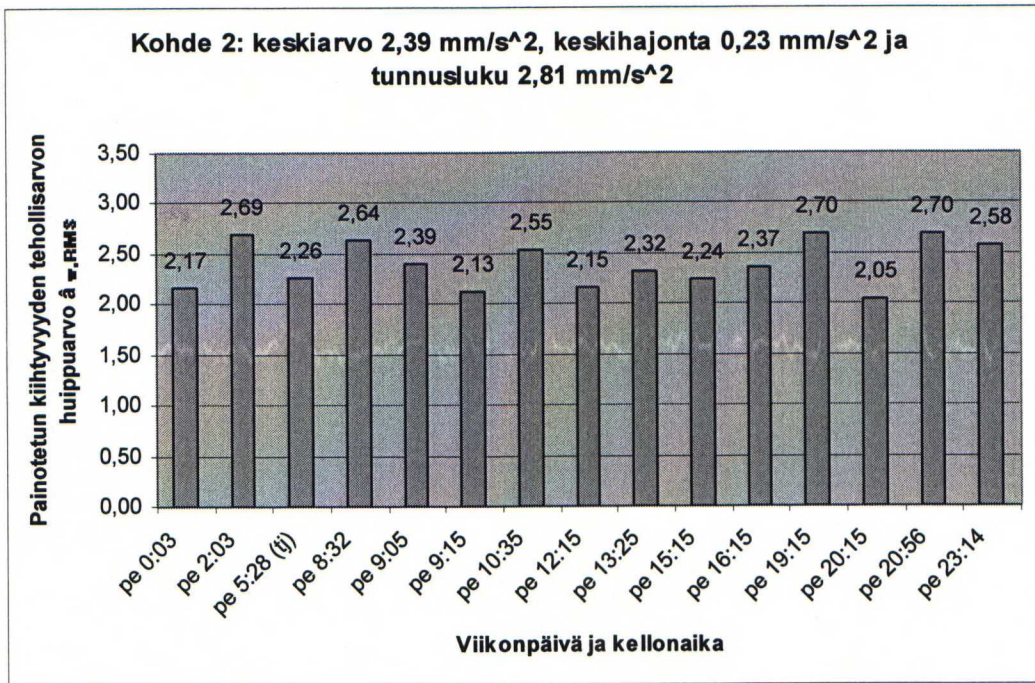
Kuva 2.5. Vaiheen kolme tunnusluvun laskennassa tiistailta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 90 %.



Kuva 2.6. Vaiheen kolme tunnusluvun laskennassa keskiviikolta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 87 %.

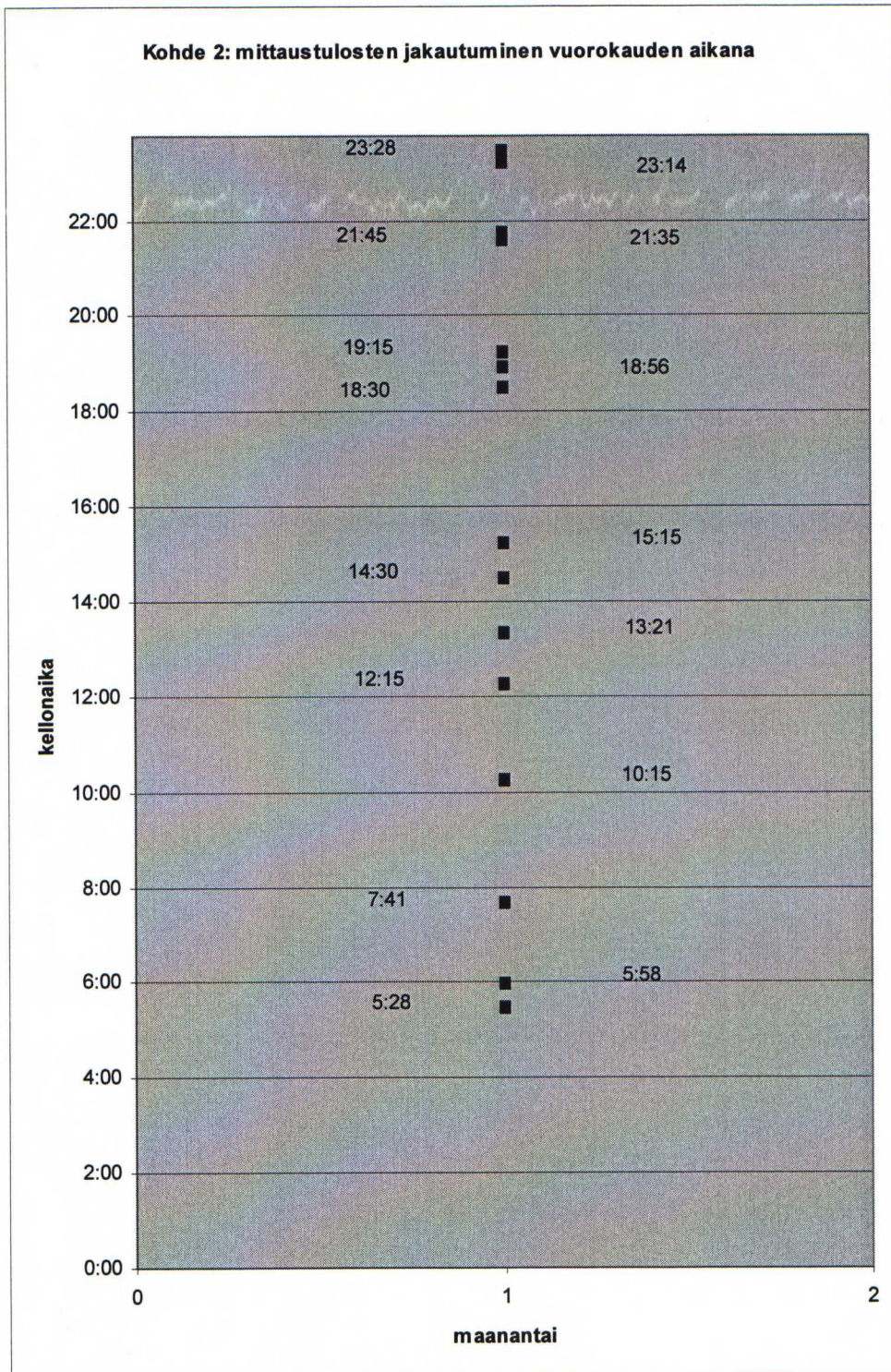


Kuva 2.7. Vaiheen kolme tunnusluvun laskennassa torstailta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 87 %.

