

# Raitiovaunun pyörien kulumisen mallinnus ja sorvausvälin optimointi

Aleksi Rintanen

**Perustieteiden korkeakoulu**

Kandidaatintyö  
Espoo 28.9.2021

**Vastuupettaja**

Prof. Antti Punkka

**Työn ohjaaja**

Insinööri (YAMK) Riku Helanne



**Aalto-yliopisto**  
Perustieteiden  
korkeakoulu

Copyright © 2021 Aleksi Rintanen

The document can be stored and made available to the public on the open internet pages of Aalto University.  
All other rights are reserved.



---

**Tekijä** Aleksi Rintanen

---

**Työn nimi** Raitiovaunun pyörien kulumisen mallinnus ja sorvausvälin optimointi

---

**Koulutusohjelma** Teknillinen fysiikka ja matematiikka

---

**Pääaine** Matematiikka ja systeemitieteet **Pääaineen koodi** SCI3029

---

**Vastuopettaja** Prof. Antti Punkka

---

**Työn ohjaaja** Insinööri (YAMK) Riku Helanne

---

**Päivämäärä** 28.9.2021 **Sivumäärä** 25+2 **Kieli** Suomi

---

### **Tiivistelmä**

Raitiovaunun pyörien muoto muuttuu kulumisen seurauksena, jonka vuoksi pyörien huolto-ohjelmaan kuuluu olennaisesti pyörien sorvaus. Sorvauksella pyörä pidetään halutussa profiilissa, jotta liikennöinti olisi tasaista ja turvallista. Sorvaaminen kuitenkin aiheuttaa kustannuksia ja sorvatessa menetetään pyöräkehän ainevahvuutta, mikä voi lyhentää pyöräkehän elinikää.

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan Artic-raitiovaunun nykytilanteen pyörien kulumista Helsingin kantakaupungin rataverkossa ja työn tavoitteena on kehittää malli pyörien kulumista ja mallin perusteella määrittää optimaalinen sorvausväli pyörille. Tutkimusaineistona toimii Artic-raitiovaunujen pyörien koko mittaushistoria, jossa on mitat kaikista pyöristä jokaiselta mittauskerralta vaunukohtaisesti noin joka kuukauden välein.

Työn tulosten mukaan laipan korkeuden kulumisnopeuden ja laipan leveyden välillä on selvä riippuvuus. Uuden sorvaustrategian perusteella sorvausvälin tulisi riippua laipan leveydestä aikaisemman kiinteän sorvausvälin sijaan. Sorvausvälit voivat olla siten keskimääräisesti pidempiä, mikä pienentää kustannuksia, jos akselinkääntö toteutetaan ajoissa.

---

**Avainsanat** Raitiovaunun pyörät, Kulumismalli, Sorvausvälien optimointi

---



---

**Author** Aleksi Rintanen

---

**Title** Mathematical modelling of the wear of tram's wheels and wheel's turning cycle optimization

---

**Degree programme** Engineering Physics and Mathematics

---

**Major** Mathematics and Systems Sciences

**Code of major** SCI3029

---

**Teacher in charge** Prof. Antti Punkka

---

**Advisor** M. Eng. Riku Helanne

---

**Date** 28.9.2021

**Number of pages** 25+2

**Language** Finnish

---

**Abstract**

Wearing causes tram's wheel profile to change, and therefore wheel turning is an essential part of the wheels' maintenance program. Wheels are sustained in a sufficient profile by turning the wheels, in order to ensure smooth and safe tram operation. However, wheel turning causes costs and material lost occurs during wheel turning, which may shorten the lifespan of a tram wheel.

This thesis explores current wearing of the Artic-tram's wheels in the rail network of the city of Helsinki. The main goal is to develop a mathematical model of tram's wheel wearing and determine the optimum turning cycle for wheels based on the model. The research material used was the whole wheel measurement history of the all Artic-trams, which included monthly tram-specific measurements for each wheel.

Based on the results, there exists correlation between the wear rate of the height of the wheel's flange and the width of the flange. According to the new wheel turning strategy developed, the new turning cycle should depend on the width of the flange instead of a fixed period as previously. Turning cycles could thus be longer, which reduces costs, if axles are circulated in time.

---

**Keywords** Tram's wheels, wearing model, optimization of wheel's turning cycle

---

# Sisällys

<b>Tiivistelmä</b>	<b>3</b>
<b>Tiivistelmä (englanniksi)</b>	<b>4</b>
<b>Sisällys</b>	<b>5</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>6</b>
<b>2 Aikaisempi tutkimus</b>	<b>7</b>
<b>3 Teoreettinen kuluminen ja kulumismallit</b>	<b>9</b>
3.1 Kisko-pyörä-kontakti . . . . .	9
3.2 Kuluminen luokittelu . . . . .	9
3.3 Kulumismallit . . . . .	9
<b>4 Tutkimusaineisto ja nykytilanteen kulumisnopeus</b>	<b>12</b>
<b>5 Kuluminen mallintaminen ja sorvausvälin määrittäminen</b>	<b>15</b>
5.1 Mallin valinta . . . . .	15
5.2 Parametrien estimointi . . . . .	17
5.3 Optimaalisen sorvausvälin määrittäminen . . . . .	18
<b>6 Tulokset</b>	<b>20</b>
6.1 Kulumismalli . . . . .	20
6.2 Sorvausväli . . . . .	20
6.3 Herkkyysanalyysi . . . . .	22
<b>7 Yhteenveto</b>	<b>24</b>
<b>A Vaunun 431 mittaushistoria</b>	<b>26</b>

# 1 Johdanto

Helsingin kantakaupungin rataverkossa liikennöi yhteensä 70 kpl Skoda Transtech Oy:n valmistamaa Artic-raitiovaunua, joiden pyörien sorvaus aiheuttaa osan kaluston ylläpitokustannuksista. Pyörien kulumisen muokkaa pyörän muotoa, mikä aiheuttaa ajan kanssa sorvaustarpeen, jotta pyörä pysyy oikeanlaisessa profiilissa. Pyörän mitoille on siten määritelty raja-arvot, joissa pyörän tulisi liikennöidessä pysyä, jotta liikennöinti olisi tasaista ja turvallista. Pyöriä sorvataan kunnes pyörän kulutuskehä on kulunut loppuun ja vaihdetaan sen jälkeen uuteen. Pyörien sorvaus voi olla joko kilometri- tai vikaperusteista, jossa ensimmäisessä pyöriä sorvataan ennakoivasti ja jälkimmäisessä vikaperusteisesti pyörän mittojen painuessa alle raja-arvojen. Vikaperustainen kunnossapito aiheuttaa yllättäviä kustannuksia ja seisontapäiviä kalustolle ja siten oikeanlaisella ennakoivalla kunnossapidolla voidaan taata kaluston tasainen operointikyky. Vastaavasti liian tiheä ennakoiva sorvausväli aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia, joten kaluston sorvausvälin tulisi olla oikea.

Artic-raitiovaunun pyörät mitataan huolto-ohjelman mukaan säännöllisesti 7500 km välein, jolla varmistetaan pyörän mittojen olevan raja-arvoissa. Pyörästä mitataan sen halkaisija, laipan korkeus ja leveys, jotka tallennetaan sisäiseen järjestelmään. Mittausdata on kohinaista ja vaunujen välillä on eroja kulumisissa, mikä aiheuttaa omat haasteensa kulumismallin kehittämiseksi. Raitiovaunun pyörien kulumista Helsingin kaupungin rataverkossa on aikaisemmin tutkittu vanhemmilla Valmetin valmistamilla NRV-nivelraitiovaunuilla, joista saatuja tuloksia on hyödynnetty myöhemmin Artic-raitiovaunun huolto-ohjelmaan.

Ennakoivan kunnossapidon huoltovälejä on aikaisemmin kirjallisuudessa ratkottu erilaisilla optimointimalleilla. [Dekker \(1996\)](#) määrittelee kyseiset mallit matemaattisiksi malleiksi, jotka pyrkivät löytämään optimaalisen tasapainon huollosta saatavien hyötyjen ja kustannusten välillä ottaen kaikki rajoitukset huomioon. Huollon hyödyt koostuvat kustannussäästöistä, jotka syntyvät vikojen ja häiriöiden pienemmistä määristä. Myös tekoälyä on käytetty huoltovälien optimoimiseen ([Kobacky, 2012](#)).

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia miten Artic-raitiovaunun pyörät kuluvat suhteessa NRV-vaunuihin, kehittää matemaattinen malli, jolla mallintaa pyörien kulumista sekä laskea mallin perusteella optimaalinen kilometriperusteinen huoltosorvausväli Artic-raitiovaunuille. Tässä työssä pyörien kulumista tutkittiin aikaisempien pyörien mittaustuloksien perusteella, joiden pohjalta kehitettiin malli kulumiselle myös käyttäen jo olemassa olevia kulumistutkimuksia apuna. Sorvausväli ratkaistiin luomalla malli sorvauskustannuksille ajokilometrien funktiona, jonka minimoiminen tuotti kustannustehokkaimman sorvausvälin.

