

Raidekaluston jarrupalojen vaihtostrategian optimointi simuloinnin avulla

Leo Lehikoinen

Perustieteiden korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 12.2.2019.

Työn valvoja

Prof. Antti Punkka

Työn ohjaaja

FT Tuomas Karavirta



Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla. Muilta osin kaikki oikeudet pidätetään.

Copyright © 2019 Leo Lehtikoinen

Tekijä Leo Lehikoinen

Työn nimi Raidekaluston jarrupalojen vaihtostrategian optimointi simuloinnin avulla

Koulutusohjelma Teknillinen fysiikka ja matematiikka

Pääaine Systems and Operations Research

Pääaineen koodi SCI3055

Työn valvoja Prof. Antti Punkka

Työn ohjaaja FT Tuomas Karavirta

Päivämäärä 12.2.2019

Sivumäärä 73

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Kunnossapito muodostaa merkittävän osan raidekaluston elinkaaren aikaisista kokonaiskustannuksista, mutta toimintakyvyn säilyttämiseksi ja turvallisuuden takaamiseksi kunnossapitoa on välttämätöntä suorittaa. Historiassa kunnossapitoa on suoritettu lähinnä vikoja korjaamalla ja ennaltaehkäisevillä huoltotoimenpiteillä kuten vuosihuolloilla. Digitalisaation myötä on tullut mahdolliseksi seurata komponenttien kuntoa mittalaitteiden ja sensoreiden avulla automaattisesti suurella skaalalla kohtuullisilla investoinneilla, jolloin huoltotoimenpiteet voidaan suorittaa todellisen huoltotarpeen perusteella. Kulut pienenevät, kun komponenttien käyttöikä pitenee, ja samanaikaisesti vikojen määrä pienenee, kun hajoamassa olevat komponentit havaitaan ennalta.

Tämän työn tavoitteena on toteuttaa simulointimalli eri huoltostrategioiden vertailuun. Mallia sovelletaan Pendolino-junien jarrupalahuoltojen suorittamiseen. Simulaatiomallin lähtötiedot jarrupalojen kulumiskäyttäytymisen osalta saadaan käsittelemällä jarrupalojen paksuutta mittaavan mitta-aseman tuottamaa dataa. Huoltojen suorittamisen kustannukset perustuvat asiantuntija-arvioihin materiaalikustannuksia lukuun ottamatta. Tutkittavana on neljä strategiaa: A) ennaltaehkäisevä strategia, jossa kaikki jarrupalat vaihdetaan tasavälein, B) kuntoon perustuva strategia, jossa kukin jarrupala vaihdetaan paksuutensa perusteella, C) ennustava strategia, jossa vaihdetaan seuraavaan huoltoon kestävämmät jarrupalat ja D) opportunistinen strategia, jossa jarrupalat ryhmitellään eri huoltotapahtumiin niin, että kokonaiskustannukset minimoituisivat. Kustannusten selvittämisen lisäksi tavoitteena on tarkastella epävarmuuksia ja riskejä, jotka liittyvät erilaisiin strategioihin. Vertailun vuoksi työssä lasketaan myös kustannus teoreettiselle tilanteelle, jossa kaikki junan jarrupalat kuluvat aina samaa tahtia.

Tulosten perusteella strategia A ei sovellu tutkittavaan ongelmaan korkeiden kustannustensa takia. Strategia B suoriutuu kohtuullisesti, mutta strategia C on merkittävästi kustannustehokkaampi. Strategia D on monimutkaisin, muttei merkittävästi kustannustehokkaampi kuin strategia C. Näin ollen ennustavaa strategiaa suositellaan käyttöön otettavaksi, jolloin todellinen suorituskyky saadaan testattua. Jarrupalojen kulumisnopeuksien eroilla junassa ei ole merkittävää vaikutusta kustannukseen.

Avainsanat Kunnossapito, simulointi, strategioiden vertailu, junan jarrupalat

Author Leo Lehtikoinen

Title Simulation Approach to Rolling Stock Brake Pad Replacement Strategy Optimization

Degree programme Engineering Physics and Mathematics

Major Systems and Operations Research

Code of major SCI3055

Supervisor Prof. Antti Punkka

Advisor Ph.D. Tuomas Karavirta

Date 12.2.2019

Number of pages 73

Language Finnish

Abstract

Maintenance attributes to a significant share of the total lifecycle cost of a rolling stock unit. However, maintenance is essential for both maintaining operating condition and ensuring safe operation of the vehicle. In the past, maintenance has been conducted mostly by replacing failed parts and performing preventive maintenance tasks, such as annual hauls. Digitalization has made it possible to cost-effectively track the condition of components on a large scale by using wayside measurement systems and on-board sensors. Hence, maintenance actions can be performed based on the true need for servicing, which results in lower maintenance cost due to extended lifetime of the components. Meanwhile, the fault rate decreases since condition monitoring enables the maintainer to detect failing components precociously.

The goal of this thesis is to build a simulation model that can be used to test the differences in maintenance strategies synthetically. The model is used for optimizing brake pad replacement in Pendolino trains. The input for the simulation model regarding the trend of wear can be obtained by processing the available brake pad thickness data. The maintenance costs are based on expert evaluation excluding the material cost of a new brake pad. The four strategies to be compared are: A) preventive strategy in which every brake pad is replaced at a constant interval, B) condition based strategy in which every brake pad is replaced based on its thickness, C) predictive strategy in which brake pads that would not last until the next maintenance are replaced, and D) opportunistic strategy in which brake pads are grouped in slots such that the total cost is minimized. On top of determining the cost of each strategy the objective is to recognize the uncertainties and risks that each strategy entails. For comparison, cost is calculated for the case in which all the brake pads wear out synchronously.

Based on the results, strategy A is not suitable for the problem at hand due to high cost. Strategy B performs moderately well, but strategy C is significantly more cost-effective. Strategy D is the most complicated, yet it does not perform substantially better than strategy C. Thus, predictive strategy is recommended to be tried out in production yielding the true performance of the strategy in practice. Variation in train's brake pad wear rates does not cause a significant rise in maintenance cost.

Keywords Maintenance, simulation, comparison of strategies, train brake pads

Esipuhe

Tämä diplomityö on toteutettu yhteistyössä VR Groupin kunnossapitodivisioonan kanssa. Suuri kiitos ystävälleni Teemu Kinnuselle diplomityön tekemisen mahdollisuudesta tiedustelemisesta konsernissa. Kiitos Mikko Alangolle ja Tuomas Savikankaalle palkkaamisestani ensin diplomityöntekijäksi ja sittemmin vakituiseen pestiin Junior Data Scientistiksi.

Haluan kiittää diplomityöni ohjaajaa Tuomas Karavirtaa hyvistä neuvoista ja rakentavasta palautteesta. Kiitos myös muille työtovereille, jotka edesauttoivat diplomityöni edistymistä asiantuntijuudellaan tai motivoinnillaan.

Kiitos Aalto-yliopistolle mielenkiintoisesta matkasta läpi kurssien ja tenttien viidakon hyvää opetusta unohtamatta. Erityiskiitos koko Systeemianalyysin laboratorion henkilökunnalle, eritoten professori Antti Punkalle, joka toimi tämän diplomityön valvojana.

Kiitän vanhempiani Aria ja Hannaa, sillä ymmärrettävästi ilman heitä en olisi voinut tätä teosta kirjoittaa. Kiitos rakkaalle vaimolleni Julialle huolenpidosta ja kompromisseista, joita opintojeni loppuun saattaminen on vaatinut.

Kiitos myös sisäiselle motivaatiolle ja valmistumisen palolle, jotka olivat kantava voima tämän projektin valmiiksi saattamisessa ja seuraavalle tasolle siirtymisessä.

Kohti ääretöntä ja sen yli
— Buzz Lightyear

Otaniemi, 12.2.2019

Leo O. Lehikoinen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Tiivistelmä (englanniksi)	4
Esipuhe	5
Sisällysluettelo	6
Symbolit ja lyhenteet	8
1 Johdanto	9
2 Kunnossapito	12
2.1 Kunnossapitolajit	12
2.1.1 Korjaus- ja määräaikaishuollot	12
2.1.2 Kuntoon perustuva kunnossapito	13
2.1.3 Opportunistinen kunnossapito	15
2.2 Sovellusesimerkkejä kirjallisuudesta	16
2.2.1 Jarrupalojen kulumisen tutkimus	16
2.2.2 Opportunistisen kunnossapidon tutkimus	17
3 Simulointi	19
4 Tutkimusaineiston käsittelyn menetelmät	22
4.1 Kohinaisen mittausdatan analysointi	22
4.1.1 Merkittävän muutoksen havaitseminen	22
4.1.2 Estimointi Kalman-suotimen avulla	23
4.2 Satunnaisuuden mallintaminen matemaattisesti	24
4.2.1 Todennäköisyysjakaumat	25
4.2.2 Todennäköisyysjakaumien käyttöön liittyviä huomioita	26
4.2.3 Parametrien estimointi	28
4.2.4 Sovituksen testaus	29
5 Malli jarrupalahuollon strategioiden vertailuun	32
5.1 Sm3-junan jarrujärjestelmä	32
5.2 Jarrupalojen mittausdata	33
5.3 Jarrupalojen vaihtojen havainnointi mittausdatasta	35
5.4 Malli yksittäisten jarrupalojen kulumiselle	37
5.5 Mittaushistorian analysointi	38
5.6 Jarrupalahuollon kustannukset	40
5.7 Simulointimalli koko junan jarrupalojen kulumiselle	41
5.8 Tutkittavat strategiat	43

6 Tulokset	47
6.1 Strategia A	48
6.2 Strategia B	49
6.3 Strategia C	51
6.4 Strategia D	53
6.5 Nykytilan kustannukset	57
6.6 Strategian parametrien vaikutus	59
6.7 Kustannusten vaikutus	61
6.8 Mittausvirheen vaikutus	63
6.9 Huoltovälin epävarmuuden vaikutus	64
6.10 Jarrupalojen kulumisnopeuserojen vaikutus	65
6.11 Strategioiden vertailu	66
7 Automaattimittausperusteiseen huollon aikataulutukseen siirtymisen riskit ja edellytykset	67
8 Yhteenveto	69
Viitteet	71

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

μ	keskiarvo
σ	keskihajonta
$N(\mu, \sigma^2)$	normaalijakauma keskiarvolla μ ja keskihajonnalla σ
$Gamma(k, \theta) = \Gamma(k, \theta)$	gamma-jakauma parametreilla k ja θ
R^2	selitysaste
\forall	kaikilla, jokaisella
\in	kuuluu joukkoon
\mathbb{R}	reaalilukujen joukko
\wedge	ja
T	transpoosi

Operaattorit

$\frac{\partial}{\partial t}$	osittaisderivaatta muuttujan t suhteen
\sum_i	summa indeksin i yli
$E[X]$	satunnaismuuttujan X odotusarvo

Lyhenteet

CBM	Condition-Based Maintenance
CM	Corrective Maintenance
ICA	Independent Component Analysis
MLE	Maximum Likelihood Estimation
OM	Opportunistic Maintenance
PCA	Principal Component Analysis
PdM	Predictive Maintenance
PvM	Preventive Maintenance
RFID	Radio Frequency Identification
RUL	Remaining Useful Life

1 Johdanto

Tekniset järjestelmät kuten koneet ja muut laitteet vaativat yleensä huoltotoimenpiteitä eli kunnossapitoa pysyäkseen toimintakuntoisina ja turvallisina käyttää. Kunnossapidolla pyritään myös järjestelmien pitkäikäisyyteen. Kunnossapidon laiminlyönnistä koituu mahdollisen turvallisuusriskin lisäksi kustannuksia, sillä järjestelmän rikkoutuessa se ei enää täytä tehtäväänsä. Toisaalta huoltotoimenpiteiden suorittaminen on myös kustannus, sillä huoltaminen saattaa esimerkiksi vaatia tuotannon pysäyttämisen, vaihto-osia ja työvoimaa. Kustannukset huomioivassa kunnossapidossa tavoitteena onkin selvittää mitä kannattaa huoltaa ja milloin.

Perinteisesti huoltoja suoritetaan tasavälein esimerkiksi ajan tai käytön mukaan ennaltaehkäisevästi ennakoivaa kunnossapitoa (engl. preventive maintenance; PvM) hyödyntäen, ja viat havaitaan ja korjataan vasta vian ilmaannuttua korjaavan kunnossapidon (engl. corrective maintenance; CM) kautta. Ennakoivassa kunnossapidossa osa komponenttien potentiaalisesta käyttöiästä menee hukkaan, sillä vikaantumisten välttämiseksi huoltoväli tulisi asettaa lyhimmän havaitun kestoiän mukaan. Useimmiten tiheä huoltaminen ei tule kustannussyistä kysymykseen, vaan huoltoväli asetetaan pidemmäksi ja hyväksytään, että tietty osa komponenteista vikaantuu. Kustannustehokkaan valinnan määrittämistä kutsutaan huoltovälin optimoinniksi.

Teknologian kehitys on mahdollistanut mittalaitteiden avulla suoritettavan järjestelmien kunnonvalvonnan, jonka tuottamaan tietoon perustuen voidaan suorittaa kuntoon perustuvaa kunnossapitoa (engl. condition based maintenance; CBM). Koska kuntoon perustuvassa kunnossapidossa huoltotoimenpiteet suoritetaan komponenttien ajantasaiseen kuntotietoon perustuen, samanaikaisesti on mahdollista sekä pienentää kustannuksia että parantaa järjestelmien luotettavuutta. Kustannukset pienenevät, kun komponentteja ei vaihdeta varmuuden vuoksi etukäteen vaan vasta eliniän lopussa. Lisäksi mittaustieto parantaa luotettavuutta, kun huonokuntoinen komponentti voidaan havaita ja vaihtaa uuteen ennen kuin se rikkoutuu. Komponenttien kuntotiedon perusteella voidaan myös luoda malleja, jotka ennustavat huoltotarpeen tulevaisuudessa, jolloin puhutaan ennustavasta kunnossapidosta (engl. predictive maintenance; PdM). Ennusteesta on hyötyä esimerkiksi kaluston huoltoon ohjauksessa, huoltotöiden suunnittelussa ja varastonhallinnassa.

Vaikka järjestelmän yksittäisten komponenttien kuntoa seuraamalla saadaan selville kunkin komponentin jäljellä oleva elinikä, jokaista komponenttia ei välttämättä kannata käyttää loppuun. Tämä johtuu siitä, että järjestelmän huoltamiseen liittyy yleensä kiinteä kustannus. Kokonaiskustannusten kannalta on todennäköisesti kustannustehokkaampaa hyödyntää tilaisuus huoltaa muitakin komponentteja kuin pelkästään välitöntä huoltaa vaativa komponentti. Järjestelmän komponenttien huoltojen ryhmittelyä kutsutaan opportunistiseksi kunnossapidoksi (engl. opportunistic maintenance; OM).

