



RAITIOVAUNUN PYÖRÄN JA KISKON MERKITYS JA VAIKUTUS KUNNOSSAPITOKUSTANNUKSIIN

Teemu Hyttinen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2015
Rakennustekniikka
Infrarakentaminen

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka
Infrarakentaminen

TEEMU HYTTINEN:

Raitiovaunun pyörän ja kiskon merkitys ja vaikutus kunnossapitokustannuksiin

Opinnäytetyö 54 sivua
Toukokuu 2015

Tampereen kaupunkiin suunnitellaan modernia ja kustannustehokasta raitiotiejärjestelmää helpottamaan joukkoliikenteen kuormitusta. Raitiotien suunnittelu- vaiheessa on mahdollista puuttua tunnettuihin ongelmakohtiin ja pyrkiä välttämään tai minimoimaan niiden vaikutusta. Raitiovaunun ja kiskon rajapinnassa vaikuttavat suuret voimat ja siitä aiheutuva pyörien ja kiskon kulumisen ja vaurioituminen muodostavat kunnossapitotarvetta. Tampereen raitiotien pohjoinen sijainti tuo myös haasteita kunnossapitoon. Tämän työn tarkoitus on selvittää raitiovaunun ja kiskon rajapinnan eri osien vaikutusta kunnossapitokustannuksiin. Tavoite on löytää Tampereen raitiotiehankkeeseen sopivia kustannustehokkaita kunnossapitoon liittyviä ratkaisuja.

Tutkimus on toteutettu kirjallisuusaineiston pohjalta sekä osin alan asiantuntijoiden haastatteluilla. Raitiovaunun pyörän ja kiskon teoreettista tarkastelua on tehty alan kirjallisuutta hyödyntäen. Olemassaolevien raitiotiejärjestelmien vertailukohteena on hyödynnetty Helsinkiä, jossa toimitaan Tampereen kaltaisissa ilmasto-olosuhteissa. Helsingin raitiotieradan ja -kaluston osalta on haastateltu kunnossapidon asiantuntijoita.

Kisko ja pyörä ovat jatkuvassa vuorovaikutuksessa ja kontaktipintaan kohdistuu suuri kuormitus. Kiskon ja pyörän profiilien yhteensovittaminen ja kunnossapito on tärkeää mm. kulumisen ja melun kannalta. Jatkuva kosketus kuluttaa ja vaurioittaa sekä kiskoa että pyörää. Työssä esitetään kiskolle ja pyörälle yleisimpiä vaurioitumistapoja ja kunnossapitomenetelmiä. Verrokkikohteena käytetty Helsingin raitiotie konkretisoi pyörän ja kiskon kunnossapidon toimia ja kustannusten muodostumista.

Työn tuloksena löydettiin useita suosituksia Tampereen raitiotiehankkeeseen. Suositukset ovat teknisiin ratkaisuihin ja kunnossapitoon liittyviä ja niiden pyrkimys oli minimoida kunnossapitokustannuksia. Ennaltaehkäisevällä huoltotoiminnalla ja radan säännöllisellä puhdistuksella voidaan ehkäistä vaurioiden syntymistä. Radan geometrialla, epäjatkuvuuskohtien minimoinnilla ja hiekoituksen optimoinnilla vaikutetaan suoraan mm. kiskon ja pyörän kulumiseen. Raitiotielikennettä käyttävien kaupunkien olisi myös kannattavaa etsiä yhteistyömuotoja mm. investointien ja palveluiden ostoissa.

Asiasanat: raitiovaunu, raitiotie, kisko, pyörä, kunnossapito.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering

TEEMU HYTTINEN:

Tram Wheel and Rail Significance and Effect for Maintenance Costs

Bachelor's thesis 54 pages
May 2015

The modern and cost-effective new tramway system is planned in the City of Tampere to facilitate public transport loads. In a design phase, it is possible to affect well-known problem areas of tramway system and try to avoid or at least minimize their influences. There are great loads affecting the wheel-rail interface. Because of that, wear and damages of wheel and rail are creating maintenance needs. The northern location of Tampere tramway also brings challenges for maintenance works. The objective of this work is to find out maintenance needs in wheel-rail interface. The purpose of this thesis is to find cost-effective and suitable solutions for Tampere tramway maintenance works.

This thesis was carried out by using literature of the field and by experts interviews. Theoretical analysis was made on basis of literature. Helsinki tramway was chosen to be an existing tramway system compared to Tampere, because they operate in same kind of environmental conditions as Tampere. Maintenance experts from Helsinki rail and wheel maintenance department were interviewed.

There are high loads and constant interaction affected between wheel and rail. A reconciliation and maintenance of wheel and rail are influenced for wear and noise. Wear and damage is formed in constant contact between wheel and rail. The most common damage and maintenance needs are presented in this work. Helsinki tramway concretize wheel and rail maintenance action and cost formation.

As a result of this study, many recommendations were found for Tampere tramway system. Recommendations are related to technical and maintenance solutions. The basis of these recommendations were aimed to minimize maintenance costs. Regular preventive maintenance activities and track cleaning can prevent damages. Minimizing discontinuities, optimizing track geometry and sanding are affected directly to rail and wheel wear. Some forms of collaboration in the area of investments and services could be worthwhile for tramway cities.

Key words: tram, tramway, rail, wheel, maintenance.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	RAITIOVAUNU JA -RATA	7
	2.1 Raitiotie-terminologia.....	7
	2.2 Raitiovaunujen kehitys	7
	2.3 Teli.....	8
	2.4 Raitiovaunun ja radan kontaktipinta	11
	2.4.1 Vaikuttavat voimat.....	13
	2.4.2 Vaurioitumismekanismit.....	14
3	PYÖRÄ	16
	3.1 Pyörän rakenne	16
	3.2 Pyörän profiili.....	19
	3.3 Pyörän koko	22
	3.4 Pyörän vaurioituminen.....	22
	3.5 Pyörien kunnossapito	23
4	KISKO.....	25
	4.1 Kiskon profiili.....	25
	4.2 Kiskon vauriot.....	26
	4.2.1 Korrugaatio	28
	4.2.2 Kuluminen.....	29
	4.2.3 Väsymissäröt.....	31
	4.3 Kiskon kunnossapito.....	32
	4.4 Vaihteet.....	34
5	MELU JA TÄRINÄ	37
6	KUSTANNUSTEN MUODOSTUMINEN	40
	6.1 Pyörien kunnossapitokustannukset.....	42
	6.2 Kiskon kunnossapitokustannukset.....	43
7	HELSINGIN RAITIOTIE.....	45
	7.1 Raitiovaunun pyörien kunnossapito.....	45
	7.2 Radan kunnossapito	47
8	SUOSITUKSET JA YHTEENVETO	50
	LÄHTEET.....	53

Erityissanasto

Austeniitti	Teräksen lämpökäsittelyllä saavutettu rakenne, joka on mkaanisilta ominaisuuksiltaan pehmeää ja sitkeää
Korrugaatio	Kiskon kulkupinnalla säännöllisin välein esiintyvää aalto- maista aluetta
Laippa	Pyörän sisäreunassa halkaisijaltaan suurin alue, joka varmistaa pyöräkerran pysymisen kiskoilla
Muokkauslujittuminen	Materiaalin ominaisuudet muuttuvat pysyvän muodonmuutoksen seurauksena, jolloin se lujittuu
Plastinen deformaatio	Materiaali muokkautuu pysyvästi
Pyöräkerran raideleveys	Laipan ulkopintojen välinen etäisyys
Särö	Vaurion alku, joka kuormitettaessa kasvaa
Särön ydintyminen	Särön muodostumisen vaihe
Teli	Raitiovaunun alla oleva jäykkä kehysrakenne, jossa sijaitsevat mm. pyörät, jarrut ja jousitus
Urakisko	Katutasoon upotettava kisko, joka mahdollistaa muun liikenteen samassa tasossa
Vaihde	Mahdollistaa raiteelta toiselle siirtymisen
Vignol-kisko	Kiskotyyppi erotetuilla rataosuuksilla, joka ei mahdollista risteävää liikennettä

1 JOHDANTO

Raitioteitä on rakennettu 1800-luvulta lähtien palvelemaan kaupunkien joukkoliikenteen tarpeita. 1900-luvulla kulkuneuvojen kehitys oli voimakasta ja linja-autojen ja metrojen kehitys syrjäytti raitiovaunuliikennettä. Raitiotieliikenteen uusi kukoistuskausi alkoi 1980-luvulla, jonka jälkeen uusia raitiotiejärjestelmiä on syntynyt lukuisiin, lähinnä Euroopan ja Pohjois-Amerikan kaupunkeihin.

Tampereen kaupungin asukasluku on kasvanut voimakkaasti viimeisten vuosikymmenten aikana ja kasvun odotetaan jatkuvan. Kaupunkiin on jo pitkään suunniteltu raitiotietä, joka yhdistäisi kaupungin tiheimmin asutut alueet ja merkittävimmät kohteet. Raitiotien odotetaan edistävän joukkoliikenteen sujuvuutta tiheästi asutuilla alueilla ja vastaavan jatkuvasti tiivistyvän kaupunkirakenteen joukkoliikennehaasteisiin.

Tampereen raitiotiehankeessa on saavutettu suunnittelu- ja kilpailutusvaihe, jossa voidaan vaikuttaa tulevan raitiotiejärjestelmän kunnossapito- ja elinkaarikustannuksiin. Radan ja kaluston yhteensovittaminen on tärkeässä osassa näiden kustannusten muodostumisessa, joka voidaan toteuttaa riittävän laajalla suunnittelulla ja eri osa-alueiden huomioonottamisella. Keskeisessä osassa ovat pyörän ja kiskon yhteistoiminnan ymmärtäminen, erilaisten ongelmien sekä niiden syiden ja mahdollisten korjaus- ja huolto-toimien tunteminen. Tämän työn tarkoitus on selvittää raitiovaunun pyörän ja kiskon rajapinnan vaikutusta kunnossapitokustannuksiin sekä selvittää pohjoisen ilmaston tuomia haasteita.

Työssä perehdytään raitiovaunun pyörän ja kiskon rajapintaan sekä raitiovaunun telirakenteeseen. Pyörän ja kiskon rajapinnassa vaikuttavat suuret voimat kuluttavat ja vaurioittavat kiskoa sekä pyörää. Raitiovaunun pyörät sijaitsevat telirakenteessa ja telillä on myös tärkeä merkitys pyörän ja kiskon rajapinnan käyttäytymisessä. Telirakenne ja sen toiminta tulee työssä esille, mutta tarkempi analysointi kohdistuu pyörään ja kiskoon. Pyörä ja kisko ovat suoraan yhteydessä toisiinsa ja niiden kulumis- ja vaurioitumistavat vaikuttavat toisiinsa.

2 RAITIOVAUNU JA -RATA

2.1 Raitiotie-terminologia

Raitiotiejärjestelmistä ja niihin liittyvistä osista kuten radasta ja kalustosta puhuttaessa voidaan käyttää useampia vakiintumattomia termejä, jotka voivat sekoittua toisiinsa eri lähteiden mukaan. Raitiotie (*Tramway*) tarkoittaa yleensä perinteistä kaupunkien keskustoissa ja ympäristössä kulkevaa katuraitiotieverkkoa, jossa käytettävät nopeudet ovat pieniä, pysäkkejä on tiheästi ja kiskoliikenne kulkee pääsääntöisesti samassa tasossa muun liikenteen kanssa. Pikaraitiotiellä (*Light Rail* tai *Light Rail Transit*) tarkoitetaan raitiotiejärjestelmää, jossa liikennöintinopeudet ovat suurempia kuin perinteisellä kaupunkiraitiotiellä ja pysäkkitiheys on harvempi. Pikaraitiotiet ulottuvat kaupunkien keskustojen ulkopuolelle ja kulkevat enemmän muusta liikenteestä eroteltuna, mikä mahdollistaa niiden suuremmat nopeudet. Pikaraitiotiessä yhdistetään junan, metron ja raitiovaunun ominaisuuksia ja tarkka rajaus kulkumuotojen välillä voi hämärtyä. Raitiovaunu (*Tram*) on raitiotiellä liikennöivä kulkuneuvo, josta usein myös erotetaan käyttäjäystävällisempi matalalattiaraitiovaunu (*Low Floor Tram*). Pikaraitiovaunut (*LRV*, *Light Rail Vehicles*) ovat pikaraitiotiellä liikennöiviä kulkuneuvoja.

Tässä työssä keskitytään pyörän ja kiskon teknisiin osatekijöihin, jotka ovat pääsääntöisesti samoja raitiotiejärjestelmän tarkemmasta tyypistä riippumatta. Selkeyden vuoksi tässä työssä käytettävät yleisnimitykset ovat raitiotie ja raitiovaunu.

2.2 Raitiovaunujen kehitys

Raitiovaunukaluston kehittyessä esteetön ja nopea kulkeminen pysäkiltä vaunun sisään ja vaunusta ulos on muodostunut oleelliseksi seikaksi uusissa vaunuissa. Esteettömän kulun vaatimus on saanut raitiovaunuvalmistajat laskemaan vaunun lattian tasoa, jolloin lattian alla oleville teleille ja muulle tekniikalle jää entistä vähemmän tilaa. Raitiovaunut voidaan jakaa korkeuden mukaan kolmeen ryhmään, joita ovat perinteiset raitiovaunut, osittain matalalattiaiset ja täysin matalalattiaiset raitiovaunut. Perinteisissä raitiovaunuissa vaunun lattia on korkealla kiskon tason yläpuolella ja vaunuun kulkeminen vaatii porrasaskelmien nousemisen. Osittain matalalattiaisessa raitiovaunussa vaunun etu- ja

takaosan lattiataso on keskiosaa korkeammalla, eli matalalattiaisuus on vain vaunun keskiosassa. Täysin matalalattiaisessa raitiovaunussa (Kuva 1) koko raitiovaunun lattia on samassa tasossa ja vaunuun kulkeminen tapahtuu esteettömästi ilman portaita. Matalalattiaivaunun lattian korkeus on yleensä 300–350 mm kiskon selän yläpuolella, jolloin pysäkkien tason korotus muusta kadun pinnasta jää kohtuullisen pieneksi. Uusista kalustoinvestoinneista Euroopassa suurin osa kohdistuu juuri matalalattiaikalustoon. (Track Design Handbook for Light Rail Transit 2012, 2-8-2-9.)



Kuva 1. Transtechin Artic-matalalattiaraitiovaunu (Transtech 2015)

2.3 Teli

Teli on perinteisesti kahden pyöräkerran muodostama jäykän kehysrakenteen sisällä oleva kokonaisuus (kuva 2). Telissä sijaitsevat muun muassa pyörät, jousitus, jarrut ja mahdollinen ajomoottori riippuen siitä, onko teli vetävä vai ei. Teleissä on yleensä kaksi erillistä jousitusta, joista ensiöjousitus ottaa vastaan pyöriltä tulevia voimia ja toisiojousitus toimii jäykän telirungon ja vaunun välissä. Perinteisesti pyörät on yhdistetty toisiinsa kiinteillä akseleilla, mutta matalalattiaraitiovaunuissa on myös teliratkaisuja, joissa vastakkaiset pyörät eivät ole mekaanisesti yhteydessä toisiinsa.

