RAIDELIIKENTEEN TÄRINÄ- JA RUNKOMELUSELVITYKSIÄ SEKÄ VAIMENNUSRATKAISUJA

Timo Huhtala, Heikki Helimäki

Helimäki Akustikot
Temppelikatu 6 B, 00100 Helsinki
timo.huhtala@helimaki.fi

1 JOHDANTO

Raideliikenne aiheuttaa maaperään värähtelyä, joka maaperän välityksellä kytkeytyy rakennuksiin. Rakennuksessa värähtely voi ilmetä joko tärinänä, runkomeluna tai äärimmäisissä tapauksissa jopa rakenteellisina vaurioina. Asukas tai tilan käyttäjä aistii tärinän tuntoaistin välityksellä liikkeenä, kun taas runkomelu aistitaan kuuloaistin välityksellä matalataajuisena äänenä. Avoradoilla kuulijan on usein vaikeaa, ellei mahdotonta, erottaa runkomelun osuutta rakennuksen ulkovaipan läpi sisään siirtyneestä melusta. Tunnelissa kulkevan raideliikenteen rakennukseen tuottama runkomelu sen sijaan on helpommin tunnistettavissa, mikäli kuulija osaa yhdistää melun äänilähteeseen.

2 ARVIOINTIKRITEERIT JA OHJEARVOT

Suomessa ei toistaiseksi ole olemassa määräystasoisia vaatimuksia tärinä- tai runkomelutasoille. Sen sijaan VTT:n vuonna 2004 julkaisema *Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokittelusta* sisältää mittausohjeiden lisäksi suositukset tärinätasojen ohjearvoista [1]. Niitä täydennettiin vuonna 2006 ilmestyneellä julkaisulla *Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa*, jossa annettiin tarkempia ohjeita mm. kaavoitusvaiheen selvitysten tekemiseen [2]. Viime vuonna julkaistiin raportti *Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi*, joka antoi ohjeet siitä miten maaperästä mitattujen tärinätasojen avulla voidaan arvioida rakennuksessa saavutettavat tärinätasot [3]. Ohje ottaa taajuuskaistoittain huomioon tärinän siirtymisen maaperästä perustuksiin sekä voimistumisen rungossa ja lattiarakenteissa. Ohjeen mukaisen tarkastelun lopputuloksena tärinätasot arvioidaan erikseen vaakasuuntaisten mittaustulosten perusteella rakennuksen rungolle ja pystysuuntaisen värähtelyn perusteella lattioille.

Tärinän arviointikriteeriksi ohjeissa on esitetty tärinän tilastollista tunnuslukua, joka voidaan esittää joko kiihtyvyyden tai nopeuden suhteen. Tunnusluku määritellään 15 merkitsevimmän mittaustulokset perusteella kaavalla

$$a_{w,95} = \overline{a_w} + 1{,}8\sigma\,, \tag{1}$$

jossa $\overline{a_w}$ on 15 merkitsevimmän ohituksen standardin ISO 2631-2 mukaisesti taajuuspainotettujen kiihtyvyyssignaalien tehollisarvojen huippuarvoista laskettu keskiarvo ja σ näiden keskihajonta [4]. Tilastollisen tunnusluvun määritelmä on, että satunnaisesti mitattu ohitus ei 95% todennäköisyydellä ylitä kyseistä tunnuslukua. Kiihtyvyyden tunnusluvuille on annettu tärinän häiritsevyyden perusteella neljä raja-arvoa, joita voidaan käyttää erilaisten rakennustyyppien ja alueiden suunnittelun lähtökohtana.

Tunnusluvun mittauksissa VTT:n suositukset esittävät käytettäväksi yhden viikon mittaista seurantajaksoa vaikka suosituksen pohjana ollessa norjalaisessa standardissa NS 8176 on ar-

vioinnin perusteena käytetty huomattavasti lyhyempää mittausjaksoa [5]. Käytännössä ja viimeaikaisissa tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että myös lyhyemmän mittausjakson mukaisilla tuloksilla on mahdollista arvioida tärinähaitta luotettavasti. Erityisesti tämä pätee kohteissa, joissa liikennöinti toistuu päivittäin samanlaisena samalla kalustolla [6].

