

Iiro Palosara

RAITIOVAUNUKALUSTON KAARREMELU TAMPEREELLA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Joulukuu 2023

TIIVISTELMÄ

Iiro Palosara: Raitiovaunukaluston kaarremelu Tampereella
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Joulukuu 2023

Tässä opinnäytetyössä perehdytään kaarremeluun ilmiönä, tuodaan ilmi havaintoja Tampereen raitiotieltä ja verrataan havaintoja olemassa olevaan tietoon juurisyiden selvittämiseksi. Työn tarkoituksena on toimia suuntaa antavana taustatyönä kaarremelun vähentämiseksi Tampereella ja se on tehty Skoda Transtech Oy:n ja Tampereen Raitiotie Oy:n käyttöön.

Kaarremelun esiintymiseen vaikuttavat kiskon pinnan karheus ja pyörän kunto, näiden välisen kontaktin kitka sekä ratageometria. Kaarremelu johtuu yleisimmin vierintäpinnan stick-slip-ilmiöstä ja laippakontaktista. Kaarremelua voidaan hillitä muun muassa pienentämällä kiskon ja pyörän kontaktin kitkaa voiteluaineilla tai akustisella hionnalla.

Tampereen rataverkolla havaittiin kiskojen pinnassa huomattavaa karheutta ja kulumista. Kiskohiomakoneen hiomajälki on karkea ja se on noin 45 asteen kulmassa kiskojen kulkusuuntaan nähden. Ruskonkehän alikulkutunnelin edustalla suoritettiin kaksi mittausäänitystä eri sääolosuhteissa, joiden tarkoituksena oli kerätä äänidataa kaarremelun äänistä tarkempaa analyysiä varten. Mittausäänityksistä saadun datan perusteella kaarremelun juurisyinä mittauspaikassa ovat rullauksesta ja kiskon selästä johtuvat äänet, jotka ovat suoraan verrannollisia kiskon selän karheuteen. Samassa paikassa havaittiin laippakontaktista syntyvää korkeataajuista kirskunääntä.

Kaarremelun eliminoimiseksi Tampereen raitiotiellä suositellaan suoritettavan rataverkon kattava mittausäänitys, jotta ongelmakohtat voidaan paikantaa kartalle. Ongelmakohtien ollessa tiedossa on suositeltavaa suorittaa paikkakohtaiset mittaukset äänien ja kiskojen kunnan osalta. Kaarremelun paikkariippuvaisuuden vuoksi toimenpide on edellytyksenä ongelman tehokkaalle ratkaisemiselle. Tämän jälkeen on mahdollista harkita korjaavia toimenpiteitä, joita ovat muun muassa hiontakarkeuden pienentäminen, paikallisen voitelun lisääminen ongelmapaikoissa sekä tarvittaessa ratageometrian parantaminen.

Avainsanat: Tampereen raitiotie, kaarremelu, laipan kirskunääntä, stick-slip-ilmiö

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Iiro Palosara: Curve noise from tram rolling stock in Tampere
Bachelor's Thesis
Tampere University
Bachelor's Programme Mechanical Engineering
December 2023

In this thesis, the study explores the phenomenon of curve squeal noise, presents observations from the Tampere tramway and compares them with existing knowledge to identify the root causes. The aim of the thesis is to serve as an orientation background work for the reduction of curve squeal noise in Tampere and it has been prepared for Skoda Transtech Oy and Tampereen Raitiotie Oy.

The occurrence of curve squeal noise is influenced by the roughness of the rail surface and the condition of the wheel, the friction of the contact between them and the track geometry. Curve noise is most commonly caused by the stick-slip effect of the rolling surface and flange contact. Curve noise can be reduced by reducing the friction between the rail and wheel contact by lubricants or acoustic grinding.

Significant roughness and wear was observed on the surface of the rails on the Tampere tramway. The grinding mark of the rail grinder is rough and is at an angle of about 45 degrees to the direction of the rails. Two measurement recordings were performed in front of the Ruskonkehä underpass tunnel under different weather conditions to collect sound data of the curve noise for further analysis. The data obtained from the recordings indicate that the root causes of the curve noise at the measurement location are the rolling noise and the noise from the top of the rail, which are directly proportional to the roughness of the top of the rail. At the same location, high frequency squealing from the flange contact was observed.

In order to eliminate curve noise on the Tampere tramway, it is recommended to carry out a comprehensive measurement recording of the railway network in order to locate the problem areas on a map. If the problem areas are known, it is recommended to carry out site-specific measurements of the noise and the condition of the rails. Given the spatial dependence of curve noise, this measure is a prerequisite for an effective solution to the problem. It is then possible to consider corrective measures such as reducing the grinding roughness, increasing local lubrication at the problem areas and, if necessary, improving the track geometry.

Keywords: Tampere tramway, curve squeal noise, flanging noise, stick-slip phenomenon

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. KAARREMELU ILMIÖNÄ.....	2
2.1 Pyörän laipan ja vierintäpinnan värähtely	2
2.2 Kiskon karheuden vaikutus	2
2.3 Pyörän profiilin ja ratageometrian vaikutus.....	3
3. KAARREMELUN HILLINTÄ	5
3.1 Voitelujärjestelmät liikkuvassa kalustossa	5
3.2 Kiskojen voitelu	6
3.3 Akustinen hionta	7
4. TAMPEREEN RAITIOTIEN KALUSTO JA KUNNOSSAPITO	9
4.1 Raitiovaunun laipanvoitelu ja pyörän profiili.....	9
4.2 Radan huolto ja kunnossapito	11
5. KAARREMELUN ÄÄNITYS JA ÄÄNIEN SPEKTRIN ANALYSOINTI	13
5.1 Mittausjärjestelyt ja mittauspaikka 10.11.2023	13
5.2 Mittausjärjestelyt ja mittauspaikka 16.11.2023	15
5.3 Äänien analysointi	16
6. YHTEENVETO JA SUOSITUKSET	20
LÄHTEET	21

1. JOHDANTO

Raitiovaunun kaarremelu on ympäri maailmaa tunnettu ongelma. Urbanissa kaupunkiympäristössä kiskokaluston melu aiheuttaa merkittävää haittaa verrattuna esimerkiksi junaliikenteen meluun taajaman ulkopuolella. Aamulehden Moro -liitteessä 13.9.2023 julkaistussa artikkelissa "Tampereen ratikasta tuli yllättävä ympäristöhaitta Hervantaan" kerrotaan raitiovaunun kirsukumisäänien aiheuttavan merkittävää meluhaittaa raitiotien läheisyydessä asuville. Tampereen Raitiotie Oy etsii ratkaisuja meluhaittojen vähentämiseksi.

Tässä työssä perehdytään lyhyesti ilmiöihin kirsunnan taustalla, tutkitaan ongelman ilmenemisen syitä erityisesti Tampereen raitiotiellä ja esitetään mahdollisia keinoja meluhaittojen eliminoimiseksi. Tämän työn tarkoituksena on toimia taustatyönä meluhaittojen syiden kartoittamiseksi ja pienentämiseksi Tampereen raitiotieverkossa.