Raitiovaunun kulun kannalta avainasemassa ovat kiskon kanssa vuorovaikutuksessa toimivat pyörät ja telit. Ajovakauteen merkittävästi vaikuttavia seikkoja ovat pyörän kartiokkuus, akselien sekä telin rakenne ja sen kunto. Telien välisellä etäisyydellä ja telin pyöräkertojen välisellä etäisyydellä on myös merkitys kaluston kaarreominaisuuksiin ja ajovakauteen. (Korkeamäki 2011, 27,33)

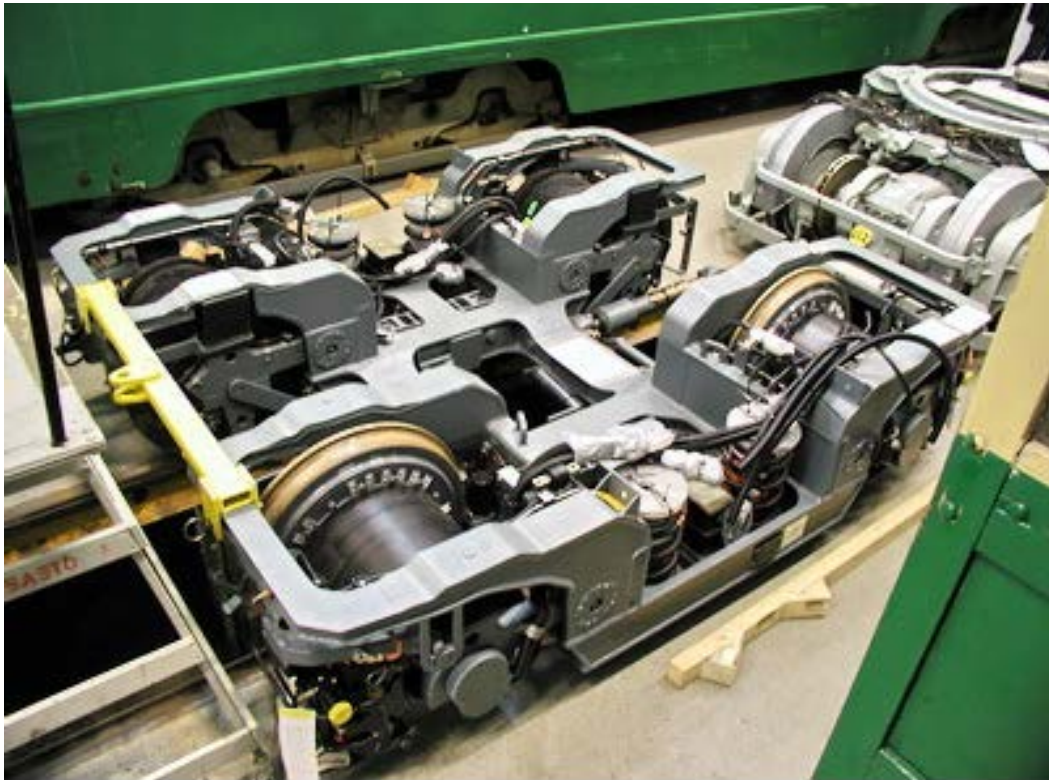


Kuva 2. Matalalattiaraitiovaunun teli. (TransTec Vetschau GmbH)

Vaunun jokainen teli ei ole yleensä vetävä. Raitiovaunun telit jaetaan moottori- ja juoksuteleihin sen mukaan onko telissä ajomoottoria vai ei. Esimerkkinä osittain matalalattiaisen raitiovaunun päädyissä olevien telien tehtävä on tuottaa vaunun tarvitsema veto, kun taas vaunun keskiosan matalalattiaisen osuuden telissä ei ole moottoria. Täysin matalalattiaiset raitiovaunut vaativat monimutkaisemman rakenteen, koska ajomoottorit on saatava sopimaan vaunun lattian alle. Perinteisesti telit kääntyvät suhteessa vaunun runkoon, mutta matalalattiaisissa vaunuissa teli on yleensä kiinteä eikä käänny rungon suhteen. Matalalattiaiset vaunut kiinteällä telillä eroavat ohjauksen ja kaarreominaisuuksien osalta perinteisistä kääntyvistä teleistä. Juokсутelit sijaitsevat yleensä raitiovaunun nivelen kohdalla. Juokсутelin rakenne on kevyempi kuin moottoritelillä, koska telissä ei ole ajomoottoreita. Keveyden vuoksi telin akselikuorma ja rataan kohdistuva kuormitus on pienempi (Track Design Handbook for Light Rail Transit 2012, 2-8-2-9, 2-34)

Telillä on vaunun vakauden säilyttämisessä tärkeä osa. Teli toimii raitiovaunun korirakennetta ja pyöriä yhdistävänä jäykkänä rakenteena, joka on merkittävä osa turvallista liikennöintiä ja matkustusmukavuutta. Pienisäteiset kaarteet ja runsas nopeusvaihteluiden määrä lisäävät riskiä telien vaurioitumiselle. Liikennöinnin vaikutuksesta teliin kohdistuu dynaamisia ja staattisia kuormia, jotka voivat johtaa väsymissäröjen syntymiseen ja vaikuttaa telin käyttöikänsä. (Lee 2008, 1340)

Kuvassa 3 on Helsingissä käytössä olevan Bombardierin Variotram-matalalattiaraitiovaunun teli. Telissä ei ole ollenkaan akseleita pyörien välisissä, vaan jokaisella pyörällä on oma napamoottorinsa. Moottorien avulla saavutetaan kaarteissa optimaalinen kulku, kun jokainen pyörä voi pyöriä tarvitsemansa kierrosmäärän. Tällä ratkaisulla voidaan estää pyörien aiheuttamaa kirsukumista kaarteissa. Suoralla radalla akseliton ratkaisu aiheuttaa vaunun kiemurtelua, koska pyörien pyörimisnopeus ei ole täysin identtinen. (Alku 2015b)



Kuva 3. Variotram-matalalattiaraitiovaunun teli (Alku 2015b)

2.4 Raitiovaunun ja radan kontaktipinta

Kiskon pääasiallinen tehtävä on ohjata raitiovaunua. Ohjauksen mahdollistaa vaunun pyörän kartiomuoto. Mikäli vaunuun kohdistuu sivuttaissuuntaisia voimia suoralla rataosuudella, keskittää kartionmuotoinen pyörä vaunun kulkua. Kartiokkuudella saavutetaan kaarteissa sulavampi kulku sekä vähemmän luistoa ja kulumista. Pyörä muodostaa kontaktipinnan raitiovaunun ja kiskon välille, joten pyörän optimaalinen muoto on erittäin tärkeää muun muassa kulumisen kannalta.

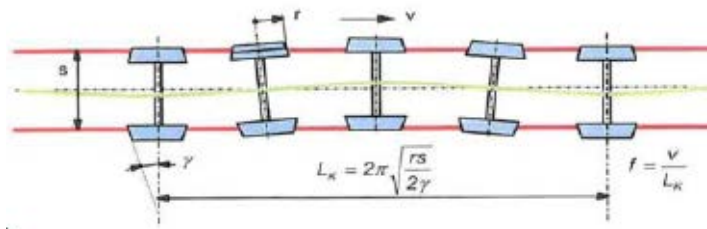
Pyörän laipan tarkoitus on estää vaunua suistumasta raiteilta. Laipan ja kiskon välillä oleva raidevälitys mahdollistaa vaunun pienet vaakasuuntaiset liikkeet. Kaarteissa ja vaihteissa raidevälitys ei usein riitä pyörän ohjautumiseen, jolloin laippa ottaa kiinni kiskon reunaan ja aiheuttaa kulumista.

Pyörän ja kiskon teräskovuuksilla on vaikutusta kulumiskestävyyteen. Yleensä kovempi teräs kestää paremmin kulutusta ja voi helposti vaikuttaa paremmalta valinnalta. Kova teräs aiheuttaa kuitenkin myös sen, että vierintäväsymissärojien syntyminen voi olla suurempaa. Pehmeämpi teräs kuluu käytössä enemmän, jolloin se myös hioo pinnassa olevia särönalkuja pois ennen kuin ne ennättävät kasvaa suuremmiksi. Kovan teräksen etu tulee esille kaarteissa, joissa kisko kuluu nopeasti verrattuna suoraan kiskoon. Kova teräslaatu kaarteissa vähentää suurinta kulumista. (Korkeamäki 2011, 17)

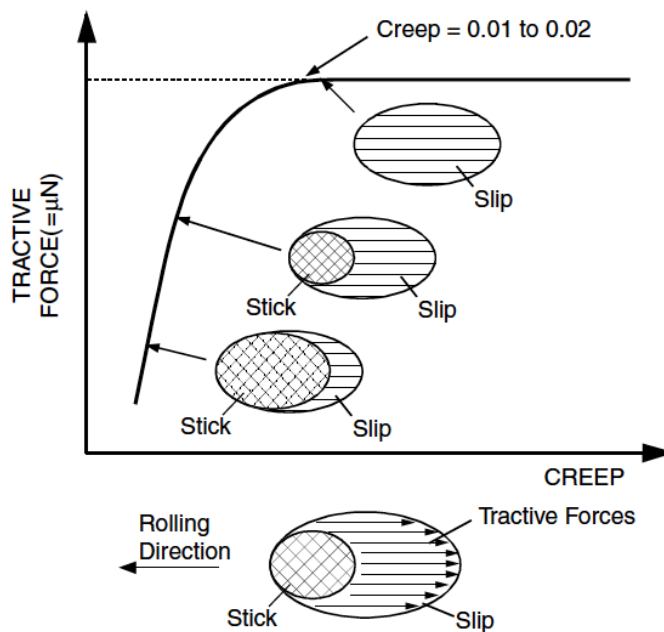
Pyörän profiilin ja sen dimensioiden on oltava yhteensopivia käytettävän kiskon kanssa. Tärkeimmät seikat, jotka tulee ottaa huomioon kaluston ja kiskon yhteensovittamisessa ovat raideleveys, pyöräkerran raideleveys ja pyörän profiili (Track Design Handbook for Light Rail Transit 2012, 2–40). Raideleveys on kiskojen välinen etäisyys, joka on yleisimmin 1435 mm. Pyöräkerran raideleveys on pyörän laippojen välinen etäisyys, joka on pienempi kuin raideleveys. Pyörän laipan ja kiskon väliin jää tyypillisesti 4–8 mm:n raidevälitys. (Niippa 2014, 6) Raidevälitys mahdollistaa raitiovaunun pienen poikittaisen liikkeen.

Raidevälitys mahdollistaa raitiovaunun sivuttaisen sinimuotoisen liikkeen (kuva 4), joka on toivottavaa muun muassa pyörien mahdollisimman tasaisen kulumisen kannalta. Eräs ei-toivottu tapaus on valelaipan muodostuminen, jossa pyörä kuluu vain kulkupin-

nan keskiosaltaan niin, että pyörän ulkoreunaan alkaa muodostua laippamainen rakenne. (Niippa 2015)



Kuva 4. Pyöräkerran sinimuotoinen liike (Nurmikolu 2014)



Kuva 5. Vetävän voiman ja luiston suhde. Pysty akselin vetävän voiman kasvattaminen pienentää pitävää aluetta ja luisto lisääntyy. (Iwnicki 2006, 131)

Kitka vaikuttaa merkittävässä roolissa kiskon ja pyörän rajapinnassa. Kuvassa 5 on esitetty vetovoiman ja luiston suhde, jossa vetovoiman kasvaessa pitävä alue kapenee muuttuen lopulta kokonaan luistoksi. Alkutilanteessa suurin osa kontaktipinnasta on pitävää aluetta ja pinnassa on vain pieni luistava alue. Vetovoiman kasvaessa pitävä alue pienenee ja luistava alue kasvaa kunnes saavutetaan saturaatioarvo, jonka yläpuolella esiintyy vain luistoa. Saturaatiopiste saavutetaan normaalioloissa kitkakertoimen arvoilla 0,01–0,02. Suurin mahdollinen vetovoima riippuu kontaktipinnan kyvystä absorboida vetovoimaa. Kuvan käyrän muoto muuttuu täysin kolmannen osatekijän vai-

kuttaessa kontaktipinnalla. Kiskon ja pyörän välissä vaikuttava kitka muuttuu esimerkiksi hiekoitushiekan tai pudonneiden lehtien vaikuttaessa kiskoilla. (Iwnicki 2006, 131)

2.4.1 Vaikuttavat voimat

Rataan kohdistuva kuormitus koostuu useasta osasta ja se on jaettavissa staattisiin ja dynaamisiin kuormiin. Staattinen kuorma aiheutuu raitiovaunun massasta ja muun muassa keskihakuvoiman ja tuulivoiman vaikutuksesta syntyy kvasistaattisia eli hitaasti ajan suhteen muuttuvia kuormituksia. Dynaaminen kuorma voidaan jakaa dynaamiseen perusosaan ja dynaamiseen iskukuormaan. Ensimmäinen on alle 20 Hz:n taajuudella värähtelevää radan ja kaluston vuorovaikutuksesta syntyvää kuormitusta, jossa vaunun jousitettu massa reagoi radan muotoihin. Jälkimmäinen koostuu korkeampitaajuuksisista kuormista, joita aiheutuu jousittamattomien massojen iskuista ja erilaisista vioista kiskossa ja vaunukalustossa. (Nurmikolu 2014)

Kiskon ja pyörän kosketuspinta on hyvin pieni, jolloin paine tässä rajapinnassa on suuri. Rajapinnassa vaikuttava paine ja suuri määrä ylityksiä muokkaa materiaaliominaisuuksia ja muodostaa lopulta materiaaliin pieniä säröjä. Kiskolla ja pyörällä on myös hiova vaikutus toisiinsa, jolloin on mahdollista, että materiaalin pintaan ydintyvät säröt hioutuvat pois normaalin liikennöinnin vaikutuksesta. Mikäli säröjen eteneminen on nopeampaa kuin hiova vaikutus, etenee säröjen kasvu syvemmälle materiaaliin ja voi johtaa lopulliseen vaurioitumiseen. (Robinson 2009, 4)

Kiskon ja kaluston vaurioiden välttämiseksi oleellisia seikkoja ovat, ettei ylitetä radalle sallittuja staattisia kuormia ja minimoidaan kalustosta sekä radasta aiheutuvat dynaamiset herätteet. Esimerkiksi pyörien, jousituksen ja telin pitäminen moitteettomassa kunnossa hillitsee ei-toivottujen dynaamisten voimien muodostumista. Samoin radasta johtuvien dynaamisten herätteiden eliminointi olisi yhtä tärkeää. Radan epätasaisuudet ja kaikki epäjatkuvuuskohdat mahdollistavat haitallisten herätteiden syntymisen. Lisäksi kaikki rakenneosat niin radassa kuin kalustossakin tulisi olla tarkoitukseen sopivia ja riittävän lujia kestämään kuormituksia. (Nurmikolu 2014)

2.4.2 Vaurioitumismekanismit

Kiskon profiilin muodon muuttuminen aiheuttaa merkittäviä kunnossapitokustannuksia. Pyörän profiilin muutos voi myös olla merkittävää etenkin mutkaisella radalla. Kuluminen ja muut vauriomekanismit voidaan jakaa luokkiin, joista suoraan kiskon ja pyörän profiilin muotoon vaikuttavia ovat kulumisen ja plastinen deformaatio. Kolmas yleinen vaurioitumismekanismi on vierintäväsyminen. (Iwnicki 2006, 125)

Plastista deformaatiota tapahtuu erityisesti kaarteissa ja se muodostuu kiskon reunalla laippakosketuksen kautta. Suuret toistuvat jännitykset pienellä pinta-alalla aiheuttavat materiaalin pysyvää muodonmuutosta, jonka syvyyteen vaikuttaa kiskon kovuus ja kaarresäde. Seurauksena on kulumista ja väsymissäröjen muodostumista ja lopulta materiaalin vaurioitunut kohta voi irrota pinnasta tai muodostaa säröjen kaltaisia halkeamia. (Iwnicki 2006, 127–128)

Vierintäväsymisen aiheuttamat vauriot voidaan jaotella materiaalin pinnalla ja pinnan alla muodostuviin säröihin. Pinnalla säröt muodostuvat liikenteen vilkkauden ja akseli-kuomien seurauksena, kun taas pinnanalaiset säröt muodostuvat yleensä teräksen metallurgisten vikojen seurauksena (Iwnicki 2006, 128). Pyörän ja kiskon kontaktipinnassa vaikuttavat suuret jännitykset nousevat teräksen myötörajan yläpuolelle, jolloin toistuvien ylitysten seurauksena teräksen pinta muokkauslujittuu ja deformoituu johtaen lopulta säröjen syntymiseen. (Robinson 2009, 4). Kovemman teräksen on havaittu olevan alttiimpi vierintäväsymissäröjen syntymiselle. (Iwnicki 2006, 130)

Kulumismekanismit kiskon ja pyörän kontaktipinnassa voidaan jakaa edelleen useampaan ryhmään syntyvän mukaan. Suurin osa kulumismekanismeista syntyy luistamisen seurauksena, mutta väsymiskulumisen syntyy pääasiassa vierimisliikkeen aiheuttamana. (Lewis & Olofsson 2009, 41–45)

- Adhesiivinen kulumisen syntyy kahden kappaleen välille, jotka tarttuvat toisiinsa pintojen kosketuspisteessä muodostaen liitoksen. Pintojen liikkeessä kosketuspinnan pehmeämpi materiaali murtuu ja yleensä tarttuu kovemman materiaalin pintaan. Adhesiivista kulumista esiintyy yleensä kaarteissa, jossa laippa koskettaa kiskon reunaa.
- Abrasiivinen kulumisen syntyy kahden tai kolmen kappaleen välillä. Ensimmäisessä kovemman kappaleen pinnankarheus irrottaa materiaalia pehmeämmästä

pinnasta liukuessaan sitä pitkin. Jälkimmäisessä kahden pinnan väliin joutuva partikkeli voi naarmuttaa molempia pintoja ja sitä esiintyy erityisesti hiekoitus-hiekan joutuessa pyörän ja kiskon väliin.