Työ on jaettu sisällöltään kuuteen lukuun. Luvussa 2 on esitelty aikaisempaa tutkimusta pyörien kulumisesta ja huoltovälien ennustamisesta. Tutkimusaineistoa ja nykytilanteen kulumisnopeutta on käsitelty luvussa 4 ja kulumisen mallintamista ja sorvasvälin määrittämistä luvussa 5. Työn tulokset löytyvät luvusta 6 ja luku 7 on yhteenvedo koko työlle. Loppuun on liitetty yhden vaunun kaikkien pyörien koko mittaushistoria liitteeseen A.

## 2 Aikaisempi tutkimus

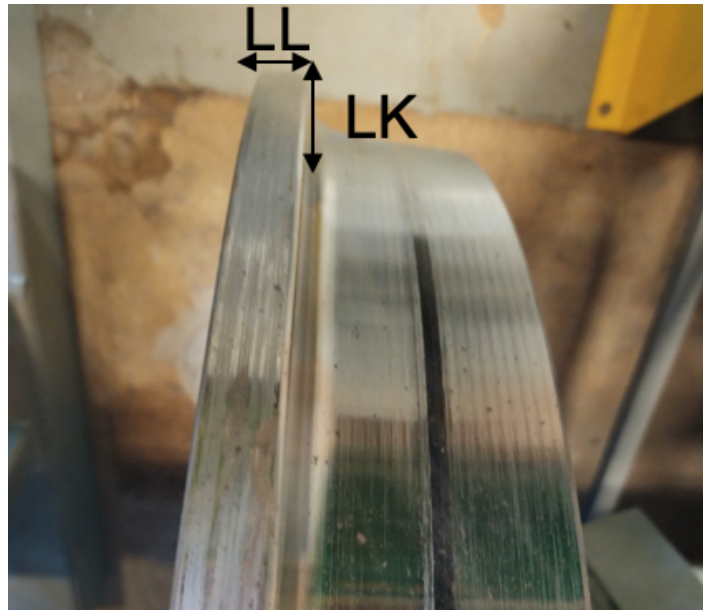
Pyörien kulumista kantakaupungin rataverkossa on aikaisemmin tutkittu Valmetin valmistamilla nivelraitiovaunuilla Niipan diplomityössä ”Raitiovaunun pyörien ennakoivan huolto-ohjelman suunnittelu” (2014). Tutkimuksen mukaan nivelraitiovaunujen ensimmäisen akselin laippojen madaltuminen aiheuttaa ensisijaisen sorvaustarpeen pyörille. Kuvassa 1 on havainnollistettu käsitteitä laipan leveys ( $LL$ ) ja laipan korkeus ( $LK$ ). Pyörän laipan leveyden ja korkeuden kuluminen on työssä mallinnettu tasaiseksi suhteessa ajokilometreihin ja pyörän kulumista on mallinnettu lineaarisella regressiolla. Akseleja ”käännetään” eli kierrätetään akselipaikkojen välillä, jolla tasataan kulumiseroja akselien välillä. Optimaalinen akselinkääntö tapahtuu diplomityön mukaan puolessa välissä pyöräkehän elinkaarta.

Kiskokaluston pyörien kulumista on aikaisemmin mallinnettu muutamilla erityyppisillä malleilla, joiden pohjalta on tehty simulaatioita pyörän profiilin muutoksesta. Huddersfieldin yliopiston tutkimusryhmän tekemässä vertailussa (Peng ym., 2019) on vertailtu erilaisten kiskokaluston pyörille tehtyjen kulumismallien soveltuvuutta pyörän polygonaalisen muutoksen simuloinniksi. Tutkimuksessa vertailtiin neljää erilaista kulumismallia, joissa käytetyt suuret muunnettiin tutkimuksessa yhteneväisiksi, jotta mallien väliset erot, yhteneväisyydet ja soveltuvuus mallintamiseen ovat helpompia hahmottaa. Yksi näistä malleista on Braghin ym. (2006) luoma kulumismalli, joka on kehitetty kokeellisten mittausten perusteella. Mittaukset suoritettiin kahden päällekkäisen kuormitetun rautatiepyörän avulla vaihtelemalla pyörien pintojen välistä painetta sekä pyörien välistä luistoa. Tulosten mukaan kulumisnopeuden ja paineen välinen riippuvuus riippuu suuresti paineen ja suhteellisen luiston tulon kertaluokasta. Pienellä paineella kulumisnopeus kasvaa lineaarisesti paineen kasvaessa, mutta kertaluokkaa suuremmalla paineella kulumisnopeus pysyy lähes vakiona. Vielä yhtä kertaluokkaa suuremmalla paineella kulumisnopeus alkaa uudelleen kasvamaan paineen noustessa. Kulumismalli luotiin jakamalla tulokset kolmeen kulumisalueeseen, jossa kulumisnopeuden ja paineen ja luiston välinen riippuvuus linearisoitiin. Samantapaiseen kolmealueisen kulumismallin käyttöön ovat päätyneet myös Pearce ja Sherratt (1991) tutkimuksessaan.

Ennakoivan kunnossapidon optimaalisia huoltovälejä on aikaisemmin ratkaistu kirjallisuudessa käyttäen erilaisia menetelmiä. Gui ja Xueqing (2013) mallinsivat teiden rappeutumista diskreetti-aikaisina Markovin ketjuina. He kehittivät yleisen kustannusmallin suurimille kustannuksille ja ratkasivat optimaalisen kunnossapitosuunnitelman Markovin päätöksentekoprosessin avulla.

Besnard ym. (2009) ovat tutkineet ennakoivan kunnossapidon huoltovälien optimointia tuulivoimaloille. Kyseisessä tutkimuksessa kehitettiin lineaarinen kokonaislukuoptimointimalli, jossa minimoitava kohdefunktio koostuu pääpiirteissään ennakoivan huollon, vikaperusteisen huollon ja tuotannon seisokista aiheutuvista kustannuksista, joihin vaikuttaa lukuisia muuttujia, mm. tuuliennusteet. Mallinnus simulointiin viidelle tuuliturbiinille kahdella ennakoivan huollon tehtävällä, joiden huollosta vastasi yksi kahden hengen huoltoryhmä. Mallin optimiratkaisussa huollot suoritetaan vikakorjausten yhteydessä sekä vähätuulisina päivinä, jolloin korjaaminen on halvinta.

Tekoälyä on myös käytetty ennakoivan huollon optimoinnissa. [Kobacky \(2012\)](#) nimeää eniten käytetyksi tekoälytekniikaksi geneettiset algoritmit, joiden ominaisuudet mahdollistavat tehokkaan optimoinnin kompleksisille huoltosuunnitelmille. Tutkimuksen mukaan julkaisumäärät tekoälyn käytöstä huollon optimoimisessa ovat kovasti kasvussa. [Kalathas ja Papoutsidakis \(2021\)](#) käyttivät koneoppimista ja tietolouhintaa optimoidakseen Kreikan kansallisen rautatieyhtiön junakaluston ennakoivaa huoltoa. He loivat onnistuneesti uuden huolto-ohjelman, jossa huoltohenkilökunta ja huollot vähenevät mutta luotettavuus ja käytettävyys kasvaa.



Kuva 1: Raitiovaunun pyörän profiili



## 3 Teoreettinen kuluminen ja kulumismallit

### 3.1 Kisko-pyörä-kontakti

Yksipistekontaktissa pyörän ja kiskon välinen kontakti on muodoltaan tyypillisesti ellipsi, jossa suurin paine on ellipsin keskellä ja heikkenee reunoja kohden (Pauym., 2002). Raitiovaunun akselit ovat jäykät eivätkä siis salli pyörimiseroja akselin pyörien välille. Pyörät ovat kuitenkin muodoltaan ulospäin suuntautuvat kartiot, jolloin kaarteissa ulkoraiteen ollessa sisäraidetta pidempi työntyy pyöräkerta kohti kaarteiden ulkoreunaa, mikä pienentää sisäkaarteiden pyörän ja vastaavasti kasvattaa ulkokaarteiden pyörän vierimissädettä, jolloin pyöräkerta kykenee kääntymään kaarteessa. Kuitenkaan pyöräkerta ei miltei koskaan asemoidu täydellisesti kaarteeseen, joten pyörissä tapahtuu lähes aina luistoa (Dirks, 2015).