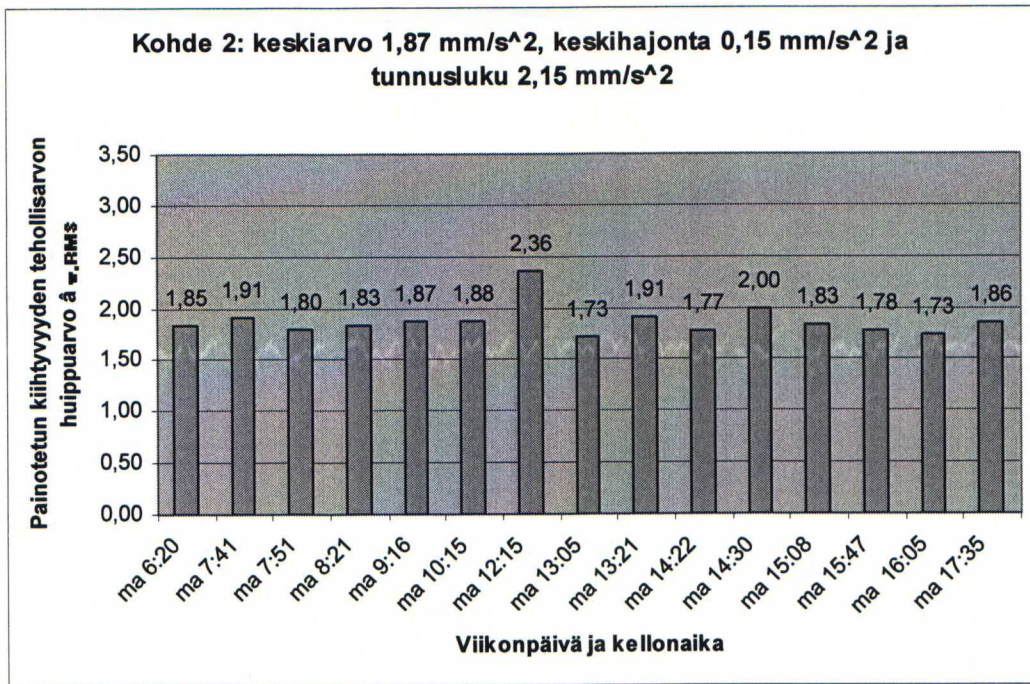


Kuva 2.8. Vaiheen kolme tunnusluvun laskennassa perjantailta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 93 %.

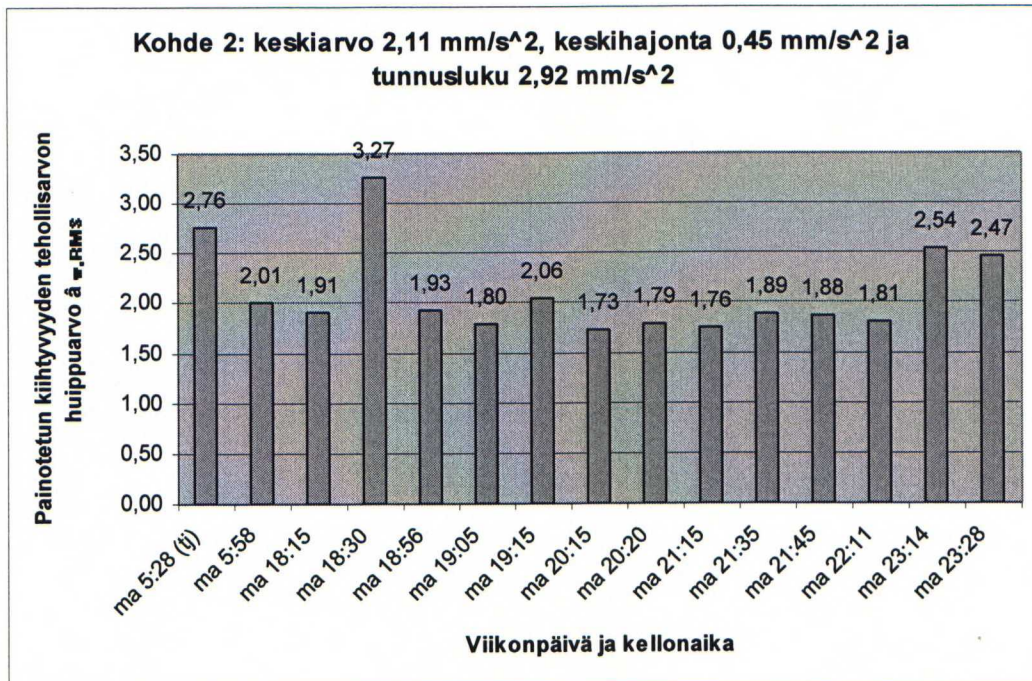
2.4 Vaihe 4



Kuva 2.9. Suurimman tunnusluvun tuottaneen arkipäivän mittaustulosten jakautuminen vuorokaudelle.

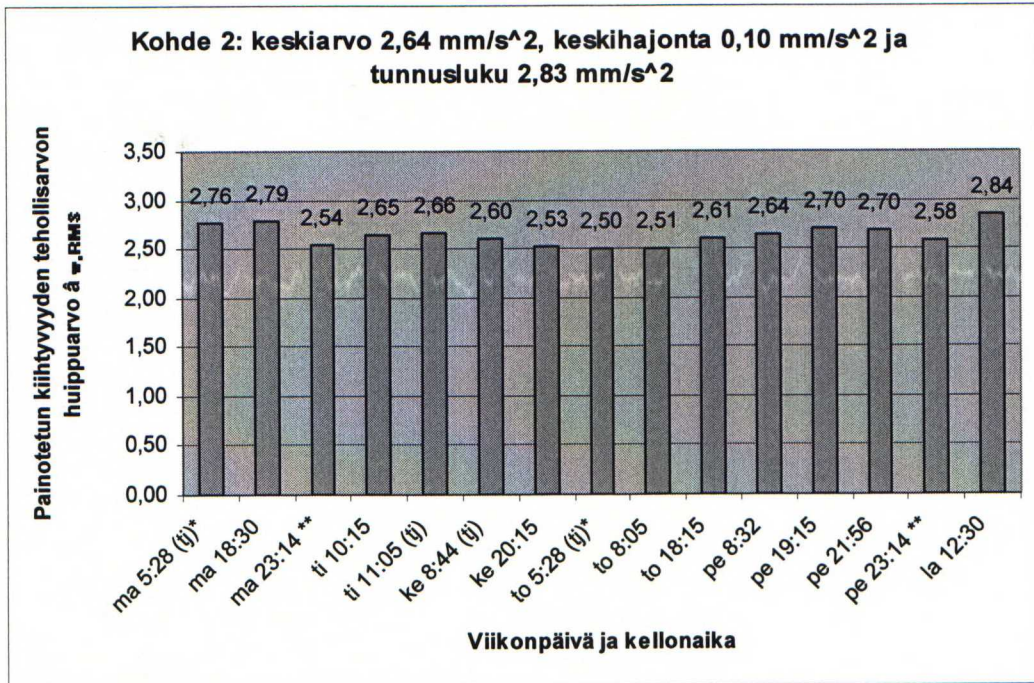


Kuva 2.10. Vaiheen neljä tunnusluvun laskennassa maanantailta klo 06-18 käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 71 %.

