

RATAHALLINTOKESKUS

RHK • Tekninen yksikkö

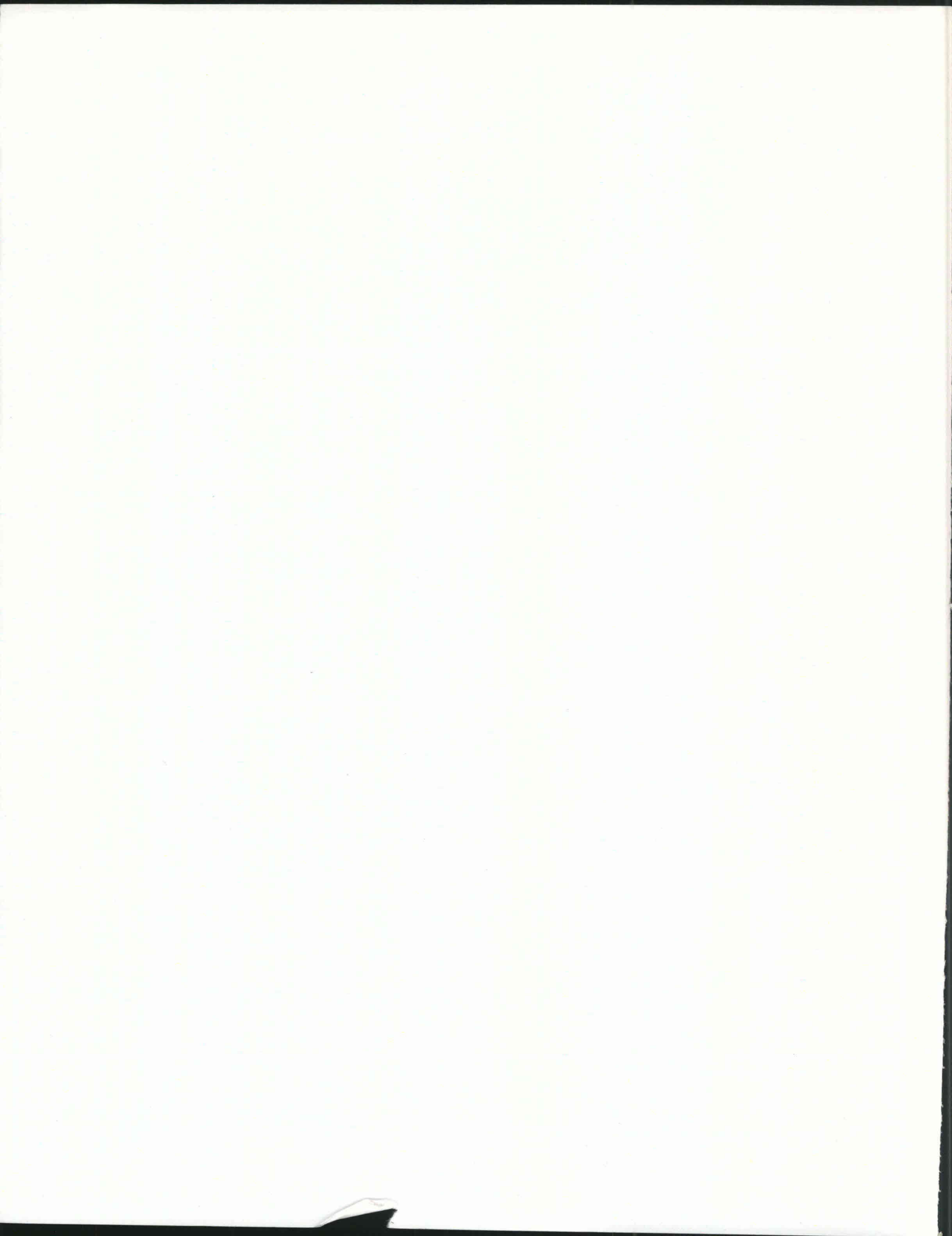
Ratahallintokeskuksen
julkaisuja

A
3/1999

**RAUTATIELIIKENTEN AIHEUTTAMA
TÄRINÄ, 250 kN:n JA 300 kN:n
AKSELIPAINOT**

o **Matti Levomäki**

Helsinki 1999



**RAUTATIELIIKENTEEEN AIHEUTTAMA TÄRINÄ,
250 kN:n JA 300 kN:n
AKSELIPAINOT**

o **Matti Levomäki**

RHK
RATAHALLINTOKESKUS
KAIVOKATU 6, PL 185
00101 HELSINKI

PUH. (09) 5840 5111
FAX. (09) 5840 5100
SÄHKÖPOSTI: info@rhk.fi

ISBN 952-445-019-4
ISSN 1455-2604

Levomäki, Matti. Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. Helsinki 1999. Ratahallintokeskuksen julkaisu A 3/1999. 37 sivua ja 2 liitettä. ISBN 952-445-019-4, ISSN 1455-2604.

Avainsanat: rautatieliikenne, tärinä, akselipainot

TIIVISTELMÄ

Tämä rautatieliikenteen aiheuttamaa tärinää käsittelevä kirjallisuustutkimus on osa Ratahallintokeskuksen 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoon tähtäävää tutkimusprojektia. Tutkimus palvelee lähdeteoksena rautatieliikenteen aiheuttaman tärinän jatkotutkimukselle 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen kannalta.

Tässä tutkimuksessa esitellään lyhyesti tärinän syntymistä ja leviämistä. Pääasiallinen mielenkiinnon kohde on kuitenkin ollut raskaampien akselipainojen vaikutus tärinän muodostumisessa ja tärinän vaimentamiseen käytettävät rakenteet ja muut menetelmät. Lähdeteoksina on käytetty koti- ja ulkomaisia teoksia, VR:n ja RHK:n aiemmin teettämiä tutkimusraportteja ja tässä yhteydessä tehtyjä haastatteluja.

Tämän tutkimuksen lähdemateriaaleissa on keskitytty lähinnä normaaleihin käytössä oleviin akselipainoihin. Nopeiden junien aiheuttamaa tärinää on tutkittu viime aikoina hyvinkin paljon, mutta koska esimerkiksi suomalaisen Pendolinon akselipainot ovat korkeintaan 140 kN, eivät tulokset ole suoraan sovellettavissa raskaampien akselipainojen vaikutuksiin. Kattavia loppupäätelmiä tai suosituksia raskaampien akselipainojen vaikutuksista ei siten voida tämän kirjallisuustutkimuksen perusteella tehdä. Myöhemmin tehtävät mittaukset antavat lisätietoa raskaampien akselipainojen vaikutuksesta tärinän syntymiseen.

Tämän kirjallisuustutkimuksen päätelminä voidaan raskaiden akselipainojen vaikutuksesta tärinään sekä tärinän vaimentamiseen käytettävistä menetelmistä todeta, että

- ◆ raskaiden akselipainojen vaikutuksesta tärinän syntymiseen ei ole olemassa tutkimustuloksia, mutta yleisesti ollaan sitä mieltä, että akselipainojen kasvattaminen lisää tärinää,
- ◆ tärinäolosuhteisiin vaikuttavat liikkuvan junakaluston ja ratapenkereen ominaisuuksien lisäksi muun muassa maaperäolosuhteet, rakennusten materiaalit, rakennustavat, kerrosten lukumäärä, perustusten tyyppi ja rakennusten sijainti,
- ◆ rakennustavalla, -materiaaleilla ja rakennusten sijainnilla näyttäisi olevan huomattavasti suurempi vaikutus tärinän vaikutuksiin kuin perustuksilla,
- ◆ rakennusten tai rautatien perustaminen paaluille eliminoi tärinän lähes kokonaan,
- ◆ tärinän vaimentaminen on yleensä parasta tehdä mahdollisimman lähellä tärinälähdettä ja lisäksi paikalliset olosuhteet on tunnettava erittäin hyvin ja
- ◆ kaiken tärinän eliminoiminen on sekä teknisesti että taloudellisesti käytännössä mahdotonta.

Levomäki, Matti. Railway traffic induced ground vibration, 250 kN and 300 kN axle loads. Finnish Rail Administration, Technical Unit. Helsinki 1999. Publications of Finnish Rail Administration A 3/1999. 37 pages and 2 appendices. ISBN 952-445-019-4, ISSN 1455-2604.

Key words: railway traffic, ground vibration, axle loads

SUMMARY

This literature study concerning railway traffic induced ground vibration, which was started in 1998, is part of Finnish Rail Administration's (RHK) investigation with the aim of taking 250 kN and 300 kN axle loads into use. This investigation has been done in the Laboratory of Highway Engineering at the Helsinki University of Technology.

This study consists of a short presentation of the origin and drift of vibration. The main interest has been focused however to the impact of heavier axle loads on the origin of vibration as well as structures and other methods used in order to reduce vibration. Domestic and foreign literature, research reports ordered previously by VR and RHK and interviews made in this connection have been used as source material.

The source material of this study confines to normal axle loads. Vibration caused by high-speed trains has been studied quite much recently, but as the maximum axle load of the Finnish Pendolino is 140 kN the results are not directly applicable to the impacts of heavier axle loads. Extensive resolutions or recommendations on the impact of heavier axle loads cannot be made even on the basis of this literature study. Measurements to be made later will hopefully clarify the impact of heavier axle loads on the origin of vibration.

The following can be stated as conclusions of this literature study on the impact of heavier axle loads on vibration and the methods used in order to reduce vibration:

- There are no research results on the impact of heavier axle loads on the origin of vibration but it is generally agreed that the rise in axle loads increases vibration.
- Apart from the features of rolling stock and embankment also soil circumstances, building materials, methods of construction, the number of layers, type of basements and location of buildings affect the vibration among others.
- Methods of construction, materials and location of buildings seem to have a much greater impact on the effects of vibration than the foundation.
- Piled foundation of buildings and railways eliminates vibration almost completely.
- It is usually best to reduce vibration as near to the origin of vibration as possible and furthermore the local circumstances should be known extremely well.
- In practise it is impossible, both technically and economically, to eliminate vibration completely.

ESIPUHE

Ratahallintokeskus aloitti vuonna 1998 tutkimusprojektin, jonka tarkoituksena on tuottaa tietoa 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoa varten. Tämä rautatieliikenteen tärinää käsittelevä kirjallisuustutkimus on osa tutkimusprojektia.

Tutkimuksen on tehnyt DI Matti Levomäki Teknillisen korkeakoulun tielaboratoriossa Otaniemessä. Työtä on ohjannut ylitarkastaja Pasi Leimi RHK:sta, TkL Matti Hakulinen Geomatti Oy:stä ja TkT Pauli Kolisoja TTKK:sta.

Helsingissä, elokuussa 1999

Ratahallintokeskus

Tekninen yksikkö

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

SUMMARY

ESIPUHE.....	5
SISÄLLYSLUETTELO.....	6
1. JOHDANTO.....	7
2. TAUSTAA TUTKIMUKSELLE.....	8
3. TÄRINÄN SYNTYMINEN JA LEVIÄMINEN.....	10
3.1 JUNA TÄRINÄLÄHTEENÄ.....	10
3.1.1 Akselikuorman dynaamisuus.....	10
3.1.2 Radan muodonmuutokset.....	11
3.1.3 Junakuorman nauhamaisuus.....	12
3.1.4 Junakalusto.....	13
3.1.5 Radan rakenne.....	14
3.2 TÄRINÄN LEVIÄMINEN MAASSA.....	14
3.2.1 Tärinä.....	14
3.2.2 Aaltotyypit.....	15
3.2.3 Maapohjan dynaamiset perusominaisuudet.....	16
3.2.4 Materiaali- ja geometrinen vaimennus.....	17
3.2.5 Maapohjan kerroksellisuuden vaikutus vaimenemiseen.....	18
4. TÄRINÄN VAIMENNUSMENETELMÄT.....	20
4.1 RADAN LÄHIYMPÄRISTÖ.....	20
4.1.1 Tärinän haittavaikutuksia.....	20
4.1.2 Tärinän raja-arvoja.....	21
4.1.3 Ratarakenne.....	21
4.1.4 Maapohjan muodonmuutos- ja vaimennusominaisuudet.....	22
4.1.5 Etäisyys radasta.....	23
4.1.6 Junan nopeus.....	24
4.1.7 Akselipaino ja junavaunun jousitus.....	24
4.2 TÄRINÄN VAIMENTAMINEN.....	25
4.2.1 Yleistä.....	25
4.2.2 Toimenpiteet.....	25
4.3 TÄRINÄN MITTAAMINEN.....	29
5. YHTEENVETO.....	32
6. PÄÄTELMÄT.....	35
7. JATKOTOIMENPITEET.....	35
LÄHDELUETTELO.....	36

LIITTEET

LIITE 1: MUUT TUTKIMUKSET

LIITE 2: TÄRINÄKIRJALLISUUTTA

1. JOHDANTO

Tämä rautatieliikenteen aiheuttamaa tärinää käsittelevä kirjallisuustutkimus on osa Ratahallintokeskuksen (RHK) 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoon tähtäävää tutkimusta, joka aloitettiin kesällä 1998. Tutkimus on tehty Teknillisen korkeakoulun tielaboratoriossa. Asiantuntija-apuna on käytetty Matti Hakulista Geomatti Oy:stä. Arvokkaita kommentteja ovat antaneet myös Seppo Kähkönen ANSERI-Konsultit Oy:stä ja Pauli Kolisoja Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laboratoriosta.

Tämä kirjallisuustutkimus palvelee lähdeteoksena rautatieliikenteen aiheuttaman tärinän jatkotutkimukselle 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen kannalta. Tässä tutkimuksessa esitellään lyhyesti tärinän syntymistä ja leviämistä. Pääasiallinen mielenkiinnon kohde on kuitenkin ollut raskaampien akselipainojen vaikutus tärinän muodostumisessa ja tärinän kulkeutumisen estämiseen käytettävät rakenteet ja muut menetelmät. Lähdeteoksina on käytetty VR:n ja RHK:n aiemmin tilaamia tutkimusraportteja, muita koti- ja ulkomaisia teoksia ja haastatteluja. Erityisesti VTT:n Heikki Komulaisen ja Jouko Törnqvistin laatimat raportit ovat olleet suureksi avuksi.

Tämän tutkimuksen lähdemateriaaleina olleet tutkimukset, mittaustulokset ja muut julkaisut ovat keskittyneet lähinnä normaaleihin käytössä oleviin akselipainoihin. Esimerkiksi Tukholmassa KTH:n (Kungl Tekniska Högskolan) asiantuntijoiden tietämys tärinästä rajoittuu normaaleihin akselipainoihin. Nopeiden junien aiheuttamaa tärinää on tutkittu viime aikoina hyvinkin paljon, mutta koska esimerkiksi suomalaisen Pendolinon akselipainot ovat korkeintaan 140 kN, eivät tulokset ole suoraan sovellettavissa raskaampien akselipainojen vaikutuksiin. Kattavia loppupäätelmiä raskaampien akselipainojen vaikutuksista tai suosituksia tärinän vaimentamiseksi ei siten voida tässäkirjallisuustutkimuksessa esittää. Kesällä 1999 Kouvolan ja Korian välillä tehtävät tärinämittaukset valaisevat todennäköisesti raskaampien akselipainojen merkitystä tärinän syntymisessä.

Tämän tutkimusraportin lopussa, liitteessä 1, on referoitu lyhyesti muutamaa käynnissä olevaa mielenkiintoista tutkimusta, joihin kannattaa tutustua. Liitteeseen 2 on lisäksi listattu useita mielenkiintoisia raportteja ja muuta tärinäkirjallisuutta. Kaikista tässä luettelossa mainituista teoksista on esitetty vähintään perustiedot tekijöistä, kustantajasta ja esimerkiksi sivumäärä. Useimpien teosten yhteydessä on myös mainittu teoksen etsimistä helpottavia tietoja. Tämän raportin ohella kannattaa tutustua myös sähköisessä muodossa olevaan kirjallisuusluetteloon. Kirjallisuusluettelo on osa samaa RHK:n 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoon tähtäävää tutkimusta ja sitä päivitetään koko tutkimuksen ajan.