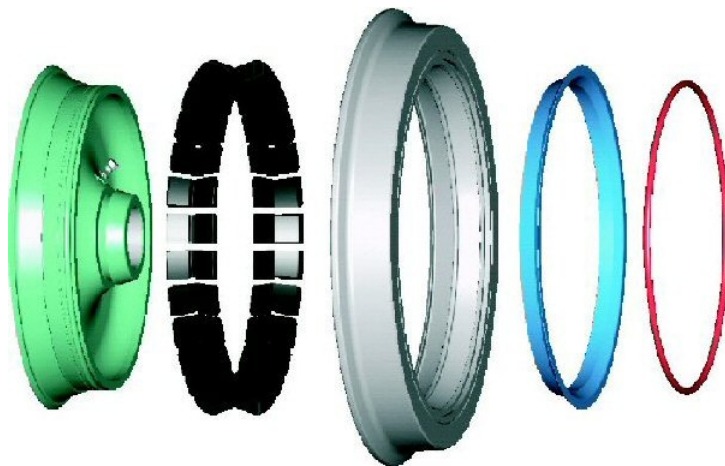
- Väsymiskuluminen aiheutuu materiaalin pitkäaikaisen ja suuren kuormituksen tuloksena. Väsymiskulumisen seurauksena materiaalin pintaan tai heti pinnan alle muodostuu väsymissäröjä. Kuormitusta jatkettaessa säröjen kasvu jatkuu ja ne voivat lopulta johtaa materiaalin lohkeamiseen.
- Hapettumiskulumisessa (Oxidative wear) materiaalin pintaan muodostuu oksidikerros, joka kuluu pois kappaleiden liikkeessä toisiaan vasten. Hapettumiskuluminen on pientä mekaaniseen kulutukseen verrattuna ja sen muodostuminen on riippuvainen lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta.
- Terminen kuluminen on seurausta kitkan aiheuttamasta suuresta lämpötilasta kontaktipinnalla. Pinnan materiaali sulaa tai pehmenee niin, että se alkaa liikkua nesteen tavoin.

3 PYÖRÄ

Kiskokaluston pyörät joutuvat kovalle rasitukselle ja pyörien kulumiseen vaikuttaa muun muassa radan geometria, akselipainot ja ulkopuolinen kuormitus. Raitiovaunun pyörät joutuvat suurelle rasitukselle pienipiirteisen ratageometrian ja ulkopuolisten kuormitusten kuten hiekoituksen ja suolauksen vuoksi. Raitiovaunuilla pyörien huolto-tarve on huomattavasti suurempi kuin esimerkiksi metrojunilla, jotka ajavat enimmäkseen suojaisissa tunneleissa varsin suoraa rataa. Esimerkkinä Helsingin kaupungin liikennelaitos sorvaa kotimaisten nivelraitiovaunujen pyörät noin 25 000 km:n välein (Niippa 2014). Vastaavasti Helsingin metrojunien pyörien sorvaus tehdään vain noin 0,7–1 milj. kilometrin välein. (Alku 2015a)

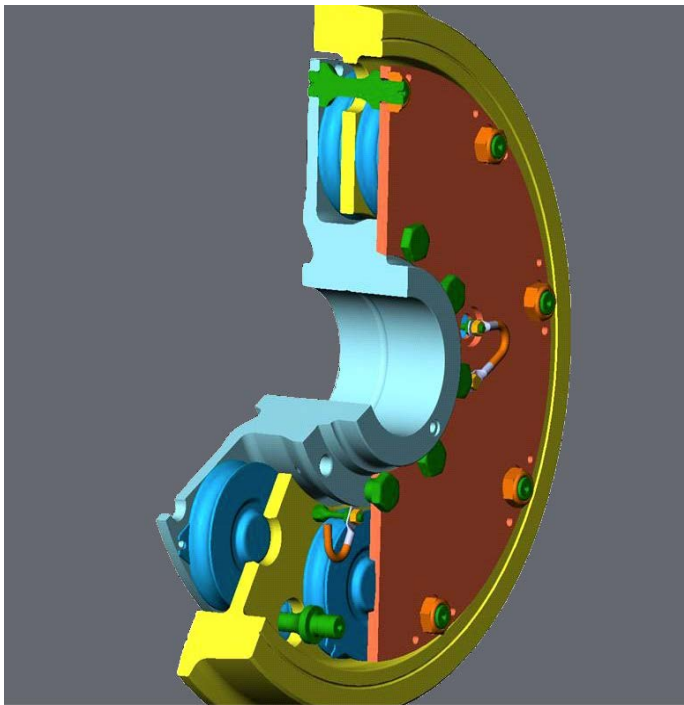
3.1 Pyörän rakenne

Perinteinen junan pyörä on umpiterästä. Raitiovaunuissa käytetään kuitenkin vaimennettua pyörää (Resilient wheel) joka koostuu kahdesta teräsosasta, uloimmasta ja sisemmästä, joiden väliin asennetaan kumipaloja vaimennukseksi. Uloimmainen rengaskehä sisältää laipan ja se toimii myös kontaktipintana kiskon kanssa. Rengaskehä asennetaan akselissa kiinni olevan peruspyörän päälle. Vaihdeettavan rengaskehän idea on, että koko pyörää ei tarvitse vaihtaa sen kuluessa loppuun, vaan pelkkä rengaskehän vaihto riittää. Rengaskehä voidaan sorvata uudelleen alkuperäiseen muotoonsa useita kertoja ennen sen käyttöään loppua.



Kuva 6. Raitiovaunun joustinkumeilla vaimennettu pyörärakenne (Inforta 2015)

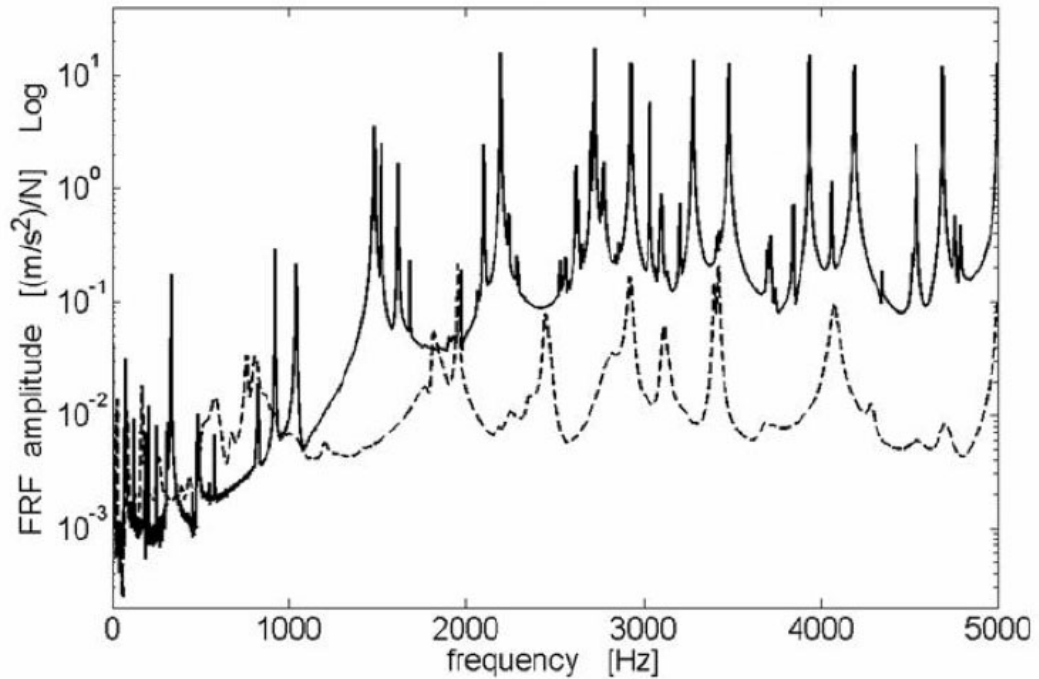
Kumien tehtävä on erottaa pyörän metalliosat toisistaan ja lisätä vaimennusta rakenteeseen, jolloin kokonaisuus saadaan vähennettyä. Kumien merkitystä pidetään erittäin tärkeänä tekijänä pyörän dynamiikassa. Joustinkumit vähentävät vaunun joustamatonta massaa ja sitä kautta vähentävät dynaamisista herätteistä aiheutuvia kuormituksia. Jäykemmällä kumeilla saavutetaan parempi vaimennus ja teräsosien kiinnitys toisiinsa. Kumisten vaimennusosien sijainti ja muoto voivat hieman vaihdella toteutustavasta riippuen. Yksi mahdollinen tapa on sijoittaa joustinkumit peruspyörän sisään kuten kuvassa 7. (Scott 2009, 252–253. Niippa 2014, 27–28)



Kuva 7. Vaimennettu pyörärakenne, jossa joustinkumit peruspyörän sisällä. (GHH-Radsatz 2015)

Vaimennetulla pyörällä on positiivinen vaikutus värähtelyiden ja melun muodostumiseen. Vierintä-äänit muodostuvat suurimmaksi osaksi pintojen epätasaisuudesta. Pinnan epätasaisuudet aiheuttavat värähtelyä ja melua eri taajuusalueilla riippuen raitiotiekaluston nopeudesta. Vierintä-äänissä merkittävin taajuusalue ulottuu noin 5 kHz:iin saakka. Kun pyörän ja kiskon rajapinnan värähtelyt osuvat pyörän ominaistajuusalueille, kasvavat pyörän värähtelyt sekä äänen säteily ympäristöön. Kuva 8 esittää yhtenäisen teräspyörän ja joustinkumeilla vaimennetun pyörän keskimääräistä vastetta eri taajuusalueilla. Kuvaajan pystyakselilla on pyörän säteittäinen kiihtyvyys ja vaaka-akselilla on äänen taajuusalue. Pyörän kulkupinnalle aiheutettu pyörän säteen suuntainen isku aiheuttaa tietyn amplitudin ja äänen säteilyä ympäristöön. Pyörällä on erilaisia ominaistaa-

juusalueita, joiden alueella äänen säteily on kaikkein voimakkainta, ja ne alueet nähdään kuvaajassa korkeina huippuina. Kuvaajan katkoviiva esittää vaimennetun pyörän vastetta, johon kohdistuu pienemmät kiihtyvyyssarvot kuin yhtenäisellä viivalla esitettyyn umpinaiseen pyörään. Vaimennetulla pyörällä on lisäksi vähäisempi määrä korkeita ominaistajuuksalueita. (Scott 2009, 239, 242, 254)

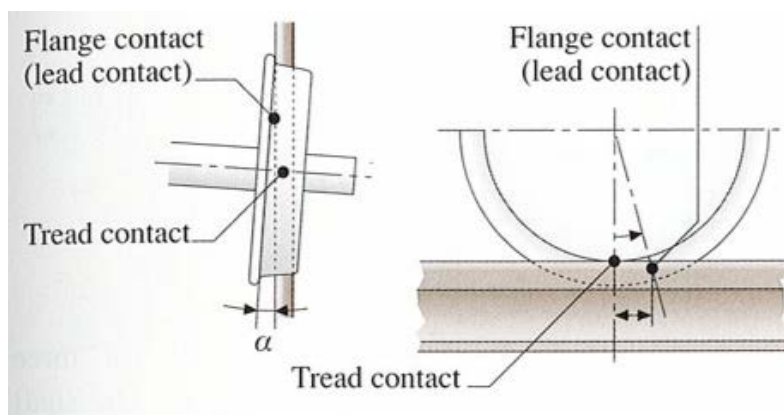


Kuva 8. Perinteisen pyörän ja vaimennetun pyörän käyttäytyminen aksiaalisessa kuormituksessa. Yhtenäinen viiva kuvaa umpinaista pyörää ja katkoviiva vaimennettua pyörää. Pystyakselilla kiihtyvyydet ja vaaka-akselilla taajuus. (Scott 2009, 254)

Vaurioitunut pyörä aiheuttaa matkustusmukavuuden laskua ja vaurio voi pahimmillaan johtaa pyörän murtumiseen. Vauriot tuovat väistämättä myös taloudellisia kustannuksia. Ennakoivalla tarkastustoiminnalla voidaan vaikuttaa vaurioiden syntymiseen, mutta alkavien vaurioiden havaitseminen voi olla hankalaa. Pyörän vauriot voivat olla rakenteen sisäisiä tai ulkopinnalla ilmeneviä. Vaurioiden tutkimiseen voidaan käyttää ainetta rikkomattomia tarkastusmenetelmiä, joilla voidaan havaita sisäisiäkin vaurioita. (Lee 2008, 1322)

3.2 Pyörän profiili

Pyörän kulkiessa kiskoa pitkin suoraan ilman sivuttaisvoimia muodostuu kiskon ja pyörän kontaktipinta kiskon kulkupinnan ja pyörän kulutuspinnan välille. Kaarteissa, vaihteissa tai sivuttaissuuntaisten voimien vaikutuksesta pyörän akselin ja kiskon välinen kohtauskulma voi kasvaa niin suureksi, että laippa koskettaa kiskon reunaa. Tällöin pyörä koskettaa kiskoa kahdesta pisteestä, pyörän kulutuspinnasta sekä laipasta. Tätä kutsutaan kaksipistekosketukseksi (kuva 9). Näillä kahdella kosketuspisteellä on erilainen etäisyys pyörän akselista, jolloin kosketuspisteiden nopeuskin on erilainen. Tämä nopeusero aiheuttaa pyörän luistamista ja kiskon sekä pyörän suurempaa kulumista.



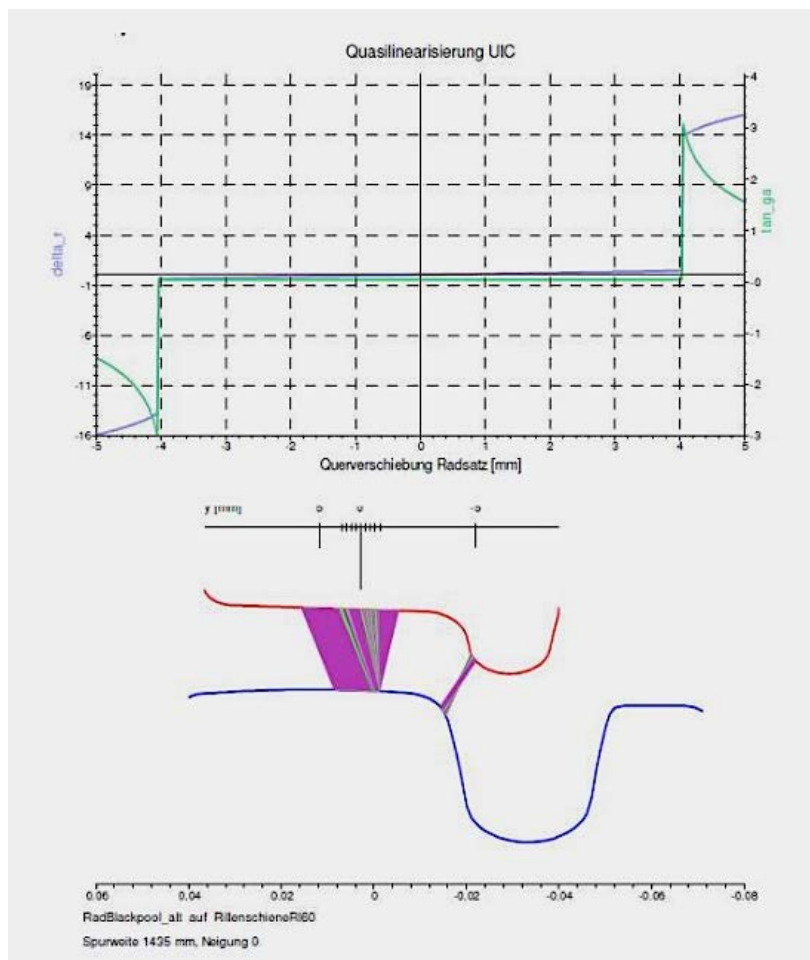
Kuva 9. Pyörän kaksipistekosketus (Grote & Antonsson 2008, 1081)

Jos kaarteissa olevan vaunun akselin pyörien kartiokkuusero ei riitä tasaamaan pyörien välistä kuljettua matkaeroa, alkaa ulommainen pyörä luistaa ja tästä syntyy melua.

Pyörän oikea muoto on merkittävä tekijä kunnossapitokustannuksissa, matkustusmukavuudessa ja melussa. Pyörän kartiomainen muoto mahdollistaa tasaisen kulun pyöräparin hakiessa automaattisesti optimilinjaa suoralla. Tämä on ideaalitilanne, mutta käytännössä sivuttaisvoimien vaikutuksesta vaunu liikkuu hieman poikittaissuunnassa. Tämä liikkuminen saa pyörän kosketuspisteen liikkumaan toisella puolella kohti laippaa ja toisella puolella laipasta pois päin.

