



Liikennetärinä: Alueiden tärinä- kartoitus ja rakenteiden vaurioitu- misalttius

Kirjoittajat: Asko Talja, Jouko Törnqvist

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi	
Liikennetärinä: Alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot	Asiakkaan viite
Liikennevirasto Erkki Poikolainen PL 33 (Opastinsilta 12) 00520 HELSINKI	Tilaus 15.4.2014 Diaarinro 1337/1001/2014 Tilausno 00LTX-0033324
Projektin nimi	Projektin numero/lyhytnimi
Rautatieliikenteen aikaansaaman vaurioalttiuden kartoittaminen	87156/Rautatie_vaurio
Raportin laatija(t)	Sivujen/liitesivujen lukumäärä
Asko Talja, Jouko Törnqvist	58 s.
Avainsanat	Raportin numero
Liikennetärinä, kaavoitus, vauriot, ohjeavot, rajat, ohjeet	VTT-R- 04703-14
Tiivistelmä	
<p>Tällä ohjeella täydennetään nykyistä liikennetärinään liittyvää ohjeistusta. Raportissa kuvataan menetelmiä, joilla voidaan selvittää rautatieliikenteestä aiheutuvan tärinän vaikutusalueen laajuutta ja tärinän vaikutusta rakennusten vaurioihin. Tärinä vaikuttaa yleensä eniten asumismukavuuteen, mutta joskus se voi myös olla osasyynä vaurioihin. Tärinä voi aiheuttaa myös maan kautta välittyvää häiritsevää runkomelua. Asumismukavuutta ja runkomelua tämä raportti ei käsittele, sillä niiltä varten on jo olemassa omat suosituksensa.</p> <p>Rakenteiden vaurioitumisalttiuden arvioinnin tarve nousee yleensä vasta kun tärinän epäillään aiheuttaneen rakennuksen vaurioita tai rakennuksen omistaja pelkää tärinän aiheuttavan vaurioita. Liikennetärinästä aiheutuvat vauriot ovat harvinaisia, vaikka rakennuksen tärinä olisikin selvästi havaittavaa. Siksi raportissa kuvataan yleisesti myös muita syitä, joiden merkitys tulee rakennevaurioiden yhteydessä arvioida. Lisäksi raportin esimerkeissä kuvataan värähtelystä aiheutuvia rakenteiden muodonmuutoksia ja verrataan niitä muista tekijöistä aiheutuviin sallittuihin muodonmuutoksiin.</p> <p>Tärinäalueiden kartoitusta tarvitaan yleisen maankäytön tai radan muutostöiden suunnittelun yhteydessä. Tärinäkartoituksessa tarkasteltava alue rakennuksineen rajataan ja luokitellaan normaalikuntoisten rakennusten tärinäalttiuden kannalta kolmeen vyöhykkeeseen, joiden perusteella voidaan arvioida alueen soveltuvuutta eri käyttötarkoituksiin. Tärinäalueiden rajausta perustuu maaperän värähtelyyn. Raportissa kuvataan myös rakennuksessa esiintyvän värähtelyn arviointia, jota tarvitaan mm. alueen rakennuskannan suunnittelun yhteydessä.</p> <p>Tärinän ohjeavot on tarkoitettu helpottamaan rakenteiden tärinäkestävyyden arviointia. Ohjeavoina suositellaan käytettäväksi ohjeessa RIL 253-2010 maa- ja pohjarakennustöille esitettyjä arvoja. Ohjeavojä käytetään perusteena myös tärinäkartoituksen tärinäalueiden rajojen määrittämisessä.</p>	
Luottamuksellisuus	Julkinen
Espoo 15.10.2014	
Laatijat	Hyväksyjä
 Asko Talja Erikoistutkija	 Jouko Törnqvist Johtava tutkija
	 Eila Lehmus Tutkimusalueen päällikkö
VTT:n yhteystiedot	
Asko Talja, PL1000, 02044 VTT, asko.talja@vtt.fi, puh. 020 7222 6831	
Jakelu (asiakkaat ja VTT)	
VTT arkisto: Alkuperäinen, 1 kpl	
Tilaaaja: Erkki Poikolainen, Alkuperäinen, 1 kpl	
PDF-raportti: Ladattavissa verkosta (http://www.vtt.fi/vtt_search.jsp)	
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.	

Alkusanat

Ohjeen taustana on VTT Tiedotteen vuonna 2002 laadittu luonnos ”Rautatieliikenteen tärinän vaikutus rakenteisiin. Vaurioalttiuden kartoittaminen ja mittaaminen”, joka on luonnostilastaan huolimatta ollut melko yleisessä käytössä, usein jopa noudatettavana asiakirjana. Käsikirjoituksen status on kuitenkin ollut käyttäjille osin epäselvä ja johtanut eräissä riitatilanteissa vääriin tulkintoihin. Ohjeen täydentäminen ja muuttaminen lopulliseen muotoon on katsottu tärkeäksi, sillä tieto liikenneperäisestä tärinästä on viimeisen kymmenten vuoden aikana lisääntynyt ja tarve ohjeelle on edelleen ajankohtainen.

Ohje nojautuu aikaisempaan ohjelunnonkseen, mutta sen ulkoasu ja sisältö on täysin uusittu paremmin nykytietämystä ja -tarvetta vastaavaksi. Vaurioitumisalttiutta koskevissa tärinän ohjearvoissa on otettu huomioon uusi ohje RIL 253-2010 sekä uusi Norjan standardi NS 8141-2-2013. Siksi ohjeessa annetut tärinän suurimmat ohjearvot vaurioitumiselle ovat yhdenmukaiset ohjeessa RIL 253-2010 maa- ja pohjarakennustöille annettujen arvojen kanssa. Ohjearvot vastaavat hyvin myös Norjassa, Ruotsissa ja myös monissa muissa maissa esitettyjä suosituksia. Poikkeuksena on Sveitsi, jossa käytössä suositukset ovat hie-man ehdotettua käytäntöä tiukemmat.

Työtä on ohjannut ja seurannut ohjausryhmä, johon ovat kuuluneet seuraavat tärinän mitaus- ja kartoitustyötä tuntevat henkilöt:

Matti Hakulinen, FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy
Juha Tuovinen, Oy Finnrock Ab
Jani Kankare, Promethor Oy
Olli Laivoranta, Promethor Oy

Liikenneviraston edustajina ohjausryhmään ovat osallistuneet Erkki Poikolainen ja Tuomo Viitala.

Kiitämme ohjausryhmää rakentavista keskusteluista ja hyvistä neuvoista liittyen sekä raportin sisältöön että sen ulkoasuun.

Espoo 15.10.2014

Tekijät

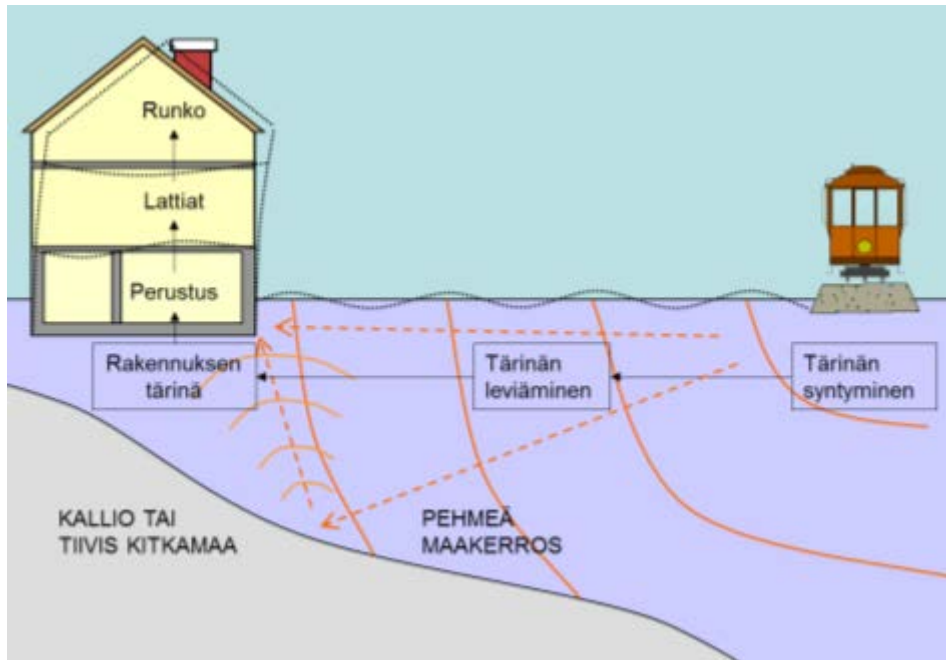
Sisällysluettelo

Alkusanat	2
1. Johdanto.....	4
1.1 Liikennetärinä ympäristöhaittana	4
1.2 Ohjeistuksen tavoite	4
2. Tärinäkartoitus	6
2.1 Tärinäalueiden rajausta kaavoituksessa	6
2.2 Tärinäkartoituksen tarkkuustasot	7
2.3 Tarkastelutaso 1 – Alustava juna- ja maaperätietoihin perustuva rajausta	8
2.3.1 Selvitys juna- ja maaperätiedoista.....	8
2.3.2 Rajauksen periaate	9
2.3.3 Laskentamenetelmä.....	10
2.3.4 Tulosten raportointi	12
2.4 Tarkastelutaso 2 – Tarkennettu tärinämittauksiin perustuva rajausta	13
2.4.1 Mittausten suoritus.....	13
2.4.2 Antureiden asennus	14
2.4.3 Mittaustulosten tarkastelu	14
2.4.4 Mittauksiin varmennettu laskentamalli.....	15
2.4.5 Tulosten raportointi	16
2.5 Tarkastelutaso 3 – Rakennuksessa esiintyvän värähtelyn arviointi	16
2.5.1 Suurennuskertoimeen perustuva menetelmä	17
2.5.2 Taajuussisältöön perustuva menetelmä	17
3. Tärinän ohjeistukset.....	19
3.1 Ohjeistukset perustukselle	19
3.2 Ohjeistukset rakenteille.....	20
4. Rakenteiden vaurioitumisalttiuden arviointi	21
4.1 Rakennevaurioiden syyt.....	21
4.1.1 Halkeamien yleinen esiintyminen rakennuksissa.....	21
4.1.2 Hauraiden materiaalien halkeamien luokittelu	22
4.1.3 Tavallisimmat vaurioiden syyt	23
4.1.4 Liikennetärinä vaurioiden aiheuttajana	24
4.2 Tärinämittaukset rakenteiden vaurioiden arvioinnissa.....	25
4.2.1 Mittausten suoritus.....	25
4.2.2 Perustuksen värähtely arviointiperusteena.....	26
4.2.3 Rungon vaakavärähtely arviointiperusteena.....	26
4.2.4 Välipohjan pystyvärähtely arviointiperusteena.....	26
4.2.5 Tulosten raportointi	27
4.3 Esimerkkejä tärinän vaikutuksista rakennukseen.....	27
4.3.1 Siirtymät ja kiihtyvyydet.....	27
4.3.2 Vaikutukset runkoon	28
4.3.3 Vaikutukset lattiaan.....	29
4.3.4 Vaikutukset perustuksiin	29
Lähdeviitteet.....	32
Liite A: Värähtelyyn ja tärinän arviointiin liittyviä käsitteitä.....	34
Liite B: Liikennetärinään vaikuttavia tekijöitä.....	37
Liite C: Tärinän siirtyminen rakennukseen.....	45
Liite D: Muissa maissa liikennetärinälle annettuja ohjeistuksia	49
Liite E: Perustusvaurioiden tyypit, syyt ja korjaus	54
Liite F: Malli kohdetietojen esittämisestä ja mittauspisteiden sijainnista kohteessa.....	57

1. Johdanto

1.1 Liikennetärinä ympäristöhaittana

Junaliikenne aiheuttaa maaperän, rakennusten ja rakenteiden värähtelyä (Kuva 1), jonka seuraukset koetaan tärinä. Tärinä voi häiritä asumismukavuutta, keskittymiskykyä tai nukkumista. Tärinä voi myös aiheuttaa pelkoa rakennevaurioista tai kiinteistön arvon alenemisesta. Liikennetärinän haitta-alue on yleensä laajin pehmeikköalueilla, kun taas kovilla maaperillä suuremmaksi ongelmaksi voi muodostua maan kautta välittyvä runkoääni.



Kuva 1. Liikennetärinän syntyminen ja siirtyminen rakennukseen.

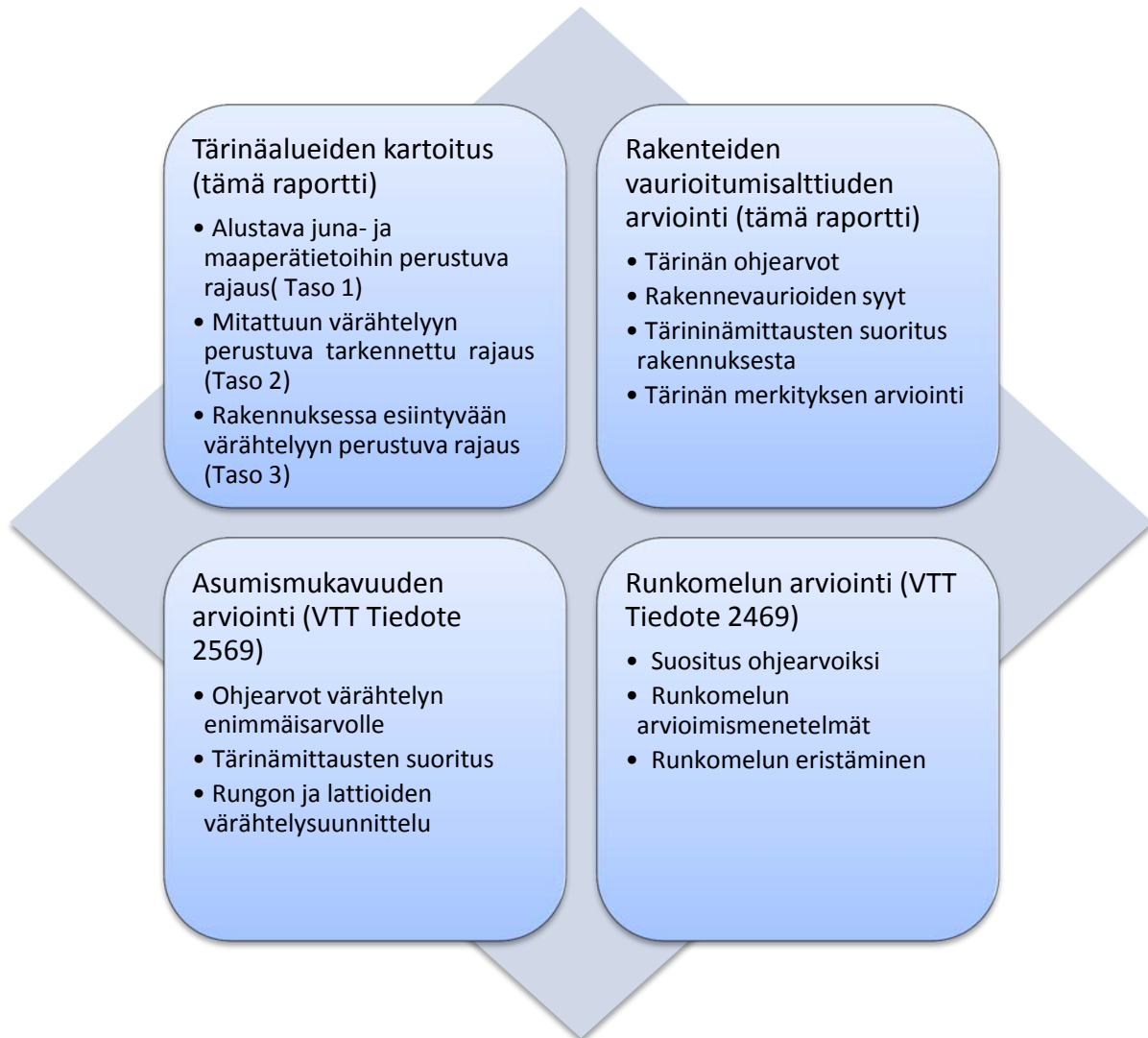
1.2 Ohjeistuksen tavoite

Tällä ohjeistuksella täydennetään nykyistä liikennetärinään liittyvää VTT:n ohjeistusta (Kuva 2). Raportissa kuvataan menetelmiä, joilla voidaan selvittää rautatieliikenteestä aiheutuvan tärinän vaikutusalueen laajuutta sekä tärinän merkitystä rakenteiden vaurioitumiseen. Tärinäalueiden kartoitusta tarvitaan maankäytön ja radan suunnittelun tai niiden muutosten yhteydessä. Vaurioitumisalttiuden arviointi koskee kaikkea rakennuskantaa, kun asumismukavuuden arviointi koskee vain asuinrakennuksia tai niihin verrattavissa olevia rakennuksia.

Vaurioitumisarviointia tarvitaan pääasiassa vanhojen kiinteistöjen yhteydessä, kun pohditaan rakennuksen vaurioiden syytä tai pelätään tärinän aiheuttavan vaurioita. Rakenteiden vaurioitumisarviointi nousee esille yleensä vain sellaisilla alueilla, joille tärinätarkastelua ei ole aikoinaan tehty, tai uusien teollisuus- tai liike- tms. tilojen rakentamisessa. Uusilla asuin- ja toimistoalueilla aluesuunnittelussa määrääväksi tekijäksi muodostuu aina asumismukavuus.

Raportti on kirjoitettu ajatellen junista aiheutuvaa tärinää, mutta soveltuvien kohdin ohjetta voidaan käyttää myös muiden vastaavien tärinälähteiden, kuten esimerkiksi raskaan maantielikenteen aiheuttaman tärinän arviointiin.

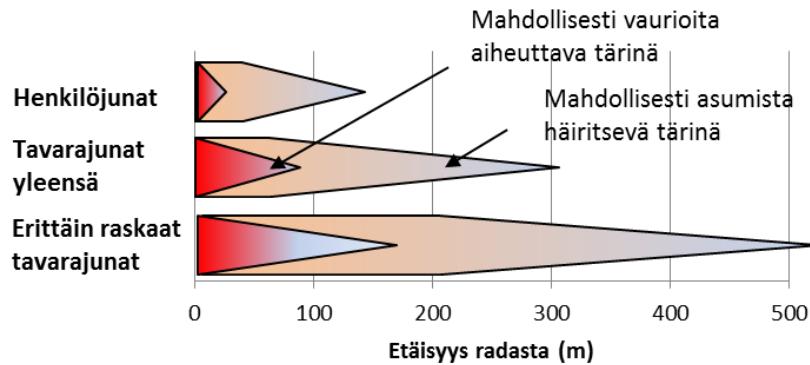
Koska tällä hetkellä liikennetärinälle ei Suomessa ole olemassa erikseen käyttöön sovellettavia ja säädöksillä vahvistettuja ohje-arvoja, kaikki raportissa esitetyt värähtelyrajat ovat ohjeellisia.



Kuva 2. Liikennetärinää koskevan VTT:n ohjeistuksen sisältö.

Tässä raportissa keskitytään tärinäalueiden kartoitukseen ja rakenteiden vaurioitumisalttiuden arviointiin (Kuva 2). Asumismukavuuteen vaikuttavan tärinän ja runkomelun arvioinnille on olemassa omat ohjeistuksensa ja ohjearvonsa. Asumismukavuutta on käsitelty VTT Tiedotteessa 2569 (Talja 2011) ja sitä koskevissa taustaraporteissa (Talja & al. 2008, Talja 2004). Runkomelua koskeva ohjeistusta on käsitelty VTT Tiedotteessa 2468 (Talja & Saari- nen 2009).

Asumismukavuuden haitta-alue on yleensä huomattavasti laajempi kuin mahdollisia vaurioita aiheuttavan tärinän alue, sillä asumismukavuudelle asetetut tärinän ohjearvot ovat huomattavasti pienemmät kuin rakenteiden vaurioitumiselle asetetut ohjearvot. Kuvassa 3 on esitetty suuntaa antavia arvioita suurimmista etäisyyksistä, joilla pehmeillä savimaa-alueilla esiintyvä liikennetärinä voi aiheuttaa vaurioita tai häiritä asumismukavuutta. Kuvan kiilamainen alue kuvaa epävarmaa aluetta, jossa erot maaperän ja rakennusten ominaisuuksissa vaikuttavat voimakkaasti tulokseen. Muilla kuin pehmeillä maaperillä vaurioita aiheuttavan värähtelyn todennäköisyys on pieni muualla kuin aivan radan välittömässä läheisyydessä.



Kuva 3. Suuntaa antava arvio suurimmasta etäisyydestä, jolla tärinä voi häiritä asumista ja tai aiheuttaa vaurioita.

2. Tärinäkartoitus

Tärinän ympäristövaikutusten kartoitusta tarvitaan kun tehdään päätöksiä uusien väylien tai alueiden suunnittelun yhteydessä, tai kun arvioidaan väylien perusrakennukseen liittyvien muutosten vaikutusta.

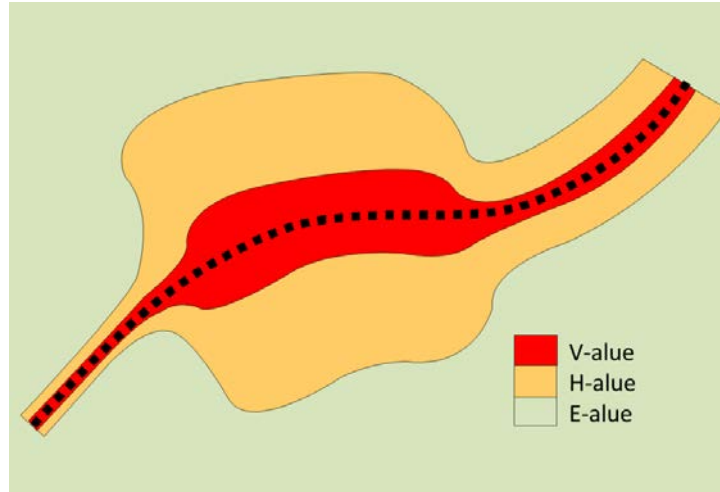
Tärinäkartoituksella ja siihen liittyvillä mittauksilla pyritään aikaansaamaan sellainen dokumentoitu tieto, että alueen rakennuskannan valinta sekä tärinän vaimentaminen joko ratateknisin tai muunlaisin toimenpitein voidaan myöhemmin tarvittaessa tehdä ja että tehtyjen toimenpiteiden vaikutuksia voidaan luotettavasti arvioida.

2.1 Tärinäalueiden rajaaminen kaavoituksessa

Tärinäalueiden rajaaminen perustuu maaperän värähtelyyn, jonka perusteella voidaan arvioida alueen soveltuvuutta eri käyttötarkoituksiin¹. Kartoituksen pohjalta tarkasteltava alue rajataan ja luokitellaan normaalikuntoisten rakennusten tärinänsiedon perusteella kolmeen vyöhykkeeseen (Kuva 4):

- V-alue: Lähinnä rataa oleva alue, jolla maaperän tärinää on niin voimakasta, että se voi aiheuttaa vahinkoriskin rakennuksille tai rakenteille.
- H-alue: Hyväkuntoisiin ja tavanomaisiin rakennuksiin ei yleensä aiheudu niiden käyttökelpoisuutta haittaavia vaurioita, jos liikennetärinä on huomioitu resonanssille herkkien rakenteiden suunnittelussa. Tärinä on kuitenkin yleensä selvästi havaittavaa ja häiritsee usein asumismukavuutta. Vaurioitumisriskin arvioinnissa tulee ottaa huomioon rakennuskanta ja käytetyt rakennusmateriaalit.
- E-alue: Tärinä ei aiheuta normaalikuntoisten rakenteiden vaurioitumista, mutta voi häiritä asumismukavuutta. Vaikutus asumismukavuuteen on tarkistettava erikseen VTT Tiedotteen 2569 mukaan.

¹ Suositus poikkeaa aikaisemmasta ohjeluonnoksesta (Törnqvist & Nuutilainen 2002), jossa rajat perustuivat rakennuksen värähtelyyn. Silloin rakennuskanta oli tunnettava tai määriteltävä jo rajauksen yhteydessä. Siksi tehty rajaaminen päti suoraan vain määritellylle rakennuskannalle. Nyt maaperän värähtely on erotettu selkeästi omaksi tehtäväkseen ja rakennukseen siirtyvä värähtely arvioidaan tarkemmin vasta maa-alueen rakennuskannan suunnittelun yhteydessä.



Kuva 4. Havainnekuva radan ympäristön värinävyöhykkeistä, kun alueen maaperäominaisuudet vaihtelevat.

Eri alueiden rajaus värinävyöhykkeisiin perustuu maaperän värähtelyn huippuarvoon v_{max} (määritelty liitteessä A). Eri alueiden värähtelyrajat on esitetty taulukossa 1. Maanpinnan värähtely ei saa pystysuunnassa eikä kummassakaan vaakasuunnassa ylittää taulukossa esitettyjä arvoja. Taulukossa esitetyt V-alueen rajat perustuvat kohdan 3.1 mukaisiin perustuksen ohjearvoihin rakenneluokan 5 (hauraat materiaalit) rakennuksille.

Taulukko 1. Tärinäalueiden (V, H ja E) rajauksessa käytettävät värähtelyrajat (v_{max} , mm/s) maaperän värähtelylle².

Maalaji	Pehmeä savi, leikkauslujuus < 25 kN/m ²	Sitkeä savi, siltti, löyhä hiekkä	Tiivis hiekka, sora, moreeni, rikkonainen tai löyhä kallio	Kiinteä kallio
Värähtelyssä hallitseva taajuus	alle 10 Hz	10–20 Hz	20–50 Hz	yli 50 Hz
V-alue	3	4,2	6	7,2
H-alue	1–3	1,4–4,2	2–6	2,4–7,2
E-alue	alle 1	alle 1,4	alle 2	alle 2,4

2.2 Tärinäkartoituksen tarkkuustasot

Kartoituksen tarkoituksesta ja halutusta tarkkuudesta riippuen tärinäalueiden rajaus voidaan tehdä kolmella eri tarkastelutasolla, joista kaksi ensimmäistä tasoa käsittelevät tärinäalueiden rajausta maankäytön tai ratojen suunnittelussa ja kolmas käsittelee rakennuskannan sekä käytettävien rakennusmateriaalien valintaa:

- Tarkastelutaso1: Alustava juna- ja maaperätietoihin perustuva rajaus. Kartoitus tehdään puoliempiirisillä laskentakaavoilla.

²Taulukko poikkeaa aikaisemmasta ohjeluonnoksesta (Törnqvist & Nuutilainen 2002). Taulukkoon on lisätty eri maalajit. Pehmeän saven raja on kuitenkin sama kuin aikaisemmin. Lisäksi aikaisemmassa ohjeluonnoksessa vertailusuurena käytettiin värähtelykomponenttien vektorisummaa, kun nyt perusteena on suurin värähtelykomponentti.

- Tarkastelutaso 2: Tarkennettu tärinämittauksiin perustuva rajausta. Kartoitus perustuu tunnetusta junaliikenteestä mitattuun maaperän värähtelyyn.
- Tarkastelutaso 3: Rakennuksessa esiintyvän värähtelyn arviointi. Tässä yhteydessä arvioidaan tarkat vaikutukset alueella olevaan tai suunniteltavaan rakennuskantaan. Uusien rakennusten suunnittelussa pyritään estämään värähtelyn voimistuminen rungossa ja välipohjissa. Nykyisen liikenteen vaikutus olemassa olevaan rakennuskantaan voidaan arvioida värähtelymittauksin ja rakennekatselmuksin.