2. TAUSTAA TUTKIMUKSELLE

Raideliikenne mielletään yleisesti sekä tehokkaaksi että ympäristöystävälliseksi kulkumuodoksi. Esimerkiksi rataverkon sähköistäminen on vähentänyt junaliikenteen paikallisia ympäristöhaittoja. Sekä junien nopeuden nostaminen että osittain myös raskaamman tavarajunakaluston käyttö saattaa kuitenkin lisätä välittömiä melu- ja tärinähaittoja. Taajama-asutuksen sijainti ratojen läheisyydessä on jo johtanut paikallisiin asumisviihtyisyyttä heikentäviin tärinähäiriöihin. Osa tärinähäiriöistä tosin aistitaan meluna. Rakennusten vaurioita junaliikennetärinä ei yleensä aiheuta. Myös tärinän aiheuttamat laitteiden käyttöhäiriöt ovat harvinaisia. /33, 17, 19/

Tärinäilmiöiden nykyistä parempi tunteminen on tarpeen välittömien häiriövaikutusten lieventämiseksi tai erikoistapauksissa rakennevaurioiden välttämiseksi. Tulevaisuudessa joudutaan mahdollisesti energiaa säästämään liikenteessä ja siten kasvattamaan raideliikenteen osuutta. Sen seurauksena radanvarsialueiden tehostuva maankäyttö korostaa liikennemelun ja -tärinän hallinnan vaatimuksia. /19/

Maadynamiikka oppiaineena on alkanut maanjäristystutkimuksista Japanissa ja koneperustustutkimuksista Euroopassa. Mielenkiinto jatkui ydinräjäytysten myötä aaltoliikkeiden tutkimuksena, josta kehittyivät myöhemmin nykyiset maadynamiikan teoriat. Maapohjan liikenneperäisen tärinän tutkimus on aloitettu laajemmin vasta 1970-luvulla. Maadynamiikan periaatteet on nykyisin yleisesti hyväksytty maailmalla. Hyväksikäyttö käytännön rakentamisessa on myös alkamassa. Suomessa on muun muassa kalliolouhinnan yhteydessä ja paperikoneiden perustamisessa hyödynnetty maadynamiikkaa. /9, 19/

Maadynamiikan tiedon tarve kasvaa jatkuvasti. Rakentamisen vaikutuksena ympäristöön leviää entistä enemmän tärinää. Tärinä voi olla epämiellyttävää tai aiheuttaa jopa vaurioita rakenteille. Myös liikenne aiheuttaa dynaamista kuormitusta maaperään. Kuormitukset rasittavat rakennekerroksia ja voivat tärinänsä levittää ympäristöön. Jos suurnopeusjuna ylittää maassa liikkuvan aallon nopeuden, kuormitukset keskittyvät kapealle alueelle ja voivat aiheuttaa sallitut rajat ylittäviä muodonmuutoksia. /9/

Maadynamiikka tutkii kuormituksia, jotka vaihtelevat ajan mukana. Kuormitukset aiheuttavat maassa jännityksiä ja siirtymiä. Kuormitettaessa maata sen käyttäytyminen riippuu siirtymän suuruudesta. Maapohjan "äärettömyydestä" johtuu, että aaltoliikkeet hallitsevat maadynamiikkaa, toisin kuin rakenteiden mekaniikassa, jossa pääpaino on tasapainoyhtälöillä. /9/

Tärinäselvityksissä on hyvin usein rajoitettu esimerkiksi kohteen etäisyyden radasta tai junan nopeuden ja tärinän intensiteetin välisten yhteyksien esittämiseen paikallisissa olosuhteissa. Pohjasuhteiden merkitykseen tärinän syntymisessä on vasta viimeaikoina kiinnitetty aikaisempaa enemmän huomiota. Junaliikennetärinän syntymisen ja leviämisen selittävä, kaikki olennaiset riippuvuudet sisältävä analyysi puuttuu toistaiseksi.

Sekä junaliikennetärinän syntymistä että sen leviämistä maapohjassa simuloivaa ja siten liikennetärinäongelman kokonaisuuden tarkasteluun soveltuvaa valmisohjelmistoa ei liene markkinoilla. Erilaisia ohjelmistoja on kuitenkin käytössä. Ohjelmat perustuvat useimmiten elementtimenetelmän (FEM, Finite Element Method ja BEM, Boundary Element Method) hyväksikäyttöön. /19, 9/

Numeerisista metodeista BEM on osoittautunut tehokkaaksi useilla insinöörialueilla. Etuna tässä on se, että vain rajapinnat täytyy tuntea, joten selvittää huomattavasti pienemmällä tuntemattomien määrällä kuin muissa numeerisissa metodeissa. /1/

Laskentamallia muodostettaessa on otettava huomioon maan käyttäytyminen, mikä riippuu kuormituksen suuruudesta. Analysoinnin tuloksia verrataan annettuihin kriteereihin, jotka yleensä ovat ongelmasta riippuvia värinärajoja. /9/

Tärinän numeerista simulointia tutkitaan muun muassa Tukholmassa, Kungliga Tekniska Högskolanissa (KTH), jossa rautatieliikenteen aiheuttaman värinän simuloinnista on valmistumassa väitöskirja. Tässä työssä on käytetty ABACUS -ohjelmistoa. Myös AHNSE -ohjelmiston käyttöön perustuva liikkuvan lähteen aiheuttaman värinän numeerista simulointia käsittelevän väitöskirjan teko on juuri alkanut. Nämä molemmat väitöskirjat käsittelevät kuitenkin normaalien akselipainojen aluetta, joten ongelmaan akselipainojen noston vaikutuksesta värinään ei ainakaan suoraan saada mitään hyötyä. Jos mallinnuksen perusteella saadaan selville, että akselipaino vaikuttaa värinään, on se erittäin hyödyllinen tieto. Varmasti pidemmällä aikavälillä kaikki muukin mallinnuksesta saatava tieto on hyödyllistä. /4, 15/

Yleisesti junaliikennetärinän tarkastelu voidaan jakaa neljään osaan. /19/

1. värinäherätteen syntyminen
2. värinän leviäminen
3. rakennusten ja rakenneosien vaste
4. värinän vaikutus ihmiseen

Rautatieliikenteen aiheuttaman värinän yleisistä syistä voidaan esittää esimerkiksi ruotsalainen (KTH) lista. Tässä ei ole otettu raskaita akselipainoja mitenkään huomioon. Seuraavat kolme seikkaa ovat huomionarvoisia: /4, 15/

- 1) Pehmeä maaperä (savi)
- 2) Kaluston massa
- 3) Dynaaminen kuorma (lovipyörä, raiteen virheet)

Tässä tutkimuksessa esitetään lyhyesti värinäherätteen syntyminen ja värinän leviäminen. Pääpaino on kuitenkin mahdollisten uusien värinän estämiseen käytettävien keinojen etsiminen ja raskaan akselipainon vaikutus värinän syntymisessä. Tärinän vaikutukset rakenteisiin ja ihmiseen on jätetty vähemmälle huomiolle. Kiinnostuksen kohteena ovat myös maapohjaan kohdistuvan värinäherätteen syntymekanismit ja värinätason arvioinnin edellytykset, menetelmät, luotettavuus ja yleistettävyyys. /19/

3. TÄRINÄN SYNTYMINEN JA LEVIÄMINEN

3.1 Juna tärinälähteenä

3.1.1 Akselikuorman dynaamisuus

Junan aiheuttaman kuormituksen ja siitä maapohjaan siirtyvän tärinän välillä ei ole olemassa yksiselitteistä siirtofunktiota. Tämä johtuu toisaalta siitä, ettei junan aiheuttama kuormitus ole pistemäistä ja toisaalta siitä, ettei kuormituksen välittyminen maapohjaan täytä systeeminä lineaarisuusvaatimusta. Kuorman tarkka määrittäminen on erittäin hankalaa. Jos siirtofunktio voitaisiin yksiselitteisesti määrittää, voitaisiin jonkin mielivaltaisen herätteen (kuorman) vaikutukset vasteeseen (siirtymään) määrittää yksiselitteisesti. /20/

Junan akselikuormat muodostavat pitkän, nauhamaisen tärinälähteen. Akselin kokonaiskuorma muodostuu staattisesta kuormasta ja dynaamisesta lisäkuormasta. Hetkellinen pyöräkuorma vaihtelee staattisen kuorman molemmin puolin. Henkilöjunien staattiset akselipainot vaihtelevat Suomessa välillä 110 – 140 kN. Tavarajunien akselipainot vaihtelevat huomattavasti kuormausasteen mukaan ja ovat pienimmillään noin 65 kN. Suurin sallittu akselipaino pääradoilla on 225 kN. Eräillä rataosilla on sallittu venäläiselle kalustolle 245 kN. Tulevaisuudessa korkeampia akselipainoja käytettäneen ainakin Tornio – Raahe -rataosalla ja mahdollisesti myös muilla lähinnä malmijunien käyttämillä rataosilla. /19, 21/

Pyöräkuorman dynaamisen osan suuruuteen vaikuttavat:

- ajonopeus
- raiteen ominaisuudet,
- kiskon ominaisuudet
- pyörän ominaisuudet (erityisesti lovipyörä),
- jousittamaton massa,
- jousitus,
- vaunun värähtelyominaisuudet ja
- jarrutus.

Tärinä aiheutuu pyörän ja raiteen välisistä voimista. Junan pyörän ylittäessä epäjatkuvuuskohdan, joita ovat muun muassa vaihteet, kiskonjatkokset ja kiskon tai pyörän vialliset kohdat, syntyy pyöräkuormaan paikallinen sysäys. Sysäyksen suuruus määräytyy ensisijaisesti pyörään kohdistuvan pystykiihtyvyyden ja akselin jousittamattoman massan mukaan. Raiteen epätasaisuuksien ja vikojen aiheuttamat voimasysäykset voivat nostaa pyöräkuorman hetkellisesti noin kolminkertaiseksi staattiseen arvoon nähden. Pyörän vioista aiheutuvat voimasysäykset taas voivat olla jopa yhtä suuria staattisen pyöräkuorman kanssa. /19, 6/

Yleensä pyöräkuorman dynaaminen osa on huomattava. Sen vaihteluväli staattisen arvon ympärillä on hyväkuntoisellakin radalla ja kalustolla melko suuri. Suomen oloissa erityisesti radan roudantuminen vaikuttaa dynaamisen osa suuruuteen. Talvella radan jäykkyys on suurempi kuin sulana aikana. Tämä lisää dynaamista pyöräkuormaa.

Tiettyä kestoaikaa pidemmät voimasysäykset saavat aikaan ratapenkereen ja maapohjan lähivyöhykkeen kiihtyvyyksiin keskimääräistä selvästi suurempia paikallisia huippuarvoja. Esimerkiksi lovipyörä (pyörässä oleva tasainen tai muutoin virheellinen kohta) voi nostaa penkereeseen kohdistuvan kiihtyvyyden huippuarvon moninkertaiseksi hyväkuntoiseen pyörään verrattuna. Kiihtyvyyden huippuarvon amplitudi, taajuus sekä maapohjan ominaisuudet säätelevät värinähuipun vaikutusetäisyyttä. /19/

Iskumaisen herätteen aiheuttamat värinätaajuudet ovat huomattavasti korkeampia kuin radasta maapohjaan välittyvän värinän pääasialliset taajuudet. Iskumainen maapohjaan kohdistuva herätetärinä vaimenee yleensä nopeasti.

Raiteen aaltoileva muoto aiheutuu raiteen taivutusjäykkyyden vaihtelusta ja kiskon kulkupinnan kulumisesta. Tämä aiheuttaa pyöräkuormien vaihtelua. Lisäksi jarrutettaessa syntyvät pystysuorat lisäkuormat ovat tyypillisesti 5 - 20 % staattisesta pyöräkuormasta. Henkilöjunien jarrujärjestelmä jakaa normaalissa jarrutuksessa jarruvoimat akseleille niin tasaisesti, että akseliston vaaka- ja kiertovärähtely ei merkittävästi kasva normaalista tasostaan. Kiskoon kohdistuu tällöin lähes pelkästään pituussuuntaisia vaakavoimia. Tavarajunissa jarrutus aiheuttaa suurempaa vaaka- ja pystysuuntaista pyöräkuormien vaihtelua kuin henkilöjunissa. Syynä tähän ovat sekä jarrujärjestelmän ja jousituksen karkeampi toiminta että suuremmat staattiset akselikuormat. /19/

Saksalaisessa tutkimuksessa dynaamisesta mallista suurnopeusjunaratoja varten esitetään asia näin: Dynaaminen käyttäytyminen voidaan jakaa kolmeen osaan; matala-, keski- ja korkeataajuuksiseen alueeseen. Matalataajuinen eli alle 40 Hz:n värinä syntyy pyörien kulkiessa radalla. Pyörän ylittäessä tietyn radan kohdan muuttuu staattinen liike dynaamiseksi värinäksi. Keskitaaajuuksinen värinä aiheutuu pyörien epätäydellisyyksistä, eli lähinnä lovipyöristä. Keskitaaajuusalue on 40 – 400 Hz. Yli 400 Hz:n värinä aiheutuu raiteen virheistä. /24/ Suomessa ei taajuusalueita jaeta näin. Suomessa korostuvat pehmeiköillä matalat taajuudet. Korkeilla ja nopeasti vaimenevilla taajuuksilla ei ole juurikaan merkitystä. Ympäristön kannalta on syytä keskittyä alle 100 Hz:n taajuuksiin.

Akselikuorman dynaamisuudesta ei kuitenkaan raskaiden akselien tapauksessa tiedetä tarpeeksi. Esimerkiksi tavarajunien jarrujen ja jousituksen toimintaa on syytä tutkia lisää, jos akselipainoja aiotaan korottaa yli 225 kN:iin.

Matalataajuista värinää aiheuttaa erityisesti akselien ohitus kiinteään pisteeseen suhteen, eli niin sanottu staattinen kuormitus. Dynaamisuus tulee siitä, että akselit seuraavat toisiaan ja jännitys- ja muodonmuutoskentät liikkuvat junan mukana.

3.1.2 Radan muodonmuutokset

Akselikuorma aiheuttaa paikallaan ollessaan sekä rataa että alapuoliseen maapohjaan painumasuppilon. Radan painuman suuruus ja painumasuppilon muoto määräytyy

- akselikuorman suuruuden,
- raiteen ja rakennekerrosten pystysuoran jäykkyyden,
- ratapenkereen korkeuden ja kimmo-ominaisuuksien sekä
- maapohjan lisäjännityksen suuruuden ja suljetun tilan kimmomoduulin perusteella.

Akselikuormien suuruuden ja sijainnin perusteella voidaan seisovan junan aiheuttama radan painumaviivan muoto arvioida. Homogeenisessa maapohjassa jännityskenttä ja

painumasuppilo liikkuvat junan mukana pienillä nopeuksilla muotoaan juuri muuttamatta. Suuremmallakin vakionopeudella ja ideaalisella radalla kulkevan junan jännitys- ja muodonmuutoskenttä pysyy junan kiinteän tarkastelupisteen suhteen muuttumattomana. /19/

Radan kiinteän pisteen suhteen tarkasteltuna jännityskentän liikkuminen merkitsee jatkuvasti muuttuvia jännityksiä ja muodonmuutoksia. Näin tapahtuu siinäkin ideaalisessa tapauksessa, että pyöräkuorma on vakio. Akselikuorman aiheuttaman painuman syntymisnopeus on verrannollinen junan nopeuteen, kun ratarakenteen ja maapohjan sisäinen vaimennus on vähäistä. Sekä radan että maapohjan tärinän kiihtyvyydet kasvavat junan nopeuden mukana. Esimerkiksi tärinämittaukset vuodelta 1997 vahvistavat tämän. Alueella 120 – 160 km/h havaittiin lievä nopeusriippuvuus. /9/

3.1.3 Junakuorman nauhamaisuus

Junien akselikuormat liikkuvat radalla nauhamaisesti toisiaan seuraten. Tietyn pisteen ylittävät akselit aiheuttavat rataa voiman. Tästä aiheutuvia radan kiinteän pisteen jännityksiä ja tärinävästean taajuuksia säätelevät akselien ja telien väliset etäisyydet ja junan nopeus. Henkilöjunat koostuvat yleensä aina akselistomitoiltaan lähes samanlaisista vaunuista, jolloin taajuudet ovat samat koko junan pituudella. Tärinävästean taajuudet muuttuvat siten vain junan nopeuden mukana. Tavarajunissa on usein akselimäärältään ja akselistomitoiltaan erilaisia vaunuja, jolloin myös taajuuksia on enemmän. /19, 6/

Ohittaessaan radan tietyn kiinteän pisteen, aiheuttavat akselit (telit) ohitustaajuudeksi kutsutun ilmiön. Tämä tärinäheräte etenee savessa erittäin hyvin dynaamisena aaltona. Sekä henkilöjunien että hitaahkojen tavarajunien akselien aiheuttamat ohitustaajuudet ovat matalia: nopeusalueella 100 - 140 km/h henkilöjunien ohitustaajuudet ovat välillä 1,5 - 5,3 Hz ja tavarajunien 60 - 80 km/h:n nopeuksilla välillä 1,1 - 5,2 Hz. Juuri nämä taajuusalueet sisältävät usein pehmeän maakerroksen alimman ominaistaajuuden. Kaikkein hankalin tilanne on silloin, kun maaperän ominaistaajuus vielä sattuu samalle alueelle rakennuksen ominaistaajuuden kanssa. Myös ruotsalainen kokemus kehottaa välttämään olosuhteista riippuen noin 5 Hz:n taajuusaluetta. Tämän taajuusalueen ongelmana on muun muassa mahdollinen seisovan aaltoliikkeen syntyminen. Seisovan aaltoliikkeen taajuusalue riippuu tosin aina maaperän ominaisuuksista, kerrospaksuudesta ja muista seikoista, joten kovin tarkkaa taajuusaluetta ei voi sanoa. /9, 15, 6/

Lyhyen junan kaikki akselit vaikuttavat samanaikaisesti ratapenkereen ja lähialueen tärinävästeeseen. Junan ollessa pitkä tarkastelupisteen tärinävästeeseen vaikuttaa samanaikaisesti vain tietty junan osa, jonka pituus riippuu tärinävästean tarkastelupisteen sijainnista.