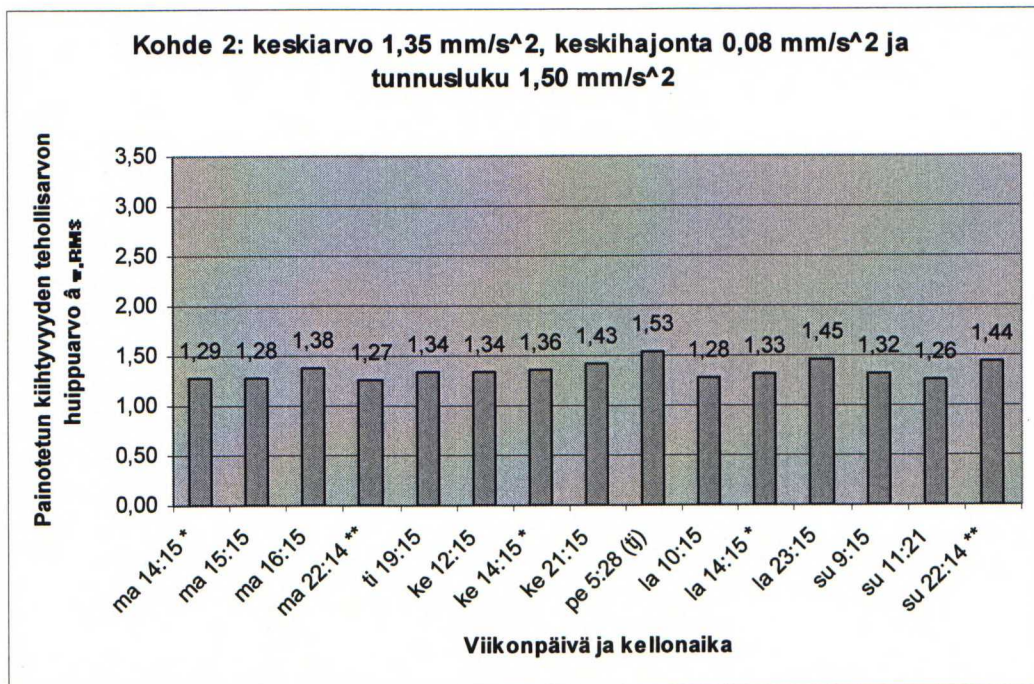


Kuva 2.11. Vaiheen neljä tunnusluvun laskennassa maanantailta klo 06-18 käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 97 %.

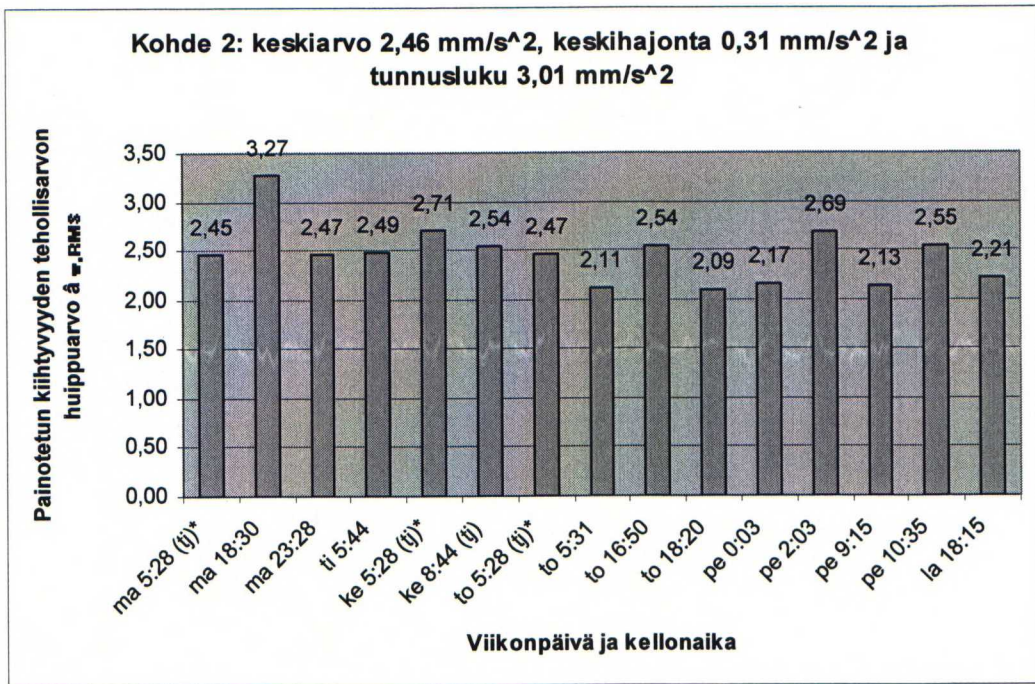
2.5 Eri kanavien vertailu



Kuva 2.12. Kanavan yksi tunnusluvun laskennassa viikon ajalta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Yhden tavara- ja yhden matkustajajunan mittaustulos on kahteen kertaan eri päiviltä. Tunnusluvun osuus koko viikon kaikista kanavista määritetystä tunnusluvusta on 94 %.



Kuva 2.13. Kanavan kaksi tunnusluvun laskennassa viikon ajalta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Yhden matkustajajunan mittaustulos on kolmeen kertaan ja toisen kahteen kertaan eri päiviltä. Tunnusluvun osuus koko viikon kaikista kanavista määritetystä tunnusluvusta on 50 %.



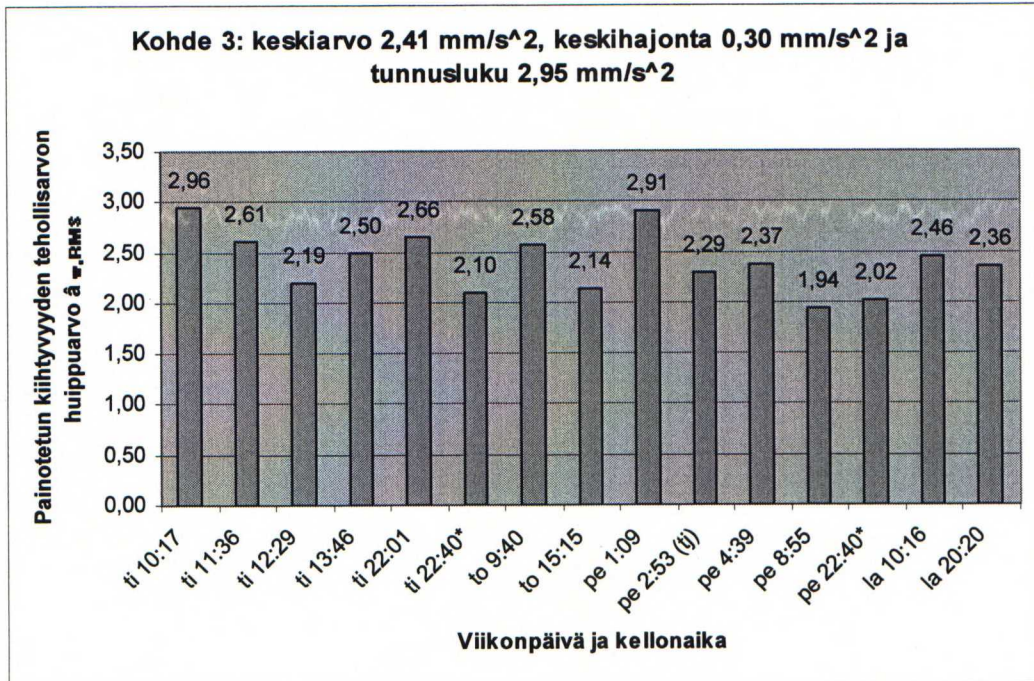
Kuva 2.14. Kanavan kolme tunnusluvun laskennassa viikon ajalta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Yhden tavarajunan mittaustulos on kolmeen kertaan eri päiviltä. Tunnusluvun osuus koko viikon kaikista kanavista määritetystä tunnusluvusta on 100 %.