Runkomelun osalta vastaavassa laajuudessa ohjeistukset ovat osittain vasta tekeillä mutta vuoden 2009 alussa julkaistiin esiselvitys *Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi*, jossa esitettiin suositukset runkomelutasojen ohjearvoiksi [7]. Ohjearvojen lisäksi esiselvitys sisälsi yhdysvaltalaisiin laskentamalleihin perustuvan laskennallisen arviointimenetelmän [8], [9]. Laskennallisen arviointimenetelmän tarkkuus ei kuitenkaan ole lähellä mittausmenetelmällä saavutettavaa tarkkuutta, jolloin laskennallinen arvio soveltuu lähinnä yleiskaavatasolla tehtävään aluesuunnitteluun [7]. Kuitenkin jo ennen VTT:n esiselvitystä on alalla jo pitkään ollut vakiintuneena mittausmenetelmä sekä yleisesti sovelletut raja-arvot runkomelulle [10].

Esiselvityksessä VTT:n runkomelun arviointikriteeriksi on esitetty tilastollista runkomelutasoa L_{prm}, joka määritellään kaavalla

$$L_{prm} = L_{pAS\max,mean} + 1{,}65 * s\,, \tag{2}$$

jossa $L_{pASmax,mean}$ on A-taajuuspainotusta ja slow-aikapainotusta käyttämällä määritettyjen enimmäisäänitasojen keskiarvo ja s on näiden standardihajonta. Runkomelutason määrittämisessä tulee käyttää vähintään viiden ohituksen mittaustulosta kolmelta tiheimmin liikennöivältä liikennevälinetyypiltä. VTT on määritellyt erilaisia rakennustyyppejä, kuten asuinhuoneistoja, majoitustiloja, oppilaitoksia ja toimistoja varten ohjearvoja sallittavalle runkomelutasolle.

3 VAIMENNUSRATKAISUT

Värähtelyn etenemistä lähteestä kohteeseen voidaan vähentää erilaisilla vaimennusratkaisuilla, jotka voidaan sijaintinsa perusteella jakaa kolmeen eri luokkaan. Värähtelylähteeseen vaikuttavia ratkaisuja ovat muun muassa väylän kunnossapito, liikennöivä kalusto, liikennöintinopeus, väylän perustamistapa sekä erilaiset väylän yhteyteen sijoitettavat eristinratkaisut. Yleensä värähtelylähteeseen vaikuttavat ratkaisut tulevat kysymykseen uuden väylän rakentamisen tai olemassa olevan väylän peruskorjauksen yhteydessä. Lähteeseen vaikuttavien ratkaisuiden olennainen etu on kuitenkin, että ne vaikuttavat tärinä- ja runkomelutasoihin yleensä kaikkialla väylän ympäristössä.

Siirtymäreitillä eli maaperässä vaikuttavat ratkaisut perustuvat maaperän akustisen impedanssin muutokseen, joka pyritään saamaan aikaan esimerkiksi stabiloimalla pehmeä savikerros kalkki-sementtipilareiden avulla. Siirtymäreitille suunniteltavien vaimennusrakenteiden puutteena on, että ne tulee sijoittaa yleensä huomattavan pitkälle matkalle lähelle lähdettä tai vaihtoehtoisesti lähelle suojattavaa kohdetta, jolloin niiden vaimennusvaikutus saavutetaan vain suojatussa kohteessa. Lisäksi niillä saavutettavan taajuuskaistaisen vaimennuksen arvioiminen etukäteen sekä pysty- että vaakasuuntiin on jossain määrin epätarkkaa. Kuitenkin tietyissä tapauksissa myös siirtymäreitille vaikuttavat vaimennusmenetelmät voivat tulla kysymykseen. Tällaisia tapauksia ovat muun muassa tilanteet, joissa sekä kohde ja väylä ovat jo olemassa eikä niiden ominaisuuksiin pystytä vaikuttamaan tai uuden, joka tapauksessa stabiloitavan väylän rakentaminen lähteen ja kohteen välille.