Kuvassa 10 on esitetty pyörän profiili, jossa kartiokkuus on hyvin pieni. Ainoastaan yksi piste kiskosta ja pieni alue pyörästä ovat kontaktissa keskenään. Kuvassa esitetään kontaktipinta pyöräkerran sivuttaissiirtymässä. Kuvaajan sininen viiva esittää samalla akselilla olevien pyörien säteiden välistä eroa, Siitä nähdään, että pienellä kartiokkuudella pyörien säteiden ero on hyvin pieni ja sivusiirtymän kasvaessa tarpeeksi, kasvaa

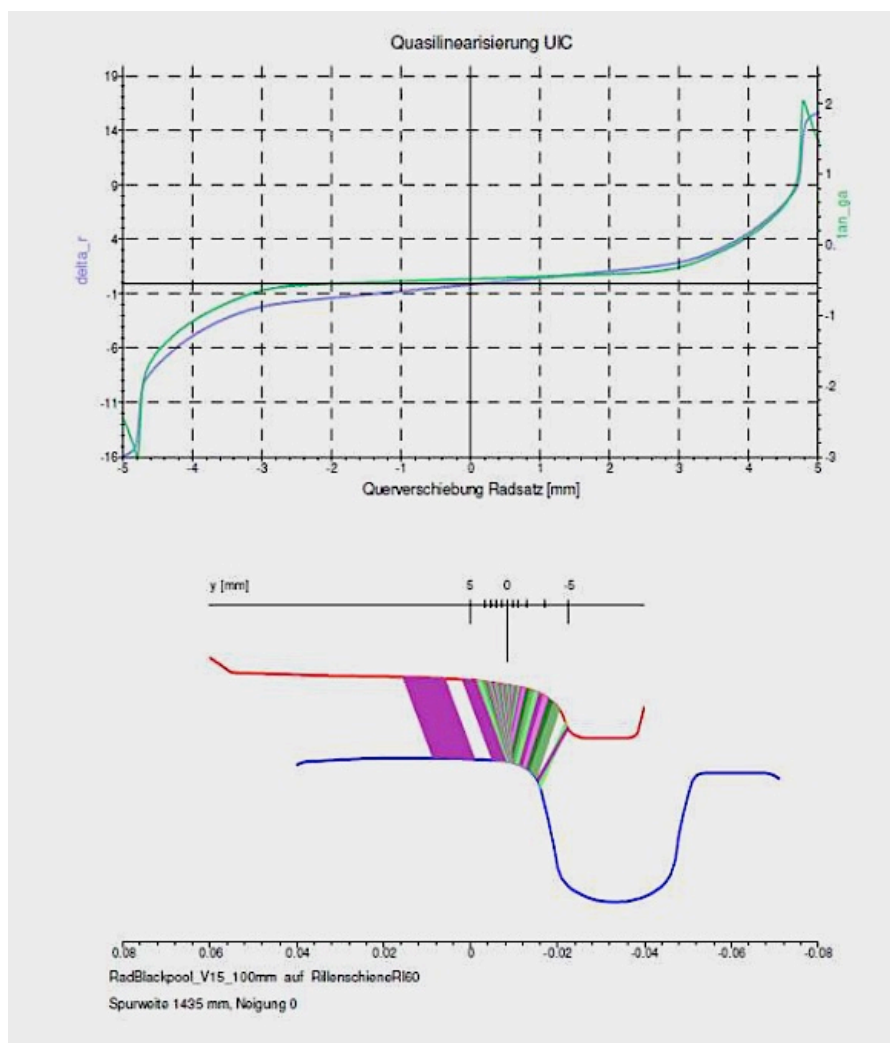
säde-ero lopulta rajusti. Tällainen kontaktialue on ongelmallinen ohjautuvuuden ja kulumisen suhteen. Kuvan kontaktipiste siirtyy epäjatkovasti kulkupinnalta laipalle pyöräkerran sivuttaissiirtymässä. Epäjatkuvuus johtaa kaksipistekosketukseen, joka vaikuttaa muun muassa matkustusmukavuuteen. Pienellä pyörän kartiokkuudella saavutetaan vain vähäinen keskittämiskyky, jolloin pienelläkin sivuttaissiirtymällä saavutetaan laippakosketus ja kiihtyvyyksiikki raitiovaunun koriin. Pieni kontaktipinta johtaa kulumisen keskittymiseen tietylle alueelle. Pyörän kuluminen johtaa valelaipan muodostumiseen. (Tramstore 2012)



Kuva 10. Kiskon ja pyörän kontaktipinta pienellä pyörän kartiokkuudella. Sivuttaissiirtymässä kontaktipinta liikkuu epäjatkovasti kulkupinnalta laipalle aiheuttaen kaksipistekosketusta. (Tramstore 2012)

Kuvassa 11 esitetään samat kuvaajat kuin kuvassa 10, mutta eri pyöräprofiililla. Pyöräprofiilia on optimoitu kiskoon paremmin sopivaksi lisäämällä kartiokkuutta ja muotoilemalla laippaa. Kontaktipinnasta on saatu laajempi ja se voi liikkua melkein jatkuvana kulkupinnalta laipalle. Sinisellä viivalla kuvattu pyörien säteiden välinen ero kasvaa

sivusiirtymän kasvaessa, jolloin kaarteissa pyörien säteiden välinen ero on suuri ja näin ollen kulku on sulavampaa. Yhden ison kontaktialueen ansiosta sivuttaisvoimat kasvavat sivusiirtymän lisääntyessä ja suoralla radalla pyöräkerta pyrkii automaattisesti keskittämään itsensä ilman laippakosketusta. Suuremman kontaktipinnan ansiosta kuluminen kohdistuu laajemmalle alueelle. (Tramstore 2012)



Kuva 11. Kiskon ja pyörän kontaktipinta parannetulla pyöräprofiililla. Sivuttaissiirtymässä kontaktipinta on melkein yhtenäinen kulkupinnalta laipalle. (Tramstore 2012)

Pyörän suuremmalla kartiokkuudella saavutetaan paremmat kaarreominaisuudet vierintäsäde-eron kasvaessa, mutta samalla ajovakaus heikkenee. Kartiokkuudella voidaan myös optimoida kiskon ja pyörän välisen pintapaineen alaa. (Korkeamäki 2011, 18–19)

3.3 Pyörän koko

Pyörän halkaisijalla on vaikutusta kiskoon kohdistuviin kuormituksiin ja kaluston etenemiseen kaarteissa. Suuremmalla pyörän halkaisijalla saavutetaan pienempi radan ja pyörän välinen pintapaine. Pienempi pintapaine johtuu kosketuspinta-alan kasvusta. Suuri pyörän halkaisija aiheuttaa kuitenkin epäedullisemmat kaarreominaisuudet. Ulkokaarteessa kulkevan pyörän on kuljettava pidempi matka kuin sisäkaarteessa kulkevan pyörän. Pienemmän pyörän on pyörittävä isosäteistä pyörää useammin kulkeakseen saman matkan, jolloin pienellä pyörällä sisä- ja ulkokaarten pyörien välille muodostuu suurempi ero kuljetussa matkassa. (Korkeamäki 2011, 21)

Erityisesti matalalattiaraitiovaunuissa pieni pyöräkoko on toivottavaa, jotta telikokoa ja vaunun korkeutta saadaan madallettua. Pieni pyörä aiheuttaa kuitenkin suuremmat pintakuormat ja edistää korrugaatiota sekä pyörän että kiskon kulumista. (Track Design Handbook for Light Rail Transit 2012, 2-2)

3.4 Pyörän vaurioituminen

Raitiovaunujen pyörissä merkittävin vauriomuoto on tasopyörän muodostuminen, joka junakaluston kohdalla tunnetaan nimellä lovipyörä. Tasopyörä syntyy esimerkiksi jarrutustilanteessa pyörän lukkiutuessa. Pyörän kuumentunut teräsrakenne muuttuu austeniitiksi ja pyörän taas pyöriessä se jäähtyy nopeasti, jolloin pintaan muodostuu karkaistu martensiittinen rakenne, joka on herkkä lohkeilemaan (Korkeamäki, 37). Lohkeileva pyörän pinta muuttaa pyörän pyöreää muotoa, jonka seurauksena tasopyörästä aiheutuu dynaamisia voimia, jotka rasittavat kiskoa sekä kalustoa. Nykyaikaisissa raitiovaunuissa on lukkiutumisen estojärjestelmiä, jotka vähentävät ongelman esiintymistä, mutta eivät poista sitä kokonaan. Tasopyörän muodostuminen kohdistuu tiettyihin sääoloihin, jotka aiheuttavat liukkautta ja pahin tilanne on syksyisin lehtien pudotessa kiskoille, jolloin lehdet voivat muodostaa kiskon pintaan erittäin liukkaan ja tiukasti kiinni tarttuvan pinnan. Pyörän muut pintavauriot eivät yleensä ennätä tulla merkittäviksi ennen pyöräprofiilin ennallistamista. (Niippa 2015)

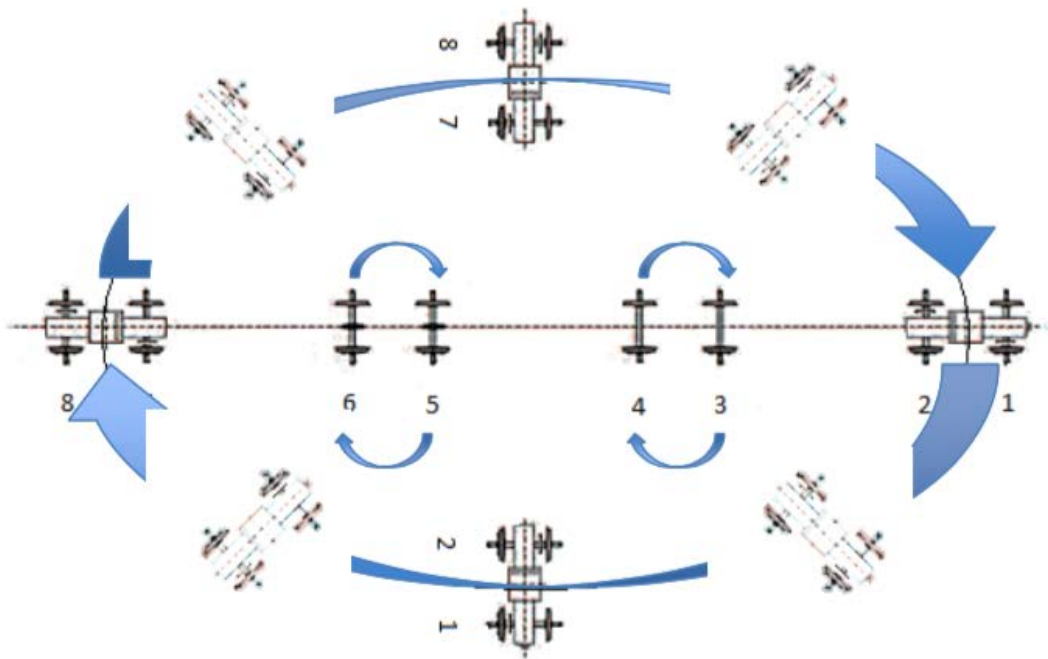
Pyörän laipan kulumisen voi muuttaa laipan paksuutta, korkeutta ja inkliinaatiota, eli laipan sisäpuolen jyrkkyyttä. Inkliinaation pienentyessä liiaksi on vaarana että laippa

nousee vaihteen kielisovitukseen päälle. Laipan paksuus vähenee etenkin kaarteissa, joissa laipan reuna koskettaa kiskon reunaa. Laipan korkeuden muuttuminen on ongelma lähinnä vaihteissa, joissa ajetaan laipan varassa. Laippa voi kulua korkeussuunnassa myös urakiskon uran täyttymisen seurauksena. (Niippa 2014, 23–24)

Polygonaaliset pyörät eli ympyrämäisyydestä poikkeavat pyörät voivat syntyä esimerkiksi jarruhäiriöissä tai sorvauksen vikatilanteissa. Polygonaalisuus voi olla jaksotonta tai jaksollista esiintyen pienellä alueella tai koko pyörän ympäröimällä. Ilmiöstä seuraa dynaamisia voimia, jotka voivat vaurioittaa kiskoa tai kalustoa. (Niippa 2014, 22)

3.5 Pyörien kunnossapito

Raitiovaunun suurin huoltoa vaativa kohde ovat pyörät matkustajien aiheuttamien vaurioiden ohella (Lesley 2009, 139). Pyörän merkittävin huoltotoimenpide on sen sorvaaminen, joka tarkoittaa raitiovaunuissa pyörän profiilin ennallistamista. Raitiovaunun pyöriä voidaan sorvata monta kertaa ja käyttöään loppuessa vaihdetaan renkaasta vain uloin osa, rengaskehä.



Kuva 12. Raitiovaunun yksiköiden kääntö. Etummainen ja viimeinen yksikkö käännetään ja vaihdetaan keskenään viimeisen kanssa. Keskimmäisistä juoksuteleistä vaihdetaan vain akselien paikat. (Niippa 2014, 34)

Brysselissä otettiin käyttöön uusia matalalattiraitiovaunuja, joissa valmistajan suositus pyöräprofiilin koneistukselle oli 50 000 kilometriä perustuen aiempiin kokemuksiin. Brysselin vanha rataverkko kuluttaa kuitenkin pyörää enemmän, joten kulutusta on täytynyt ruveta seuraamaan oikean sorvausvälin löytämiseksi. (TramStore 2012, 23)

Pyörien kuluminen on epätasaista eri telien ja akselien kesken. Suurin kuluminen kohdistuu moottoriteleihin ja erityisesti ensimmäisen telin etummaisen akselin pyöriin. Nämä pyörät vastaanottavat suurimmat kuormat ensimmäisenä esimerkiksi ajettaessa vaihteisiin. Jotta pyörien kuluminen olisi tasaisempaa ja niiden käyttöikä mahdollisimman pitkä, käännetään raitiovaunun yksiköitä säännöllisesti. Yksiköllä tarkoitetaan telissä olevaa moottoriyksikköä, joka koostuu akseleista, vetopyörästä ja moottorista. Vaunun etummainen yksikkö käännetään ja vaihdetaan takimmaisen kesken, jolloin etummaiset kuluneet pyörät vaihtuvat viimeisiksi (kuva 12). Yksiköiden kääntö tapahtuu vain moottoriteliin kesken. Juoksuteleissa vaihdetaan vain akselien paikkoja telin sisällä. Näillä toimenpiteillä renkaiden kulumista saadaan tasattua raitiovaunun sisällä ja vältetään enneaikainen pyörien uusiminen. (Niippa 2014, 34)

4 KISKO

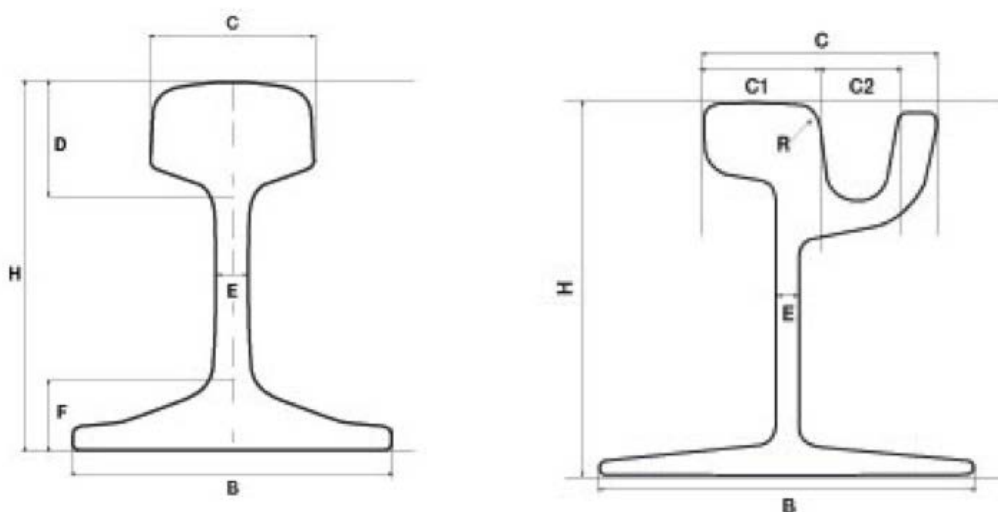
Kisko mahdollistaa raitiovaunulle toiminnallisia hyötyjä, joita ovat automaattinen ohjaus, kumipyöriä merkittävästi pienempi vierintävästus ja kiskon merkitys kaluston käyttämän virran paluureittinä. Rautateillä ja raitioteilla käytetään hyvin erilaisia kaarresäteitä. Rautateillä kaarresäteet eivät mene koskaan alle 150 metrin, kun taas raitioteilla voidaan mennä pienimmillään jopa 10 metrin kaarresäteisiin asti. Suurilla kaarresäteillä kaluston kulun ohjaus hoituu pyörän kartiokkuudella. Pienillä kaarresäteillä vaunu ohjautuu myös pyörien laippakosketuksella, jossa laippa koskettaa kiskon reunaan ja urakiskon vastapuolta. Laippakosketuksesta aiheutuu melua ja se vaikuttaa oleellisesti myös kunnossapitotarpeeseen. Raiteilla kulkevien kulkuneuvojen kitkakerroin on hyvin pieni verrattuna kumipyöräisiin kulkuneuvoihin, joissa iso osa energiasta absorboituu joustaviin kumirenkaisiin. Kaikissa nykyaikaisissa raitiotiejärjestelmissä kisko toimii osana virtapiiriä vetokaluston sähkömoottoreiden ja radan sähkönsyöttöasemien välillä. (Lesley 2011, 71–73)

4.1 Kiskon profiili

Kuvassa 13 on esitetty yleisesti käytössä olevat raitioteiden kiskoprofiilit. Vasemmalla puolella on ns. Vignol-kisko, jota käytetään muusta liikenteestä erotetuilla rataosuuksilla. Vignol-kisko ei salli risteävää liikennettä muuten kuin tasoristeyksissä. Kuvan oikean puoleista urakiskoa käytetään niillä osuuksilla, joilla muu liikenne risteää tai kulkee samassa tasossa radan kanssa. Urakisko upotetaan katuun ja kadun päällyste tulee kiskon yläreunan tasolle, jolloin kiskon yli on helppo kulkea. Urakisko onkin yleisin ratkaisu alueilla, joilla rata halutaan sulauttaa osaksi muuta katua. Urakiskon huonoihin puoliin kuuluu säännöllinen puhdistustarve, koska kiskon ura kerää herkästi likaa. Vignol-kiskon puhdistustarve on vähäisempi, koska se jää ympäröivää maanpintaa korkeammalle.