3 KOHDE 3: ERI AJANJAKSOILTA MÄÄRITETTYJEN TUNNUSLUKUJEN LASKENNASSA KÄYTETYT TULOKSET

Tässä liitteessä on esitetty eri ajanjaksoilta määritettyjen tunnuslukujen laskennassa käytetyt mittaustulokset kohteessa kolme. Tunnusluku on laskettu käyttämällä 15 suurimman taajuuspainotetun tehollisarvon huippuarvon tuottanutta mittaustulosta. Ensiksi esitetään vaiheen yksi mittaustulokset, jotka on laskettu käyttäen viikon pituista mittausjakso. Ensimmäinen vaihe vastaa siis VTT:n ohjeen ”Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta” mukaan määriteltyä tunnuslukua. Toisessa vaiheessa tunnusluvut on laskettu käyttämällä ajanjaksoina arkipäiviä sekä viikonloppua. Kolmannessa vaiheessa tunnusluvut on määritetty jokaiselta arkipäivältä erikseen. Neljännessä vaiheessa isoimman tunnusluvun tuottaneilta arkipäiviltä on laskettu tunnusluvut ottamalla laskentaan mukaan vain kyseisen päivän mittaustulokset tietyiltä ajanjaksoilta.

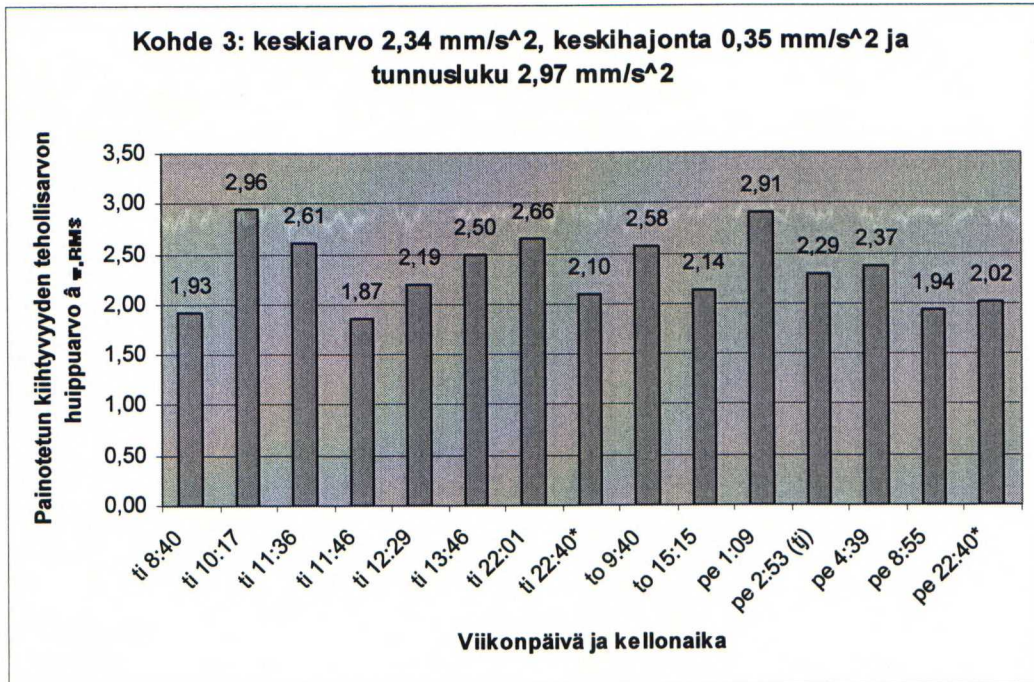
Kohteessa kolme käytettiin kolmea mittauskanavaa. Etäisyys junaradasta oli noin 50 metriä ja raiteiden lukumäärä 2. Mittaustuloksista huomioitiin kunkin junan ohituksesta osalta suurimman tuloksen tuottanut mittauskanava. Näin ollen ei ole mahdollista, että sama ohitus huomioitaisiin tunnusluvun laskennassa jokaisesta kanavasta saadun tuloksen perusteella erikseen. Tavarajunat on merkitty käyttämällä lyhennettä (tj) päivän ja kellonajan perässä. Mikäli jokin juna on laskennassa useampaan kertaan eri päiviltä mitattuna, on se merkitty *-merkillä.

3.1 Vaihe 1

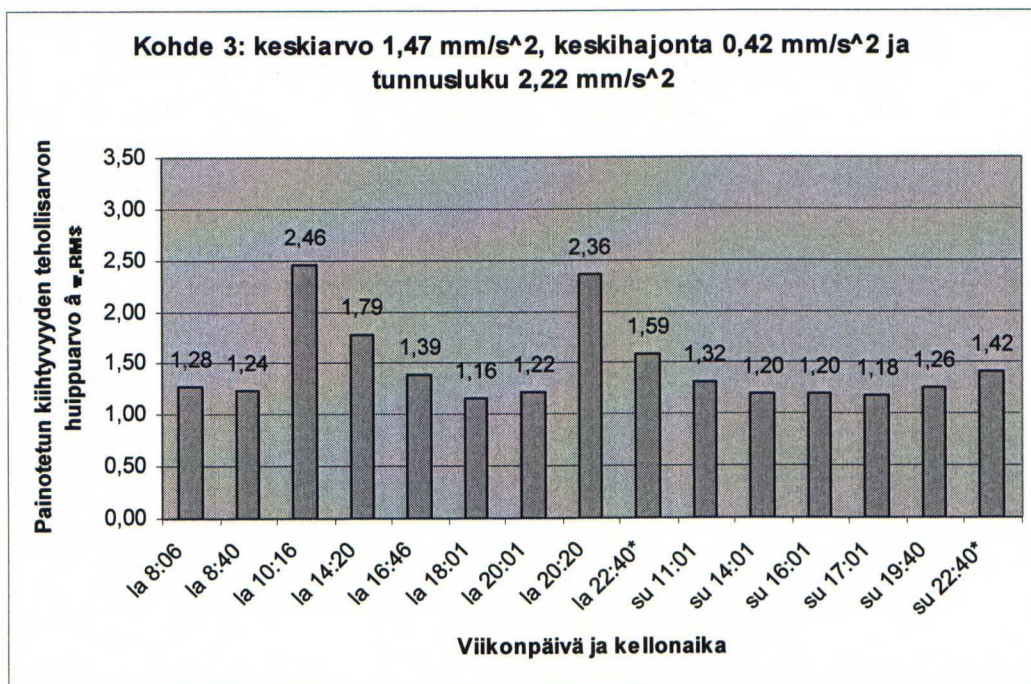


Kuva 3.1. Vaiheen yksi tunnusluvun laskennassa käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Yhden matkustajajunan mittaustulos on kahteen kertaan eri päiviltä.