Työn alussa tutustutaan kaarremeluun ilmiönä kirjallisuusselvityksen muodossa keskittyen erityisesti pyörän laipan ja vierintäpinnan värähtelyyn sekä pyörän kartion ja ratageometrian merkitykseen kaarremelun synnyssä. Seuraavaksi työssä esitellään erilaisia ratkaisuja kaarremeluhaittojen hillitsemiseksi. Kirjallisuusselvityksen jälkeen työssä esitellään havaintoja Tampereen raitiotien radasta ja käytettävästä kalustosta, analysoidaan kaarremeluaäniä radalla suoritettujen mittausäänitysten tulosten perusteella ja verrataan tuloksia aiempaan tietoon.

2. KAARREMELU ILMIÖNÄ

Kiskokaluston korkeaäänistä kirsuntaa kaarteessa kutsutaan kaarremeluksi. Kaarremelua syntyy erityisesti pyörän laipan ja pyörän kosketuspinnan osuessa kiskoon. (Rinne 2016, s. 34) Korkeataajuinen kirskuva ääni koetaan usein epämiellyttävänä meluna.

2.1 Pyörän laipan ja vierintäpinnan värähtely

Pyörän laipan tehtävänä on ohjata kaarteessa ulompaa pyörää muuttamaan suuntaa kaarteeseen mukaisesti. Laipan ja kiskon välinen kitka saa pyörän värähtelemään korkealla taajuudella, joka kuuluu kirsuntana. Sisäkaarteessa olevalla pyörällä ei ole laippakontaktia, mutta jyrkissä kaarteissa kiinteän akselin sekä sisemmän ja ulomman kiskon eriävän muutosnopeuden takia se on alttiina liukumiselle kiskon pintaa vasten. Kiskon ja pyörän välinen kitka vastustaa liikettä, jolloin pyörä takertuu kiskon pintaan. Kun pyörän ja kiskon välinen jännitys ylittää tietyn rajan, pyörä irtoaa äkillisessä rekyyliliikkeessä. Tämä tapahtuu jaksoittain ja johtaa pyörien värähtelyyn. Tätä ilmiötä kutsutaan Stick-slip-ilmiöksi. (Panulinova ja Harabinova 2013)

Näillä melun eri syntymekanismeilla on eri taajuudet. Laipasta johtuvien äänien taajuus on 5 000–10 000 Hz ja kiskon selän sekä pyörän vierintäpinnan kontaktista johtuvan äänen taajuus on 1 000–5 000 Hz. (Eadie et al. 2005, s. 1149) Molemmissa tapauksissa kyse on metallisten pyörien ja metallisen kiskon välisen rajapinnan kitkasta.

2.2 Kiskon karheuden vaikutus

Kiskon karheudella on oleellinen vaikutus pyörän ja kiskon selän väliseen kitkaan. Kiskon karheutta lisääviä tekijöitä ovat esimerkiksi kiskon kuluminen, epäpuhtaudet, korrosio, hiekka sekä vääränlainen kiskon hionta.

Kiskon kuluessa kiskonselässä saattaa esiintyä korrugaatiota eli aaltoilua. Rajaramin et al. (2016, s. 59) mukaan kuluneella kiskon pinnalla, jolla esiintyy aaltoilua, äänitasot voivat olla jopa 20 dB korkeampia kuin tasaisella kiskon pinnalla.

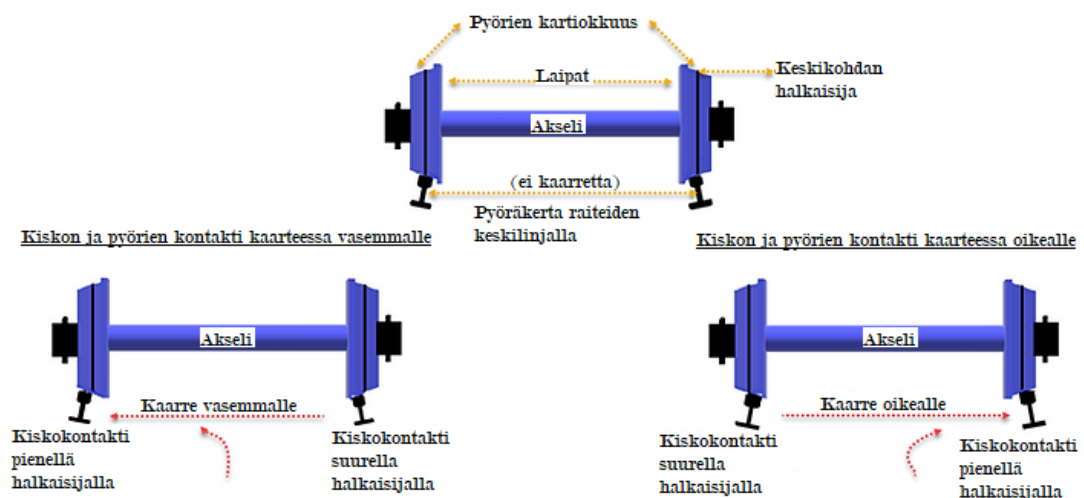
Perinteisesti kiskon hionnalla pyritään puhdistamaan kiskon pinta epäpuhtauksista ja poistamaan mahdollisesti syntyneet halkeamat. Junaliikenteessä meluhaitat ovat kuitenkin vähäisempi huolenaihe kuin kaupunkiympäristössä, jolloin hiontajälki on usein karkeampi. Tilanteessa, jossa kevyen joukkoliikenteen kiskot hiotaan samalla tavalla kuin junapuolella, melutasot voivat melun vähentämisen sijasta nousta. (Rajaram et al.

2016 s. 59) Hiontajälkeen vaikuttavat hiontakivien karheuden lisäksi myös hiomissuunta ja hiontalaitteiston kunto.

Hölttä (2009, s. 83) toteaa tutkimuksensa perusteella junaradan melun muuttuneen hionnan seurauksena korkeampitaajuiseksi. Mittauksista havaittiin, että ujeltavan äänen taajuuden ja sen monikertojen aiheuttajaksi tunnistettiin säännöllinen värinäjäлки, joka johtui pyörivien hiomakivien epätasapainosta, epätasaisesta kulumisesta tai muista vastaavista syistä. Värinäjäлки ja karkeudet tasoittuvat liikenteen kulutuksessa, mutta kevyellä henkilöliikenteellä tasoittuminen kestää kauemmin kuin rautatiekalustolla. (Hölttä 2009, s. 83–84)

2.3 Pyörän profiilin ja ratageometrian vaikutus

Pyöräkerrassa, jossa on jäykkä akseli, molemmat pyörät pyörivät aina samalla nopeudella. Kaarteessa ulomman ja sisemmän kiskon välistä eriävää muutosnopeutta kompensoi pyörän kartiomainen profiili, jossa pyörän vierintäpinnan halkaisija pienenee laipan juuresta ulkoreunalle edetessä. Kaarteen ulkokiskolla olevan pyörän halkaisija on suurempi kuin sisäkiskolla olevan pyörän halkaisija (kuva 1).