Pyörän laipan sivuttaista kosketusta esiintyy tilanteissa, jossa kaarteiden säde on niin tiukka, että pyörien kartiokkuus ei riitä tuottamaan tarvittavaa kääntymistä, jolloin laippa koskettaa vasten kiskoa. Helsingin kantakaupungin rataverkon ristikoissa, jossa kiskot risteävät, kulkevat raitiovaunut ristikon yli osin pelkästään laipan varassa, joka kuluttaa laippaa (Niippa, 2014).

### 3.2 Kulumisen luokittelu

Pyöriin vaikuttaa useita kulumismekanismia (Dirks, 2015). Adessiivinen kuluminen on pintojen yhteen tarttumista, jossa pinnan terävät huiput hitsautuvat kiinni ja liitoksen revetessä materiaa voi siirtyä pinnasta toiseen ja syntyä hiovia partikkelia. Abrasiivisessa kulumisessa eli hiontakulumisessa kovempi materiaali kuluttaa (esimerkiksi kovat partikkelit kosketuspinnan välissä) heikompa materiaalia. Väsymiskuluminen aiheutuu toistuvasta raskaasta mekaanisesta rasituksesta, josta aiheutuu säröjä kappaleeseen.

Kuluminen jaotellaan usein kolmeen eri luokkaan: lievä, vakava ja katastrofaalinen kuluminen. Plastiset muodonmuutokset eivät varsinaisesti ole kulumismekanismi vaan aineen siirtymää ilman materiaalin menetystä. Suuret aineen siirtymät kuuluvat lähes poikkeuksetta katastrofaalisen kulumisen luokkaan.

### 3.3 Kulumismallit

Kulumismallit voidaan jaotella kahteen eri mallinnusperiaatteeseen: malleihin, jossa kulumista mallinnetaan kitkavoiman tekemällä työllä ja malleihin, jossa kulumisnopeus riippuu luistomatkastasta. Mallit jaotellaan myös joko lokaaleiksi tai globaaleiksi malleiksi, joista lokaaleilla malleilla voidaan simuloida kulumista pistekohtaisesti koko pyöräkehällä ja saada tarkka malli kuluneesta profiilista kun taas globaalit mallit kuvaavat miten pyörän profiili muuttuu globaalisti. (Peng ym., 2019). Tässä työssä kulumista mallinnetaan vain muutamalla suureella, jotka mitataan säännöllisesti (halkaisija, laipan leveys ja korkeus), joten on helpointa keskittyä vain globaaleihin malleihin.

Yksinkertainen malli kulumiselle on luistomatkan perustuva Archardin kulumisyhtälö

$$V = k \frac{sN}{H},$$

jossa kulunut tilavuus  $v$  riippuu  $k$  kulumisvakioista,  $s$  luistomatkasta,  $H$  materiaalin kovuudesta ja  $N$  normaalivoimasta. Tästä voidaan johtaa yhtälö kulumissyvyydelle

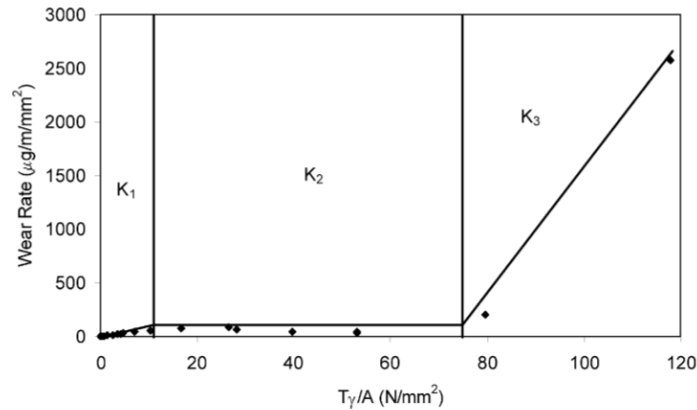
$$\Delta z = k \frac{sP}{H},$$

joka riippuu suoraan paineesta  $p$  (Dirks, 2015).

Sheffieldin yliopiston tutkimusryhmän kehittämässä kulumismallissa yhtälö kulumisnopeudelle riippuu kulumisalueesta (lievä, vakava ja katastrofaalinen). Kuvassa 2 (Braghin ym., 2006) on esitetty tutkimuksen kokeelliset mittautulokset kulumisnopeudesta suorittetuna kaksoispyörän avulla. Kuvaajasta nähdään selvästi, miten kulumisnopeuden ja kulumisindeksin välinen riippuvuus on hyvin erilaista riippuen kulumisalueesta. Kulumisindeksin yhtälö on

$$W_1 = \frac{\gamma T}{A},$$

jossa kulumisindeksi  $W_1$  riippuu suhteellisesta luistosta  $\gamma$ , pyörästä kiskoon vaikuttavasta voimasta  $T$  ja kosketusalueesta  $A$ . Yhtälö kulumiselle jokaisessa kulumisalueessa on saatu linearisoimalla kulumisnopeuden ja kulumisindeksin riippuvuus. Kyseinen malli on esitelty taulukossa 1.



Kuva 2: Kulumisnopeus eri kulumisindekseille ( $T\gamma/A$ ) (Braghin ym., 2006). Lupa julkaisuun opinnäytetyössä myönnetty.

Alue	$T\gamma/A$ (N/mm <sup>2</sup> )	Kulumisnopeus ( $\mu\text{g}/\text{m}/\text{mm}^2$ )
K1	$T\gamma/A < 10.4$	$5.3 T\gamma/A$
K2	$10.4 < T\gamma/A < 77.2$	55.0
K3	$77.2 < T\gamma/A$	$61.9 T\gamma/A$

Taulukko 1: Sheffieldin yliopiston tutkimusryhmän kehittämä kulumismalli (Braghin ym., 2006)

British Railway Researchin kehittämä kulumismalli (Pearce ja Sherratt, 1991) on samankaltainen kuin Sheffieldin yliopiston tutkimusryhmän kehittämä malli. Yhtälö kulumisnopeudelle riippuu samalla tavalla kulumisalueesta, mutta mallissa käytetyt suureet eroavat. Yhtälö kulumisindeksille on

$$W_2 = T\gamma,$$

jossa kulumisindeksi  $W_2$  on määritelty kuorman  $T$  ja suhteellisen luiston  $\gamma$  avulla. Kulumisindeksiä vastaava kulumisnopeus on määritelty pyörän radiaalisen pinnan pinta-alan pienentymisellä pyörimismatkaa kohden, jossa  $D$  on pyörän halkaisija. Malli on esitelty taulukossa 2

Braghin ym. (2006) johtivat yhtälöt hetkellisen kontaktipinnan kulumissyvyydelle  $H$  molemmille edellä käsitellyille pyörän kulumismalleille, joiden yhtälöiksi saatiin

$$H_1 = W_1 \frac{2a}{\rho} = K_1 \frac{T\gamma}{\pi ab} \frac{2a}{\rho} = \frac{2K_1}{\pi b\rho} T\gamma$$

$$H_2 = W_2(\pi D) \frac{1}{2b} = K_2 \frac{T\gamma}{D} (\pi D) = \frac{\pi K_2}{2b} T\gamma,$$

missä  $\rho$  on pyörän tiheys,  $K_1$  ja  $K_2$  ovat mallikohtaisia vakioita,  $b$  on pyörän ja kiskon kontaktipinnan akselin suuntainen leveys,  $a$  on kiskon suuntainen pituus ja vastaavasti  $\pi ab$  on kontaktialan pinta-ala. Yhtälöistä voidaan huomata, että ensimmäisessä kulumisalueessa molempien mallien suureiden väliset riippuvuudet ovat täysin yhtäläiset.