3.2 Vaihe 2

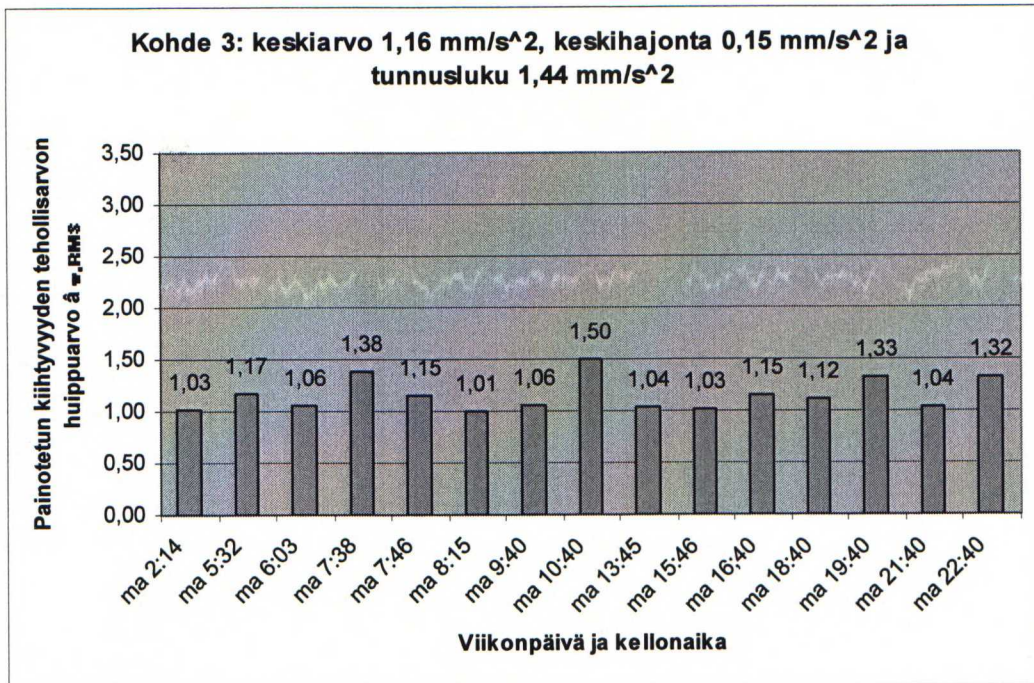


Kuva 3.2. Vaiheen kaksi tunnusluvun laskennassa arkipäiviltä käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Yhden matkustajajunan mittaustulos on kahteen kertaan eri päiviltä. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 101 %.

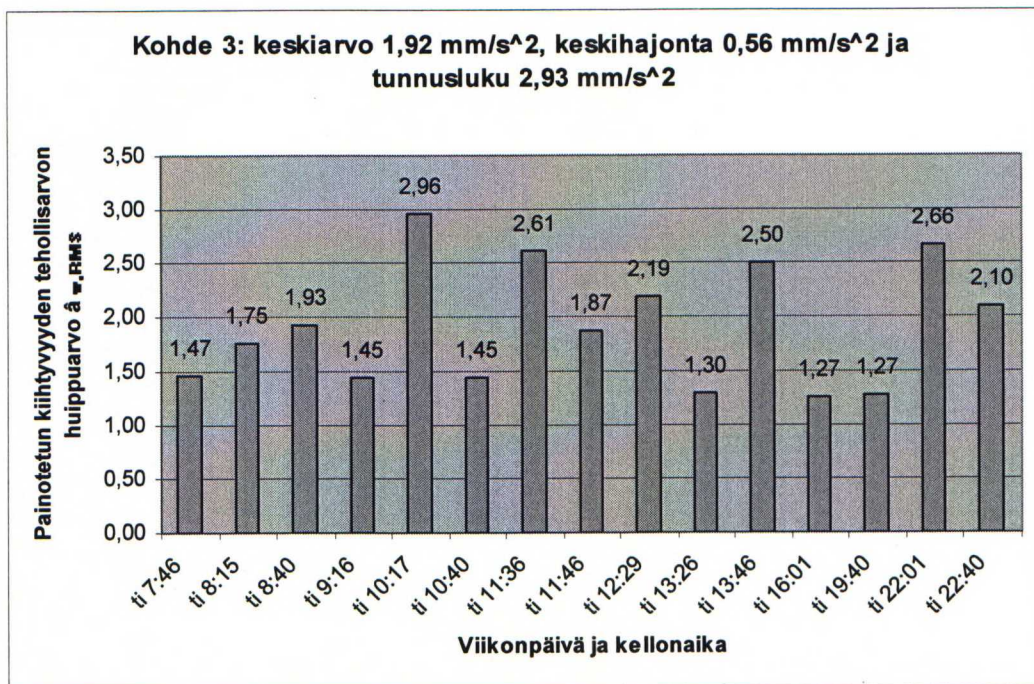


Kuva 3.3. Vaiheen kaksi tunnusluvun laskennassa viikonloputta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Yhden matkustajajunan mittaustulos on kahteen kertaan eri päiviltä. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 75 %.