Tässä työssä tarkastellaan jarrupalahuoltoja Pendolino-junissa, joita on VR:llä liikenteessä 17 kappaletta. Nykytilanteessa VR:n Pendolinojen jarrupalojen kunto arvioidaan silmämääräisesti alustatarkastuksen yhteydessä 5000 km välein eli noin kerran viikossa. Jokaisen junan 64 jarrusylinterin jarrupalojen tarkastamiseen kuluu paljon aikaa. Lisäksi palojen vaihto suoritetaan usein turhan aikaisin, mikä johtaa turhiin materiaali- ja vaihtotyökustannuksiin. Kustannuslaskelmien perusteella on arvioitu, että jarrupalahuoltojen kustannuksia voidaan alentaa merkittävästi, jos jarrupalojen tarkastus suoritetaan automaattisesti.

VR:llä on mittausasema, joka mittaa junien jarrupalojen paksuudet varikolle saavuttaessa. Huoltotoiminnan tehostamiseksi tavoitteena on siirtyä kuntoon perustuvaan kunnossapitoon mittausaseman tuottamaa dataa hyödyntäen. Mittausdatan perusteella on myös mahdollista havaita vikatiloja jarrujärjestelmässä, mikä nopeuttaa vian havaitsemista ja korjausta. Mikäli jarrupalan kulumisen on poikkeuksellisen nopeaa tai hidasta, jarrujärjestelmä tulee säätää tasapainoon. Pelkkä tarkastushetken mittaus ei kerro palan kulumisen trendiä, mutta automatisoidun mittauksen ansiosta historian tutkiminen ja trendien määrittäminen on mahdollista. Lisäksi kertyvän mittausaineiston perusteella voidaan ennustaa jokaiselle jarrupalalle jäljellä oleva elinikä (engl. remaining useful life; RUL), mikä voi mahdollistaa kustannusten säästön tehokkaamman suunnittelun seurauksena.

Työn tavoitteena on vertailla erilaisten huoltostrategioiden kustannuksia jarrupalojen vaihdoille. Paloja ei kannata vaihtaa yksi kerrallaan, mikäli huoltotapahtuman kiinteä kustannus on suuri suhteessa materiaalikustannukseen. Toisaalta mikäli paloja vaihdetaan erittäin harvoin, joudutaan haaskaamaan paljon käytettävissä olevaa kitkapintaa, jotta kaikki jarrupalat kestävät varmasti kaukaiseen seuraavaan huoltoon asti. Tällöin myös jarrupalojen vaihtoon käytettävän työn kustannukset kasvavat, sillä palojen kulutus kasvaa ja jokaisen jarrupalan vaihtoon kuluu tietty määrä aikaa.

Työssä luodaan jarrupalojen kulumiskäyttäytymiselle simulointimalli saatavilla olevan mittausdatan perusteella. Mittausdatan avulla estimoidaan jakauma historiassa havaituille jarrupalojen kulumisnopeuksille ja vaihtopaksuuksille. Mallilla simuloidaan junan jarrupalojen kulumista estimoituun jakaumaan perustuen, ja huoltoja simuloidaan neljään eri vaihtostrategiaan perustuen. Simulaation ulostulona lasketaan keskimääräinen kustannus kilometriä kohden. Kustannuksiin kuuluvat jarrupalojen materiaalikustannus, työn kustannus, huollon kiinteä kustannus sekä minimipak-suuden alittamisesta seuraava sakko. Tavoitteena on vertailun perusteella löytää kustannustehokas strategia tuotantoon vietäväksi.

Työ koostuu kahdeksasta luvusta. Luvussa 2 käydään läpi työn kannalta olennaiset kunnossapitolajit ja sovellusesimerkit kunnossapidon kirjallisuudesta. Luvussa 3 tarkastellaan simulaatiota, jota käytetään tämän työn tutkimusmenetelmänä strategioiden vertailuun. Luvussa 4 esitellään työn kannalta olennaiset aineiston hankkimiseen ja käsittelyyn liittyvät menetelmät. Luvussa 5 luodaan malli jarrupalahuollon strategioiden vertailuun. Luvussa 6 esitetään työn tulokset, ja luku 7 sisältää pohdintaa.

Lopuksi käydään läpi yhteenveto luvussa 8.

2 Kunnossapito

Kunnossapito kattaa kaiken toiminnan, jonka avulla kohde säilyttää tilan tai palautuu tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditut toiminnot [1, s. 8]. Kunnossapitoa suoritetaan muiden muassa infrastruktuurille, rakennuksille ja teollisuuden koneille, mutta tässä työssä keskitytään raidekaluston kunnossapitoon. Kunnossapito on välttämätön osa rautatieliikennettä, sillä kaluston toimivuuden lisäksi kunnossapidolla varmistetaan sen turvallinen operointi. Turvallisuus ja vastuullisuus on kirjattu VR Groupin arvoksi, ja ilman asianmukaista kunnossapitoa junien operointi ei ole turvallista. Junakalustossa tietyt asiat kuten pyörien asianmukainen profiili kiskoilla pysymisen varmistamiseksi ja jarrujärjestelmät ovat kriittisiä seikkoja turvallisuuden kannalta. Lisäksi asiakkaan etukaan ei toteudu, mikäli junat rikkoutuvat kesken matkan huonon kunnossapidon seurauksena. Myös ei-kriittisistä vioista kuten ilmastointilaitteen toimimattomuudesta kuumana kesänä on merkittävää haittaa matkustusmukavuudelle.

Vaikka kunnossapito on välttämätöntä, sitä ei kannata tehdä liikaa. Kunnossapito on yleisesti ottaen teollisuuden eri aloilla merkittävä kustannustekijä. Wymanin [2] selvityksen mukaan junien kunnossapitoon kuluu noin 30 % elinkaaren aikaisista kokonaiskustannuksista. Samansuuruiseen kustannukseen on päätynyt Baumgartner [3, s. 10], jonka mukaan hankintahintaan suhteutettuna sähkömoottorijunan kunnossapidon osuus on noin 30 % elinkaaren kustannuksista. Näin ollen suhteellisesti pienetkin säästöt järjestelmätasolla tuottavat suuren rahallisen säästön, kun säästön aikaan saama toimenpide suoritetaan koko kalustolle. Data-analyysin avulla voidaan löytää säästökohteita huolto-ohjelmista, parantaa luotettavuutta ja selvittää eri komponenttien huolloista koituvien kustannuksen summia.

2.1 Kunnossapitolajit

Seuraavaksi käydään läpi työn kannalta tärkeimmät kunnossapitolajit, koska rakennettavan simulointimallin avulla testattavat strategiat edustavat eri kunnossapitolajeja.

2.1.1 Korjaus- ja määräaikaishuollot

Korjaushuollot kuuluvat korjaavan kunnossapidon (engl. corrective maintenance; CM) piiriin. Korjaushuollon tavoitteena on paikallistaa oireet aiheuttava vika ja korjata se. Mikäli vika ei ole kriittinen, viankorjausta voidaan lykätä, mutta ennemmin tai myöhemmin korjaushuolto on joka tapauksessa suoritettava. Käytännössä korjaushuoltoja tulee aina suoritettavaksi jossain määrin, sillä kaikkia vikoja ei voida täysin

ennakoida. Hyvä puoli vikaantumiseen asti käytössä on se, että komponenteista saadaan kaikki hyöty irti. Huonoja puolia ovat ennalta-arvaamattomat käyttökatkot ja vikakorjauksien epäsäännöllisten aikataulujen aiheuttavat henkilöstö- ja materiaali-resursoinnin haasteet. Lisäksi rikkoutuva komponentti voi hajotessaan vahingoittaa muita komponentteja, joiden elinikää olisi vielä ollut jäljellä.

Määräaikaishuollot kuuluvat ennaltaehkäisevän kunnossapidon (engl. preventive maintenance; PvM) kategoriaan. Määräaikaishuoltoja suorittamalla pyritään ennaltoimalla välttämään vikojen esiintyminen. Huoltoja voidaan ajoittaa esimerkiksi päivämäärän, käyttötuntien tai ajokilometrien mukaan. Määräaikaishuoltojen hyviä puolia ovat helppo huoltotyön aikataulutus ja varastonhallinta, kustannusten tasainen jakautuminen sekä yllättävien käyttökatojen väheneminen. Huoltokustannukset kuitenkin kasvavat korjaavaan kunnossapitoon verrattuna, koska harvoin määräaikaishuolto osuu juuri rikkoutumista edeltävään hetkeen. Näin ollen komponentin potentiaalisesta käyttöiästä jää hieman käyttämättä. Lisäksi osat eivät välttämättä kulu aina samalla tavalla, vaan valmistusvirheet tai käyttötapa voivat vaikuttaa komponentin kulumiseen. Kustannustehokkain huoltovälin pituus ei siten välttämättä ole vakio tai edes ennalta määritettävissä kulumisprosessin satunnaisuuden vuoksi.

2.1.2 Kuntoon perustuva kunnossapito

Kuntoon perustuva kunnossapito (engl. condition based maintenance; CBM) tähtää aikataulutettua huolto-ohjelmaa parempaan kustannustehokkuuteen ja luotettavuuteen. Kuntoon perustuvassa kunnossapidossa suoritetaan kunnonvalvontaa esimerkiksi sensorien tai mittauksen avulla ja sen perusteella pyritään havaitsemaan poikkeavuudet tai ennustamaan komponentin jäljellä oleva elinikä (engl. remaining useful life; RUL). Komponenttia ei vaihdeta laitetason mittarin kuten käyttötuntien mukaan, vaan vaihto tai korjaus perustuu kunkin komponentin havaittuun kuntoon. Näin toimimalla komponentteja ei vaihdeta liian aikaisin, mikä johtaa kustannussäästöihin ainakin komponenttien osalta. Toisaalta myös vikojen määrää saadaan vähennettyä, kun orastava vika havaitaan ja korjataan ennen kuin se ehtii aiheuttaa haittaa. [4]

Kuntoon perustuvaan kunnossapitoon liittyy myös haasteita. CBM:n hyödyntäminen kunnossapitokustannusten pienentämiseen vaatii, että komponentin kuntoa voidaan mitata kustannustehokkaasti. Kun otetaan huomioon tarvittavat investointikustannukset mittalaitteeseen, voi olla, ettei kuntoon perustuva kunnossapito olekaan kustannustehokkain vaihtoehto. Lisäksi mittalaitteiden ylläpidosta koituu myös kustannuksia. Käytännön haaste kuntoon perustuvan kunnossapidon soveltamisessa on se, että eri komponenttien tai laitteiden huoltojen ajoittumista toisiinsa nähden ei ole suunniteltu. Se saattaa aiheuttaa huoltojen keskittymistä tiettyyn ajankohtaan, jolloin huoltokapasiteetin tulee riittää yllättävän suman ilmetessä. Lisäksi varastonhallinta on hankalampaa ja mahdollisesti kalliimpaa, kun yllättäviin

kysyntäpiikkeihin tulee varautua esimerkiksi varaston arvoa kasvattamalla. [4]

Yhdysvaltojen puolustusministeriö on julkaissut lausuman [5], jossa tuodaan julki kuntoon perustuvan kunnossapidon potentiaalia ja määrätään CBM^+ käytettäväksi. CBM^+ -opaskirja [6] kuvaa prosessin, joka on käytännössä kuntoon perustuvan kunnossapidon ja luotettavuusanalyysin yhteensulautuma. Sillä sanotaan saavutettavan ”dramaattisia säästöjä ajassa ja rahassa mitattuna sekä käytettävyyden ja toimintakyvyn paraneminen” [6, s. 8]. Kuntoon perustuvaa kunnossapitoa on tutkittu myös tieteellisesti. Joissakin tilanteissa perinteiset kunnossapitolajit korjaava kunnossapito ja ennaltaehkäisevä kunnossapito toimivat riittävän hyvin, mutta mikäli viat tai huollot ovat kalliita, kuntoon perustuva kunnossapito on parempi vaihtoehto verrattuna perinteisiin kunnossapitolajeihin [4, s. 1500].

Komponenteista mitattavia kuntoa ilmaisevia suureita voivat olla muiden muassa värähtelyt, lämpötilat, paineet ja öljyn koostumus. Mittausdataa voidaan siirtää automaattisesti langattomasti anturilta tietojärjestelmään. Tapahtumadataa, kuten vikojen ilmenemiset ja tehdyt korjaukset, tulisi myös ottaa talteen. Tapahtumadata on tärkeää, sillä ilman sitä ei voida varmistua prosessin toimivuudesta. [4]

Eri datatyypeille käytetään erilaisia analysointimenetelmiä. Data voi olla joukko yksittäisiä mittauspisteitä, kuten lämpötila tai paine. Väriinät ovat aaltoluontoista dataa, joita voidaan tutkia aikasarja-analyysin keinoin tai taajuustasossa. Aaltoluontoisen datan lisäksi moniulotteinen data, kuten kuvadata, vaatii signaalin prosessointia, jotta raakadata saadaan jalostettua hyödylliseen muotoon. Yleisiä menetelmiä datan analysointiin ovat regressioanalyysit ja aikasarjamallit. Mikäli muuttujia on paljon, voidaan joutua turvautumaan PCA- tai ICA-menetelmiin, joiden avulla dimensioiden lukumäärää saadaan vähennettyä. Jos tapahtumadataa halutaan hyödyntää mittausdatan kanssa yhdessä, voidaan käyttää stokastisia malleja kuten Markovin piilomallia (engl. hidden Markov model). [4]

Huollon päätöksentekoa varten voidaan ottaa joko diagnostinen tai prognostinen lähestymistapa. Diagnostiikassa mittausdata-avaruus pyritään kuvaamaan vika-avaruuteen eli luokitellaan mittausdata joko normaaliksi tai epänormaaliksi. Toteuttamiseen voidaan käyttää esimerkiksi tilastollisia testejä, klusterointia tai Markov-ketjuja. Myös koneoppimisen menetelmiä kuten erilaisia neuroverkkoja ja geneettisiä algoritmeja voidaan hyödyntää. Diagnostiikkaa voidaan tehdä myös mallilähtöisesti rakentamalla malli tutkittavalle komponentille, ja mikäli mittausdata ei sovi normaalin toiminnan malliin, voidaan päätellä komponentin olevan vikaantunut. Prognostiikassa pyritään ennustamaan komponentin kestoa (RUL) ja sen jakaumaa tai vaihtoehtoisesti todennäköisyyttä, jolla komponentti kestää häiriöttä esimerkiksi seuraavaan huoltoon. Aikasarjamallit, koneoppimisen menetelmät sekä mallipohjainen ratkaisu ovat paljon käytettyjä työkaluja RUL-estimointiin. Mikäli tietty komponentti ei kulu vaihteittain loppuun vaan hajoaa yht’äkkiä täysin satunnaisesti, joudutaan nojaamaan diagnostiikan puoleen, jolloin hyödyt anturoinnista saattavat jäädä pienemmiksi. [4]