Helsingin raitioteilla käytetään urakiskoprofiileja Ri60 ja Ri59, joista jälkimmäistä käytetään sisäkaarteissa. Eri kiskoprofiilien käytön syy on Ri59-profiilin suuremmissa uraleveydessä, joka tuo kaarteisiin suuremman raidevälyksen, eli pyörän on mahdollista

liikkua enemmän sivusuunnassa. Pyörien säteiden välinen ero kasvaa ja haitallisen laip-pakosketuksen määrä kaarteissa vähenee. (Niippa 2014, 25)



Kuva 13. Vignol-kisko ja urakisko (ArcelorMittal 2015)

Urakiskoissa yleensä käytettävien teräslaatuojen lujuusominaisuudet ovat R200, R220 ja R260. Näitä vastaavat aiemmin käytössä olleet Brinell-kovuusasteikon arvot ovat 700, 800 ja 900A. Raitiotiekäytössä suositaan R200 ja R220 lujuuksisia teräksiä. Ne mahdollistavat kiskon kuluessa suuremman määrän päällehitsauksia. (Goldschmidt 2015)

Kiskoprofiilin halutun muodon ylläpito on helpompaa Vignol-kiskolla kuin urakiskolla. Urakiskon yläpintaan tuleva kadun päällyste ja kiskon ura tekevät pyöriojien hiontakivien asettelusta haastavaa

4.2 Kiskon vauriot

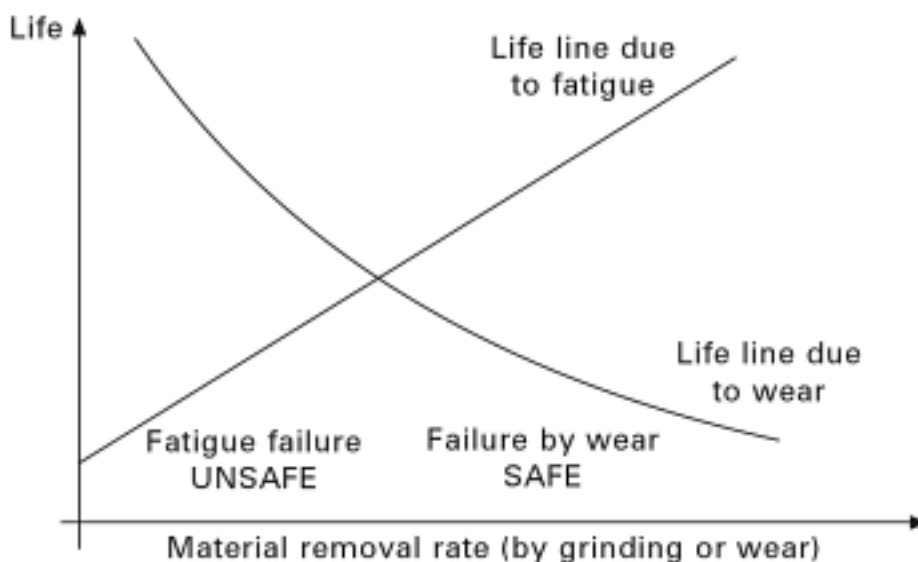
Kaksi yleisintä kiskovauriota ovat kuluminen ja korrugaatio. Kuluminen on suurinta pienillä, alle 30 metrin kaarresäteillä ulkokiskon sisäreunassa ja sisäkiskossa urakiskon uran vastapuolella. Kulumista voidaan vähentää voitelulla ja alentamalla nopeuksia. Voitelulla voidaan vähentää myös melun määrää. (Lesley 2011, 135)

Muita kiskoon kohdistuvia vaurioita ovat kiskon mahdolliset halkeamiset kovien pakasjaksojen aikana ja erilaiset hitsaukseen ja hitsiliitoksiin liittyvät vauriot. Tässä ei kuitenkaan keskitytä tarkemmin näihin vauriomuotoihin.



Kuva 14. Kulunut ja reunastaan lohkeillut urakisko pienen kaarresäteen alueella.

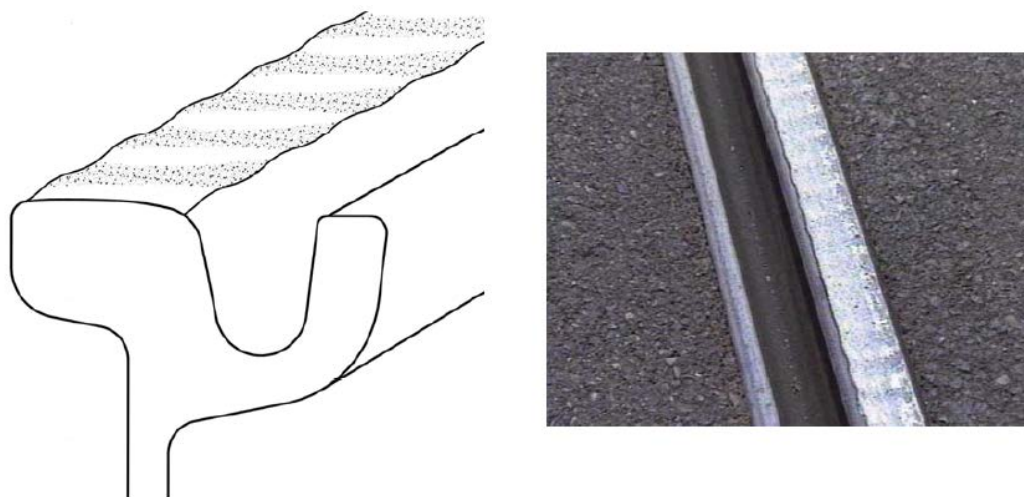
Kiskon kulumisen ja väsymissäröt liittyvät toisiinsa kiskon mahdollisimman pitkää elinkaarta ajatellen. Väsymissäröjä ydintyy ja ne kehittyvät, mutta luonnollinen kulumisen voi katkaista niiden kehittymisen ja jopa poistaa niitä. Kuva 15 havainnollistaa väsymisen ja kulumisen merkitystä kiskon eliniässä. Jos kiskon pinnan hiominen tai luonnollinen kulumisen pidetään mahdollisimman vähäisenä, pysyy kiskon elinikä kulumisen osalta pitkänä, mutta väsymissäröt lyhentävät kiskon ikää merkittävästi. Niinpä kulumisen ja väsymissäröjen suhteen tulisi pyrkiä tasapainotilaan, jossa saavutetaan mahdollisimman pitkä kiskon elinikä. (Lewis & Olofsson 2009, 52)



Kuva 15. Kiskon eliniän ja materiaalin poiston suhde. Nouseva ja laskeva käyrä kuvaavat kiskon eliniän muuttumista väsymisen ja kulumisen vuoksi. Kova kiskomateriaali vähentää kulumista, mutta lisää väsymissvaurioita. (Lewis & Olofsson 2009, 52)

4.2.1 Korrugaatio

Korrugaatiolla tarkoitetaan kiskon kulkupinnalle muodostuvaa säännöllisin välein esiintyvää muokkauslujittunutta aluetta, jonka aiheuttajana on vaunun epävakaata kulku. Korrugaatiota voidaan vähentää pitämällä pyörän ja kiskon profiilit optimaalisina, jolloin kulku on mahdollisimman tasaista. Kiskon pinnan säännöllisellä hionnalla saavutetaan kulkuneuvon tasaisempi kulku, mutta samalla hionta kuluttaa kiskon pinnasta noin 2 mm jokaisella hiontakerralla. Korrugaatio heikentää matkustusmukavuutta, aiheuttaa melua ja vaikuttaa myös kulkuneuvon jousitukseen. Raitiovaunujen korrugaatiota esiintyy yleensä aallonpituudella 100 mm tai vähemmän. Korrugaatiota syntyy kun vaunun telit heiluvat kontrolloimattomasti ja iskevät pyöriä kiskoja vasten, jolloin raideprofiiliin pääsee muodostumaan muokkauslujittumisen seurauksena kovia, noin 2 mm leveitä ja paksuja vyöhykkeitä. Pyörät kuluttavat jatkossa näiden kovien vyöhykkeiden välisiä pehmeämpiä kohtia ja tilanne pahenee. Seurauksena voi olla korrugaation leviäminen koko kiskon hamaraan, jolloin koko kisko joudutaan vaihtamaan. Tilannetta voidaan korjata reagoimalla tilanteeseen ajoissa ja kulkupinnan hiomisella saavutetaan taas tasainen kulku. (Lesley 2011, 84,135)



Kuva 16. Kiskon korrugaatiota (Autech 2015)

Korrugaatiolle herkkiä alueita ovat yleensä kaarteet. Pienisäteisissä kaarteissa pyörän ja kiskon välille muodostuu kaikkiin suuntiin vaikuttavia dynaamisia voimia, jotka johtuvat kitkavoimista sekä pyörän ja kiskon epätäydellisyydestä. Näiden voimien amplitudi voi kasvaa kaarteissa seuraavien tekijöiden vaikutuksesta: (Corrugation 2015)

- Laipan aiheuttamasta kitkasta
- Telin pyöräkertojen huonosta suuntauksesta
- Kiskon tuennan vaihteluista
- Pyörän ja kiskon välillä tapahtuvasta luistamisesta
- Olemassaolevasta korrugaatiosta
- Telin heikosta ohjautuvuudesta.

4.2.2 Kuluminen

Kuluminen on materiaalin irtoamista tai siirtymistä kontaktipinnasta. Kuluminen voi tapahtua eri kulumismekanismien kautta kuten aiemmin esitettiin.

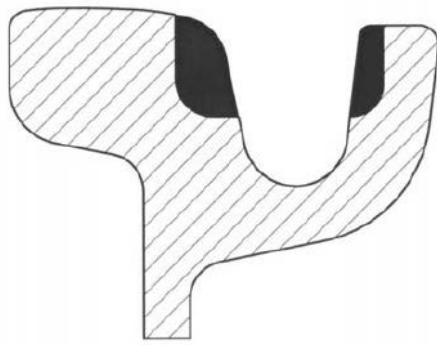
Kiskon kulumisen katsotaan olevan vika, jos sivukuluneisuus on voimakasta tai kisko-profiili kuluu pyörälle huonosti sopivaksi. Kiskon kulumisen voidaan jakaa korkeus- ja sivukuluneisuuteen. Kiskon kulumisen nopeuteen vaikuttaa kiskon ja pyörän välinen kitkakerroin, normaalivoima ja osittaisluisto. (Kauppinen 2011, 47–48)

Ihanteellisissa olosuhteissa suoran kiskon kuluminen ei olisi ongelma. Säännöllisellä huollolla kisko voi kestää käytössä jopa 40 vuotta. Kuluminen kannalta kriittisiä kohtia ovat kaartet, joissa pyörän laippa hioo ja kuluttaa kiskon reunaa. Tämän seurauksena radan raideleveys kasvaa ja voi pahimmillaan luoda olosuhteet pyörän nousulle raiteen yli. Kiskon kulumista voidaan vähentää raiteen tai pyörän voitelulla. Kiskon kulumisen seurauksena kiskoa on uudelleen profiloitava säännöllisesti, joka taas edistää raidevälin kasvamista ja sallittujen toleranssien ylittämistä. Kuluttavimmissa kaarteissa olevat kiskot saavuttavat elinkaarensa pään 8–10 vuoden kuluttua, jolloin ne on vaihdettava uusiin. (Lesley 2011, 84)



Kuva 17. Kulunut urakisko

Kiskon sivun kuluminen on vähäistä hyvin ylläpidetyllä suoralla radan osuudella sekä suurilla kaarresäteillä. Kulkupinnan kuluminen on nopeampaa ja se määrittelee kiskon vaihtovälin. Yleensä kiskot eivät kuitenkaan ole täydellisessä kunnossa ja telin sivusuuntaisten heilahteluiden ja raidevälyksen mahdollistaman pienen pyörien erisuuntaisuuden vuoksi kisko kuluu reunastaan pyörien osuessa siihen. Molemmat mekanismit aiheuttavat leikkausjännityksiä ja iskuvoimia kiskon reunaan. Jos nämä yhdistyvät kiskon kulkupinnan korrugaatioon, voi myös kiskon sivuun syntyä jaksollisia kovettuma-alueita. Tämä on myös esimerkki väsymisviasta. (Robinson & Kapoor 2009, 31)



Kuva 18. Urakiskon sivun ja uran vastapuolen kulumista (Autech 2015)

Kiskon kulumista voidaan ehkäistä voitelulla. Siihen käytetään yleensä rasvaa tai vahaa, mutta myös pelkkä vesi toimii kulumista vähentävänä aineena. Voitelun ongelmana voi olla rasvan leviäminen pidemmälle alueelle kuin pelkkään kaarteeseen, jolloin se voi aiheuttaa raitiovaunulle ongelmia kiihdytys ja jarrutustilanteissa. Pyörän ylilyönti voi aiheuttaa kiskoon metallurgisia vaurioita ylikuumentumisen vuoksi.

4.2.3 Väsymissäröt

Väsymissäröt muodostuvat leikkausjännitysten seurauksena kiskon reunaan ja kulkupinnalle (kuva 19) ja ne voivat ydintyä kiskon pinnalla tai pinnan alla. Vierintäväsymissäröjä ydintyy kiskon kulkupinnalle ja reunaan. Kaarteissa kiskon ulkoreunaan voi ydintyä säröjä pyörän sivuttaisesta luistamisesta. Akselilla yhdistetyissä pyörissä vaikuttaa kaarteissa palauttava voima, kun toinen pyörä pyrkii pyörimään eri nopeudella kuin toinen. Tämän voiman vaikutuksesta pyörässä tapahtuu pientä luistamista, jonka seurauksena säröjä voi muodostua. (Robinson & Kapoor 2009, 29,34)



Kuva 19. Väsymissäröjä kiskossa (Schattauer 2015)

Väsymissäröjen kasvuun vaikuttaa myös pyörän ja kiskon väliin joutuva vesi tai voiteluaine. Syntyneisiin säröihin jäävän nesteen paine nousee yli ajavan pyörän vaikutuksesta ja säröjen kasvu nopeutuu. (Lewis & Olofsson 2009, 50)

4.3 Kiskon kunnossapito

Kiskon kunnossapidon yleisimmät toimenpiteet ovat puhdistus, hiominen ja hitsaaminen. Urakiskon puhtaus on tärkeää radan kunnossapidon kannalta ja vaihteiden tulee olla voideltuina oikean toiminnan varmistamiseksi. (Lesley, L. 2011, 136). Kiskon hionnan tarkoitus on poistaa kiskon pinnassa olevat vauriot kuten korrugaatio ja vierintäväsymisen aiheuttamat säröt. Hionnalla myös ennallistetaan kiskon profiilia, joka on kulumisen seurauksena muuttanut muotoaan eikä ole enää optimaalinen pyörän muotoon nähden. Kiskon hionnalla saavutettavia etuja ovat myös melun ja tärinän vähentyminen, pienempi vierintävästus ja vähäisempi energiankulutus. Vaikka kiskon hionnalla poistetaan kiskosta materiaalia, kasvatetaan sillä kuitenkin kiskon elinikää optimoimalla kiskon ja pyörän kontaktipintaa ja parantamalla kuormien siirtoa pyörältä kiskolle. Joidenkin tutkimusten mukaan kiskon elinikää voidaan kasvattaa säännöllisellä hiontaohjelmalla jopa 30 % (Track Design Handbook for Light Rail Transit 2012, 14-8)

Kiskon kuluessa yli toleranssirajojen ei hiominen ole enää mahdollista. Tällöin kiskoon hitsataan uusi pinta kuluneelle kohdalle. Kaarteissa ja vaihteissa kuluvat kiskoja voidaan päällehitsata useaan kertaan ennen koko kiskon uusimista. Kiskon profiilin hionta hoidetaan yleensä erillisellä hionta-autolla (kuva 20). Kiskon kulkupinnan hiomista tehdään myös monitoimikalustolla.