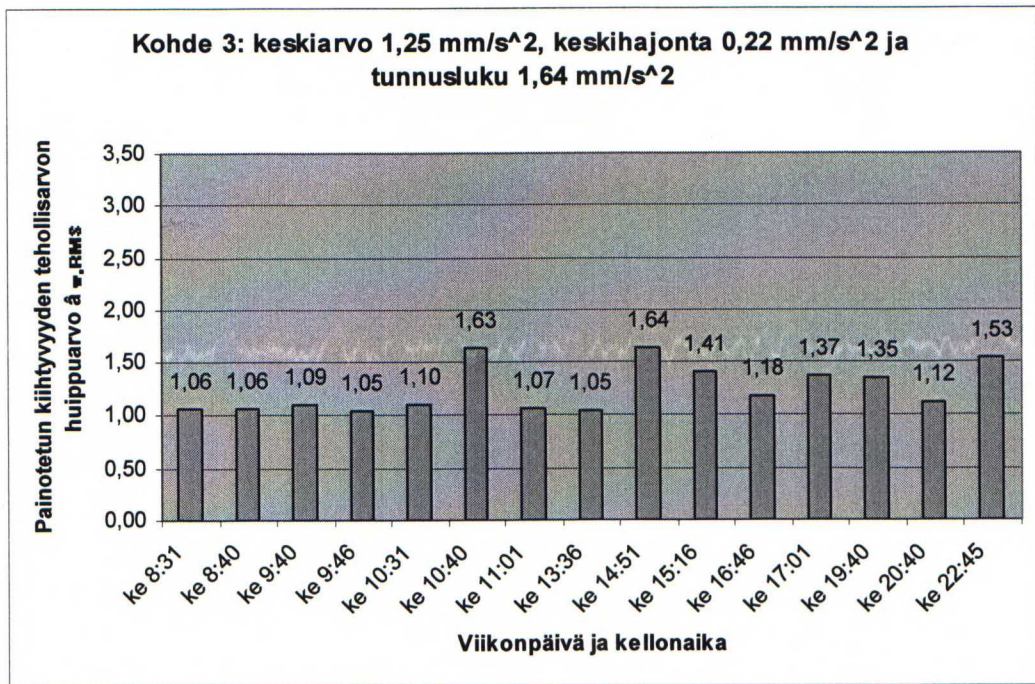
3.3 Vaihe 3



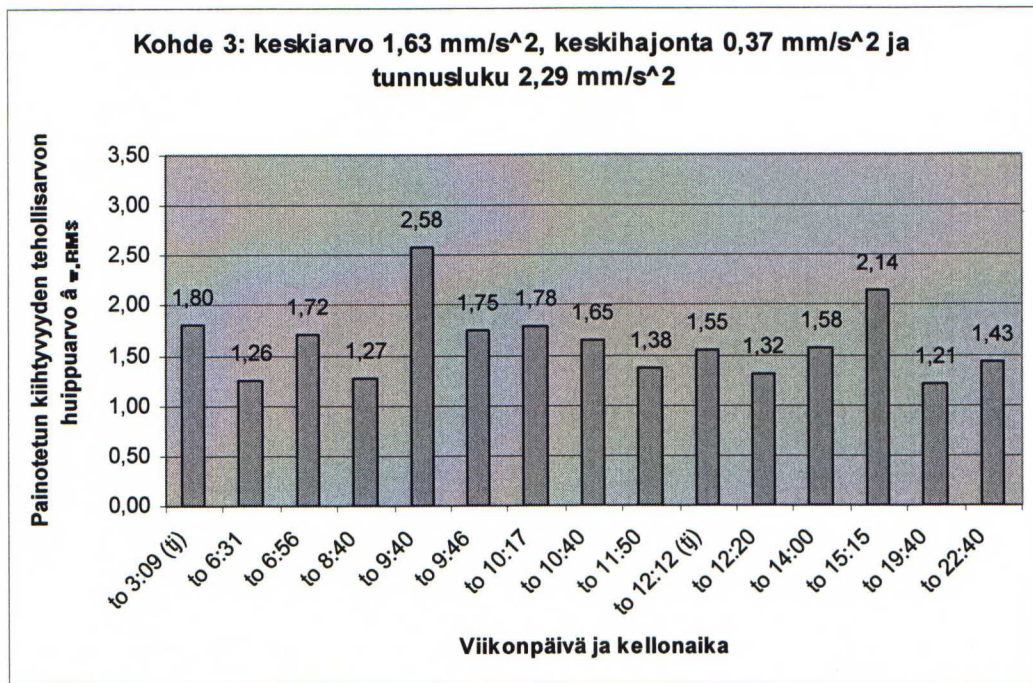
Kuva 3.4. Vaiheen kolme tunnusluvun laskennassa maanantailta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 49 %.



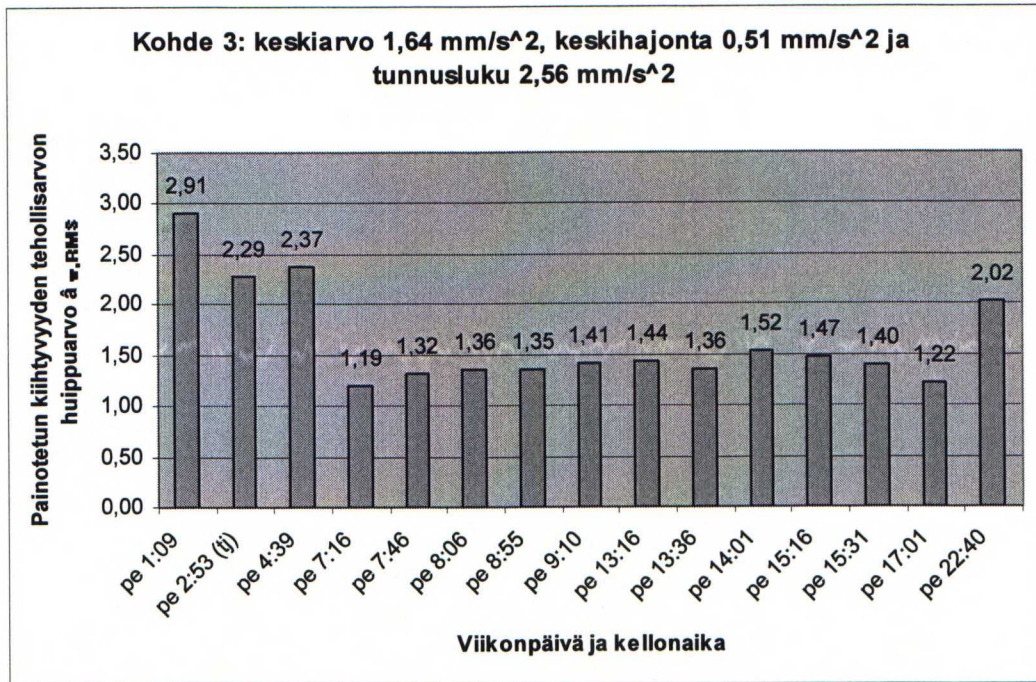
Kuva 3.5. Vaiheen kolme tunnusluvun laskennassa tiistailta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 99 %.



Kuva 3.6. Vaiheen kolme tunnusluvun laskennassa keskiviikolta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 46 %.