Tason 1 kartoituksessa rajataan ja luokitellaan yleispiirteisesti ne alueet, joilla rautatieliikenteen aikaansaama tärinä voi aiheuttaa haittaa. Sen tavoitteena on niiden maa-alueiden, rakenteiden, laitteiden sekä kohteiden tunnistaminen ja nimeäminen, joihin tasojen 2 ja 3 tarkennetussa arvioinnissa tehdään värähtelymittauksia, vauriokartoituksia tai muita tärinän haitta-asteen selvittämiseen tai värähtelyn vaimentamiseen liittyviä toimenpiteitä.

Kartoituksessa arvioitavan tärinäalueen rajaukseen vaikuttavat pääasiassa radalla liikennöivä kalusto ja alueen maaperä. Tärinän syntymiseen vaikuttavat mm.

- liikennöivän kaluston tyyppi, paino, nopeus ja kunto,
- maaperä radan alla, radan rakenne ja sen perustamistapa, sekä
- radan epäjatkuvuuskohtat, kuten kiskovaihteet, maaperävaihtelut, sillat, alikulut.

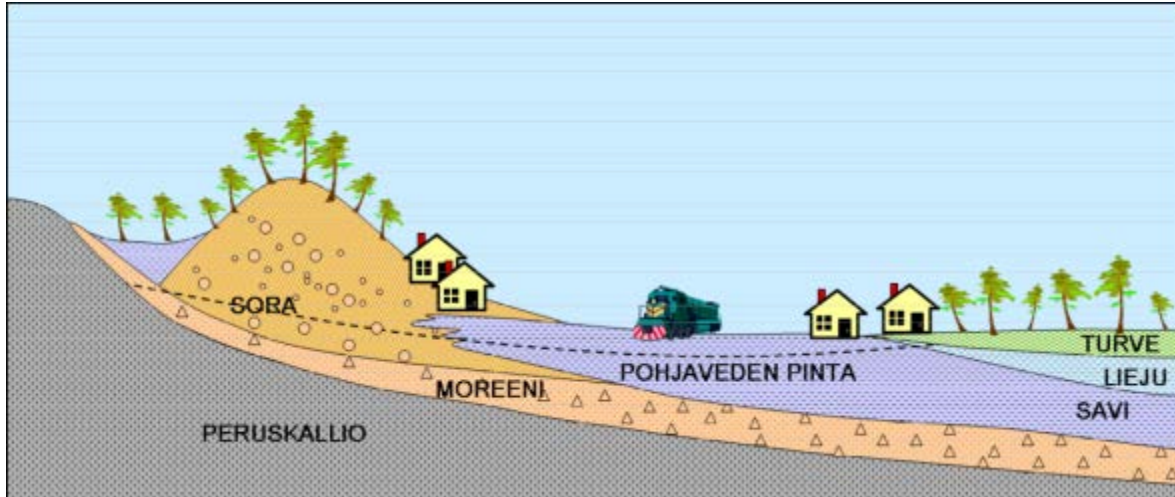
Tärinän leviämiseen maaperässä vaikuttaa maaperäolosuhteet sekä maaperän kerroksellisuus sekä erityisesti pehmeän maakerroksen paksuus. Maaperä vaikuttaa sekä värähtelyn suuruuteen että sen taajuussisältöön. Tarkemmin tärinään liittyviä käsitteitä on kuvattu liitteessä A ja tärinään vaikuttavia tekijöitä on liitteessä B.

Rakennukseen siirtyvään tärinään vaikuttavat erityisesti rakennuksen ja välipohjien dynaamiset ominaisuudet. Rungon ominaisuudet riippuvat perustamistavasta, käytetyistä materiaaleista, kerrosmäärästä, rakennuksen pinta-alasta ja kokonaismassasta. Välipohjien ominaisuuksiin vaikuttavat jänneväli, jäykkyys ja massa, jotka riippuvat käytetyistä materiaaleista. Rakennustyyppin, käytettyjen materiaalien ja mahdollisen resonanssin värähtelyä vahvistava vaikutus vaurioitumiseen joudutaan usein arvioimaan erikseen. Tärinän siirtymistä rakennuksen on kuvattu liitteessä C.

2.3 Tarkastelutaso 1 – Alustava juna- ja maaperätietoihin perustuva rajausta

2.3.1 Selvitys juna- ja maaperätiedoista

Tärinän kannalta ongelmallisimpia ovat raskaat tavarajunat ja pehmeät maa-alueet (Kuva 5). Siksi tärkeää on heti aluksi selvittää alueen maaperäolosuhteet. Erityisen ongelmallisia maalajeja ovat savet, sillit sekä joissakin tapauksissa myös vedellä kyllästyneet löyhät hiekat. Erityyppisistä junista tulee arvioida nykyisten paino-, pituus- ja nopeustietojen lisäksi myös niiden mahdollinen muuttuminen tulevaisuudessa. Tiedot radalla kulkevista junista löytyvät Liikenneviraston ylläpitämästä junien seurantajärjestelmästä (JUSE).



Kuva 5. Esimerkki tärinän suhteen Suomessa ongelmallisen alueen pohjasuhteista.

Tieto radan alla olevasta maaperästä on yleensä saatavissa Liikennevirastolta. Ratoihin liittyvää tietoa löytyy myös pengeri- ja poikkileikkaustutkimuksista. Pengertutkimuksia on tehty kaikilta sähköistetyiltä rataosuuksilta ja poikkileikkaustutkimuksia on olemassa useimmilta pehmeikköalueilta. Ratarakenteista, penkereen rakenteista ja radan pinnan poikkileikkausprofiileista on vuosina 2012–2014 mitattu noin 50 % rataverkosta. Tietoja voi tiedustella Liikenneviraston geoasiantuntijoilta. Lisäksi tietoja löytyy siltapaikkatutkimuksista.

Ympäröivän alueen maaperätietoja on saatavissa parhaiten Maanmittauslaitokselta (<http://www.paikkatietoikkuna.fi>), Geologisesta tutkimuskeskuksesta (<http://www.gtk.fi/tietopalvelut/karttapalvelut>, Kuva 6) tai kunnilta (esim. <http://soili.hel.fi>). Oleellisia tietoja ovat savi-, siltti ja turvepehmeikköjen rajaukset, kallioalueet sekä erilaisten kitkamaamuodostumien rajaukset (harjut, moreenimuodostelmat). Maaperägeologisia tietoja voidaan täydentää maastokatselmuksilla. Suomen maaperän erityisominaisuuksia on tarkemmin kuvattu Liitteen B kappaleessa 3.



Kuva 6. Esimerkki pohjatutkimuskartasta. (<http://ptrarc.gtk.fi/pohjatutkimusrekisteri/>)

2.3.2 Rajauksen periaate

Maaperäolosuhteiden perusteella etsitään tärinän leviämisen kannalta olennaiset alueet, joita ovat pehmeiköt (savi, siltti, turve, lieju) sekä vedellä kyllästyneet löyhät hiekka-alueet, joita

esiintyy mm. jokikerrostumissa, rantamuodostelmissa ja harjujen liepeillä. Koska tärinän leviäminen voi olla erilaista eri puolilla rataa, käyttöön hankittavan maaperätiedon tulee kattaa radan molemmat puolet.

Maalajimuodostumien rajaamisen lisäksi määritellään alueet, joissa voi esiintyä tärinä-aaltojen voimistumista. Tällaisia ovat mm. tärinän etenemissuunnassa ohenevat, kovaan pohjaan rajoittuvat pehmeiköt. Näillä alueilla tärinän voimakkuuden voidaan ennakoida olevan hieman suurempaa kuin homogeenisessa kohdassa samalla etäisyydellä. Tällaisessa tapauksessa tärinän voidaan olettaa leviävän jossain määrin myös pehmeikön ulkopuoliseen karkearakenteiseen maakerrokseen.

Tärinän rajausta varten tarkasteltava rataosuus jaetaan sellaisiin osa-alueisiin, joiden sisällä tärinäolosuhteet voidaan olettaa vakioiksi. Seuraavassa luvussa kuvatus laskentamallin avulla määritetään sellaiset etäisyydet radasta, jotka vastaavat taulukossa 1 esitettyjä V, H ja E -alueiden minimirajoja. Laskennassa tarvittavat parametrit arvioidaan kullekin osa-alueelle pohjasuhteiden ja junakaluston perusteella. Junan paino ja nopeus otaksutaan mahdollisimman epäedullisiksi tärinän suhteen, eli arvioinnissa käytetään rataosan suurinta mahdollista junapainoa ja suurinta sallittua nopeutta.

Eri osa-alueiden rajaukset yhdistetään yhtenäiseksi rajaviivaksi ottaen huomioon pehmeiköjen yms. alueiden rajaukset. Mikäli on oletettavissa, että junan aiheuttama heräte on poikkeavan korkea jossakin epäjatkuvuuskohdassa (esimerkiksi sillan päädyt, tasoristeykset, vaihteet), kasvatetaan etäisyyttä tällaisella kohdalla harkinnan mukaan. Vastaavasti, jos laskennallinen rajausta asettuu lähelle ohenevan pehmeikön kohtaa, kasvatetaan rajaa myös tällä kohdalla.

2.3.3 Laskentamenetelmä

Laskennallisessa arvioinnissa maaperän värähtely oletetaan samaksi sekä pysty- että vaakasuunnassa. Luotettava arviointi edellyttää, että juna- ja maaperätiedot tunnetaan riittävän hyvin. Parametrin valinnassa voidaan apuna käyttää aikaisemmin vastaavista kohteista saatua kokemusta.

Laskentamalli on alun perin julkaistu lähteessä (Madshus & al. 1996) ja sovitettu Suomen olosuhteisiin mm. lähteen (Törnqvist & al. 2006) liitteessä C.

Maanpinnan värähtelyn huippuarvo halutulla etäisyydellä radasta lasketaan lausekkeella

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

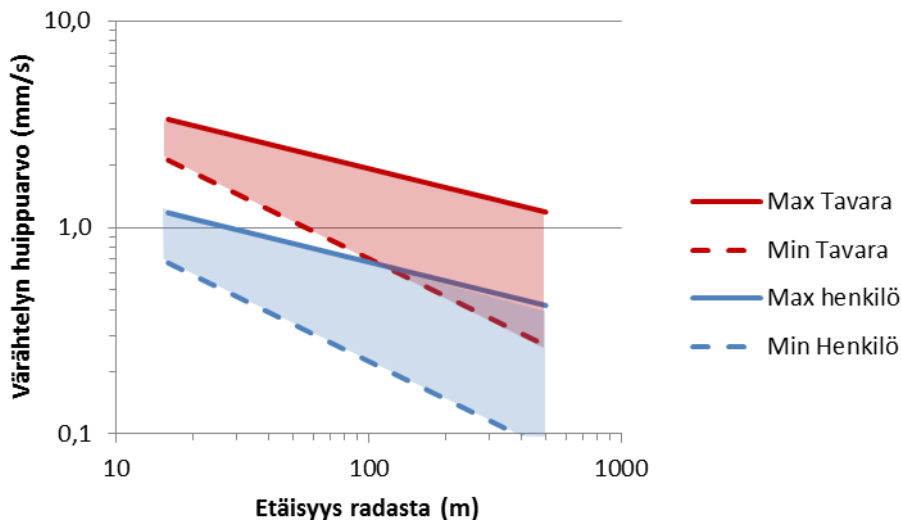
- jossa v_0 on värähtelyn perusarvo maassa etäisyydellä $D_0 = 15$ m raiteen keskilinjasta ja jonka arvo saadaan taulukosta 2.
- D on tarkasteltava etäisyys. B on etäisyyseksponentti, joka saadaan taulukosta 2.
- S on tarkasteltava nopeus, jonka perusarvo on $S_0 = 70$ km/h. Nopeuseksponentti $A = 0,9-1,1$ (keskimäärin 1,0).
- G on tarkasteltavan junan kokonaispaino, jonka perusarvo $G_0 = 2000$ tn.
- k_R on radan kunnosta riippuva kerroin ja on keskimäärin 1,0. Vanhalle yksiraiteiselle radalle $k_R = 1,3$ ja uudelle moniraiteiselle radalle $k_R = 0,7$.
- $F = 2$ on varmuuskerroin. Mikäli perusyhtälön kalibrointi on varmistettu kohteen maaperän tärinämittauksilla, $F = 1$.

Taulukko 2. Värähtelyn perusarvo etäisyydellä $D_0 = 15$ m sekä etäisyysseksponentti B eri maalajeille ja junatyypeille.

Määrävä tärinää johtava maalaji	EkspONENTTI B	Värähtelyn perusarvo v_0 (mm/s) ja vaihteluväli	
		Tavarajuna	Henkilöjuna
Tärinäherkkä koheesiomaa (ljSa, ljSi, Lj)	0,3–0,6	1,1–1,7	0,7–1,2
Normaali koheesiomaa (Sa, saSi, Si)	0,5–1,0	0,7–1,2	0,5–0,9
Välimaalajit (karkeaSi, hkSi, siHk, hienoHk)	0,9–1,5	0,4–0,9	0,3–0,6
Karkearakeinen (Hk, Sr, HkMr, SrMr)	1,4–2,0	0,3–0,6	0,2–0,4

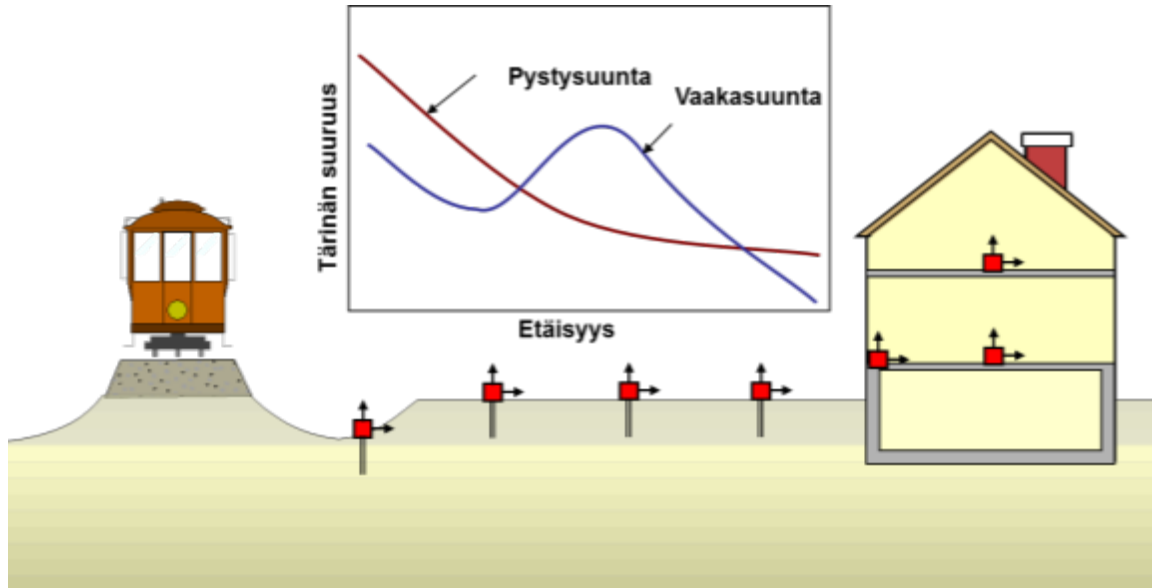
Maalajiselitykset: ljSa – liejuinen savi, liSa – lihava savi, Lj – lieju, Sa – savi, saSi – savinen siltti, Si – siltti (vastaava geologinen nimike hiesu), karkeaSi – karkea siltti (vastaava geologinen nimike hieta), hkSi –hiekkainen siltti (hieta), siHk – silttinen hiekka, hienoHk – hieno hiekka, Hk – hiekka, Sr – sora, HkMr – hiekkainen moreeni, SrMr – sorainen moreeni.

Laskennallinen värähtelyn arviointi taulukossa 2 esitetyillä maaperäparametrien vaihteluväleillä voi ilman asiantuntijaa ja kokemusperäistä tietoa johtaa hyvin erilaisiin tuloksiin. Kuvaan 7 on laskettu esimerkkinä arvio tärinän vaihteluvälistä keskimääräiselle Suomen tavarajunalle ($G = 1400$ tn, $S = 100$ km/h) ja henkilöjunalle (IC/pikajunat, $G = 500$ tn, $S = 140$ km/h) (Liikennevirasto 2013). Tarkasteltavana on tärinäherkkä koheesiomaa. Esimerkissä on käytetty radan kuntokerrointa $k_R = 1,0$ ja varmuuskerrointa $F = 2$. Suuren vaihteluvälin lisäksi kuvan tuloksia arvioitaessa on huomattava, että Suomessa suurimmillaan tavarajunan paino voi esimerkitapauksesta poiketen olla noin 5000 tn ja henkilöjunan paino noin 1000 tn. Junan kokonaispaino ei ole yksiselitteinen tekijä tärinän syntyisessä. Junan kokoonpanossa olevat suurempien akseli- ja telipainojen keskittymät vaikuttavat syntyvään tärinään.



Kuva 7. Esimerkki maaperäparametrien hajonnan vaikutuksesta värähtelyyn eri junatyypeillä.

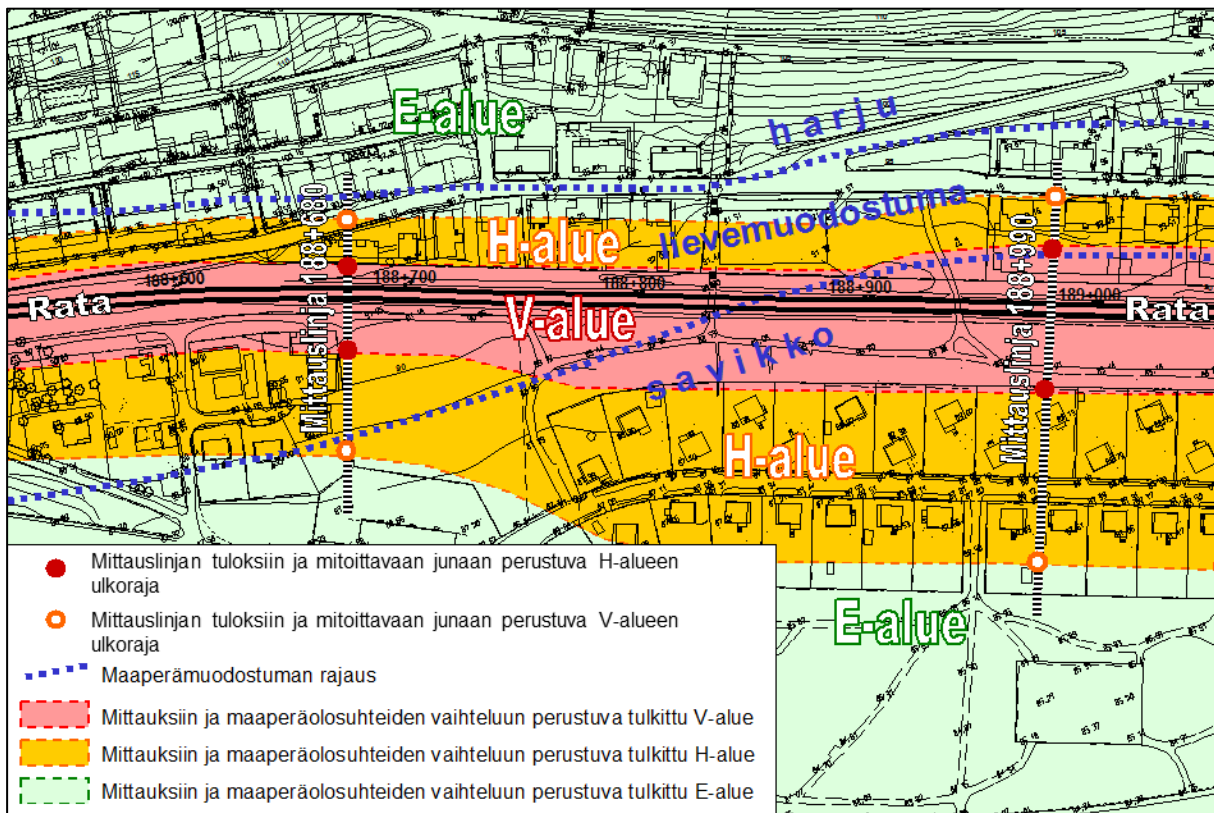
Laskennassa on hyvä tiedostaa, että menetelmä on likimääräismenetelmä, jossa oletetaan vaaka- ja pystysuuntaiset värähtelyt yhtä suuriksi. Menetelmä saattaa aliarvioida vaakavärähtelyä erityisesti lähellä rataa ja yliarvioida sitä kaukana radasta. Mallin käyttöä vaikeuttaa myös suuri maaperäolosuhteiden vaihteluväli. Epävarmuutta aiheuttavat myös geologiset epäjatkuvuuskohdat, kuten maakerrosten paksuuden vaihtelut esimerkiksi rinnealueisiin rajautuvilla savikkoalueilla. Tällaisilla alueilla tärinä voi esiintyä muuta ympäristöä voimakkaampana. Siksi laskennallista rajausta tarkennetaan yleensä aina maaperästä ja rakennuksista tehdyillä värähtelymittauksilla (Kuva 8).



Kuva 8. Maaperän ja rakennuksen värähtelyn mittaamisperiaate. Radan läheisyydessä vaakavärähtelyt voivat olla pystyvärähtelyä suuremmat.

2.3.4 Tulosten raportointi

Tärinäkartoituksesta laaditaan karttatuloste ja seloste. Tärinävyöhykkeiden rajat esitetään 1:2000 tai 1:1000 kartoilla (Kuva 9). Karttapohjana käytetään esimerkiksi kunnan ylläpitämää ajan tasalla olevaa kaavoituksen kaava- tai rekisterikarttaa, joista ilmenevät rakennukset, tiet ja tonttien rajat. Ratasuunnitelmista tarkistetaan ratarakenteet ja tärkeimmät epäjatkuvuuskohdat.



Kuva 9. Esimerkki karttatulosteesta, jossa laskentamallilla saatuja tuloksia on tarkennettu tarkastelutason 2 (ks. kappale 2.4) mittaustulosten avulla (Törnqvist & Nuutilainen 2002).

Tulosten raportointi käsittää karttatulosteen ja selosteen.

1) Karttatulostuksessa esitetään

- radan km-paalutus, radan yleiskunto ja mahdolliset epäjatkuvuuskohdat,
- tärinäaluerajaukset V, H ja E,
- eri tärinävyöhykkeillä sijaitsevat nykyiset ja suunnitteilla olevat rakennukset yksilöityinä,
- alueet ja linjat, joilta maan tärinä ehdotetaan mitattavaksi, sekä
- rakennukset, joista tärinä ehdotetaan mitattavaksi.

2) Selosteessa esitetään

- rataosuuden kuvaus (perustaminen, kunto, kiskot, pölkyt, rakennusvuosi ja viimeiset perusparannusvuodet),
- rautatieliikenteen kuvaus junatietoineen,
- maaperätiedot,
- alueella olevien tai suunniteltavien kiinteistöjen tiedot,
- viittaukset jo aikaisemmin raportoituihin maaperästä tai rakennuskohteista tehtyihin tärinämittauksiin,
- tärinän laskennalliset tarkastelut ja muut tärinäalueiden rajausperusteet, sekä
- alueella olevien tai suunniteltujen rakennusten tärinäalttius rakennustapojen avulla määritettynä (ks. Taulukko 5).

2.4 Tarkastelutaso 2 – Tarkennettu tärinämittauksiin perustuva rajaus

Tarkennetussa rajauksessa käytetään apuna alueelta tehtäviä tärinämittauksia. Laskennallinen tarkastelu voidaan korvata kokonaan mittaamalla maaperän värähtely tai sillä voidaan tarkentaa laskennallisia arvioita. Laskennallisessa arvioinnissa käytetty tarkasteltavan rataosuuden jako tärinän suhteen erilaisiin osa-alueisiin on hyvä pohja värähtelyn mittausaluiden valinnalle, mutta alueelle sijoitettavien mittauspisteiden määrä voi kuitenkin vaihdella huomattavasti maaperäolosuhteiden mukaan.

Mittaukset on aina pyrittävä tekemään vertailukelpoisin ja toistettavin menetelmin. Mikäli junaliikenteen tärinään vaikuttavat tekijät muuttuvat olennaisesti aikaisemmin tehtyjen mitausten jälkeen, tulee mitausten uusiminen harkita erikseen.

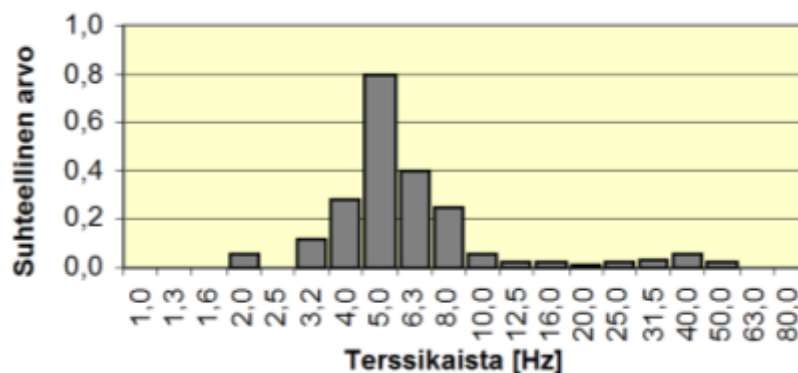
2.4.1 Mittausten suoritus

Maanpinnan mittaus tehdään yleensä linjamittauksena rataan nähden poikittaisessa linjassa useammassa pisteessä yhtäaikaisesti. Yleisluonteisessa kartoituksessa suositeltava mittauslinjojen määrä on pehmeillä alueilla 2 kpl ratakilometriä kohden, jos pohjasuhteet ovat vakiot tai vain hitaasti muuttuvia. Tarkennetussa maankäytön suunnittelussa, erityisesti kun arvioidaan tärinän mukavuushaittaa, mittauspisteiden välimatka voi kuitenkin olla huomattavasti pienempi, esimerkiksi 60–100 metriä. Mikäli radan molemmat puolet ovat pohjasuhteiltaan samanlaisia, eikä selvää poikittaista maaston kaltevuutta tai maaperän muutosta ole havaittavissa, voi tällä alueella yhdellä puolella tehty mittaus edustaa myös radan vastakkaista puolta.

Linjamittauksessa mittauspisteiden etäisyydet radasta määritetään laskennallisesti arvioitujen tärinävyöhykkeiden leveyksien perusteella. Mittauspisteiden määrän tulee olla vähintään kolme, jotta tärinän vaimeneminen etäisyyden suhteen voidaan arvioida. Yleisluonteisessa pehmeikköalueiden tärinäkartoituksessa suositus etäisyydeksi radan keskeltä on 40–60, 60–100 ja 100–160 metriä, kun linjassa käytetään kolmea mittapistettä.

Mittauspisteiden etäisyyden valinnassa tulee ottaa huomioon myös se, että näennäisesti pienet erot maaperässä (pehmeikön paksuus ja reuna-alueet) ja radan ominaisuuksissa (vaihteet, sillat, rummut, risteykset) voivat vaikuttaa merkittävästi värähtelyn suuruuteen. Jos esimerkiksi pehmeikköalueen ns. kova pohja nousee pintaan lähempänä rataa tai pohjasuhteet vaihtelevat muuten voimakkaasti, pienemmät mittauspisteiden väliset etäisyydet ovat usein perusteltuja. Etäisyyksissä tulee huomioida, että mittaustulosten ekstrapolointia mitatun alueen ulkopuolelle tulee välttää. Mittaukset suositellaan tehtäväksi sulan maan aikaan, ensisijaisesti kevät- ja syyskaudella, jolloin maaperän kosteus on suurin. Mikäli mittaus tehdään roudan aikaan, tulee tulosten tarkastelussa huomioida savimaan roudan vaikutus korkeisiin värähtelytaajuuksiin.