Alue	$T\gamma$ (N)	Kulumisnopeus (m <sup>2</sup> /m)
K1	$T\gamma < 100$	$0.25 \frac{T\gamma}{D} \cdot 10^{-12}$
K2	$100 \leq T\gamma \leq 200$	$\frac{25}{D} \cdot 10^{-12}$
K3	$200 < T\gamma$	$\frac{1.19T\gamma-154}{D} \cdot 10^{-12}$

Taulukko 2: British Railway Researchin kehittämä kulumismalli (Pearce ja Sherratt, 1991)

## 4 Tutkimusaineisto ja nykytilanteen kulumisnopeus

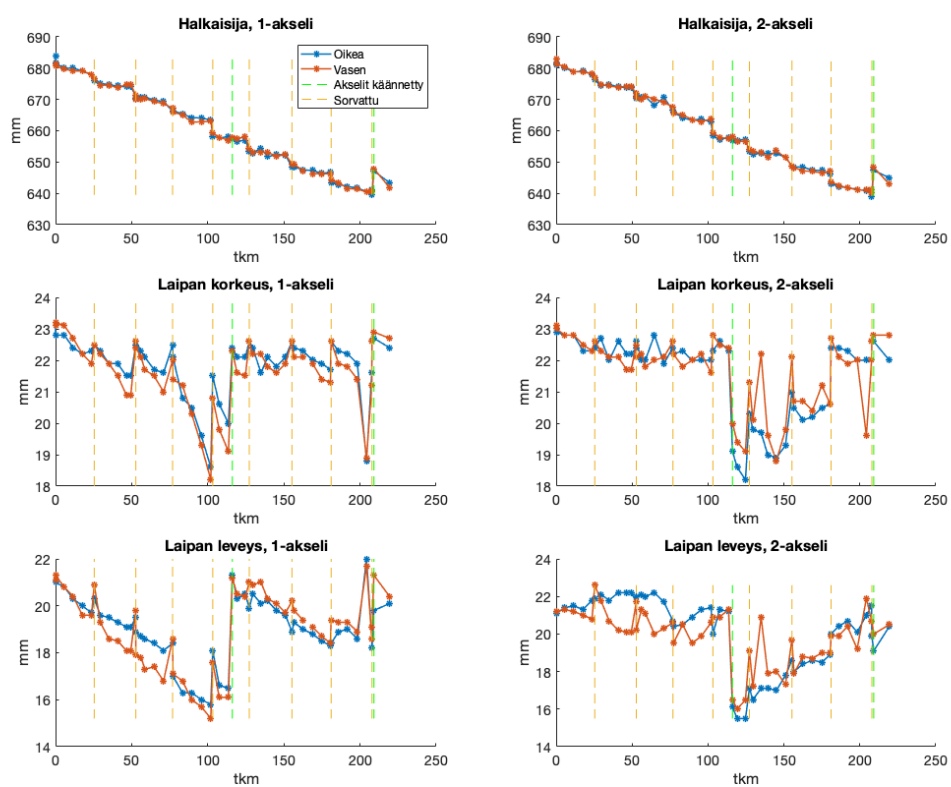
Tutkimusaineistona käytettiin vaunujen 425–470 pyöräkohtaisia mittaustuloksia sisäisestä järjestelmästä. Ensimmäisiä Artic-raitiovaunuja ei otettu aineistoon mukaan, sillä niissä käytettiin eri kokoisia pyöriä, joiden kulumisen oli erilaista. Pyörät mitataan huollossa säännöllisesti noin 7500 km välein optisella mittaustulokselilla. Mittauksessa syntyy virhettä laitteen sisäisen epätarkkuuden lisäksi käsin tehtävässä mittauksessa, jossa pyörän puhtaus, mittaustulokselin ja mittapalan sijainti vaikuttavat tulokseen.

Kaikissa vaunuissa 1-akseli kuluu keskimäärin eniten, mikä aiheuttaa ensisijaisen sorvaustarpeen, samoin kuin NRV-vaunuissa (Niippa, 2014), ja täten työ keskittyy 1-akselin pyörien kulumisen mallintamiseen. Kuvassa 3 on esitetty mittaustulokset vaunun 431 ensimmäiseltä teliltä. Laipan leveys kuluu selvästi 1-akselilla koko mittaushistorian aikana. 2-akselilla laipan leveys pysyttelee samana, kunnes akselit käännetään ja toiselle akselille päätyy akseli, jossa laippa on kapea. Tästä eteenpäin laippa alkaa paksuuntumaan. Sama ilmiö on nähtävissä kaikilla teleillä, jossa ensimmäisen akselin laipan leveys pienenee ja taaimmaisen kasvaa. Laipan leveyden alarajaksi on määritetty 14 mm ja korkeuden alarajaksi 18 mm. Liitteessä A on kuvattu vaunun 431 kaikkien akseleiden mittaushistoria.

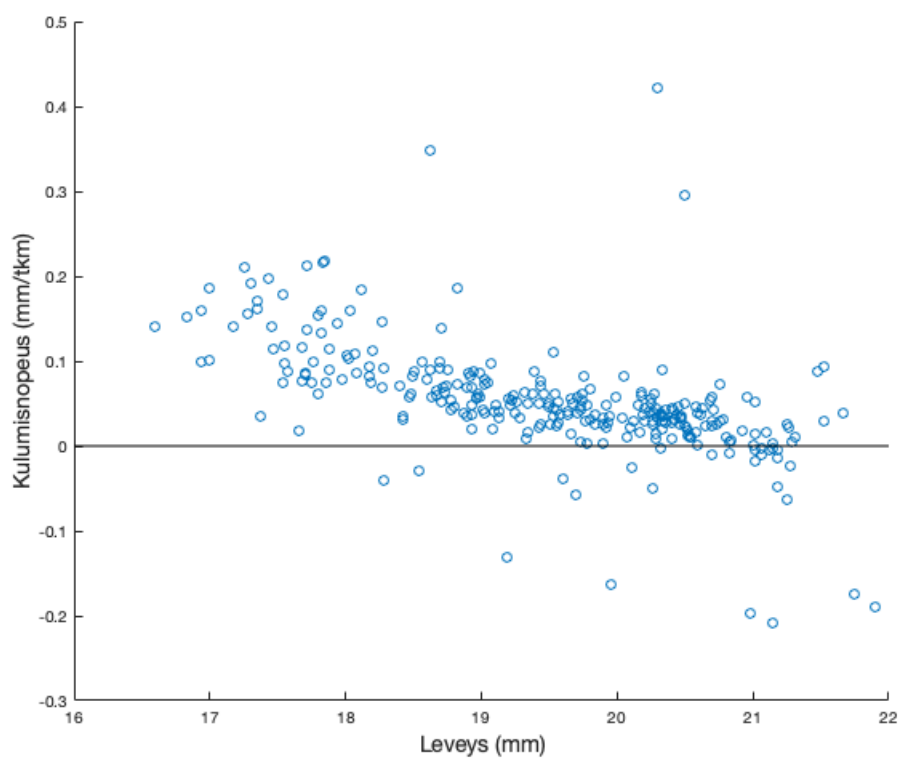
HKL:n sorvarin kanssa käydyin keskustelun mukaan Artic-raitiovaunuja vikasorvataan erittäin harvoin. Pyörät pitävät pyöreän muotonsa hyvin, eikä tasoja juurikaan esiinny pyörissä. Nykyinen 25 000 km sorvausväli on niin tiheä, että laippa ei pääse kulumaan liian kapeaksi tai ohueksi kesken sorvausvälin.

Pyörien sorvauksessa pyritään ajamaan laipat täyteen maksimimitaan 22.5 mm korkeuteen. Laipan leveyttä on vaikea sorvata lisää menettämättä paljon materiaalia ja HKL:n sorvarin mukaan laippa ei juurikaan levene tavallisessa huoltosorvauksessa. Kuvaajassa näkyvät terävät piikit laipan paksuudessa sorvauksien kohdalla johtuvat pääasiassa erilaisesta mittalaitteesta sorvauksen yhteydessä.

Ensimmäisen akselin laippojen leveyden kulumisen vaikuttaa suhteellisen tasaiselta kaikilla vaunuilla, mutta laipan korkeuden kulumisessa on suuria eroja. Kuvaan 4 on laskettu keskimääräinen laipan korkeuden kulumisen sorvauskertojen välillä laipan leveyden funktiona. Kuvasta nähdään, että kulumisnopeus on ollut pahimmillaan moninkertaista laipan ollessa ohut.



Kuva 3: Vaunun 431 1-teli kuluminen



Kuva 4: Laipan korkeuden kulumisnopeus laipan leveyden funktiona

## 5 Kulumisen mallintaminen ja sorvausvälin määrittäminen

### 5.1 Mallin valinta

Raitiovaunun laipan leveyden ja korkeuden kulumista on aikaisemmin HKL:llä mallinnettu lineaarisella regressiolla (Niippa, 2014). Laipan korkeuden kulumisnopeus kuitenkin riippuu selvästi laipan leveydestä kuvan 4 mukaan. Kansainvälisen tutkimusryhmän Peng ym. (2019) tekemä tutkimus vertailee erilaisia kulumismalleja, joissa kaikissa neljässä vertailussa käsitellyistä malleista pyörän kulumisnopeus on suoraan verrannollinen pyörän pinnalla vaikuttavaan lokaaliin paineeseen. Täten on syytä olettaa, että jokin vastaavaa riippuvuus löytyisi Artic-vaunun pyörien kulumisnopeudesta.

Laipan ja kiskon kontaktipinta on muodoltaan oletettavasti pyöräkehän tapaan ellipsi, jonka ala riippuu laipan leveydestä, halkaisijasta, kuormasta ja materiaalin kovuudesta. Laipan kaventuessa kontaktipinta pienenee ja vastaavasti paine kasvaa. Toisaalta paineen kasvaessa pyörä antaa enemmän periksi ja kontaktiala kasvaa (Pau ym., 2002). Paineen muutosta voidaan kuitenkin approksimoida yhtälöllä

$$\Delta p \approx \frac{F}{\Delta A} \approx \frac{1}{\Delta LL}, \quad (1)$$

jos pyörän elastisuus jätetään huomioimatta.