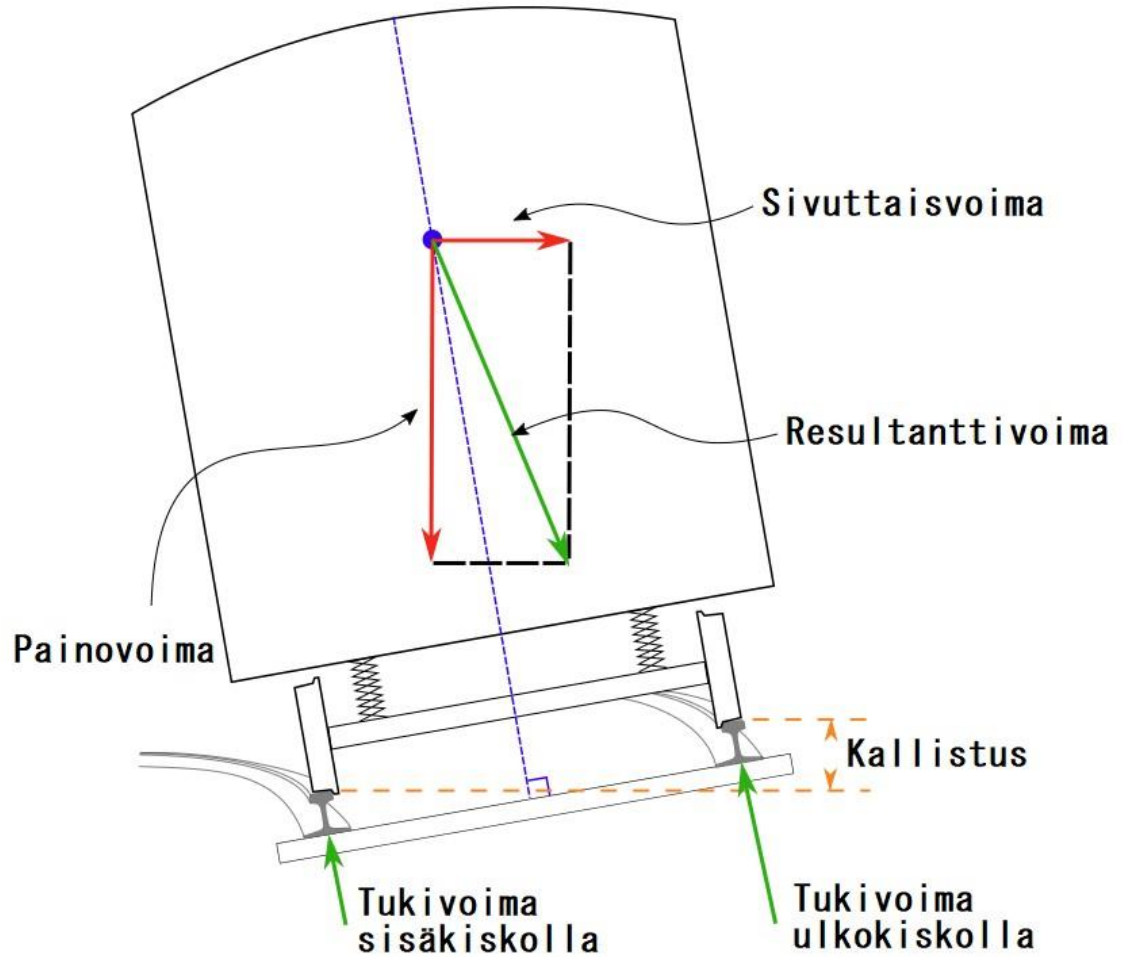


Kuva 1 Pyörän kartiokkuus, muokattu lähteestä (Influx Big Data Solutions Pvt Ltd 2022)

Pyörän profiilin kuluessa kuopalle profiilin kartiokkuus menetetään, jolloin pyörän halkaisijan muutos ei enää kompensoi riittävästi sisä- ja ulkokiskon eriävää muutosnopeutta. Näin ollen pyöräkerta, jonka pyöränprofiilit ovat kuluneet, on kaarteessa alttiimpi stick-slip-ilmilölle.

Piiroisen (2010, s. 28) mukaan radan kallistuksella on merkittävä vaikutus laippakontaktin. Kaarteeseen ajettaessa kiskokaluston kuorma pyrkii painautumaan

ulkokaarretta kohti, jonka seurauksena pyörän laippa hankaa sivuttaisvoimien ansiosta kiskoon. Radan kallistuksella, jossa ulkokiskoa korotetaan, pyritään muuttamaan sivuttaisvoimia alaspäin suuntautuviksi voimiksi (kuva 2), jolloin laippa ei tavoita kiskoa eikä hankausta pääse syntymään. (Piiroinen 2010, s. 28)



Kuva 2 Radan kallistus, muokattu lähteestä (Levy 2021)

3. KAARREMELUN HILLINTÄ

Kaarremelun torjumiseksi on kehitetty historian kuluessa useita eri menetelmiä, jotka kaikki liittyvät kitkan vähentämiseen pyörän ja kiskon välillä. Näistä tyypillisimpiä keinoja ovat pyörän laipan sekä kiskojen voitelu. Kaupunkiympäristössä kevyen raideliikenteen meluhaittoja on nykyisen tutkimustiedon perusteella alettu eliminoidaan myös niin kutsutulla akustisella hionnalla, jossa kiskon pinta pyritään saamaan mahdollisimman sileäksi. Eadien et al. (2016, s. 1153) mukaan metro- ja raitiovaunukaluston kiskonpäällisen kitkan hallinnalla on mahdollista ratakohtaisesti eliminoida sekä kiskon päällinen kirs kunta että korkeampitaajuinen laipan kirs kunta kokonaan.

Laipan ja kiskon välisen kontaktin voitelulla on todettu saavutettavan merkittävää kulumisen vähentymistä sekä kiskon että pyörän laipan osalta. Voiteluainetta voidaan levittää joko kiinteästi kiskoon asennetulla laitteella, liikkuvaan kalustoon asennetulla voitelulaitteella tai erillisellä voiteluajoneuvolla. (Piironen 2010, s. 11)

Kiinteällä voitelulaitteella tai erillisellä voiteluajoneuvolla voidaan saavuttaa luotettavampi voitelutulos, mutta liikkuvaan kalustoon asennettavaa järjestelmää käytetään sen kustannushyötyjen ja säännöllisesti tapahtuvan voitelun vuoksi. Vaikka liikkuvan voitelujärjestelmän voiteluainetuotto on huomattavasti pienempää verrattaessa kiinteään voitelulaitteeseen, sijaintiin perustuvalla voitelulla voidaan saavuttaa voitelu vain niillä alueilla, joilla voitelua tarvitaan. (Piironen 2010, s. 93)

3.1 Voitelujärjestelmät liikkuvassa kalustossa

Liikkuvaan kalustoon asennettuja voitelujärjestelmiä on kahdenlaisia. Voitelulaitteisto voi olla öljyä tai rasvaa laipalle sumuttava järjestelmä tai sitten pyörän laippaa vasten painautuva jousikuormitettu voiteluainepuikko. Nykyaikaisissa järjestelmissä laipanvoitelurasva on korvannut öljyn. Rasvan edut kiinteään voiteluaineeseen nähden ovat voitelun oikea-aikaisuus ja säädettävyys sijaintiin perustuvassa järjestelmässä. Voiteluainetikun etuja sen sijaan ovat järjestelmän yksinkertaisuus, toimintavarmuus ja vikasietoisuus. (Piironen 2010, s. 51–55)

Kalustoon asennetun laipanvoitelulaitteiston huolto voidaan suorittaa päivittäishuoltojen yhteydessä, mikä pienentää huoltokustannuksia. Tällöin kuitenkin järjestelmän toiminnan testaamisen sekä oikea-aikaisen huollon merkitykset järjestelmän toimivuuden kannalta korostuvat.