Rataan ja maapohjaan kohdistuvan tärinäherätteen kesto aika määräytyy junan pituuden ja nopeuden mukaan. Henkilöjunan ohituksen tyypillinen kesto aika on noin 4 - 8 s. Tavarajunilla ohitukseen kuluva aika vaihtelee yleensä välillä 10 - 45 s. Henkilöjunien vaunujen staattiset pyöräkuormat poikkeavat yleensä vain vähän toisistaan. Esimerkiksi Pendolinon akselipainot ovat 110 – 140 kN. Veturivetoisten henkilöjunien veturien (Sr1 ja Sr2) akselipainot ovat kuitenkin välillä 195 – 215 kN. Tavarajunissa akselikuormat voivat vaihdella hyvinkin paljon. /19, 21/

Tavarajunista aiheutuva pitkittynyt kuormitus aiheuttaa kuitenkin resonanssia, jos junassa on paljon samanlaisia vaunuja (mm. sama akseliväli) ja ne on kuormattu

tasaisesti. Näin syntyvä tärinä pyrkii Hanneliuksen raportin mukaan herättämään maapohjassa pääkomponenttiltaan likimain sinikäyrän muotoista värähtelyä. /16, 15/

Pitkän junan aiheuttamien tärinääaltojen samanaikainen tulokulma lähialueella olevaan kohteeseen voi olla jopa lähes 180 astetta. Kohteeseen saapuvat aallot voivat taajuutensa ja vaiheensa mukaan joko vahvistaa tai heikentää toisiaan.

3.1.4 Junakalusto

Junanvaunun rungon, jousituksen ja radan muodostamalla monimutkaisella värähtelevällä kokonaisuudella on monia ominaistajuuksia. Esimerkiksi silloin, kun pyöräkuorman aiheuttama heräte osuu lähelle jonkin systeemin osan ominaistajuuutta, värähtely voimistuu. Tällöin rungon värähtelyn voimakkuutta säätelee rungon sisäisen vaimennuksen määrä, jousituksen vaimennuskyky, herätteen kesto aika ja pysyvyys. Jos esimerkiksi ratapölkkyjen keskinäisestä etäisyydestä määräytyvä taajuus tietyllä junan nopeudella vastaa akseliston pystysuuntaista ominaistajuuutta, voi seurauksena olla rajua värähtelyä alhaisellakin nopeudella. /19/

Rautatieliikenteen aiheuttaman matalataajuaisen tärinän merkittäväksi aiheuttajaksi on ORE:n (Office for Research and Experiments of the International Union of Railways) tutkimuksissa osoittautunut pyörän pinnan kunto. Lovipyörä tai muu yksittäinen pinnan epäjatkuvuuskohta taas ei välttämättä aiheuta juuri mitään tärinää, vaikka se on hyvin kuultavissa. /32/ Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että lovipyörän aiheuttama taajuus on niin korkea, että se vaimenee nopeasti.

Kiskon taipumaerot pölkyn kohdalla ja pölkkyjen välissä aiheuttavat pyöräkuormaan likimain harmonisen vaihtelun, jonka taajuus on junan nopeuden suhde pölkkyväliin. Useimmiten pölkkyt eivät kuitenkaan aiheuta suurta ongelmaa vaunun värähtelylle, sillä pölkkyistä aiheutuvan tärinän taajuus on yleensä noin 50 Hz (esim. 0,5 m:n pölkkyväli ja 25 m/s nopeus). Vaunujen tyypilliset ominaistajuuudet ovat 15...20 Hz. Ratarakenne taas on niin hidaskäyttöinen, että pölkkyistä aiheutuva tärinä ei yleensä saa maaperää herätettyä. /9/

Vaunun tärinäherätteenä ovat raiteen satunnaisesti vaihtelevien pysty- ja vaakasuorien poikkeamien aiheuttamat voimat sekä pyörivien massojen epätasapainosta syntyvät voimat.

Maapohjan tärinää sääteleviksi kalustomuuttujiksi arvioidaan ensisijaisesti

- staattinen akselikuorma,
- akseliston mitat,
- jousittamaton massa ja
- jousituksen alimmat resonanssitaajuudet

Lisäksi edellisiä vähemmässä määrin maapohjan tärinään vaikuttavat

- vaunun ns. pomppimistaajuus ja
- vaunun rungon alimmat värähtelyn ominaistajuuudet.

Vaunun värähtelyä voidaan analysoida erilaisia laskentamalleja käyttäen. Vaunu voidaan kuvata esimerkiksi palkkina, jonka tuentaa kuvaava malli sisältää jousituksen elementit. Raide kuvataan suoraksi, pitkäksi palkiksi, joka on tuettu lineaaristen jousien ja viskoosien vaimentimien avulla. /19/

3.1.5 Radan rakenne

Raiteeseen aiheutuneiden muoto- ja rakenteellisten vaurioiden syyt voivat olla:

- kiskon tuennan heikkeneminen
(pölkkyjen väsyminen, kiinnikkeiden heikkeneminen, tukikerroksen löyhtyminen)
- penkereen routiminen
- maapohjan painuminen

Tärkeä pyöräkuorman ja raiteen värähtelyyn matalilla taajuuksilla vaikuttava ratarakenteen muuttuja on sen pystysuuntainen jäykkyys. Pystyjäykkyyteen vaikuttavat kiskon taivutusjäykkyys, kiskon kiinnityksen tiukkuus, pölkkyväli, pölkyn koko ja kunto, tukikerroksen rakeisuus, paksuus ja tiiveys, muiden rakennekerrosten tiiveys, penkereen korkeus ja muoto, penkereen ja maapohjan muodonmuutosominaisuudet sekä radan perustamistapa.

Matalilla taajuuksilla raiteen dynaaminen jäykkyys on suurempi kuin vaunun jousituksen jäykkyys. Tällöin raiteen epäsäännöllisyyksien synnyttämä liike ilmenee pääosin jousittamattoman massan liikkeenä ja raiteen taipumat jäävät melko pieniksi. Pyörävoiman suuruuteen voidaan vaikuttaa jousitusta muuttamalla. Taajuuksien noustessa jousittamattoman massan inertia-voimat ja siten jousituksen impedanssi kasvavat. Raiteen joustavuutta lisäämällä voidaan korkeampitaajuisia pyörävoimia pienentää tietyn taajuuden yläpuolella. Mitä matalampitaajuisesta tärinästä on kysymys sitä syvemälle ulottuu ratarakenteen tehokkaasti värähtelevä osa. /19/

Tottolan havaintojen perusteella voidaan todeta, että tärinän leviämällä maanvaraisperustuksesta ei ole merkittävää eroa sillä, onko rata perustettu puu- vai betonipölkkyille, ovatko kiskot jatkuvat tai epäjatkuvat tai onko ratapenger kevennetty tai ei. Tulos pätee luonnollisesti vain samantapaisilla pehmeiköillä kuin tuossa tutkimuksessa. Esimerkiksi kalliopohjilla, joissa korkeat taajuudet voivat olla huomattavan merkityksellisiä, havainto ei varmaankaan päde. /20/

Ruotsalainen käytäntö on mitoitaa geotekniset rakenteet niin, että dynaaminen kuorma otetaan kokonaisuudessa huomioon kertomalla staattinen kuorma 1,2:lla. Normaalikäytännössä tätä kerrointa voidaan käyttää vain alle 90 km/h nopeuksilla. Suuremmille nopeuksille ei ole olemassa yleisesti hyväksyttyä korjauskerrointa. Tämän kertoimen historia on epäselvä, mutta myös muualla kuin Ruotsissa käytetään vastaavaa menetelmää dynaamisen kuorman huomioon ottamiseksi. /5/

3.2 Tärinän leviäminen maassa

3.2.1 Tärinä

Liikenteen energiankulutus, päästöt ja ympäristövaikutukset –julkaisussa esitetään tärinä seuraavasti: Tärinä on väliaineen liikettä, mikä aiheutuu jännitystilän purkautumisesta maaperässä tai kalliiossa. Harmonista värähtelyä voidaan kuvata matemaattisesti seuraavalla tavalla: /18/

$$A = A_0 \sin(2\pi ft - \phi)$$

$$v = A_0 2\pi f \cos(2\pi ft - \phi)$$

$$a = -A_0 4\pi^2 f^2 \sin(2\pi ft - \phi)$$

A	=	poikkeama
A ₀	=	poikkeaman maksimisuuruus
f	=	heilahdustaajuus
t	=	aika
φ	=	vaihesiirto
v	=	heilahdusnopeus
a	=	kiihtyvyys

Heilahdusnopeus v on poikkeaman A aikaderivaatta. Kiihtyvyys a on nopeuden aikaderivaatta. Maa- ja kallioperän värähtelyliike on harmonista vain poikkeustapauksissa, mutta tietyillä yksinkertaistuksilla harmonisen värähtelyn periaatteet pitävät kuitenkin paikkansa. Yleensä värähtelyliikettä kuvataan liikenopeudella (mm/s).

Tärinätasolla tarkoitetaan taajuuspainotettua tärinän kiihtyvyys- ja nopeustasoa, joka voi olla ekvivalenttitaso tai jokin aikapainotettu taso. Ympäristötärinämittauksissa suositellaan käytettäväksi yleensä painotusta S (slow), jolla tarkoitetaan 2 sekunnin keskiarvoa. Tärinätason yksiköksi esitetään desibeliä. Maaperän tärinän yhteydessä sitä ei kyllä yleensä käytetä. /18, 9/

3.2.2 Aaltotyypit

Värähtely ilmenee maaperässä periaatteessa kahdentyyppisenä aaltoliikkeenä. Nämä aaltoliikkeet ovat puristusaalto (primary, dilatational wave, P-aalto) ja leikkausaalto (secondary, distortional wave, S-aalto). Puristusaalto aiheuttaa muodonmuutoksia aaltorintaman etenemissuunnassa ja leikkausaalto kulkusuuntaa vastaan kohtisuorissa pysty- (SV) ja vaakasuunnissa (SH). Puristus- ja leikkausaaltoja sanotaan runkoalloiksi. Puristus- ja leikkausaallot leviävät pistemäisestä lähteestä palloaaltoina. /6, 19/

Puoliavaruuden rajapinnan läheisyydessä eli tässä tapauksessa lähellä maanpintaa värähtelyenergia jakautuu runkoaaltojen ja pintaaaltojen kesken. Rayleigh- eli R-aalto on tärkein pinta-aaltotyyppi. R-aalto leviää maan pintakerroksessa sylinteriaaltona pistemäisestä maanpinnalta olevasta lähteestä. Viivamaisesta tärinälähteestä R-aalto leviää suorana rintamana. /19, 6/

Maanpinnalla olevan pistemäisen pystysuoran tärinälähteen homogeeniseen, hyvin paksuun maakerrokseen syöttämästä aaltoenergiasta leviää R-aaltona noin 67 %, S-aaltona noin 25 % ja P-aaltona noin 7 %. Maan pintakerroksen tärinää hallitseva aaltotyyppi on R-aalto. Tositilanteessa kuormitustapa vaikuttaa aaltoenergian jakautumiseen. /19/

Mittaustulosten perusteella kauempana radasta tärinä saapuu merkittävänä selvästi ennen penkereen yläosan heräämistä. Tämä on merkki alueellisesti junaa nopeammin liikkuvan pinta-aallon (R-aalto) saapumisesta. Kulkiessaan läpi pehmeikön tämän ennen junaa saapuvan aallon taajuussisältö pelkistyy vastaamaan maan ominaistajuutta. Maapohja toimii ikään kuin välipäästösuotimena, joka vahvistaa maapohjan geometristen ominaisuuksien ja maalajiominaisuuksien säätlemänä värähtelyä tietyllä taajuusalueella. /20/

3.2.3 Maapohjan dynaamiset perusominaisuudet

Tärkeimmät värinän leviämiseen vaikuttavat maapohjan ominaisuudet ovat maakerrosrakenne, kimmo- ja leikkausmoduuli, kyllästysaste ja materiaalivaimennus kussakin kerroksessa. Ruotsissa on tutkittu myös huokosvedenpaineen ja deformaation ilmenemistä. Banverketin raportin mukaan ensimmäinen plastinen deformaatio palautuu melko nopeasti. Elastista deformaatiota taas tapahtuu jokaisen junan kohdalla. Tutkimustulokset kertovat myös vastoin teoriaolettamusta, että dynaaminen huokosvedenpaine ei välttämättä ole ainakaan suoraan riippuvainen yliajavista junista. Mittauksia tosin tarvittaisiin lisää varmistamaan tämä havainto. Maapohjan kerroksellisuus ja kerrosten eriasteinen epähomogeenisuus monimutkaistavat suuresti värinän leviämislmiöitä. /19, 5/

Dynaamiset maaparametrit ja vaimennuksen suuruus ovat voimakkaasti riippuvaisia muodonmuutostasosta. Esimerkiksi saven dynaamiset ominaisuudet ovat aivan toisentyypiset kuin sen staattiset ominaisuudet. Dynaamiset ominaisuudet määritellään melko pitkälle dynaamisen jännityksen kestosta. Jos kesto on riittävän pitkä, saattaa seurauksena olla maaperän luhistuminen kuten maanjärityksessä. /19, 5/ Tämä tosin riippuu muodonmuutostasosta. Elastisella alueella ei ole odotettavissa luhistumista.

Junaliikennetärinän leikkausmuodonmuutokset ratarakenteen ulkopuolella ovat melko pieniä, jolloin maan jaksollisen kuormituksen leikkausjännitys - muodonmuutoskäyrä on lähes suora viiva. Jännitys - muodonmuutos -käyttäytyminen on siten lineaarikimmoista.

Normaalikonsolidoituneen maan leikkausmoduuli ja siten leikkausaallon nopeus ovat pääosin huokosluvun ja vallitsevan tehokkaan jännityksen funktioita. Puristus (P) - ja leikkausaallon (S) etenemisnopeudet ovat maan kimmo- ja leikkausmoduulien sekä tiheyden funktioita. Maastossa leikkausaallon nopeus mitataan pohjasuhteiden mukaan joko pintaseismisesti tai cross-hole-mittausmenetelmällä. /19, 5/

Puristusaalto on selvästi nopein aaltotyyppi, nopeusalue noin 200 - 800 m/s. Vedellä kyllästyneissä kerroksissa P-aallon nopeus on jopa 1500 m/s. Rayleigh- ja leikkausaallon nopeudet vaihtelevat yleensä välillä 60 - 400 m/s, mutta voivat olla tätäkin hitaampia. R-aallon nopeus on 92 - 95 % S-aallon nopeudesta. Veden kyllästämissä maakerroksissa R- ja S-aallon välinen nopeusero on niin pieni, että samaa reittiä kulkeneina ne ovat käytännössä samanaikaisia. P-aallon nopeus kasvaa voimakkaasti Poissonin luvun mukana toisin kuin S- ja R-aaltojen nopeudet.

R-aaltojen syvyysulottuvuus on suoraan verrannollinen aallonpituuteen, eli matalataajuisin värinä ulottuu syvimmälle. R-aallon energiasisällöstä noin 98 % on yhden aallonpituuden syvyisessä vyöhykkeessä. Esimerkiksi vedellä täysin kyllästyneessä pehmeässä koheesiomaassa (Poissonin luku on suuri) R-aallot ulottuvat kaikkein syvimmälle. /19/

Otetaan esimerkiksi taajuusalueella $f = 3 \dots 10$ Hz kulkeva R-aalto, jonka nopeus on $v = 100$ m/s ja aallonpituus $\lambda = 30$ m. R-aallon etenemissyvyydeksi voidaan katsoa puolet aallonpituudesta, joten tässä tapauksessa etenemissyvyydeksi saadaan $\frac{1}{2}\lambda = 15$ m. Näin syvällä kulkevaa aaltoa on hyvin hankala eristää. /9/

3.2.4 Materiaali- ja geometrinen vaimennus

Tärinälähteen etäisyyden kasvaessa tärinä vaimenee kahdella tavalla. Materiaalivaimenemista kutsutaan myös sisäiseksi vaimenemiseksi ja geometrinen vaimenemista säteilyvaimenemiseksi. Materiaali- ja geometrinen vaimennuksen keskinäinen merkitys vaihtelee perustuksen, pohjasuhteiden ja tärinäherätteen ominaisuuksien mukaan. Näitä vaimenemistapoja on käytännössä vaikea erottaa toisistaan.

Materiaalivaimennus aiheutuu aaltoliikkeen mobilisoimasta materiaalin sisäisestä kitkasta. Sisäisen kitkan vaikutuksesta värähtelyenergiaa absorboituu maakerrokseen. Tätä ei kuitenkaan tapahdu ideaalikimmoisessa materiaalissa.

Junaliikennetärinälle vaimennussuhde on melko pieni. Itse ratarakenteessa ja sen alapuolisessa maapohjan vyöhykkeessä, jossa myös muodonmuutokset ovat suuria, on vaimeneminen merkittävää.

Kriittisesti vaimennettu rakenne palaa tasapainoasemaansa yhden värähdysyöskin aikana herätekuorman lakattua vaikuttamasta rakenteeseen. /19/

Materiaalivaimennuksen suuruus riippuu

- värähtelyn muodonmuutosamplitudista,
- värähtelytaajuudesta,
- maakerroksen tehokkaasta jännityksestä,
- kerroksen huokoisuudesta ja kyllästysasteesta ja
- kuormitusjaksojen lukumäärästä.

Tärinän sisäinen vaimeneminen on vähäistä

- muodonmuutostason ollessa pieni (leikkausmuodonmuutos γ alle noin 10^{-5}),
- pehmeissä, vedellä kyllästetyissä savi- ja orgaanisissa maissa sekä löyhissä siltti- ja hienohiekkakerroksissa ja
- taajuuksien ollessa matalia.