Tärinä mitataan kolmessa suunnassa, joista x on radan suunta, y on rataa nähden kohtisuora suunta ja z on pystysuunta. Mitattavan taajuusalueen tulee kattaa terssikaistat 1–80 Hz. Tärinämittausten tekijän ja tulosten analysoijan tulee osoittaa, että hänellä on riittävä asiantuntemus liikennetärinän mittaamisesta ja tulosten analysoinnista. Mittauslaitteiston kokoonpano ja sen tarkkuus tulee olla dokumentoitu. Laitteiston erottelukyvyn ja taustakohinan tulee olla niin pieni, että niillä voidaan luotettavasti mitata värähtelyt, joiden amplitudi on 0,1 mm/s. Mittaustuloksista tulee määrittää myös värähtelyn taajuussisältö (Kuva 10), joka antaa käsityksen maaperän ominaisuuksista ja jota voidaan tarvita resonanssiherkkien rakenteiden värähtelyn arvioinnissa. Hetkellinen värähtelyspektri esitetään terssikaistoittain siltä 1 sekunnin pituiselta ajanjaksolta (aikaikkuna 1 s), jolla värähtelyn suurin arvo esiintyy (Talja 2011).



Kuva 10. Esimerkki terssikaistoittain esitystä värähtelyspektristä.

2.4.2 Antureiden asennus

Mittausanturien asennuksessa maahan tulee ottaa huomioon, ettei anturien kiinnityselimen tai johtojen heiluminen aiheuta häiriötä mittaustuloksiin. Luotettavin tapa on upottaa anturit maahan. Yleensä kuitenkin pehmeikköalueiden suhteellisen matalia taajuuksia mitattaessa riittää, että anturit on asennettu esim. metallikoteloon, joka on kiinnitetty tukevasti maahan lyödyn tai kierretyn varren yläpäähän, aivan maan rajaan.

Häiriöttömän mittauksen edellytyksenä on, että kiinnityksen ominaistajuus on vähintään nelinkertainen mitattavan värähtelyn hallitsevaan taajuusalueeseen nähden. Kiinnityselimen ominaistajuus riippuu antureiden massasta, kiinnitysvarren jäykkyydestä ja varren asennuksen tukevuudesta. Ominaistaajuus voidaan arvioida mittaamalla kiinnityselimeen tai mittauskoteloon kohdistetun pehmeän vaakasuuntaisen iskun aiheuttama värähtely.

2.4.3 Mittaustulosten tarkastelu

Tilastollisen luotettavuuden vuoksi mittausten lukumäärän tulisi olla vähintään 5 ohiajoa kulkutakin tarkasteltavalta junatyypiltä (esim. raskas tavarajuna yli 3000 tn, tavarajuna alle 3000 tn, P–Pikajuna, IC1/IC2–InterCity, H–taajamajuna, PEN–Pendolino, ALL–Allegro). Mikäli junatyypin sisällä tulosten ero on suurempi kuin 25 %, mittausten määrää tulee kasvattaa.

Jos junatyyppejä ei erotella, mittaukset voidaan tehdä myös ohjeiden (Talja 2011) mukaisesti kaikesta liikenteestä yhden viikon ajanjaksolta, jolloin saaduista mittaustuloksista valitaan 15 suurimmat värähtelyt aiheuttanutta tapahtumaa. Molemmissa tapauksissa mittauksiin tulisi aina sisältyä rataosuudella kulkeva raskain juna, vaikka se kulkisi harvemmin kuin kerran viikossa.

Automaattisessa mittauksessa analysoitaviksi valitut tapahtumat tulee osoittaa liikenteen aiheuttamiksi esimerkiksi tapahtumahetkellä otetun kuva-aineiston tai eri pisteissä tapahtuvan värähtelyn samanaikaisuuden avulla. Junatietojen selvittämisessä voidaan apuna käyttää liikenteen aikataulutietoja ja JUSE-rekisteriin (junien seurantajärjestelmä) tallennettuja tietoja.

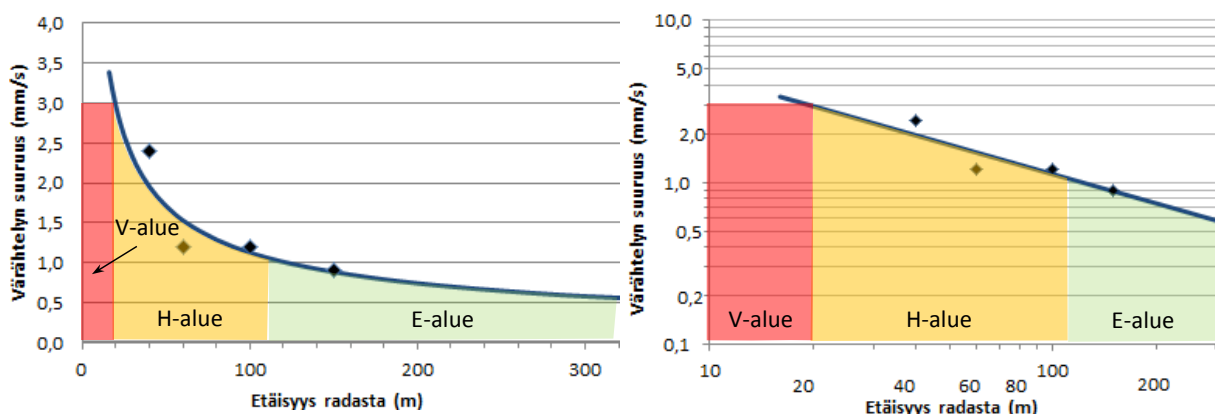
Mittaustuloksista määritetään tilastollinen maksimiarvo lausekkeesta

$$v_{max} = v_{ka} + 1,8 \cdot s$$

jossa v_{ka} on tulosten keskiarvo ja s on niiden keskihajonta. Eri suunnissa (x, y, z) mitatut arvot käsitellään tilastollisesti erikseen, mutta tärinäalueiden rajausta tehdään niistä suurimman arvon perusteella.

2.4.4 Mittauksin varmennettu laskentamalli

Parhaiten edellisessä kappaleessa esitetty laskennallinen malli sopii käytettäväksi yhdessä maaperästä tehtyjen värähtelymittausten kanssa. Laskentamallin korjauksen peruseriaate on, että mallilla saadut tulokset sovitetaan vastaamaan mahdollisimman hyvin mittaustulosten eri pisteistä saatuja mittaustuloksia (Kuva 11). Kun junien painot ja nopeudet tunnetaan junatyypeittäin, voidaan eri etäisyydellä radasta mitatuista värähtelyistä määrittää sellaiset kohdekohtaiset parametrit v_0 ja B , jotka sopivat parhaiten mittaustuloksiin. Samalla taulukossa 2 esitetyt laskentaparametrit tarkentuvat. Kohdekohtaisessa mittauksin varmennetussa tarkastelussa on radan kuntokerroin $k_R = 1,0$ ja varmuuskerroin $F = 1,0$. Haluttaessa voidaan tarkentaa myös nopeusekspONENTTIA A.



Kuva 11. Esimerkki korjatun laskentamallin käytöstä. Pisteet esittävät pehmeän savimaa-alueen mittaustuloksia ja kuvaaja korjattua laskentamallia. Vasemmalla samat tulokset on esitetty lineaarisella ja oikealla kaksoislogaritmisella asteikolla.

Määrittelemällä parametrit erityyppisille junille, laskentamalli muuttuu yleistä mallia tarkemmaksi työkaluksi, jolla voidaan kohdekohtaisesti tarkastella muuttuvien tekijöiden kuten junan tyyppin, painon ja nopeuden vaikutusta eri etäisyyksillä oleviin kohteisiin.

Malli soveltuu parhaiten pystyvärähtelyiden tarkasteluun, sillä toisin kuin vaakavärähtelyt, ne pienenevät yleensä suhteellisen tasaisesti etäisyyden kasvaessa. Mikäli samalta etäisyydeltä mitatut vaakavärähtelyt ovat kuitenkin pienemmät kuin pystyvärähtelyt, mallilla voidaan arvioida turvallisesti myös vaakavärähtelyn vaikutusta. Malli soveltuu kuitenkin huonosti käytettäväksi aivan radan välittömässä läheisyydessä (vrt. Kuva 8).

Mittaustulokset voidaan hyödyntää tärinärajauksessa myös suoraan ilman laskentamallin käyttöä. Molemmista tapauksista tulee mittaustulokset ennen niiden käyttöä muuntaa vastaamaan tärinärajausten perusteena olevien junien painoja ja nopeuksia.

2.4.5 Tulosten raportointi

Mittaustulokset ja niistä tehdyt johtopäätökset esitetään mittausraporttina ja tarkistettuna karttatulosteena (Kuva 9). Mittausraportissa tuloksista esitetään kaikilta mittauskanavilta vähintään tilastollinen maksimiarvo v_{max} sekä sitä vastaava keskimääräinen taajuussisältö terssikaistoittain (Kuva 10). Ellei erikseen muuta ole sovittu, tuloksista määritetään myöhemmä tarvetta varten myös asumismukavuutta kuvaava värähtelyn tunnusluku ja sitä vastaava painotettu taajuussisältö. Ohjeita keskimääräisen taajuussisällön ja värähtelyn tunnusluvun määrittämisestä sekä mittaustulosten esittämisestä on annettu VTT Tiedotteessa 2569 (Talja 2011).

Lisäksi raportin liitteinä tulee esittää ainakin seuraavat tiedot:

- 1) Mittauspisteiden sijainti kaava- ja geokartalla. Mittauspisteiden koordinaatit määritetään ja kirjataan ETRS-TM35FIN – koordinaatistossa sekä ratojen osalta lisäksi ratakohdan kilometrikoordinaatistossa.
- 2) Liikennetiedot mitatuista tapahtumista

Liikennetiedot lisäävät tulosten luotettavuutta ja helpottavat mittaustulosten myöhemmä hyödyntämistä. Jälkikäteen liikennetietojen saaminen ei useinkaan ole mahdollista. Junista suositellaan esitettäväksi tapahtuman ajankohdan ja suurimman mitatun värähtelyn suuruuden lisäksi vähintään seuraavat tiedot: junan tyyppi, kulkusuunta, junan numero, junan kokonaispaino, junan suurin akselipaino ja suurin sallittu nopeus mittausalueella.

- 3) Lisätiedot

Liitteissä voidaan esittää muuta sellaista tietoa, joka tulosten tulkinnan tai jatko-
hyödyntämisen kannalta katsotaan tarpeelliseksi. Yleensä todisteena suurimmat värähtelyt aiheuttaneista tapahtumista esitetään värähtelysignaalit, värähtelyspektrit ja kuva-aineistoa tärinän aiheuttajasta. Lisätietoja voivat olla myös radan pintarakenteiden laji ja kunto, radan perustamistapa, mahdolliset tärinän vaimennusratkaisut, liikenteelle asetetut paino- ja nopeusrajoitukset sekä radan epäjatkuvuuskohdat ja niiden sijainti (sillat, rummut, ratavaihteet, ajohidasteet, tms.). Erityisen tärkeitä dokumentoitavia ovat sellaiset tiedot, joiden saaminen ei myöhemmin ole mahdollista.

2.5 Tarkastelutaso 3 – Rakennuksessa esiintyvän värähtelyn arviointi

Rakennukseen siirtyvän värähtelyn arviointia tarvitaan maa-alueen rakennuskannan suunnittelun yhteydessä, erityisesti kun lähtökohtana on asumismukavuus. Kun suunnitellaan uusia asuinrakennuksia, rakennuskannan vauriotarkastelua ei yleensä tarvita, sillä asumismukavuuden raja on huomattavasti tiukempi kuin raja rakenteiden vaurioitumiselle.

Edellä esitetty tärinäkartoituksen lähtökohtana on rakennuksen perustuksen värähtely. Rakennuksessa esiintyvän värähtelyn suuruuteen vaikuttaa myös rakennuksen mittasuhteet sekä käytetyt materiaalit. Siksi rakennuskannan ja niiden materiaalin valintaan tulee kiinnittää erityistä huomiota, kun suunnitellaan maankäyttöä tärinäkartoituksessa rajatuille H-alueille.

Ylärakenteissa jatkuva värähtely voi voimistua resonanssin vuoksi. Voimakkaan resonanssin esiintyminen on melko harvinaista, mutta esiintyessään sen merkitys voi olla suuri. Siksi resonanssin merkitys tulee arvioida liikennetärinäalueelle suunniteltavien rakennusten suun-

nittelussa. Resonanssi-ilmiö vahvistaa voimakkaasti sitä taajuuskomponenttia, joka sattuu rakenteelle ominaisen ominaistajuuden alueelle. Pehmeillä maa-alueilla värähtelyn koko energia saattaa osua lähes yhdelle terssikaistalle, jolloin resonanssin merkitys usein korostuu. Koska resonanssin syntyminen on tapauskohtainen, vauriokartoituksessa rakenteiden värähtelyn suuruus tulee aina määrittää rakenteista tehtävin mittauksin. Eri materiaalien vaurioitumisherkkyys otetaan huomioon tärinän ohjearvoissa kappaleessa 3 (Taulukko 5) kuvattun rakennustapakertoimen avulla. Värähtelyn siirtymistä rakennukseen on kuvattu tarkemmin liitteessä C.

2.5.1 Suurennuskertoimeen perustuva menetelmä

Mikäli rakenteiden värähtelyä ei ole mitattu tai tarkempaa värähtelyn taajuussisältöä huomioivaa resonanssitarkastelua ei tehdä, rakennuksessa esiintyvien pysty- ja vaakasuuntaisen värähtelyn voimistuminen mahdollisessa resonanssissa voidaan karkeasti arvioida suurennuskerroinmenetelmällä.

Suurennuskerroinmenetelmässä värähtelyn huippuarvo arvioidaan lausekkeesta

$$v_B = k_B \cdot v_G$$

jossa k_B on värähtely suurennuskerroin ja v_G on maan värähtely. Kertoimen suuruus riippuu tarkasteltavasta rakennusosasta ja värähtelyn suunnasta. Suosituksia värähtelyn arvioinnissa käytettäviksi suurennuskertoimiksi on esitetty taulukossa 3. Vain erittäin harvoin resonanssin merkitys rakennuksissa on suurempi kuin taulukossa on esitetty.

Taulukko 3. Suurennuskertoimia rakennuksen eri osien pysty- ja vaakasuuntaisen värähtelyn arvioimiseksi mahdollisessa resonanssissa.

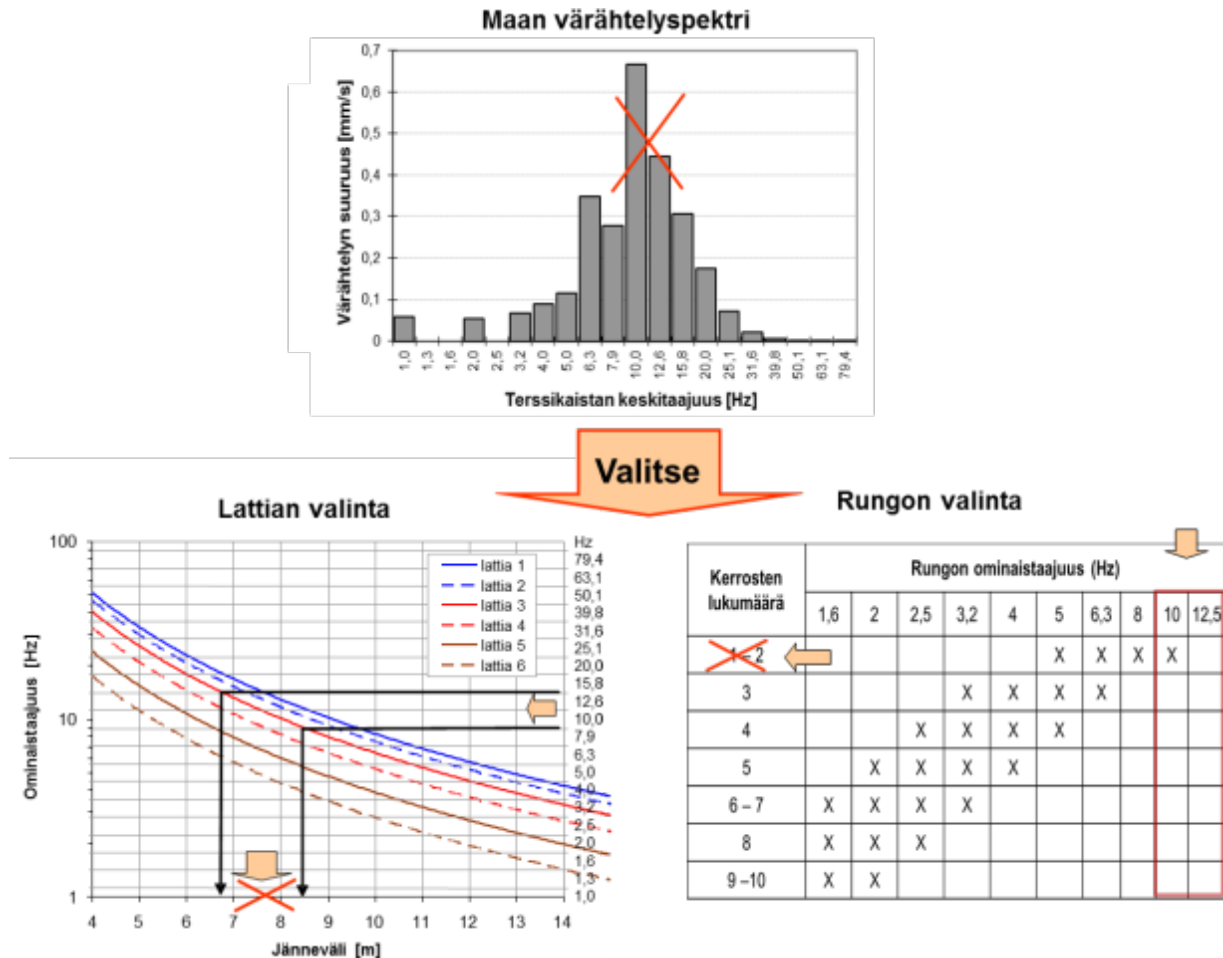
Rakennusosa	Värähtelyn suunta	Suurennuskerroin k_B
Perustus	Kaikki suunnat	1,0
Maanvarainen lattia,	Kaikki suunnat	1,0
Alapohja, paaluperustus	Vaakasuunta	1,5
Ala- ja välipohjat	Pystysuunta	3,0
Kattotaso, enintään 2 kerrosta	Vaakasuunta	3,0
Kattotaso, 3–4 kerrosta	Vaakasuunta	2,0
Kattotaso, yli 4 kerrosta	Vaakasuunta	1,0

Resonanssin merkitys on suurin pehmeillä maa-alueilla, jolloin maaperän värähtelyn energia esiintyy hyvin kapealla taajuuskaistalla, joka voi sattua rungon tai lattian ominaistajuuden alueelle. Kovissa maaperissä värähtelyssä hallitsevat yli 10 Hz taajuudet ja värähtely on laajakaistaista. Silloin vaakavärähtely ei yleensä voimistu rungossa ($k_B = 1,0$) ja latioissakin voimistumisen voidaan olettaa vähäiseksi ($k_B = 1,5$). Rakennukseen siirtyvä värähtely tulee kuitenkin aina olettaa vähintään samansuuruiseksi kuin maaperässä, vaikka todellisuudessa värähtely voikin jossain määrin vaimeta rakennukseen siirtyessään.

2.5.2 Taajuussisältöön perustuva menetelmä

Rakennuksen värähtely voidaan arvioida edellä esitettyä tarkemmin maaperän värähtelymittauksista saatujen tulosten perusteella, koska silloin värähtelystä tunnetaan myös sen taajuussisältö. Yleensä menettelyllä pyritään estämään maaperässä esiintyvien voimakkaimpien värähtelytaajuuksien vahvistuminen rakenteissa. Lähtökohtana on, että oikeilla runkoon ja

välipohjiin liittyvillä valinnoilla voidaan estää värähtelyssä dominoivien taajuuskomponenttien vahvistuminen resonanssin vuoksi (Kuva 12).



Kuva 12. Periaatekuva lattian ja rungon värähtelysuunnittelusta. Oikeilla runkoon ja välipohjiin liittyvillä valinnoilla voidaan estää värähtelyssä dominoivien taajuuskomponenttien vahvistuminen.

Värähtelysuunnittelun perusperiaate on, että rakennuksen kerrosluku ja lattioiden jänneväli tulee valita siten, että rakenteen alin ominaistajuus ei satu perustuksen värähtelyspektrissä hallitsevalle taajuusalueelle. Kuvan 12 esimerkissä värähtelyssä hallitsevat terssikaistat 10 Hz tai 12,6 Hz. Jos kuvan värähtelyspektri esittää lattian pystysuuntaista värähtelyä mahdollisessa resonanssissa ja jos lattiaksi valitaan kuvan vaihtoehdoista lattiatyyppejä 3, jänneväli ei saa olla 6,7–8,4 m. Jos taas esimerkin värähtelyspektri kuvaa rungon vaakavärähtelyä mahdollisessa resonanssissa, rakennuksen ei tule olla kaksikerroksinen.

Mittauksiin perustuvaa tarkennettua värähtelysuunnittelua on kuvattu asumismukavuutta käsittelevässä VTT Tiedotteessa 2569 (Talja 2011). Jos menetelmää halutaan soveltaa myös vaurioitumisalttiuden arvioinnissa, arviointi käsittää seuraavat vaiheet:

- Määritä värähtelyn maksimiarvo v_{max} , sitä vastaava tehollisarvo v_{rms} (määritelty liitteessä A) ja sitä vastaava värähtelyspektri terssikaistoittain. Tehollisarvo ja spektri määritetään ilman VTT Tiedotteen 2569 taajuuspainotusta.
- Arvioi perustuksen värähtelyspektri VTT Tiedotteen 2569 mukaisella pienennyksellä.
- Arvioi lattian ja rungon värähtelyn tehollisarvo resonanssissa v_{res} VTT Tiedotteen 2569 mukaisesti siinä esitetyillä suurennuskertoimilla.
- Laske suhde v_{res}/v_{rms} . Jos arvo on pienempi kuin 1,0 käytä arvoa $v_{res}/v_{rms} = 1,0$.
- Laske lattian ja rungon värähtelyn huippuarvo resonanssissa, $v_{max.res} = (v_{res}/v_{rms}) \cdot v_{max}$.

3. Tärinän ohjearvot

Tärinän ohjearvo on raja, jota pienemmän värähtelyn ei katsota aiheuttavan vahinkoa. Tärinän ohjearvot on tarkoitettu helpottamaan rakenteiden tärinäkestävyyden arviointia. Ohjearvot ovat perusteena myös tärinäkartoitukseen liittyvissä rajauksissa (luku 2.1).

Tärinätarkastelun lähtökohtana on aina kolmikomponenttisesti mitattu värähtely. Vertailussa käytetään suurinta perustuksessa esiintyvää värähtelykomponenttia tai suurinta rakennuksen rungossa esiintyvä vaakavärähtelyä. Ohjearvoja voidaan käyttää myös ala- ja välipohjissa esiintyvälle pystyvärähtelylle, mutta vain siinä tapauksessa että kantavien palkkien tai laattojen varaan on tehty vaurioitumisalttiita rakenteita.

3.1 Ohjearvot perustukselle

Ohjearvona suositellaan käytettäväksi ohjeessa RIL 253 (RIL 2010) maa- ja pohjarakennustöille esitettyjä arvoja. Näiden rajojen käyttö on perusteltua, sillä useista työmenetelmistä (mm. lyöntipaalaus, pudotustiivistys, tärytys, työmaaliikenne) aiheutuva värähtely on luonteeltaan lähellä junaliikenteestä aiheutuvaa pitkäkestoista tärinää. Tämä rinnastus on tehty myös Norjan uusissa ohjeissa (liite D). Tärinän ohje-arvot esitetään rakennuksen perustuksesta mitatulle värähtelylle, mutta ohjeen RIL 253 mukaan arvoja voidaan usein soveltaa myös ylärakenteista mitatuille värähtelyille. Ohjeessa RIL 253 esitetyt rajat vastaavat hyvin Norjassa, Ruotsissa ja myös monissa muissa maissa esitettyjä rajoja. Poikkeuksena on Sveitsi, jossa käytössä olevat rajat ovat ehdotettua käytäntöä tiukemmat (vrt. liite D).

Tärinän ohjearvo v määritetään kertomalla värähtelyrajan perusarvo v_0 rakennustapakertoimella F_k , jolloin ohjearvo on $F_k \cdot v_0$. Värähtelyrajan perusarvo v_0 määrittää rajan, jolla hyväkuntoisiin ja tavanomaisiin rakennuksiin ei yleensä aiheudu niiden käyttökelpoisuutta haittaavia vaurioita. Tärinän ohjearvo ei kuitenkaan ota huomioon tärinän voimistumista ylärakenteissa mahdollisen resonanssin vaikutuksesta. Perusarvo riippuu maapohjasta taulukon 4 mukaisesti. Perusarvossa pyritään ottamaan huomioon sekä värähtelyspektrin hallitseva taajuus että värähtelyspektrin muoto. Pehmeillä ja sitkeillä savi- ja silttialueilla ja kaukana radasta hallitsevat yleensä matalat 5–15 Hz taajuudet ja värähtely on kapeakaistaista. Tiiwiillä hiekka- ja moreenialueilla hallitsevat yleensä tätä korkeammat taajuudet ja värähtelyt esiintyvät savimaita laajemmalla taajuusalueella.

Taulukko 4. Värähtelyn perusarvo perustuksessa erilaisille maa- ja kalliopohjille perustetuille rakennuksille (RIL 2010).

Maalaji	Pehmeä savi, leikkauslujuus < 25 kN/m ²	Sitkeä savi, siltti, löyhä hiekka	Tiivis hiekka, sora, moreeni, rikkonainen tai löyhä kallio	Kiinteä kallio
Värähtelyn perusarvo v_0	5	7	10	12
Värähtelyssä hallitseva taajuus ¹⁾	alle 10 Hz	10–20 Hz	20–50 Hz	yli 50 Hz

¹⁾ Hallitsevat taajuudet on lisätty liitteen B ja lähteiden (DIN 1999, Törnqvist & Nuutilainen 2002) perusteella, niitä ei ole esitetty ohjeessa RIL 253 (2010).

Rakennustyyppi ja -materiaali otetaan huomioon rakennustapakertoimella F_k . Taulukossa 5 on esitetty arvot hyväkuntoisille rakenteille. Arvot ovat yhtenevät RIL 253 -ohjeessa maa- ja pohjarakennustöille esitettyjen arvojen kanssa (RIL 2010, taulukot 3.3 ja 3.1, kelpoisuus aaluokka). Taulukossa esitetyistä rakenteista poikkeavien, kuten esim. huonossa kunnossa ole-

vat rakenteet, värinänkestävyys on arvioitava tapauskohtaisesti. Tukipaaluille perustetulle hyväkuntoiselle rakennukselle taulukon arvoja voidaan korottaa 20 %.

Taulukko 5. Rakennustapakertoimet värinän ohjearvojen määrittämiseksi perustuksissa (RIL 2010).