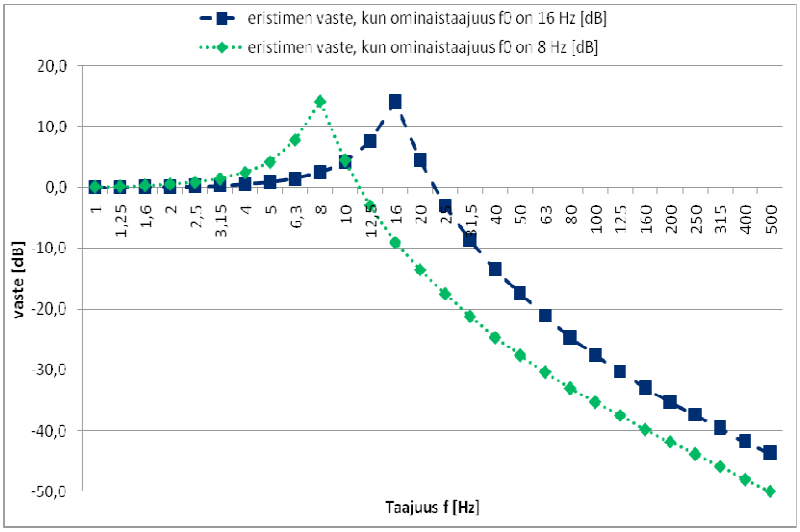
Yleisin käytännön suunnitteluongelma on tilanne, jossa jo olemassa olevan väylän läheisyyteen kaavoitetaan uusi rakennusalue tai rakennetaan uusi rakennus. Tällöin vaimennusratkai-

suna käytetään itse kohteeseen sijoitettavia tärinäneristimiä. Eristimien etuna on, että niillä saavutetaan yleensä hyvä vaimennus ja järjestelmän vaste on taajuuskaistoittain laskennallisesti arvioitavissa suunnittelun kannalta riittävällä tarkkuudella. Vaimennusratkaisujen lisäksi rakennuksien tärinän ja runkomelun hallinnan kannalta oleellista on lisäksi välttää värähtelyn voimistumista rakenteissa resonanssin seurauksena.

4 RAKENNUKSIIN SIJOITETTAVAT VAIMENNUSRATKAISUT

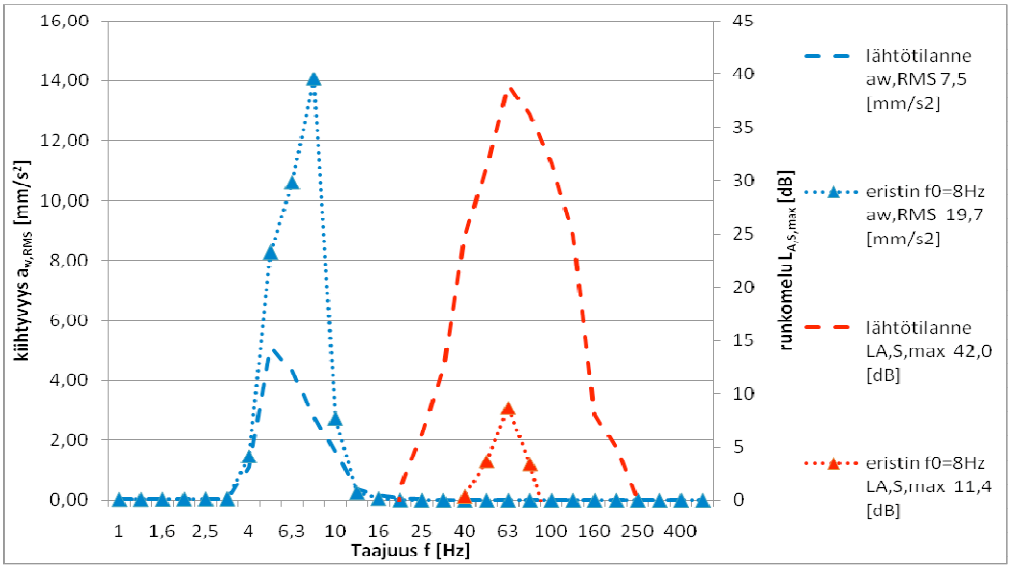
4.1 Rakennuksiin sijoitettavien vaimennusratkaisuiden suunnittelu

Kohteeseen sijoitettavat eristimet ovat yleensä joko eripaksuisia joustavia materiaalikerroksia, jotka asennetaan joko rakenteen koko pinnalle, kaistoina tai pisteittäin. Vaihtoehtoisesti eristäminen voidaan toteuttaa teräsjousilla. Kaikissa tapauksissa eristin jakaa rakennuksen eristämättömään ja eristettyyn osaan, joita voidaan yksinkertaistettuna ajatella jousi-massajärjestelmänä. Tällöin järjestelmä voimistaa värähtelyä, joka on ominaistaajuuden ympäristössä ja ominaistaajuutta vähintään $\sqrt{2}$ kertaa korkeampi värähtely puolestaan vaimenee (vrt. kuva 1).