Maanpinnalla olevalle tärinälähteelle voidaan materiaalivaimennusta kuvata yksinkertaistetulla yhtälöllä

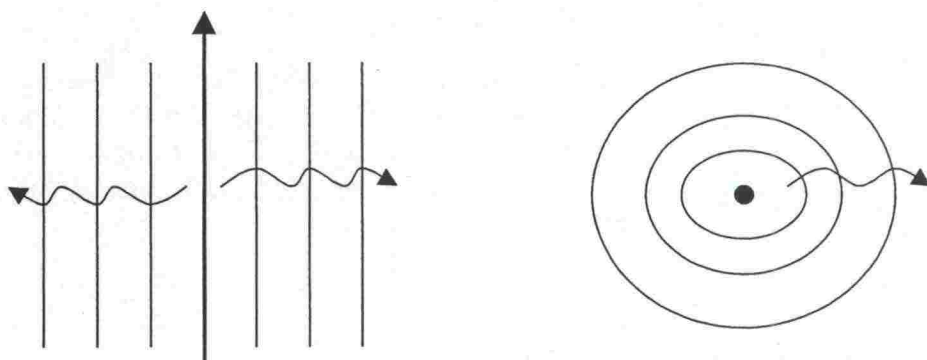
$$A_2 = A_1 e^{-\alpha(R_2 - R_1)}$$

missä

A_1 ja A_2 ovat tärinäamplitudeja etäisyyksillä R_1 ja R_2 tärinälähteestä

α = absorptiokerroin. /19, 6/

Absorptiokertoimet erilaisilla maaperillä saavat tyypillisesti taajuusalueella 5 - 50 Hz arvoja 0,001...0,1 1/m. Absorptiokertoimien arvot vaihtelevat huomattavasti samassakin maalajissa. Tarkka määrittäminen on mahdollista vain kohdekohtaisesti mittaamalla.



Kuva 1 Viiva- ja pistemäinen tärinälähde

Geometrinen eli säteilyvaimennus aiheutuu värähtelyn energiatiheyden pienenemisestä aaltorintaman levitessä suuremmalle pinta-alalle. Teoriassa viivamaisen (nauhamaisen) tärinälähteen geometrinen vaimennusta ei tapahdu lainkaan (kts. esim. kuva 1 tai seuraavassa esitetyn kaavan n -arvot). Geometrinen vaimennusta voidaan yksinkertaisimmin approksimoida eksponenttifunktiolla: /19/

$$A_2 = A_1 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^n$$

jossa

A_1 ja A_2 ovat tärinäamplitudeja etäisyyksillä R_1 ja R_2 tärinälähteestä n :n arvoon vaikuttavat aaltotyyppi ja tärinälähteen muoto.

Pistemäinen tärinälähde:

- $n = 2$ runkoaallot maassa
- $n = 1$ runkoaallot maanpinnassa
- $n = 0,5$ R-aallot

Viivamainen tärinälähde:

- $n = 1$ runkoaallot maassa
- $n = 0$ R-aallot

Käytännössä tilanne on kuitenkin hieman toinen, sillä n :n arvot ovat mittausten mukaan yleensä nollaa suurempia. Viivamaisen tärinälähteen R-aaltojen n -arvoksi voidaan olettaa noin 0,5.

3.2.5 Maapohjan kerroksellisuuden vaikutus vaimenemiseen

Säteilyvaimennus on kaikkein suurimmillaan, kun maapohja koostuu paksuista ja homogeenisista maakerroksista. Jos maakerros kiinteän kallion päällä on riittävän ohut, vaimenevat runkoaallot vain materiaalivaimennuksen kautta. Osa niiden energiasta muuttuu pinta-aaltoenergiaksi, ja vain se vaimenee geometrisesti. Maakerroksen ominaistajuutta pienemmillä taajuuksilla ei esiinny pinta-aaltoja eikä myöskään säteilyvaimenemista.

Etäisyysvaimenemiseen vaikuttaa usein merkittävästi maapohjan rajapinnoilla tapahtuva aaltoliikkeen heijastuminen ja taittuminen. Rajapinnoilla osa aaltoenergiasta heijastuu toisentyypisiksi aalloiksi osan taittuessa ja jatkaessa etenemistä seuraavassa kerroksessa. Etäisyyden kasvaessa tai kerrospaksuuden pienentyessä aaltoliikkeen sironnan vaikutus vaimenemiseen kasvaa. /19, 9/

Rajapintoja ovat maakerrosrajat, joilla kimmo-ominaisuudet muuttuvat huomattavasti sekä rajat, joilla maan kyllästysaste muuttuu selvästi. Karkearakeisessa maassa pohjavedenpinta on maan kyllästysasteen muuttumiskohta. Yksinkertainen esimerkki on pehmeän pintakerroksen alapuolisen kovan kerroksen (esimerkiksi tiivis sorakerros tai kiinteä kallion pinta) toimiminen aaltoliikkeen tehokkaana heijastimena. Tällöin esimerkiksi heijastuneiden runkooaltojen energia voi lisätä kerrospaksuuden mukaan maanpinnan tärinää tietyillä etäisyyksillä tärinälähteestä. /19, 9/

Homogeenisen maakerroksen ominaistajuus f_0 voidaan yksinkertaisimmillaan laskea seuraavalla kaavalla.

$$f_0 = \frac{v_s}{4d}$$

missä

v_s = leikkausaallon nopeus
 d = maakerroksen paksuus

Tiiviin kitkamaakerroksen ominaistajuus on huomattavasti suurempi verrattuna samanpaksuisen pehmeän savikerroksen ominaistajuuteen.

Aaltoliikkeen käyttäytymistä maakerrosrajalla säätelevät tulokulma ja kerrosten impedanssit. Maakerroksen impedanssi on pinta-alan, aallon nopeuden ja tiheyden tulo.

Junakuorman nauhamaisuus korostaa aaltoenergian erilaisten heijastumisten vaikutusta. Erityisesti Suomessa heijastumia syntyy paljon, sillä irtomaapeite on yleensä melko ohut ja kallionpinnan topografia vaihtelee pienipiirteisesti. Seurauksena on tärinälähteen suuren pituuden ja maapohjan kerroksellisuuden aiheuttama niin sanottu monitie-ongelma, joka tekee tärinän leviämisen kauempana radasta monimutkaiseksi ymmärtää.

Aaltoliikkeen heijastumisella pehmeän tai löyhän kerroksen alapuolisen kerroksen pinnasta on suuri merkitys etenkin herätteen vaikutukseen maakerroksen ominaistajuuden ollessa herätteen taajuuskaistalla. Tällöin ominaistajuuden lähellä olevat tärinätaajuudet eivät juurikaan vaimene. /19/

4. TÄRINÄN VAIMENNUSMENETELMÄT

4.1 Radan lähiympäristö

4.1.1 Tärinän haittavaikutuksia

Junaliikennetärinää pidetään jatkuvana tärinä, koska tärinän kesto pääsääntöisesti riittää aikaansaamaan rakennukseen resonanssivärähtelyä, jos rakennuksen tai rakennusosan ominaistajuudet ovat rakennukseen kohdistuvan tärinän taajuusalueella. Tärinän haitallisuutta, eli rakennuksen tai rakenneosan vaurioitumistodennäköisyyttä, joudutaan käytännössä aina jossain määrin arvioimaan. Huomioon otettavia seikkoja ovat silloin esimerkiksi Rautatieliikennetärinän mittausohjeen mukaan /34/

- koko rakennuksen ja rakenneosien resonointitaajuudet
- rakennuksen ja rakenneosien vaimennusominaisuudet,
- rakennuksen tyyppi,
- rakennuksen tila- ja materiaaliominaisuudet,
- aaltoliikkeen taittuminen ja
- amplitudivasteen ominaisuudet.

Kun arvioidaan tärinän haitallisuutta rakennusten kannalta, luokitellaan rakennukset standardin ISO 4866 mukaan seuraavasti. /34/

- rakennuksen tyyppi
- perustaminen
- maapohja

Myös ruotsalaisen tutkimuksen mukaan tärinään vaikuttavat rakennusten materiaalit, rakennustavat, kerrosten lukumäärä, perustusten tyyppi ja rakennusten sijainti. /22/ Rakennusten sijainti vaikuttaa tärinään samoin kuin ääniinkin. Sekä ääni että tärinä ovat aaltoliikettä, jonka heijastuksiin rakennusten kulmamuuutokset vaikuttavat.

Rakennukset on yleensä suunniteltu vastaanottamaan painovoiman suuntaisia voimia. Rakennusten kantavat osat ovatkin yleensä herkimpiä vaurioitumaan nimenomaan vaakasuuntaisista värähtelyistä. Yleisesti esitetyt raja-arvot on kuitenkin esitetty pystysuuntaiselle heilahdusnopeudelle.

Tärinä aiheuttaa vaurioita silloin, kun rakenneosan kokemat jännitykset ylittävät rakenneosan sietokyvyn. Tavanomaiset vauriokriteerit perustuvat lähinnä heilahdusnopeuden maksimin tarkasteluun. Maapohjassa, jossa aaltoliikkeen etenemisnopeus on suuri, heilahdusnopeutena esitetty vaurioitumisraja-arvo on myös suurin. Kun aallonpituus on lähellä rakennuksen sivumittaa, vaurioituminen on todennäköisintä. Erittäin matalilla taajuuksilla tai suurilla aaltoliikkeen etenemisnopeuksilla rakenteen vaurioituminen taipumalla ei ole kovin todennäköistä. /20/

Esimerkiksi Hausjärvellä ja Kärkölässä junaliikenteen aiheuttama tärinä häiritsee asukkaita. Pahimmillaan ihmisten kokemat haitat ovat pitkien tavarajunien kulkiessa seudun ohi. Mielenkiintoista juuri Hausjärven tapauksessa on se, että asukkaiden mielestä haitat ovat lisääntyneet nimenomaan pääradan peruskorjauksen jälkeen. Käytännössä haittoja ovat muun muassa astioiden kilinä, huonekalujen tärinä ja unta ja asumista haittaavat äänet. /33, 17/

4.1.2 Tärinän raja-arvoja

Banverketin erään tutkimuksen tavoitteena on tarkastella ihmisiä häiritsevien värähtelyjen amplitudeja rautateiden läheisyydessä sijaitsevissa rakennuksissa. Ruotsin ulkopuolellakaan ei ole tehty mittauksia tärinän suhteen siten, että tuloksia olisi voitu hyödyntää ratapenkereen mitoituksessa. Tämän tutkimuksen mittausten tuloksena saatiin joistakin paikoista suurempia leikkausjännityksiä kuin voisi odottaa liikenteen aiheuttamiksi. /5/

ORE:n tutkimuksissa on tultu siihen tulokseen, että tärinä ei ole ensisijainen syy rakenteiden vaurioitumiseen. Yhdessä tutkimuksessa testattiin kuitenkin tärinän vaikutusta laboratorio-olosuhteissa. Todellisessa tilanteessa rakenteen tärinähistoriaa on hyvin vaikea koota.

Laboratoriotesteissä kuudenkymmenen päivän ajan altistettiin seinä tärinällä (14 mm/s maksimissaan 13 Hz:ssä). Rappaamattomalla seinän puolella betonissa oli havaittavissa pieniä murtumia, mutta rapatulle puolelle tärinästä ei jäänyt jälkiä. /30/

Ihmisen kannalta raja-arvojen määrittäminen on vaikeaa. Havaintokynnys taajuusalueella 1...10 Hz on 0,1...0,6 mm/s. Kuten melulle ja ilmanvaihdonkin häiritsevyydelle ihmisen epämiellyttäväksi kokema raja-arvo on voimakkaasti subjektiivinen suure. Ainoa varma raja, jossa tärinästä ei ihmisen kannalta ole haittaa on havaintokynnyksen alittava tärinä. /20/

Suomessa käytettäviä raja-arvoja käsitellään esimerkiksi Ratahallintokeskuksen julkaisussa "Rautatieliikennetärinän mittaushje". /34/

4.1.3 Ratarakenne

Rakenteiden pitää yleensä kestää sekä staattista että dynaamista kuormaa. Ratapenger ei ole tässä mikään poikkeus. Toistuvat kuormat voivat aiheuttaa normaalin painumisen (cyclic soil deformation) lisäksi plastista muodonmuutosta. Kyllästetyn siltin huokosvedenpaine voi kasvaa niin suureksi, että maa nesteytyy.

Banverket on erityisesti kiinnostunut toistuvien kuormien vaikutuksesta (deformaatio) ratapenkereisiin, jotka on rakennettu savipohjaiselle silttikerroksia sisältävälle maalle. Tarkoitus on ottaa huomioon toistuvat kuormat luiskien vakavuustarkasteluissa paremmin kuin nykyisin käytössä oleva 20%:n lisä staattiseen kuormaan verrattuna. Dynaaminen kuorma erilaisilla maaparametrien arvoilla (leikkauslujuus) ei ole normaalisti suunnittelun pohjana. Dynaamisten kuormien vaikutuksista ei myöskään maailmalla tiedetä kovin paljon. /7/

Banverket on tehnyt mittauksia Länsi-Ruotsissa, missä on suuria savikerrostumia ja kevyesti ylikonsolidoitunutta kerrostumatonta silttiä. Mitattavia suureita olivat huokosvedenpaine, jännitykset (pysty- ja vaakasuora) ja eri kerrosten deformaatio sekä tärinä. Nämä parametrit mitattiin radan keskeltä, 4,4:n metrin ja kahdeksan metrin

päästä radasta aina kahdeksan metrin syvyyteen asti. Tärinää mitattiin pinnalla 40:n metrin päähän radasta. Mittauksiin käytettiin 54 eri laitetta. Junista rekisteröitiin nopeus, tyyppi ja massa. Tuloksia verrattiin staattiseen kuormaan. /7/

Tulosten mukaan huokosvedenpaineen vaihtelu on pientä. Maksimiarvoksi saatiin 2 kPa hiekkaisessa silttikerroksessa kahdeksan metrin syvyydellä radan alla. Ylikonsolidoituminen saattaa olla syynä näin alhaiseen lukemaan. Deformaatio radan alla osoittaa selvästi nopeus-, syvyys- ja painoriippuvuuden. Jännitykset olivat suuria penkereen lähellä, mutta pieniä kauempana. /7/

Junakuorma aiheuttaa maapohjaan painumia. Junakuormalla tarkoitetaan raiteeseen kohdistuvaa junan staattisten akselikuormien ja dynaamisten lisäkuormien summaa. Painumien suuruus ja painumaviivan muoto säätelevät merkittävästi tärinäherätettä ja lähiympäristön tärinätasoa. Ratarakenteen jäykkyys määrittelee sen, miten tasaisesti junakuorma jakautuu maapohjalle ja minkä suuruiset ovat akselikuormien aiheuttamat radan suuntaiset maanpinnan painumaerot.

Mitä jäykempi radan rakenne on, sen parempi. Vaikka maapohjan keskimääräinen, staattinen painuma ei juuri muutu, tärinäherätteen kannalta tärkeät painumaerot pienenevät merkittävästi radan taivutusjäykkyyden mukana.

Jossain määrin radan jäykkyyttä saadaan kasvatettua rakennekerrosten paksuutta ja pengerkorkeutta lisäämällä. Penkereen massa kasvaa nopeasti sen korkeuden myötä, mikä yhdessä maapohjan jännitysten tasaisemman jakautumisen kanssa pienentää tärinän kiihtyvyyksiä. Myös toisen raiteen rakentaminen tuo mukanaan lisää massaa ja kasvattaa jäykkyyttä, mikä yleensä vähentää melko selvästi tärinätasoa. /19/

Havainnot esimerkiksi Tottolasta kertovat, että paalupenkereen päällä mitattavissa oleva taajuussisältö on täysin poikkeava penkereen ympäristössä mitatusta. Ympäristössä nousevat korkeiksi varsin korkeat taajuudet, mikä johtuu paljolti siitä, että koko energiasisältö on pieni penkereen ulkopuolella. Tärkein huomio on, ettei matalalla maapohjan ominaistaajuuden alueella juuri ole energiaa. Paaluperustustapauksessa juna ei kykene herättämään maapohjaa niin sanotusti soimaan. /20/

Ratapenkereen ja leikkauksen korkeuden kasvaessa tärinäenergian leviäminen ympäristöön vähenee. Pinta-aallot vaimenevat sekä penkereessä että maanpinnan taitekohdissa jopa 20 - 45% verrattuna siihen tilanteeseen, että rata on maanpinnan tasossa. Penkereen ja leikkauksen vaikutusta on tutkittu tärinälaskennoissa nykyään varsin yleisillä BEM-malleihin perustuvilla laskennoilla. /19, 15/

4.1.4 Maapohjan muodonmuutos- ja vaimennusominaisuudet

Maanpinnan painuman suuruuteen vaikuttavat sekä maakerrosten lisäjännitykset ja jännitysten jakautuminen että maapohjan staattiset ja dynaamiset muodonmuutosominaisuudet. Nauhamainen junakuorma aiheuttaa sitä suuremman keskimääräisen painuman mitä pienemmät maapohjan kimmo- ja leikkausmoduulit ovat. Deformoituvan maakerroksen paksuus ja suljetun tilan muodonmuutosmoduuli säätelevät merkittävässä määrin tärinätasoa. Hyvin pehmeillä maapohjilla pengerkorkeuden ja radan rakennekerrosten vaihtelun aiheuttama hajonta on kuitenkin melko suurta. /19/

Dynaamisen pistekuorman vaikutusta penkereen pystysiirtymiin on tarkasteltu FEM-laskentamalleilla Japanissa. Materiaalitietoina on käytetty ratapölkkyjen, tukikerroksen, penkereen, yksikerroksisen pehmeän pohjamaan ja kallion leikkausmoduulia, Poissonin lukua, vaimennuskerrointa ja tilavuuspainoa. Muuttujina ovat olleet pehmeän kerroksen

leikkausmoduuli ja paksuus sekä pengerkorkeus. Japanilaisen tutkimuksen tuloksina voidaan todeta, että

- staattiset ja dynaamiset siirtymät kasvavat maakerroksen leikkausmoduulin alittaessa tietyn arvon (tässä noin 8 MPa)
- dynaamisen kuormituksen aiheuttamat pystysuoran siirtymän huippuarvot ovat keskimäärin 1,5 - kertaisia keskimääräisiin (staattisiin) siirtymiin nähden
- pengerkorkeuden lisääminen 1:stä 3:een metriin vähentää keskimääräistä pystysiirtymää jopa 25 - 40 %, mutta vaikutus siirtymän huippuarvoihin jää vähäiseksi.