Kuva 20. Kiskon hiontaa erikoiskalustolla (Schattauer 2015)

Kiskojen vaurioitumista voidaan estää monilla tavoilla: (Nurmikolu 2014)

- Akselikuormien pitäminen maltillisena
- Dynaamisten voimien rajoittaminen jousituksella sekä telien ja pyörien moitteetomalla kunnolla
- Kiskon dynaamisten herätteiden minimointi kiskon tasaisuudella ja epäjatkuvuuksien minimoinnilla
- Lisäksi radan rakenneosat tulisi olla riittävän lujia, mutta silti hieman joustavia, jotta dynaamiset kuormitukset voidaan vastaanottaa

Kiskojen vaurioitumista voidaan vähentää säännöllisellä puhtaanapidolla ja erityisesti urakiskon uran puhdistuksella. Kiskojen yli ajavan muun liikenteen minimoinnilla vähennetään myös kiskon vaurioitumisriskiä.

4.4 Vaihteet

Vaihteiden tehtävä on ohjata raitiovaunu haluttuun suuntaan. Vaihteissa on liikkuva kieli, jonka siirtäminen asennosta toiseen ohjaa vaunun toivotulle raiteelle (kuva 21). Vaihteet ovat radan epäjatkuvuuskohtia, joilla on suuri vaikutus ajodynamiikkaan.

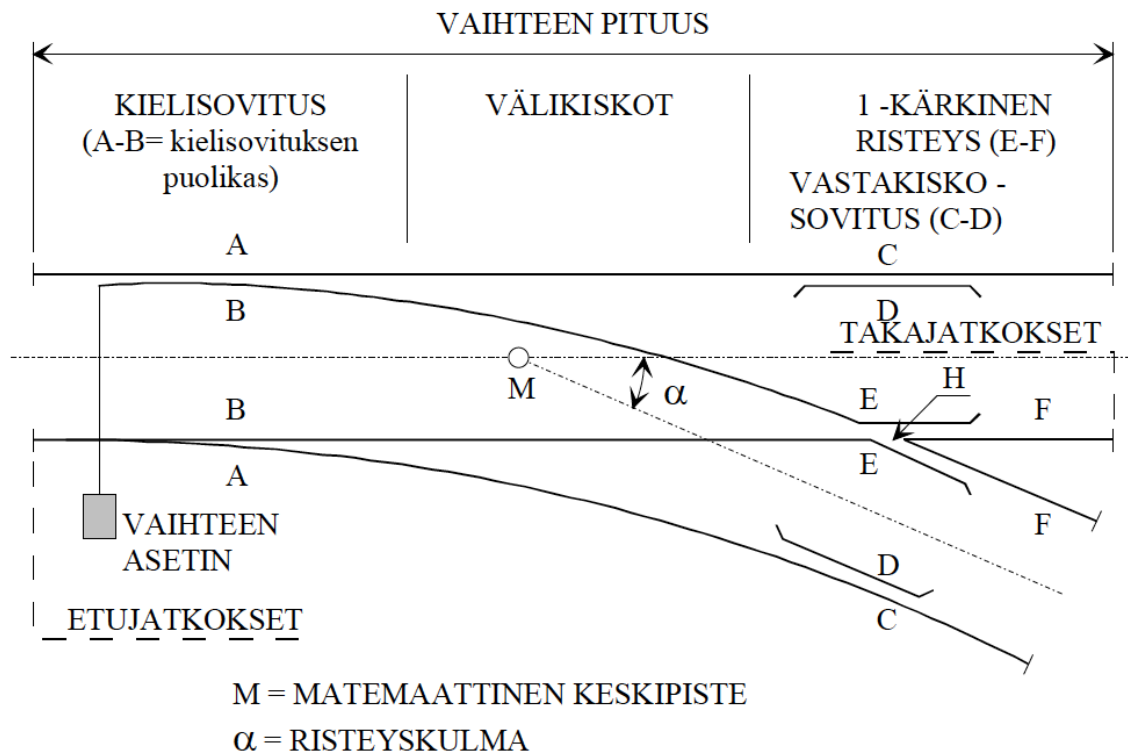


Kuva 21. Raitiotien vaihde

Vaihteet ovat koko radan heikoin kohta. Raitioteillä risteävän raiteen kaarresäteet ovat niin pieniä, että jo pienellä nopeudella vaihteeseen ajettaessa vaihteen kieleen kohdistuu suuria vaaka- ja pystysuuntaisia voimia. Toinen heikkous on laippakosketuksen merkitys vaihteessa. Toisin kuin junaliikenteessä, raitiovaunut tarvitsevat laippakosketusta vaihteissa ohjautumiseen. Laipan osuessa vaihteen kieleen se hioo kielen reunaa. Raitiovaunujen lisäksi muut kiskoilla liikkuvat ajoneuvot voivat aiheuttaa vaurioita vaihteisiin. (Robinson 2009, 51)

Vaihteeseen tuleva raitiovaunu joutuu kulkusuunnasta riippumatta ylittämään aina risteävän raiteen toisen puolen pyörillään (Kuva 22). Vaihteen pääosia ovat kielisovitus, välikiskot, risteys- ja vastakiskosovitus. Kielisovitus ohjaa raitiovaunun valitulle raiteelle kääntyvän kielen avulla. Välikiskojen alueella kulkuneuvo ohjautuu kohti valittua raidetta ja risteyssovituksen alueella ylitetään risteävä raide. Mikäli pyöräpari ei ohjau-

du riittävän hyvin halutulle raiteelle, varmistaa vastakiskosovitus kaluston raiteilla pysymisen pyörän laipan osuessa vastakiskon reunaan. (Maijala 2015)



Kuva 22. Vaihtteen osat: Tukikisko (A), kielet (B), vastakiskojen tukikiskot (C), vastakiskot (D), siipikiskot (E), kärkikiskot (F). (Maijala 2015)

Kun raitiovaunun pyörä ylittää risteävää kiskoa, joutuu se ylittämään myös kiskon uran, jolloin pyörä kulkee osittain tyhjän päällä. Pyörän tulemiseen vaihteessa on perinteisesti kaksi vaihtoehtoa, joista ensimmäinen on vaihteen alueen uran korotus niin, että raitiovaunun pyörät nousevat kulkemaan laipan varassa. Toinen vaihtoehto on käyttää niin leveitä pyöriä, että kiskolta toiselle siirryttäessä pyörä ulottuu riittävästi molempien kiskojen alueelle estäen liian suurien kuormien muodostumista. (Peltola 2011)

Perinteisesti raitiotieliikenteessä on käytetty laipan varassa ajettavia vaihteita ja kapeita pyöräleveyksiä, koska katuun upotettu kisko on voinut aiheuttaa liian leveän pyörän osumisen katupäällysteeseen. Laipan varassa ajettavassa vaihteessa vain toinen, risteävän raiteen ylittävä pyörä nousee laipan varaan toisen pyörän kulkiessa normaalisti kiskon pintaa pitkin. Laipan varaan nouseminen tapahtuu apurampin ja nousurampin avulla. Nykyisin käytetään pääsääntöisesti syväuraisia vaihteita ja leveämpiä pyöriä. Syväuraiset vaihteet tuovat merkittäviä etuja, joista suurimmat ovat kiskon ja pyörän kulumi-

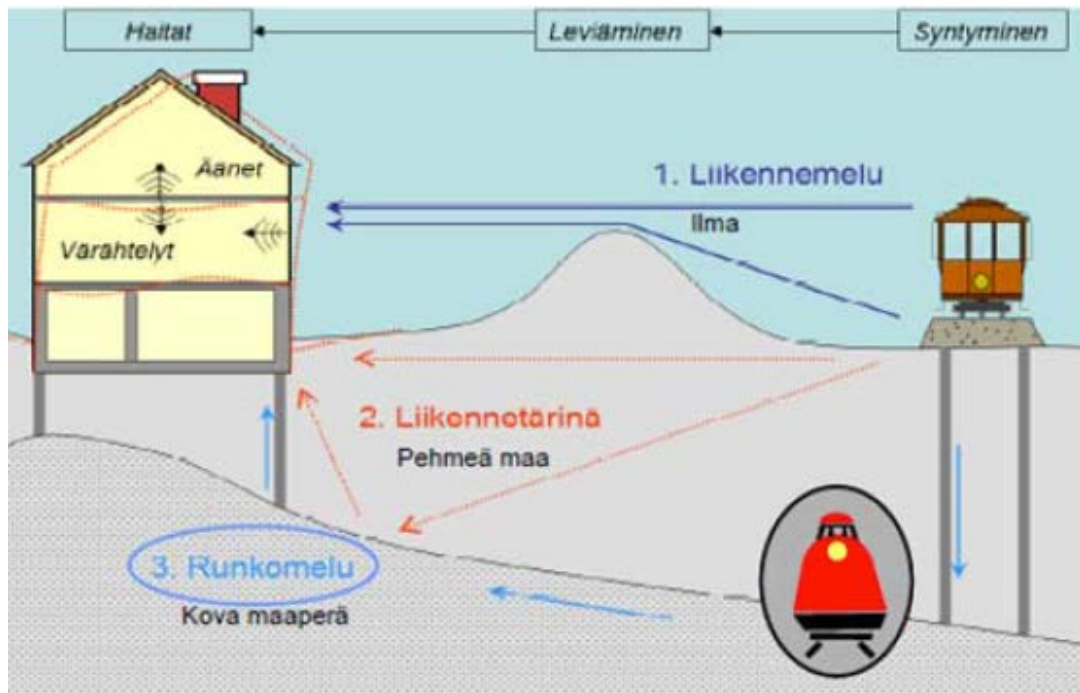
sen väheneminen tärisevän laippakosketuksen aiheuttaman melun väheneminen. Syväuraiset vaihteet voidaan myös ajaa nopeammin läpi, josta suurin hyöty tulee kiihdytysten ja jarrutusten vähenemisestä. (Peltola 2011; Niippa 2014)

Risteyskulma ei saa olla liian suuri, jotta syväuraiset vaihteet toimisivat ilman laippojen varassa ajoa. Helsingin seudun liikenne on selvittänyt, että heillä 110 mm leveät pyörät mahdollistaisivat maksimissaan 30–40 asteen risteyskulman. Siirryttäessä ajamaan pyörien kulkukehällä vaihteisiin kohdistuisi uusia kulumiskohtia risteyssovitukseen, pyörien kulkupinnalle ja siipikiskoihin. (Peltola 2011)

5 MELU JA TÄRINÄ

Melu on ääntä joka koetaan haitallisena. Liikenteen tuottamiin ääniin on alettu kiinnittämään entistä suurempaa huomiota ja liikkuvan kaluston äänet sekä erilaiset värähtelyt koetaan usein epämiellyttävinä ja haitallisina. Melu vaikuttaa muun muassa yleiseen viihtyvyyteen ja ihmiset kokevat melun vaikutuksen eri tavoilla, vaikuttaen herkimmillä esimerkiksi unen laatuun.

Raitiovaunun tuottama melu voidaan jakaa kuvan 23 mukaisesti ilman välityksellä leviävään liikennemeluun, pehmeiden maakerrosten kautta kulkeutuvaan liikennetärinäan ja kovan maan kautta kulkeutuvaan rakennusten runkomeluun. (Nurmikolu 2014)



Kuva 23. Melun ja värähtelyiden kulkeutuminen raideliikenteestä. (Nurmikolu 2014)

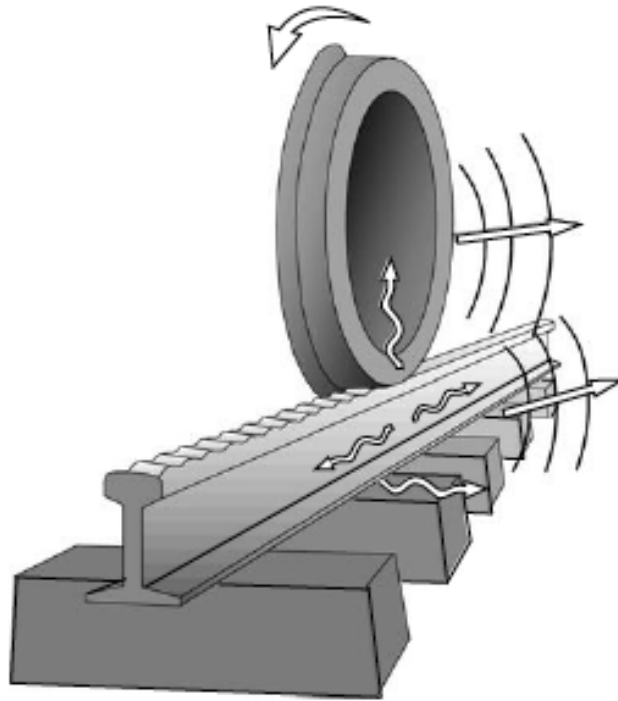
Ilman välityksellä leviävä liikennemelu on raitioteillä pääasiassa kiskon ja pyörän rajapinnasta lähtevää melua. Aerodynamiikasta tai moottorien äänistä aiheutuvat äänet peittyvät muiden äänien taakse pienissä nopeuksissa. Lisäksi muita erilaisia äänilähteitä ovat muun muassa jarrut, vaihteet ja risteykset. Pyörän ja kiskon rajapinnassa muodostuvia suurimpia äänilähteitä ovat: (Track Design Handbook for Light Rail Transit 2012, 9-4-9-9, 9-35)

- Normaalit vierintä-äännet, jotka aiheutuvat suurimmaksi osaksi koskettavien pintojen pinnankarheudesta.
- Iskuäännet, jotka johtuvat kiskon tai pyörän epätäydellisyydestä, kuten kiskon liitoksista ja vioista tai pyörän tasoista.
- Korrugaatiosta ja erityisesti pienen aallonpituuden korrugaatiosta johtuvat äännet ovat merkittävin yksittäinen melun lähde monilla raitioteilla. Alkuvaiheessa korrugaatio on matala-amplitudista, mutta pitkälle kehittynyt korrugaatio aiheuttaa iskuääniä pyörän irrotessa kiskon pinnasta.
- Kaarteiden aiheuttamat äännet voidaan jakaa kolmeen lähteeseen: Pitkittäinen luistaminen esiintyy kaarteissa, joissa pyörän kartiokkuus ei riitä tasaamaan matkaeroa pyörien välillä, jolloin pyörä luistaa kiskon päällä. Poikittainen luistaminen, joka pienillä kaarresäteillä aiheuttaa luistoa poikittaissuunnassa pyörän ja kiskon välisen kohtauskulman kasvun seurauksena. Tämä aiheuttaa pääosan kirsuntaäänistä. Kolmantena äänilähteenä on pyörän laippakosketus, jossa laippa ottaa kiinni kiskon reunaan pienillä kaarresäteillä ja aiheuttaa samalla myös pyörän luistamista kiskon kulkupinnalla.

Raideliikenteestä aiheutuvaa tärinää muodostuu pyörän ja kiskon rajapinnassa ja se johtuu radan kautta maaperään ja leviää maakerrosten välityksellä ympäristöön. Maakerrosten kautta kulkeutuva matalataajuinen värähtely voi aiheuttaa ongelmia radan lähistön rakennuksissa. Värähtelyn taajuuteen vaikuttaa paljon kaluston akseliväli, telien väli ja pyörän halkaisija. Erityisesti suuret akselikuormat yhdistettynä pieneen nopeuteen tuottavat erittäin pienten aallonpituuksien (alle 10 Hz) värähtelyä ja värähtelyt voivat johtua rakennusten perustuksiin aiheuttaen epämiellyttävää tärinää. Pahin tilanne syntyy kun rakennuksen ominaistajuus osuu samalle taajuusalueelle värähdysten kanssa.