3.2 Kiskojen voitelu

Kiskojen kulkupintaa voidaan voidella kiinteästi kiskoon asennetulla voitelulaitteella (kuva 3), joka on sijoitettu kaarteeseen ja todennäköisen laippakontaktin alkuun. Kiinteän voitelulaiteasennuksen suurin hyöty on runsas voiteluainetuotto kohteeseen sekä automaattinen toiminta. Kiinteä voitelulaitteisto vaatii kuitenkin enemmän huoltoa ja työtunteja kuin kaluston mukana kulkeva laitteisto. Laitteisto ei myöskään sovellu talviolosuhteisiin. (Piiroinen 2010, s. 49–50)



Kuva 3 Kiskoon asennettu voitelulaite (ELPA d.o.o. 2023)

Voiteluaineina käytetään tyypillisesti biohajoavaa rasvaa. Kiskojen voitelu voidaan toteuttaa myös ruiskuttamalla vettä kiskoille (kuva 4).



Kuva 4 Kiskojen voitelu vedellä Hampurissa (Piiroinen 2010)

3.3 Akustinen hionta

Kunnollisella kiskon hionnalla voidaan saavuttaa sileä kiskon pinta ja olettaen pyörän pinnan olevan sileä, hionnalla voidaan merkittävästi vähentää melun tasoa (Rajaram et al. 2016 s. 59). Akustisella hionnalla tarkoitetaan hiomatekniikkaa, jossa hiomajälki on kiskon kulkusuunnan suuntainen (kuva 5) ja hionnan päätarkoitus on pienentää kiskonpinnan karheutta akustiikan ehdoilla.



Kuva 5 Akustisesti hiottu kisko (RailTechnology GmbH ei pvm.)

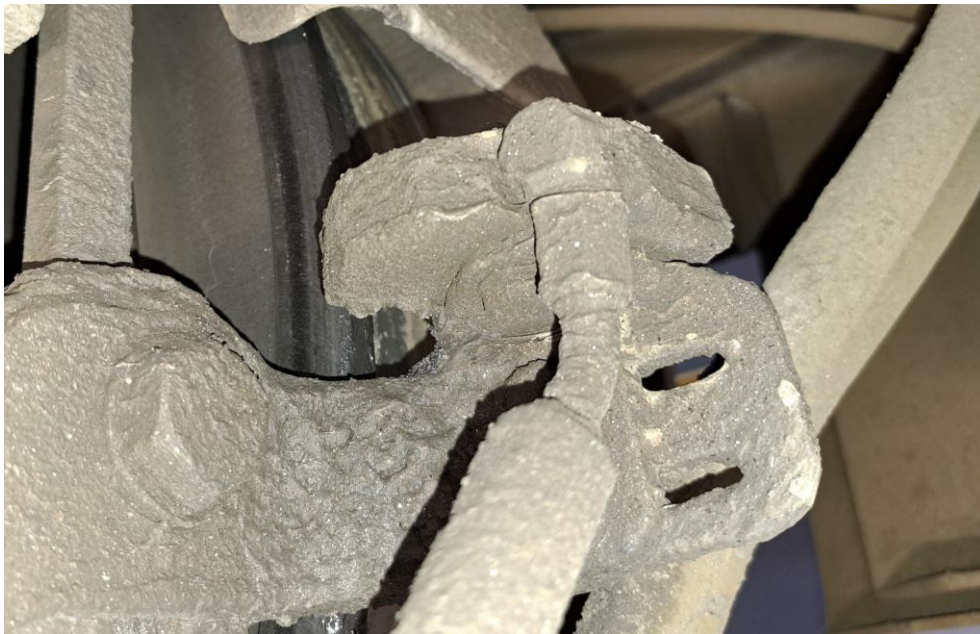
Höltän (2009, s. 82–84) mukaan kiskon pinnan epätasaisuus on yksi merkittävimpiä melun aiheuttajia rautatiekalustolla. Tutkimuksessaan hän vertasi rautatien melua ennen hiontaa ja hionnan jälkeen. Hionnan jälkeisissä mittauksissa havaittiin, että perinteisellä pyörivillä kivillä suoritettulla hionnalla ohiajomelu laski 2–4 dB äänen muuttuessa korkeampitaajuiseksi. Hänen mukaansa kiskon pintaan muodostunut värinäjätki ja poikittaissuuntainen hionnan karkeus ovat poistettavissa akustisella hionnalla, jolloin myös ujeltava ääni poistuu. (Hölttä 2009, s. 82–84)

4. TAMPEREEN RAITIOTIEN KALUSTO JA KUNNOSSAPITO

Tampereella käytettävä raitiovaunukalusto koostuu kahdestakymmenestä ForCity Smart Artic X34 -mallin raitiovaunusta. Vaunut koostuvat kolmesta moduulista, ja jokaisessa vaunussa on neljä teliä ja kahdeksan akselia. Vaunut ovat kahteen suuntaan ajettavia. Liikennöinnin keskinopeus on 19–22 km/h ja suurin sallittu nopeus rataverkolla on 70 km/h. Rataverkon raideleveys on 1 435 mm ja pienin kaarresäde 25 m. (Tampereen ratikka, 2023)

4.1 Raitiovaunun laipanvoitelu ja pyörän profiili

Tampereen raitiovaunukalustossa on käytössä sijaintiperusteinen laipanvoitelujärjestelmä, jonka paikkatieto perustuu GPS-sijaintietoon. Laipanvoitelujärjestelmä sumuttaa biohajoavaa rasvaimaseosta pyörän laipalle molemmilla päätyakseleilla (kuva 6). Syksyllä 2023 viidessä vaunussa on testissä pyörän vierintäpinnan voitelu ja kahdessa vaunussa TRO01 ja TRO02 uusi laipanvoiteluaine.



Kuva 6 Laipanvoitelusuutin päätyakselilla

Tampereen raitiovaunujen pyörät profiloidaan pyöräsorvilla varikolla. Pyöriä ei irroteta sorvausta varten, vaan vaunu ajetaan sorvin päälle ja pyörät on mahdollista sorvata akseli kerrallaan (kuva 7). Sorvaus suoritetaan vaunulle pyörien profiilien ollessa riittävän

kuluneita tai mahdollisten vaurioiden ja tasojen ilmetessä. Syksyllä 2023 raitiovaunun profilointiväli on 43 000 – 50 000 km edellisestä sorvauksesta.