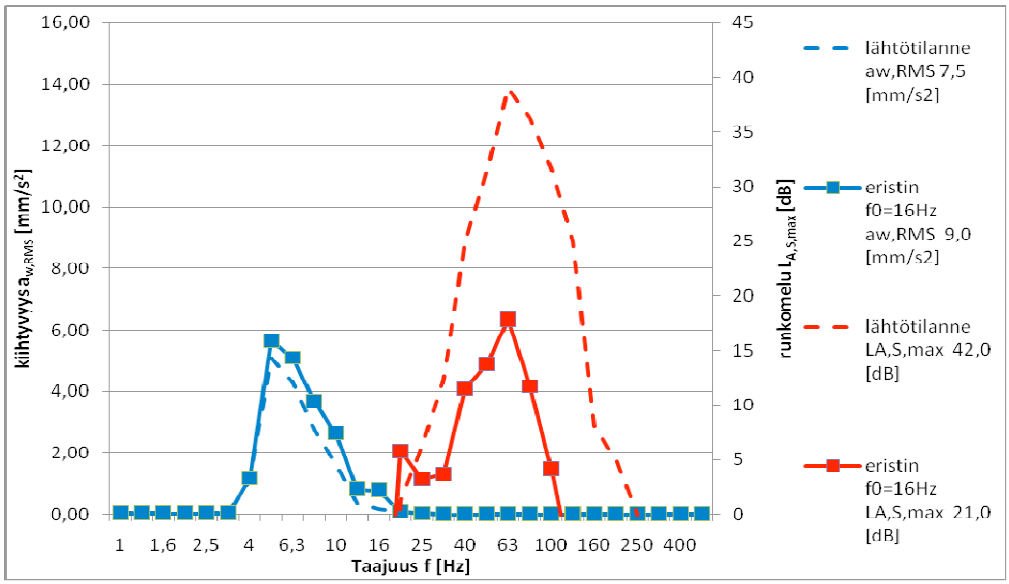


Kuva 1. Yksinkertaisen jousi-massajärjestelmän vaste kun ominaistaajuus on 8 Hz tai 16 Hz.

Kuvissa 2 ja 3 on esitetty mitatut tärinä- että runkomelutasot eräästä kohteesta lähtötilanteessa sekä laskennallisesti arvioituna molemmilla kuvan 1 mukaisilla eristimillä. Kohteessa lähtötilanteessa runkomelutaso $L_{A,S,max}$ = 42dB (tavoite $L_{A,S,max} \leq$ 35dB) ja tärinätaso $a_{w,RMS}$ = 7,5 mm/s^2 (tavoite $a_{w,RM\ S} \leq$ 7,5 mm/s^2) eli runkomelu ylittää tavoitetason kun taas tärinä ei lähtötilanteessa ole ongelma. Kuvat 2 perusteella voidaan havaita, että eristimen ominaistaajuuden ollessa 8 Hz runkomelu on vaimentunut huomattavasti ja täyttää tavoitetason mutta tärinä on voimistunut eristimen ominaistaajuuden ympäristössä ja se ylittää tavoitetason huomattavasti. Kun eristimen ominaistaajuus on 16 Hz (kuva 3) täyttävät sekä runkomelu että tärinä tavoitetasot. Vaihtoehtoisesti eristimen ominaistaajuus voitaisiin mitoittaa tärinän merkitsevimpien taajuuksien alapuolelle esim. 3,5 Hz, jolloin sekä tärinä- että runkomelutasoilla saavutettaisiin vaimennusta. Tämä johtaa kuitenkin taloudellisesti kalliimpaan vaimennusratkaisuun.