2.1.3 Opportunistinen kunnossapito

Opportunistisessa kunnossapidossa (engl. opportunistic maintenance; OM) yksittäisen huoltotoimenpiteen suorittamiseen vaikuttaa koko järjestelmän tila. Ajatuksena on, että huoltotoimenpiteet ryhmitellään siten, että kokonaiskustannukset minimoituvat. Esimerkiksi jos tuotanto on pysäytetty muusta syystä, voi olla kustannustehokasta suorittaa tiettyjä huoltoja etukäteen, ja näin vähentää tuotantoseisokkien kokonaismäärää. Toisaalta materiaalikustannukset kasvavat, jos komponentit vaihdetaan liian aikaisin. Opportunistinen kunnossapito voidaan nähdä korjaavan kunnossapidon ja ennaltaehkäisevän kunnossapidon yhdistelmänä, ja sitä kutsutaan joskus myös ”optimaaliseksi kunnossapidoksi”, koska painotus luotettavuuden ja huoltokustannusten välillä sisältyy kokonaiskustannusfunktioon, jota yritetään minimoida. [7]

Lähtökohtana opportunistisessa kunnossapidossa ovat yksittäisten komponenttien RUL-estimaatit. RUL-estimaatti voi olla yksittäinen lukuarvo, mutta komponenttien kulumisen epävarmuutta mallinnettaessa RUL-estimaatti on todennäköisyysjakama. Estimaatteja päivitetään mittausdatan perusteella ja seuraava huoltoajankohta määritetään ensin käyttöikänsä loppuun tulevan komponentin mukaan, kuten kuntoon perustuvan kunnossapidonkin tapauksessa. Joka kerta kun yksi tai useampi huoltotapahtuma tehdään, joudutaan maksamaan tietty kiinteä kustannus. [8]

Shi ja Zeng esittelevät opportunistisen kunnossapidon strategian [8], jossa tarkastellaan ennalta määrättyä sopivan pituista aikaikkunaa ensimmäisestä huoltoajankohdasta eteenpäin. Tämän ikkunan sisällä huoltoja voidaan aikaistaa tehtäväksi seuraavan huollon yhteydessä. Ajatuksena on, että ryhmittelyvaihtoehdoille lasketaan käyttöiän hukkaan menosta koitua kustannus ja huoltojen määrän vähenemisestä saatava hyöty. Kun kaikkien vaihtoehtojen kustannukset on laskettu, suoritettavaksi toimenpiteeksi valitaan kokonaiskustannuksilta edullisin ryhmittelyvaihtoehto. Huomionarvoista on, että ryhmittely on luonteeltaan dynaaminen, eli tulevaisuuden ryhmittelyt voivat muuttua ennen huoltotapahtumien toteutumista.

Opportunistisen kunnossapidon optimointiongelma on luonteeltaan monimutkainen ja kombinatorinen, sillä huollettavien osien lukumäärän ja mahdollisten huoltoajankohtien kombinaation muodostama joukko on suuri. Tästä syystä optimointiongelman ratkaisuun on käytettävä jotakin heuristiikkaan perustuvaa algoritmia kuten esimerkiksi simuloitua jäähtytystä tai geneettistä algoritmia [9]. Tällaisen algoritmin toteuttaminen ei ole yksioikoista ja taetta optimiratkaisun löytymisestä ei ole. Lisäksi opportunistisen kunnossapidon käytännön haasteena on RUL-estimaattien epävarmuus, joka vaikeuttaa todelliseen optimaaliseen ryhmittelyyn pääsemistä.

2.2 Sovellusesimerkkejä kirjallisuudesta

Tässä osassa käydään läpi sovellusesimerkkejä kirjallisuudesta liittyen jarrupalojen huoltamiseen ja opportunistiseen kunnossapitoon. Kirjallisuudessa opportunistista kunnossapitoa ei ole sovellettu jarrupalojen huoltamiseen, joten käsitellään jarrupalojen huoltamisen tutkimus ja opportunistisen kunnossapidon tutkimus omissa kappaleissaan.

2.2.1 Jarrupalojen kulumisen tutkimus

Bohoris ym. tutkivat junien jarrupalojen tarkastus- ja vaihtostrategioita regression keinoin [10]. Heidän tarkoituksenaan oli pidentää jarrupalojen elinikää vaihtopaksuutta alentamalla ja mahdollisesti harventaa tarkastusväliä. Artikkelissa esiteltiin kaksi ääripäätä huoltostrategialle. Yksittäisten jarrupalojen strategiassa jokainen jarrupala tarkastetaan tunnin välein ja vaihdetaan, mikäli pala on kulunut loppuun. Toisessa ääripäässä kaikki jarrupalat vaihdetaan vasta silloin, kun kuluneimman palan oletetaan kuluneen loppuun. Jälkimmäisessä strategiassa tarkastuksia ei tehdä lainkaan, ja näin ollen kustannukset siltä osin alenevat. Toisaalta jarrupalat kuluvat hieman eri tahtiin johtuen eroista jarrusylinterin tuottamassa paineessa, jarrulevyyn pinnanmuodoissa ja akselipainoissa.

Kokeessaan Bohoris ym. tutkivat 21 yksikköä, joista jokainen koostui yhdestä moottoridusta ja kahdesta moottoroimattomasta vaunusta. Moottoroitujen ja moottoroimattomien vaunujen välillä tiedettiin olevan eroa jarrupalojen kulumisnopeudessa, joten ne jaettiin omiin luokkiinsa. Havaintoaineistoon sovitettiin lineaarinen malli, jossa selitettävänä muuttujana oli jarrupalan paksuus ja selittävänä muuttujana ajomäärä edellisestä vaihtoa-jankohdasta. Mallin selitysaste oli 82,5 %.

Bohoris ym. havaitsivat eroja sisä- ja ulkokehän jarrupalojen kulumisnopeuksissa, mutta eivät huomioineet sitä lopullisessa vaihtostrategiassaan. Syy oli se, että jarrupalojen tulee olla samanpaksuiset kummallakin puolella jarrulevyä, jotta jarrujärjestelmä toimii ongelmitta. Kaikki jarrupalat samalla kertaa vaihtava strategia ei toiminut hyvin johtuen eroista jarrupalojen kulumisnopeuksissa, joten parhaaksi strategiaksi valikoitui käytössä ollut jarrupalat yksitellen tarkastava ja vaihtava strategia. Lopulta yksinkertaisuuden vuoksi tuotantoon viety vaihtostrategia yksinkertaistettiin yhteen lukuarvoon (vaihtopaksuus 6 mm) riippumatta vaunutyypistä. Yksinkertaisen ohjeistuksen nähtiin olevan tärkeämpi kuin vaunutyypikohtaisella ohjeistuksella saavutettava pieni kustannussäästö. Vaikka tarkastusvälin pituuden muuttamista pohdittiin ja kustannusvaikutuksia laskettiin, tarkastusväliä ei oltu vielä kirjoitushetkellä pidennetty.

Gailis ja Berjoza tutkivat jarrupalojen kulumista autoissa [11]. He toteavat, että jarrupalan kulumisen ennustamisella voidaan säästää huoltokustannuksissa ja välttää

yllättävä ajoneuvon rikkoutuminen. Analyysin mukaan jarrupalan kulumisnopeuteen vaikuttaa se, onko pala sisä- vai ulkokehällä ja etu- vai taka-akselilla. Sijainnin lisäksi myös ulkoiset tekijät kuten ajoneuvon malli, tien kunto ja ajotapa vaikuttavat kulumisnopeuteen. Huolto tulisi suorittaa, kun nopeimmin kulunut jarrupala on kulunut loppuun.

Kokeessaan Gailis ja Berjoza mittasivat kolmen eri automallin jarrupalojen kulumista. Palan paksuus mitattiin vaihdon lisäksi myös määräaikaishuoltojen ja jousituksen korjauksien yhteydessä. Mittaustarkkuus ei ollut kovin hyvä, sillä kuluneen palan pinta on hapettunut eikä se ole sileä. Tästä syystä mittaus suoritettiin neljästä eri pisteestä. Matkamittarin lukema kirjattiin ylös paksuuden mittauksen yhteydessä. Koska jarrutuksen määrää ei voitu mitata suoraan, käytettiin matkamittarin lukemaa kulumisen selittäjänä.

Gailis ja Berjoza käyttivät lineaarista regressiota kulumisen mallintamiseen. Regressio suoritettiin jokaiselle ajoneuvotyypille etu- ja taka-akselin jarrupaloille erikseen. Selittävänä muuttujana käytettiin ajokilometrejä viimeisestä vaihdosta alkaen, ja selitettävä muuttuja oli jarrupalan paksuus. Regression selitysaste R^2 vaihteli välillä 0,69 – 0,83. Datassa oli kirjoittajien mukaan liikaa varianssia, jotta lineaarisen regression mallia voitaisiin käyttää ennustamaan jarrupalojen kulumista.

2.2.2 Opportunistisen kunnossapidon tutkimus

Ding ja Tian tutkivat opportunistisen kunnossapidon mahdollisuutta tuulivoimapuistoille [12]. Heidän mukaansa tällä hetkellä tuuliturbiineille käytetään paljon korjaavan ja ennaltaehkäisevän kunnossapidon strategioita. Kuntoon perustuvaa kunnossapitoa tutkitaan, mutta tutkimuksissa keskitytään yksittäisiin komponentteihin. Ding ja Tiang testasivat simulaation avulla mallia, jolla koko tuulivoimapuiston kunnossapitokustannuksia pyritään optimoimaan opportunistisen kunnossapidon strategialla. Kustannuksia verrattiin korjaavan kunnossapidon strategian kustannuksiin.

Esimerkissään Ding ja Tian mallinsivat kymmenen tuuliturbiinin puistoa. Mallissa jokaisessa turbiinissa on neljä komponenttia: roottori, päälakeri, vaihteisto ja generaattori. Kullekin komponentille on korjauskustannus ja ennakoivan huollon kustannus. Lisäksi huollolle on kiinteä kustannus, joka koostuu muun muassa paikalle pääsyyn liittyvästä kustannuksesta. Komponentin kesto noudattaa Weibull-jakaumaa, jonka parametrit on määritetty komponenttikohtaisesti.

Simulaation avulla Ding ja Tian vertailivat kolmen opportunistisen kunnossapidon strategian kustannuksia korjaavan kunnossapidon strategian kustannuksiin. Komponentit voidaan huoltaa uutta vastaavaan kuntoon tai niille voidaan suorittaa kevyempiä huoltotoimenpiteitä. Vertailussa opportunistisen strategian kustannussäästö vaihtelee välillä 21,9 % – 35,4 % riippuen huoltosisällöstä.

Besnard ym. tutkivat myös opportunistista kunnossapitoa tuulivoimaloille [13]. Heidän opportunistisen kunnossapidon mallinsa huomioi huoltotarpeen lisäksi myös tuuliennusteen, sillä tyynellä säällä turbiinin pysäyttämistä koituu vähemmän tappioita. He mallinsivat huoltojen optimointiongelman lineaarisen kokonaislukuoptimointitehtävänä. Mallin laskenta on tarkoituksena suorittaa päivittäin, ja ulostulona saadaan päivän aikana suoritettavat huoltotoimenpiteet. Ennusteiden epävarmuuden takia optimointi suoritetaan useita kertoja eri tuuliennusteilla.

Esimerkissään Besnard ym. mallinsivat viittä turbiinia, joista jokaiselle tulee suorittaa kaksi erilaista huoltotoimenpidettä. Suunniteltujen huoltotoimenpiteiden lisäksi turbiineille simuloidaan kolme vikaa, joiden yhteydessä voidaan myös suorittaa ennaltaehkäiseviä huoltotoimenpiteitä opportunistisesti. Löytyneessä optimiratkaisussa ennaltaehkäisevät huoltotoimenpiteet suoritetaan vain vikakorjauksien yhteydessä tai päivinä, jolloin tuulee vähän. Opportunistinen strategia pienensi kustannuksia 43 % verrattuna tilanteeseen, jossa huoltoja ei suunniteltu optimointialgoritmin avulla, vaan turbiinit huollettiin peräkkäisinä päivinä satunnaisessa järjestyksessä.