Kuva 7 Raitiovaunu sorvilla

Profiloinnin tarkoituksena on poistaa epätasaisuuudet pyörän pinnasta, korjata pyörän kulunut profiili ja täten varmistaa oikeanlainen kartiokkuus pyörän kehällä. Kuvassa 8 vasemmalla puolella pyörä on kuvattuna ennen profilointia ja oikealla profiloinnin jälkeen. Kuluneen pyörän kartio on kulunut kuopalle ja vierintäpinnalla on havaittavissa mm. hiekan aiheuttamia kulumajälkiä ja karheutta.



Kuva 8 Pyörän kehä ennen profilointia ja profiloinnin jälkeen

4.2 Radan huolto ja kunnossapito

Tampereen raitiotien huollosta ja kunnossapidosta vastaa Kunnossapitoallianssi. Radan huoltotoimia suoritetaan pääasiassa yöaikaan, jotta liikennöinti ei keskeytyisi. Raiteiden osalta kunnossapitoallianssi muun muassa puhdistaa ja rasvaa vaihteita, puhdistaa kiskoja lehdistä, hiekasta ja talvisin lumesta. Kunnossapitoallianssin vastuulla on myös kiskojen hionta. Tampereella raitiotien kiskoja hiotaan HSG-City -hiontavaunulla (kuva 9), joka on suunniteltu toimimaan yhdessä Unimogin kanssa. Hionnan tarkoituksena on puhdistaa kiskon pinta epäpuhtauksista, vähentää meluhaittoja ja pidentää kiskojen elinkaarta. Hiontaa tehdään säännöllisesti. (Stenroos 2020)



Kuva 9 HSG-City -hiontavaunu (Stenroos [Tiitola] 2020)

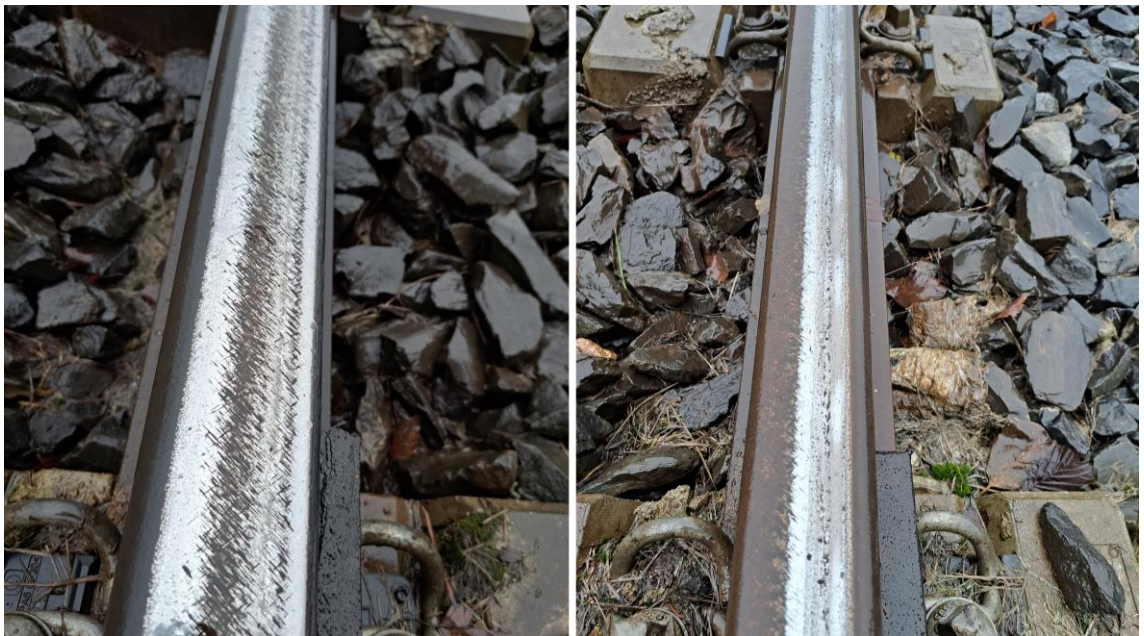
HSG eli High Speed Grinding -teknologialla kiskot hiotaan vapaasti akselillaan liikkuvilla hiontakivillä, jotka saavat liikevoimansa vaunun liikkeestä. Kivet on asennettu riviin hiontapalkkiin ja niiden kulmaa suhteessa kiskon selkään voi säätää portaattomasti (kuva 10). Valmistajan mukaan hionnalla voidaan poistaa kiskon pinnan pienet ja keskisuuret vauriot, ehkäistä uusien vaurioiden syntymistä ja näin ollen vähentää meluhaittoja 3–10 dB. Hiontanopeus hiontavaunulla on 8–60 km/h. (Vossloh AG 2023)

Kuvassa 11 on kuvattuna satunnaisotos Tampereen raitiotien kiskoista Ruskonkehän alikulkutunneliin johtavasta kaarteesta Santalahden suuntaan. Kuvassa vasemmalla olevan kaarteeseen ulkokiskon pinnasta voidaan havaita noin 45 asteen kulmassa kiskon kulkusuuntaan nähden esiintyvä karkea hiomajälki, ruostetta ja kaksipistekontaktin

aiheuttama kaksiosainen kulumajälki. Kuvassa oikealla on kuvattu saman karteen sisäkisko, jossa alkava aaltoilu ilmenee tummentumina kiillottuneessa pinnassa. Aaltoilu on todennäköisesti seurausta stick-slip-ilmiöstä. Kiskon edellinen hionta Hervantajärven rataosuudella on suoritettu 9.–11.10.2023, jolloin rataosuus on hiottu neljällä yliajolla.



Kuva 10 High Speed Grinding, muokattu lähteestä (Vossloh AG 2023)



Kuva 11 Kiskojen kunto kaarteessa ennen Ruskonkehän alikulkutunnelia. Vasemmalla ulkokiskokiskossa karkea hiontajälki erottuu hyvin. Oikealla sisäkiskossa havaittavissa alkavaa aaltoilua.

5. KAARREMELUN ÄÄNITYS JA ÄÄNIEN SPEKTRIN ANALYSOINTI

Ruskonkehän alikulkutunnelin Hervantajärven puoleisessa kaarteessa Hervantajärven suuntaan on todennetusti havaittu häiritsevää kaarremelua (Mäkinen 2023). Edellä mainitussa paikassa suoritettiin kaarremelujen mittausäänitykset 10.11.2023 ja 16.11.2023. Mittauksien tarkoituksena oli saada suuntaa antavaa tietoa kaarremelun synnystä ja siihen vaikuttavista olosuhteista mittauspaikalla.

5.1 Mittausjärjestelyt ja mittauspaikka 10.11.2023

Mittaus suoritettiin sateella + 5 celsiusasteen lämpötilassa kiskon pinnan ollessa märkä. Kiskojen hionta rataosuudelle oli suoritettu noin kuukausi aiemmin. Äänityksessä käytettävä laitteisto koostui seuraavista osista:

- Zoom H4n Pro –digitaalitalennin
- Kaksi kondensaattorimikroфонia
- Mikrofonien tuulisuojat ja kaapelit.