Junaliikennetärinän vaimenemisessa geometrinen vaimennus on hallitsevassa asemassa. Geometriseen vaimenemiseen vaikuttavat kaikkein eniten taajuussisältö ja eri maakerrosten paksuudet. Materiaalivaimennusta tapahtuu lähinnä raiteissa, penkereessä ja radan alapuolisella osuudella maapohjassa. Maapohjan muodonmuutokset ovat kuitenkin niin pienet, että materiaalivaimennuksen merkitys tärinän leviämisessä on vähäistä. /19/

4.1.5 Etäisyys radasta

KTH:ssa on kehitelty beam-on-Winkler-foundation -malliin perustuva menetelmä rautatieliikenteen ympäristöönsä aiheuttaman tärinän taajuusjakauman ennustamista varten. Tämä malli auttaa ennustamaan rautatieliikenteen aiheuttaman tärinän taajuussisältöä varsin tarkasti lähellä rautatietä. Parhaimmillaan hallitseva taajuusalue voidaan ennustaa kolmenkymmenen metrin etäisyydelle asti radasta. Kauempana tärinälähteestä tulokset hämärtyvät eri materiaalien ja geometrinen efektien vaikutuksista. Kuitenkin tärkeimmät taajuudet saadaan selville myös kauempana radasta erityisesti niiden junien osalta, joissa akselit ovat yhtä etäällä toisistaan ja saviperusteisilla ratapenkereillä. /14/

Junaliikennetärinän loppuraportissa mainitaan useita eri tutkimuksia tärinän intensiteettiin vaikuttavista seikoista. Tässä referoidaan ainoastaan lyhyesti näiden tutkimusten päätelmiä. Asian kiinnostaessa enemmän on syytä tutustua ko. loppuraporttiin tai alkuperäisiin tutkimusraportteihin. Erityisesti etäisyyden vaikutusta on tutkittu useasti. Raporteissa ja artikkeleissa esitetyt tärinätaso-etäisyys-relaatiot ovat useimmiten kuitenkin paikkakohtaisia. Laajempia yhteenvetoja on ollut käytettävissä Japanista, Tanskasta ja Saksasta. /19/

Esimerkiksi Japanin Shinkansen- rataa koskevan tärinätutkimuksen (1975-1986) tuloksien perusteella voidaan sanoa, että perustamistavan vaikutus tärinän vaimenemiseen vähenee etäisyyden kasvaessa. Tällöin tulosten vertailukelpoisuus maanvaraisen radan kanssa paranee. Keskimääräinen pystysuoran tärinätason vaimentumisen dB-arvo lisäetäisyyttä kohti oli tutkimuksen mukaan 5,6 - 2,45 dB/10m ja vähentyi etäisyyden radasta kasvaessa ja vastaava reduktiokerroin 0,53 - 0,75, joka kasvoi etäisyyden radasta kasvaessa. /19/

Tanskalainen tutkimus toteaa, että hitaimmin vaimeneva taajuus pohjasuhteiltaan erilaisissakin kohteissa on 8 Hz. Nopeimmin vaimenee korkea 63 Hz:n taajuus. Myös saksalainen tutkimus saa päätelmäkseen, että pohjasuhteiden erilaisuus ei olennaisesti vaikuta tärinän etäisyysvaimenemiseen. /19/

4.1.6 Junan nopeus

Sekä japanilaisen että suomalaisen tutkimustiedon perusteella voidaan todeta, että tärinän intensiteetti ja junan nopeus korreloivat. Suomalaiset tärinämittaukset vuodelta 1997 vahvistavat nopeusalueella 120 – 160 km/h lievän nopeusriippuvuuden. Japanilainen tutkimus menee vielä pidemmälle vahvistaen tärinän siirtymäamplitudin olevan nopeusalueella 80 – 210 km/h likimain suoraan verrannollinen junan nopeuteen. Toisaalta täytyy aina muistaa, että erilaiset junat aiheuttavat erilaisen herätteen samallakin nopeudella. Esimerkiksi tavarajunien ollessa kyseessä suurin tärinäheräte aiheutuu yleensä sellaisella melko hitaalla nopeudella, jolla ratapölkkyjen ohitustaajuus vastaa raide-jousitus-vaunu –systemin resonanssitaajuutta. /19, 9, 6/

Aivan kaikki tutkimustulokset eivät kuitenkaan tue nopeuden ja tärinän intensiteetin korrelaatiota. Esimerkiksi Esveldin kirjassa todetaan, että tärinä ei välttämättä kasva suoraan suhteessa nopeuteen. Joissain tapauksissa nopeuden pudotus jopa pahentaa tärinätilannetta. /6/

4.1.7 Akselipaino ja junavaunun jousitus

Akselipainon tai akselijärjestelyiden vaikutuksesta tärinään ei juurikaan ole olemassa tutkimustuloksia. Nekin tutkimukset, mitä esimerkiksi ORE on tehnyt, kohdistuvat maanalaiseen kalustoon tai muuten normaaleihin akselipainoihin. Maanalaisesta liikenteestä ORE toteaa, että akselipainojen muutos ei vaikuta merkittävästi tärinätasoon. Tehdyissä tutkimuksissa akselipainolla ei ollut merkittävää vaikutusta tärinätasoon 60 km/h nopeudella. Sen sijaan hyvin matalilla taajuuksilla tärinätaso oli verrannollinen jousittamattomaan massaun. /32, 19/

Junaliikennetärinän loppuraportissa todetaan staattisen akselipainon lisäämisen merkitsevän samalla myös pyöräkuorman dynaamisen osan vaihtelun kasvua. Lähialueen tärinätaso kasvaa akselipainon noustessa, jos muut muuttujat pysyvät ennallaan. Pituusmassalla tarkoitetaan massaa junametriä kohti. Pehmeällä maapohjalla pituusmassan kaksinkertaistuessa pystysuoran heilahdusnopeuden maksimiarvo voi kasvaa jopa kaksinkertaiseksi. Hiekkamaapohjalla massan lisäys ei vaikuta samoin. /19/

Vaikutusalueen laajuuteen vaikuttavat ennen kaikkea maapohjan muodonmuutos- ja vaimennusominaisuudet. Pehmeillä maapohjilla akselipainon merkitys on suurimmillaan.

Japanilaisen Shinkansen -junakaluston värähtelyanalyysien sekä vertailumittauksien perusteella on tultu seuraaviin päätelmiin: /19/

- Alle 30 Hz:n taajuuksilla maapohjan tärinätasoon vaikuttavat vaunun korin massa ja telin primäärisesti vaimennettu massa.
- Matalien taajuuksien tärinätason esimerkiksi 3 dB:n vaimenemiseen tarvittava akselipainon kevennys on noin 30 %.
- Vaimentuminen pätee vain raiteen ollessa hyväkuntoinen. Raiteen epäjatkuvuuksien kasvaessa vaimentuminen pienenee.
- Kasvava ajonopeus laajentaa vaimentuvaa taajuuskaistaa. 100 km/h:n nopeudella vaimentuvat alle 18 Hz:n taajuudet, 180 km/h:n nopeudella vaimennus ulottuu 25 Hz:iin.
- Jousittamattoman massan muutokset vaikuttavat tärinään vain yli 25 Hz:n taajuuksilla.

Junavaunujen kitkaiskunvaimentimien toiminta perustuu vaimentimen sisäisen kitkavoiman ylittymiseen. Tätä kitkavoimaa pienemmillä vaimenninvoimilla jousitus ei toimi, joten koko vaunun massa voi joutua jousittamattomaksi. Vaimentimien sisäinen kitka kasvaa muun muassa vaimentimen kunnan huonontuessa. Matalataajuiset dynaamiset pyöräkuormat kasvavat tämän seurauksena ja vastaava värinätaso nousee. Alle 20 Hz:n pystyvärähtelytaajuuksilla kitkaiskunvaimennus ei juuri toimi, mikä aiheuttaa kaikkein vaikeimmin estettävää matalaa värinätaajuutta. /19/

4.2 Värinän vaimentaminen

4.2.1 Yleistä

Rautatiet ovat nauhamaisen värinän lähde. Siltojen päät ja muut epäjatkuvuuskohdat voivat tosin olla myös pistemäisen värinän lähteitä. Värinällä tarkoitetaan niitä värähtelyjä, mitkä aiheutuvat ohikulkevista junista ja kulkeutuvat maaperää pitkin. Tietyn rajan ylittävä värinä aiheuttaa ihmisissä epätietoisuutta omasta hyvinvoinnista ja rakenteiden kestävydestä. Värinään on alettu jo kahdeksankymmentäluvulla suhtautua entistä kriittisemmin. /28/ Värinän vaikutuksia voidaan vähentää erilaisilla toimenpiteillä ja rakenteilla.

Ensimmäiset värinää vaimentavat rakenteet on tehty jo kuusikymmentäluvun puolivälissä. ORE:n raportin mukaan värinää vaimentavat rakenteet ja materiaalit toimivat myös pitkällä aikajänteellä hyvin. Tässä on tosin syytä muistaa, että Suomen olosuhteissa routa aiheuttaa oman lisävaatimuksensa materiaalien kestävyysominaisuuksiin. /29/

Yleisiä havaintoja värinän torjuntaan käytettävistä toimenpiteistä on lueteltu seuraavassa:

- värinän torjunnan keinot ovat taajuusriippuvaisia
- matalat taajuudet (2 - 30 Hz) ovat hankalimpia torjua
- matalien taajuuksien torjuminen poikkeaa korkeiden taajuuksien torjunnasta
- toimenpiteet perustuvat yleensä yritykseen ja erehdykseen
- parhaat toimenpiteet ovat kaikkein kalleimpia

Värinän torjunnan kannalta määräävät taajuudet ovat välillä 2 - 150 Hz. ORE:n raportin mukaan korkeammat taajuudet vaimenevat kulkeutuessaan maaperän läpi, kun taas rakennukset eivät yleensä reagoi matalampiin taajuuksiin. Yleisesti kyllä matalimpia taajuuksia pidetään kaikkein hankalimpina. Kulkeutuessaan eri pituiset aallot käyttäytyvät eri tavalla. Jotkut taajuudet vaimenevat ja toiset resonoivat. Jos halutaan saavuttaa hyvä tulos jollain värinänvaimennusmenetelmällä, on sekä värinälähde että kohderakenne tunnettava erittäin hyvin. /28, 9, 19/

4.2.2 Toimenpiteet

Yleisesti junaliikennetärinän tarkastelu voidaan jakaa neljään osaan. Näitä osia ovat värinäherätteen syntyminen, värinän leviäminen, rakennusten ja rakenneosien vaste ja värinän vaikutus ihmiseen. /19/ Tässä tutkimuksessa ovat värinän vaikutukset rakenteisiin ja ihmisiin jätetty vähemmälle huomiolle, kuten jo alussa todettiin.

Seuraavassa on tärinän vaimentamiseen tarkoitettuja toimenpiteitä jaettu otsikoiden ”Tärinäherätteen syntyminen” ja ”Tärinän leviäminen” alle. Lisäksi on oma kappale metrotärinän vaimennusmenetelmistä. Näitä menetelmiä on tuskin kuitenkaan mahdollista hyödyntää rautateillä, koska metroradan rakenne poikkeaa oleellisesti rautatien rakenteesta. Tärinän vaimennusmenetelmiä kuvataan myös esimerkiksi Heikki Komulaisen kirjallisuus selvityksessä junaliikennetärinän vaimentamisesta VTT:n raportin ”Ratarakenteiden perustaminen Tottolan pehmeikölle” liitteessä. /20/

Tärinäherätteen syntyminen

Tärinää voidaan vaimentaa joko suoraan tärinälähteeseen vaikuttavilla toimenpiteillä tai tärinälähteen ja suojattavan kohteen väliin tehtävillä rakenteilla. /28/

Tärinälähteenä voidaan ajatella esimerkiksi pyörää, sillä ORE:n tutkimusten mukaan juuri pyörän pinnan kunto on merkittävä matalataajuuksisen tärinän aiheuttaja. /32/

On olemassa useita erityyppisiä tärinälevyjä ja muita menetelmiä torjua tärinää. Radan epäjatkuvuuskohdista aiheutuvaa tärinää taas voidaan vähentää korjaamalla epäjatkuvuuskohtia normaalin kunnossapidon yhteydessä tiettyyn rajaan asti.

Esimerkiksi tukikerroksen kasvattaminen 300:stä 750:een millimetriin vähentää DB:n tutkimuksen mukaan tärinää 6 dB taajuusalueella 1 - 17 Hz. Ranskalainen SNCF saa omasta tutkimuksestaan tulokseksi -20dB kasvattamalla tukikerrosta 200:sta 800:aan millimetriin. /32/ Tässä yhteydessä on huomattava, että sekä DB että SNCF mittaavat tukikerroksen paksuuden pölkyn alapinnasta lukien, kun taas Suomessa tukikerroksen paksuus määritellään KV:sta alaspäin.

Toisessa ORE:n tutkimuksessa tosin saatiin tulokseksi, että tukikerroksen kasvattaminen 250:stä 500:aan millimetriin ei vaikuttanut mitenkään tärinään. Samassa tutkimuksessa todetaan, että aluslevyillä ja matoilla voidaan tärinää vähentää huomattavasti. Mattojen ongelma on kuitenkin niiden hankala kunnossapito ja vaikutukset radan tasaukseen. /26/

Suomessa eristekerros on jo alunperin melko paksu muun muassa routamitoituksen vuoksi, joten tukikerroksen kasvattaminen ei ole kovinkaan järkevä tai edullinen toimenpide tärinävaimennuksessa. /20/

Ruotsalaisen kokemuksen mukaan tärinää voidaan vähentää pitämällä staattinen kuorma riittävän pienenä. Myös staattiset radan poikkeamat ja painumat pitää minimoida. Ratarakenteen jäykistämiseen voidaan käyttää esimerkiksi kalkkisementtipaaluja (stabilointi) tai betonirakennetta. Tärinämatoista ei ainakaan KTH:n tärinäasiantuntijoilla ole juurikaan käytännön kokemusta. /4, 15/

ORE:n tutkimusten mukaan pyöriä ja niistä aiheutuvaa tärinää kannattaa tutkia lisää.

Tärinän leviäminen

Passiivinen suojausrakenne voidaan toteuttaa niin, että varsinaiseen ratarakenteeseen ei kosketa lainkaan. Näin ei aiheuteta haittaa liikenteelle. Lupaavimmat menetelmät näyttäisivät olevan radan suuntainen oja (ojaa voidaan kutsua myös tärinäaidaksi) tai lisämassa absorboimaan tärinää. Oja tosin hyödyttää vain välittömässä läheisyydessään, sillä 25 metrin päässä sen vaikutus on jokseenkin mitätön. Lisämassa saattaa aiheuttaa joidenkin taajuuksien kasvamista. /27/

Amerikkalaisessa tutkimuksessa esitellään yksinkertaisia suunnitteluohjeita ja menetelmiä tärinäaitojen ja -rakenteiden tehokkuuden määrittämiseksi. Passiivinen suojaus mahdollistaa pinta-aaltojen (Rayleigh-aalto) kulun estämisen useimmissa tilanteissa. Tärkeää on ensin havaita aaltojen tyyppi ja energia. Tärinäaidalla tarkoitetaan maaperään kaivettua ojaa tai uraa, joka voi olla ilmaa sisältävä rakenne (open), betonilla tai bentoniitilla täytetty rakenne (in-filled), levyseinä tai jopa paalurivi. /1/ Bentoniitilla täytetyssä ojassa voi olla keskellä kuplaseinä, joka on suojattu alumiinifoliolla.