3 Simulointi

Simuloinnilla tarkoitetaan todellisuuden jäljittelyä esimerkiksi tietokoneen avulla. Simulointia käytetään ongelmanratkaisutyökaluna, joka mahdollistaa tutkittavan systeemin muilla keinoin mahdollittoman analyysin. Simulointi käsitteenä pitää sisällään sekä systeemin mallintamisen että kokeiden tekemisen mallin avulla. Kokeita voidaan käyttää systeemin käyttäytymisen ymmärtämiseen ja systeemin ohjausstrategioiden hyvyden arviointiin. Tutkittavan systeemin ei välttämättä tarvitse olla olemassa, vaan voidaan mallintaa vasta suunnitteluvaiheessa olevaa systeemiä, mikä voi säästää resursseja. Toisaalta mikäli tutkitaan olemassa olevaa systeemiä, simulointituloksia voidaan verrata tosielämään. Simuloinnin konsepti on helppo ymmärtää, mikä mahdollistaa analyysin intuitiivisen ymmärtämisen. [14]

Operaatiotutkimuksessa simulointia käytetään esimerkiksi jonomallien analysointiin ja optimaalisen strategian valitsemiseen. Simulointia voidaan myös käyttää optimointiheuristiikkana, jolloin ei puhuta simulointimallista [15]. Tässä työssä keskitytään strategioiden paremmuuden vertaamiseen simulaatiomallin avulla. Dynaaminen eli muutosta ajassa kuvaava simulointimalli voi olla joko jatkuva- tai diskreettiaikainen. Jatkuva-aikaisessa mallissa systeemillä on tila jokaisella reaaliarvoisella ajanhetkellä, kun taas diskreettiaikaisessa mallissa aika-avaruus mallinnetaan numeroituvana joukkona. Toinen luokitteluperuste simulointimalleille on deterministisyys tai stokastisuus. Deterministiset mallit käyttäytyvät aina samalla tavalla eli niissä ei ole satunnaisuutta mukana. Monet mallinnettavat systeemit sisältävät vaihteluita, joita ei voida selittää mallinnettavan tilan avulla. Tällöin malliin lisätään satunnaismuuttujia ja siitä tulee stokastinen. [16]

Simulointimallin rakentamisprosessista on monia eri kehyksiä, mutta pääpiirteittäin ajatus on kuitenkin sama – iteratiivinen prosessi, jossa mallinnettava systeemi, konseptuaalinen malli, simulointikoodi ja tulokset on takaisinkytketty silmukaksi. Esimerkiksi Lawn ja McComas esittävät vaiheittaisen menetelmän simulointimallin rakentamiseen [17]:

1. Muotoile ongelma
2. Kerää tarvittavat esitiedot ja luo dokumentti tehdyistä oletuksista
3. Varmista, että oletukset ovat oikeat
4. Ohjelmoi malli
5. Varmista ohjelmoidun mallin oikeellisuus (verifointi)
6. Suunnittele ja tee kokeita, analysoi tuloksia (validointi)
7. Dokumentoi ja esitä tulokset

Tässä työssä käytetään diskreettiaikaista tapahtumasimulointia (engl. discrete event simulation). Siinä systeemin tila esitetään vain niissä pisteissä, joissa systeemin tila muuttuu. Tasavälisestä diskretoinnista poiketen tapahtumasimulaatiossa tapahtumien esiintymistiheys voi vaihdella esimerkiksi stokastisesti tai systeemin tilaan perustuen. Perusajatus on, että simulaatio pitää muistissa jonon tulevista tapahtumista, ja joka askeleella edetään seuraavaan aikaisimpaan tapahtumahetkeen. Samaan aikaan tapahtuvien tapahtumien tapauksessa tapahtumien prioriteetti määrää niiden käsittelyjärjestyksen. Simulaatiota ajetaan, kunnes valittu suure saavuttaa halutun arvon, esimerkiksi tietty ajanhetki saavutetaan tai tietty määrä tapahtumia on prosessoitu. [18]

Stokastisessa simulaatiossa tärkeä seikka on satunnaisuuslähteiden todennäköisyysjakauman oikea muoto. Yksi yleinen virhe on jakauman korvaaminen odotusarvolla. Esimerkiksi tarkkana tulee olla jonotusta simuloitaessa, sillä läpimenoajan keskiarvon mukaan jonoja ei välttämättä muodostu lainkaan, mutta oikeaa jakaumaa käytettäessä jono muodostuu kuten todellisuudessakin. Toinen usein toistuva virhe on väärän todennäköisyysjakauman käyttäminen. Esimerkiksi jonotusta mallintaessa normaali-jakaumaa ei tule käyttää läpimenoajoille, koska prosessi noudattaa todellisuudessa usein eksponenttijakaumaa. [19]

Mikäli dataa systeemin käyttäytymisestä on olemassa, voidaan soveltaa kahta eri tapaa todennäköisyysjakauman määrittämiseksi. Suositeltava vaihtoehto on arvioida histogrammin perusteella mikä voisi olla sopiva jakauma, ja sovittaa teoreettinen todennäköisyysjakauma aineistoon suurimman uskottavuuden estimointimenetelmällä, ja käyttää saatua jakaumaa, mikäli sovitus on hyvä. Ongelmaksi muodostuvat tilanteet, joissa data ei noudata mitään teoreettista todennäköisyysjakaumaa. Usein tämä johtuu siitä, että data on useiden satunnaismuuttujien summa tai pyöristetty. Toinen vaihtoehto on rakentaa todennäköisyysjakauma esimerkiksi paloittain lineaarista funktiota käyttäen, joka sopii empiirisesti havaittuun dataan. Monimutkaiselle funktiolle tarvitaan paljon parametreja, jolloin malli monimutkaistuu. Toisaalta yksinkertaisella jakaumalla saatetaan rajautua liian suppeaan tarkasteluun, kun kaikista mahdollisista satunnaismuuttujan arvoista ei ole dataa. Niiden parametrien osalta, joille dataa ei ole olemassa, joudutaan turvautumaan asiantuntija-arvioihin. [16]

Simulaation tulosten tarkastelussa tulee stokastisen simulaation tapauksessa ottaa huomioon se, että tuloksetkin ovat stokastisia. Jokaiselle ajanhetkelle ulostulo noudattaa jotakin tuntematonta jakaumaa. Mikäli voidaan katsoa jakauman pysyvän vakiona tietystä hetkestä lähtien, voidaan sanoa systeemin saavuttaneen tasapainotilan. Simulaatioajon alussa esiintyy useimmiten transientti, koska simulaation alkutila on harvoin tasapainotila. Transientin aikaisia ulostuloja ei tule sisällyttää tuloksiin tasapainotilan määrittämisessä. Joskus transientti voi olla kiinnostuksen kohde, jolloin sitä analysoidaan erikseen. Aina simulaatio ei saavuta tasapainotilaa, vaan ulostuloon voi jäädä esimerkiksi kausivaihtelua, joka saattaa olla kiinnostuksen kohde. Tarpeeksi pitkän ajoajan lisäksi on tärkeää myös ajaa simulaatio useamman kerran

eri satunnaisluvuilla. Ajokertojen välillä tulokset ovat tällöin riippumattomia [16, s. 489]. Ajon pituuden ja toistojen lukumäärän määrittämiseen voi käyttää muiden muassa graafista menetelmää tai tilastollisia testejä.

Stokastisuuden lisäksi tulosten oikeellisuuden varmistamiseen liittyvät käsitteet verifiointi ja validointi. Verifioinnissa tarkastetaan simulointimallin ohjelmakoodi ja varmistetaan siitä, että ohjelmoitu malli vastaa käsitemallia. Verifiointia voidaan tehdä ohjelmistoprojekteissa käytetyillä laadunvarmistamisen elementeillä, joita ovat esimerkiksi suunnitelmallisuus, versionhallinnan käyttö, staattinen analyysi, regressio-testaus ja dokumentointi [20]. Validointi sen sijaan liittyy simulointimallin tuloksiin. Tuloksia validoidessa tulisi ensin tarkastella kaikkien mahdollisten ulostulojen kelvollisuutta jossakin tietyssä tavallisessa tilanteessa. Sen jälkeen mallia testataan mahdollisimman laajalla joukolla parametreja ja yritetään löytää pääpiirteittäisiä vaikutuksia ulostuloihin. Mikäli simulaatio vastaa olemassa olevaa systeemiä tietyillä parametreilla, voidaan systeemistä tehtyjä havaintoja ja simulaatiomallin ulostuloja verrata toisiinsa. Vertailua voidaan tehdä esimerkiksi tilastollisten tunnuslukujen tai histogrammien avulla. Animaatiot voivat olla tehokas tapa havainnollistaa mallin toimintaa [16, s. 268]. Niiden avulla voidaan sekä löytää selkeitä virheitä että vakuuttaa päätöksentekijä simulaation validiteetista.

Sekä verifioinnin että validoinnin tavoitteina on kitkeä mahdolliset virheet pois ja parantaa ennustustarkkuutta, mutta myös vahvistaa mallin uskottavuutta päätöksentekijöiden silmissä. Mallia ei voi koskaan verifioida ja validoida täydellisesti, vaan riittävyttä pitää arvioida tapauskohtaisesti suhteessa mallille asetettuihin vaatimuksiin [21].

4 Tutkimusaineiston käsittelyn menetelmät

Tässä luvussa esitellään menetelmiä, joita käytetään jarrupalojen mittausaineiston analysointiin ja subjektiivisten kustannusarvioiden arviointiin. Ensin käydään läpi jarrupalan paksuutta kuvaavan aikasarjan analysointiin käytettäviä menetelmiä. Seuraavaksi kuvataan menetelmät, joilla yksittäisistä aikasarjoista tehdyt havainnot yleistetään satunnaisuutta sisältäväksi malliksi.

4.1 Kohinaisen mittausdatan analysointi

Kohina ja mittausvirheet vaikeuttavat mittausaineiston hyödyntämistä. Tässä osiossa käydään läpi algoritmi, jolla voidaan havaita merkittävä muutos datassa. Lisäksi käydään läpi Kalman-suotimen toiminta, jolla estimoidaan systeemin tila kohinaa sisältävästä mittausaineistosta.

4.1.1 Merkittävän muutoksen havaitseminen

Cannyn mukaan hyvä menetelmä merkittävän muutoksen havaitsemiseen on derivaatan ääriarvojen etsiminen Gaussin suotimella prosessoidulle aikasarjalle [22]. Suodatus poistaa korkeataajuisen kohinan, jonka jälkeen itseisarvoltaan suuri derivaatan arvo kuvaa merkittävää muutosta. Normaalijakauma on jatkuva, mutta suodatusta varten se voidaan diskretoida suodatusikkunaksi valitulle välille origon ympärillä.

Olkoon käsiteltävänä N havainnon aikasarja $y(k)$, missä $k \in \{1, \dots, N\}$. Ensin $y(k)$ suodatetaan diskreetin konvoluution avulla

$$f(k) = (y * G)(k) = \sum_{n=-w}^w y(k-n) G(n),$$

missä $x \in \{1+w, \dots, N-w\}$, w on suodatusikkunan koko suuntaansa ja $G(k) = c g(k)$ on Gaussin ydin

$$g(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2},$$

normalisoituna siten, että

$$\begin{aligned} \sum_{n=-w}^w G(n) &= 1 \\ \sum_{n=-w}^w c g(n) &= 1 \\ c &= \frac{1}{\sum_{n=-w}^w g(n)}. \end{aligned}$$

Suodatetulle datalle $f(x)$ lasketaan numeerinen derivaatta eli differenssi

$$d_f(x) = f(x) - f(x - 1),$$

missä $x \in \{w, \dots, N - w\}$.

Numeeriselle derivaatalle $d_f(x)$ etsitään tietyn rajan h ylittäviä lokaaleja maksimeja, joille pätee

$$d_f(x) > h \quad \wedge \quad d_f(x - 1) < d_f(x) \quad \wedge \quad d_f(x + 1) < d_f(x),$$

missä $x \in \{w + 1, \dots, N - w - 1\}$.

Haasteena suorassa muutosten havaitsemisessa (engl. online change detection) on havaitsemisen viive [23]. Yleensä tieto muutoksesta halutaan mahdollisimman pian. Suodatusikkunan pituus w määrittää tarvittavan puskurin pituuden. Pienemmillä ikkunoilla viive pienenee, mutta lokaali käyttäytyminen esimerkiksi kohinan takia saattaa aiheuttaa virheellisiä havaintoja. Eräs ratkaisu havainnointinopeuden parantamiseen voisi olla usean ikkunan pituuden käyttäminen, jolloin voidaan määrittää tilastollinen muuttuja kuvaamaan muutoksen tapahtumisen todennäköisyyttä. Näin voidaan saada epävarma tieto muutoksen tapahtumisesta lyhyellä viiveellä, ja estimaatin varmuus paranee ajan kuluessa pidempienkin ikkunoiden saavuttaessa kyseisen pisteen.

4.1.2 Estimointi Kalman-suotimen avulla

Kalman-suodin on tilaestimaattori, joka pääsee yksittäistä mittauspistettä tarkempaan estimaattiin käyttämällä systeemin dynamiikan mallia, tunnettuja ohjauksia ja useita peräkkäisiä mittauksia yhdessä [24]. Jokaisella päivitysaskeleella uusi estimaatti muodostuu ennustetun tilan ja mittauksen painotettuna keskiarvona. Myös painokertoimet päivitetään jokaisella askeleella eli estimaatin kovarianssi muuttuu. Parametrien avulla voidaan määrittää oletettu mittauskohina ja prosessikohina. Algoritmi on rekursiivinen eli koko historiaa ei tarvita, vaan viimeinen tila sisältää kaiken informaation.

Merkitään systeemin tilaa hetkellä k vektorilla \mathbf{x}_k . Tilansiirtomatriisi \mathbf{F}_k kuvaa systeemin käyttäytymistä hetkellä k . Tilayhtälö

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k,$$

kuvaa systeemin uuden tilan edelliseen tilaan perustuen, missä \mathbf{w}_k on virhetermi.

Kalman-suodin ennustaa edellisen askeleen $k - 1$ tilan perusteella seuraavan askeleen k tilan $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ ja kovarianssin $\mathbf{P}_{k|k-1}$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} &= \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \\ \mathbf{P}_{k|k-1} &= \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k, \end{aligned}$$

missä \mathbf{Q}_k on prosessikohinan kovarianssi. Merkinällä $k | k - 1$ tarkoitetaan sitä, että estimaatti on muodostettu edellisen vaiheen informaation perusteella eli hetkellä k mitattua arvoa ei ole käytetty estimaatin muodostamisessa.

Havainnot mallinnetaan Kalman-suotimessa yhtälöllä

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k,$$

missä \mathbf{z}_k on mitattu tila hetkellä k , \mathbf{H}_k on havainnoinnin malli ja $\mathbf{v}_k \sim N(0, \mathbf{R}_k)$ on mittaukseen liittyvä virhe.

Tilaestimaattorin päivitysyhtälöt ovat

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{y}}_k &= \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \\ \mathbf{S}_k &= \mathbf{R}_k + \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T \\ \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{S}_k^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k} &= \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \tilde{\mathbf{y}}_k \\ \mathbf{P}_{k|k} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1},\end{aligned}$$

missä $\tilde{\mathbf{y}}_k$ on mittauksen residuaali ennen vaiheen k sovitusta, \mathbf{S}_k on kovarianssi ennen vaiheen k sovitusta, \mathbf{K}_k on optimaalinen Kalman-vahvistus, $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ on päivitetty tilaestimaatti ja $\mathbf{P}_{k|k}$ on päivitetty kovarianssi.