Rakenneluokka (hyväkuntoinen rakenne)	Rakennustapakertoimen F_k
1. Raskaat teräsbetoni- ja teräsrakenteet kuten sillat ja laiturit	2,00
2. Teräsbetoniset, teräksiset ja puurakenteiset teollisuus- ja varastorakennukset, ruiskubetonoidut kalliotilat, yleensä staattisesti määrätyt rakenteet, joissa ei asuta tai työskennellä	1,50
3. Pilariperustuksille rakennetut elementtirakenteiset teräsbetonirakenteet, teräs- ja puurakenteiset toimisto- ja asuinrakennukset, muut puu- ja teräsrakennukset, johdot ja maakaapelit	1,20
4. Massiiviseinäiset tiili-, kevytsoraharkko- ja teräsbetonirunkoiset teollisuus-, toimisto- ja asuinrakennukset, lasiseinäiset teräsrunkoiset sekä tiiliverhotut puurunkoiset rakennukset, ruiskubetonioimattomat kalliotilat	1,00
5. Rakennukset, joissa on kevytbetoni- tai kalkkihiekkatiilirakenteita, tai muuta vaurioherkkää materiaalia, värinä- ja värähtelyherkät vanhat rakennukset, kuten kirkot tai korkeita holveja käsittävät rakenteet	0,65

3.2 Ohjearvot rakenteille

Kun arvioidaan rakennuksen rungon tai välipohjien värähtelyä, joka on suodattunut ja voimistunut mahdollisen resonanssin vuoksi, värähtelyn perusarvoksi soveltuu edellä esitettyjä ohjearvoja paremmin ohjeessa RIL 253 esitetty vaihtoehtoinen menettely. Ohjearvo perustuu värähtelyn siirtymäamplitudin perusarvoon $u_0 = 0,2$ mm ja värähtelyssä hallitsevaan taajuuteen f . Ohjearvo lasketaan lausekkeessa $v = F_k v_0$, jossa värähtelyn perusarvo v_0 lasketaan lausekkeesta $v_0 = (2\pi f) \cdot u_0 = 1,26$ mm \cdot f . Rakennuksen ominaisuudet ja materiaalien muodonmuutoskyky otetaan huomioon taulukossa 5 esitetyllä rakennustapakertoimella F_k .

Jos rakenteessa korostuu voimakkaasti resonanssin merkitys, taajuus f on sama kuin rakenteen ominaistaajuus ja syntyvä muodonmuutostila vastaa ominaisvärähtelyssä esiintyviä muodonmuutoksia. Taajuusalueella 3,2–12,5 Hz perusarvoksi tulee 4–16 mm/s (Taulukko 6). Tätä korkeammilla taajuuksilla rakennuksen rungon tai välipohjan resonanssin merkitys korostuu erittäin harvoin. Siinä tapauksessa vaurioitumisen suhteen määrääväksi muodostuu yleensä perustuksesta mitattu värähtely.

Taulukko 6. Värähtelyn perusarvo rungon ja välipohjan värähtelylle³.

	Terssikaistan keskitaajuus (Hz)						
	3,2	4,0	5	6,3	8	10	12,5
Värähtelyn perusarvo v_0 (mm/s)	4,0	5,0	6,3	8,0	10	12,5	16

³ Tässä menetelmän soveltuvuusaluetta on laajennettu ohjeeseen (RIL 2010) nähden, jossa menetelmän käyttö on rajoitettu tilanteeseen, jossa hallitseva taajuus on alle 5 Hz.

4. Rakenteiden vaurioitumisalttiuden arviointi

Rakenteiden vaurioitumisalttiuden arvioinnin tarve nousee yleensä esille kun tärinän epäillään aiheuttaneen rakennuksen vaurioita tai rakennuksen omistaja pelkää tärinän aiheuttavan rakenteiden vaurioitumista.

Rakenteiden vaurioitumisalttiuden arvioinnissa tärinäasiantuntijalta edellytetään FISE:n pätevyysluokan aa kelpoisuutta.

Liikennetärinästä aiheutuvat vauriot sisätiloissa ovat harvinaisia ja silloinkin ne ilmenevät yleensä vain hauraiden materiaalien hiushalkeamina. Tällaiset vauriot aiheutuvat useimmiten muista syistä kuin tärinästä. Siksi rakennuksen vaurioiden syytä arvioitaessa tulee aina ensiksi arvioida muut mahdolliset vaurioiden aiheuttajat.

4.1 Rakennevaurioiden syyt

4.1.1 Halkeamien yleinen esiintyminen rakennuksissa

Rakennusta, jossa ei halkeamia sen elinaikana synny, ei käytännössä juuri ole. Halkeamien syntyminen voi johtua monista tekijöistä, kuten esimerkiksi lämpö- ja kosteusliikkeistä, painumista, routimisesta, käytettyjen materiaalien vanhenemisestä, sopimattomista rakenneyksityiskohdista ja liitoksista, liikuntasaumojen puutteista tai työvirheistä.

Suurin yhteinen selittäjä halkeamille on se, että vaikka monet rakennusmateriaalit ne ovatkin lujia, ne ovat myös hauraita. Rakennusmateriaalit kestävät hyvin puristusta, mutta selvästi heikommin vetoa. Tällöin varsin pienetkin muodonmuutokset (venymät ja siirtymäerot) aiheuttavat veto- tai leikkausrasituksia, jotka muodostavat halkeilulle potentiaalisen riskin. Useimmiten halkeamat syntyvät ns. sekundaarisiin rakenneosiin, joiden vauriot eivät uhkaa rakennuksen käytettävyyttä tai kantavuutta. Vauriot ja halkeamat muodostavat tällöin lähinnä esteettisen haitan.

Kuinka paljon rakennuksissa on ”luontaisesti” vaurioita ja miten ne lisääntyvät ikääntymisen myötä, on tutkittu suhteellisen vähän. Ruotsissa on tehty selvityksiä olosuhteissa, joissa tärinä on suljettu pois vauriolähteenä. Ruotsissa kahden asuinrakennuksen 12 vuoden seurannassa havaittiin rakennusten halkeamia syntyvän keskimäärin 6–7 kpl vuodessa (Pöllä & al. 2006).

Tampereella seurattiin 1990-luvulla 40 pientalon vaurioiden luontaista kehittymistä runsaan kolmen vuoden aikana (Pöllä & al. 2006). Rakennukset olivat tarkkailun aikana muutaman vuoden ikäisiä. Keskimäärin uusia halkeamia tai vanhojen halkeamien kasvua havaittiin vajaa 14 kpl vuodessa yhtä rakennusta kohden. Selvityksessä halkeamia oli suhteessa eniten väliseinissä (Taulukko 7). Pelkästään kalkkiahiekkakivijulkisivuissa halkeamien määrän kasvu oli nopeaa, noin 6 kpl vuodessa. Myös levytetyissä sisäpinnoissa ja harkkorakenteissa sokkeleissa halkeilun lisääntyminen oli joissakin rakennuksissa merkittävää.

Taulukko 7. Rakennneosat, joissa halkeamia on todettu katselmuksissa (Pöllä & al. 2006).

Rakennusosa	Materiaali	Halkeilleiden rakennneosien lukumäärä	Halkeilleiden rakennneosien suhteellinen osuus
Julkisivu	Yhteensä	31	13 %
	- kalkkihiekkakivi	9	
	- poltettu tiili	22	
Sokkeli	Yhteensä	11	5 %
	- betoni	1	
	- harkko	10	
Lattia		41	17 %
	- betoni	26	
	- laatta	15	
Sisäkatto	Yhteensä	21	9 %
	- betoni	1	
	- levy	20	
Väliseinä	Yhteensä	92	38 %
	- tiili	13	
	- laatta	38	
	- levy	41	
Palomuri	Yhteensä	18	7 %
Tulisija	Yhteensä	29	12 %
	Kaikki yhteensä	243	100 %

4.1.2 Hauraiden materiaalien halkeamien luokittelu

Rakennuksen rungon, lattioiden tai osien liian suuret muodonmuutokset ilmenevät pintojen halkeamina. Vauriot voivat olla kosmeettisia, vähäisiä tai merkittäviä. Kosmeettisissa vaurioissa voi seinin syntyä hiushalkeamia tai vanhat halkeamat voivat kasvaa. Vähäisissä vaurioissa seinien halkeamat voivat olla suuria, pinnoite voi putoilla tai halkeamat voivat ulottua läpi seinän. Suurissa vaurioissa kantaviin rakenteisiin syntyy halkeamia tai niiden liitokset löystyvät. Mikäli rakenne on ulkotiloissa, myös hiushalkeama voivat kasvaa säärasitusten vuoksi suuremmiksi vaurioiksi.

Vauriot sisätiloissa ovat usein kosmeettisia ja ilmenevät hauraiden materiaalien hiushalkeamina (Taulukko 8). Hauraita materiaaleja ovat mm. tiili, betoni, kevytbetoni ja kipsilevy. Taulukossa esitettyjä halkeaminen lyhenteitä käytetään mm. louhintatärinään liittyvien katselmusten yhteydessä.

Taulukko 8. Halkeamien luokittelu (RIL 2010).

Nimitys	Lyhenne	Mitta
Hiushalkeama	H	alle 0,5 mm
Pieni halkeama	F	0,5–1,0 mm
Keskikokoinen halkeama	M	1,0–2,0 mm
Iso halkeama	G	2,0–4,0 mm
Suuri halkeama	S	yli 4 mm, mitataan

4.1.3 Tavallisimmat vaurioiden syyt

Perustusvaurioiden syyt johtuvat yleensä talon käytön aikaisissa muutoksissa joko itse talossa tai sen lähiympäristössä, mutta voivat johtua myös virheistä talon suunnittelussa, väärästä perusmaan kantokyvyn arvioinnista tai rakennusvirheistä. Usein vanhoissa rakennuksissa vaurioiden käynnistäjänä ovat peruskorjauksen yhteydessä rakennuksessa tai tontilla tehdyt toimenpiteet (muutokset sokkelissa, muutokset salaojituksessa, tontin puiden kaato, muutokset kunnallistekniikassa, jne.). Talon rakennusvaiheessa tehdyt virheet saattavat joissakin tapauksissa pahentaa myöhempien muutosten aiheuttamia vaurioita.

Perustusten painuminen voi johtaa mm. seuraaviin vaurioihin (Museovirasto 2003):

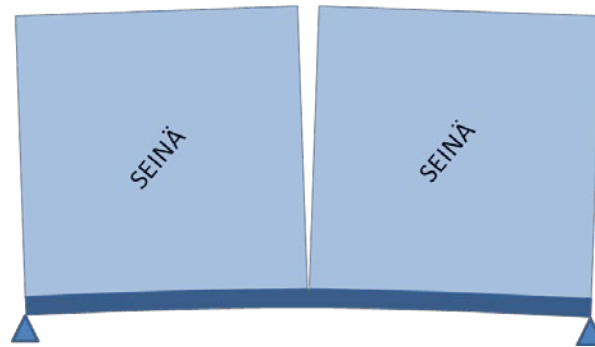
- Alapohja, sokkeli tai seinien alaosat rikkoutuvat.
- Talon ulkovuoraus tai runko vaurioituu.
- Piiput, palomuurit, hormimuurit, uunit, vesijohdot tai viemärit rikkoutuvat.
- Puurunkoinen talo vääntyy ja tiilirunkoinen katkeilee.
- Ikkunoissa ja ovissa on käyntiongelmia.

Perustusten painumisen syitä voivat olla esimerkiksi (Museovirasto 2003):

- Käytetty perustamistapa on maaperälle soveltumaton.
- Vedellä kyllästynyt maa perustusten alla routii, maa jäätyy perustusten alla ja ympärillä tai jäälinsit kallistavat taloa.
- Rakennusalueen maapohjan maalajeilla on epätasainen kantokyky, esim. talon routivalla maapohjalla oleva osa liikkuu, kalliolla osa pysyy paikoillaan.
- Perustusten salaojituskerros tai täytekerros on muuttunut routivaksi, kun salaojat ovat tukkeutuneet juurien tai niihin valuneen hienojakeisen maa-aineksen vuoksi.
- Talon viereen tai alle on asennettu viemäri tai kaukolämpöputki tms., joka kuivattaa kantavia maakerroksia ja aiheuttaa maan kokoonpuristumisen.
- Kaivanto naapuritontilla laskee pohjaveden pintaa tai kuivattaa perustusten alla olevia hienorakeisia maakerroksia, jotka puristuvat kokoon.
- Suuret lehtipuut haihduttavat vettä ja kuivattavat perustusten alla olevia hienorakeisia maakerroksia, mistä aiheutuu perustusten alla olevan maan kokoonpuristuminen.
- Talon toispuoleinen lisäkuorma aiheuttaa hienorakeisen maan painumisen lisäkuormituksen puolelta, esim. tien rakentaminen talon viereen, ajoluiskan teko kellariin tai puutarhan rakentamisen yhteydessä tehty maatäyttö.

Mahdollisia perustusten painumisen syitä on kuvattu yksityiskohtaisesti liitteessä E.

Sisäseinissä tai -katoissa esiintyvät halkeamat voivat johtua myös käytön aikaisista muutoksista. Muutokset katon tai välipohjan kuormituksessa lisäävät tai vähentävät rakenteiden taipumia. Muutosten johdosta ylä- tai välipohjan alapintaan tai välipohjan päällä olevaan seinään voi syntyä hiushalkeamia (Kuva 13). Esimerkiksi taipuman muutos 4 mm vastaa jännävälillä $L = 4000$ mm arvoa $L/1000$. Tällainen taipuman muutos on 40 % taipumarajasta $L/400 = 10$ mm, joka ohjeissa sallitaan höytykuormasta aiheutuvalle taipumalle (YM 2007).



Kuva 13. Havainnekuva välipohjan kuormituksen vähenemisen vaikutuksesta sen päällä olevaan hauraaseen seinään.

Pinnoitteiden ja keraamisten laattojen irtoaminen voi johtua myös rakenteiden lämpö- ja kosteusliikkeistä tai betonin kutistumisesta. Uuden betonirakenteen kutistuma on tyypillisesti 0,4–0,8 mm/m. Kun rakenne joutuu kutistuman vaikutuksesta jännitystilaan, jännitys voi muiden rasitusten kanssa aiheuttaa heikoimpaan kohtaan halkeaman. Halkeamien syntymisaikankohta voi näkyä jo viikon tai vasta vuosien jälkeen valmistuksesta⁴.

Puurunkoisilla rakenteilla rakenteiden luonnollista liikkumisesta tapahtuu kosteuden ja teräs-rakenteilla lämpötilan vaihtelusta. Puun turpoamisesta ja kutistumisesta aiheutuva vaihtelu voi sisätiloissa olla noin 20 mm/m puun leveysuunnassa ja noin 2 mm/m puun pituusunnassa⁵. Rakenteiden sisällä vaihtelu on pienempää. Teräksen lämpölaajeneminen on 0,012 mm/m/°C, joten esimerkiksi 10 asteen lämpötilan muutoksesta pituuden muutos on 0,12 mm/m. Koska seinä- tai kattolevytyksen heikoimpia kohtia ovat levyjen väliset saumat, jolloin hiushalkeamat pyrkivät syntymään saumakohtiin. Märkätiloissa kosteusvaihtelu voi johtua myös vesivuodoista ja aiheuttaa laattojen irtoamisen.

Julkisivuissa esiintyvät ongelmat voivat perustuksen painumisen lisäksi johtua ilmaston aiheuttamasta materiaalien luontaisesta vanhenemisesta tai pakkasrapautumisesta. Pakkasrapautuminen syntyy, kun materiaaliin pääsee kulkeutumaan tai kondensoitumaan kosteutta, jonka toistuvasti jäätyy ja sulaa. Julkisivupinta voi lohkeilla myös, jos betonin karbonatisoituminen saavuttaa betoniteräkset ja aiheuttaa niiden ruostumisen.

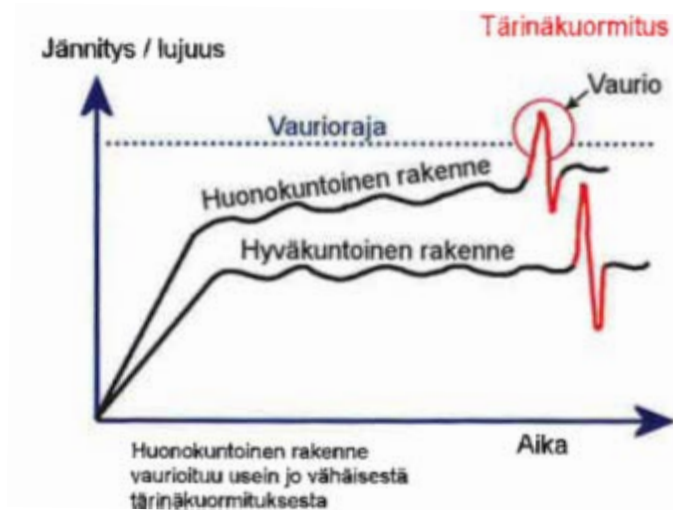
4.1.4 Liikennetärinä vaurioiden aiheuttajana

Vain poikkeustapauksissa liikennetärinän voidaan katsoa olevan pääsyyntä rakenteellisiin vaurioihin, vaikka usein kehon tuntemusten perusteella tärinän pelätäänkin vaurioittavan rakenteita. Yleensä liikennetärinän haitat rajoittuvat asumisen häiriintymiseen. Asuminen häiriintyy yleensä jo kun värähtelyssä nopeuden huippuarvon on 0,5–1 mm/s, mutta rakenteelliset vauriot edellyttävät yleensä tähän nähden moninkertaista värähtelyä.

Rakennuksen aikaisempi kuormitus- ja rasitushistoria vaikuttaa tärinävaurioiden syntymiseen. Tärinä on usein rakennuksen kokemien rasitustekijöiden lisäkomponentti. Liikennetärinä voi esimerkiksi olla osasyynä vaurioon, jos rakenne on jo jostain muusta syystä jännittyneessä tilassa, esimerkiksi perustusten painumisen vuoksi. Silloin tärinästä aiheutuva pienikin lisä voi johtaa materiaalin lujuuden ylittymiseen (Kuva 14).

⁴ [https://www.rakennustieto.fi/bin/get/id/631CStSjs%3A\\$47\\$RK100402\\$46\\$pdf/RK100402.pdf](https://www.rakennustieto.fi/bin/get/id/631CStSjs%3A47RK100402$46$pdf/RK100402.pdf)

⁵ Puun kosteuden muutos 15 %:sta (ilma-kuiva) 6 %:iin (sisäkuiva), mikä vastaa likimain ilmakehän kosteuden muutosta 65 %:sta 15 %:iin (Manninen 1987).



Kuva 14. Huonokuntoinen, jännittyneenä oleva rakenne voi vaurioitua pienestäkin jännityksen lisääntymisestä (RIL 2010).

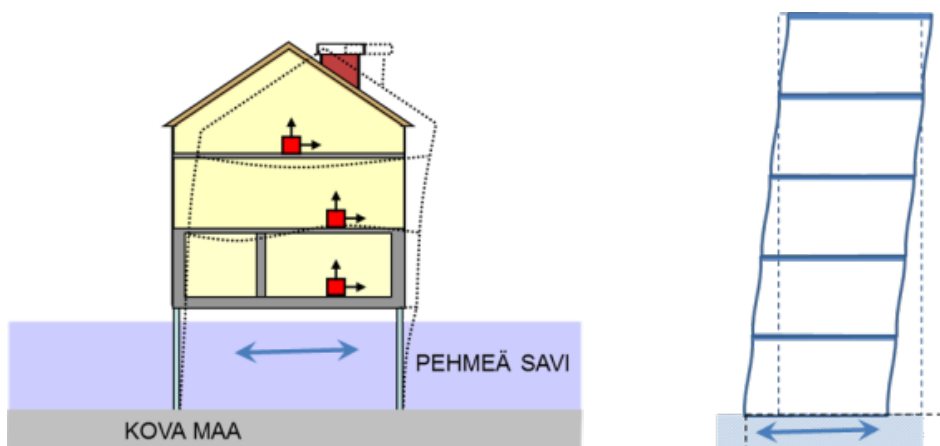
4.2 Tärinämittaukset rakenteiden vaurioiden arvioinnissa

4.2.1 Mittausten suoritus

Rautatieliikenteen aiheuttaman tärinän haitallisuutta radan läheisyydessä nykyisin oleville rakennuksille ja rakenteille voidaan parhaiten arvioida mittaamalla värähtelyt. Mittauksia voidaan tarvita myös, kun arvioidaan tarvetta nykyisissä rakennuksissa esiintyvän tärinähaitan pienentämiseksi. Erityistapauksissa voidaan mittaamalla selvittää myös tärinälle alttiiden laitteiden toiminnalle mahdollisesti aiheutuvia haittoja.

Tärinämittaustulos sinänsä ei käynnistä rakennuksiin tai rataan kohdistuvia toimenpiteitä. Tarvittavien toimenpiteiden selvittämiseksi tehdään mahdollisia tarkentavia mittauksia ja tutkimuksia sekä otetaan huomioon kunkin kohteen erityispiirteet, kuten esimerkiksi rakennetyyppi ja kunto sekä toimenpiteiden tekniset ja taloudelliset mahdollisuudet.

Rakennus voi värähdellä kokonaisuutena perustuksen liikkeiden mukaan tai värähtely voi joissakin tapauksissa voimistua rungon tai välipohjien resonanssin vuoksi (Kuva 15). Värähtely aiheuttaa runkoon ja välipohjiin muodonmuutoksia, jotka saattavat ilmetä hauraiden materiaalien hiushalkeamina.



Kuva 15. Havainnekuva rakennuksen värähtelystä. Pientalossa suurin värähtely esiintyy yleensä kattotasossa ja korkeilla kerrostalolla massan hitauden vuoksi pohjatasossa.

Nykyisin vaurioitumisalttiuden lähtökohtana on usein perustuksesta mitattu värähtely. Värähtelyn mittausta tulisi kuitenkin tehdä myös ylärakenteista, etenkin jos kyse on pehmeikköalueelle rakennetusta pientalosta tai kun kantavien välipohjapalkkien tai -laattojen varaan on tehty vaurioitumisalttiita rakenteita. Rakenteista tehtyjen mittausten avulla voidaan arvioida tärinähaittaa myös asumismukavuuden kannalta.

Tärinän mittauksessa erisuuntaista värähtelyä mittaavat anturit asennetaan yleensä erilliseen asennuselementtiin. Kevyitä antureita käytettäessä anturit voidaan vaihtoehtoisesti kiinnittää tarra-aineella suoraan rakenteen pintaan. Myös johdot anturin lähellä tulee kiinnittää. Perustuksessa asennuselementtinä voi toimia esimerkiksi paksuseinämäinen metallikotelo, joka ruuvataan tukevasti perustuksen ulkopintaan. Poikkeustapauksessa mittausta voidaan suorittaa rakennuksen sisäpuolelta välittömästi perustukseen kiinteästi liittyvästä rakenteesta. Sisätiloissa asennuselementtinä käytetään usein kolmella jalalla varustettua teräslevyä, joka kiinnitetään tarra-aineella välipohjan tai ullakkotilan lattiapintaan. Mahdollinen lattian pintarakenteiden jouston vaikutus tuloksiin tulee mittausraportissa erikseen arvioida.

Ohjeet mittaajalle, mittalaitteille, mittaussajankohdalle, mitattaville junille ja tilastollisen maksimiarvon määrittämiselle ovat samat kuin on esitetty maaperän tärinämittaukselle (kappale 2.4.1).

4.2.2 Perustuksen värähtely arviointiperusteena

Perustuksesta värähtely mitataan kolmikomponenttisesti ja niistä suurinta käytetään vaurioitumisalttiuden arvioinnissa. Värähtely mitataan sekä rakennuksen pituus- (x-suunta), poikittais- (y-suunta) että pystysuunnassa (z-suunta). Mittauspiste on pääsääntöisesti lähinnä rataa oleva rakennuksen nurkka.

Perustuksen värähtelylle asetettu raja riippuu sekä maapohjasta että rakennuksen rakennetyypistä ja materiaaleista. Ohjearvot perustuksista mitatulle värähtelylle on esitetty kappaleessa 3.1. Esimerkiksi savimaalle perustetun kevytbetonirakenteisen talon rajaksi saadaan 3 mm/s ja tiiviille moreenimaalle pilareille perustetun puurakenteisen talon rajaksi 12 mm/s.

4.2.3 Rungon vaakavärähtely arviointiperusteena

Rakennuksen kattotasosta mitatulla vaakavärähtelyllä voidaan arvioida rungon resonanssin merkitystä. Vaakavärähtely mitataan sekä rakennuksen pituus- että poikittaissuunnassa, pääsääntöisesti lähinnä rataa olevan rakennuksen nurkan kohdalta. Vaakavärähtely voi rungon resonanssin vuoksi osoittautua haitallisemmaksi kuin perustuksen värähtely, erityisesti jos kyseessä on pehmeikköalueelle rakennettu pientalo.

Rajana seinien vaurioitumiselle voidaan käyttää perustuksen värähtelylle kappaleessa 3.1 esitettyjä ohjearvoja. Paremmin tarkasteluun soveltuu kuitenkin kappaleessa 3.2 esitetty värähtelyn aiheuttamiin muodonmuutoksiin perustuva raja. Jos esimerkiksi rungossa hallitseva värähtelyn taajuus on 8 Hz, saadaan kevytbetonirakenteisen talon vaakavärähtelyn rajaksi 6,5 mm/s ja puurakenteisen talon rajaksi 12 mm/s.

4.2.4 Välipohjan pystyvärähtely arviointiperusteena

Välipohjista mitattu pystyvärähtely on yleensä suurinta lattiapalkkien tai -laattojen keski-alueella, kun kyse on resonanssivärähtelystä. Välipohjan värähtely voi olla perustuksesta mitattua arvoa suurempi sekä pehmeikköalueille rakennetuissa pientaloissa (kevyet lattiat, pienet jänneväli) että asuin- ja toimistorakennuksissa (raskaat lattiat, suuret jänneväli).

Kun kantavien palkkien ja laattojen varaan on tehty vaurioitumisalttiita rakenteita, rajana seinien vaurioitumiselle voidaan käyttää perustuksen värähtelylle kappaleessa 3.1 esitettyjä ohjearvoja. Paremmin vaurioitumista kuvaa kuitenkin muodonmuutoksiin perustuva raja (kappale 3.2). Jos esimerkiksi raskaan välipohjan hallitseva värähtelyn taajuus on 3,2 Hz ja

sen päällä on kevytbetonisia väliseiniä, pystyvärähtelyn rajaksi saadaan 2,6 mm/s. Puurakenteisten väliseinän tapauksessa raja on vastaavasti 4,8 mm/s. Ellei kantavien palkkien ja laattojen varaan ole tehty vaurioitumisalttiita rakenteita, itse välipohjarakenteen kantavuuteen vaikuttavat vaurioitumisrajat ovat yleensä merkittävästi suuremmat kuin väliseinien muodonmuutoksiin perustuvat rajat.