Kuva 2. Mitatut tärinä- ja runkomelutasot eräässä kohteessa sekä vastaavat suureet laskennallisesti arvioituna, kun eristimen ominaistaajuus on 8Hz.



Kuva 3. Mitatut tärinä- ja runkomelutasot eräässä kohteessa sekä vastaavat suureet laskennallisesti arvioituna, kun eristimen ominaistaajuus on 16Hz.

Eristinratkaisuja suunniteltaessa tulee lisäksi ottaa huomioon, että ratkaisulla on pystysuuntaisen ominaistaajuuden lisäksi myös vaakasuuntainen ominaistaajuus. Lisäksi eristinten ominaistaajuuksien osuminen rungon tai lattioiden ominaistaajuuksien kanssa samalle alueelle voi johtaa hallitsemattomaan yhteisvaikutukseen. Varsinaisten vaakasuuntaisten eristinratkaisuiden lisäksi tulee rakennesuunnittelussa detaljitasolla varmistua, että eristetystä rakennuksen osasta ei ole yhtään äänisiltaa eristämättömään osaan tai maaperään. Käytännössä tämä koskee esimerkiksi kaikkia maanpaineseiniä sekä LVIS-asennuksia, jotka tulee suunnitella tapauskohtaisesti kulloinkin kysymyksessä olevan järjestelmän vaatimusten mukaisiksi. Eristinratkaisuiden suunnittelun tulee aina perustua taajuuskaistaisiin mittaustuloksiin, jotta voidaan varmistua siitä, että tärinä- ja runkomelutasot todella pysyvät hallinnassa.

4.2 Teräsjousin toteutettu kohde

Raideliikenteen aiheuttama tärinä- ja runkomeluriski arvioitiin maankäytön suunnitteluvaiheessa mittauksin. Tulosten perusteella runkomelutaso ylitti ja tärinätaso alitti tavoitearvot. Eristinratkaisun suunnittelussa tärinätasot tuli kuitenkin ottaa huomioon siten, että tärinää ei kohtuuttomasti voimistettaisi lähtötasoltaan. Kohde suunniteltiin eristettäväksi teräsjousin ja järjestelmän ominaistaajuudeksi mitoitettiin alhaisemmaksi kuin tärinän ja runkomelun kannalta merkitsevimmät taajuudet. Näin saavutettiin vaimennusta sekä lähtötilanteen tärinä- että runkomelutasoihin. Teräsjousielementtien asennukset on suunniteltu siten, että ne voidaan tarvittaessa vaihtaa (kuva 4).

Kuva 4. Teräsjousiin perustuvat eristinelementit asennettuna autohallin pilareiden yläpäihin. Taustalla maanpaineseinä, joka ei tukeudu yläpuoleiseen eristettyyn rakennuksen osaan. Kuvan oikeassa reunassa näkyvässä viemärilinjassa on joustoliitin, jolla estetään äänisilta eristyksen rajalla.

4.3 Eristinkaistoin toteutettu kohde

Suunnitteluvaiheessa tarkistettiin maaperästä tehdyin mittauksin tärinä- ja runkomelutasot kohteessa. Tulosten perusteella runkomelu ylitti, mutta tärinä alitti tavoitetasot. Eristinratkaisuiden suunnittelussa tärinän kohtuutonta voimistamista tuli kuitenkin välttää. Eristinratkaisu mitoitettiin kuvan 3 periaatetta noudattaen siten, että eristinratkaisun ominaistaajuus jäi korkeammalle kuin tärinän kannalta merkitsevimmät taajuudet mutta selkeästi alemmas kuin runkomelun kannalta merkitsevät taajuudet. Näin tärinän kohtuuton voimistuminen vältettiin tinkimättä kuitenkaan oleellisesti runkomelun vaimennuksesta.