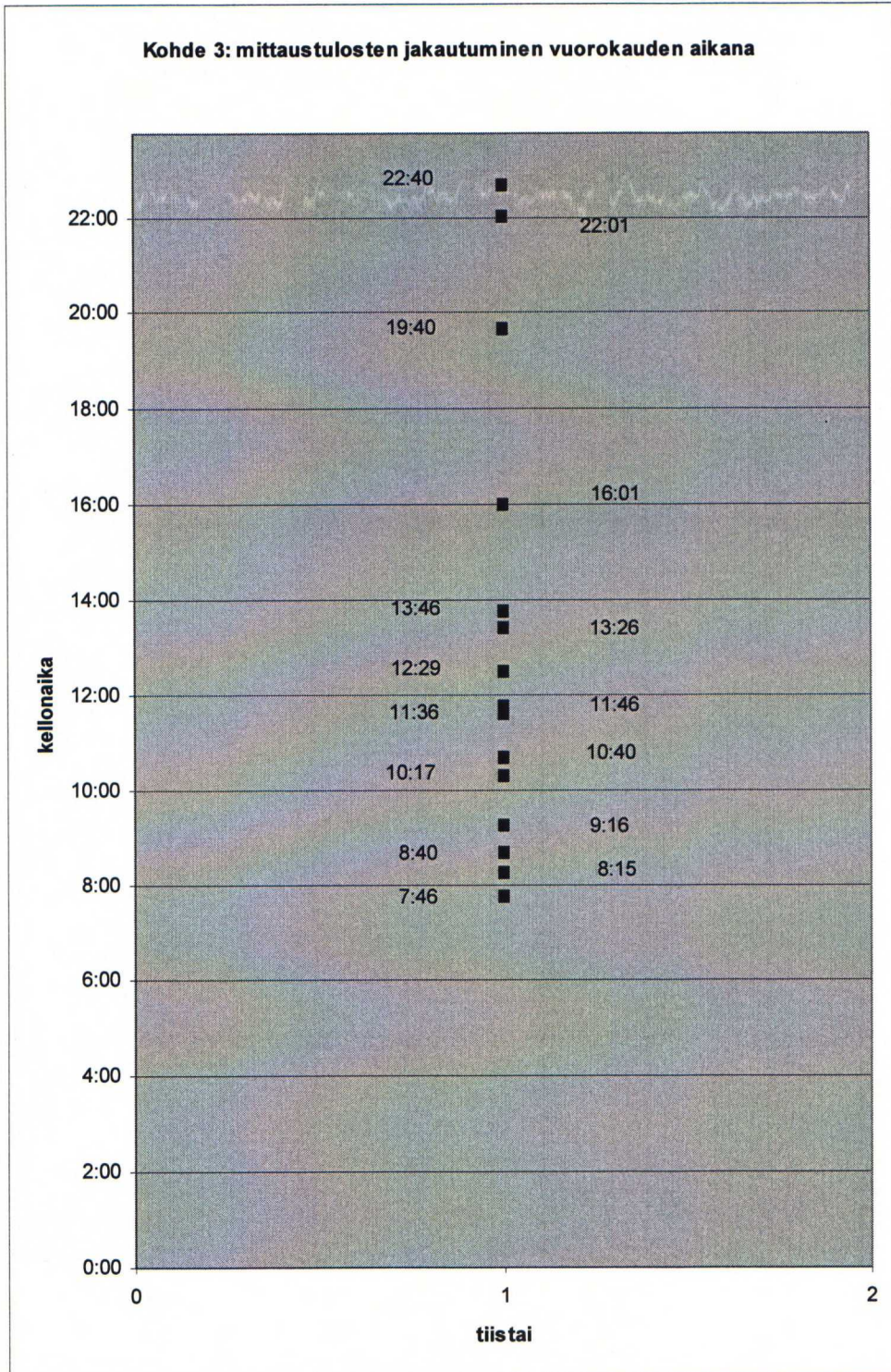


Kuva 3.7. Vaiheen kolme tunnusluvun laskennassa torstailta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 78 %.

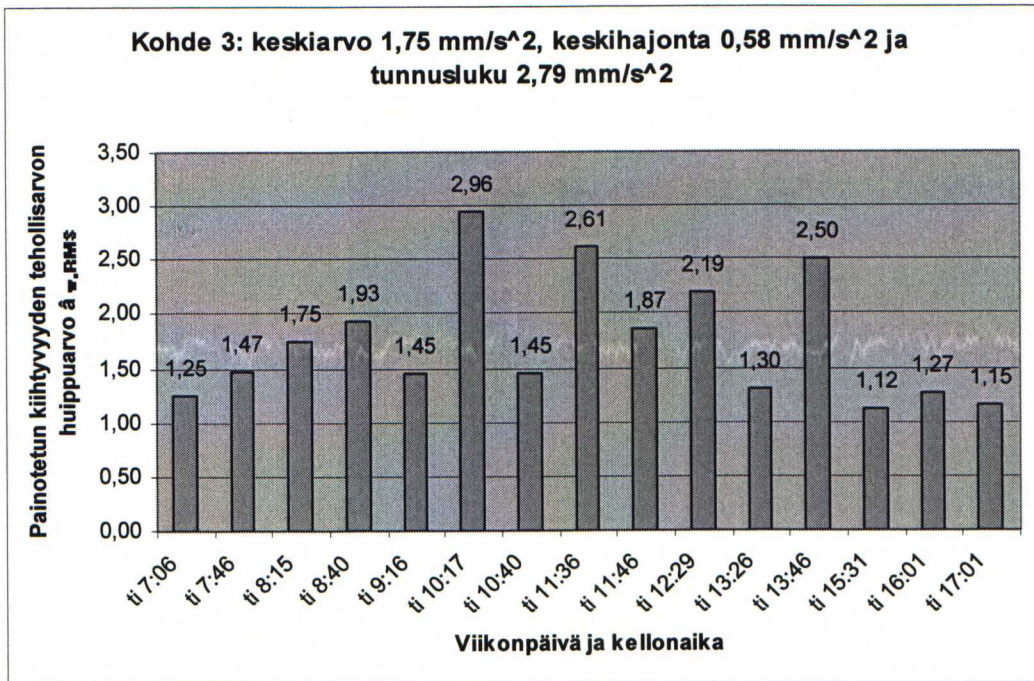


Kuva 3.8. Vaiheen kolme tunnusluvun laskennassa perjantailta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 87 %.

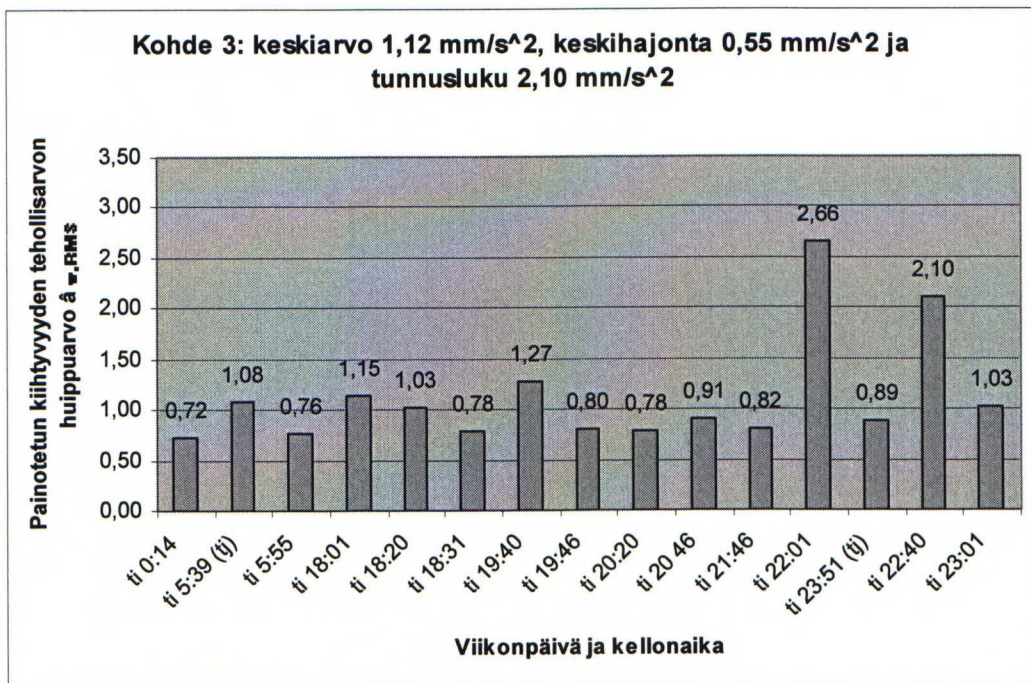
3.4 Vaihe 4



Kuva 3. 9. Suurimman tunnusluvun tuottaneen arkipäivän mittaustulosten jakautuminen vuorokaudelle.