Kyseisen tutkimuksen päätelminä todetaan muun muassa, että jos tärinäaita on matala, pääsee sen alta jopa suuri määrä Rayleigh -aallon energiaa läpi. Avointen tärinäaitojen leveydellä ei juuri ole vaikutusta vaimennukseen. Täytetyllä aidalla sekä leveys että syvyys ovat merkittäviä. Myös täyteaineen tiheys (maaperään verrattuna) on otettava huomioon. Erityisesti avoimen aitarakenteen tapauksessa maaperän kerroksellisuudella on varsin suuri vaikutus aidan suunnittelusyvyyteen ja sitä kautta tärinänvaimennusominaisuuksiin. /1/

Jos maaperässä on kaksi erilaista kerrosta ja käytetään avointa aitaa, eli oja -tyyppistä tärinäsuojasta, niin seuraavat seikat on syytä ottaa huomioon: /1/

- jos alemman kerroksen jäykkyys on pienempi kuin ylemmän, ei kerrosrakenteeseen tarvitse kiinnittää huomiota lainkaan
- jos alempi kerros on jäykempi kuin ylempi, on aita rakennettava normaalitilannetta syvemmäksi

Oja estämässä tärinää on myös siksi hankala, että ojan on oltava melko syvä. Tällöin puhutaan jopa 10 metriä syvästä rakenteesta siinäkin tapauksessa, että Rayleigh -aalto saadaan rajattua alle 20 metriseksi aallonpituudeltaan. /6/ Aitarakenteen vaimennusvaikutus on parhaimmillaan jopa 50%.

Näistäkin havainnoista saadaan vahvistusta teorialle, että maapohjan koostuessa laajalla alueella hyvin paksusta ja pehmeästä kerroksesta tärinäenergian välittyminen syvemmällä olevien maakerrosten kautta on vähäistä.

Saksalaisen tutkimuksen tuloksena kehitetty dynaaminen juna - kisko -malli suurnopeusrautateitä varten ottaa huomioon eri taajuuksalueet. Muuttujina olivat joustamaton massa, pölkyt, tukikerros ja radan muodonmuutosominaisuudet. Perusmallin lisäksi tutkittiin kahdeksatoista erilaista vaihtoehtoa. Akselipainojen osalta ei ylitetty 200 kN:a, joten tulokset eivät ole siltäkään osin suoraan siirrettävissä Suomen olosuhteisiin. /24/

Tutkimuksen tuloksena saaduista arvioista eri komponenttien vaihtamisen vaikutuksista tärinään (tukikerroksen kuormitukseen) voidaan kuitenkin esittää seuraavat huomiot: /24/

- pehmeämpi välilevy parantaa vaimennusta sekä keskitaajuuksilla että myös jonkin verran matalilla taajuuksilla
- ratapölkylä ei ole juurikaan merkitystä
- pölkyn tuennan pehmentäminen lisärakenteella vaimentaa varsinkin keskitaajuuksista tärinää

Myös suomalaiset kokemukset Tottolasta osoittavat, että ratapölkylä ei ole vaikutusta tärinään. /20/

Ruotsissa tärkeimmät menetelmät rautatieliikenteen aiheuttaman tärinän vähentämiseen ovat:

- 1) kalkkisementtipaalutus radan viereen
- 2) paaluperustus tai paalulaatta (påldäck)
- 3) uusi menetelmä: kalkkisementtipaalutus radan alle (stabilointi)

Kalkkisementtipaalutus radan vieressä on tyypillinen tärinänvaimennusrakenne (aitarakenne). Sekä paaluperustuksella että kalkkisementtipaalutuksella taas pyritään ratarakenteen jäykistämiseen. Nykyisin rata perustetaan Ruotsissa tärinän kannalta ongelmallisissa tilanteissa joko betonilaattarakenteella tai kalkkisementtipaaluille. Betonirakenteen ongelmana Banverketin kannalta on sen määrittely sillaksi, koska siihen on pakko soveltaa kaikkia siltojen määräyksiä. Kalkin ongelma on sen sopimattomuus happamille maaperille. /4, 15/

Kalkkisementtipaalutuksella radan vieressä saavutetaan ruotsalaisen kokemuksen mukaan noin 40 prosentin vähennys tärinään verrattuna tilanteeseen ilman tärinänvaimennusrakennetta. Paalulaatalla voidaan päästä jopa 90 prosentin vähennykseen tärinätasossa. /36/

Tottolan pehmeikölle ainoa varma käytännön ratkaisu tärinän vaimentamiseen näyttäisi olevan radan perustamisen pystyjäykyyden kasvattaminen. Tämä vaatii radan perustamista paaluille tai vahvistetulle jäykälle maapohjalle. Lähes kovaan pohjaan viedyllä rakenteella, esimerkiksi stabiloiduilla pilaririvistöillä, pystytään pienentämään tärinää. Tärinän pienentymisen suuruuden ja teknisen onnistumisen ennustaminen on erittäin vaikeaa. /20/

Uudet rakennukset voidaan varustaa tärinän torjuntaan jo valmiiksi. Olemassa olevia rakennuksia voidaan varustaa tärinää absorboivilla rakenteilla, jotka toimivat parhaiten alueella 10 - 30 Hz. /32/ Ruotsalaisen tutkimuksen mukaan rakennusten perustaminen paaluille on tärinän kannalta hyvä ratkaisu. /22/ Joissain ääritilanteissa jopa vanhan rakennuksen paaluttaminen on mahdollista, mutta tämä on yleensä yhtä kallista kuin kokonaan uuden rakennuksen rakentaminen.

Metrotärinän vaimennusmenetelmät

Metrotärinää on tutkittu melko paljon. Metrotärinä on taajuudeltaan melko korkea ja metroradan pohja on kovaa kalliota, joten tärinän torjunta on huomattavasti helpompaa kuin rautateillä. Tärinää voidaan torjua esimerkiksi pehmeillä lisäaluslevyillä tai tukikerroksen alle sijoitettavilla matoilla. Mitä pehmeämmästä materiaalista on kyse sitä paremmin se vaimentaa tärinää. Luultavaa on, että nämä tunneleissa hyväksi havaitut menetelmät eivät toimi avoimessa maastossa yhtä hyvin. /31/

Lisäksi on otettava huomioon, että eurooppalaiset tutkimukset ja tuotteet eivät ole suoraan sovellettavissa Suomen olosuhteisiin. Esimerkiksi Helsingin kaupungin liikennelaitos (HKL) on päättänyt tekemään tai teettämään hyvin suuren osan kaikesta metrotärinän tutkimuksesta ”talon sisällä”, jotta osattaisiin keskittyä oikeisiin asioihin. Tulokset ovat olleet hyviä. Metroradalla on käytetty useita erilaisia tärinäeristelevyjä. Tärinää vaimentaa jopa tavallinen lämpöeristelevy. Saavutettava taso voi olla -12dB, mutta keskimäärinkin HKL:n kokemuksen mukaan noin -10dB. Tärinälevyt ja matot ovat melko kalliita. Hinnat liikkuvat välillä 100 – 1000 mk/m². /25/

HKL:n teettämissä tutkimuksissa todetaan muun muassa, että rengasrouhe on mahdollinen materiaali, mutta suuren staattisen painuman ongelma saattaa estää laajemman käytön. Tutkimustuloksia ei rengasrouheesta ole saatavilla. Jos käytetään tärinämattoa, sen päällä olevan sepelikerroksen paksuudella ei ole juurikaan vaikutusta tärinätasoon. Ilman mattoa normaalin kerrospaksuuden (500 mm) lisääminen 10 prosentilla lisää eristysvaikutusta 1-1,5dB. /23/

Vuosaaren metroradalle on asennettu noin 25 000 m² 25 mm paksua Fawolon – tärinäsuojauslevyä. Paikoitellen asennus on tehty kahteen kerrokseen. Levy on tiheydeltään 65 kg/m³. Raskaille akselipainoille tällainen levy ei ainakaan suoraan sovi. Mahdollista on tosin valmistaa tiheämpää levyä. Rakenteessa levy on sepelikerroksen alla suojattuna kummaltakin puolelta. /25/

Metroradalla saatiin tulokseksi 60 mm:n kerroksella tärinäsuojauslevyjä keskimäärin 12 dB:n vaimennus. Levy painui lähes 3 mm metron aiheuttaman paineen ollessa 53 kN/m². /8/

4.3 Tärinän mittaaminen

Rautatietärinän mittauksesta on juuri ilmestynyt RHK:n mittausohje, jonka mukaan kaikki rautatieliikennetärinän mittaukset vastaisuudessa tehdään. Tässä esitetään muutamia huomioita muista lähteistä. /34/

ORE:n raportissa todetaan, että kulkeutuessaan tärinän eri taajuudet käyttäytyvät eri tavalla. Jotkut taajuudet vaimenevat ja toiset resonoivat. Jos halutaan saavuttaa hyvä tulos jollain tärinävaimennusmenetelmällä, on sekä tärinälähde että kohderakenne tunnettava erittäin hyvin. Erittäin hyvää tuntemista varten on suoritettava sellaisia mittauksia, että saadaan riittävästi soveltuvaa tietoa. /28/

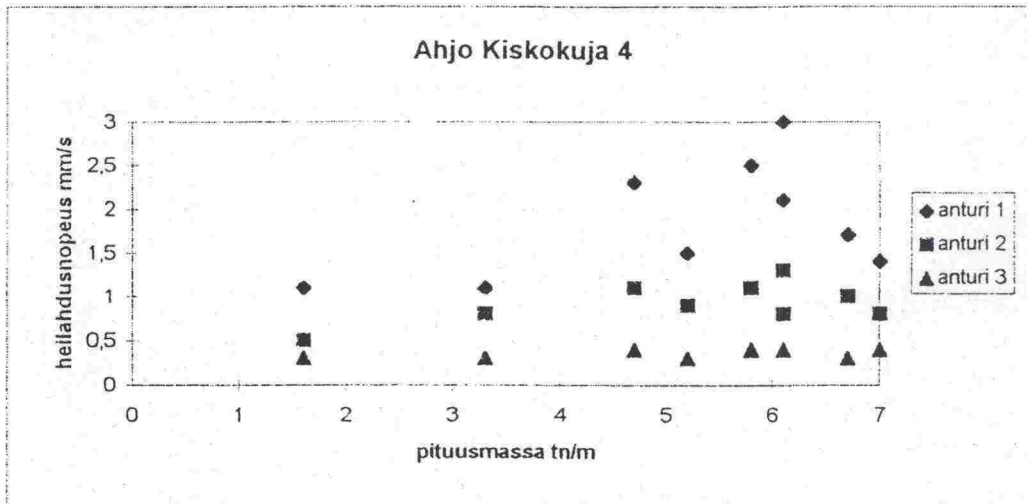
Ruotsissa tärinää mitataan sekä seismometreillä (geofoni) että kiihtyvyysantureilla. Geofonien taajuusalue alkaa noin 4,5 hertsistä. Matalampia taajuuksia varten tarvitaan suurempia ja kalliimpia laitteita. Tuloksena saadaan suoraan normin edellyttämä mm/s – arvo. On parempi mitata suoraan haluttua suuretta, koska tällöin mahdollisen virheen mahdollisuus vähenee. Kiihtyvyysanturit ovat hinnaltaan melko kalliita. Niiden etuna on taajuusalue alkaen suoraan nollost. Lisäongelmia taas tuottavat vahvistuskanavan tarve ja vaativa kosteudelta suojaus. Göteborgissa Banverketillä käytetään vain kiihtyvyysantureita, mutta Tukholmassa ainoastaan geofoneja. Göteborgin tärinämittauslaitteistot ovat erinomaiset. /4/

Suomessa on käytetty sekä geofoneja että muita antureita. Esimerkiksi Tottolassa tärinää mitattiin maahan asennetuilla pietsosähköisillä kiihtyvyysantureilla. Näillä antureilla päästään jopa 0,5 Hz:n taajuuteen, mutta mittauksissa alle 1,0 Hz:n taajuusalue vaimennettiin ylipäästösuotimella. Antureiden mittaussignaali voidaan taltioida joko analogiaintegraattorilla integroituna heilahdusnopeutena tai kiihtyvyytenä, joka integroidaan jälkepäin heilahdusnopeudeksi numeerisella signaalinkäsittelyohjelmistolla. /20/

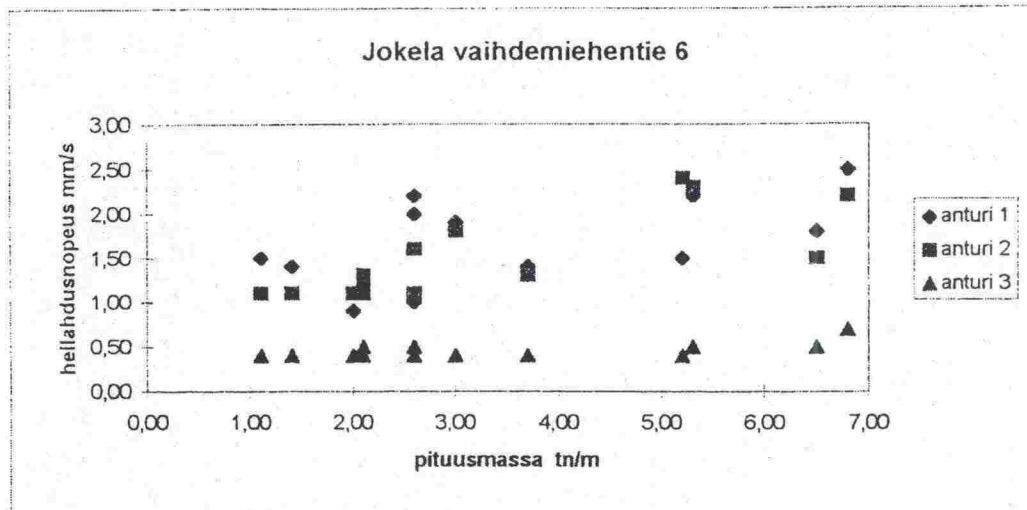
Joissain tärinämittauksissa on tuloksia ilmoitettu pituusmassan ja heilahdusnopeuden avulla. Junaliikennetärinän loppuraportissa selvitetään pituusmassan laskentamenetelmä. Pituusmassalla tarkoitetaan massaa junametriä kohti [tonnia/juna-m]. Suhteellisen tasaisesti kuormatusta junasta pituusmassa saadaan laskettua jakamalla

kokonaisuudessa junan pituudella. Epätasaisesti kuormatusta junasta pituusmassa voidaan laskea painottamalla raskaita vaunuja. Henkilöjunien pituusmassat ovat yleensä 1,7 – 2,1 t/m. Tavarajunilla pituusmassan vaihteluväli on huomattavasti suurempi. /19/

Kuvassa 2 on mittaustuloksia vuodelta 1997 Keravalta. Anturit sijoitettiin noin 50 metrin etäisyydellä radasta olevaan kiinteistöön. Mittauspisteitä olivat savupiippu (1), hormin juuri (2) ja lattian kulma (3). Kuvasta on tässä tapauksessa selvästi havaittavissa kasvavien akselipainojen vaikutus heilahdusnopeuteen.



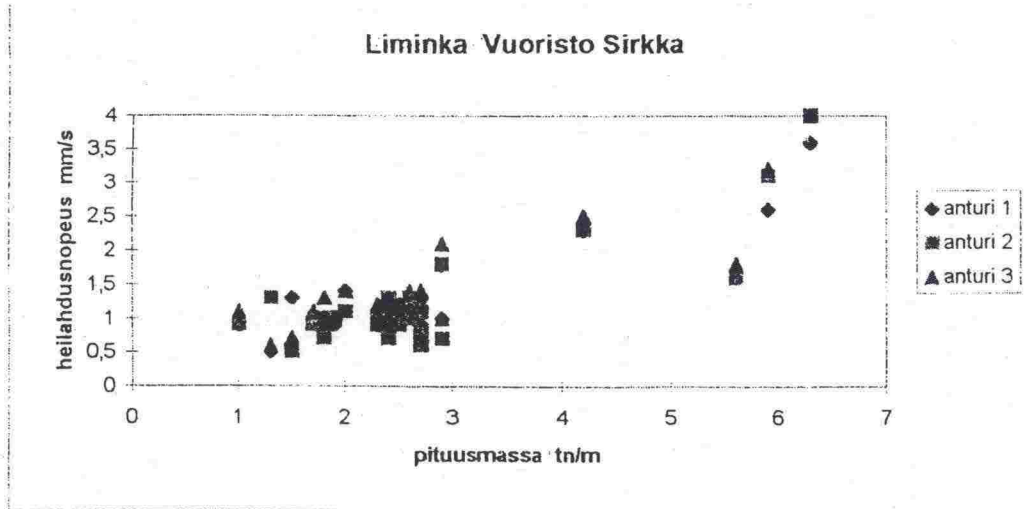
Kuva 2 Tärinän riippuvuus junan pituusmassasta, Kerava /10/



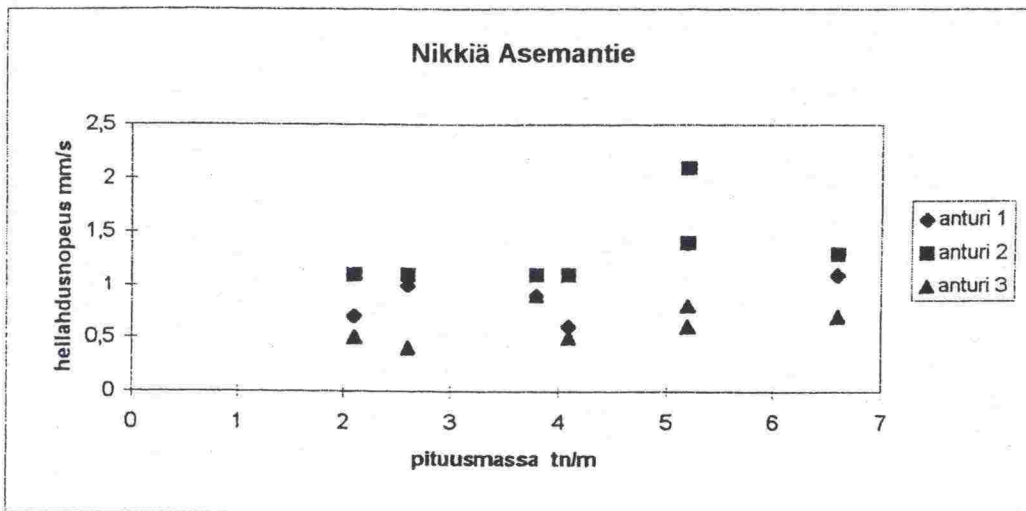
Kuva 3 Tärinän riippuvuus junan pituusmassasta, Jokela /11/

Kuvassa 3 on mittaustuloksia Jokelasta myös vuodelta 1997. Tässä pystysuuntaista heilahdusnopeutta mitattiin palomuurista (1) ja sokkelista rakennuksen vastakkaisilta puolilta (2 ja 3). Pituusmassan vaikutus heilahdusnopeuteen ei ole mitenkään selkeä.