Kuvaan 5 on sovitettu suora kulumisnopeuden kuvaajaan laipan leveyden käänteisluvun funktiona. Kuvaajasta nähdään, että paineen muutokseen perustuva malli (1) näyttäisi hyvin kuvaavan laipan leveyden ja kulumisnopeuden riippuvuutta. Reippaasti poikkeavat arvot kulumisnopeuksissa voidaan selittää mittausvirheellä ja mittausdatan kirjaamisessa tapahtuvalla inhimillisellä virheellä.

Kuvassa 6 on nähtävissä metallipursetta laipan kärjen molemmin puolin, mikä viittaa aineensiirtymään laipan kärjessä. Täten on syytä olettaa, että kärjen kuluminen on luokaltaan katastrofaalista. Aikaisemmin esitellyssä Sheffieldin yliopiston tutkimusryhmän tekemissä kokeellisissa mittauksissa kuluminen oli linearisoitu jokaisessa kulumisalueessa erikseen. Kuvasta 2 nähdään, että suora ei leikkaa origossa viimeisessä kulumisalueessa ja siksi tämän työn kulumisnopeuden malliin on syytä ottaa vakiotermin mukaan. Myöskään kuvan 5 regressiosuora vaatii vakiotermin selittääkseen riippuvuutta järkevästi. Tällöin laipan korkeuden kulumiselle saadaan yhtälö

$$LK'(x) = \frac{k_2}{LL(x)} + k_1,$$

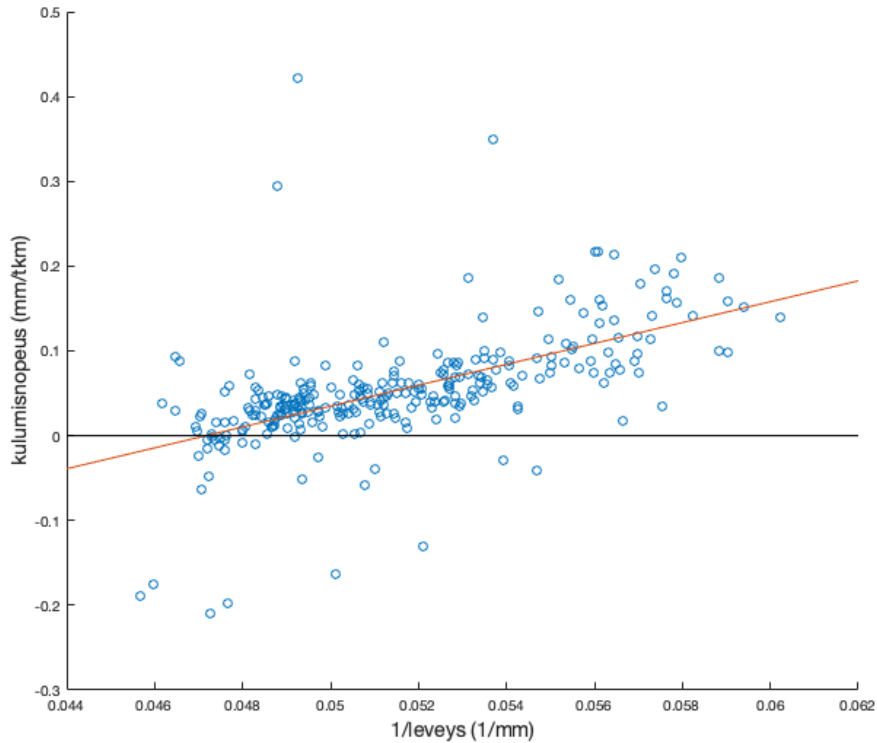
jossa  $k_1$  ja  $k_2$  ovat vakioita ja laipan korkeuden kulumisnopeus riippuu kääntäen laipan leveydestä.

Laipan leveyden kulumisnopeutta mallinnetaan tässä mallissa vakionopeudella. Yhdistämällä yhtälöt kulumisnopeuksille saadaan ensimmäisen kertaluvun differentiaaliyhtälöryhmä

$$\begin{cases} LL'(x) &= -k_0 \\ LK'(x) &= \frac{k_2}{LL(x)} + k_1 \\ LL(0) &= LL_0 \\ LK(0) &= LK_0, \end{cases}$$

jossa alkuarvot  $LK_0$  ja  $LL_0$  ovat laipan korkeuden ja leveyden alkumitat ajokilometreillä  $x = 0$ . Yhtälöryhmä saadaan ratkaistua separoimalla, jonka ratkaisu tuottaa mallin laipan kulumisesta ajokilometrien funktiona:

$$\begin{cases} LL(x) &= LL_0 - k_0x \\ LK(x) &= LK_0 + k_1x + \frac{k_2}{k_0}(\log(LL_0) - \log(LL_0 - k_0x)). \end{cases} \quad (2)$$



Kuva 5: Laipan korkeuden kulumisnopeus laipan leveyden käänteisluvun funktiona

Pyörän halkaisija vaikuttaa kulumisnopeuteen vähintäänkin pyörän kehäpituuden lyhenemisellä, jolloin pyörä pyörii useamman kierroksen samoilla ajokilometreillä. Kehäpituus pienenee halkaisijaan nähden suoraan verrannollisesti, jolloin vierintämatka kasvaa kääntäen verrannollisesti ja tällöin kulumisnopeuden tulisi myös muuttua vastaavasti ajokilometriä kohden. Lisäksi kiskokontakti muuttuu ja materiaali kulumiskehällä pienenee halkaisijan neliössä, mikä muuttaa kulumisnopeutta. Kuitenkaan



esimerkiksi British Railway Research instituutin kehittämässä kulumismallissa kulumisnopeus ei riipu halkaisijasta kehän vierimismatkan suhteen (Dirks, 2015), joten on syytä olettaa, että vaikutus on suhteellisen pieni.



Kuva 6: Aineensiirtymää laipassa

Artic-raitiovaunun akseleita kierrätetään keskenään eri akselipaikoille ja täten vaihtelevien halkaisijoiden huomioiminen regressiomallissa olisi varsin haastavaa. Halkaisija on myös varsin iso: uudella pyörällä 680 mm ja loppuun kuluneella 620 mm. Tällöin erot vierimismatkassa olisivat suurimmillaan vain 10% ja siksi mallissa lasketaan suoraan todellisilla ajokilometreillä. Lisäksi Niipan (2014) diplomityössä pyöräkehän lyhenemistä ei huomioitu eikä myöskään Laaksosen (2008) metrovaunujen pyörien kulumisesta tehdyssä diplomityössä löydetty yhteyttä kulumisnopeuden ja pyörän halkaisijan välillä.

## 5.2 Parametrien estimointi

Mittausdatasta on nähtävissä, että yksittäisessä mittaustuloksissa on heittoa. Pyörän halkaisija on voinut vaikkapa kasvaa edellisen mittauksen välillä, joka todennäköisesti johtuu pelkästä mittausvirheestä. Oletetaan, että mittausvirheet ovat toisistaan riippumattomia ja normaalijakautuneita, jolloin pienimmän neliösumman menetelmällä voidaan tehokkaasti estimoida kulumismallin (2) parametrit. Parametrit estimoidaan regressiomallilla

$$y = \beta_0 x + \sum_{j=1}^m \delta_{ij} \beta_j, \quad (3)$$

jossa vektori  $x = (x_{1,1}, x_{2,1}, \dots, x_{1,2}, x_{2,2}, \dots, x_{k,j})$  sisältää mittaustulokset, jonka indeksi  $k$  on mittausten lukumäärä viimeisimmän sorvauksen jälkeen ja indeksi  $j$  on sorvausväli, joita on yhteensä  $m$  kappaletta. Parametri  $\beta_0$  on estimoitava kulumisvakio  $k_0$  ja loput parametrit ovat niin sanottuja ”dummy”-muuttujia, jotka antavat jokaiselle sorvauskerralle oman laipan leveyden alkuarvon. Merkintä  $\delta_{ij}$  on Kroneckerin deltafunktio:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{jos } i = j \\ 0, & \text{jos } i \neq j. \end{cases}$$

Regressiomalli laipan korkeudelle on pääpiirteiltään samanlainen kuin malli laipan korkeudelle (3). Malli saadaan yhtälöstä

$$y = \beta_0 x + \beta_1 g(x) + \sum_{j=1}^m \delta_{ij} \beta_{j+1},$$

jossa parametri  $\beta_0$  vastaa kulumisvakiota  $k_1$ ,  $\beta_1$  kulumisvakiota  $k_2$  ja  $g(x)$  on kulumismallin (2) laipan korkeuden yhtälössä esiintyvä termi:

$$\frac{1}{k_0} (\log(LL_0) - \log(LL_0 - k_0 x)).$$

Molemmat regressiomallit ovat yleistettyjä lineaarisia malleja, joiden regressiokertoimet voidaan helposti ratkaista Matlabilla.