Äänityksessä käytetty näytetaajuus oli 44,1 kHz. Mittausjärjestelyssä kondensaattorimikrofonit asennettiin lähelle sepelirataa ja digitaalitalennin kauemmas kiskoista pyörätielle (Kuva 12). Kondensaattorimikrofonien sijoitus havaittiin ongelmalliseksi analysointivaiheessa muun muassa ilmavirran aiheuttaman melusaasteen vuoksi, ja siksi analyysissä on keskitytty vain digitaalitalentimella taltioituihin otoksiin.

Kiskon pinta kuvattiin (kuva 13) molemmista kiskoista ennen äänitystä. Kuvista voi silminnähden havaita molemmissa kiskoissa karkean hiomajäljen sekä kulumista. Kaarteen ulkokiskossa on havaittavissa myös kaksi kontaktipistettä, aivan laipan juurella sekä profiilin ulkoreunassa.



Kuva 12 Mittausjärjestelyt Ruskonkehän alikulkutunnelin kohdalla 10.11.2023.



Kuva 13 Ruskonkehän alikulkutunnelin äänityspaikan kiskot 10.11.2023. Vasemmalla sisä- ja oikealla ulkokisko.

5.2 Mittausjärjestelyt ja mittauspaikka 16.11.2023

Mittaus toistettiin - 5 celsiusasteen pakkassäässä kuivalla kiskon pinnalla. Rataosuutta ei ollut hiottu mittausten välillä. Uusintamittauksesta kondensaattorimikrofonit oli jätetty pois, jotta mittaustulokset olisivat vertailukelpoisia. Äänityksessä käytettävä laitteisto koostui seuraavista osista:

- Zoom H4n Pro –digitaalitalennin
- Mikrofonien tuulisuoja

Äänityksessä käytetty näytetaajuus oli 44,1 kHz. Mittausjärjestelyssä digitaalitalennin asetettiin samaan kohtaan pyörätietä kuin 10.11.2023 järjestetyssä mittausäänityksessä (kuva 14).

Kiskon pinta kuvattiin edellisen mittauksen tavoin molemmista kiskoista ennen äänitystä (kuva 15). Kiskoissa ei havaittu sääolosuhteita lukuunottamatta muutoksia edelliseen mittausäänitykseen verrattuna.



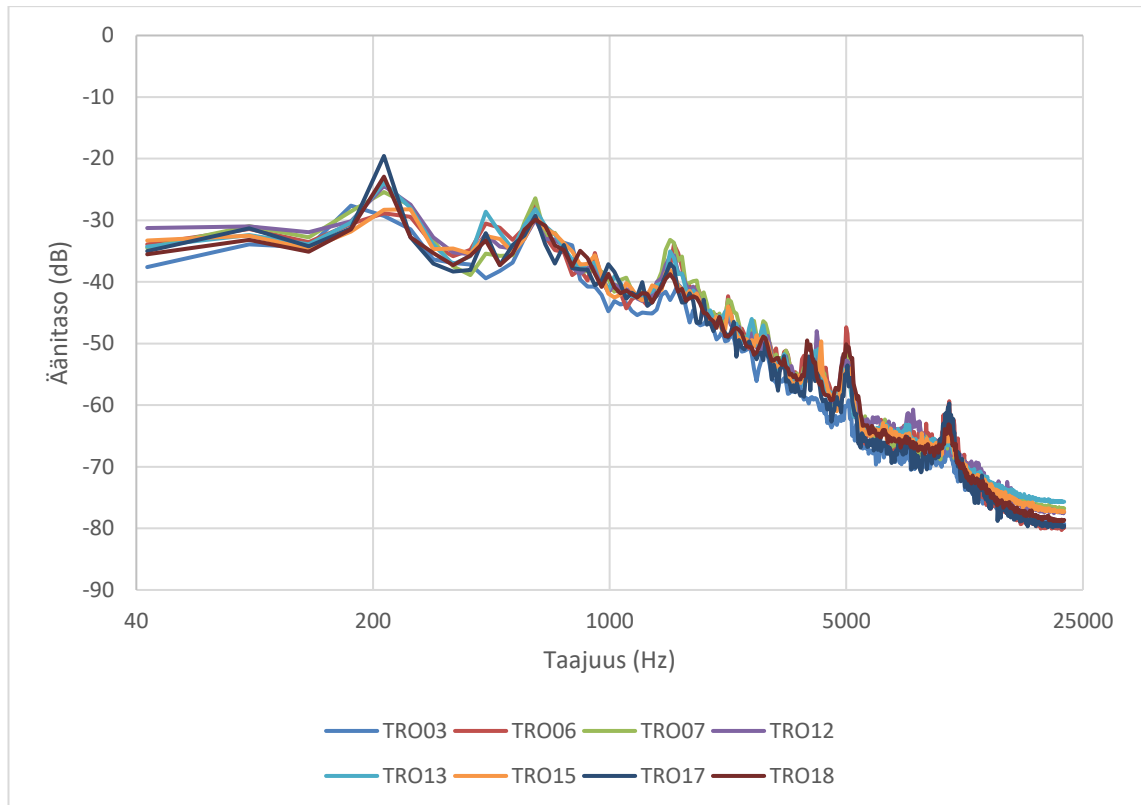
Kuva 14 Mittausjärjestelyt Ruskonkehän alikulkutunnelin kohdalla 16.11.2023



Kuva 15 Ruskonkehän alikuluttunnelin äänityspaikan kiskot 16.11.2023. Vasemmalla sisä- ja oikealla ulkokisko.