4.2.5 Tulosten raportointi

Mittaustulokset ja niistä tehdyt johtopäätökset esitetään mittausraportissa. Lisäksi raportin liitteinä tulee esittää ainakin seuraavat tiedot:

- 1) Kohdetiedot ja mittauspisteiden sijainti rakennuksessa. Malli tietojen esittämisestä on annettu liitteenä F.
- 2) Liikennetiedot mitatuista tapahtumista. Junista esitetään tapahtuman ajankohdan ja suurimman mitatun värähtelyn suuruuden lisäksi vähintään junan tyyppi, kulkusuunta, junan numero, junan kokonaispaino, junan suurin akselipaino ja suurin sallittu nopeus mittausalueella.
- 3) Lisätiedot

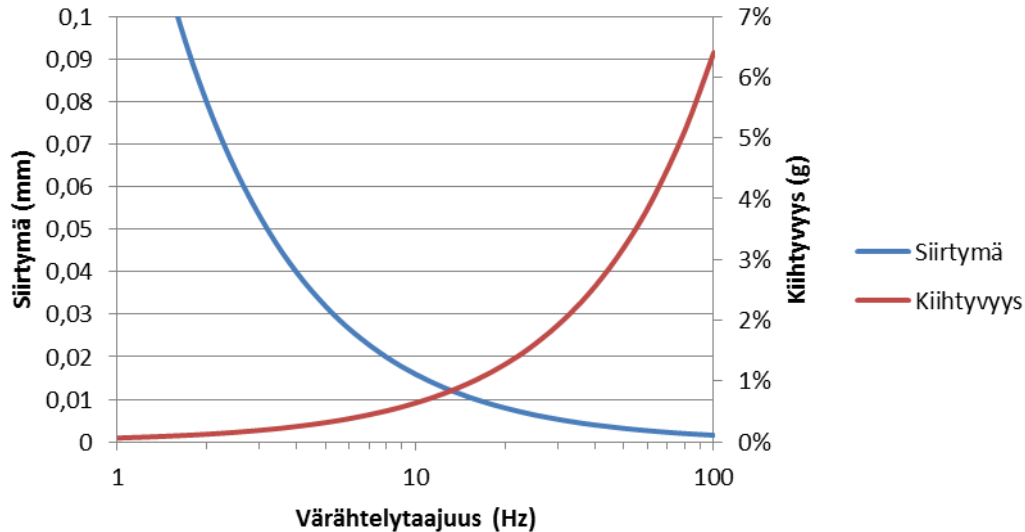
Liitteissä kannattaa esittää myös muuta sellaista tietoa, joka tulosten tulkinnan tai jatkohyödyntämisen kannalta katsotaan tarpeelliseksi. Todisteeksi suurimmat värähtelyt aiheuttaneista tapahtumista esitetään yleensä värähtelysignaalit ja niiden taajuus-sisältö sekä kuva-aineistoa värähtelyt aiheuttaneesta tapahtumasta. Myös yleisiä juna- ja ratatietoja suositellaan esittäväksi, etenkin ellei niitä ole muussa yhteydessä aikaisemmin raportoitu.

4.3 Esimerkkejä värähtelyn vaikutuksista rakennukseen

4.3.1 Siirtymät ja kiihtyvyydet

Värähtelyn merkitystä voidaan havainnollistaa siitä aiheutuvien muodonmuutosten tai rakenteen liikkeestä aiheutuvien hitausvoimien avulla. Hitausvoimien suuruus on suorassa suhteessa kiihtyvyyteen. Jos tarkastellaan esimerkiksi jousen varassa värähtelevää painoa, jonka värähtelyn nopeuden huippuarvo on 1 mm/s, sitä vastaavat siirtymän ja kiihtyvyyden huippuarvot riippuvat värähtelyn taajuudesta kuvan 16 mukaisesti.

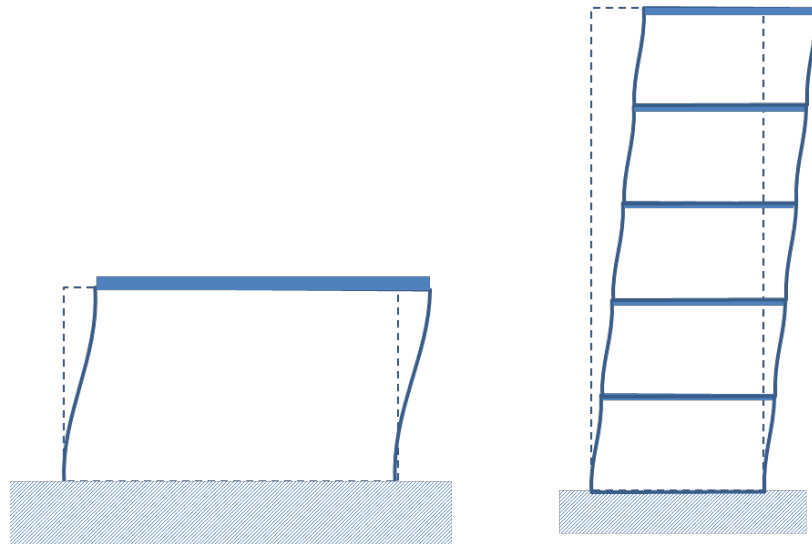
Seuraavissa suuntaa antavissa esimerkeissä on värähtelyn suuruutena yksinkertaisuuden vuoksi käytetty arvoa 10 mm/s. Jos esimerkkejä käytetään todellisen tilanteen arviointiin, tulokset on korjattava vastaamaan mitattua värähtelyä.



Kuva 16. Värähtelyn nopeuden huippuarvoa 1 mm/s vastaavat siirtymän ja kiihtyvyyden huippuarvot suhteessa maan vetovoiman kiihtyvyyteen ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

4.3.2 Vaikutukset runkoon

Yksikerroksisen pientalon rungon resonanssivärähtelyn taajuus on tyypillisesti 5–10 Hz (Taulukko 1). Jos mitattu vaakavärähtely kattotasossa on 10 mm/s, kuvan 16 mukaan seinän yläreunan siirtymä on suuruusluokkaa $\pm(0,15\text{--}0,3)$ mm. Amplitudi on likimain 0,2 mm, jota ohjeessa RIL 253 on esitetty ohjeellisenä siirtymäamplitudin rajaksi. Amplitudi on pieni 1–2 -kerroksisille rakennuksille suunnitteluohjeissa annettuun yleiseen suunnittelurajaan $H/150$ (puurakenteet $H/300$) nähden (H on rakennuksen korkeus, YM 2007). Jos rungossa on kuitenkin esimerkiksi levytys, jonka ruuvi- tai naulakiinnitykset eivät estä seinätason muodonmuutoksia, rungon vaakaliike voi aiheuttaa hiushalkeamia levyjen välisiin saumoihin.



Kuva 17. Yksi- ja 5-kerroksisen rakennuksen ominaisvärähtelyä kuvaava malli.

Jos arvioidaan värähtelyn vaikutusta esimerkiksi yksikerroksisen rakennuksen seinän yläreunaan asennettuun vesijohtoputkeen, siihen vaikuttava vaakavoima on esimerkkitapauksessa kuvan 16 mukaan vain 0,3–0,6 % siihen vaikuttavasta pystyvoimasta. Arvo on putkea ja sen kiinnityksiä ajatellen pieni, vaikka värähtely vielä kasvaisi paikallisesti putken resonanssin vuoksi noin kymmenkertaiseksi. Voima on kuitenkin riittävä aiheuttamaan liikettä ja häiritsevää ääntä esimerkiksi putken löysissä liitoksissa.

Kun tarkastellaan 5-kerroksisen rakennuksen värähtelyä resonanssissa (Kuva 17), sen värähtelyn taajuus on tyypillisesti 2–4 Hz (liitteen C Taulukko 1). Jos mitattu vaakavärähtely kattotasossa on sama 10 mm/s kuin edellisessä esimerkissä, rakennuksen huipun siirtymä on suuruusluokkaa $\pm(0,4-0,8)$ mm. Arvo on pieni yli kaksikerroksisille rakennuksille annettuun yleiseen suunnittelurajaan $H/400$ (puurakenteet $H/300$) nähden. Siirtymän arvo on kerrosta kohden 0,08–0,16 mm, joka on vähemmän kuin yksikerroksisella pientalolla. Myös seiniin ripustettuihin esineisiin aiheutuva kiihtyvyyden arvo on pieni, vain 0,1–0,3 % maan vetovoiman aiheuttamasta kiihtyvyydestä.

4.3.3 Vaikutukset lattiaan

Jos tarkastellaan lattian taivutusvärähtelyä resonanssissa (Kuva 18) ja lattian keskeltä mitattu pystyvärähtely on 10 mm/s, lattian kiihtyvyyden amplitudi on 10-kertainen kuvassa 16 esitettyyn nähden. Sen perusteella lattian värähtelyn amplitudin suhde lattian ja sen kuorman painosta aiheutuvaan taipumaan riippuu lattian ominaistajuudesta taulukon 9 mukaisesti. Koska täydellä hyötykuormalla myös kevyiden lattioiden ominaistajuudet (Taulukko 2) ovat vain poikkeustapauksissa yli 16 Hz, esimerkin värähtely 10 mm/s voi lisätä enintään 10 % täysillä suunnittelukuormilla esiintyviä taipumia ja taivutusjännityksiä. Lisäys on merkittävin kevyillä lattioilla, vaikka värähtelyn siirtymäamplitudit ovatkin suurimmat raskailla lattioilla. Toisaalta on muistettava, että Suomen savimaa-alueilla korostuu taajuusalue 5–10 Hz ja lisäksi värähtelyn energia on keskittynyt hyvin kapealle taajuusalueelle. Silloin lattioiden resonanssin merkitys korostuu ja siksi raskaat lattiat ovat resonanssin suhteen yleensä ongelmallisempia kuin kevyet lattiat. Kun taajuusalue on 5–10 Hz, niin värähtelystä 10 mm/s aiheutuva taipumien suuruus on kuitenkin vain noin 5 %.



Kuva 18. Lattian ominaisvärähtelyä kuvaava malli.

Taulukko 9. Lattian värähtelystä syntyvän siirtymän suhde kuormituksesta aiheutuvaan taipumaan, kun värähtelyn suuruus on 10 mm/s.

Terassikaistan keskitaajuus (Hz)	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25
Taipumien suhde	2,1 %	2,6 %	3,2 %	4,0 %	5,1 %	6,4 %	8,0 %	10 %	13 %	16 %

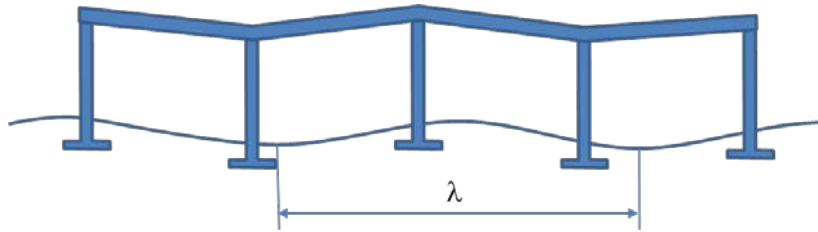
Jos välipohjaan aiheutuu resonanssivärähtely taajuusalueella 3,2–5 Hz ja värähtelyn suuruus on 10 mm/s, siitä aiheutuva välipohjan taipuma on kuvan 16 perusteella $\pm(0,3-0,5)$ mm. Arvo on pieni rakennusten välipohjille annettuun yleiseen suunnittelurajaan $L/400$ nähden (L on jänneväli, YM 2007). Jos välipohjan päällä on lujuudeltaan heikkoja ja hauraita, mutta kuitenkin joustamattomia rakenteita (esim. kipsilevystä tai kevytbetonista tehty seinä), tällainen taipuman vaihtelu voi kuitenkin aiheuttaa hiushalkeamia seinäpintoihin.

4.3.4 Vaikutukset perustuksiin

Mikäli perustus on toteutettu paaluilla ja niiden väliin astetuilla sokkelipalkeilla, palkkeihin värähtelystä aiheutuva muodonmuutos riippuu värähtelytaajuudesta ja on samaa suuruusluokkaa kuin lattioillakin (Taulukko 9).

Maanvaraisessa perustamisessa ja paalujen varaisen perusmuurin tapauksessa on otettava huomioon maanpinnan aaltoilun vaikutus perustusten painumaeroihin (Kuva 19). Maanpinnassa etenevän värähtelyaallon jakson pituuden λ , aallon etenemisnopeuden c ja värähtelytaajuuden f välillä on yhteys $\lambda = c/f$. Käyttäen taulukon (Liitteen B Taulukko 1) leikkausaallon

etenemisnopeuksia, savimaa-alueiden taajuusalueella 5–10 Hz aallonpituudet ovat pienimmillään 5–20 m. Vastaava arvo tiiviiden sora- ja hiekka-alueiden taajuusalueella 30–80 Hz on 2,5–10 m.



Kuva 19. Periaatekuva maanpinnan aaltoilun vaikutuksesta kallistumiin.

Perustusten pystysiirtymäerojen merkitystä kuvataan kulmakiertymän avulla, joka on vierekkäisten perustusten korkeusero jaettuna niiden välimatkalla. Jos maanpinnan muoto on sini-aallon muotoinen, kulmakiertymä on suurin, kun perustusten välimatkalla on alle puolet aallon pituudesta. Silloin siirtymäero voi olla 2–3,1 -kertainen maaperän värähtelyn siirtymäamplitudiin nähden. Koska värähtelyn aiheuttavat suurimmat siirtymät esiintyvät matalilla taajuuksilla, niin pehmeikköalueilla siirtymäerot kasvavat suurimmiksi. Jos mitattu maanpinnan pystyvärähtely on 10 mm/s ja sitä vastaava taajuus on 5 Hz, siitä aiheutuva perustusten korkeusero voi kuvan 16 perusteella olla perustusten välistä riippuen $\pm(2-3,1) \cdot 0,32 \text{ mm} = \pm(0,6-1,0) \text{ mm}$.

Kokonaispainumien ja vierekkäisten perustusten epätasaisista painumista tai laattaperustuksen taipumisesta aiheutuvien kulmakiertymien rajoja eri rakennetyypeille on esitetty pohjarakenteiden määräyksissä ja ohjeissa (YM 2004). Lähtökohtana on, että painumaerojen mahdollisesti aiheuttama halkeilu ja saumojen aukeaminen eivät saa aiheuttaa rakenteellisen kestävyuden, asumismukavuuden tai asunnon terveellisyysvähentämistä. Taulukon 10 arvot määräytyvät tavanomaisten rakennusten kantavien ylärakenteiden käyttökelpoisuuden ehdoksi asetettujen vaatimusten perusteella. Ohjeen mukaan taulukossa esitetyt rajoja käytettäessä saattaa joskus esiintyä pieniä esteettisiä haittoja etenkin kantaviin rakenteisiin liittyvissä ei-kantavissa rakenteissa (YM 2004).

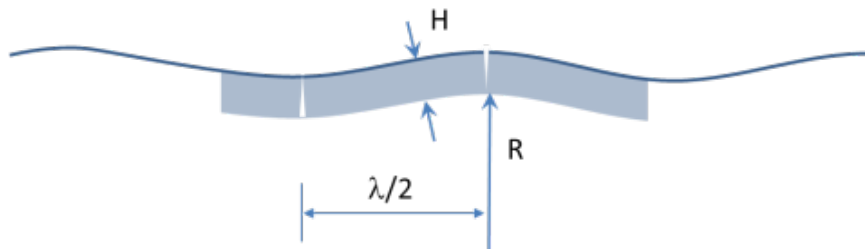
Esimerkin tapauksessa (pystyvärähtely 10 mm/s, taajuus on 5 Hz) maanpinnan pystyvärähtelystä aiheutuva siirtymäero on enintään 1 mm. Silloin taulukossa 10 esitetty teräsbetonirakenteille annettu kulmakiertymän raja 1/1000 ylitetään vasta, jos perustusten välimatka on alle 1 m. Arvo on merkittävästi pienempi kuin puolikas savimailla hallitsevasta aallonpituudesta 5–20 m.

Taulukko 10. Kantavien rakenteiden kulmakiertymien suuntaa-antavia rajoja hienorakenteille maapohjalle (YM 2004).

Rakennetyyppi	Rajan vaihteluväli
Puurakenteet	1/300–1/200
Teräsrakenteet	1/500–1/200
Muuratut rakenteet	1/800–1/400
Teräsbetonirakenteet	1/700–1/350
Teräsbetonielementtirakenteet	1/1000–1/500
Teräsbetonikehärakenteet	1/1500–1/700

Rakennusten kulmakiertymien arvoja ja tärinä aikaansaamia kulmakiertymiä ja siirtymiä verrattaessa tulee huomioida niiden syntymiseen kuluva aika. Hauraat materiaalit (muuratut ja teräsbetonirakenteet sekä monet kiviainespohjaiset pintaverhousmateriaalit) kykenevät hitaassa muodonmuutoksessa hiipumaan jossakin määrin ilman, että syntyy halkeilua. Nopeassa tärinärasituksessa hiipumaa ei tapahdu.

Maan pinnan värähtelyn aiheuttamia taivutusmuodonmuutoksia maassa olevaan sokkeli-palkkiin tai laattalattiaan voidaan arvioida rakenteeseen aiheutuvan kaarevuuden avulla (Kuva 20). Jos maanpinnan värähtely on siniaallon muotoinen, sen suurin kaarevuussäde R voidaan lausua aallonpituuden ja värähtelyamplitudin avulla, $R = (\lambda/\pi)^2/u_{max}$. Jos mitattu maanpinnan pystyvärähtely on 10 mm/s ja sitä vastaava taajuus on 5 Hz, siitä aiheutuva värähtelyamplitudi on kuvan 16 mukaan 0,32 mm. Jos esimerkiksi värähtelyn aallonpituus on $\lambda = 10$ m ($c_s = f \cdot \lambda = 50$ m/s) ja rakenteen korkeus on $h = 1$ m, kaarevuudesta voi aiheutua yläreunaan enintään venymä $\varepsilon = h/R = 32 \cdot 10^{-6}$. Betonin kimmokertoimella $E = 30$ GPa tämä vastaa jännitystä $\sigma = E\varepsilon = 1$ MPa. Jos rakenne on hauras ja raudoittamaton, jolloin kaikki venymä keskittyy murtumiin, venymästä voi syntyä särö aallon minimi- ja maksimikohtaan ja sen leveys on enintään $\varepsilon \cdot \lambda/2 = 0,16$ mm.



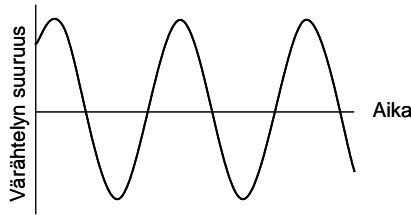
Kuva 20. Periaatekuva maanpinnan aaltoilun vaikutuksesta rakenteen taipumiin.

Lähdeviitteet

- Bachmann, H. et al. 1997. Vibration problems in structures. Practical guidelines. Basel: Birkhäuser Verlag. 234 s. ISBN 0-8176-5148-9.
- DIN. 1999. DIN 4150-3: Erschütterungen im Bauwesen - Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V. 12 s.
- FISE. 2014. Rakennus-, LVI- ja kiinteistöalan henkilöpätevydet FISE Oy: Tärinäasiantuntijan pätevyysvaatimukset. http://www.fise.fi/default/www/suomi/patevyysvaatimukset_lomakkeet_nimikkeiden_kaannokset/uudisrakentamisen_suunnittelu/tarina_asiantuntija/
- Liikennevirasto. 2013. Suomen rautatietilasto 2013. Liikenneviraston tilastoja 9/2013. 56 s. http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/ti_2013-09_suomen_rautatietilasto_2013_web.pdf
- Madshus, C., Bessason, B. & Hårvik, L. 1996. Prediction model for low frequency vibration from high speed railways on soft ground. Journal of sound and Vibration 193(1), s. 195–203.
- Manninen, J. 1987. Puu- ja puutuotteet rakennustarvikkeina. Helsinki: Rakentajain Kustannus. 83 s.
- Museovirasto. 2003. Museoviraston korjauskortisto. Korjauskortti nro 24: Pientalon perustusten korjaus. <http://www.nba.fi/fi/File/2131/korjauskortti-24.pdf>
- Pöllä, J., Kärnä, T., Vuolio, R., Paavola, P., Räsänen, H. 1996. Louhintätärinän syntyminen ja välittyminen sekä rakenteiden ja laitteiden tärinänkestävyys. Kalliorakentaminen 2000-teknologiahanke, projekti 3.7, VTT:n tutkimusraportti.
- RATO 2008. Ratatekniset ohjeet. Osa 3: Radan rakenne. Helsinki: Ratahallintokeskus. 89 s.
- RIL. 2010. Rakentamisen aiheuttamat tärinät. Julkaisu RIL 253-2010. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörin liitto RIL ry. 122 s. ISBN 978-951-758-515-6
- Talja, A. 2004. Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. VTT Tiedotteita 2278. Espoo. 50 s. + liitt. 15 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2004/T2278.pdf>
- Talja, A., Vepsä, A., Kurkela, J., Halonen, M. 2008. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi. VTT Tiedotteita 2425. 95 s. + liitt. 69 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2008/T2425.pdf>
- Talja, A. 2011. Ohjeita liikennetärinän arviointiin. VTT Tiedotteita 2569. 35 s. + liitt. 9 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2569.pdf>
- Talja, A., Saarinen, A. 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi. Esiselvitys. VTT Tiedotteita 2468. 56 s. + liitt. 11 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2468.pdf>
- Törnqvist, J. Nuutilainen, O. 2002. Rautatieliikenteen tärinän vaikutus rakenteisiin. Vaurioalttiuden kartoittaminen ja mittaaminen. VTT Tiedotteita -sarjan käsikirjoitus. 76 s.
- Törnqvist, J. & Talja, A. 2006. Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. VTT Working Papers 50. 46 s. + liitt. 33 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W50.pdf>
- YM. 2004. Pohjarakenteet. Määräykset ja ohjeet. Suomen rakentamismääräyskokoelman osa B3. Ympäristöministeriö. <http://www.finlex.fi/data/normit/17075-B3s.pdf>

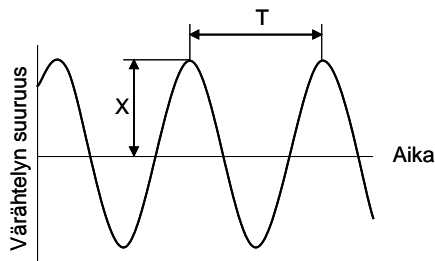
YM. 2007. Ympäristöministeriön asetus Eurocode-standardien soveltamisesta talonrakentamisessa: SFS-EN 1993-1-1 (teräsrakenteet). SFS-EN 1994-1-1 (betonirakenteet), SFS-EN 1995-1-1 (puurakenteet), <http://www.ym.fi/download/noname/%7B145E3C8B-A8CB-48B4-A3B4-AD53CD9BF2AF%7D/31605>

Liite A: Värähtelyyn ja värinän arviointiin liittyviä käsitteitä



Vakioamplitudinen värähtely

Harmoninen, siniaallon muotoinen värähtely.

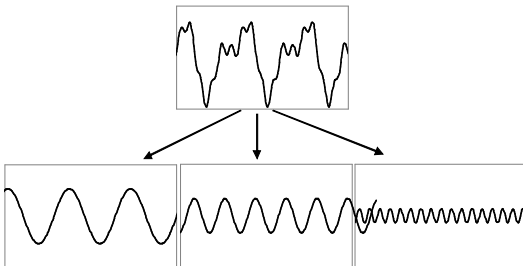


Värähtelyamplitudi X [mm/s]

Vakioamplitudisen värähtelyn amplitudi. X on puolet värähtelyn vaihteluvälistä.

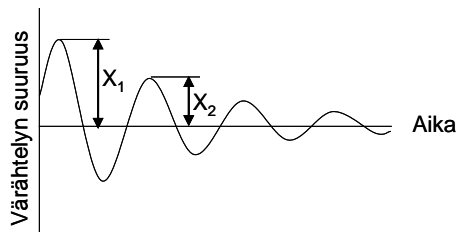
Värähtelytaajuus f [Hz]

Vakioamplitudisen värähtelyn vakiojaksojen lukumäärä sekunnissa. Kun yhden värähtelyjakson kesto on T sekuntia, värähtelytaajuus $f = 1/T$.



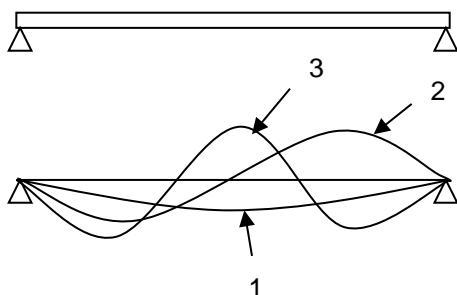
Värähtelykomponentti

Useasta taajuuskomponentista muodostuvan värähtelyn yksi vakioamplitudinen komponentti.



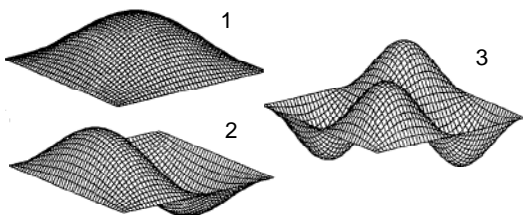
Suhteellinen vaimennus ζ [-]

Tekijä, joka ilmaisee vapaasti vaimenevan värähtelyn vaimenemisnopeuden. Kun perättäisten jaksojen amplitudien suhde on X_1/X_2 , $\zeta = \ln(X_1/X_2)/(2\pi)$



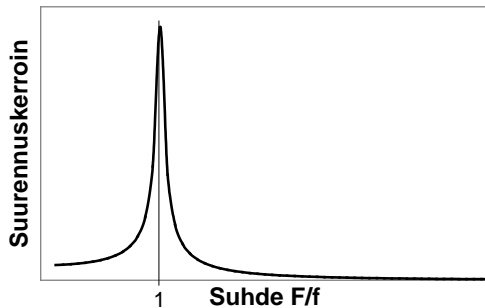
Ominaistaajuus, alin ominaistaajuus f [Hz]

Rakenteelle ominainen värähtelytaajuus, kun rakenne saatetaan värähtelemään ja sen annetaan värähdellä vapaasti. Rakenteella on paljon eri ominaistaajuuksilla värähteleviä muotoja. Alin ominaistaajuus vastaa pienintä värähtelytaajuutta. Kuvassa on palkin taivutuksen kolme alimpaa ominaistaajuutta vastaavat värähtelymuodot.



Ominaisuoto, alin ominaisuoto

Rakenteen ominaistajuuksia vastaavat värähtelymuodot. Kuvassa on laatan taivutuksen kolme alimpaa ominaistajuuksia vastaavat muodot.

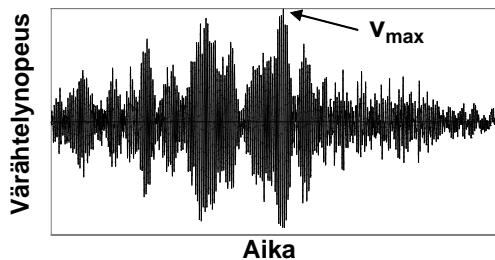
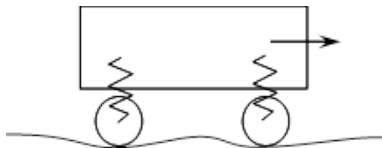


Resonanssi

Värähtelyn voimakas vahvistuminen, kun herätteen taajuus (F) sattuu lähelle rakenteen ominaistajuuksia (f). Suurennuskerroin on suhteella $F/f = 1$ kääntäen verrannollinen suhteelliseen vaimennukseen.

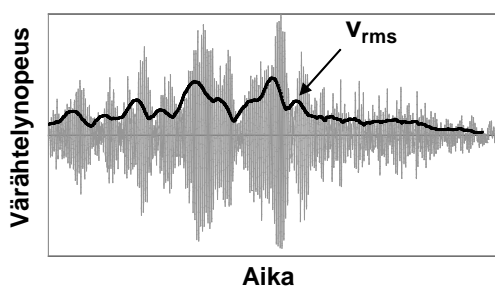
Heräte

Värähtelyn aiheuttaja. Liikenteessä heräte aiheutuu kulkuvälineestä, sen aiheuttamasta radan painumisesta sekä radan epätasaisuuksista.