### 5.3 Optimaalisen sorvausvälin määrittäminen

Niippa (2014) määrittelee sorvausvälin nivelraitiovaunuille regressiomallin pohjalta pisteessä, jossa laipan korkeus alittaa laipan minimikorkeuden raja-arvon, jonka jälkeen pistettä on siirretty taaksepäin 68% luottamusvälin verran. Tutkimusaineistosta tehtyjen havaintojen perusteella on syytä olettaa, että Artic-raitiovaunujen sorvausväli tulisi myös perustua laipan madaltumiseen.

Sorvauskustannuksia on mallinnettu funktiolla

$$z(x) = \frac{s_0 + \mathbb{E}(s(x))}{x}, \quad s(x) = \begin{cases} 0, & LK(x) > 19 \\ ks_0 & \text{muuten,} \end{cases} \quad (4)$$

jossa sorvauskustannukset  $z$  ajokilometriä  $x$  kohden koostuvat huoltosorvauskustannuksesta  $s_0$  ja vikasorvauskustannuksen  $s(x)$  odotusarvosta. Mallissa vikasorvauskustannus toteutuu, jos laippa pääsee kulumaan alle 19 millimetrin vahvuuteen. Vakio  $k$  kuvaa vika- ja huoltosorvauskustannusten suhdetta. Funktio  $s(x)$  riippuu laipan korkeuden regressiomallista, jonka parametrit ovat PNS-estimaatteja parametrien arvoille. Mallissa parametrit ovat normaalisti jakautuneita satunnaismuuttujia keskiarvoon suuruusella keskihajonnalla yleisen regressiomallin standardioletusten mukaan.

Optimaalinen sorvausväli saadaan minimoimalla sorvauskustannusfunktio (4) ajokilometriä suhteen sopivilla rajoitusehdoilla: sorvausvälin tulee olla positiivinen ja laipan korkeuden odotusarvon tulee olla yli minimikorkeuden. Tällöin ratkaistava optimointitehtävä voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\begin{aligned} & \arg \min_x z(x) \\ \text{s.t.:} & \quad x \geq 0 \\ & \quad \mathbb{E}(LK(x)) \geq 18. \end{aligned}$$

Tehtävä on yksidimensioinen ja sen käypä joukko on pieni, joten optimi voidaan tehokkaasti hakea tasavälisellä etsinnällä. Kustannusfunktiossa oleva odotusarvo vaikeuttaa funktion arvon laskemista, jota tarvitaan valitussa ratkaisumenetelmässä. Odotusarvo saadaan kuitenkin ratkaistua numeerisesti käyttämällä monte carlo -menetelmää funktion arvon ratkaisuun.

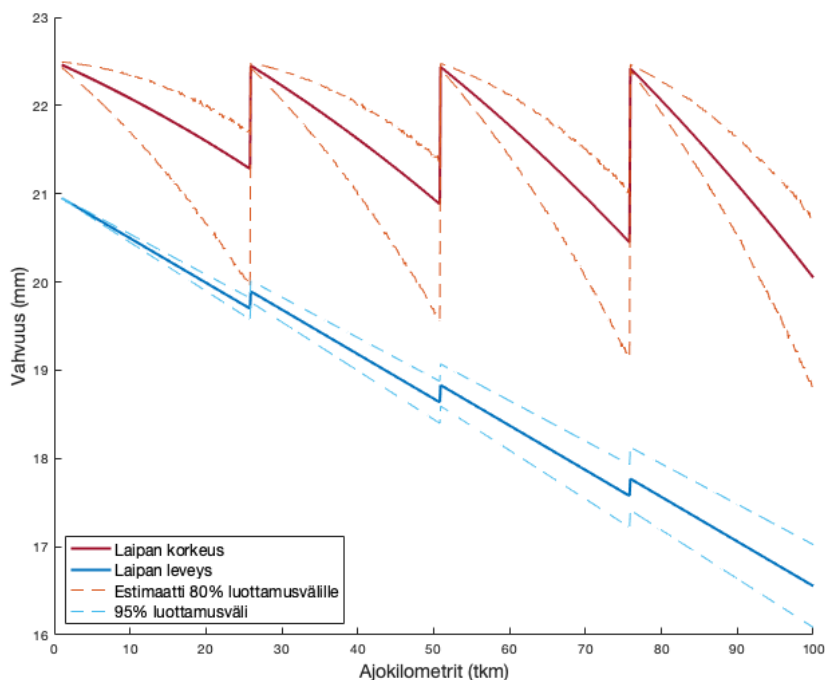
## 6 Tulokset

### 6.1 Kulumismalli

Regressiomallin selitysasteeksi laipan korkeudelle saatiin 0.76 ja leveydelle 0.72 ja korjatuiksi selitysasteiksi 0.70 ja 0.65. Taulukkoon 3 on kerätty estimaatit kulumismallin parametreille sekä niiden keskivirheille. Kuvassa 7 on esitetty mallin mukainen laipan kulumisen nykyisillä 25 000 km sorvausväleillä. Luottamusvälit laipan korkeudelle on estimoitu numeerisesti kvantiileilla. Mallin perusteella laipan korkeuden kulumisnopeus kasvaa laipan ohentuessa, mikä oli havaintojen perusteella oletettua.

Parametri	Estimaatti	Keskivirhe
$k_0$	0.05046	0.002393
$k_1$	-5.527	0.3271
$k_2$	0.2245	0.01582

Taulukko 3: Estimaatit ja keskivirheet kulumismallin parametreille

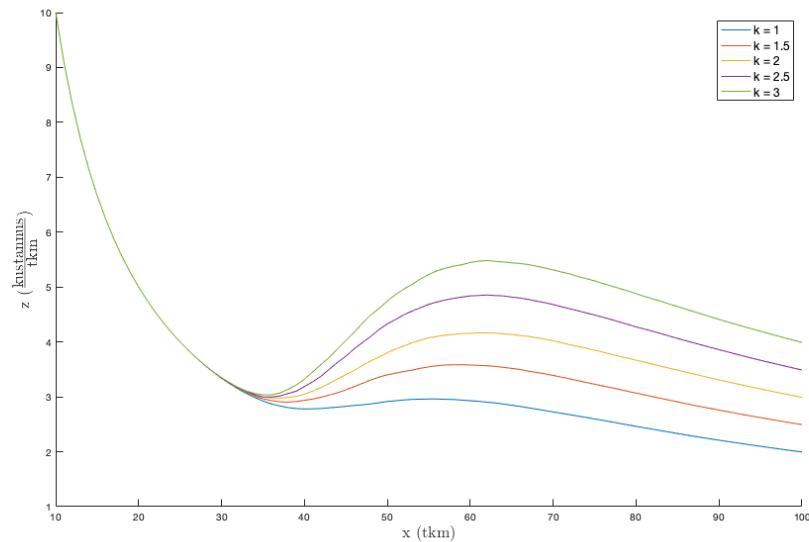


Kuva 7: Kulumismalli nykyisellä sorvausvälillä

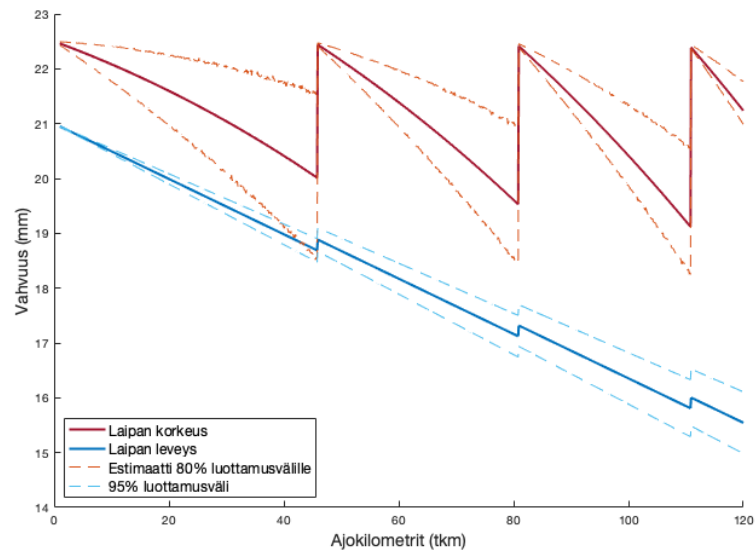
### 6.2 Sorvausväli

Tarkkaa arviota vikasorvauksen kustannukselle on vaikeaa antaa. Kuvassa 8 on ratkaistu optimikohta useilla eri kustannusarvoilla. Minimikohta on suhteellisen

stabiili, eikä muutu paljoa kustannusten muuttuessa rajustikin. Kuvaan 9 on piirretty 1-akselin laipan kuluminen mallin tuottamilla optimaalisilla sorvausväleillä arvolla  $k = 2$ .