Maaperän kautta leviävä tärinä on huomioitava erityisesti pehmeillä maalajeilla, joissa värähtelyt voivat levitä laajalle alueelle. Kallioperän kautta rakennuksiin kulkeutuvat värähtelyt muodostavat rakennuksen seinissä ja lattioissa kuultavaa runkomelua ja se mielletään erityisen epämiellyttäväksi. Nämä runkoäännet ovat taajuudeltaan noin 30–200 Hz. (Track Design Handbook for Light Rail Transit 2012, 9-42–43; Esveld 2001, 461)

Kuva 24 havainnollistaa kiskon ja pyörän rajapinnan vierintä-äänien muodostumismekanismeja. Vierintä-äänit voivat levitä ympäristöön sekä pyörästä että kiskosta. Tarkempi erottelu äänen syntyperästä voi olla vaikeaa, koska esimerkiksi pyörästä peräisin oleva ääni voi säteillä ympäristöönsä kiskon kautta. (Iwnicki 2006, 283)



Kuva 24. Vierintä-äänien muodostumismekanismit kiskon ja pyörän rajapinnassa. Ääni voi säteillä sekä pyörän että kiskon kautta. (Iwnicki 2006, 283)

6 KUSTANNUSTEN MUODOSTUMINEN

Raitiotiejärjestelmän suunnitteluvaiheessa tehtävillä valinnoilla voi olla merkittäviä vaikutuksia elinkaarikustannuksiin. Rataan ja kiskokalustoon tehdyt valinnat määräävät suunnan vuosikymmeniksi, eikä suunnan muuttaminen myöhemmin ole helppoa eikä halpaa. Niinpä pelkät investointikustannukset raitiotien tapauksessa eivät kerro koko elinkaaren aikaisia kustannuksia.

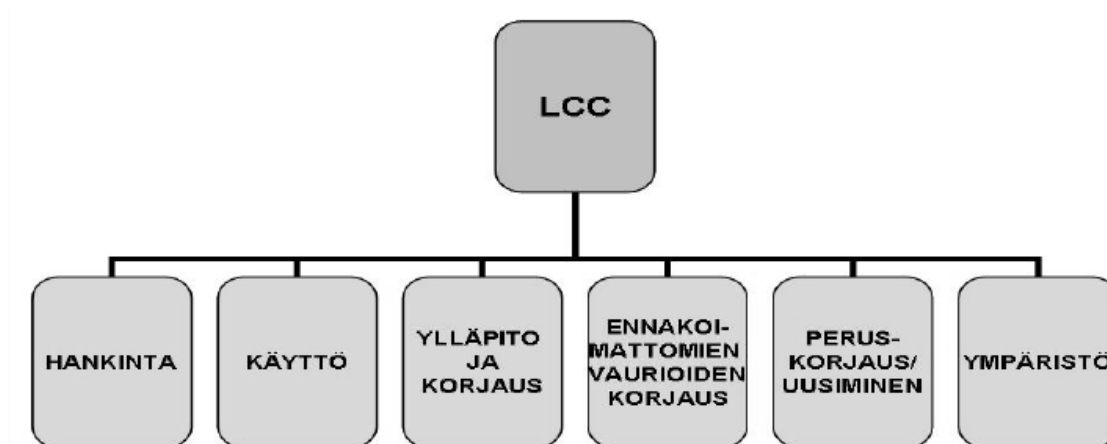
Yleinen lähestymistapa kunnossapitoon voi vaihdella ennaltaehkäisevästä toiminnasta vaurioiden korjaamiseen. Ennaltaehkäisevällä kunnossapidolla voidaan säästää vähentyneenä vaurioiden korjaustarpeena. Usein voidaan tavoitella ennaltaehkäisevää kunnossapitoa, mutta budjettirajoitteet ohjaavat kunnossapitoa vaurioiden korjaamisen suuntaan.

Valitut toimenpiteet ja korjaustarpeen määrä vaikuttavat kunnossapitokustannusten määräytymiseen. Valitulla kunnossapitostrategialla voidaan toteuttaa haluttua palvelu- ja turvallisuustasoa. Kunnossapitostrategia ja materiaalivalinnat vaikuttavat koko elinkaaren aikaiseen ehkäisevän kunnossapidon ja korjauksen määrään. Kunnossapitoa koskevissa päätöksissä tasapainotetaan talous- ja turvallisuusnäkökulmia, joissa pyritään mahdollisimman pienellä summalla pääsemään haluttuun palvelu- ja turvallisuustasoon. Yllättävät kunnossapitotarpeet kertovat osaltaan kunnossapidon tasosta. Erilaisten liikennöintihäiriöiden nouseminen ja yllättävien kustannusten kasvu voivat olla merkki laadun ja luotettavuuden alenemisesta. (Koskela 2011, 19–20)

Kunnossapitoa ja sen kaikkia positiivisia vaikutuksia ei ole aina ymmärretty. Suunnitelmallisella radan kunnossapidolla saavutettavia positiivisia vaikutuksia ovat: (Koskela 2011, 19)

- Turvallisuuden lisääntyminen
- Käyttöiän lisääntyminen
- Liikennöintikustannusten väheneminen
- Piilevien vikojen tunnistaminen
- Imagon luominen
- Liikennöinnin tehokkuus

Infra-alan elinkaarikustannukset voidaan jakaa kuvan 25 mukaisesti kustannuksia muodostaviin ryhmiin, jotka muodostuvat hankinta-, käyttö-, ylläpito- ja korjauskustannuksista, ennakoimattomista kustannuksista, peruskorjaus- ja uusimiskustannuksista sekä ympäristökustannuksista.



Kuva 25. Infra-alan elinkaarikustannusten muodostuminen (Koskela 2011, 16)

Radan elinkaarikustannuksia voidaan arvioida kahdella tavalla: (Esveld 2001, 616)

- Aineelliset kustannukset verrattuna aineettomiin kustannuksiin. Aineellisia kustannuksia ovat suoraan rahassa mitattavat kustannukset, kuten radan rakentamisen ja kunnossapidon kustannukset. Aineettomien kustannusten määrittäminen taas on hankalaa tai mahdotonta. Aineettomiin kustannuksiin luetaan mm. laadun, turvallisuuden tai matkustusmukavuuden laskun ja meluhaittojen aiheuttamat kustannustekijät, joiden suoraa rahallista arvoa ei voida tarkasti määrittää.
- Pääomakustannukset verrattuna juokseviin kustannuksiin. Pääomakustannuksia muodostuu suorista hankinnoista, asennuksista tai rakentamisesta. Juoksevat kustannukset taas ovat vuosittain toistuvia toimenpiteitä, kuten tarkastuksia ja huoltoja.

Pyörän ja kiskon rajapinnassa kustannuksia aiheuttaa pääasiassa pyörien sorvaaminen sekä kiskon kunnossapitotyöt. Pyörän ja kiskon kunnossapidossa hyödynnetään paljon teknisiä laitteita, mutta henkilötyötuntien määrä on silti suuri. Suurimman kustannuserän muodostaakin henkilöstökulut.

6.1 Pyörien kunnossapitokustannukset

Tämän luvun kunnossapitokustannukset perustuvat Helsingin kaupungin liikennelaitoksen kokemuksiin (Niippa 2014, 2015). Helsingin kaupungin raitioliikenteen käyttämien Valmetin nivelraitiovaunujen pyörien huolto-ohjelman suunnittelussa on siirrytty ennakkoivaan huolto-ohjelmaan, joka tarkoittaa määrävälein tehtävää huoltoa. Toisin sanoen huoltoja tehdään, vaikka kalustolla voisi vielä liikennöidä. Ennakoivalla huollolla säästetään kuitenkin kustannussäästöjä pidemmällä ajanjaksolla. Ennakoiva huolto-ohjelma kasvattaa aluksi kustannuksia, mutta maltillisesti. Pyörien kunnossapidossa suuren menoerän aiheuttaa niiden kulutuspinnan sorvaaminen ja siten lyhenevä käyttöikä.

Raitiovaunun pyörähuollon kustannuksista suurin osa muodostuu työvoimakustannuksista. Materiaalin osuus kokonaiskuluista on hyvin pieni. Materiaalikustannuksia muodostuu lähinnä uusista rengaskehistä, joita hankitaan vuosittain noin 200 kpl. Rengaskehät sorvataan ennen niiden asentamista pyöriin. Helsingin raitiovaunujen kunnossapidossa työskentelee 3 ammattimaista pyöräsorvaajaa. Pyöräsorvit ovat automaattisorveja, joissa automaatio hoitaa suuren osan sorvaustyöstä. Pyöräsorvin kapasiteetilaskennassa yhden vaunun läpimenoajaksi on saatu noin 6 tuntia.

Pyörien sorvauksen materiaalikustannukset ovat noin 230 euroa raitiovaunua kohden ja yhden millimetrin sorvaus renkaan pinnasta maksaa materiaalina noin 7 euroa. Huoltosorvaus voidaan suorittaa yhden työvuoron aikana ja yhden sorvaajan toimesta. Sorvikustannukset muodostuvat teristä ja huollosta. Sorvin kuluvana osana ovat sen terät, joita joudutaan vaihtamaan keskimäärin kahden raitiovaunun sorvauksen jälkeen. Pyöriin muodostuvat tasot ovat paljon sorvin teriä kuluttava vauriomuoto. Sorvin vaatimat tarkastukset ja pienet huoltotyöt voidaan toteuttaa itse ja suuremmat huollot hoidetaan huoltosopimuksella. Sorvin käyttö lasketaan kiinteisiin kustannuksiin jos sorvin tunnit eivät ylitä huolto-ohjelman rajoja.

Telien kääntö ja akselien vaihto vaativat aikaa yhden työpäivän ja kahden henkilön työpanoksen, jonka lisäksi vaaditaan hieman sähkömiehen ammattitaitoa sähköjärjestelmän kytkennässä. Kokonaistyoääräksi on laskettu 13 tuntia. Pyörien rengaskehien uusimi-

nen ja raitiovaunuun asentaminen vaatii runsaasti työtunteja. Yhden kahdeksan akselisen matalalattianivelraitiovaunun pyörien uusimisen on laskettu vievän aikaa noin 68 tuntia.

Eri kunnossapitotoimien vaatimia työtuntimääriä Valmetin 8-akseliselle nivelraitiovaunulle:

- Pyörien uusiminen: 68 h
- Telien kääntö ja akselien vaihto: 13 h
- Huoltosorvaus: 8 h

6.2 Kiskon kunnossapitokustannukset

Erityisesti kiskon kunnossapidossa ennaltaehkäisevä huolto on kokonaiskustannusten muodostumisen kannalta kustannustehokkaampaa kuin pidemmälle menneiden vaurioiden korjaus. Saksan Karlsruhessa operaattorit ovat suositelleet seuraavia toimia kustannusten karsimisessa: (Rodriguez 2010)

- Radan säännöllinen puhdistus
- Vaihteiden säännöllinen puhdistus ja rasvaus
- Kiskojen hitsaus ja korrugaation pois hionta
- Säännöllinen kiskon uudelleen profilointi ja päällysteen paikkaus
- Säännöllinen visuaalinen tarkastus.

Kiskon kunnossapitokustannukset muodostuvat suurimmaksi osaksi henkilöstökuluista. Suuremmat työt kuten kiskon hitsaus tai profiilin ennallistaminen toteutetaan yleensä urakoitsijoita kilpailuttamalla.

Helsingissä raitiotieradan kunnossapitotoimia tehdään päivävuorossa sekä 5-vuorotyönä. Eri kunnossapitotoimiin käytettäviä päivittäisiä henkilöstö- ja kalustomääriä eri vuodenaikoina: (Toivonen 2015)

- Rata-alueen lakaisu ja urakiskon uran puhdistus kesällä: Rataverkko puhdistetaan joka viikko kahdella harjavaunulla kahden henkilön toimesta
- Rata-alueen lakaisu ja urakiskon uran puhdistus talvella: Rataverkko puhdistetaan joka yö kahdella harjavaunulla kahden henkilön toimesta
- Vaihteiden tarkastus, puhdistus ja rasvaus kesällä: Jokainen vaihde tarkastetaan vähintään kerran viikossa lokaimuauton ja kahden henkilön toimesta

- Vaihteiden tarkastus, puhdistus ja rasvaus talvella: Kahdella lokaimuautolla päivä- ja vuorotyöntekijöiden toimesta
- Viemäroinnin huuhtelu: Viemärointi huuhdellaan vähintään keväisin ja syksyisin lokaimuauton ja kolmen vuorotyöntekijän toimesta
- Vaihteiden mekaaninen huolto ja kunnostus: Jokainen vaihde huolletaan vähintään kaksi kertaa vuodessa auton ja kahden työntekijän toimesta
- Radan kaarteiden rasvaus: Kaikki radan kaarteet rasvataan päivittäin rasva-autolla yhden työntekijän toimesta. Haastavimpia kaarteita rasvataan kaksi kertaa päivässä
- Kiskon ylläpito- ja hiontaa suoritetaan pakkasettomaan aikaan huomavaunulla yhden työntekijän toimesta joka päivä yhteensä n. 10 000 km vuodessa. Lehtien putoamisen aikaan syksyllä hiontaa tehdään kahdessa vuorossa.

7 HELSINGIN RAITIOTIE

Helsingin raitiotiellä on pitkät perinteet säännöllisen liikenteen aloittaessa jo 1890-luvun alussa. Raitiotien laajuus on vaihdellut vuosikymmenten saatossa autoistumisen kehityksen myötä, mutta viime vuosikymmeninä raitioliikenteen merkitys on jälleen korostunut ja rataverkko kasvanut.

HKL-raitioliikenne on Helsingin kaupungissa raitiotieliikennöinnistä ja kalustosta vastaava taho, joka huolehtii osittain myös radan kunnosta. Radan suunnittelusta, rakentamisesta, ylläpidosta ja huoltamisesta vastaa HKL-infrapalvelut.

Nykyinen raitiovaunukalusto

- Valmetin nivelraitiovaunuja 82 kpl.
- Bombardierin Variotram-matalalattivaunuja 40 kpl.
- Transtechin Arctic-matalalattivaunuja tilattu 40 kpl, jotka toimitetaan vuoteen 2018 mennessä. Nyt käytössä 2 kpl. (huhtikuu 2015)

Rataverkon laajuus

- Raitioverkon pituus n. 50 km
- Linjaraiteilla vasta- sekä myötävaihteita 93 kpl molempia
- Varikot kolmessa toimipisteessä

Tämän kappaleen aineistot pyörien ja radan kunnossapidosta on saatu haastattelemalla HKL-raideliikenteen ja HKL-infrapalveluiden asiantuntijoita (Niippa 2015, Portti 2015)

7.1 Raitiovaunun pyörien kunnossapito

HKL-raideliikenne seuraa nivelraitiovaunujen pyörän kulumista tarkastuksilla, jotka toteutetaan 10 000 km:n välein vaunun tullessa huoltoon. Pyörälle tehtävät tarkastukset käsittävät laipan korkeuden ja leveyden sekä pyörän halkaisijan mittaukset. Mikäli sallitut mittapoikkeamat ylitetään, joudutaan pyörien profiili ennallistamaan. Profiilin ennallistaminen tehdään sorvaamalla pyörät sorvissa, joita HKL-raitioliikenteellä on käytössä kaksi. Toinen pyöräsorvi toimii lattiatason alapuolella ja toinen vaatii raitiovaunun

nostamisen ilmaan sorvaamisen ajaksi (Kuva 26). Pyörien sorvaaminen Valmetin nivelraitiovaunuille tehdään keskimäärin 25 000 km:n välein. Variotram-matalalattiavaunujen pyörien sorvausväli on vain noin 7500 km, joka hieman vaihtelee vuodenaikojen ja liikennöintiolosuhteiden mukaan. Pieni sorvausväli johtuu vaunutyyppin ominaisuuksista, jotka eivät sovellu hyvin Helsingin rataverkolle. Variotramien huoltamisesta Helsingissä vastaa niiden valmistaja.



Kuva 26. Variotram-matalalattiaraitiovaunu menossa pyöräsorviin Helsingin varikolla

Eri vuodenajat tuovat haasteita liikennöintiin. Merkittävin haitta aiheutuu syksyisin puista putoavista lehdistä. Ne muodostavat kiskon pintaan erittäin liukkaan kerroksen, josta voi seurata tasopyörän muodostuminen, jossa pyörä liikuu kiskoa pitkin ja sen muoto muuttuu ei-pyöreäksi. Liukkaiden kelien operointia helpottaa vaunuissa olevat hiekoitussuuttimet, joista voidaan tarvittaessa syöttää hiekkaa kiskoille tarvittavan pidon aikaansaamiseksi (kuva 27). Hiekoitus vaikuttaa merkittävästi pyörien kulumiseen. Asiaa ei ole tarkemmin tutkittu, mutta hiekoituksen vaikutuksen on arvioitu olevan noin kaksinkertainen normaalikulumaan verrattuna.