Värähtelyn huippuarvo v_{\max} [mm/s]

Mitatus värähtelysignaalin itseisarvoltaan suurin arvo. Vakioamplitudisella värähtelyllä huippuarvo on sama kuin värähtelyn amplitudi.

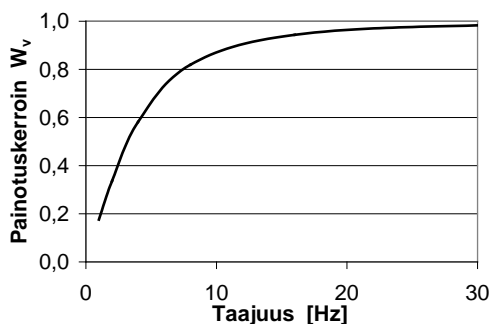


Värähtelyn tehollisarvo v_{rms} [mm/s]

Mitatus värähtelysignaalin $v(t)$ tehollisarvo ajanhetkellä t_0 on

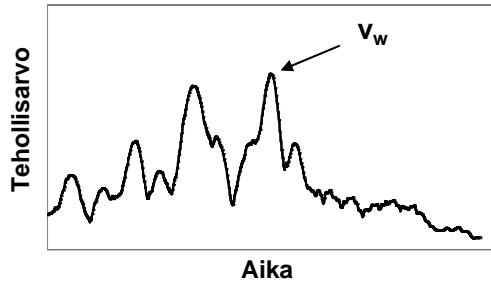
$$v_{rms}(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [v(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}},$$

jossa aikaikkunan pituus τ on 1 sekunti. Vakioamplitudisella harmonisella värähtelyllä, kun $T \ll \tau$, $v_{rms} = v_{\max} / \sqrt{2}$.



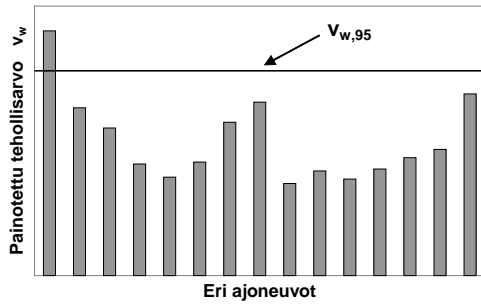
Värähtelyn taajuuspainotus $W_v(f)$ [-]

Kertomalla eri värähtelykomponentit taajuudesta riippuvalla painotuskertoimella mitatus signaalin taajuusamplitudit tehdään ihmisen herkkyden suhteen samanarvoisiksi.



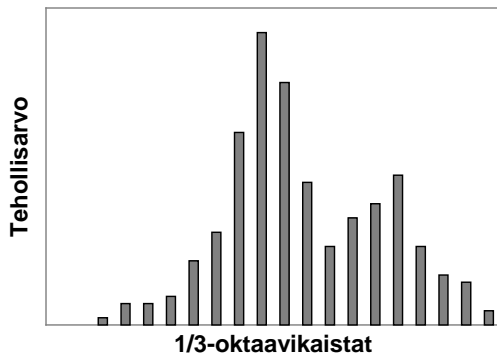
Painotettu värähtelyn tehollisarvo v_w [mm/s]

Taajuuspainotetusta värähtelysignaalista $v_w(t)$ määritetty suurin tehollisarvo.



Värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$ [mm/s]

Painotetun värähtelyn v_w tilastollinen maksimi. Asumismukavuutta arvioitaessa arvo perustuu yhden viikon ajalta 15 merkitsevimmistä ajoneuvosta mitattuun värähtelyyn.

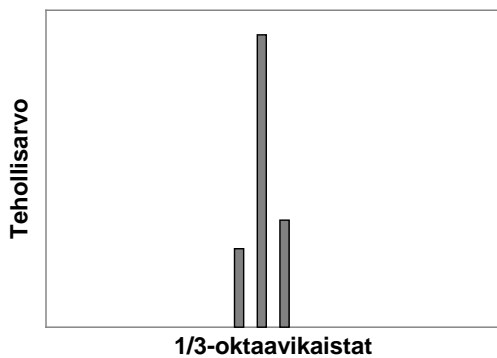


Terssikaista (kolmannesosaoktaavikaista)

Liikennetärinä tarkastelussa taajuuskaistat, joiden keskitajuudet ovat 2, 2,5, 3,2, 4, 5, 6,3, 8, 10, 12,5, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63 ja 80 Hz.

Terssikaistan tehollisarvo

Yhden terssikaistan alueella esiintyvien värähtelykomponenttien tehollisarvo.



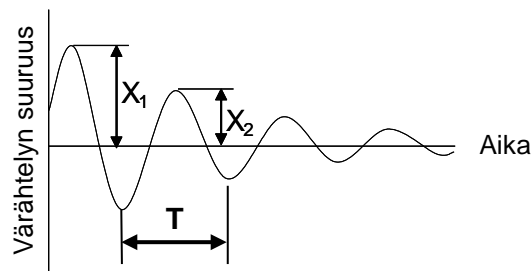
Kapeakaistainen värähtely

Värähtely sisältää vain kapealla taajuusalueella olevia värähtelykomponentteja.

Liite B: Liikennetärinään vaikuttavia tekijöitä

1 Värähtelyyn liittyvät peruskäsitteet

Parhaiten värähtelyyn liittyviä peruskäsitteitä voidaan kuvata ominaisvärähtelyn avulla (Kuva 1). Kun jousen varaan ripustettu paino saatetaan värähtelemään ja sen annetaan värähdellä vapaasti, se värähtelee sille ominaisella taajuudella. Tätä taajuutta kutsutaan ominaistaajuudeksi. Taajuuden (f) yksikkö on hertsi (tunnus Hz), joka ilmoittaa heilahdusjaksojen lukumäärän yhden sekunnin aikana. Siten yhteen heilahdusjaksoon kuuluva aika sekunteina on $T = 1/f$.



Kuva 1. Vaimeneva värähtely.

Ominaistaajuudella tapahtuvalla värähtelyllä on tietty muoto, jota kutsutaan ominaismuodoksi. Jousen varaan ripustetulla painolla se on värähtelyä ylä- ja ala-asennon välillä. Jatkuvissa rakenteissa, esimerkiksi palkissa, laatoissa tai maaperässä, ominaistaajuuksia on useita ja jokaisella niillä on oma muodonmuutosten vaihtelua kuvaava ominaismuotonsa.

Rakenteissa on aina vaimennusta, joten ajan kuluessa vapaa värähtely vaimenee. Peräkäisten jaksojen amplitudien pienenemistä (X_2/X_1) kuvataan suhteellisella vaimennuksella. Koska samaan ajanjaksoon mahtuu suurempi määrä korkea- kuin matalataajuuksisia heilahdusjaksoja, korkeat taajuudet häviävät värähtelystä nopeammin kuin matalat taajuudet.

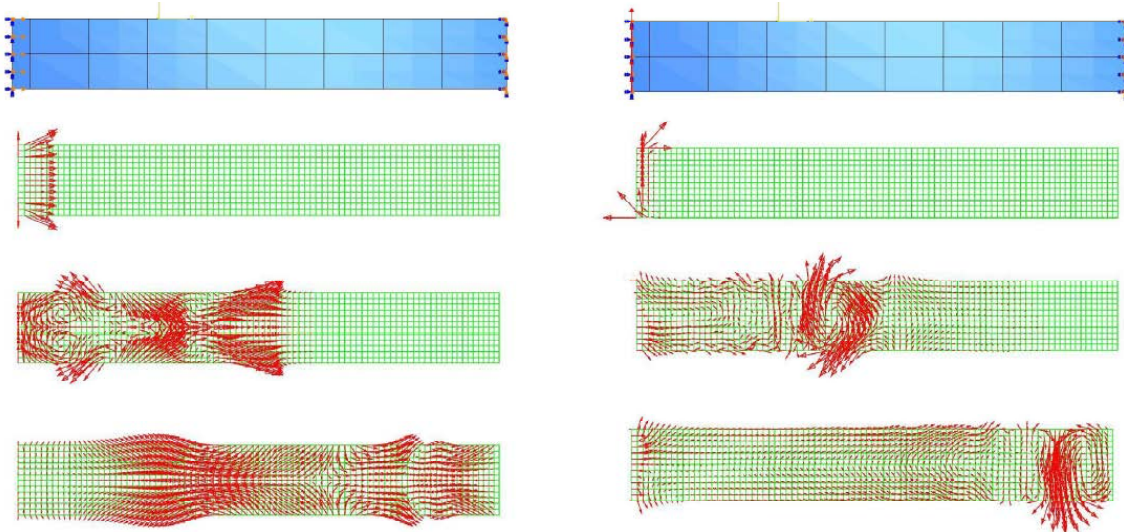
Käytännössä värähtely ei yleensä sisällä vain yhtä taajuutta. Silloin värähtely jaetaan komponentteihin ja taajuussisältö (värähtelyspektri) ilmoitetaan yleensä terssikaistoittain (kolmannesosaaktaavikaistoittain).

Liikennetärinän suuruutta kuvataan värähtelysignaalin huippuarvon (nopeusamplitudin) v_{max} avulla. Harmonisessa värähtelyssä sitä vastaava siirtymäamplitudi $u_{max} = v_{max}/(2\pi f)$ ja kiihtyvyyden amplitudi $a_{max} = v_{max} \cdot (2\pi f)$.

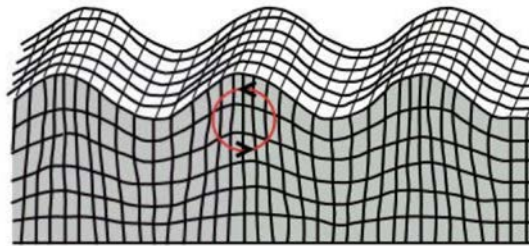
Värähtelyyn ja tärinän arviointiin liittyviä käsitteitä on esitetty tarkemmin liitteessä A.

2 Tärinän leviäminen maaperässä

Värähtely leviää maassa eri aaltomuotoina, P-, S- ja R-aaltoina, joiden yhteisvaikutuksesta syntyy koettava tärinä. Nopeimmin leviävät P- ja hitaimmin R-aallot. P-aalloissa (primary wave, pressure wave, paineaalto, pitkittäisaalto) maaperän liike on paine-eroista aiheutuvaa kokoonpuristumisen vaihtelua (Kuva 2). Sen eteneminen maaperässä vastaa ilmassa tapahtuvaa ääni- ja paineaaltojen etenemistä. S-aalloissa (secondary wave, shear wave, leikkausaalto, poikittaisaalto) maan partikkelit liikkuvat leikkausmuodonmuutosten johdosta ilman maa-aineksen kokoonpuristumista. R-aalto (Rayleigh wave, pinta-aalto) syntyy, kun P- tai S-aallot kohtaavat maanpinnan. Muodostuva R-aalto muistuttaa vedenpinnan aaltoilua (Kuva 3). R-aaltojen suuruus on suurin maan pinnalla. R-aallon pituutta vastaavalla syvyydellä pystysuoran värähtelyn amplitudi on enää noin 30 % ja vaakasuoran värähtelyn amplitudi enää noin 15 % maan pinnan arvosta.



Kuva 2. Havainnekuva maan partikkelien liikkeestä P- ja S-aallossa eri ajanhetkillä. Vasemmalla kuvasarjassa pitkittäinen (P) ja oikeassa poikittainen (S) iskuheräte. Esimerkkitapauksessa heräte kohdistuu levymäisen kappaleen vasempaan reunaan.



Kuva 3. Havainnekuva maaperän liikkeestä R-aallossa.

Todellisissa olosuhteissa, joissa maaperä sisältää paksuudeltaan vaihtelevia kerroksia ja peruskallion topografia vaihtelee, värähtelytarkastelu muuttuu monimutkaiseksi. Kun erityyppiset aallot kohtaavat maanpinnan, peruskallion tai toisen maakerroksen, aalto-tyypeissä tapahtuu heijastumista ja taittumista, jolloin värähtelyssä tapahtuu P-aaltojen muuntumista S-aalloiksi ja päinvastoin. Aaltojen heijastuminen ja taittuminen sekä mahdollinen eri herätepisteistä lähtevien tai heijastuvien aaltojen summautuminen voivat aiheuttaa odottamattoman suuria värähtelyjä pehmeissä maaperissä etenkin silloin, kun herätteestä lähtevän värähtelyn kesto on useita sekunteja.

Maanpinnan pystysuuntainen värähtely vaimenee yleensä tasaisesti värähtelyn edetessä kauemmaksi värähtelystä. Karkeasti voidaan arvioida värähtelyn suuruuden puolittuvan, kun etäisyys kasvaa kaksinkertaiseksi. Hitaampaankin vaimenemiseen on kuitenkin varauduttava erityisesti pehmeillä maalajeilla.

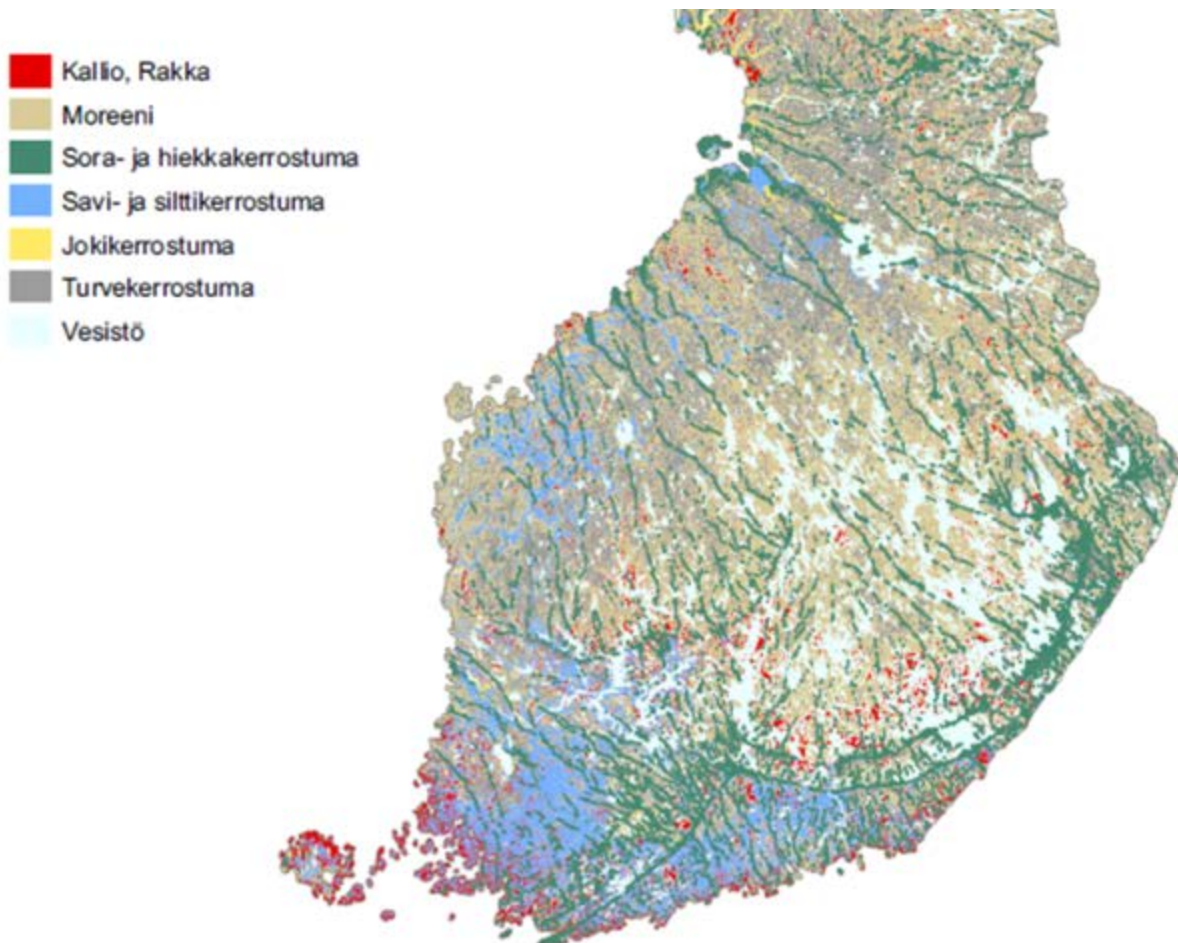
Kokemusperäiset havainnot osoittavat, että teoreettisesta oletuksesta poiketen vaakavärähtely voi olla pystyvärähtelyä suurempi. Ilmiö on yleinen kovilla maaperillä, mutta myös pehmeillä maaperillä vaakavärähtely voi dominoida melko kaukanakin radasta.

3 Maaperäominaisuudet

Värähtelyarvioinnissa on tärkeää tuntee Suomen maaperän muodostumisen historia. Värähtelyn leviäminen on merkittävintä pehmeissä ja vesipitoisissa maalajeissa – savissa, silteissä, liejuissa ja turpeissa. Etelä-Suomessa muinaisiin meriin sedimentoituneita savia ja siltejä on yleisesti eteläisen Salpausselän eteläpuolella ja Lounais-Suomessa. Alavilta mailta Länsi-, Keski- ja Lounais-Suomesta löytyy laajojakin hienorakeisista maalajeista muodostuneita alueita, jotka värähtelyn leviämisen kannalta ovat usein ongelmallisia (Kuva 4). Pohjanmaalla

maankohoamisalueilla sedimenttikerrostumia esiintyy aina noin 200 km:n etäisyydelle nykyisestä rantaviivasta. Etelä-Suomen savet ovat tyypillisesti muuta maata pehmeämpiä ja vesipitoisempia.

Pohjanmaalla savi- ja silttikerrokset vaihtelevat moreeni- ja turvekerrostumien kanssa. Lounais-Suomessa savikerrostumat ovat tyypillisesti kallioesiintymien välisissä painanteissa. Myös jokikerrostumien alueella ja harjumuodostuminen reuna-alueilla voi silttikerrosten lomassa esiintyä savikerroksia. Savikerrokset voivat olla paksuja, Lounais-Suomessa esiintyy jopa 50–70 m paksuisia hienorakeisia kerrostumia. Rannikolta sisämaahan päin edetessä savikerrosten paksuudet pääsääntöisesti ohentuvat, mutta paikoitellen myös sisämaassa voi olla paksuja pehmeiköjä. Silttejä esiintyy yleensä ohuina kerroksina myös harju- ja reuna- muodostelmien reuna-alueilla.



Kuva 4. Keski- ja Etelä-Suomen maaperäkartta (<http://www.gtk.fi/>).

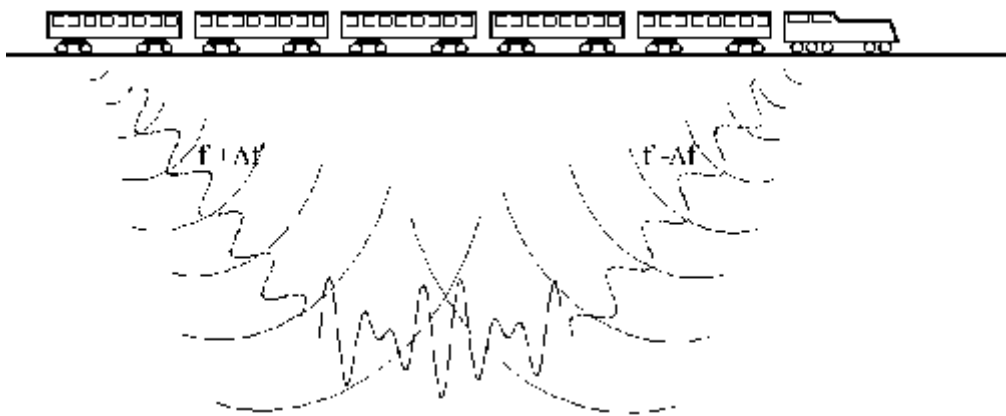
Rakenteellisen lujuuden perusteella maalajeja kutsutaan Suomessa hyvin pehmeiksi, pehmeiksi, sitkeiksi, koviksi tai hyvin koviksi. Maakerrosten rakenteellista lujuutta hienorakenteisilla maapohjilla kuvataan yleensä maakerroksen leikkauslujuuden avulla. Kauimmaksi liikennetärinän vaikutusalue ulottuu hienorakeisissa hyvin pehmeissä tai pehmeissä kivennäismaalajeissa (savi, siltti) sekä pehmeissä eloperäisissä maalajeissa (turve, lieju), joilla suljettu leikkauslujuus on alle 25 kN/m². Kovissa kivennäismaalajeissa vaikutusalue on pienempi. Pienin liikennetärinän vaikutusalue on tiiviissä karkearakenteisissa kivennäismaalajeissa (sora, hiekka) ja moreenimaalajeissa (silttimoreeni, hiekkamoreeni, soramoreeni) sekä kalliossa. Pehmeissä maakerroksissa välittyvät yleensä hyvin matalat alle 10 Hz värähtelytaajuudet. Jäykissä maakerroksissa tai matalilla alle viiden metrin pehmeissä maakerroksissa hallitseva taajuusalue on yleensä tätä suurempi. Korkeat yli 50 Hz taajuudet suodattuvat yleensä pehmeissä maalajeissa pois jo suhteellisen lähellä rataa.

Maan pinnalta mitattavassa tärinässä olennainen osa taajuuksista johtuu junan ja ratapengeren ominaisuuksista sekä maapohjan ominaisuuksista. Ratapenger ja maapohja vaikuttavat junasta syntyvään tärinään, vahvistaen tai vaimentaen ympäristöön leviävän tärinän eri taajuusalueita. Pääsääntöisesti lähellä rataa, junan ja penkereen ominaisuudet vaikuttavat merkittävimmin taajuussisältöön, mutta etäimmällä radasta nousevat maapohjan ominaisuuksien vaikutukset merkittävimpiin asemaan. Pehmeillä maapohjilla matalat taajuudet voivat olla dominoivia jo välittömästi radan vierellä, jos juna on aikaansaanut koko pehmeikköalueen laaja-alaisen ominaisvärähtelyn.

4 Junan ja radan ominaisuudet

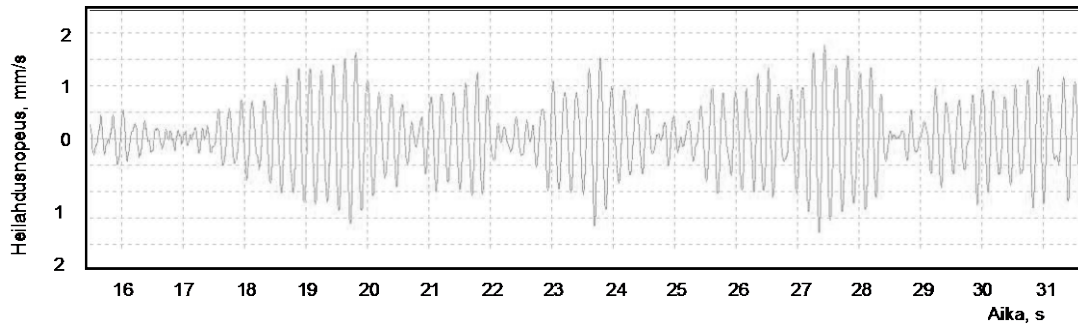
Juna muodostaa nauhamaisen tärinälähteen, jossa junan kaikki akselit muodostavat erillisiä, pistemäisiä tärinälähteitä. Lähellä rataa yksittäisten akselien tai telien aiheuttama maan painuma ja siitä aiheutuva maan pakkovärähtely (ns. kvasistaattinen värähtely) vaikuttavat yleensä merkittävästi värähtelyn suuruuteen ja taajuussisältöön. Kauempana radasta eri pyörien vaikutukset summautuvat ja värähtelyssä dominoi maaperän vapaa värähtely. Myös maaston pinnan muodot ja pohjasuhteet vaikuttavat tärinän amplitudiin ja taajuussisältöön. Eniten valituksia aiheuttavaa tärinää aiheuttavat raskaat tavarajunat.

Olennaisimmat kalustosta ja liikennöinnistä riippuvat tekijät ovat kuormituksen suuruus, junanopeus ja telivälit. Akseli- ja telipainot vaikuttavat paikalliseen radan taipumaan ja siten lähes suoraan tärinän suuruuteen. Junan pituus vaikuttaa taas herätteen toistuvuuteen sekä tärinän keston. Junan pituuden merkitystä lisää myös se, että kauempana radasta olevassa pisteessä yhdistyy monesta radan herätepisteestä syntyvä värähtely (Kuva 5). Siksi myös junan kulkusuunnalla voi vaihtelevissa maasto-olosuhteissa olla merkitystä.

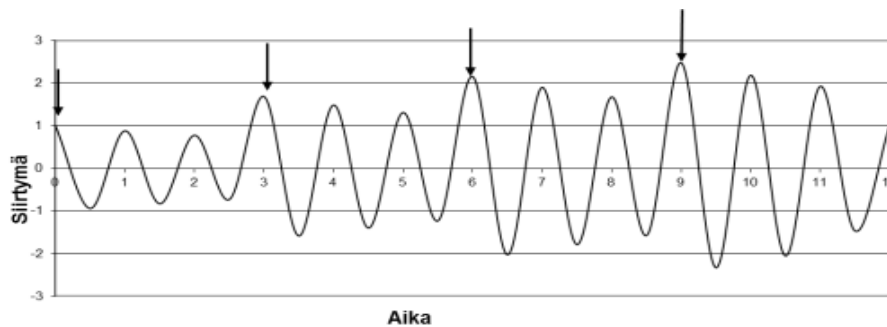


Kuva 5. Eri herätepisteistä lähtevän värähtelyn yhteisvaikutus.

Yleensä tärinäheräte kasvaa junan nopeuden kasvaessa, mutta nopeus ei ole aina yksiselitteinen. Junan nopeus, teliväli ja ratarakenne-maapohja -kokonaisuus säätelevät tärinän suuruutta ja taajuussisältöä, jolloin paikkakohtaisia poikkeamia perussääntöön esiintyy. Värähtely voi voimistua maaperässä erityisen suureksi, jos radan epäjatkuvuuskohtaan osuvan pyörän toistuvuus on sama tai lähes sama kuin radan alla olevan maaperän ominaistajuus (Kuva 6). Värähtely voi voimistua myös silloin, kun iskumaisen herätteen toistuvuus sattuu olemaan maaperän heilahdusjaksojen monikerta (Kuva 7). Lisäksi junan nopeuden merkitys tärinän suuruuteen voi korostua silloin, kun juna etenee likimain samalla nopeudella kuin maaperän pinta-aalto.



Kuva 6. Tyypillinen värähtely, kun herätetaajuus on lähellä maaperän ominaistajuutta.