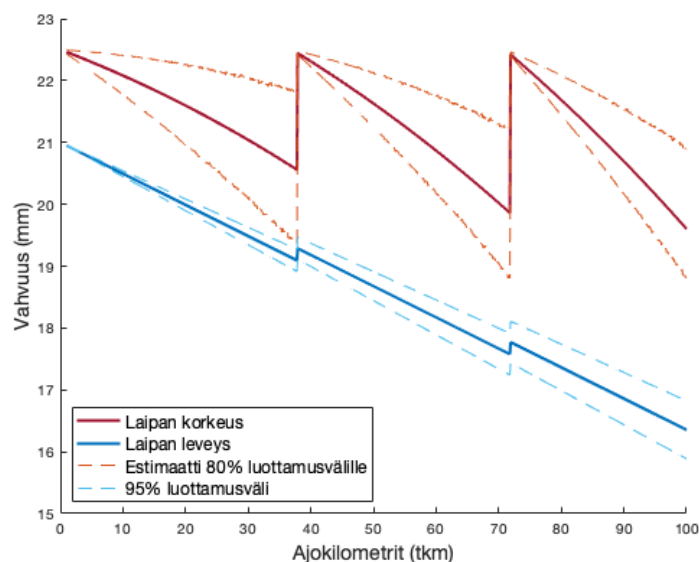
Kuva 8: Kustannusfunktio eri kustannusarviolla



Kuva 9: Laipan kuluminen mallin mukaisilla sorvausväleillä

Akselinkäännön tulisi tapahtua tasaisin välein, jotta pyörien väliset erot halkaisijoissa tasoittuisivat mahdollisimman hyvin ja materiaalia säästyisi (Niippa, 2014).

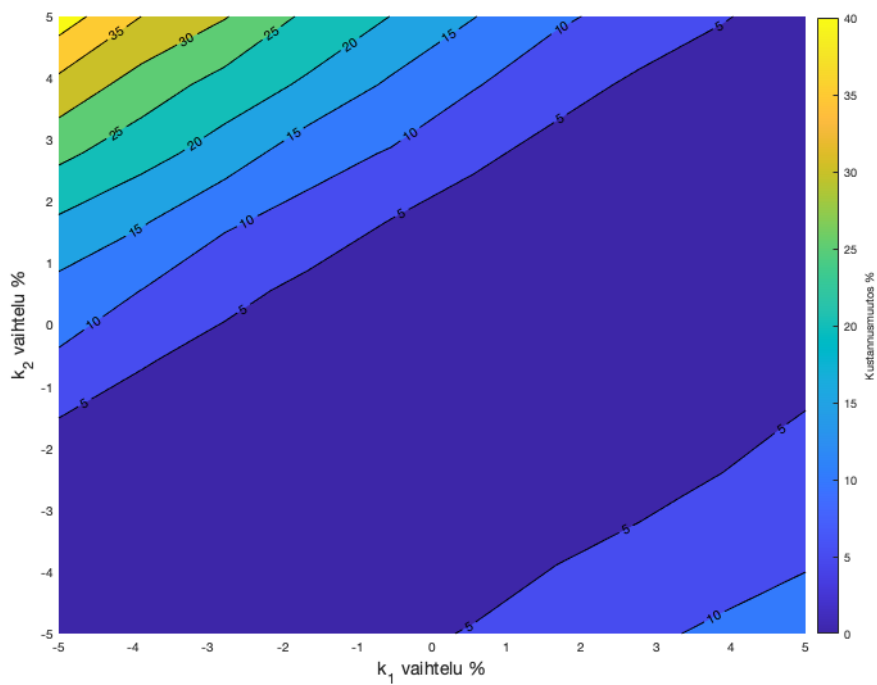
Akselinkääntöjä tehdään tällä hetkellä kaksi kertaa pyöräkehän elinkaaren aikana ja jos pyöräkehillä ajetaan noin 250-320 tkm, tulisi ensimmäisen käännön ajoittua jo ennen 110 tkm sorvausta. Nykyisellä 100 tkm akselinkääntöväliä kustannusfunktio minimoituu, kun sorvaukset tapahtuvat 37 ja 71 tkm kohdalla. Laipan kuluminen kyseisillä sorvausväleillä on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10: Laipan kuluminen mallin mukaisilla sorvausväleillä akselinkäännöt huomioiden

### 6.3 Herkkyysanalyysi

Optimisorvausväli ei muuttunut paljoa kustannusten muuttuessa ja ratkaisu oli stabiili kustannusmuutosten suhteen, mutta optimisorvausväli riippuu myös regressiomallin parametreista  $k_1$  ja  $k_2$  joiden vaihtelua on tutkittu ratkaisun herkkyyteen kuvassa 11.  $x$ -ja  $y$ -akselit ovat suhteellisia muutoksia estimoiduissa parametreissa  $k_1$  ja  $k_2$  ja jokaista tason pistettä vastaava arvo on kustannusten nousu pisteen parametreja vastaavasta minimistä. Kuvan perusteella optimikohta on myös parametrien suhteen suhteellisen stabiili, eikä pieni muutos parametreissa muuta lopputuloksen arvoa merkittävästi.



Kuva 11: Osittaisherkkyyksanalyysi sorvausvälin optimille

## 7 Yhteenveto

Tässä työssä kartoitettiin raitiovaunujen pyörien nykytilanteen kulumista ja kulumisnopeutta mittaustuloksien perusteella. Mittaustulokset analysoitiin ja niiden pohjalta kehitettiin matemaattinen malli pyörien kulumiselle. Kulumismallin perusteella luotiin malli sorvauskustannuksille, jonka minimoiminen tuotti kustannuksellisesti optimaalisen sorvausvälin pyörille.

Työn tärkeimpiä havaintoja on laipan korkeuden kulumisnopeuden riippuvuus laipan leveydestä. Sorvausvälin tulisi täten olla riippuvainen laipan leveydestä. Mittausdatasta on nähtävissä, että 25 000 km sorvausväli voi olla jopa liian lyhyt jos laippa on päässyt kulumaan lähelle alarajaa ja laippaa ei ole sorvattu aivan täyteen korkeuteen edellisessä sorvauksessa. Tällöin vaunu on jouduttu vikasorvaamaan.

Nykyisillä akselinkäntöväleillä, eli noin 100 ja 200 tkm kohdalla, sorvauksia voitaisiin mallin perusteella nykyisen 4 kappaaleen sijasta tehdä 2 kappaletta olettaen, että akselinkäntö toteutetaan ajoissa. Uusien sorvausvälien käyttöönotto vaatisi kuitenkin sorvaussuunnitelman laipan leveydelle. Yleensä huoltosorvauksissa laippaa ei juurikaan sorvata leveämmäksi, mutta välillä laipan ollessa lähellä leveyden alarajaa, on laippoja sorvattu paksummiksi. Tällöin uudessa sorvausstrategiassa riskinä on laippojen liian alhaisen leveyden vuoksi tehtävät sorvaukset, jos alhaista leveyttä ei ajoissa päästä huomaamaan.

Akselinkäntö on oleellinen osa pyörien huoltosuunnitelmaa, jota ei työn laajuuden puitteissa pystytty käsittelemään syvällisesti tässä opinnäytetyössä. Useammilla akselinkäännöillä pyöräkehän elinkaaren aikana pystyttäisiin hidastamaan laipan kulumista ja mahdollisesti sorvausvälejä venyttämään entisestään. Akselinkäntö on kuitenkin selvästi kalliimpaa kuin huoltosorvaaminen.

Kantakaupungin rataverkossa aiotaan tulevaisuudessa siirtyä täysin syväuravaihteisiin, jolloin laipan pystysuuntainen kuormitus pienenee oleellisesti, kun raitiovaunu ei enää kulje vaihteen yli osin laipan varassa. On odotettavissa, että laipan pystysuuntainen kuluminen vähenee tai loppuu kokonaan tai laippa voi jopa alkaa kasvamaan korkeammaksi kuten junien pyörissä, kun vaihteet tulevat käyttöön. Opinnäytetyössä kehitetyt mallit pätevät vain nykyisen kaltaiselle kulumiselle ja syväuravaihteiden tullessa käyttöön muuttuvat sorvausperusteet todennäköisesti, jolloin mallit eivät anna oikeita tuloksia.