Mittausdatassa esiintyvät suuren poikkeaman virhemittaukset aiheuttavat merkittävän virheen suotimen estimoinnassa tilassa. Virhemittausten suodattamiseksi voidaan käyttää robustia Kalman-suodinta (engl. robust Kalman filter) [25], jossa perinteiseen Kalman-suotimen toteutukseen lisätään Mahalanobis'n etäisyyteen pohjautuva testisuure

$$\gamma_k = \tilde{\mathbf{y}}_k^T \mathbf{P}_{k|k-1} \tilde{\mathbf{y}}_k.$$

Testisuureen γ_k ylittäessä asetetun rajan χ_α todetaan, että havainto on liian epätodennäköinen vallitsevassa tilassa, ja kovarianssin $\mathbf{P}_{k|k-1}$ arvoa skaalataan ylöspäin ylityksen suhteellisella suuruudella $\frac{\gamma_k}{\chi_\alpha}$. Mittauspisteen painokerrointa siis pienennetään, mikäli todennäköisyys saada kyseinen mittaus vallitsevassa tilassa on hyvin alhainen. Hyvin suuret erot ennusteeseen nähden tulkitaan siis enemmänkin mittausvirheeksi kuin todisteeksi suuresta muutoksesta, mikä parantaa mallin robustisuutta. Suurten poikkeamien painoarvon madaltamiseen liittyy riski, että malli ja todellisuus erkanevat, jos monta peräkkäistä mittauspistettä tulkitaan virheellisiksi. Mikäli tietty määrä peräkkäisiä mittauspisteitä ei toteuta oletettua kohinan jakaumaa, mallin käyttäjää voidaan informoida poikkeamasta ja alustaa estimaattorin tila uudelleen.

4.2 Satunnaisuuden mallintaminen matemaattisesti

Tässä työssä satunnaisuutta käytetään simulaation syötteenä. Tavoitteena on löytää kuvaus, joka selittää satunnaismuuttujan mahdollisia arvoja ja niiden esiintymis-

tiheyksiä, jotta simulaatiossa voidaan matkia todellisen systeemin käyttäytymistä. Lisäksi satunnaisuuden tavoitteena on generoida havaitsemattomia, mutta mahdollisia syötteitä. Seuraavaksi esitellään työssä käytettyjä satunnaisuuteen liittyviä käsitteitä ja menetelmiä.

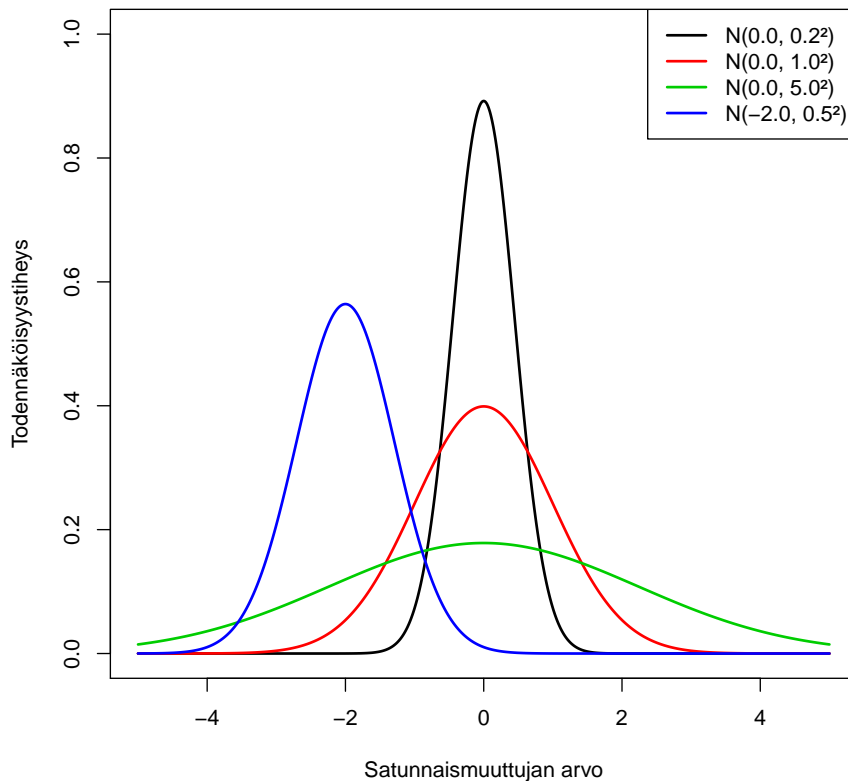
4.2.1 Todennäköisyysjakaumat

Todennäköisyysjakauma kuvaa sitä, miten satunnaisilmiön tulosvaihtoehtoihin liittyvä todennäköisyysmassa jakautuu tulosvaihtoehtoihin liittyvän satunnaismuuttujan arvoalueelle [26, s. 3]. Todennäköisyysjakauma voi olla joko diskreetti tai jatkuva. Diskreetissä jakaumassa satunnaismuuttuja voi saada äärellisen määrän arvoja, ja arvojen summa on 1. Jatkuva todennäköisyysjakauma määritellään tiheysfunktion avulla, jonka integraali lukuvälin yli kuvaa satunnaismuuttujan todennäköisyyttä osua kyseiselle lukuvälille. Tiheysfunktio on normalisoitu siten, että integraali koko avaruuden yli on 1. Tässä työssä käytettävät satunnaismuuttujat ovat jatkuvia, joten diskreettejä jakaumia ei käsitellä enempää.

Normaalijakauma on usein käytetty jakauma, koska se kuvaa hyvin monia tosielämän ilmiöitä, kuten miesten tai naisten pituuksia populaatiossa [27]. Toinen syy normaalijakauman suosioon on se, että suurilla toistomäärillä monia diskreettejä jakaumia voidaan approksimoida normaalijakaumalla. Tämä johtuu siitä, että riippumattomien satunnaismuuttujien summa noudattaa Lindebergin ehdon täytyessä normaalijakaumaa yksittäisten satunnaismuuttujien jakaumista riippumatta, kun satunnaismuuttujia on suuri määrä [28, s. 496–497],[29]. Normaalijakauma on symmetrinen jakauma, jonka parametrit ovat odotusarvo μ ja varianssi σ^2 . Esimerkkejä normaalijakauman tiheysfunktion kuvaajista on esitetty kuvassa 1.

Monissa tapauksissa jakautuminen ei ole symmetristä, vaan jakaumalla on nk. häntä joko vasemmalle tai oikealle. Gamma-jakauma yksi esimerkki tällaisesta vinosta jakaumasta, jota on esimerkiksi käytetty yhteiskunnallisessa kontekstissa tulojen jakautumiseen mallintamiseen populaatiossa [30]. Tuloilla ei periaatteessa ole ylärajaa, mutta alaraja on nolla. Lisäksi keskitulo on esimerkiksi yleensä korkeampi kuin mediaanitulo, eli suurin osa populaatiosta tienaa keskiarvoa vähemmän. Gamma-jakaumaa on myös käytetty muiden muassa huoltoon kuluvan ajan mallintamisessa [31]. Gamma-jakauman tiheysfunktioesimerkkejä on piirretty kuvaan 2.

Gamma-jakauma saa positiivisia arvoja koko positiivisella reaaliakselilla. Joissakin tosielämän tapauksissa ei kuitenkaan ole realistista, että satunnaismuuttujan arvo voi olla mielivaltaisen lähellä nollaa. Esimerkiksi palveluaika pankissa ei voi olla mielivaltaisen pieni. Gamma-jakaumaa voidaan siirtää oikealle, minkä myötä asetetun alarajan alittavien arvojen todennäköisyys on nolla. Tällöin puhutaan kolmen parametrin gamma-jakaumasta [16, s. 365]. Yhtä lailla ongelmaksi voi muodostua äärimmäisen epätodennäköiset, mutta todella suuret satunnaismuuttujan arvot. Siinä

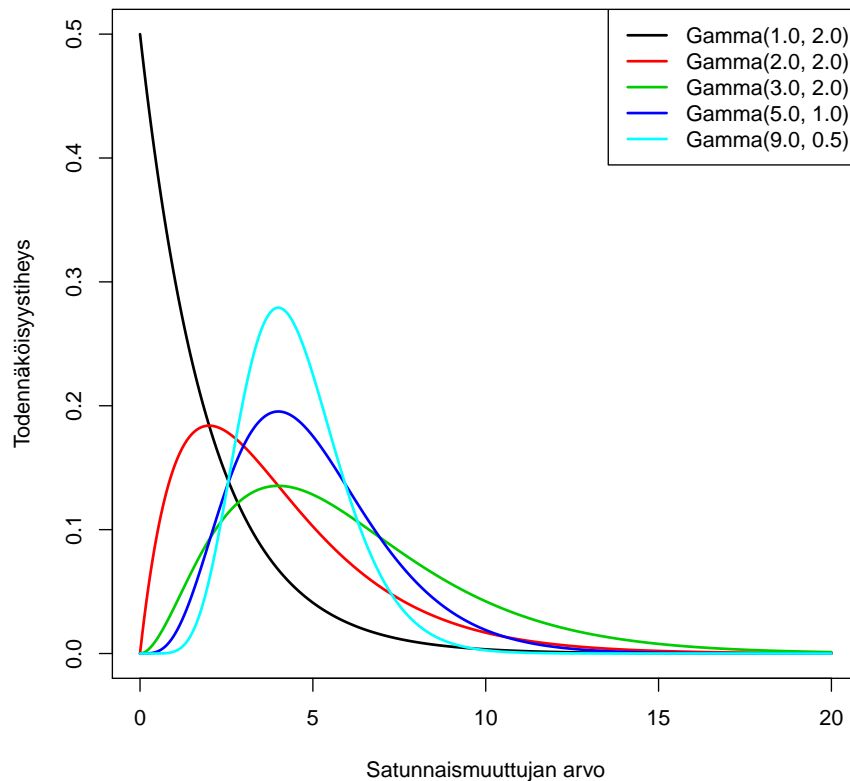


Kuva 1: Normaalijakauman tiheysfunktion kuvaajia eri parametrien arvoilla.

tapauksessa jakauma voidaan katkaista halutun maksimiaron kohdalta asettamalla rajaa suurempien havaintojen todennäköisyydeksi nolla. Katkaistun jakauman tiheysfunktio skaalataan uudelleen siten, että integraali minimiarvon ja maksimiaron välillä summautuu lukuun 1.

4.2.2 Todennäköisyysjakaumien käyttöön liittyviä huomioita

Riippumattomuus ja identtisesti jakautuneisuus (engl. independent and identically distributed) on oletus monien tilastollisten menetelmien käyttämiseksi. Satunnaismuuttujien joukko on identtisesti jakautunut, kun kaikkien muuttujien oletetaan noudattavan samaa todennäköisyysjakaumaa. Riippumattomuus tarkoittaa sitä, että yhden havainnon arvo ei riipu toisen havainnon arvosta. Kysymys riippumattomuudesta tulee usein esiin, kun tarkoituksena on kohdella havaintojen aikasarjaa satunnaismuuttujien jonona. Tällöin riippumattomuutta voidaan tarkastella korrelaation avulla graafisesti laskemalla havaintojen aikasarjalle X_1, X_2, \dots, X_n otosautokorrelaatio konvoluutiona viiveille $1, 2, \dots, n - 1$ ja esittämällä korrelaatiot



Kuva 2: Gamma-jakauman tiheysfunktion kuvaajia eri parametrien arvoilla.

viiveiden funktiona kuvaajana. Huomionarvoista on, että korrelaatio on lineaarisen riippuvuuden mittari, joten korreloimattomuus ei takaa riippumattomuutta, mutta käytännössä edellä kuvattu menetelmä riippumattomuuden toteamiseen on paljon käytetty. [32]

Kun mittaustuloksia kerätään useasta lähteestä, ennen mittaustulosten yhdistämistä tulee varmistua siitä, että eri lähteiden satunnaismuuttujat noudattavat samaa jakaumaa eli ovat homogeenisia [16, s. 385]. Esimerkiksi kahtena eri päivänä tai vuodenaikana kerätyt havainnot eivät välttämättä noudata samaa jakaumaa. Myös samanaikaisesti kahdesta samanlaisesta komponentista kerätyt aineistot eivät välttämättä ole homogeenisia, jos komponentteihin kohdistuu erilaisia rasituksia. Aineistojen homogeenisuutta voidaan tutkia varianssianalyysin (engl. analysis of variances) avulla, jolla testataan tilastollisesti aineiston ryhmien odotusarvojen yhtäsuuruutta [33, s. 437].

Mikäli satunnaismuuttujien tiedetään noudattavan tiettyä prosessia, joka tuottaa tietyn jakauman, jakaumaa ei tarvitse valita, vaan se tunnetaan ennalta. Esimerkiksi radioaktiivisen hajoamisen tiedetään noudattavan eksponenttijakaumaa. Tun-

temattomalle aineistolle jakauman valinnasta ei ole yhtä ainoaa hyvin määriteltyä valintakriteeriä, vaan usein edetään yrityksen ja erehdyksen kautta. Eri todennäköisyysjakaumien sopimista havaittuun aineistoon voidaan tarkastella piirtämällä havaintoaineistosta histogrammi ja vertaamalla sen muotoa eri todennäköisyysjakaumien tiheysfunktioiden muotoon. Histogrammin jakotiheys voi myös vaikuttaa päätelmään, joten on suotavaa tarkastella useampaa eri jakotiheyttä.

4.2.3 Parametrien estimointi

Todennäköisyysjakauman parametrien estimointiin voidaan käyttää suurimman uskottavuuden estimaattoria (engl. maximum likelihood estimator; MLE), jota voidaan pitää standardimenetelmänä tilastotieteessä [34]. MLE-estimaatti on *tyhjentävä, tarkentuva, tehokas* ja *parametri-invariantti*. Tyhjentävyys tarkoittaa sitä, että kaikki parametrin sisältämä informaatio sisältyy MLE-estimaattiin. Tarkentuva estimaatti lähestyy asympotoottisesti parametrin todellista arvoa, ja tehokkaan estimaatin varianssi on pienin mahdollinen. Monet tilastotieteen työkalut pohjautuvat MLE-estimaattiin, kuten χ^2 -testi ja Bayesin menetelmät.