Kuvassa 4 on vastaavanlaisen mittauksen tuloksia Limingasta. Kuvassa 5 esitetään myös samantyyppisiä mittaustuloksia Sipoosta. Kaikkien tässä esitettyjen mittausten tulokset ovat samansuuntaisia kuin mitä havaittiin Junaliikennetärinän loppuraportissa esitetyissä mittauksissa. /19/



Kuva 4 Tärinän riippuvuus junan pituusmassasta, Liminka /12/



Kuva 5 Tärinän riippuvuus junan pituusmassasta, Sipoo /13/

5. YHTEENVETO

Seuraavassa esitetään huomioita, tuloksia ja päätelmiä eri tärinätutkimuksista. Missään näistä tutkimuksista ei ole kuitenkaan keskitytty raskaampiin akselipainoihin, joten tarvetta on ilmiselvästi sekä teoreettiseen jatkotutkimukseen että mittauksiin.

- ◆ Yleisesti ottaen rautatietärinä ei ole häiriö radanvarren asukkaille. Rakenteiden ei ole todettu kärsivän tärinästä.
- ◆ Välittömästi ratapenkereen alapuolisen maapohjavyöhykkeen tärinä syntyy akselikuormien, ratarakenteen ja alapuolisen maapohjan vuorovaikutteisen toiminnan tuloksena.
- ◆ Tärinätaso radan ympäristössä määräytyy suurelta osin ratarakenteen alapuolisen maapohjavyöhykkeen tärinän (initiaalisen tärinän) amplitudien ja taajuussisällön mukaan. Matalat alle 10 Hz:n taajuudet vaimentuvat kaikkein hitaimmin.
- ◆ Ratarakenteen alapuolisen maapohjavyöhykkeen tärinän voimakkuutta lisäävät
 - kasvava pituusmassa,
 - kasvava staattinen akselipaino,
 - jousittamattoman massan kasvu,
 - jousituksen kokonaisjäykkyyden kasvu,
 - junan nopeuden kasvu,
 - raiteen ja pyörän muotopoikkeamien ja epäjatkuvuuskohtien lisääntyminen,
 - maapohjan pehmeän kerroksen kasvava paksuus,
 - maapohjan muuttuminen pehmeämmäksi ja
 - ratarakenteen vertikaalijäykkyyden väheneminen.
- ◆ Akselipaino ja junan nopeus vaikuttavat tärinäamplitudeihin merkittävästi vain suhteellisen pehmeillä maapohjilla. Nopeuden vaikutus riippuu radan kunnosta ja junakaluston ominaisuuksista. Joidenkin tehtyjen mittausten mukaan junan nopeus ei vaikuta tärinään lainkaan, mutta yleisesti ollaan sitä mieltä, että nopeudella on keskeinen merkitys tärinän syntymisessä.
- ◆ Tärinän voimakkuuteen vaikuttavien seikkojen merkittävyyden yleisempi arviointi on mahdollista vain suuntaa-antavasti, sillä eri seikkojen suhteellinen painoarvo vaihtelee huomattavasti eri kohteiden välillä.
- ◆ Junan pituus vaikuttaa tärinätasoon siten, että maapohjan herääminen värähtelemään ominaistaajuudellaan vaatii herätteeltä tiettyä toistuvuutta. Pitkän junan lisäksi ongelmallisia ovat sellaiset junat, joissa akseli- ja telivälit ovat samanlaiset pitkällä matkalla. Junan pituudella lienee kuitenkin sanottavaa merkitystä vain pehmeillä maapohjilla.
- ◆ Junaliikennetärinän vaimeneminen tunnetaan paremmin kuin sen syntyminen. Vaimeneminen etäisyyden suhteen on suhteellisen riippumaton maapohjan ominaisuuksista, kun maakerrokset ovat suhteellisen paksut. Ohuiden maakerrosten tapauksessa tärinäenergia voi kulkeutua jopa merkittävässä määrin alapuolisen kovan pohjakerroksen kautta. Tämä on otettava huomioon myös tärinää estäviä rakenteita suunniteltaessa.

- ◆ Maapohjan ominaisuudet, varsinkin pehmeikön keskimääräinen syvyys ja sen kimmo-ominaisuudet (leikkausaallon etenemisnopeus) säätävät alueellisesti merkittävimmän värinän taajuussisällön ja mahdollisesti heilahdusnopeuden maksimisuuruuden.
- ◆ Yksittäisten rakennusten osalta rakennuksen alapuolisen maapohjan geometria ja ennen kaikkea pehmeän kerroksen paksuus säatelevät värinän suuruutta ja taajuussisältöä.
- ◆ Jos maakerroksen resonanssitaajuus osuu värinäherätteen taajuusalueelle, pyrkivät resonanssitaajuus ja sen monikerrat korostumaan värinän levitessä.
- ◆ Radan kunto, pölkyjen laatu, kiskojen jatkuvuus tai epäjatkuvuus tai penkereen vähäinen keventäminen eivät vaikuta merkittävästi radan ympäristössä koettavaan värinään.
- ◆ Pehmeiköillä nopeutena tai kiihtyvyytenä ilmaistuna värinäenergian pääosa ilmenee taajuusalueella 1...4 Hz. Maanvaraiset rakennukset liikkuvat tällöin samassa vaiheessa maapohjan kanssa ja heiluvat heilahdusnopeuden pystysuuntaisella maksimiarvolla ilmaistuna lähes yhtä paljon kuin maapohjakin.
- ◆ Paaluperusteisesta radasta ympäristöön leviävän värinän suuruus on merkittävästi pienempi kuin maanvaraisesta radasta. Heilahdusnopeuden pystysuuntainen komponentti on paaluperusteisen radan osalta n. 20...30 % siitä mitä se on maanvaraisesta radasta. Vaakasuuntaiseen heilahdusnopeuteen paaluille perustamisella ei näytä olevan vaikutusta.
- ◆ Matalien taajuuksien vaimentaminen joko rataa kohdistuvin toimenpitein tai passiivisesti radan ulkopuolelle tehtävin toimenpitein on teknisesti ja taloudellisesti vähintäänkin hankalaa. Esimerkiksi 30 ... 50 %:n pienennys amplitudeissa edellyttää radan ulkopuolella pystysuuntaista vaimenninrakennetta, joka ulottuu kovaan pohjaan asti (käytännössä n. 20 m:n ja teoriassa n. 100 m:n syvyydelle).
- ◆ Rakennustavalla, -materiaaleilla ja rakennusten sijainnilla näyttäisi olevan huomattavasti suurempi vaikutus värinään kuin perustuksilla. Paaluperustus on tästä poikkeus.
- ◆ Alhaisilla kiihtyvyytasoilla ($0,010 - 0,10 \text{ m/s}^2$, taajuusalueella 3 – 10 Hz) savelle perustetut rakennukset eivät vaurioidu herkästi. Savialueilla värinää voidaan muuten vähentää suojarakenteilla. Värinän vaikutukset on kuitenkin tunnettava ennen rakentamista.
- ◆ Horisontaaliset liikkeet ovat yleisimpiä monikerroksisten puisten rakennusten ylimmissä kerroksissa.
- ◆ Yksikerroksiset rakennukset ovat värinäherkillä alueilla suositeltavampia kuin monikerroksiset. Kivi- tai betonirakenteet ovat parempia kuin puiset rakenteet.
- ◆ Tavarajunista aiheutuva pitkittynyt värinän kesto aiheuttaa resonanssia (huippuarvo jopa $0,25 \text{ m/s}^2$).
- ◆ Jos rautatie perustetaan paaluille, eliminoituu myös värinä lähes kokonaan. Toisaalta paaluperustus aiheuttaa riskin perustuksen horisontaaliseen liikkeeseen tietyissä tilanteissa.

- ◆ Periaatteessa suurempi nopeus aiheuttaa enemmän tärinää ainakin tietyillä taajuuksilla. Jos akselipaino on kaikissa vaunuissa sama ja myös akseliväli on sama, voi tärinä kumuloitua jopa hyvin paljon.
- ◆ Mallinnus pitäisi aina tehdä kolmiulotteisesti.
- ◆ Merkittävä tärinän vaimennus saadaan aikaan lisäämällä ratapenkereen massaa radikaalisti.
- ◆ Tärinään vaikuttavat rakennusten materiaalit, rakennustavat, kerrosten lukumäärä, perustusten tyyppi ja rakennusten sijainti.
- ◆ Tavarajunat aiheuttavat 5 - 15 mm/s tärinäarvoja savikoilla lähellä rataa taajuusalueella 5 - 7 Hz. Tyypilliset arvot henkilöjunille ovat 0,5 - 3 mm/s taajuusalueella 5 - 15 Hz.
- ◆ Kitkamaalajeilla tärinä on vähäistä, mutta taajuudet korkeahkoja.
- ◆ Rautatietärinän energiasisältö on korkea räjäytyksistä aiheutuvaan tärinään verrattuna, vaikka rautatietärinän taso on melko alhainen.
- ◆ Päälysrakenteessa horisontaaliset värähtelyt voivat olla 2-10 kertaa voimakkaampia kuin pohjarakenteissa. Vertikaaliset värähtelyt vahvistuvat hieman ylemmissä rakennuskerroksissa.
- ◆ Tärinän syntyminen on hyvin mutkikas prosessi. Kaikkia siihen vaikuttavia seikkoja ei vielä tunneta. Erityisesti maapohjan käyttäytymistä olisi syytä tutkia lisää.

6. PÄÄTELMÄT

Tämän kirjallisuustutkimuksen päätelminä voidaan raskaiden akselipainojen vaikutuksesta tärinään ja tärinän vaimentamiseen käytettävistä menetelmistä todeta seuraavassa esitetyt huomiot.

- Maanvaraisesti pehmeiköille perustettujen ratojen tärinä kasvaa pituusmassan kasvaessa.
- Raskaiden akselipainojen vaikutuksesta tärinän syntymisessä ei ole olemassa tutkimustuloksia. Yleisesti ollaan sitä mieltä, että akselipainojen kasvattaminen lisää tärinää, mutta kaikki tutkimustulokset eivät ole yhdenmukaisia.
- Paikallisiin tärinäolosuhteisiin vaikuttavat liikkuvan junakaluston ja ratapenkereen ominaisuuksien lisäksi muun muassa pohjaolosuhteet, rakennusten perustamis- ja rakennustavat ja myös materiaalit, kerrosten lukumäärä ja rakennusten sijainti.
- Rakennustavalla, -materiaaleilla ja rakennusten sijainnilla näyttäisi olevan huomattavasti suurempi vaikutus tärinään kuin perustuksilla. Paaluperustus on tästä poikkeus.
- Myös rautatien perustaminen paaluille eliminoi tärinän lähes kokonaan. Toisaalta paaluperustus aiheuttaa riskin perustuksen horisontaaliseen liikkeeseen tietyissä tilanteissa.
- Tärinän vaimentaminen tai sen leviämisen estäminen on yleensä parasta tehdä mahdollisimman lähellä tärinälähdettä.
- Tärinän vaimentamista suunniteltaessa on paikalliset olosuhteet tunnettava erittäin hyvin.
- Kaiken tärinän eliminoiminen on sekä taloudellisesti että teknisesti käytännössä mahdotonta.

7. JATKOTOIMENPITEET

Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä vaatii jatkotutkimusta, ongelma-alueiden kartoitusta ja kansainvälisten havaintojen seuranta. Ratahallintokeskus jatkaa tärinän selvitystyötä Ympäristöohjelmansa toimintasuunnitelman mukaisesti. Kansainvälisestä tutkimustoiminnasta seurataan erityisesti RENVIB II -projektin etenemistä. Suomessa jatketaan tärinäalueiden ja niiden laajuuden kartoitusta ja tehdään tarpeellinen määrä tärinämittauksia. Ongelmapaikoille suunnitellaan tarpeellisia tärinävaimennusmenetelmiä. Kesällä 1999 tehdään ratarakenteen instrumentoinnin yhteydessä Tärinämittauksia Kouvolan ja Korian välisellä rataosalla liittyen raskaiden akselipainojen tutkimusprojektiin.

LÄHDELUETTELO

1. Ahmad, S. & Al-Hussaini, T.M. Simplified Design for Vibration Screening by Open and In-Filled Trenches, Journal of Geotechnical Engineering, ISSN 0733-9410/91/0001-0067, Vol. 117, No. 1, Paper No. 25416 ASCE, 1991
2. Banverkets normer för Buller och Vibrationer, Banverket, 1997, 3s
3. Bengtsson, P.-E. Evaluation and Analyses of Measurements from the West Coast Line (Draft), High Speed Lines on Soft Ground, Banverket, Bansystem, Geoteknik, Borlänge 1998, 26s
4. Bodare, A. Haastattelu. Tukholma, KTH, Jord- och Bergmekanik, 25.1.1999
5. Den statistiska och dynamiska tåglastens inverkan vid stabilitetsanalyser - litteraturstudie och erfarenheter från Banverkets fältmätningar, Banverkets tekniska rapporter No 1994:2, Banverket 1994, 109s
6. Esveld, C. Modern Railway Track, ISBN 90-800324-1-7, W-Germany 1989, 446s
7. FoU-projekt vid Banverket HK-TB: Tåglastens inverkan vid stabilitetsanalyser, etapp III, Delrapport, januari 1996, Diarienummer: T91-1058/33, Banverket 1996, 62s
8. Gustafsson, C. Haastattelu. Termonova Oy, 2.2.1999
9. Hakulinen, M. Katsaus maadynamiikkaan, luento 24.11.1998 TKK / R
10. Hakulinen M. Tärinämittaus Ahjo 7.-10.4. ja 24.-27.4.1997, Mittausraportti, Geomatti Oy / VR-Rata Oy, 1997, 5s.
11. Hakulinen M. Tärinämittaus Jokela 1.-3.4.1997, Mittausraportti, Geomatti Oy / VR-Rata Oy, 1997, Mittausraportti, 5s.
12. Hakulinen M. Tärinämittaus Liminka 12.-15.5.1997, Mittausraportti, Geomatti Oy / VR-Rata Oy, 1997, Mittausraportti, 10s.
13. Hakulinen M. Tärinämittaus Nikkilä 25.-26.3.1997, Mittausraportti, Geomatti Oy / VR-Rata Oy, 1997, Mittausraportti, 5s.
14. Hall, L & Bodare, A. Prediction of frequency content in train induced ground vibrations based on a beam-on-Winkler-foundation model, KTH, Institutionen för jord och bergmekanik, 1999
15. Hall, L. Haastattelu. Tukholma, KTH, Jord- och Bergmekanik, 25.1.1999
16. Hannelius, L. Vibrationer från tung tågtrafik, Rapporter JoB No. 12, KTH, Inst. för jord och bergmekanik, 1978
17. Helsingin Sanomat, Asumista häiritsevä tärinä kasvanut ratojen ja teiden varsilla, 22.2.1999
18. Kalenoja, H. & Kallberg, H. Liikenteen energiankulutus, päästöt ja ympäristövaikutukset. TTKK, Liikenne ja kuljetustekniikka, Julkaisuja 30, Tampere 1998, 216s
19. Komulainen, H. & Törnqvist, J. Junaliikennetärinä, Loppuraportti, Tutkimusraportti nro 174/93, VTT, Tie- geo- ja liikennetekniikan laboratorio, 1993, 230s
20. Komulainen, H.& Törnqvist, J. Ratarakenteiden perustaminen Tottolan pehmeikölle, Junaliikenteen tärinä, Tutkimusraportti nro TGL 83B, VTT, Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio, 1992, 153s
21. Kähkönen, S. Haastattelut. ANSERI Konsultit Oy, 1998