4.4 Eristinkaistoin toteutettu kohde, jossa lisävaimennus stabiloinnilla

Kohteessa tehtiin ensimmäiset lyhyet arviointimittaukset kaavoitusvaiheessa. Suunnittelun käynnistyessä jo varhaisessa vaiheessa tehtiin tarvittavat tarkennusmittaukset, joiden perusteella varmistettiin suojaetäisyydet kaukaisempien rakennusten osalta sekä määritettiin eristinratkaisulta vaadittavat taajuuskaistaiset vaimennusominaisuudet. Mittaustulosten perusteella sekä tärinä että runkomelu ylittivät tavoitetasot. Koska rautatietä lähimpien rakennusten ja radan väliin oltiin rakentamassa uutta liikenneväylää, jonka osalta maaperä tultiin stabiloimaan, päätettiin normaalia stabilointirakennetta muuttaa siten, että sillä saavutettiin vaimennusta tärinätasoihin myös rakennusten osalta. Stabiloinnilla saatava lisävaimennus mahdollisti kohteen toteuttamisen taloudellisesti halvemmalla eristinratkaisulla. Eristinratkaisu mitoitettiin ottamalla huomioon tärinän ja runkomelun kannalta merkitsevimmät taajuudet, jolloin periaate noudatti kuvassa 3 esitettyä periaatetta. Hankkeen yhteydessä olemme käynnistäneet

tutkimusprojektin yhteistyössä Ratahallintokeskuksen, NCC Rakennus Oy:n ja YIT Rakennus Oy:n kanssa. Tavoitteena on selvittää stabilointirakenteen vaikutus kohteessa sekä eristinratkaisuilla saavutettava vaimennus kohteessa.

4.5 Huone huoneessa –ratkaisulla eristetty kohde

Kohteen tärinä- ja runkomelutasot arvioitiin laskennallisesti kaavoitusvaiheessa ja suunnitteluvaiheessa arviointia tarkennettiin maaperästä tehdyin mittauksin. Mittaustulokset tukivat aiempaa arviota, jonka perusteella tärinä alitti, mutta runkomelu osittain ylitti tavoitetasot. Tässä tapauksessa ei ollut vaaraa tärinän liiallisesta voimistumisesta rakenteissa tai mahdollisten eristinratkaisujen seurauksena. Ilman taajuuskaistaisia mittaustuloksia ei kohteessa tarvittavia vaimennusratkaisuja kuitenkaan pystyttäisi suunnittelemaan luotettavasti. Kohteessa rakennusmassa on kohtisuoraan metrorataa vasten ja rataa lähimmässä osassa rakennusta tilojen eri käyttötarkoituksista johtuen sovelletaan erilaisia runkomelutasovaatimuksia. Teknistaloudellisesti paras ratkaisu oli suojata kriittiset huonetilat runkomelua vastaan tekemällä huoneisiin kaksinkertaiset rakenteet eli ns. huone huoneessa –ratkaisu. Tällöin käytännössä tilan lattia-, katto- ja seinärakenteet on irrotettu rakennuksen rungosta eristimiä käyttäen.

VIITTEET

1. Talja, A, *Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta*. VTT tiedotteita 2278. Espoo 2004.
2. Törnqvist J & Talja A, *Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa*. VTT Working Papers 50. Espoo 2006.
3. Talja A, Vepsä A, Kurkela J & Halonen M, *Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi*. VTT tiedotteita 2425. Espoo 2008.
4. ISO 2631-2. *Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)*. International Organisation for Standardization. Geneve 2003.
5. NS 8176.E. *Vibration and Shock – Measurement of vibration in buildings from landbased transport and guidance to evaluation of its effects on human beings*. Byggstandardiseringsråd 1999.
6. Huhtala T, *Mittausjakson pituuden vaikutus maaperästä mitatun raideliikenteen värähtelyn asuntoihin aiheuttaman haitan arvioinnissa*. Helsinki 2006.
7. Talja A & Saarinen A, *Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi*. Esiselvitys, VTT tiedotteita 2468. Espoo 2009.
8. Federal Railroad Adminstration. U.S, Department of Transportation. Report HHMH No. 2936304. *Highspeed ground transportation. Noise and vibration impact assessment*. Washington 2005.
9. Federal Transit Administration. U.S, Department of Transportation, Office of Planning and Environment. Report FTAVA90100306. *Transit noise and vibration impact assessment*. Washington DC 2006.
10. Peltonen T, Backholm M & Lahti T, Raideliikenteen melu- ja tärinätutkimuksia. *Akustiikkapäivät 2005*, 26.-27.2005, Kuopio, 135-140.
11. Getzner Werkstoffe GmbH. *Ballast mats - Sylomer- ja Sylodyn-tuote-esite*.