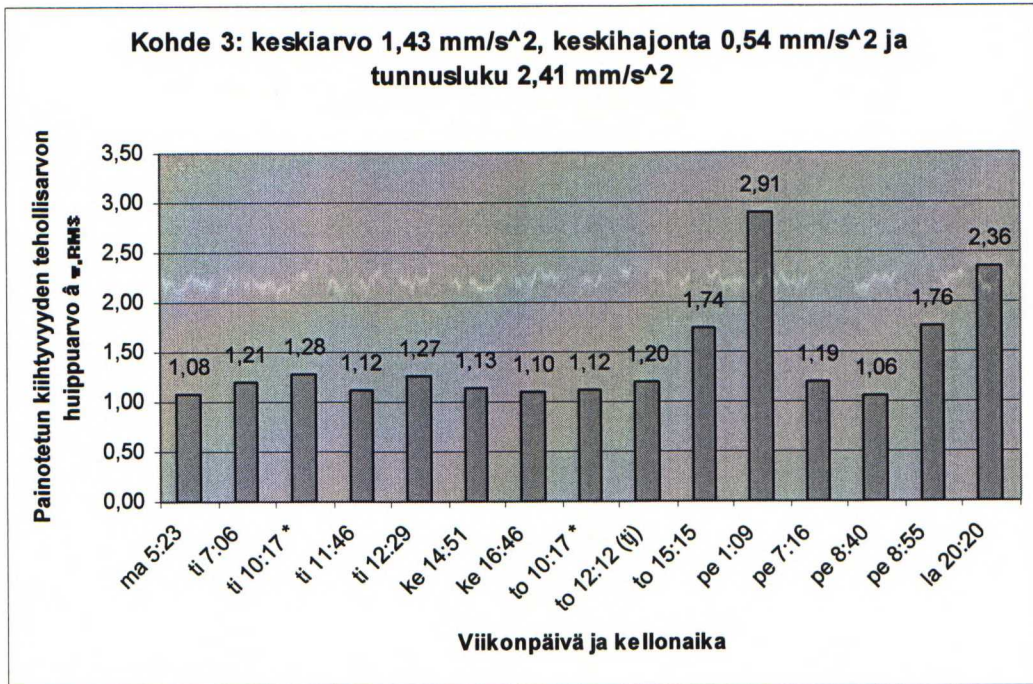


Kuva 3.10. Vaiheen neljä tunnusluvun laskennassa tiistailta klo 06-18 käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 95 %.

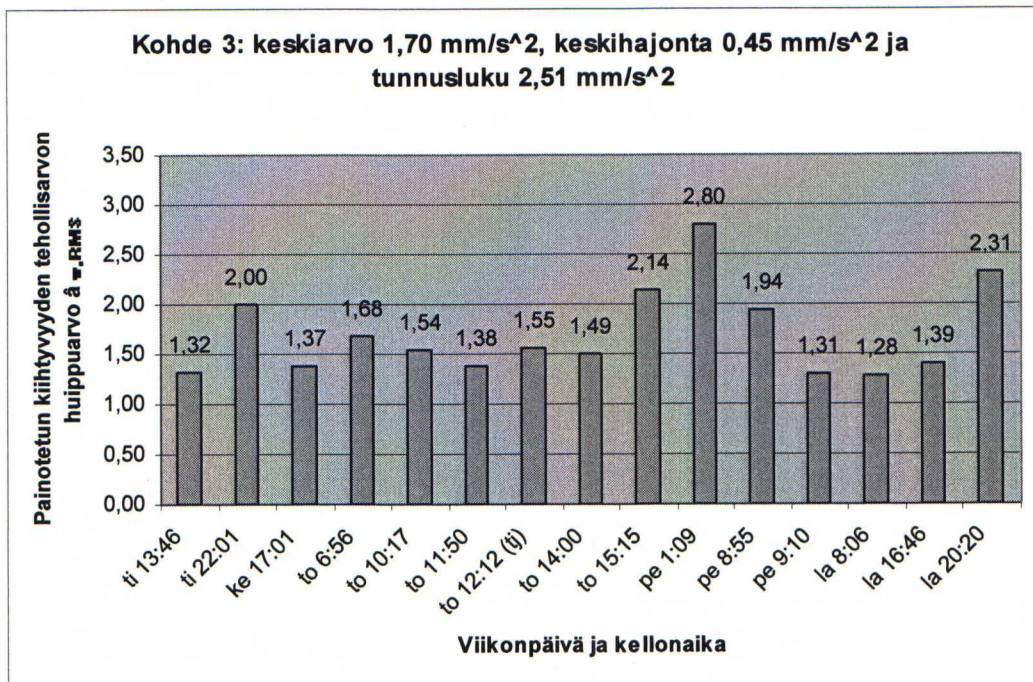


Kuva 3.11. Vaiheen neljä tunnusluvun laskennassa torstailta klo 06-18 käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon tunnusluvusta 71 %.

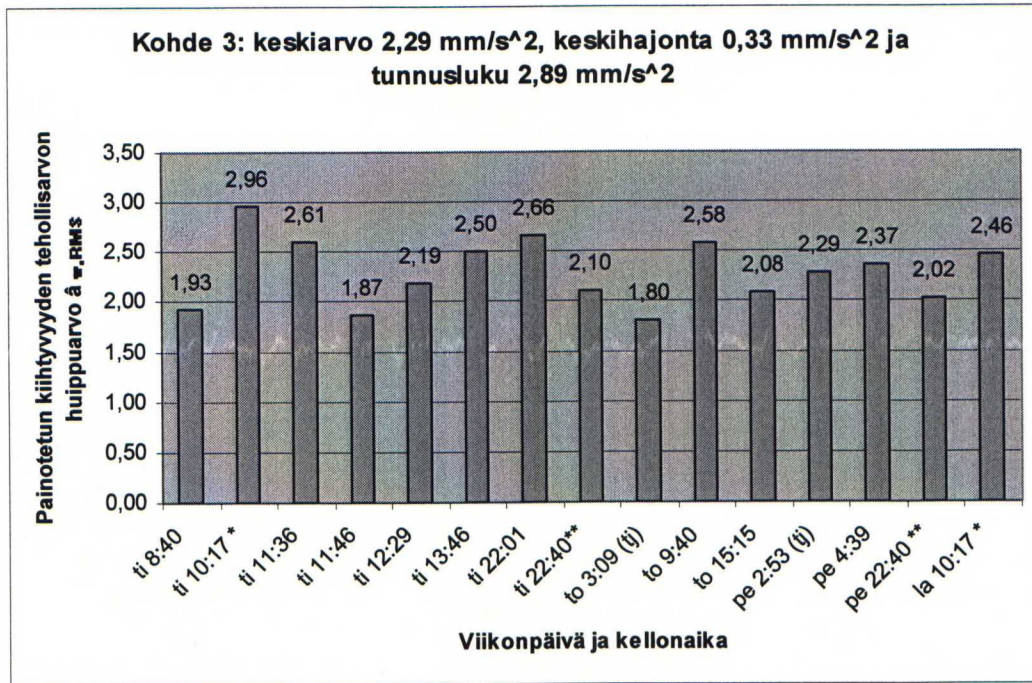
3.5 Eri kanavien vertailu



Kuva 3.12. Kanavan yksi tunnusluvun laskennassa viikon ajalta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Yhden matkustajajunan mittaustulos on kahteen kertaan eri päiviltä. Tunnusluvun osuus koko viikon kaikista kanavista määritetystä tunnusluvusta on 82 %.



Kuva 3.13. Kanavan kaksi tunnusluvun laskennassa viikon ajalta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Kaikki mittaustulokset ovat eri junista. Tunnusluvun osuus koko viikon kaikista kanavista määritetystä tunnusluvusta on 85 %.



Kuva 3.14. Kanavan yksi tunnusluvun laskennassa viikon ajalta käytetyt 15 suurinta mittaustulosta. Yhden matkustaja- ja tavarajunan mittaustulos on kahteen kertaan eri päiviltä. Tunnusluvun osuus koko viikon kaikista kanavista määritetystä tunnusluvusta on 98 %.