22. Lindberg, G. Vågutbredning I jord - Analys och åtgärder, Vibrationer från tågtrafik, Tekn.lic.avhandling, KTH, Inst. för jord och bergmekanik, ISSN 1102-1861, Tukholma 1992, 91s
23. Metroradan tärinäeristeiden tutkimus, Loppuraportti, TR 1193-8, Suomen Akustiikkakeskus Oy, 1986
24. Muller-Boruttau, F. H. & Ebersbach, D. & Breitsamter, N. Dynamische Fahrbahnmodelle für HGV-Strecken und Folgerungen für Komponenten, ETR 47(1998), H. 11 November, s. 696-702
25. Myllymäki, P. Haastattelu. Helsingin kaupungin liikennelaitos, Ratapäällikkö, Raitiotie- ja metroradat, 29.1.1999
26. ORE, Question D151 / RP 10. Vibrations transmitted through the ground. Vibration isolation measures on open line: Effect of added track resilience, Utrecht 1986, 60s
27. ORE, Question D151 / RP 11. Anti-vibration measures for ballasted track in the open, Lineside vibration absorbers, Utrecht 1988, 63s
28. ORE, Question D151 / RP 2. Vibrations transmitted through the ground, An assessment of vibration countermeasures in current use, Utrecht 1982, 56s
29. ORE, Question D151 / RP 6. Vibrations transmitted through the ground, Study of the long term behaviour of various antivibration measures in the track, Utrecht 1984, 58s
30. ORE, Question D151 / RP 7. Vibrations transmitted through the ground, An experimental investigation of the effect of vibration on building elements, Utrecht 1984, 22s
31. ORE, Question D151 / RP 8. Vibrations transmitted through the ground, An investigation of resilient pads for ballasted track in Metro tunnels, Utrecht 1984, 35s
32. ORE, Question D151 / RP 9. Vibrations transmitted through the ground. Experimental study of factors influencing the vibration and re-radiated noise produced by underground railway traffic, Utrecht 1984, 44s
33. Radio Häme. Hausjärvellä kiusaa junien tärinästä, 17.02.1999
34. Rautatieliikennetärinän mittausohje. Vaikutusalueen laajuuden kartoitus, tärinän mittaus rakennuksissa, Ratahallintokeskuksen julkaisu B1, Tekninen yksikkö, ISBN 952-445-011-9, Ratahallintokeskus, 1998, 37s
35. Renvib II. Executive Summary, C926, ERRI, 1998
36. Zackrisson P. Vibrationsdämpningåtgärder, Banverket, 1998, 2s

Liite 1: Muut tutkimukset

KTH:ssa tutkitaan kahden väitöskirjan verran tärinän simulointia numeerisilla menetelmillä. Tuloksista voidaan varmasti saada hyötyä myös Suomen olosuhteisiin, vaikka raskaammat akselipainot eivät olekaan ensisijaisia tutkimuskohteita. /4, 15/

Ruotsalaisessa nopeita junia koskevassa tutkimuksessa ovat mukana monet eri tahot. Mallinnustietoa (maamekaniikka, numeerinen simulointi, TRAINVIB -ohjelmisto) on hyvin paljon esimerkiksi Christian Madshusilla Norjassa (NGI). Tämän nopeita junia koskevan tutkimuksen tämänhetkisenä päätelmänä voidaan todeta seuraavaa: maaperäolosuhteet, junan mittasuhteet ja massa ja junan nopeus ovat määräävässä asemassa kisko-ratapenger-maaperäsysteemin käyttäytymisessä. /3, 4/

Parhaillaan käynnissä olevassa RENVIB II -projektissa on kolme pääkohdetta. Ensimmäinen on selvittää tärinän ja tärinään liittyvän teknologian tämänhetkinen tila. Toinen ja kolmas kohde ovat tutkia niitä lyhyen ja pitkän aikavälin ongelmia, joita ensimmäisessä osassa on löydetty. RENVIB II -projektin tuloksista on varmasti hyötyä myös Suomessa. Esimerkiksi KTH:ssa tehdään RENVIB II -projektiin liittyen teoreettista (erittäin paljon) yksinkertaistettua mallia tärinän laskentaan. /35, 4, 15/

Liite 2: Tärinäkirjallisuutta

Tässä liitteessä luetellaan rautatietärinään liittyvää kirjallisuutta. Osaa teoksista on referoitu tässä kirjallisuustutkimuksessa ja osa on mukana yleisestä mielenkiinnosta. Erityisesti mahdollisia jatkotutkimuksia ajatellen tästä listasta voi olla hyötyä. Lista on järjestetty teosten nimien mukaisesti aakkosjärjestykseen. Teoksen tietojen jälkeen on lisätty myös tieto teoksen sijaintipaikasta ja mahdollisesta kontaktihenkilöstä.

- A literary survey of railway induced ground vibrations transmitted into buildings. Study report, publ. D96:3, Johan Johnsson, Chalmers tekniska högskola, 1996, ISSN 1400-7673 1 23, RHK, Pasi Leimi
- Anti-vibration measures for ballasted track in the open Lineside vibration absorbers, ORE, Question D151 / RP 11, Utrecht, 1988, 63s, VR Henrik Fagerholm
- Banverket, Renvib II ja muuta materiaalia, Banverket 1998, TKK/TIE, Matti Levomäki
- Banverkets normer för Buller och Vibrationer, Banverket, 1997, 3s, TKK/TIE, Matti Levomäki
- Den statiska & dynamiska tåglastens inverkan vid stabilitetsanalyser literaturstudie och erfarenheter från Banverkets fältmätningar, T91-1058/33, Borlänge, 1992, 146s, TKK/TIE, Matti Levomäki
- Den statiska och dynamiska tåglastens inverkan vid stabilitetsanalyser, Tekniska Rapporter No 1994:2, Banverket, 1994, 109s, RHK, Pasi Leimi
- Embankment Vibration Caused by Running Trains on Shinkansen, Quarterly Reports Vol. 18 No. 4 M. Nasu, T. Komine, Y. Yasuda, 1977, 6s, RHK, Pasi Leimi
- Evaluation and Analyses of Measurements from the West Coast Line (Draft) High Speed Lines on Soft Ground Per-Evert Bengtsson Banverket, Bansystem, Geoteknik, Borlänge, 1998, 26s, TKK/TIE, Matti Levomäki
- Hvordan gjør vi tiltak (=åtgärder) mot vibrasjoner Seminar i Borlänge, Norges Geotekniske Institutt, 1997, 48s, RHK, Pasi Leimi
- Jernbanestoy - Luftlyd Rapport R890 Matias Ringheim kilde Akustikk as, Voss, Norway, 1997, 16s, RHK, Kari Ojanperä
- Junaliikennetärinä Loppuraportti, Tutkimusraportti nro 174/93 H. Komulainen, J. Törnqvist VTT, Tie- geo- ja liikennetekniikan laboratorio, 1993, 230s, TKK/TIE, Matti Levomäki
- Kalk-cement-pel skjerm som tiltak ved Liersvingen NGI-rapport 983004-1 Jernbaneverket, 1998, Matti Levomäki
- Kiskokalustotekniikka /1993 Päästöt, Melu, Tärinä, Maankäyttö, Kari Pulli, 1993, 34s, RHK, Esko Sandelin
- Liikenteen energiankulutus, päästöt ja ympäristövaikutukset TTKK, Julkaisuja 30, H. Kalenoja, H. Kallberg, TTKK / Liikenne ja kuljetustekniikka, 1998, 216s, TKK/TIE, Matti Levomäki

- Markvibrationer genererade av tågtrafik Tågtrafikgenererade vibrationer - ett jordnära problem, Anders Bodare, Stocholm, 1997, 12s, RHK, Pasi Leimi
- Markvibrationer vid tågpassage i höga hastigheter - erfarenheter från Västra Regionen, Tågtrafikgenererade vibrationer - ett jordnära problem, Bo Andréasson J&W, Göteborg, 1997, 16s, RHK
- Measurement of railway induced building vibrations in Furet Publ. D96:3, Johan Johnsson, Chalmers tekniska högskola, 1996, ISSN 1400-7673, 59s, RHK, Pasi Leimi
- Metroradan tärinäeristeiden tutkimus Loppuraportti, TR 1193-8, Suomen Akustiikkakeskus Oy, 1986, HKL, Pentti Myllymäki
- Minimising Track Noise And Vibration, Track IRJ September 1997, International Railway Journal, 1997, ISSN 0744-5326, RHK/Arkisto
- Prediction Model for Low Frequency Vibration from High Speed Railways on Soft Ground, Journal of Sound and Vibration (1996) 193(1), C. Madshus, B. Bessason, L. Hårvik, Norwegian Geotechnical Institute, 1996, TKK/TIE, Matti Levomäki
- Prediction of frequency content in train induced ground vibrations based on a beam-on-Winkler-foundation model, L. Hall, A. Bodare, KTH, Inst. för jord och bergmekanik, 1999, 6s, TKK/TIE, Matti Levomäki
- Presentasjon av analyse og utverdering av målte vibrasjoner, Seminar i Borlänge, Norges Geotekniske Institutt, 1997, 36s, RHK, Pasi Leimi
- Pågående utvikling - i Norge, Seminar i Borlänge, Norges Geotekniske Institutt, 1997, 49s, RHK, Pasi Leimi
- Radan kiihtyvyyssmittaukset, Peräseinäjoki, Elokuu 1995, Raportti 1, TKK/LUJ, 1995, 28s, RHK, Kari Ojanperä
- Ratarakenteiden perustaminen Tottolan pehmeikölle Junaliikenteen tärinä, Tutkimusraportti nro TGL 83B, H. Komulainen, J. Törnqvist, VTT, Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio, 1992, 153s, TKK/TIE, Matti Levomäki
- Rautatieliikennetärinän mittaus, Muistio, RHK, 1998, 33s, RHK, Pasi Leimi
- Rautatieliikennetärinän mittausohje, Vaikutusalueen laajuuden kartoitus, tärinän mittaus rakennuksissa, Ratahallintokeskuksen julkaisuja B1, Tekninen yksikkö, Ratahallintokeskus, 1998, 952-445-011-9, 37s, RHK, Pasi Leimi
- RENVIB II, C 926, ERRI Projects for the UIC Research Committee (without EU funding), 1998, RHK, Pasi Leimi
- Renvib II Executive Summary, C926 ERRI 19 98 1 3 RHK Pasi Leimi
- Schwingungen von Schienen- und Strassenfahrzeugen, M. Mitschke, H. Helms ETR (24) 10, 1975, TKK/TIE, Matti Levomäki
- Schwingungen, die durch den Boden übertragen werden Auswirkungen der Schwingungen auf Gebäude und ihre Bewohner, Analyse und Kommentare zum Schrifttum, ORE, Frage D 151 / RP 4, Utrecht, 1982, 87s, VR, Henrik Fagerholm
- Schwingungen, die durch den Boden übertragen werden Durch Zugbetrieb in Gebäuden hervorgerufene Schwingen, Auswertung von Messberichten verschiedener Bahnen ORE, Frage D 151 / RP 5, Utrecht, 1983, 28s, VR, Henrik Fagerholm

- Schwingungen, die durch den Boden übertragen werden Schlussbericht über eine Untersuchung der durch den Eisenbahnverkehr erzeugten Bodenschwingungen, ORE, Frage D 151 / RP 12, Utrecht 1989, 54s, VR, Henrik Fagerholm
- Schwingungen, die durch den Boden übertragen werden Theoretische Voraussagen von Bodenschwingungen und Vergleiche mit experimentellen Resultaten, ORE, Frage D 151 / RP 3, Utrecht, 1983, 94s, VR, Henrik Fagerholm
- Schwingungen, die durch den Boden übertragen werden Vorstellung des Problems und Aufzeigen von Lösungswesen, ORE, Frage D 151 / RP 1, Utrecht 1981, 28s, VR, Henrik Fagerholm
- Simplified Design for Vibration Screening by Open and In-Filled Trenches, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, No. 1, Paper No. 25416 S., Ahmad, T. M. Al-Hussaini, ASCE, 1991, ISSN 0733-9410/91/0001-0067, TKK/TIE, Matti Levomäki
- Stress, Vibration and Noise Analysis in Vehicles, Applied Science Publishers, Edited by H.G. Gibbs and T.H. Richards, London, 1975, 0-85334-642-9, 485s, VR, Juha Tammisto
- Track. Performance requirements for fastening systems. Part 6: Special fastening systems for attenuation of vibration, Draft , CEN/TC 256/SC 1/WG 17 N262, 1998, 19s, RHK, Normikaappi
- Tåglastens inverkan vid stabilitetsanalyser, etapp III Delrapport, FoU-projekt vid Banverket, HK-TB, T91-1058/33, Banverket, 1996, 62s, TKK/TIE, Matti Levomäki
- Tärinämittaus Ahjo 7.-10.4. ja 24.-27.4.1997, Matti Hakulinen, Geomatti Oy / VR-Rata Oy, 1997, Mittausraportti, 5s, Geomatti Oy, Matti Hakulinen
- Tärinämittaus Jokela 1.-3.4.1997, Matti Hakulinen, Geomatti Oy / VR-Rata Oy, 1997, Mittausraportti, 5s, Geomatti Oy, Matti Hakulinen
- Tärinämittaus Liminka 12.-15.5.1997, Matti Hakulinen, Geomatti Oy / VR-Rata Oy, 1997, Mittausraportti, 10s, Geomatti Oy, Matti Hakulinen
- Tärinämittaus Nikkilä 25.-26.3.1997, Matti Hakulinen, Geomatti Oy / VR-Rata Oy, 1997, Mittausraportti, 5s, Geomatti Oy, Matti Hakulinen
- Vibrasjoner og stöt i byggverk - veiledende grenseverdier for vibrasjoner fra paeleramming, spunting, graving og lignende - innvirkning på konstruksjoner, NSF, Norsk Standard, 1998, 12s, TKK/TIE, Matti Levomäki
- Vibrasjonsdempende tiltak under eksisterende bane. Langsgående betongdragere. NGI-rapport 963015-1, Jernbaneverket, 1997, Matti Levomäki
- Vibration Behaviors of Roadbed on Soft Grounds under Train Load, QR of RTRI, Vol. 31, No. 1, '90. Feb M. Sunaga, E. Sekine, T. Ito, 1990, 7, RHK, Pasi Leimi
- Vibrationer från tung tågtrafik, Rapporter JoB No. 12, Lars Hannelius, KTH, Inst. för jord och bergmekanik, 1978, 410s, TKK/TIE, Matti Levomäki
- Vibrations transmitted through the ground, An assessment of vibration countermeasures in current use, ORE, Question D151 / RP 2, Utrecht, 1982, 56s, VR, Henrik Fagerholm
- Vibrations transmitted through the ground An experimental investigation of the effect of vibration on building elements, ORE, Question D151 / RP 7, Utrecht, 1984, 22, VR, Henrik Fagerholm

- Vibrations transmitted through the ground An investigation of resilient pads for ballasted track in Metro tunnels, ORE, Question D151 / RP 8, Utrecht, 1984, 35, VR, Henrik Fagerholm
- Vibrations transmitted through the ground Experimental study of factors influencing the vibration and re-radiated noise produced by underground railway traffic, ORE, Question D151 / RP 9, Utrecht, 1984, 44s, VR, Henrik Fagerholm
- Vibrations transmitted through the ground, Study of the long term behaviour of various antivibration measures in the track, ORE, Question D151 / RP 6, Utrecht, 1984, 58s, VR, Henrik Fagerholm
- Vibrations transmitted through the ground, Vibration isolation measures on open line: Effect of added track resilience, ORE, Question D151 / RP 10, Utrecht, 1986, 60s, VR, Henrik Fagerholm
- Vibrationsmätningar I Finland 1997, Exemplar av vibrationsmätningar gjord I Finland av Oy VR-Rata Ab, Kari Fagerholm, VR, 1998, 19s, TKK/TIE, Matti Levomäki
- Virkning på omgivelsene, Seminar i Borlänge, Norges Geotekniske Institutt, 1997, 27s, RHK, Pasi Leimi
- Wirkungen von Verkehrserschütterungen auf Erdbauwerke und ungebundene Tragschichten im Oberbau, R. Rump, B. Ehling, E. Rehfeld, ETR 45(1996), H. 7/8 Juli/August 1995, ISSN 0013-2845 485 491, RHK/Arkisto
- Vågutbredning I jord - Analys och åtgärder Vibrationer från tågtrafik, Tekn.lic.avhandling, Gunnar Lindberg, KTH, Inst. för jord och bergmekanik, 1992, ISSN 1102-1861, 91s, TKK/TIE, Matti Levomäki

- 1/1997 Railway Industry Structures and Capital Investment Financing
- 2/1997 Nopean junaliikenteen aluekehitysvaikutukset
- 3/1997 Rautateiden henkilöliikenteen ennustemalli (RALVI)
- 4/1997 Kilpailuedellytykset ja niiden luominen Suomen rataverkolla
- 5/1997 Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2020
- 1/1998 Rataverkon jatkosähköistytksen yhteiskuntataloudellinen vaikutus selvitys
- 2/1998 Suomen rautatieliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä (RAILI 96)
- 3/1998 Rautateiden tavarakuljetusten laatutekijät
- 4/1998 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämistoiminta 1997 - 99
- 5/1998 Rataverkon kehittämisen yhdyskuntarakenteellisten vaikutusten ja menetelmien arviointi
- 6/1998 Yksityisrahoituksen käyttömahdollisuudet Suomen ratahankeissa
- 1/1999 Ratarakenteen instrumentoinnin kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
- 2/1999 Rautatieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset

RATAHALLINTOKESKUS
KAIVOKATU 6, PL 185
00101 HELSINKI

TEKNINEN YKSIKKÖ

Lisätietoja: Pasi Leimi, puh. (09) 5840 5184, sähköposti: pasi.leimi@rhk.fi
Jakelu: Sinikka Kiikka, puh. (09) 5840 5192, sähköposti: sinikka.kiikka@rhk.fi

ISBN 952-445-019-4
ISSN 1455-2604