Suurimman uskottavuuden menetelmä maksimoi uskottavuusfunktion

$$L(w | y) = f(y | w),$$

missä $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ on havaittu aineisto, f on oletetun jakauman tiheysfunktio ja w on jakauman parametrit. Kun havainnot oletetaan riippumattomiksi, voidaan yhtälö kirjoittaa auki muotoon

$$L(w | y) = f(y_1 | w)f(y_2 | w) \dots f(y_n | w).$$

Laskennan helpottamiseksi voidaan maksimoida funktion L logaritmia, jos oletetaan, että $\log L$ on derivoituva. Koska logaritmfunktio on monotoninen, ääriarvo-ongelman ratkaisu ei muutu. Välttämätön ehto optimissa parametreille w_i on

$$\frac{\partial \log L}{\partial w_i} = 0 \quad \forall i. \quad (1)$$

Lisäksi tulee varmistua, että ääriarvo on maksimi eikä minimi. Se onnistuu Hessen matriisiin

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L}{\partial w_1^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial w_1 \partial w_2} & \cdots & \frac{\partial^2 L}{\partial w_1 \partial w_n} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial w_2 \partial w_1} & \frac{\partial^2 L}{\partial w_2^2} & \cdots & \frac{\partial^2 L}{\partial w_2 \partial w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 L}{\partial w_n \partial w_1} & \frac{\partial^2 L}{\partial w_n \partial w_2} & \cdots & \frac{\partial^2 L}{\partial w_n^2} \end{bmatrix}$$

avulla, mikäli \mathbf{H} on kääntyvä. Pisteen \mathbf{w}^* tiedetään olevan maksimi, mikäli Hessian matriisi pisteessä \mathbf{w}^* on positiivisesti definiitti. [35, s. 861]

Yleensä osittaisdifferentiaaliyhtälöä (1) ei ratkaista analyttisesti, vaan maksimin etsimiseen käytetään epälineaarisen optimoinnin numeerisia menetelmiä. Optimointialgoritmi ei välttämättä löydä globaalia maksimia, vaan se saattaa pysähtyä lokaaliin maksimiin. Optimointimenetelmiä ei käsitellä tässä työssä enempää, vaan jakauman parametrien estimointiin käytettiin valmiina ratkaisuna R-ohjelmiston *fitdistrplus*-pakettia [36].

4.2.4 Sovituksen testaus

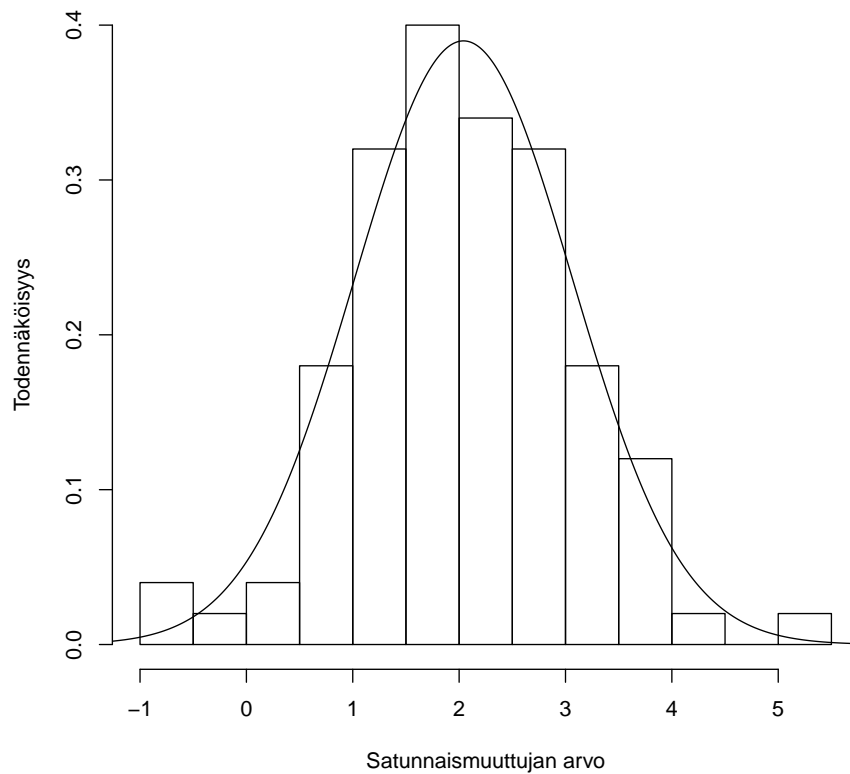
Ennen jakauman ja parametrien lopullista hyväksymistä tulee tarkistaa, että sovitettu jakauma sopii aineistoon riittävän tarkasti. Graafisesti tarkastelu onnistuu piirtämällä empiirisen jakauman histogrammi ja sovitetun jakauman tiheysfunktion kuvaaja samaan kuvaan. Histogrammin jakoväli vaikuttaa sovitukseen, joten on suotavaa tarkastella miltä sovitus näyttää useammalla eri jakovälin arvolla. Kuvassa 3 on esitetty histogrammi, joka on piirretty generoimalla 100 satunnaislukua normaalijakaumasta $N(2, 1)$. Otoksen pohjalta on tehty suurimman uskottavuuden estimointi normaalijakauman parametreille $\mu \approx 2,04$, $\sigma \approx 1,02$, ja estimoidun normaalijakauman tiheysfunktion kuvaaja on piirretty histogrammin päälle.

Toinen graafinen työkalu sovituksen testaamiseen on kvantiilikuvaaja. Kvantiileilla tarkoitetaan tasavälein k/q , $k \in \{1, \dots, q\}$ poimittuja satunnaismuuttujien arvoja X_k , joille $P(x < X_k) = k/q$. Kvantiilikuvaajassa kahden vertailtavan jakauman kvantiilit piirretään xy -tasoon. Mikäli pistejoukko mukaillee suoraa $y = x$, sovitus on hyvä. Selkeät epälineaarisuudet kielivät jakaumaoletuksen tai estimoitujen parametrien virheellisyydestä. Kuvaan 4 on piirretty kvantiilikuvaaja samalle $N(2, 1)$ aineistolle ja sovitukselle. Pisteet seuraavat hyvin tarkasti suoraa $y = x$, eikä epälineaarisuutta ole havaittavissa.

Yhteensopivuuden testaamiseen voidaan käyttää graafisten menetelmien lisäksi myös tilastollista testausta. Esimerkiksi χ^2 -testillä voidaan testata yhteensopivuutta havaintojen ja jakaumaoletuksen välillä [37]. Testiä varten havainnot jaetaan m luokkaan kuten histogrammiakin piirrettäessä. Nollahypoteesi yhteensopivuustestissä on, että luokkien $k \in \{1, \dots, m\}$ havaitut frekvenssit O_k ja oletetut frekvenssit E_k muistuttavat toisiaan. Testisuuren arvo saadaan yhtälöstä

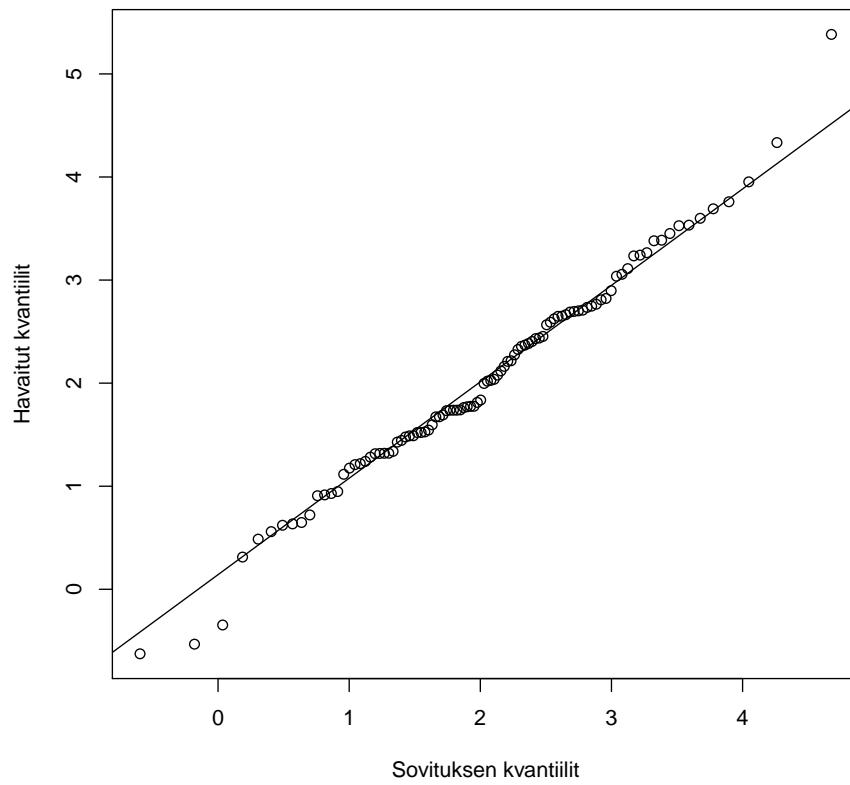
$$\chi^2 = \sum_{k=1}^m \frac{(O_k - E_k)^2}{E_k}. \quad (2)$$

Mikäli nollahypoteesi pätee, testisuuren arvo yhtälöstä (2) noudattaa suurella otoksella approksimatiivisesti χ^2 -jakaumaa vapausastein $m - 1 - p$, missä p on oletetun jakauman parametrien lukumäärä. Kun testattavana aineistona käytetään



Kuva 3: Histogrammi otokselle ja sovitetun normaalijakauman tiheysfunktio.

kuvassa 3 esitettyä aineistoa, luokkia on $m = 13$, ja normaalijakaumassa parametreja on $p = 2$. χ^2 -testisuureen arvoksi tulee 13,29 yhtälöstä (2). Todennäköisyys havaita vähintään testisuureen X suuruinen arvo eli testin p-arvo saadaan laskettua χ^2 -jakauman kertymäfunktioista F lausekkeella $1 - F(X)$. Laskettu testisuureen arvo 13,29 vastaa p-arvoa 0,21, kun vapausasteita on $13 - 1 - 2 = 10$. Mikäli p-arvo on merkitsevyystasoa suurempi, jää nollahypoteesi voimaan. Tilastollisesti merkitsevänä rajana pidetään merkitsevyystasoa 0,01 [38], joten testin valossa jakauma sopii aineistoon on hyvin.



Kuva 4: Kvantiilikuvaaja.

5 Malli jarrupalahuollon strategioiden vertailuun

Tutkimusaineistona tässä työssä käytetään Pendolino- eli Sm3-junien jarrupalojen automaattimittauksen tuottamaa mittausdataa ja junien päivittäin kulkemaa matkaa kilometreissä vuodesta 2014 lähtien. Jarrupalahuoltoon liittyvät kustannukset on arvioitu VR:n asiantuntijoiden toimesta. Jarrupalojen kulumiskäyttämiseen liittyvät jakaumat estimoidaan mittausdatasta tilaestimaattorin avulla, ja erilaisten huoltostrategioiden kustannuksia tutkitaan simuloinnin keinoin.

5.1 Sm3-junan jarrujärjestelmä

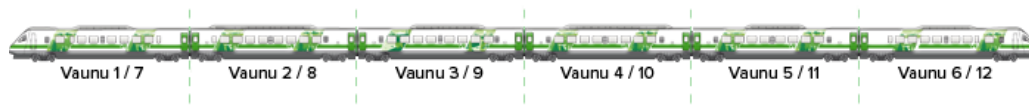
Pendolinossa on kuusi vaunua kuvan 5 mukaisesti. Junia on liikennekäytössä yhteensä 17 kappaletta. Vaunuja ei irroteta toisistaan, mutta kaksi junaa on mahdollista kytkeä yhteen muodostaen yhden 12 vaunun junan. Juna voi jarruttaa paineilmajarrun, sähköjarrun ja kiskoajarrun avulla. Lisäksi junassa on paikallaan pysymistä varten käsijarru, joka toimii osana paineilmajarrujärjestelmää. Tässä työssä keskitytään paineilmajarrun jarrupaloihin. Kiskoajarrua käytetään vain hätäjarrutukseen, ja sähköjarrussa ei ole kuluvia kitkaosia, sillä jarrutus tehdään käyttämällä ajomoottoria generaattorina.

Junan läpi kulkee jarruväylä, jonka painetta säätämällä kuljettaja määrittää jarrutusvoiman suuruuden. Jokaisessa vaunussa on oma jarruyksikkö, joka kontrolloi kyseisen vaunun jarrusylintereitä telikohtaisesti. Vaunussa on kaksi teliä, joissa kummassakin kaksi akselia. Moottoritonta akselia kutsutaan juoksuakseliksi ja moottorillinen akseli on vetoakseli. Juoksuakselilla on kolme jarrusylinteriä, vetoakselilla kaksi. Keskimmaisissä vaunuissa 3 ja 4 ei ole vetoakseleita ollenkaan, vaan kaikki akselit ovat juoksuakseleita. Muissa vaunuissa keskimmaiset akselit eli toinen ja kolmas akseli ovat vetoakseleita. Vetoakseleilla paineilmajarru on säädetty jarruttamaan vähemmän, koska sähköjarru jarruttaa vetoakseleita.

Jokaisella akselilla on luistonestolaite, jonka tarkoitus on estää jarrujen lukkiutuminen ja pyörän pilalle kulumisen. Luistonestolaite irrottaa akselin jarrut, mikäli se havaitsee, ettei akseli pyöri. Jos luistonestolaitteeseen tulee vika, on mahdollista, että akselin jarrutusvoima ja jarrupalojen kulumisen on poikkeavaa.

Yhteensä junassa on 64 jarrusylinteriä. Jarrusylinteri ohjaa jarrulevyn kummankin puolen jarrupaloja vivuston avulla. Oikein säädettyinä vivusto painaa kumpaakin puolta samalla voimalla, mutta jumiutuessaan jarrupalojen kulumisen jarrulevyn eri puolilla voi olla epätasaista. Jarrulevyn molemmilla puolilla on kaksi jarrupalaa vierekkäin, eli yhteensä junassa on kaiken kaikkiaan 256 jarrupalaa. Koska jarrulevyn yhden puolen molemmat jarrupalat on vaihdettava samalla kerralla, kustannuksia lukuun ottamatta junassa ajatellaan olevan vain yksi jarrupala jarrulevyn molemmin

puolin. Uuden jarrupalan paksuus on 35 mm, ja valmistajan ilmoittama pienin sallittu paksuus on 5 mm.