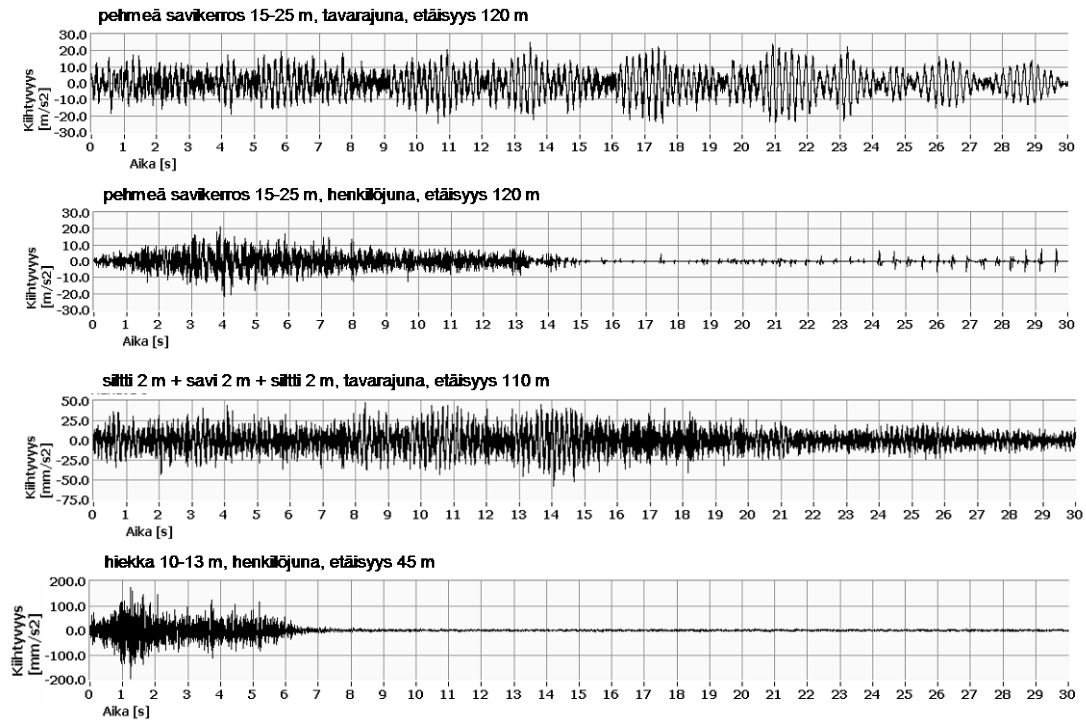


Kuva 7. Värähtelyn voimistuminen jaksollisesta herätteestä, kun maaperän ominaistajuus on kolme kertaa herätteen toistuvuus. Esimerkissä vapaan värähtelyn vaimennus on 2 %.

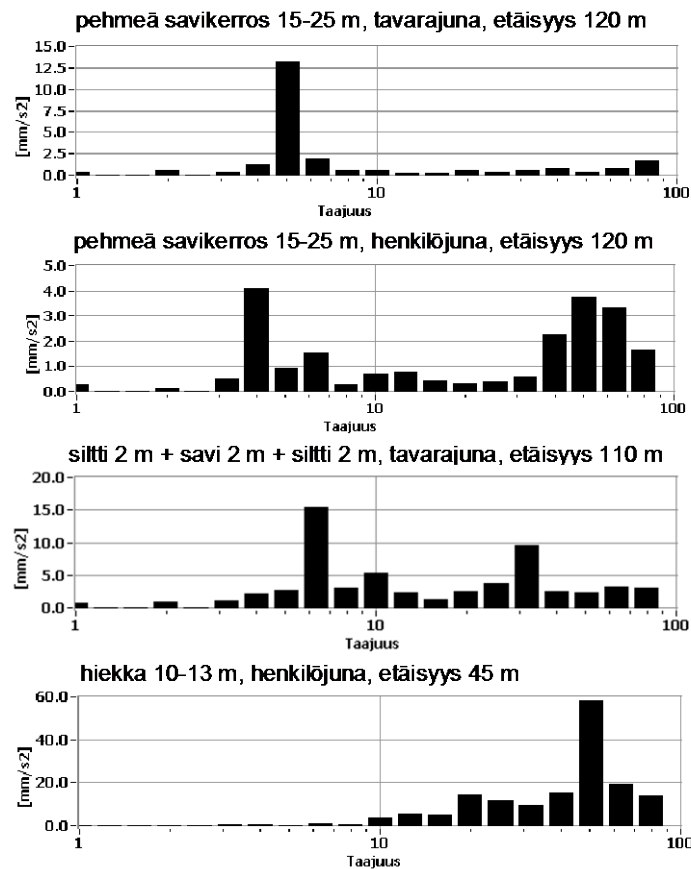
Radan epäjatkuvuuskohtia ovat erot penkereen alla olevassa maaperässä (maalajien vaihtelu ja pehmeikköjen paksuus), erot penkereen jäykkyydessä (rummut, sillat, alikulut, routavauriot), erot kiskojen taipumisessa tai erot kiskojen tasaisuudessa (tukikerroksesta irti olevat pölkyt, vaihteet, kiskonjatkokset). Myös epätasaisuudet pyörissä (ns. lovipyörät) voivat kasvattaa maaperän tärinän tasoa.

5 Esimerkkejä mittaustuloksista

Esimerkkejä tavara- ja henkilöjunien aiheuttamasta värähtelystä eri maaperissä on esitetty kuvassa 8 ja kuvassa 9 on esitetty värähtelyjen taajuussisältöjä. Kokemuseräiset havainnot osoittavat, että pehmeillä savimailla merkittävimmät värähtelyt esiintyvät yleensä 4–10 Hz:n taajuusalueella. Kovilla savimailla merkittävimmät taajuudet ovat aina yli 10 Hz ja moreeni-alueilla yleensä yli 30 Hz.



Kuva 8. Esimerkkejä junien aiheuttamasta värähtelystä eri maaperissä.



Kuva 9. Kuvassa 8 esitettyjen värähtelynäytteiden taajuussisältö terssikaistoittain.

Pehmeän maakerroksen ominaistaajuutta f_0 voidaan arvioida lausekkeella (Bachmann et al. 1997)

$$f_0 = \frac{c_s}{4H},$$

jossa c_s on leikkausaallon nopeus (Taulukko 1) ja H on pehmeän maakerroksen paksuus.

Lauseke antaa homogeenisen vakiopaksuisen maakerroksen alimman ominaistajuuden pystysuoralle värähtelylle. Lausekkeen mukaan esimerkiksi savella, kun $c_s = 80\text{--}120$ m/s, f_0 [Hz] = (20–30 m)/ H . Edellä esitetty lauseke voidaan ymmärtää toisesta päästään kiinni olevan sauvan aksiaalivärähtelynä. Koska lauseke on voimakkaasti yksinkertaistettu, se ei kuitenkaan ole riittävän tarkka suunnittelutarkoitukseen. Tarkka taajuussisällön määrittäminen on mahdollista ainoastaan maaperästä tehtävin mittauksin.

Taulukko 1. Leikkausaallon etenemisnopeuksia erilaisissa maalajeissa (Törnqvist & Talja 2006).

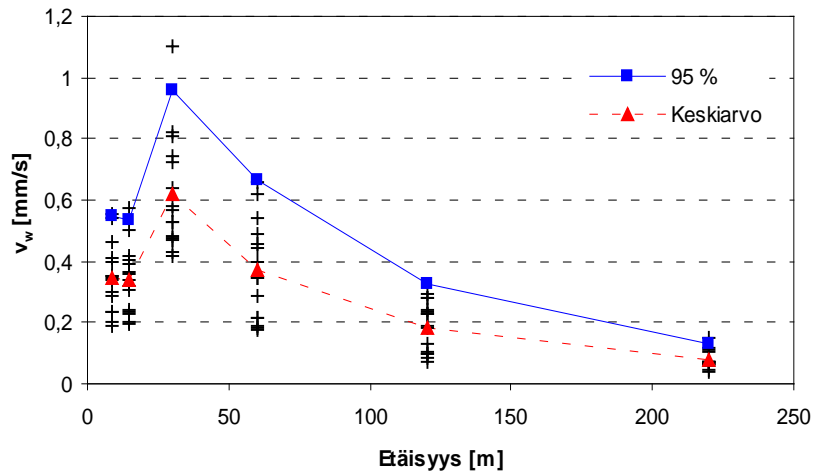
Maalaji	Leikkausaallon etenemisnopeus (c_s , m/s)
Pehmeä savi	50–120
Sitkeä savi, löyhä hiekka tai siltti	100–200
Tiivis hiekka tai siltti, löyhä sora	150–250
Tiivis sora tai moreeni, kova savi	200–500

Savilla leikkausaallon etenemisnopeutta c_s , voidaan likimäärin arvioida saven vesipitoisuuden w (p-%) perustuvalla kaavalla (RATO 2008)

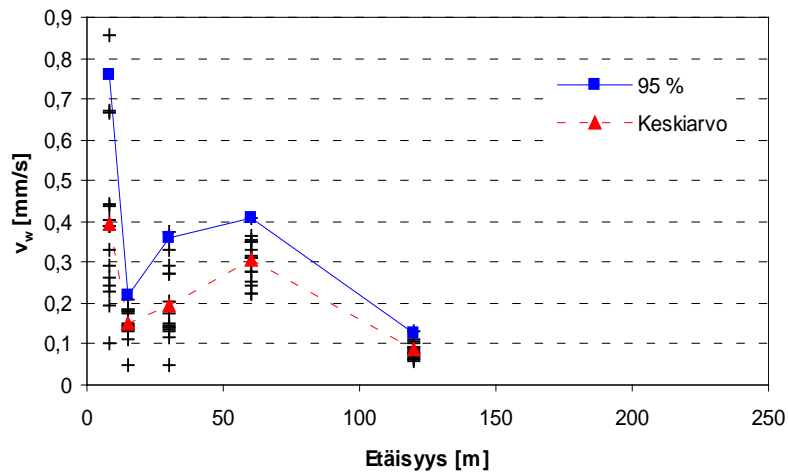
$$c_s = 135 - 0,75 w$$

Maanpinnan pystysuuntainen värähtely vaimenee yleensä tasaisesti tärinän edetessä kauemmaksi radasta. Kokemusperäiset havainnot osoittavat kuitenkin, että vaakavärähtely ei pienene tasaisesti etäisyyden kasvaessa, vaan saattaa tietyllä etäisyydellä myös kasvaa (Kuva 10). Lisäksi herätteen lähietäisyydellä vaakavärähtely voi usein olla pystyvärähtelyä suurempi.

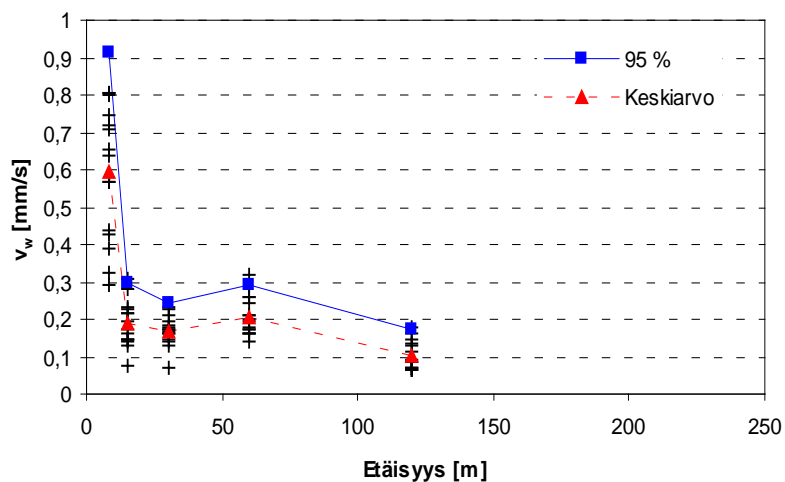
Pystysuunnassa



Radan suunnassa



Kohtisuorassa suunnassa rataa nähden



Kuva 10. Esimerkkejä värähtelyn suuruudesta eri suunnissa ja eri eri etäisyydellä radasta. Kuva käsittää viikon aikana suurimmat tärinät aiheuttaneet 15 junaa. Alue on 15–25 syvää savimaata.

Liite C: Tärinän siirtyminen rakennukseen

1 Tärinä rakennuksessa

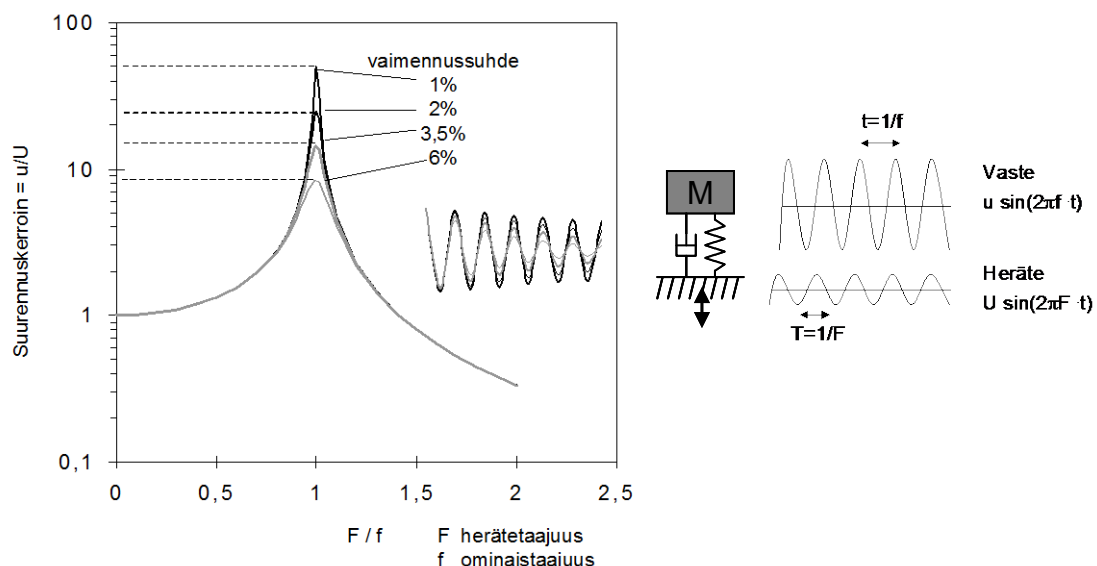
Kun maaperän värähtely siirtyy maasta perustukseen ja edelleen rakennuksen runkoon tai lattiaan, värähtelyn suuruuden lisäksi myös sen taajuussisältö muuttuu.

Maasta rakennukseen siirtyvän värähtelyn suuruuteen vaikuttavat rakennuksen dynaamiset ominaisuudet, joihin puolestaan vaikuttavat:

- maaperän värähtelyn suuruus, suunta ja taajuussisältö
- rakennuksen korkeus ja vaakamitat
- perustamistapa ja perustuksen jäykkyys
- rungon ja lattian dynaamiset ominaisuudet.

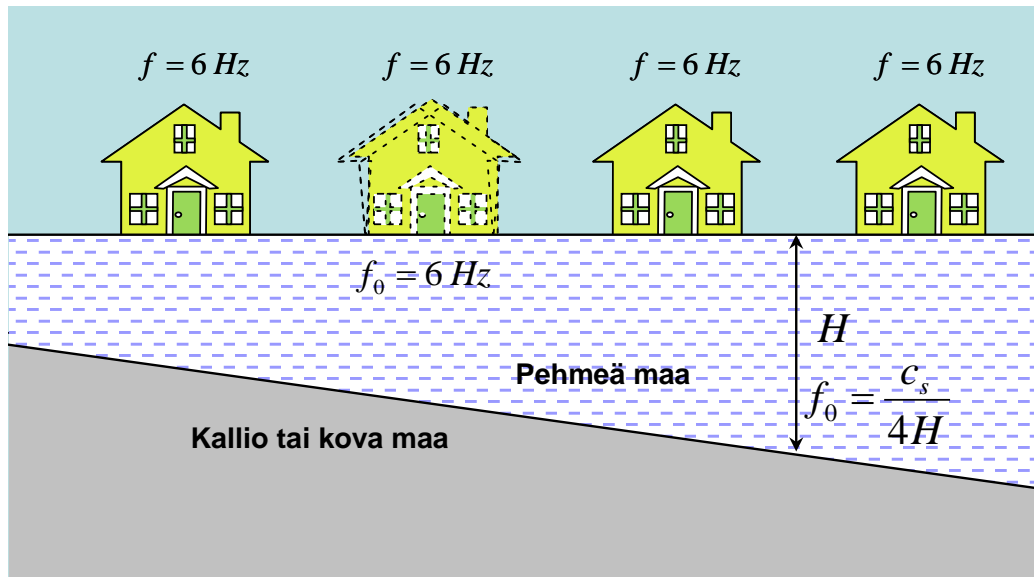
Rungon ja lattian dynaamisiin ominaisuuksiin vaikuttavat niiden massa, jäykkyys ja vaimennus.

Pahin tilanne tärinän voimistumisen kannalta on, että herätevärähtely on hyvin kapeakaista ja osuu rungon tai lattian alimman ominaistaajuuden alueelle. Silloin resonanssi-ilmiö kasvattaa voimakkaasti värähtelyä (Kuva 1). Täysi resonanssi pääsee liikennetärinästä harvoin syntymään, mutta 80 % täydestä arvosta voi rakennuksissa syntyä jo kun kuormitusjakso toistuu 5–10 kertaa (vaimennussuhde 3–5 %), mikä herätetaajuudella 5–10 Hz vastaa vain yhden sekunnin herätettä. Koska resonanssi-ilmiö vahvistaa voimakkaasti vain sitä taajuuskomponenttia, joka sattuu ominaistaajuuden alueelle, resonanssin ilmeneminen voi olla satunnaista, mutta ilmetessään resonanssin merkitys on suuri.



Kuva 1. Värähtelyn suurenemisen riippuvuus herätetaajuuden ja ominaistaajuuden suhteesta F/f sekä vaimennuksesta.

Koska maaperän värähtelyn hallitseva taajuus ja värähtelyspektrin leveys riippuvat maa-lajista, värähtelyn voimistuminen samassa rakennuksessa on erilainen savi- ja hiekkamaan tapauksessa. Samoin näennäisesti samanlaisissakin olosuhteissa voi sama rakennus käyttäytyä eri tavoin (Kuva 2).



Kuva 2. Pienetkin erot pohjasuhteissa voivat vaikuttaa resonanssin ilmenemiseen.

2 Rungon ja lattian värähtelyyn vaikuttavia tekijöitä

Merkittävin yksittäinen tekijä rungon ja lattian värähtelyssä on niiden ominaistajuus. Rungon värähtely on lattian värähtelyä haitallisempi, koska se saa koko rakennuksen värähtelemään. Rungon ominaistajuus riippuu erityisesti rakennuksen korkeudesta ja maaperässä esiintyvistä vaakavärähtelystä. Rungon resonanssivärähtely muodostuu yleensä pahimmaksi pehmeillä savimailla olevissa pientaloissa ja ilmenee rakennuksen yläosan voimakkaana vaakavärähtelynä. Syynä ilmiöön on, että savimailla maaperän värähtely on usein hyvin kapeakaistaista ja hallitseva terssikaista sattuu usein 4–10 Hz:n alueelle, joka on sama kuin 1–2 -kerroksisten rakennusten tyypillinen ominaistajuus (Taulukko 1). Yli 3-kerroksisilla taloilla rungon alin ominaistajuus on yleensä alempi kuin savimailla esiintyvät herätetaajuudet ja resonanssivärähtelyn muodostuminen haitalliseksi on harvinaisempaa. Tällöin suurimmat värähtelyt esiintyvät rakennuksen pohjakerroksessa ja värähtely pienenee siirryttäessä ylempiin kerroksiin.

Taulukko 1. Rakennuksen korkeuden vaikutus ominaistajuuteen.

Kerrosten lukumäärä	Terssikaistan keskitaajuus									
	1,6	2	2,5	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5
1–2						X	X	X	X	
3				X	X	X	X			
4			X	X	X	X				
5		X	X	X	X					
6–7	X	X	X	X						
8	X	X	X							
9–10	X	X								

Lattian ominaistajuus riippuu erityisesti lattian jännevälistä ja maaperän pystyvärähtelystä. Ominaisajuuden vaihtelu on kuitenkin suuri samantyyppisilläkin lattioilla (Taulukko 2). Läh-

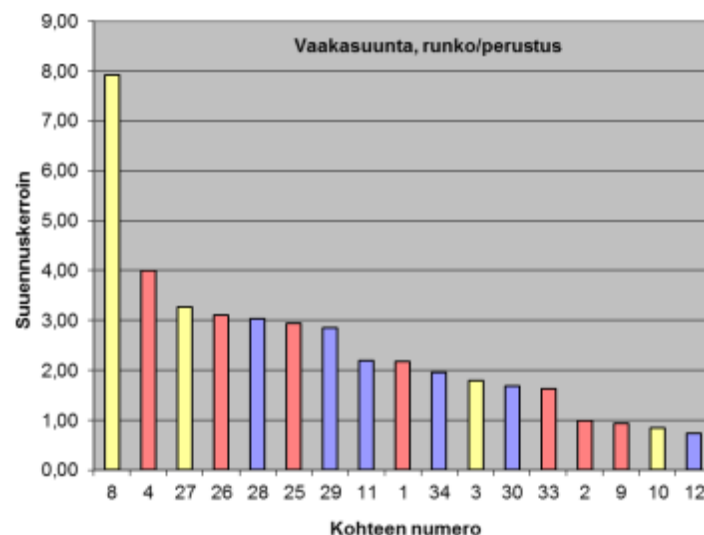
teessä (Talja 2011) ja erityisesti sen liitteessä B on annettu tarkempaa tietoa erityyppisten lattioiden ominaistajuuden riippuvuudesta jännevälillä. Kevyiden lattioiden resonanssi-värähtely ei uusissa rakennuksissa yleensä muodostu ongelmaksi savimaiden 4–10 Hz:n taajuusalueella, sillä yleensä niiden ominaistajuus pitää muista värähtelyteknisistä syistä suunnitella suuremmaksi kuin 10 Hz. Ontelolaatoilla tai pitkillä jänneväleillä resonanssi voi kuitenkin muodostua ongelmaksi myös uusissa rakennuksissa.

Taulukko 2. Erialaisten lattioiden tyypillinen ominaistajuus (hyötykuormalla 30 kg/m²).

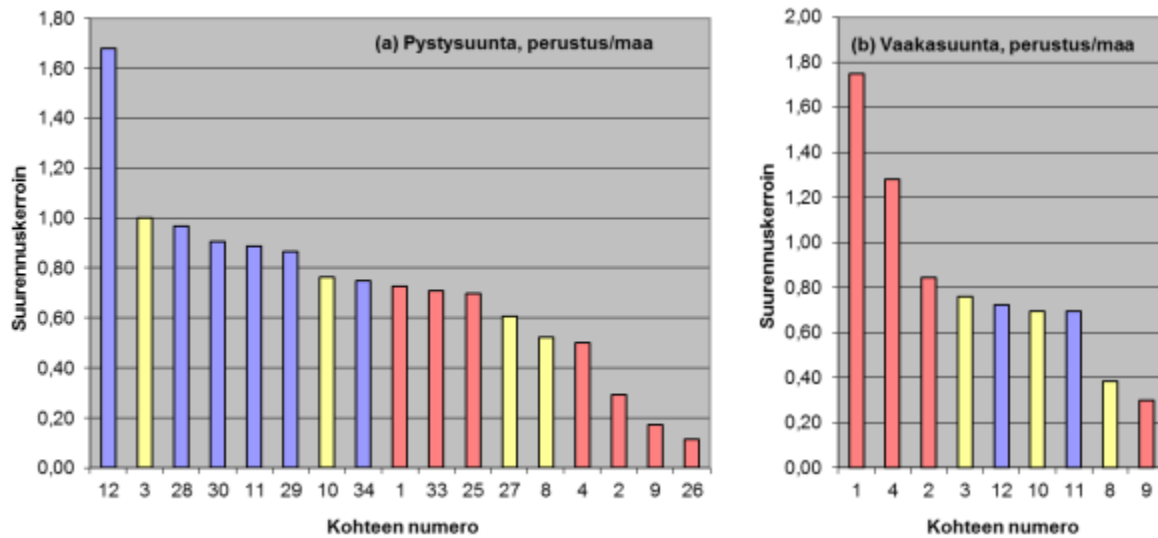
	Terssikaistan keskitaajuus									
	3,2	4,0	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25
Kevyet lattiat (L = 3–7 m)				X	X	X	X	X	X	X
Ontelolaatta (L = 6–14 m)	X	X	X	X	X	X	X	X		
Pitkät jännevälit (L = 12–18 m)	X	X	X	X	X					

3 Mittaustuloksia värähtelyn voimistumisesta

Esimerkkinä mitatusta värähtelyn voimistumisesta kuva 3 esittää yhteensä 17 kaksikerroksisen talon toisesta kerroksesta mitatun vaakavärähtelyn suhteen perustuksesta mitattuun värähtelyyn. Kuvassa 4 on verrattu samojen kohteiden perustuksen värähtelyä maaperän värähtelyyn. Tulokset perustuvat mittaustuloksiin, jotka on saatu savimailla olevista pientaloista (Talja & al. 2008). Siniset ja keltaiset (kellarikerrokselliset) kohteet on rakennettu ilman paalutusta, mutta punaiset on rakennettu paaluille. Tarkemmat tiedot kohteista löytyvät kohdenumeron avulla lähteestä (Talja & al. 2008, liite C).



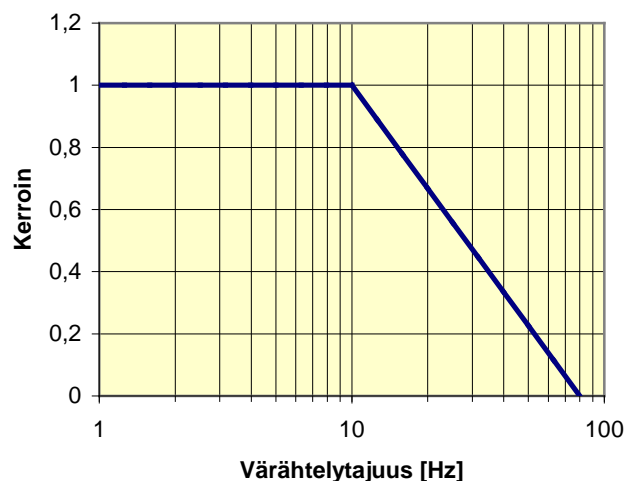
Kuva 3. Mitattu toisen kerroksen vaakavärähtelyn suhde perustuksen vaakavärähtelyyn.



Kuva 4. (a) Mitattu perustuksen pystyvärähtelyn suhde maan pystyvärähtelyyn. (b) Mitattu perustuksen vaakavärähtelyn suhde maan vaakavärähtelyyn.

Kuva 3 osoittaa, että pientalossa rungon yläosan vaakavärähtely voi olla yli kolminkertainen perustuksen vaakavärähtelyyn nähden. Kuva 4 osoittaa, että paalutus (kuvassa punaiset pylväät) voi pienentää perustuksen vaakavärähtelyä, mutta toisaalta se voi myös kasvattaa perustuksen vaakavärähtelyä. Kellarikerroksella (kuvassa keltaiset pylväät) ei ole havaittavaa merkitystä värähtelyn suuruuteen.

Käytännössä suuret taajuudet siirtyvät pieniä taajuuksia heikommin rakennukseen (Kuva 5). Koska pienennys alkaa vasta yli 10 Hz alueella, sillä ei kuitenkaan ole vaikutusta pehmeillä maaperillä dominoiviin värähtelytaajuuksiin.



Kuva 5. Taajuuden vaikutus värähtelyn pienemiseen (Talja 2011).

Lähteen (Talja & al. 2011) kirjallisuuslähteiden perusteella yli 3 kerroksisilla rakennuksilla matalat taajuudet pienenevät kuvaa (Kuva 5) enemmän. Tulosten perusteella pienennys alkaisi jo 3–4 Hz:stä ja kerroin olisi siten 8 Hz taajuudella suuruusluokkaa 0,6–0,8. Lähteessä (Talja & al. 2011) esitetystä muutamassa mittauskohteessa pysty- ja vaakavärähtelyn havaittiin kuitenkin siirtyvän maasta perustukseen likimain samassa suhteessa kuin pientalo-kohteissakin. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että yhdessä pitkässä (noin 30 m) ja kapeassa (noin 10 m) paaluille perustetussa rakennuksessa pituussuuntainen värähtely siirtyi selvästi huonommin perustukseen kuin vaakasuuntainen värähtely.