5.3 Äänien analysointi

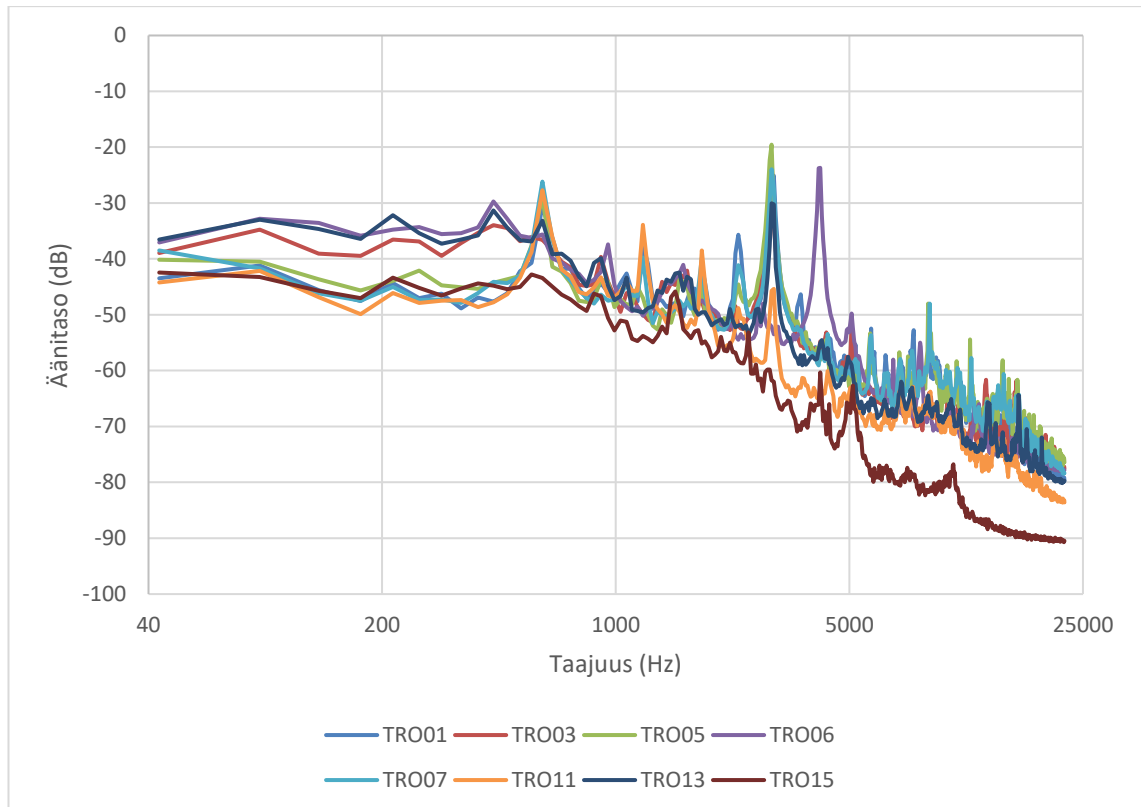
Kaarremelun ilmenemisen syytä on mahdollista analysoida tarkastelemalla kaarremelusta syntyvän äänen spektriä. Tässä työssä analyysityökaluna on käytetty Audacity -ohjelmistoa, jolla myös molemmilla mittausäänityskerroilla ohiajaneiden vaunujen kaarremelun spektrit on muodostettu. Spektrit ovat esitettyinä osana mittauspöytäkirjoja (liite 1, liite 2). Mittausäänityksen spektrien datoista on muodostettu Excelillä koostekuvaajat. Ensimmäisen mittausäänityksen koostekuvaaja on esitettyinä kuvassa 16 ja toisen mittausäänityksen kuvassa 17.



Kuva 16 Koostekuvaaja 10.11.2023 mittauksen tuloksista

Ensimmäisen mittausäänityksen aikana sää oli sateinen ja kiskon pinta märkä veden toimiessa voiteluaineena pyörän ja kiskon pinnan välillä. Tällä oli todennäköisesti kaarremelua pienentävä vaikutus. Sadesäällä kaluston profiloinnilla tai laipanvoitelun asemoinnilla ei ollut havaittavaa vaikutusta kaarremeluun. Taajuudet noin 215 Hz, 600 Hz, 1 500 Hz sekä 5 000 Hz alueilla korostuivat selvästi jokaisen vaunun ohittaessa äänityslaitteiston.

Havaitut 210-220 hertsin taajuudet olivat todennäköisimmin peräisin vaunun ajomottorista tai vaihteistosta. Verrattaessa korkeampia 600 Hz ja 1 500 Hz taajuuspiikkejä Eadien et al. (2005, s. 1149) esittämään taulukkoon (taulukko 1), on todennäköistä, että kaarremelun juurisyy mittauspaikassa liittyy rullausääniin sekä vierintäpinnan ääniin. Laipasta johtuvaa kirskuntaa ei korvakuulolla äänien seasta havaittu, mutta spektrien korostuma n. 5 000 Hz alueella sekä ulkokiskon sisäkaarteiden puoleisen reunan kiillottuminen voivat viitata osittaiseen laippakontaktiin kaarteessa.



Kuva 17 Koostekuvaaja 16.11.2023 mittauksen tuloksista

Toisella mittausäänityskerralla kiskon pinta oli kuiva, jolloin kaarremelu odotetusti korostui ja havaittavissa oli selkeää kirskuntaa. Hiljattain profilloidut vaunut olivat huomattavasti hiljaisempia muihin vaunuihin nähden. Laipanvoitelusuuttimien asemoinnilla tai laipanvoiteluaineella ei ollut havaittavaa vaikutusta melun syntyyn. Selkeimmät piikit koko kalustolla spektreissä havaittiin noin 600 Hz, 2900 Hz, ja 8700 Hz kohdilla, joskin vaunukohtaisia eroja spektreissä havaittiin enemmän kuin määrällä kiskolla. Määrällä kiskolla havaitut noin 1500 Hz ja 5000 Hz korostuneet taajuusalueet olivat myös tässä mittauksessa havaittavissa, mutta selkeästi vaimeampia verrattuna muihin taajuuspiikkeihin.

Taajuuspiikkejä edelleen verrattaessa Eadien et al. (2005, s. 1149) taulukkoon (taulukko 1), epäily kiskon selän ja pyörän profiilin kunnon sekä niiden välisen kontaktin vaikutuksesta kaarremelun syntyyn vahvistuu. Laipasta johtuva kirskunta oli tällä mittauskerralla mahdollista erottaa korvakuulolla, ja se korostui myös spektreissä korkeiden taajuuksien piikkeinä. Laipan kirsunnasta johtuvien taajuuspiikkien äänitaso oli kuitenkin huomattavasti kiskon selän taajuuspiikkien äänitasoja alempi.

Liikenteen ja sääolosuhteiden aiheuttama taustamelu esiintyi mittauksissa pääasiassa matalataajuisena kohinana. Kaarremelun mittaustuloksia voidaan toistuvuutensa ja säännöllisyytensä vuoksi pitää taajuusalueiden suhteen luotettavina. Erot erityisesti

jälkimmäisessä mittauksessa vaunuyksilöiden välillä selittyvät vaunukohtaisilla eroilla ja mahdollisesti myös ajotavasta kaarteessa.

Kuvaajien perusteella äänitaso olisi jälkimmäisellä mittauksella ollut ensimmäistä sadesään mittauskertaa matalampi, minkä paikkansapitävyys on helppo kyseenalaistaa. Erot kuvaajien äänitasoissa johtuvat todennäköisesti eroavaisuuksista mikrofoniin suuntauksessa mittausäänitysten välillä. Tällä ei kuitenkaan ole vaikutusta mittauskertakohtaisen taajuusanalyysin luotettavuuteen.

Taulukko 1. *Taajuusalueet erilaisille rautatien äänityypeille, muokattu lähteestä (Eadie et al 2005).*

Äänen tyyppi	Taajuusalue (Hz)
Rullaus	30–5 000
Tasot pyörissä	50–250 (riippuu nopeudesta)
Maaperän runkomelu	4–80
Rakenteen runkomelu	30–200
Vierintäpinnan ulvonta	1 000–5 000
Laipan äänet	5 000–10 000

6. YHTEENVETO JA SUOSITUKSET

Kiskon pinnan ja pyörän välisen kontaktin karheudella on merkittävä vaikutus kaarremelun ilmenemiseen. Karhealla kiskolla ja kuluneella pyörän profiililla on syy-yhteys stick-slip ilmiön syntymiseen. Kaarremelua voidaan vähentää pienentämällä kiskon ja pyörän välistä kitkaa esimerkiksi voiteluaineilla tai akustisella hionnalla.