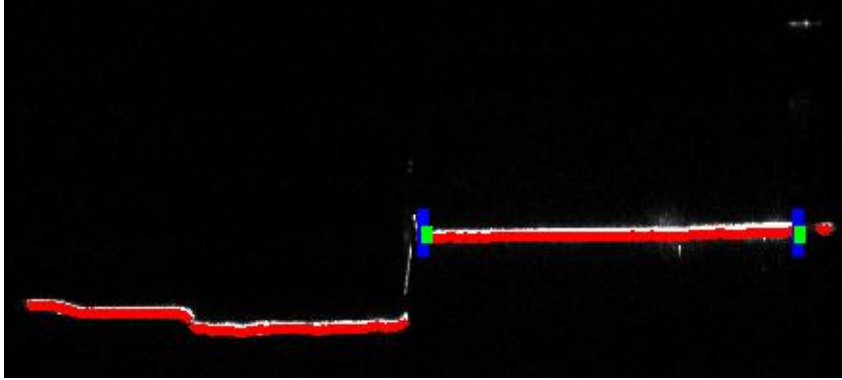
Kuva 5: Pendolino-juna. [40]

Nykyisellään jarrupaloja vaihdetaan 50000 km välein, mutta jarrupalat tarkastetaan myös alustahuollon yhteydessä 5000 km välein. Jarrupala mitataan silmämääräisesti viitepaksuutta käyttäen. Viitepaksuus voi vaihdella työvuorojen ja vuodenaikojen välillä. Esimerkiksi syksyllä jarrupaloja saatetaan vaihtaa tiheämmin siitä syystä, että talvella vettä valuvan junan alla ei ole mukavaa työskennellä. Kaikkien junan 64 jarrusylinterin tarkastamiseen kuluu merkittävästi aikaa. Lisäksi manuaalisella tarkastuksella ei nähdä kulumisen trendiä, vaan pelkästään nykyhetken paksuus. Tiettyissä vikaantumismooodeissa jarrupalat eivät kulu ollenkaan tai kulumat epänormaalin nopeasti. Näitä tilanteita on vaikea, ellei mahdoton havaita manuaalimittauksen avulla. Mikäli jarrupala pääsee kulumaan loppuun, jarrupalaa paikallaan pitävä selkälevy alkaa kulua, mikä saattaa vahingoittaa myös jarrulevyä. Pahimmassa tapauksessa myös jarrupalaa puristavat männät saattavat vahingoittua, mikäli jarrupaloja ei vaihdeta ajallaan.

5.2 Jarrupalojen mittausdata

Jarrupalojen paksuutta mitataan automaattisesti toimivalla mittausasemalla, joka sijaitsee Ilmalan varikolle johtavan raiteen yhteydessä. Asema yksilöi kaluston RFID-tunnisteen avulla. Kiskojen väliin on asennettu kolme laser-projektorin ja kameran sisältävää yksikköä, yksi kunkin jarrulevyn kohdalle. Järjestelmään kuuluu myös tunnistin, joka havaitsee junan pyörän ja ajoittaa kuvan ottamisen oikein. Junan ajettua mittausaseman yli, järjestelmän toimittajan ohjelmisto prosessoi kuvat ja laskee kullekin jarrupalalle paksuuden. Yksilöivät RFID-tiedot ja aikaleima yhdistetään tuotettuun paksuusmittaan ja tallennetaan tietokantaan. Sm3-junat seisovat usein Ilmalan varikolla vuorojen välillä, joten mittauksia tapahtuu keskimäärin muutaman päivän välein.

Kuvassa 6 on esitetty mittausaseman tuottama kuva täysimittaiselle jarrupalalle. Järjestelmän algoritmi määrittää jarrupalan etu- ja takapinnan kohdat kahdella eri algoritmilla (kuvassa siniset ja vihreät palkit). Algoritmi antaa ulos myös ”Confidence”-kokonaislukuarvon, joka kuvastaa mittauksen luotettavuutta. Mikäli luotettavuusarvo on 0, mittaus on epäonnistunut täysin. Luotettavuuden 2 mittaukset ovat kaikista yleisimpiä, kuten kuvan mittaus, jossa kahdella eri keinolla määritetyt paksuudet täsmäivät. Mikäli paksuudet eroavat, mittausasema palauttaa pienem-



Kuva 6: Mittausaseman tuottama kuva. Siniset ja vihreät palkit ovat eri keinoin määritettyjä jarrupalan rajakohtia.

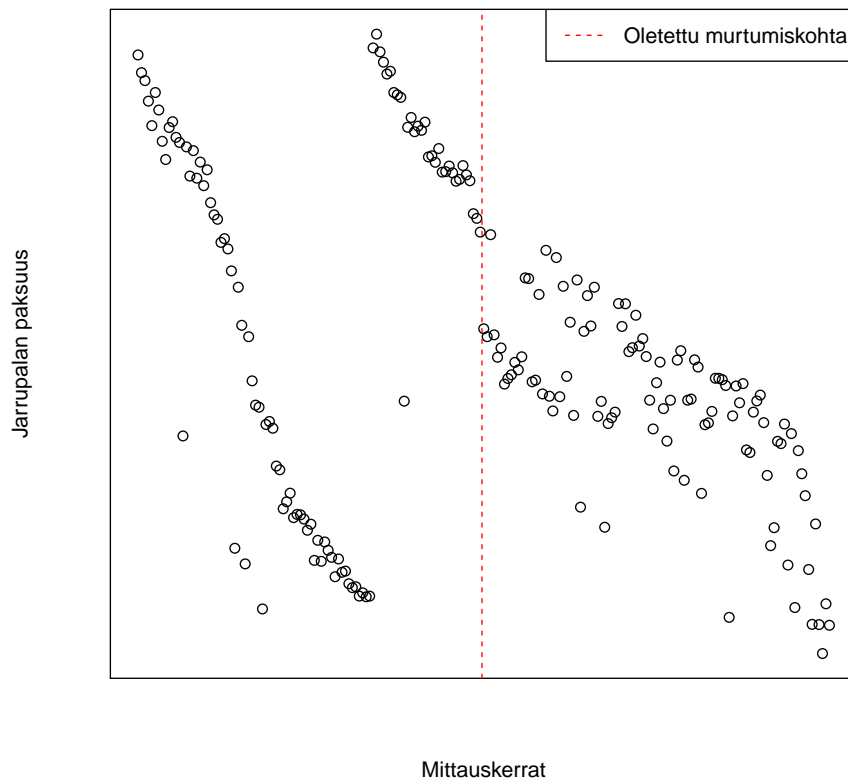
män paksuuden ja luotettavuusarvon 1. Kvantitatiivista tietoa luotettavuusarvon ja mittauksen varianssin välisestä yhteydestä ei ole.

Laser mittaa vain yhdestä kohdasta, joten pienet, jarrupalan jarrutuskykyyn vaikuttamattomat kuvan 7 kaltaiset murtumat aiheuttavat ongelmia mittauksessa. Kuvassa 8 on kyseisen jarrupalan mittausdataa. Mittauksen varianssi on selkeästi suurempi katkoviivan oikealla puolella. Hyvin todennäköisesti syynä huonoon mittaustarkkuuteen on murtuma. Lisäksi laser-säteen satunnaiset heijastumiset alustasta tai mahdollisesti toimittajan paksuudenlaskenta-algoritmin heikkoudet aiheuttavat poikkeavia havain-toja. Näistä syistä yhden mittauspisteen perusteella ei voi todeta mitään ehdotonta jarrupalan todellisesta kunnosta.



Kuva 7: Murtuma jarrupalassa selkäpuolella.

Mittausasema ei tiedä junayksilön ajettujen kilometrien kokonaismäärää. Sm3-junissa matkamittarin lukema päivitetään tietokantaan päivätasolla. Mikäli juna on sähköttömänä tai tietoliikenne on poikki, kyseiselle päivälle ei ole matkamittarin lukemaa tietokannassa. Siinä tapauksessa oletetaan, että juna on seissyt paikallaan esimerkiksi huoltotyön takia ja käytetään edellisen päivän lukemaa. Jarrupalojen mittausasema voi tuottaa useammankin mittauksen samalta päivältä. Koska selittävänä muuttujana käytettävää matkamittarilukemadataa on vain päivätasolla, lasketaan mahdollisista



Kuva 8: Murtuman vaikutus laser-mittaukseen.

saman päivän paksuusmittauksista keskiarvo.

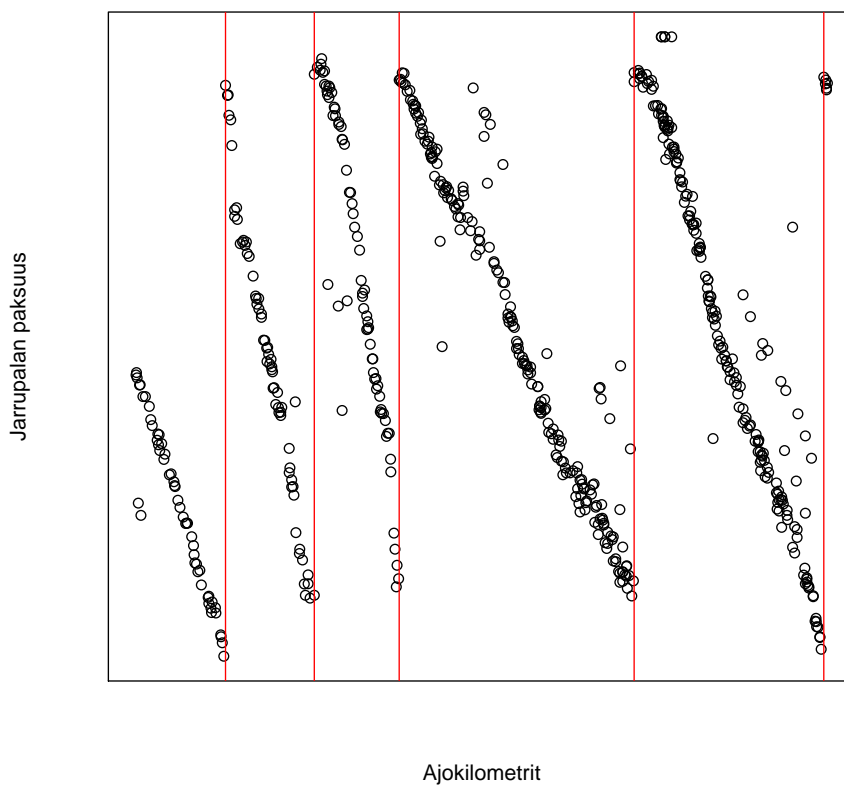
5.3 Jarrupalojen vaihtojen havainnointi mittausdatasta

Kuntoon perustuvassa kunnossapidossa olisi syytä kerätä myös tapahtumadataa mittausdatan lisäksi [4]. Tapahtumadatala tarkoitetaan esimerkiksi kuvausta tehdyistä huoltotoimenpiteistä ja havaituista vioista. Jarrupalojen tapauksessa asentajat eivät yleensä kirjaa jarrupalojen vaihtoa sylinterin tarkkuudella, vaan koko junan tasolla. Vaihdon syy jää tällöin pimentoon, vaikka se voisi olla tärkeä tieto tietyissä tapauksissa. Esimerkiksi halkeaman tai muun poikkeaman takia vaihdetuista paloista olisi hyvä olla kirjaukset tallessa riskien arviointia tai toimittajalle reklamointia varten. Tässä työssä vaihdot havaitaan mittausdatasta, koska kirjauksia vaihtotapahtumista ei ole.

Vaihtokohtien havainnointi suoritetaan luvussa 4 esitetyn reunantunnistusalgoritmin avulla. Yksinkertaisuuden vuoksi vaihtokohtien löytämiseen käytetään pelkästään

mittalaitteelta saatavia paksuusmittoja. Oletuksena on, että mittaus tapahtuu keskimäärin tasavälein, ja mittaustiheys on riittävästi suurempi kuin vaihtotiheys. Tässä sovelluksessa riittää, että vaihto havaitaan tehdyksi ennen seuraavaa vaihtojankohdtaa. Lisäksi pidempi viive mahdollistaa uuden palan kulumisen trendin määrittämisen tarkemmin, sillä käytettävissä on ikkunan pituuden verran mittauspisteitä yhden sijaan.

Jarrupalojen paksuuden mittausdatalle hyvin toimivat parametrien arvot $w = 4$, $\sigma = 2$ ja $h = 1,5$ löydettiin kokeilemalla. Esimerkki havaituista vaihtoista yhdelle jarrupalalle on esitetty kuvassa 9. Riittävä osumatarkkuus jarrupalojen vaihtokohdille havaittiin tarkastelemalla useita algoritmin löytämiä vaihtokohtia manuaalisesti.



Kuva 9: Esimerkki vaihtojen havainnointialgoritmin toiminnasta. Punaiset pystyviivat merkitsevät kohtia, joissa algoritmi on havainnut jarrupalan vaihtuneen uuteen mittausdatan perusteella.

5.4 Malli yksittäisten jarrupalojen kulumiselle

Jarrupalojen kulumisen selittäjäksi intuitiivinen valinta on ajettu matka. Kuluminen on suhteellisen lineaarista ajokilometriä suhteen. Kulumisnopeus kuitenkin vaihtelee paljon eri jarrupalojen kesken. Syynä tähän voivat olla erot materiaalissa tai asennuksen yhteydessä tapahtuvassa muutoksessa esimerkiksi säätötoimenpiteen seurauksena. Tämä johtaa siihen, että juuri vaihdetun jarrupalan kestoa on vaikea ennakoita. Kun jarrupalalle karttuu hieman ajettuja kilometrejä, kulumisen trendi alkaa erottua. Kulumisnopeuteen vaikuttavat todennäköisesti myös muiden muassa lämpötila, junan reitti ja kuljettajan ajotapa. Pienen vaikutuksen, haastavan mittaamisen ja huonon ennustettavuuden vuoksi nämä tekijät sivuutetaan.

Toinen haaste jarrupalasta toiseen vaihtelevan kulumisnopeuden lisäksi on mittaustalossa ilmenevä kohina. Kohinan ei tulisi ideaalitulanteessa vaikuttaa jarrupalan paksuuden estimaattiin eikä kulumisnopeuden estimaattiin. Pienimmän neliösumman lineaarinen regressio ei ole robusti tässä suhteessa, sillä yksittäinen virheellinen mittauspiste muuttaa sovitettua suoraa merkittävästi. Todellisuudessa kulumisnopeus pysyy suurin piirtein vakiona, joten mittaustalossa kohinaa voidaan poistaa kappaleessa 4 esitetyn Kalman-suotimen avulla.

Tässä työssä yksittäisen jarrupalan systeemin tilaa \mathbf{x} hetkellä k on

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \end{bmatrix},$$

missä x on jarrupalan paksuus ja \dot{x} jarrupalan kulumisnopeus ajokilometriä suhteen. Tilansiirtomatriisi

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta d_k \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

kuvaava jarrupalan lineaarista kulumista ja riippuu kuljetusta matkasta eli ajokilometriä muutoksesta Δd_k .

Jos oletetaan, että mittauspisteiden $k-1$ ja k välillä kulumisnopeuden muutos a_k on keskimäärin vakio, joka on noudattaa normaalijakaumaa $a_k \sim N(0, \sigma_a^2)$, niin tilayhtälö saa muodon

$$\tilde{\mathbf{x}}_k = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{G}_k a_k,$$

missä

$$\mathbf{G}_k = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \Delta d_k^2 \\ \Delta d_k \end{bmatrix}.$$

Toisin sanoen Kalman-suotimen virhetermi $\mathbf{w}_k \approx \mathbf{G}_k a_k$. Näin ollen

$$\mathbf{Q}_k = \text{cov}(\mathbf{w}_k) = \mathbf{G}_k \mathbf{G}_k^T \sigma_a^2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} \Delta d_k^4 & \frac{1}{2} \Delta d_k^3 \\ \frac{1}{2} \Delta d_k^3 & \Delta d_k^2 \end{bmatrix} \sigma_a^2.$$

Tässä sovelluksessa mitataan vain jarrupalan paksuutta eli ensimmäistä tilamuuttujaa, joten $\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$, ja merkitään $\mathbf{R}_k = \sigma_r^2$.