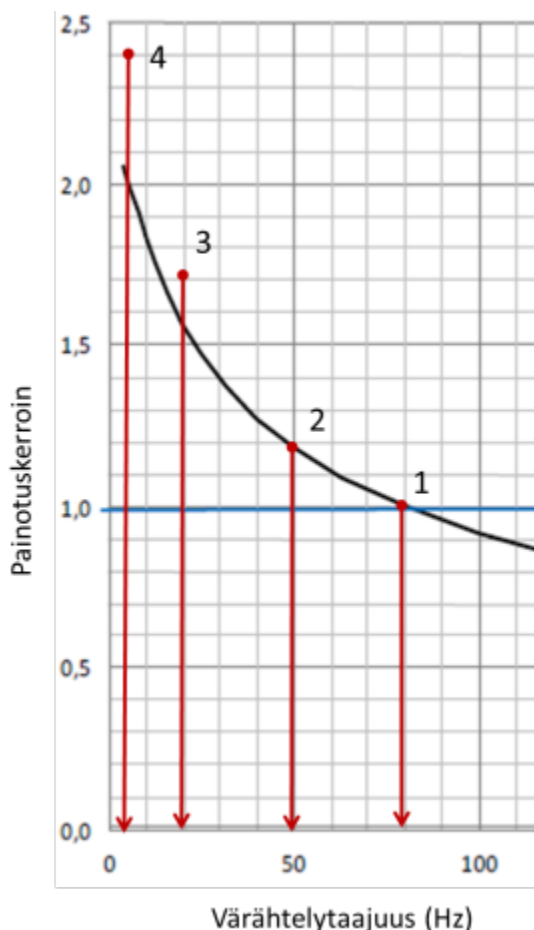
Liite D: Muissa maissa liikennetärinälle annettuja ohjearvoja

1 Ohje NS 8141-2-2013: Tärinän vaikutus rakenteisiin, muu kuin louhintatyö

NS 8141-2-2013: Virkning av vibrasjoner på byggverk fra annen anleggsvirksomhet enn sprengning, og fra trafikk

Lähde: Nils Ramstad: Viktige endringer i NS 8141 Vibrasjoner og støt. Anleggsdagene 2014. <http://www.mef.no/ikbViewer/Content/117415/Anleggsdagene%202014,%20Sprengningsdagen,%20N.%20Ramstad.pdf>

Norjan standardissa mitattu värähtelysignaali ensin taajuuspainotetaan, josta saatua värähtelynopeuden huippuarvoa verrataan ohjeelliseen rajaan. Taajuuspainotuksella otetaan huomioon, että värähtelyn matalat taajuudet ovat haitallisempia rakenteille kuin korkeat taajuudet. Taajuuspainotus kasvattaa alle 80 Hz:n värähtelyjä ja kerroin on 5–10 Hz:n taajuuksilla 1,8–2,0. Taajuuspainotuksen merkitys on samaa suuruusluokkaa kuin mitä Suomen ohjeessa RIL-253-2010 on esitetty maaperän vaikutuksesta ohjearvojen perusarvoon (Kuva 1).



RIL 253-2010:n mukainen "painotus":

- 1 – Kiinteä kallio
(12/12=1,0)
- 2 – Tiivis hiekka, sora, moreeni
(12/10=1,2)
- 3 – Sitkeä savi, siltti, hiekka
(12/7=1,7)
- 4 – Pehmeä savi
(12/5=2,4)

Kuva 1. Värähtelynopeuden taajuuspainotus NS 8141-2-2013:n mukaan ja painotuksen vertailu ohjeen RIL 253-2010:n taulukon 3.3 mukaisiin "painotuksiin" eri maapohjilla.

Värähtelyn ohjeellinen raja on asetettu perustuksesta mitatulle värähtelylle ja se määritetään lausekkeesta

$$v_f = v_0 \cdot F_b \cdot F_m \cdot F_t \cdot F_k$$

jossa

- $v_0 = 35$ mm/s on värähtelyrajan perusarvo
- F_b on rakennustyyppikerroin (Taulukko 1)
- F_m on materiaalikerroin (Taulukko 2)
- F_t on kuntokerroin (Taulukko 3) ja
- $F_k = 0,4$ rautatieliikenteelle (värähtelylähteestä riippuva tekijä).

Jos esimerkiksi kyse on normaalista muuratusta asuintalosta ($F_b = F_m = F_t = 1,0$), taajuuspainotetun värähtelyn raja on 14 mm/s. Teräsbetoni-, puu- tai teräsrunkoisella talolla arvo on 20 % suurempi. Kun kyse on savimailla yleensä esiintyvistä värähtelytaajuuksista 5–10 Hz, taajuuspainottamattomana raja olisi 7–8 mm/s. Arvo saadaan jakamalla taajuuspainotettu raja 14 mm/s kuvasta 1 saadulla tekijällä 1,8–2. RIL 253-2010 antaa vastaaville rakennustyypeille perustuksista mitatulle värähtelylle ohjearvoksi 5 mm/s. Värähtelystä aiheutuviin rakenteiden muodonmuutoksiin perustuvassa menettelyssä ohjearvo olisi 6–12 mm/s.

Taulukko 1. Rakennustyyppikerroin.

Rakennustyyppi	Rakennustyyppikerroin F_b
Raskaat rakenteet, kuten sillat, laiturit ja linnoitukset	1,7
Teollisuus- ja toimistorakennukset	1,2
Asunnot yleensä	1,0
E erityisen herkäät rakennukset, kuten esimerkiksi kaaret ja suuret jäneväliit, herkäät rakennusmateriaalit, historialliset rakennukset ja rautiot	0,7

Taulukko 2. Materiaalikerroin.

Materiaali	Materiaalikerroin F_m
Teräsbetoni, teräs, puu	1,2
Lujittamaton betoni, muuratut rakenteet, tiili, betoniharkot, kevytso-raharkot ja vastaavat	1,0
Paineessa kovetettu kevytbetoni (Siporex ja vastaavat)	0,8

Taulukko 3. Kuntokerroin.

Kunto	Kuntokerroin F_t
Normaali	1,0
Hauras ja helposti särkyvä	0,8

2 Ohje SS 02 52 11: Tärinän vaikutus rakenteisiin, muu kuin louhintatyö

Svensk Standard SS 02 52 11. 1999. Vibration och stöt – Riktvärden och mätmetod för vibrationer i byggnader orsakade av pålning, spontning, schakting och packning.

Lähde: Hakulinen, M. 2009. Rakentamisen aiheuttamat värinät -projekti. Taustaselvitykset. www.getunderground.fi/getfile.ashx?cid=72843&cc=3&refid=8

Vertailusuurena on rakennuksen perustuksessa esiintyvä pystysuuntainen värähtely. Ohje-arvot on esitetty paalutukselle, maan tiivistykselle, kaivulle ja pontitukselle. Värähtelyraja määritetään lausekkeesta

$$v_f = v_0 \cdot F_b \cdot F_m \cdot F_g$$

jossa

- v_0 on maaperästä riippuva värähtelyrajan perusarvo (Taulukko 4)
- F_b on rakennustyyppikerroin (Taulukko 5)
- F_m on materiaalikerroin (Taulukko 6) ja
- F_t on perustamistapakerroin (Taulukko 7).

Jos esimerkiksi kyse on savi- siltti tai soramaalle maanvaraisesti perustetusta pientalosta ($F_b = F_m = 1,0$, $F_g = 0,6$), niin värähtelyraja on 60 % taulukossa 4 esitetystä arvosta. Maan tiivistyksen tapaukselle arvoksi saadaan 3,6 mm/s ja muille taulukon työmenetelmille 5,4 mm/s. RIL 253-2010 antaa samalle tapaukselle perustuksista mitatulle värähtelylle ohjearvoksi 5 mm/s.

Taulukko 4. Värähtelyn perusarvo v_0 perustuksen pystyvärähtelylle maa ja pohjarakennustöissä.

	Savi, siltti, hiekka sora	Moreeni	Kiinteä kallio
Tiivistys	6	9	12
Paalutus, pontitus, kaivu	9	12	15

Taulukko 5. Rakennustyyppikerroin F_b .

Rakennustyyppi	Rakennustyyppikerroin F_b
Raskaat rakenteet, kuten sillat, laiturit ja linnoitukset	1,7
Teollisuus- ja toimistorakennukset	1,2
Normaalit asuinrakennukset	1,0
Eriyisen herkäät rakennukset ja rakennukset, joissa on kaaria ja suuria jännevälejä, esimerkiksi kirkot ja museot	0,65
Hauraassa ja sortumisherlässä tilassa olevat historialliset rakennukset ja rauniot	0,50

Taulukko 6. Materiaalikerroin F_m .

Materiaali	Materiaalikerroin F_m
Teräsbetoni, teräs, puu	1,2
Lujittamaton betoni, tiili, betoniharkot, kevytsoraharkot	1,0
Paineessa kovetettu kevytbetoni (Siporex), roiskerappaus	0,75
Kalkkihiekkatiilet ja -harkot	0,65

Taulukko 7. Perustamistapakerroin F_g .

Perustuksen tyyppi	Kuntokerroin F_t
Maanvarainen	0,6
Kitka- ja koheesiopaalut	0,8
Tukipaalut	1,0

3 Ohjeet DIN 4150-3, SN 640 312 a, ÖNORM S 9020, FTA (USA)

DIN 4150-3. 1999. Erschütterungen im Bauwesen; Einwirkungen auf bauliche Anlagen

SN 640 312 a. 1992. Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke.

ÖNORM S 9020. 1986. Bauwerkserschütterungen; Sprengerschütterungen und vergleichbare impulsförmige Immissionen

FTA. 2006. Transit noise and vibration impact assessment. FTA-VA-90-1003-06. http://www.fta.dot.gov/documents/FTA_Noise_and_Vibration_Manual.pdf

Lähteet:

Vibration Standards: http://vibrationdamage.com/Vibration_standards.htm

Ziegler, A. Neue Erschütterungsnormen: Anwendung und Interpretation. <http://www.z-c.ch/Publikationen/Ersch%FCtterungsnormen.pdf>

Auszug Norm SN 640 312a. B. Richtwerte für Erschütterungen. http://www.kgkissling.ch/dokumente/Erschuetterungsmessungen_Norm_SN_640_312a.pdf

Pistol, J., Kopf, F., Adam, D., Villwock, S., Völkel, W. 2013. Ambient vibration of oscillating and vibrating rollers. Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013). http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_219586.pdf

Saksan DIN 4150-3: Ajoittain esiintyvä pitkäkestoinen tärinä⁶

Vertailusuurena on suurin perustuksessa esiintyvä pysty- tai vaakasuuntainen värähtely ja suurin ylimmässä kerroksessa esiintyvä vaakavärähtely.

Jos taulukossa esitettyjä arvoja ei ylitetä, tärinän aiheuttamat käyttöarvoa pienentävät vauriot ovat epätodennäköisiä. Jos vaurioita on kuitenkin havaittu, niiden todennäköinen syy on jokin muu kuin liikennetärinä. Jos esitetyt arvot ylitetään merkittävästi, lisätutkimus mahdollisista vaurioista ja on tarpeen.

Taulukko 8. Saksan rajat.

Värähtelytaajuus	Perustuksen värähtely			Ylin kerros, vaakasuunta
	1–10 Hz	10–50 Hz	50–100 Hz	1–100 Hz
Normaalit asuinrakennukset	5 mm/s	5–15 mm/s	15–20 mm/s	5
Eriyisen tärinäherkät materiaalit tai suojellut historialliset rakennukset	3 mm/s	3–8 mm/s	8–10 mm/s	2,5

⁶ DIN 4150-3:n mukaan tärinä on pitkäkestoista, jos sen esiintymisen aikana voi kehittyä resonanssi.

Itävallan ÖNORM S 9020: Ajoittain esiintyvä pitkäkestoinen tärinä

Vertailusuurena on suurin rakennuksen perustuksessa esiintyvä värähtely (resultantti).

Taulukossa esitetyt vertailuarvot on arvioitu pienentämällä lyhytkestoisen tärinän rajoja 60 %.

Taulukko 9. Itävallan rajat.

Normaalit asuinrakennukset ja niiden perustukset (betoni, puu, teräs, muuraukset)	8 mm/s
Vaurioherkät rakenteet, kuten laatoille tai palkeille perustetut muuratut rakenteet	4 mm/s
Erittäin vaurioitumisherkät rakenteet	2 mm/s

Sveitsin SN 640 312 a: Työkoneiden tai liikenteen aiheuttama tärinä

Vertailusuurena on suurin rakennuksessa esiintyvä värähtely (resultantti), mutta ei kuitenkaan mitattuna lattian keskeltä.

Jos taulukossa esitettyjä arvoja ei ylitetä, pienetkin vauriot ovat epätodennäköisiä. Lisäksi pieni ylitys (alle 30 %) kasvattaa vaurioitumisriskiä vain marginaalisesti.

Taulukko 10. Sveitsin rajat.

Värähtelytaajuus	<30 Hz	30–60 Hz	>60 Hz
Normaali vaurioitumisherkkyys, kuten betoniset tai muuratut asuinrakennukset	3 mm/s	4 mm/s	6 mm/s
Kohonnut vaurioitumisherkkyys, kuten asuinrakennusten erityisen hauraat materiaalit tai suojellut historialliset rakennukset	1,5 mm/s	2 mm/s	3 mm/s

USA:n Federal Transit and Noise administration (FTA)

Vertailusuurena on suurin maanpinnassa esiintyvä pysty- tai vaakavärähtely.

Taulukossa esitettyjä rajoja käytetään kriteerinä kun ympäristövaikutusten arvioinnissa karotetaan ongelma-alueita joihin lopullisessa suunnittelussa tulee kiinnittää erityistä huomiota.



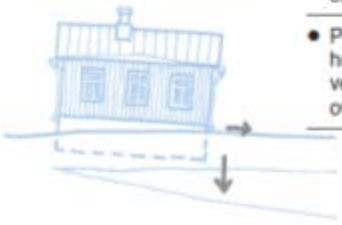

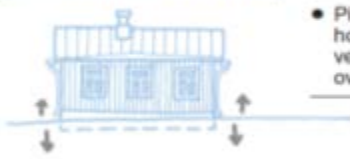
Taulukko 11. USA:n rajat.

Nykyaikaiset (engineered) betonirakenteet ja muuratut rakenteet (ei kipsi)	8 mm/s
Perinteiset (non-engineered) puurakenteet ja tiilirakennukset (myös kipsilevyt)	5 mm/s
Erittäin vaurioitumisherkät rakenteet (ml. historialliset rakennukset)	3 mm/s






Liite E: Perustusvaurioiden tyypit, syyt ja korjaus

Lähde: Museovirasto. 2003. Museoviraston korjauskortisto. Korjauskortti nro 24: Pientalon perustusten korjaus. <http://www.nba.fi/fi/File/2131/korjauskortti-24.pdf>




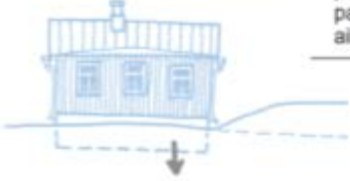

1. Virheitä talon suunnittelussa tai rakentamisessa

	Vaurioita	Vaurioitumisen syytä	Korjaustapoja
1. Liian matala perustus routivalla maalla 	<ul style="list-style-type: none"> Talo painuu, kallistuu tai kiertyy. Piiput, palomuurit, hormimuurit, uunit, vesijohdot, ja viemärit ovat vaarassa rikkoutua. 	<ul style="list-style-type: none"> Vedellä kylästynyt maa routii. Maalaji jäätyy perustusten alla ja ympärillä. Jäälinssit keikuttavat taloa. Perustuksissa ei ole anturaa tai se on liian kapea. 	<ul style="list-style-type: none"> A Pintavesien johtaminen pois talon seinustalta. B Perustusten routasuojaus. C Salaojitus ja salaojituskerros. D Perustusten ulottaminen routarajan alapuolelle. E Talon painuvan pään tai koko talon paaluttaminen ja mahdollinen nosto.
2. Talo notkossa 	<ul style="list-style-type: none"> Vaurioita alapohjassa, sokkelissa ja seinien alaosissa. 	<ul style="list-style-type: none"> Talo rakennettu valuma-alueen alimpaan kohtaan. Muuratuissa ja betoni-rakenteisissa perustuksissa veden kapillaarista nousua rungon rakenteisiin. 	<ul style="list-style-type: none"> F Painuvan osan tai koko talon paalutus tai arkutus (Ks. s. 12 <i>Lamellointi eli vaiheistus</i>). Myös koko talon nosto tarpeen mukaan. <p><i>Korjaustavat A–F soveltuvat tapauksiin 1–5.</i></p>
3. Savikerrostuma perustusten alla 	<ul style="list-style-type: none"> Talo painuu, kallistuu ja voi siirtyä myös sivusuunnassa. Piiput, palomuurit, hormimuurit, uunit, vesijohdot, ja viemärit ovat vaarassa rikkoutua. 	<ul style="list-style-type: none"> Rakennuksen perusmaassa oleva savikiila ei ole merkänä kantava maalaji. Huonosti tutkitut pohjasuhteet rakennettaessa eli maaperään soveltumaton perustamistapa. 	
4. Osa talosta kantavalla maapohjalla, osa routivalla 	<ul style="list-style-type: none"> Talon kallistumisesta aiheutuu vaurioita piippuihin, palomuuireihin ja muihin seinin. Puurunkoinen talo vääntyy ja tiilirunkoinen katkeilee. Ikkunoissa ja ovissa käyntiongelmia. Putkistot vaarassa. 	<ul style="list-style-type: none"> Talon routivalla maapohjalla oleva osa liikkuu, kalliolla olevan yhden kulman pysyessä paikoillaan. Talo kallistuu. 	
5. Matala perustus routimattomalla maalla 	<ul style="list-style-type: none"> Talo painuu, kallistuu tai kiertyy. Piiput, palomuurit, hormimuurit, uunit, vesijohdot, ja viemärit ovat vaarassa rikkoutua. 	<ul style="list-style-type: none"> Perustusten salaojituskerroksen tai täytekerroksen muuttuminen routivaksi kun ympäröivistä maakerroksista niihin kulkeutuu vähitellen veden mukana hienojakoisia maalajeja. Veden virtaus on muuttunut tai perustuksia rakennettaessa ei ole käytetty suodatinkangasta. 	

2. Muutoksia rakennuksessa

	Vaurioita	Vaurioitumisen syitä	Mahdollisia korjaustapoja
6. Talon säännöllisen kunnossapidon laiminlyönti 	<ul style="list-style-type: none"> Talon liikkuminen ja siitä aiheutuvat vauriot. Vaurioita sokkelissa ja seinien alaosissa. 	<ul style="list-style-type: none"> Salaojien tukkeutuminen, kattovesien lätköityminen talon seinustalle ja maapohjan routiminen. 	<ul style="list-style-type: none"> Pintavesien johtaminen pois talon seinustalta ja jalkarännien ja syöksytorvien korjaus. Salaojitus ja salaojituskerros.
7. Viemärivuoto 	<ul style="list-style-type: none"> Talon epätasaisesta painumisesta johtuvia vaurioita. 	<ul style="list-style-type: none"> Viemärivedet voivat tuoda pohjaveteen kivi-perustuksen alla olevalle puuarinalle vaarallisia anaerobisia lahottajia. Viemärivesi voi myös allastua perusmaahan ja tehdä sen routivaksi tai muuttaa haitallisesti pohjaveden pH:ta. 	<ul style="list-style-type: none"> Viemärin korjaus ja tilanteen tarkkailu. Painuneen pään lamellointi, nosto ja arkutus (ks. s. 12 <i>Lamellointi eli vaiheistus</i>).
8. Uusi viemäri tai kaukolämpöputki 	<ul style="list-style-type: none"> Talon kallistuminen tai nurkan painuminen ja niistä johtuvat vauriot. 	<ul style="list-style-type: none"> Talon viereen tai alle asennettu viemäri tai kaukolämpöputki kuivattavat kantavia maakerroksia, jotka puristuvat kokoon ja aiheuttavat talon kallistumisen. 	<ul style="list-style-type: none"> Painuneen pään lamellointi, nosto ja arkutus.
9. Lattialämmitys kellaritilaan 	<ul style="list-style-type: none"> Talon epätasaisesta painumisesta johtuvia vaurioita. 	<ul style="list-style-type: none"> Lattialämmitys voi eristämisestä huolimatta kuivattaa kantavia maakerroksia, jotka puristuvat kokoon ja aiheuttavat perustusten painumista ja talon kallistumisen. 	<ul style="list-style-type: none"> Painuneen pään lamellointi, nosto ja arkutus.
10. Lisäkuorma 	<ul style="list-style-type: none"> Talon tasainen tai epätasainen painuminen ja niistä aiheutuvat vauriot. 	<ul style="list-style-type: none"> Uuden kerroksen rakentamisen aiheuttama lisäkuorma. Maapohjan maalajien epätasainen kantokyky voi aiheuttaa talon kallistumisen. 	<ul style="list-style-type: none"> Lisäanturointi lamelloimalla ja tarvittaessa talon oikaisu.

3. Muutoksia rakennuksen ympäristössä

	Vaurioita	Vaurioitumisen syitä	Mahdollisia korjaustapoja
11. Iso lehtipuu talon vieressä 	<ul style="list-style-type: none"> Talo painuu ja liikkuu epätasaisesti, mistä aiheutuu vaurioita. 	<ul style="list-style-type: none"> Suuret lehtipuut saattavat haihduttaa satoja litroja vettä päivässä. Maakerrokset perustusten alla voivat kuivua, puristua kokoon ja aiheuttaa talon painumisen. Juuret voivat tunkeutua salaojaputkiin, tukkia ne ja maa alkaa routia. Perustusten alle ja sisään kasvaneet juuret voivat heiluttaa pientä taloa. 	<ul style="list-style-type: none"> Talon oikaisu peruskiloilla Salaojituksen korjaus ja haitallisten juurien katkaisu. Paalutus.
12. Liikenteen värinä 	<ul style="list-style-type: none"> Talon painumisesta aiheutuvia vaurioita sekä piipun, muurien, uunien ja sokkelin halkeilua. 	<ul style="list-style-type: none"> Värinä sinänsä ja sen vaikutuksesta kantavien maakerrosten tiivistyminen perustusten alla. 	<ul style="list-style-type: none"> Nopeusrajoitus, tien pinnan asfaltointi, raskaan liikenteen ajokielto tai tien paalutus ja värinäkatko.
13. Rakentaminen naapuritontilla 	<ul style="list-style-type: none"> Talon painuminen tai kallistuminen ja niistä aiheutuvat vauriot. 	<ul style="list-style-type: none"> Kaivanto naapuritontilla laskee pohjaveden pintaa tai kuivattaa perustusten alla olevia maakerroksia, jotka puristuvat kokoon. 	<ul style="list-style-type: none"> Painuneen pään lamellointi, nosto, arkutus tai paalutus.
14. Talon lähiympäristön toispuoleinen kuormamuutos 	<ul style="list-style-type: none"> Talon painuminen lisäkuormituksen puolelta ja epätasaisesta painumisesta aiheutuvat vauriot. 	<ul style="list-style-type: none"> Esimerkiksi tien rakentaminen talon viereen, ajoluiskan teko kellarin, puutarhan rakentamisen yhteydessä tehty maatyttö. 	<ul style="list-style-type: none"> Talon oikaisu kiilaamalla perustuksen ja puurungon välistä. Perustusten vahvistaminen. Tukimuurin teko.
15. Talon vieressä olevan tien pinnan nostaminen 	<ul style="list-style-type: none"> Talon ulkuvuorauksen ja rungon vaurioituminen. Talon kallistuminen. Perustusvauriot mahdollisia. 	<ul style="list-style-type: none"> Pintavedet pääsevät kosketuksiin talon ulkoseinärakenteen kanssa; kapillaarista vedennousua seinässä. Talon toispuoleinen lisäkuorma. 	<ul style="list-style-type: none"> Puhdistettavissa oleva vesikouru seinän viereen. Talon oikaisu kiilaamalla perustuksen ja puurungon välistä. Tarvittaessa perustusten ulottaminen syemmälle tai anturan teko tai sen laajentaminen.

Liite F: Malli kohdetietojen esittämisestä ja mittauspisteiden sijainnista kohteessa

KOHTEEN YLEISTIEDOT

(eri kohdissa voidaan viitata lisätietoihin)

Kohdetunnus

Kohteen tiedot	Omistaja/Asukas
Osoite:	Nimi:
Etäisyys rataan:	Yhteystiedot:
Kaavio kohteen sijainnista	Kuva kohteesta
(periaatepiirros, josta selviää kohteen ja radan sijainti, etäisyydet, talon asento rataan nähden, värähtelysuunnat x/y jne.)	(valokuva radalta kuvattuna, tai radan suuntaan kuvattuna mikäli molemmat mahtuvat samaan kuvaan)

Rakennuksen kuvaus

Rakennustyyppi: (pien/rivi/kerros/...)	Rungon materiaali: (puu/harkko/teräs/...)
Käyttötarkoitus: (asunto/toimisto/hotelli/...)	Ulkoverhoilu: (puu/tiili/harkko/kv-bet..)
Kerros määrä: (1, 1½, 2, N /rinne/kellari)	Sisäverhoilu: (levy/lauta/harkko/...)
Valmistumisvuosi: (antura/laatta/pilari/...)	Alapohjan materiaali: (ont.laatta/valu/puu/...)
Perustamistapa: (paalut/pilarit/sokkeli/...)	Välipohja: (ont.laatta/valu/puu/...)
Paalut: (betoni/teräs/puu/pituudet)	Katon runko: (puu/teräs/betoni/...)
Maaperä: (lieju/savi/sora/syvyys/...)	Katon materiaali: (tiili/huopa/pelti/...)

Liikenteen kuvaus

Liikenteen tyyppi
(liikennemäärät, esim. tavarajunat lastattuna, tavarajunat tyhjinä, pikajunat, IC-junat, Pendolinot, lähijunat)
Rajoitukset
(paino ja nopeusrajoitukset eri kalustoilla, junien suurimmat kokonaispainot, muut rajoitukset)
Ratatiedot
(radan kuntoluokitus, vaihteet, sillat, alikulut, rummut, muut epäjatkuvuudet)

Aikaisemmat selvitykset

	Vuosi	Tekijä	Tilaaja
Tärinämittaukset			
Maaperätutkimukset			

Viittaukset lisätietoihin

Viite	
1)	
2)	

MITTAUSTIEDOT

(eri kohdissa voidaan viitata lisätietoihin)

Mittauslaite:

Mittausajankohta:

Mittausvastaavan yhteystiedot Nimi: Osoite: Puhelin: Sähköposti:	Muut mittaukseen osallistuneet
--	--------------------------------

Mittauskanavien numerot (z: pystysuunta, x: talon pituussuunta, y-poikittaissuunta)

Mittauspiste 1	x	y	z	Mittauspiste 2	x	y	z
Kanavat				Kanavat			
(periaatepiirros, josta selviää mittauspisteen sijainti ja etäisyydet, tilojen päämitat ja värähtelysuunnat x/y) (vaihtoehtoisesti/lisäksi mittauspisteen sijainnit voidaan osoittaa valokuvilla)							
Asennusalusta: (lattian pintarakenne)				Asennusalusta:			
Mittauspiste 3	x	y	z	Mittauspiste 4	x	y	z
Kanavat				Kanavat			
Asennusalusta:				Asennusalusta:			
Mittauspiste 5	x	y	z	Mittauspiste 6	x	y	z
Kanavat				Kanavat			
Asennusalusta:				Asennusalusta:			

Viittaukset lisätietoihin

Viite	
1)	
2)	