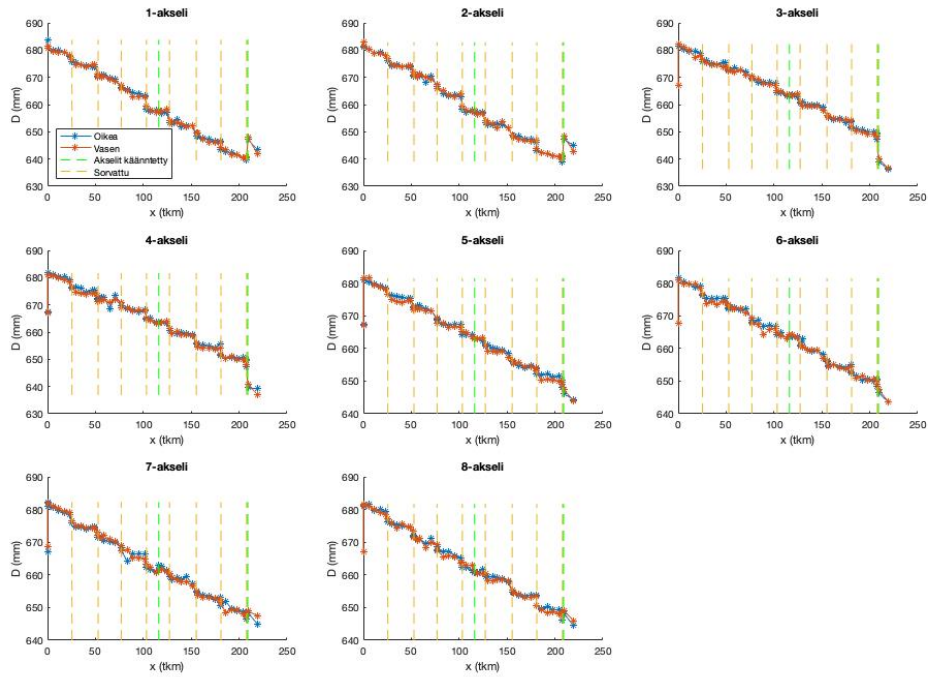
Pyörien ennakoiva sorvaus on vain yksi osa raitiovaunun pyörien kunnossapitoa, johon vaikuttaa myös mm. pyörän profiili, pyörän kovuus ja edellä mainittu akselinkäntö, joita ei tässä työssä ehditty käsittelemään tarkemmin. Lisätutkimusta vaatisi useampien muuttujien huomioiminen pyörien kunnossapidon optimoinnissa saavuttaakseen suurimmat kustannussäästöt pyörien kunnossapidossa.



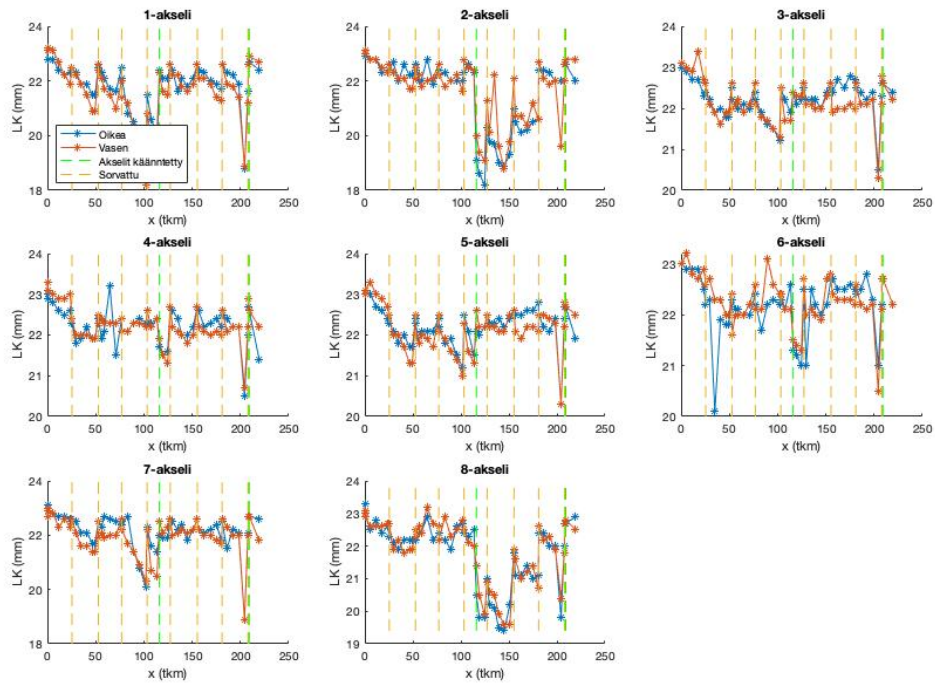
## Viitteet

- F. Besnard, M. Patriksson, A. Strömberg, A. Wojciechowski, ja L. Bertling. An optimization framework for opportunistic maintenance of offshore wind power system. 2009 IEE Bucharest PowerTech, 2009.
- F. Braghin, R. Lewis, R.S. Dwyer-Joyce, ja S. Bruni. A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear. *Wear*, 261:1253–1264, 2006.
- M. Dekker. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliability engineering & system safety*, 51:229–240, 1996.
- B. Dirks. *Simulation and measurement of wheel on rail fatigue and wear*. Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2015.
- H. Gui ja Z. Xueqing. A markov-based road maintenance optimization model considering user costs. *Computer-aided civil and infrastructure engineering*, 28:451–464, 2013.
- I Kalathas ja M. Papoutsidakis. Predictive maintenance using machine learning and data mining: A pioneer method implemented to greek railways. *Designs*, 5, 2021.
- K. Kobbyak. Application of artificial intelligence in maintenance modelling and management. *IFAC Proceedings Volumes*, 45:54–59, 2012.
- T. Laaksonen. Helsingin metron pyörien kuluminen, sen optimointi ja seuranta. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta, Espoo, 2008.
- T. Niippa. Raitiovaunun pyörien ennakoivan huolto-ohjelman suunnittelu. Diplomityö, Aalto yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu, Espoo, 2014.
- M. Pau, F. Aymerich, ja F. Ginesu. Distribution of contact pressure in wheel–rail contact area. *Wear*, 253:265–274, 2002.
- T. Pearce ja N. Sherratt. Prediction of wheel profile wear. *Wear*, 144:343–351, 1991.
- B. Peng, S. Iwnicki, P. Schakleton, ja D. Crosbee. Comparison of wear models for simulation of railway wheel polygonalization. *Wear*, 436–437, 2019.

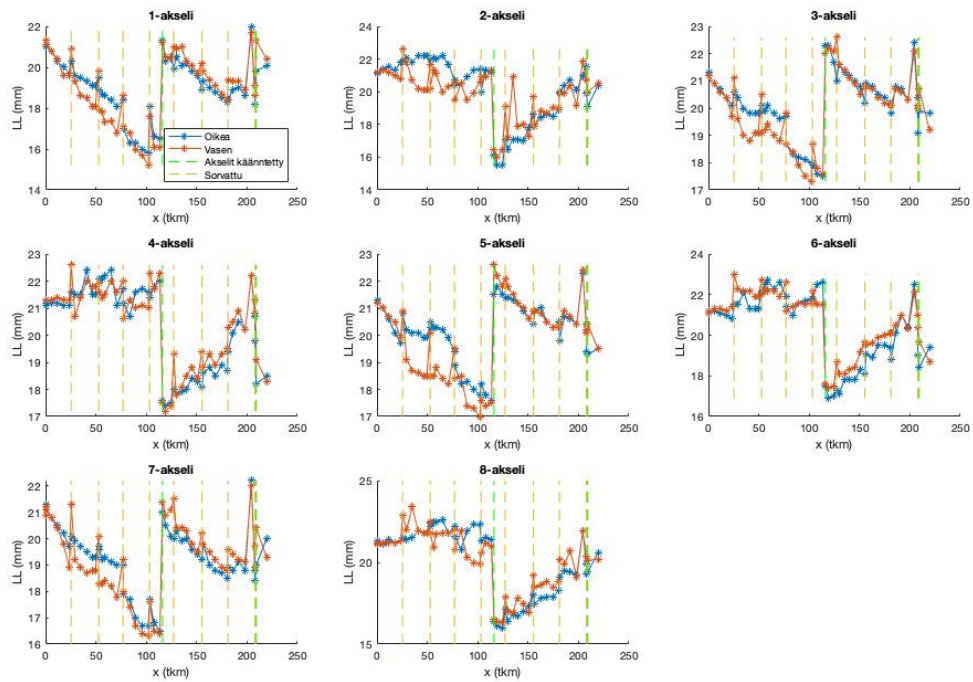
# A Vaunun 431 mittaushistoria



Kuva A1: Mittaustulokset halkaisijasta



Kuva A2: Mittaustulokset laipan korkeudesta



Kuva A3: Mittaustulokset laipan leveydestä