Tampereen raitiotiellä on käytössä sijaintitietoon perustuva raitiovaunuun asennettu laipanvoitelujärjestelmä. Raitiovaunun pyörät profiloidaan säännöllisesti ja tarpeen vaatiessa vaunusorvilla. Kiskoja huolletaan kunnossapitoallianssin toimesta puhdistamalla, rasvaamalla ja hiomalla. Hiomajälki on noin 45 asteen kulmassa kiskon suuntaan nähden ja se on akustiseen hiontaan verrattaen karkea. Havaintopaikassa oli havaittavissa alkavaa kiskon pinnan aaltoilua noin kuukauden kuluttua edellisestä hionnasta. Mittausäänityksistä saadun datan perusteella Ruskonkehän alikulkutunnelin jälkeisen kaartein kaarremelun juurisyyinä ovat todennäköisesti kiskon pinnan äänet sekä laipan äänet.

Kaarremelu on aina paikkakohtainen ilmiö. Kiskon pinnasta syntyvät äänet ovat suoraan verrannollisia kiskon pinnan karheuteen, mutta esimerkiksi laippakontaktiin vaikuttavat erityisesti pyörän profiilin kunto ja ratageometria. Ympäristön olosuhteiden vaikutus kaarremeluun on huomattava. Jotta meluhaittoja pystyttäisiin analysoimaan paikkakohtaisesti, tulisi nämä paikat ensin kartoittaa koko rataosuudelta esimerkiksi vaunuun asennetun äänityslaitteiston avulla. Mittausäänitykset on kannattavaa suorittaa kuivalla säällä, jolloin kiskon ja pyörän välinen kitka on mahdollisimman suuri, ja ongelmakohtat korostuvat parhaiten. Paikkakohtaiset tiedot kaarremelun syistä ovat edellytyksenä jatkotoimenpiteille, jos niillä halutaan saada aikaan pysyvää vaikutusta kaarremelun pienentämiseksi.

Hiontajäljen karkeuden pienentämistä, esimerkiksi hienojakoisemmilla hiomakivillä on kannattavaa harkita. Täysin uuden kiskojen suuntaisesti hiovan kaluston hankinta on mahdollista, mutta se on erittäin kallis ja sitä myöten epätodennäköinen vaihtoehto. Kiskojen hionnan todellisen vaikutuksen saa selville suorittamalla mittausäänityksen rataosuudelle ennen ja jälkeen hionnan.

Pahimpiin ongelmakohtiin on mahdollista harkita kiinteän voiteluainelaitteiston asennusta tai säännöllistä voitelua liikkuvan huoltoyksikön toimesta. Kiinteää asennusta hankittaessa on kuitenkin otettava huomioon sen huoltokustannukset sekä toimimattomuus talviolosuhteissa.

LÄHTEET

Eadie, D. T., Santoro M., Kalousek, J. (2005). Railway noise and the effect of top of rail liquid friction modifiers: changes in sound and vibration spectral distributions in curves. *Wear*. [Online] 258 (7), 1148–1155.

ELPA d.o.o. (2023). Trackside devices. Saatavissa (viitattu 17.11.2023): <https://elpa.si/trackside-devices/>

Hölttä, P. (2009). Ratakiskojen hionta ja hionnan vaikutus junaliikenteen meluun. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Espoo. Saatavissa (viitattu 4.10.2023): https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/96518/master_H%F6itt%E4_Pasi_2009.pdf;jsessionid=7FD48079EA86428BD6B92E13EF1B8304?sequence=1

Influx Big Data Solutions Pvt Ltd. (2022). Railway Safety - Wheel profile Gauge | Conicity Measurement. Saatavissa (viitattu 17.11.2023): <https://www.influxbigdata.in/post/railway-accident-smart-solution-conicity-measurement>

Levy, A. (2021). Tilting Trains and Technological Dead-Ends. Pedestrian Observations. Saatavissa (viitattu 22.11.2023): <https://pedestrianobservations.com/2021/04/22/tilting-trains-and-technological-dead-ends/>

Manninen, J. (2023). "Tampereen ratikasta tuli yllättävä ympäristöhaitta Hervantaan". *Aamulehti*, Moro, 13.9.2023. Saatavissa (viitattu 15.9.2023): <https://www.aamulehti.fi/moro/art-2000009798012.html>

Mäkinen, P. (2023). "Tämä ujellus ja kirs kuna sapettavat Etelä-Hervannassa" *Tamperelainen*, 20.7.2023. Saatavissa (viitattu 23.10.2023): <https://www.tamperelainen.fi/paikalliset/6081101#kommentit>

Panulinova, E. & Harabinova, S. (2013). The noise pollution problem in the tram route. Proceeding of SGEM, 13th International Multidisciplinary Scientific Geoconference: Ecology, Economics, Education and Legislation, Albena, Bulgaria, 16-22. Saatavissa (viitattu 23.10.2023): <https://www.proquest.com/docview/1465552021?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true>

Panulinova, E., Harabinova, S., Argalaso, L. (2016). Tram squealing noise and its impact on human health. *Noise & health*, 18(85), 329–337. Saatavissa (viitattu 23.10.2023): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5227013/>

Piiroinen, T. (2010). Sijaintiin perustuva liikkuvan kaluston pyörän laipan voitelu. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 3/2010. Saatavissa (viitattu 23.10.2023): https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/121532/its_2010-03_978-952-255-503-8.pdf?sequence=1&isAllowed=y

RailTechnology GmbH. (ei pvm.). ST SILENT TRACK RAIL GRINDING TECHNOLOGY. Saatavissa (viitattu 17.11.2023): <https://www.railtechnology.com/rt-st-rail-grinding-technology/>

Rajaram, S., Saurenman, H., Wong, A. (2016). Light Rail Vehicle Noise: Evaluation of Rail Roughness and Noise from Wheel–Rail Interface. *Transportation research record*. [Online] 2571 (1), 59–72.

Rinne, H. A. M. (2016). Laippakosketuksen havaitseminen rautatiekaluston kunnonvalvontajärjestelmässä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere.

Stenroos, P. (2020). Raitiotien kunnossapitoa tamperelaiseen tapaan: oma malli syntyy tarkasti suunnitellen ja testaten. Ratikka-aika. Saatavissa (viitattu 17.11.2023): <https://ratikka-aika.fi/artikkelit/raitiotien-kunnossapitoa-tamperelaiseen-tapaan-oma-malli-syntyy-tarkasti-suunnitellen-ja-testaten>

Tampereen ratikka (2023). Tekniset tiedot. Saatavissa (viitattu 3.10.2023): <https://www.tampereenratikka.fi/vaunujen-tekniset-tiedot/>

Vossloh AG. (2023). HSG-city Grinding Machine. Saatavissa (viitattu 17.11.2023): https://www.vossloh.com/en/products-and-solutions/product-finder/product_20928.php