Kiskon korrugaatiota esiintyy erityisesti vaihteen ristikoiden jälkeen, eli kohdissa joissa pyörä on juuri ohittanut vaihteen. Ristikoiden jälkeiseen korrugaatioon on syynä matalauraiset vaihteet, joissa pyörän kontaktipinta siirtyy täysin laipan varaan ja palautuu

vaihteen jälkeen takaisin pyörän vierintäpinnalle. Tässä kontaktipinnan muutoskohdassa vaikuttaa pystysuuntaisia kuormituksia, jotka edesauttavat korrugaation syntymistä. Pyörien kuluminen on Helsingissä suurinta juuri laipan korkeussuunnassa, mikä on seurausta matalauraisista vaihteista, jotka kuluttavat pyörän laippaa. Syväuraisilla vaihteilla välttyttäisiin näiltä ongelmilta, mutta vaihto onnistuisi vain osaan nykyisistä vaihteista. Lopuissa vaihteissa liian suuri raideristeyksen kulma rajoittaa syväuravaihteiden käytömahdollisuutta.



Kuva 27. Kotimaisen nivelraitiovaunun hiekoitussuutin pyörän edessä

7.2 Radan kunnossapito

Rataverkkoa huolletaan säännöllisesti. Urakiskon urat ja vaihteet puhdistetaan jäädästä ja liasta sekä kaarteita rasvataan osana päivittäistä ylläpitoa. Päivittäinen huolto suoritetaan omalla erikoiskalustolla. Kuvassa 28 on HKL-raitioliikenteen monitoimivaunu, jolla voidaan suorittaa päivittäistä ylläpitoa ja erilaisia huoltotoimia kuten kiskon hiontaa. Vaunuun on helposti vaihdettavissa työkaluja vuodenaikojen ja vaatimusten mu-

kaan. Monitoimivaunulla tehdään kiskon selän hiontaa ns. laahakivellä, jossa ei ole mukana pyörivää liikettä. Hionnalla poistetaan korrugaatiota ja muita kiskon selkään muodostuneita vaurioita.

Kiskon kunnostustoimenpiteenä suoritettava ajoreunan ja vaihteiden urien hitsaus suoritetaan EU-kilpailutuksella. Hitsattavalta kiskolta vaadittava ominaisuus on, ettei sen kovuus saa olla enempää kuin R200 (700 Brinell). Kovempi kisko kestää huonommin Suomen ilmasto-olosuhteita ja seurauksena voi olla kiskon katkeaminen. Kovempi kisko vaatii myös enemmän huomiota esi- ja jälkilämmityksen osalta.



Kuva 28. Helsingin monitoimivaunu (Raitio.org)

HKL seuraa järjestelmällisesti kiskoja kulumista ja datan analysointiin käytetään Bentley'n OpTram -ohjelmistoa. Järjestelmällinen mittaus on ollut käytössä vasta hetken aikaa, joten konkreettisia kulumistilastoja ei ole vielä saatavilla. HKL on kuitenkin seurannut kiskon kulumista tietyissä kaarteissa Variotram-matalalattiaraitiovaunun vaikutuksesta. Kiskon kulumisnopeuden on havaittu olevan noin 0,5 mm kuukaudessa kaarteissa, jossa radan kaarresäde on 25 metriä. Variotram-matalalattiaraitiovaunut ovat aiheuttaneet haasteita Helsingin raitiotieverkolle, koska ne kuluttavat kiskoa enemmän kuin muu kalusto. Mitattua kulumisnopeutta ei voi soveltaa sellaisenaan muihin raitiotieverkkoihin.

Helsingissä havaitut kiskojen yleisimmät vaurioitumistavat ovat:

- Kiskon kuluminen kaarteissa
- Kiskohalkeamat talvella
- Kiskohitsausten ongelmat kuten lohkeamat ja hitsausjatkosten kuluminen
- Korrugaatio
- Vaihteiden kielien kuluminen, lohkeilu ja katkeilu

Vuodenajat ja kadulla liikkuva kalusto vaikuttavat kiskon kulumiseen ja vaurioitumiseen. Kiskon kuluminen nopeutuu vähälumisena pakkastalvena sekä kuumana ja kuivana kesänä. Kiskon vaurioitumista aiheutuu jonkin verran talvella lumiauroista.

Helsingin raitiotieradan kiskon profiilin hiominen ja täytehitsaus kilpailutetaan. Vuosittaiset työmäärät ovat: (Toivonen 2015)

- Ajoreunan hitsausta n. 3–5,5 km vuodessa
- Risteyspohjien hitsausta n. 1–2 km vuodessa
- Korrugaation hiontaa n. 4–11 km vuodessa

8 SUOSITUKSET JA YHTEENVETO

Tampereelle suunniteltava raitiotie yhdistää perinteisen katuraitiotien ja pikaraitiotien ominaisuuksia. Se tulee kulkemaan tiiviisti rakennetun ydinkeskustan läpi, kuitenkin pääosin omilla kaistoillaan. Raitiotie ulottuu kaupungin äärilaidoille kulkien pitkiä matkoja isojen väylien välittömässä läheisyydessä.

Taulukkoon 1 on koottu Helsingin ja Tampereen raitioteiden lukuja. Raitioteillä on paljon yhteistä, mutta taulukosta käy hyvin ilmi raitioteiden erilainen luonne. Helsinki pienipiirteisenä kaupunkiraitiotienä ja Tampere nykyaikaisena pikaraitiotietyyppisenä kuvaavat aikakausiensa kaupunkien joukkoliikenteen tarpeita.

Taulukko 1. Helsingin ja Tampereen raitioteiden vertailua

	Tampere (Yleissuunnitelma)	Helsinki
Raideleveys [mm]	1435	1000
Raitiovaunun leveys [mm]	2650	2300–2400
Raitiovaunun kynnyisleveys [mm]	2650	2300
Raitioverkon pituus [km]	23,5	n. 50
Käyttövaihteiden lukumäärä	1	n. 200
Puolenvaihtoraiteiden lukumäärä	n. 30 (n. 2 km:n välein)	-
Keskimääräinen pysäkkiväli [m]	600	350
Keskimääräinen nopeus [km/h]	19–22	15
Pienin kaarresäde [m]	25	15
Linjojen ulottuma keskustasta [km]	12	5

Tämän työn pohjalta voidaan antaa suosituksia Tampereen raitiotiehankkeessa huomiioon otettavista seikoista ja toimenpiteistä, jotka voivat vaikuttaa raitiovaunun ja radan elinkaarikustannuksiin laskevasti:

- Syväuravaihteiden käyttö, jolla vähennetään mm. pyörän laipan kulumista, melua ja korrugaation esiintymistä vaihteiden läheisyydessä.
- Kaarresäteiden pitäminen mahdollisimman suurina, jolla on suora vaikutus kulumiseen ja meluun.

- Kiskon ja pyörän materiaalien yhteensopivuus. Erilainen terästen kovuus voi aiheuttaa heikomman materiaalin suurempaa kulumista. Liian kova teräs myös vaikeuttaa profiilin hitsausta ja voi vaikuttaa mm. säröjen kehittymiseen materiaalin pinnan alla.
- Kiskojen säännöllinen puhdistus ja vuodenaikojen huomioiminen puhdistustarpeessa. Etenkin syksyisin lehtien putoamisen aikoihin puhdistukseen on kiinnitettävä huomiota.
- Kiskon ja pyörän välisen hiekoituksen optimointi, jolla on suora vaikutus kulumiseen. Kitkan puute voi myös aiheuttaa vaurioita esim. tasopyörien muodossa.
- Vignol-kiskon mahdollisimman suuri käyttö olisi suotavaa etenkin erotetuilla rataosuuksilla, jossa muun liikenteen ei tarvitse tulla raitiotieradalle. Urakiskoa merkittävästi korkeammalla maanpinnasta oleva Vignol-kisko vaatii vähemmän puhtaanapitoa kuin urakisko. Muun liikenteen minimointi radalla vähentää kiskon kulumista ja vaurioitumisriskiä.
- Vaihteiden mahdollisimman pieni lukumäärä, jolloin huollettavien kohteiden määrä vähenee.
- Kiskon ja pyörien suunnitellulla ennaltaehkäisevällä huollolla voidaan saavuttaa säästöjä vaurioiden korjauskustannuksissa.
- Tampereen ja Helsingin raitiotieliikenteen olisi hyödyllistä yhdistää voimavaroja erilaisissa radan ja kaluston investoinneissa ja palveluiden ostoissa. Suuremman määrän kilpailutuksessa saavutetaan yleensä hintaetua ja yhteistyöllä voisi myös säästää henkilöstökuluissa. Yhteistyön ongelmaksi saattaa muodostua mm. erilainen raideleveys ja ratojen erilainen luonne vaihteiden ja geometria suhteen. Yhteistyömuotojen etsiminen ja kehittäminen olisi kuitenkin ehdottoman kannattavaa.

Tampereen kaupunkiin suunnitellaan uutta raitiotiejärjestelmää, joka helpottaisi kasvavan kaupungin joukkoliikenteen tarpeita. Hanke on vaiheessa, jossa tuleviin ratkaisuihin voidaan vielä vaikuttaa ja mahdollisia ongelmakohtia välttää. Tämän työn tarkoitus oli selvittää pyörän ja kiskon rajapinnan merkitystä ja vaikutusta kunnossapitokustannuksiin. Raitiotie suunnitellaan vuosikymmeniksi, joten suunnitteluvaiheessa tehdyt ratkaisut vaikuttavat kunnossapidon kustannuksiin vielä pitkän ajan kuluttua. Niinpä kustannusten muodostuminen pyörän ja kiskon kohdalla olisi hyödyllistä ymmärtää. Raitiovaunun ja kiskon kontaktipinnassa vaikuttaa suuret voimat, jotka kuluttavat ja vaurioit-

tavat sekä kiskoa että pyörää. Erilaisten kulumis- ja vaurioitumismekanismien ymmärtämisellä voidaan puuttua ongelmiin aiheuttaviin ratkaisuihin.

Työn tavoitteena oli löytää tärkeitä huomioonotettavia seikkoja pyörän ja kiskon rajapinnasta, jotka kannattaisi huomioida Tampereen raitiotiehankkeessa. Työ rajautui kiskon ja pyörän rajapintaan, jonka lisäksi huomioitiin lyhyesti myös pyörän ja raitiovaunun käyttäytymiseen merkittävästi vaikuttava telirakenne.

Työn toteutettiin kirjallisuustutkimuksena sekä osin asiantuntijahaastatteluin. Pyörän ja kiskon välinen kontaktipinta on hyvin kompleksinen. Kontaktipinnalla vaikuttaa staattisia ja dynaamisia kuormia, jotka erilaisten vaurioitumismekanismien kanssa vaurioittavat pyörää sekä kiskoa. Kontaktipinnan ilmiöitä ymmärtämällä sekä suunnitellulla ja ennaltaehkäisevällä kunnossapidolla voidaan saavuttaa kustannussäästöjä ehkäisemällä vaurioiden syntyä. Pyörän ja kiskon osalta tarkasteltiin niiden rakenteita, profiileja sekä yleisimpiä vaurioita ja kunnossapitoa. Empiirisellä tutkimuksella kartoitettiin Helsingin raitiotieliikenteen käytännön kunnossapitotoimia.

Pyörän ja kiskon rajapinta tuottaa haitallisena koettua melua, johon kiinnitetään huomiota jo suunnitteluvaiheessa. Meluhaitta muodostuu pääasiassa kiskon ja pyörän rajapinnasta, josta muun muassa vierintä-ääninä ympäristöön säteilevä melu leviää ympäristöön ilmassa. Pyörän ja kiskon kustannusten muodostumisessa tarkasteltiin elinkaari-kustannusten muodostumista sekä pyörän ja kiskon kunnossapitokustannuksia.

Työn tuloksena löydettiin kiskon ja pyörän teknisiä ja kunnossapitoon liittyviä suosituksia, jotka tulisi huomioida Tampereen raitiotiehankkeessa. Suosituksissa otettiin huomioon pyörän ja kiskon aiheuttamia kustannuksia ja pyrittiin minimoimaan niitä.

LÄHTEET

- Alku, A. Joukkoliikenneasiantuntija. 2015a. Haastattelu 12.3.2015. Tampere
- Alku, A. 2015b. Kaupunkiliikenne. Luettu 8.4.2015. <http://www.kaupunkiliikenne.net/variobahn.html>
- ArcelorMittal. 2015. Tram rails. Luettu 15.3.2015. <http://rails.arcelormittal.com>
- Autech. 2015. Tram and Commuter Train Track Maintenance. Luettu 20.4.2015. http://www.autech.ch/en/media/pdf_downloads/englisch/trackmaintenance.pdf
- Chandra, S. & Agarwal, M.M. 2007. Railway Engineering. New Delhi: Oxford university press.
- Corrugation. 2015. Research & Facts. Luettu 2.3.2015. <http://www.corrugation.eu>
- Esveld, C. 2001. Modern railway track. Second edition. Zaltbommel: MRT Productions.
- GHH-Radsatz. 2015. Resilient wheels. Luettu 4.4.2015. <http://www.ghh-radsatz.com>
- Grote K. & Antonsson E. K. 2008. Springer handbook of mechanical engineering. Heidelberg: Springer
- Helsingin kaupunki. 2015. HKL Helsingin kaupungin liikenne. Luettu 12.4.2015. <http://www.hel.fi/www/hkl/fi/raitiovaunulla/>
- Inforta. 2015. Resilient wheels. Luettu 20.4.2015. <http://www.inforta.lt>
- Iwnicki, S. 2006. Handbook of Railway Vehicle Dynamics. Boca Raton, FL: Taylor & Francis.
- Korkeamäki, S. 2011. Rataan kohdistuva kuormitus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksessa. Helsinki: Liikennevirasto.
- Koskela, O. 2011. Ratojen elinkaariajattelu ja ratahankkeiden kannattavuuslaskennan ongelmat. Helsinki: Liikennevirasto.
- Lee, S. 2008. Advanced nondestructive evaluation II proceedings of the International Conference on ANDE 2007, the 2nd International Conference on Advanced Nondestructive Testing. Singapore: World Scientific.
- Lesley, L. 2011. Light Rail Developers Handbook. Ft. Lauderdale: J. Ross Publishing.
- Lewis, R. & Olofsson, U. 2009. Wheel-Rail Interface Handbook. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Maijala, M. 2015. Vaihteet. Rautatietekniikan kurssin luentomateriaali. Tampereen ammattikorkeakoulu. Tampere

Niippa, T. 2014. Raitiovaunun pyörien ennakoivan huolto-ohjelman suunnittelu. Aalto-yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu. Koneenrakennustekniikan laitos. Diplomityö

Niippa, T. Huoltoinsinööri. 2015. Haastattelu 26.2.2015. Helsinki.

Nurmikolu, A. Professori. 2014. Radan rakenteet ja niiden elinkaari. Luento 23.10.2014. Tampereen teknillinen yliopisto. rakennustekniikka. Tampere.

Peltola, J. 2011. HSL Helsingin seudun liikenne. Selvitys syväuraisten vaihteiden ja raideristeysten käyttöönoton hyödyistä ja edellytyksistä Helsingin raitiotieverkolla. Helsinki: Edita Prima Oy

Portti, J. Ratasuunnittelija. 2015. Sähköpostiviesti. jarno.portti@hel.fi. Luettu 7.4.2015

Robinson, M. & Kapoor, A. 2009. Fatigue in railway infrastructure. Cambridge: Woodhead Publishing Limited

Rodriguez, N. 2010. SP2 -Cost effective track maintenance, renewal and refurbishment methods. WP2.3 Advanced maintenance strategies. Urban Track Final Conference. 25.6.2010. Prague.

Schattauer, M. 2015. Goldschmidt-Thermit Railservice esittely. 22.1.2015. Tampere.

Scott, N. P. 2009. Railway Transportation: Policies, Technology and Perspectives. New York, NY: Nova Science Publishers.

Toivonen, J. Ratainsinööri. 2015. Sähköpostiviesti. jani.toivonen@hel.fi. Luettu 25.5.2015

Track Design Handbook for Light Rail Transit. 2012. National Research Council (U.S.). Transportation Research Board. United States. Federal Transit Administration. Transit Cooperative Research Program. Parsons, Brinckerhoff, Quade & Douglas. Transit Development Corporation. Second Edition. Washington D.C: Transportation Research Board.

TramStore21. 2012. Wheel and Track Profiles in Use & Maintenance. Luettu 15.3.2015 <http://tramstore21.eu/know-how/wheel-and-track-profiles-use-and-maintenance>

TransTec Vetschau GmbH. 2015. Bogie for tram. Luettu 05.02.2015. <http://www.transtec-vetschau.de>

Transtech. 2015. Helsingin uusi raitiovaunu. Luettu 10.3.2015. <http://www.transtech.fi>