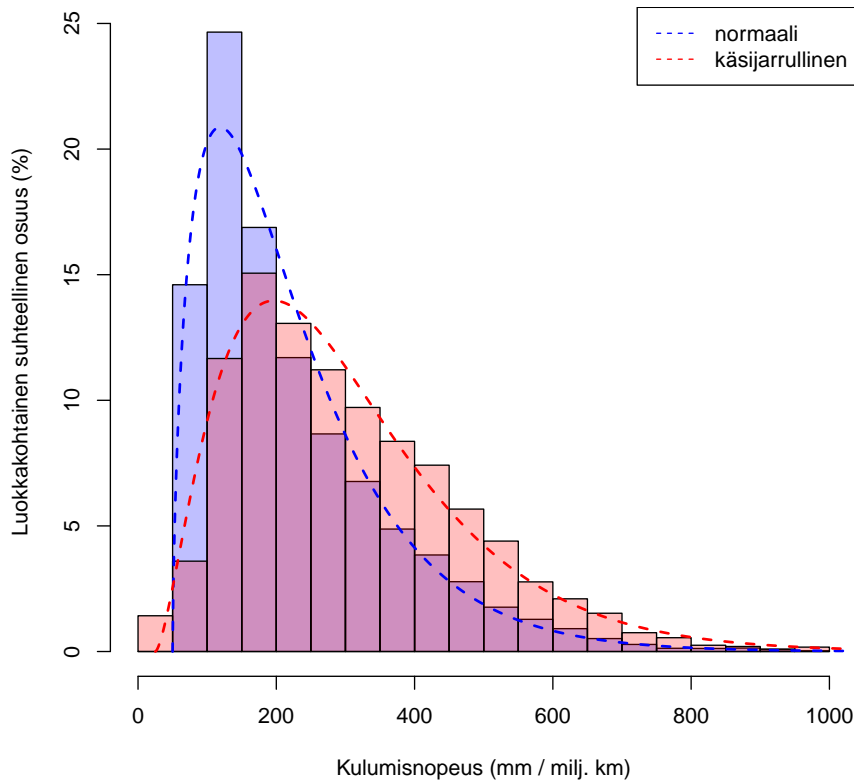
Sopivat arvot kulumisnopeuden epävarmuudelle σ_a^2 ja mittauskohinalle σ_r^2 määritettiin mittausdataa tarkastelemalla sekä testaamalla suotimen toimintaa eri arvoilla. Systemin tilan alkuarvojen alustus suoritettiin aina vaihdon havaitsemisen jälkeen viimeisimpien mittausten perusteella huomioiden yksittäisten mittauspisteiden epävarmuus kovarianssimatriisin alkuarvossa.

5.5 Mittaushistorian analysointi

Kun tilaestimaattori on laskettu historiadatalle, voidaan estimoida jarrupalojen kulumisnopeuksien jakauma. Hetkittäisten kulumisnopeuksien jakauman muotoon vaikuttavat erot mittaustiheyksissä eri jarrupalojen välillä. Koska vaihtokohdat on määritetty aiemmin, on mahdollista myös määrittää vaihtopaksuuksien jakauma poimimalla tilaestimaatin paksuuden arvo jokaisessa vaihtokohdassa. Samalla on mahdollista laskea keskimääräinen kulumisnopeus jokaiselle pois heitetylle jarrupalalle.

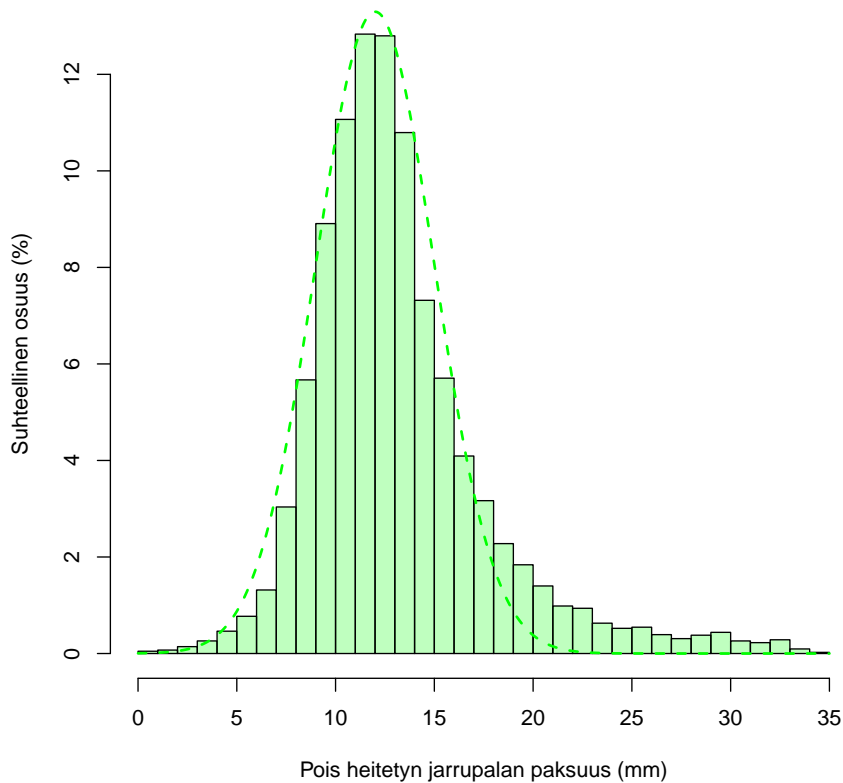
Keskimääräisen kulumisnopeuden vaihtelulle voidaan etsiä selittävää tekijää esimerkiksi varianssianalyysin avulla. Tarkastelemalla keskimääräisiä kulumisnopeuksia vaunun tyyppin, akselinumeron ja jarrupalan numeron mukaan jaoteltuina voidaan huomata, että vaunuissa 1–3 akselin 1 jarrupalat 1 ja 2 sekä akselin 4 jarrupalat 5 ja 6 kuluvat nopeammin kuin muut. Vastaavasti symmetrisesti vaunuissa 4–6 akselin 1 jarrupalat 5 ja 6 sekä akselin 4 jarrupalat 1 ja 2 kuluvat nopeammin muihin paloihin nähden. Varianssianalyysin F-testisuureen arvoksi saadaan 367,1, jolloin p-arvo on hyvin pieni. Eroa selittää esimerkiksi se, että kyseiset nopeammin kuluvat jarrupalat toimivat vauhdin hidastamisen lisäksi myös seisontajarruna. Näillä perusteilla jarrupalat jaetaan kahteen ryhmään: vain liikkeessä jarruttavat jarrupalat ja liikkeen lisäksi seisontajarruna toimivat jarrupalat. Näiden ryhmien sisällä selkeitä aliryhmiä ei löydy, joskin esimerkiksi junakohtaisesti keskiarvoissa on hieman eroja.

Molemmille ryhmille suoritetaan kulumisnopeuden jakauman estimointi erikseen. Tässä yhteydessä käytetään gamma-jakaumaa, koska se näyttää sopivan dataan hyvin. Gamma-jakauma alkaa nolasta, mutta tässä tarkoituksessa parempi sovitus saadaan siirtämällä jakaumaa oikealle vakiotermin avulla. Sopiva vakiotermin arvo eli minimiarvo kulumisnopeudelle määritettiin kummallekin luokalle 0,1 % kvantiiliin mukaan. Vakiotermejä pienemmät arvot suodatettiin pois ja empiirisiä jakaumia siirrettiin vasemmalle vakiotermien verran. Siirrettyihin jakaumiin sovitettiin gamma-jakaumat laskemalla suurimman uskottavuuden estimaatit. Tämän perusteella käsijarruttoman luokan jarrupalojen kulumisnopeus noudattaa jakaumaa $Gamma(1, 66; 0,00955) + 50$ ja käsijarrullisten jarrupalojen jakaumaa $Gamma(2, 59; 0,00927) + 25$. Luokkakohtaiset histogrammit ja sovitettujen jakaumien käyrät on esitetty kuvassa 10. Sovitukselle ei tehty tilastollisia testejä, vaan sopivuus todettiin graafisesti kvantiilikuviosta. Herkkyysanalyysien avulla varmistetaan, etteivät simulaatiotulokset ole herkkiä kulumisnopeuksien jakaumien muutokselle.



Kuva 10: Nopeusestimaattien histogrammit ja jakaumaestimaatit kahdelle jarrupalaluokalle.

Nykytilanteen ymmärtämisen vuoksi tutkitaan myös pois heitettyjen jarrupalojen paksuuden jakaumaa. Data on samaa kuin keskimääräisen kulumisnopeuden laskemiseen käytetty mittausaseman data. Jarrupalan sijainnilla, vaunulla tai muilla ajasta riippumattomilla tekijöillä ei näytä olevan merkittävää vaikutusta vaihtopaksuuteen, mutta vuodenaika vaikuttaa jonkin verran. Suurin tekijä näyttää olevan aika, sillä keskimääräinen vaihtopaksuus on laskenut vuosien 2014–2017 välillä paksuudesta 15 mm paksuuteen 12 mm. Tästä syystä kuvaan 11 on piirretty vuodesta 2016 alkaen pois heitettyjen jarrupalojen paksuudet. Jakauma on selkeästi oikealle vino, jota voidaan selittää ainakin sillä, että tietyissä huolloissa jarrupalat vaihtuvat riippumatta niiden paksuudesta. Tämän työn puitteissa ei tarkastella muita huolto- toimenpiteitä, joten jarrupalahuolloissa pois heitettyjen jarrupalojen voidaan olettaa noudattavan kuvaan piirrettyä normaalijakaumaa keskiarvolla 12 ja keskihajonnalla 3. Materiaalikustannuksen minimoivassa ideaalitulanteessa kaikki jarrupalat vaihdettaisiin minimipaksuudessa 5 mm. Oletetun jakauman perusteella voidaan todeta, että pienin sallittu paksuus alitetaan noin 1 % tapauksista. Näitä tietoja käytetään simulointimallin validoinnissa.



Kuva 11: Pois heitettyjen jarrupalojen paksuuden jakauma ja $N(12, 3^2)$.

5.6 Jarrupalahuollon kustannukset

Kustannukset on merkittävä tekijä jarrupalojen vaihtostrategioiden suorituskykyä arvioitaessa. Materiaalikustannukset on määritetty varasto- ja tilaustietojen perusteella, joten niitä voidaan pitää tarkkoina. Sekä vaihtotyön keston että työn tuntihinnan määrittäminen on vaikeampaa, joten siinä on turvauduttu asiantuntijan arvioon. Mikäli arvioita haluaisi tarkentaa, voisi vaihtotyöhön menevää aikaa tutkia tilastollisin keinoin datankeruun kautta. Huollosta koitua kiinteä kustannus on myös arvioitu asiantuntijoiden toimesta. Liian myöhään tapahtuneesta jarrupalan vaihdosta johdettava kustannusta on mallinnettu sakkona, joka on asetettu asiantuntija-arvioon perustuen tarpeeksi korkeaksi. Käytännössä tällaista kitkamateriaalin kokonaan loppuun kulumista halutaan välttää pelkkää korjauskustannusta enemmän, koska liian ohuet jarrupalat ovat myös turvallisuusriski. Korjauskustannukset eivät todellisuudessa ole aina samat eikä jokainen 5 mm alitus aiheuta vahinkoa, mutta tässä analyysissä kustannukset asetettiin tarpeeksi korkeaksi, ettei optimistrategialla vaihdettaisi montaa jarrupalaa liian myöhään.

Yksittäisen jarrupalan kustannus on haettu toiminnanohjausjärjestelmästä, jossa jarrupalan hinta on 12 euroa. Koska jarrulevyn yhdelle puolelle asennetaan kaksi jarrupalaa, yksi simuloitu jarrupala koostuu todellisuudessa kahdesta erillisestä jarrupalasta. Näin ollen simuloitun jarrupalan materiaalikustannus on 24 euroa. Tuotannossa vierailun ja asiantuntija-arvion perusteella arvioitiin, että yhden jarrulevyn jarrupalojen vaihtoon kuluu noin 10 minuuttia, joten yhden simuloitun jarrupalan vaihtoon katsottiin kuluvan 5 minuuttia työaika. Lisäksi jokaisessa huollossa, jossa vaihdetaan yksikin jarrupala, työn aloittamiseen ja lopettamiseen kuluu yhteensä 20 minuuttia sisältäen työlle leimaamisen, osien ja työkalujen noutamisen sekä junan maadoituksen ja käyttökuntoon saattamisen. Vaihtotyön suorittaa 2 henkilöä, ja yhden henkilön työn tuntihinnaksi oletettiin 50 euroa / tunti. Alimittaisen jarrupalan aiheuttaman vaurion korjauksen kustannus on 2000 euroa, joka perustuu jarrulevyn materiaali- ja vaihtokustannukset huomioivaan arvioon.

Tässä työssä huoltojen kestolle ja sitä kautta kustannuksille käytetään keskiarvoa. Myös työn hinnalle on käytetty keskimääräistä arviota, vaikka todellisuudessa se vaihtelee hieman vuorokaudenajan ja viikonpäivän mukaan. Lisäksi tässä työssä ei mallinneta kerrannaisvaikutuksia pitkäksi venyneistä huolloista, kuten kaluston sitoutumista kunnossapitoon ylimääräiseksi ajaksi, mikä saattaisi johtaa jopa junavuoron peruuntumiseen. Oletetaan myös, että huoltoon kutsumiseen ja kaluston sitoutumiseen kunnossapitoon ei liity kustannusta. Tässä työssä käsiteltyjen Pendolinojen osalta oletusta voidaan pitää realistisena, sillä junat eivät ole ajossa kellon ympäri ja niiden seisontapaikka on Ilmalan varikko, jossa huollotkin suoritetaan.

Kuntoon perustuvassa kunnossapidossa mittalaitteet aiheuttavat lisäkustannuksia investointeina ja käyttökustannuksina yksinkertaisempiin huolto-ohjelmiin nähden. Tässä tilanteessa mittausasema on jo olemassa, joten sen kustannukset sivuutetaan vähäisinä.

5.7 Simulointimalli koko junan jarrupalojen kulumiselle

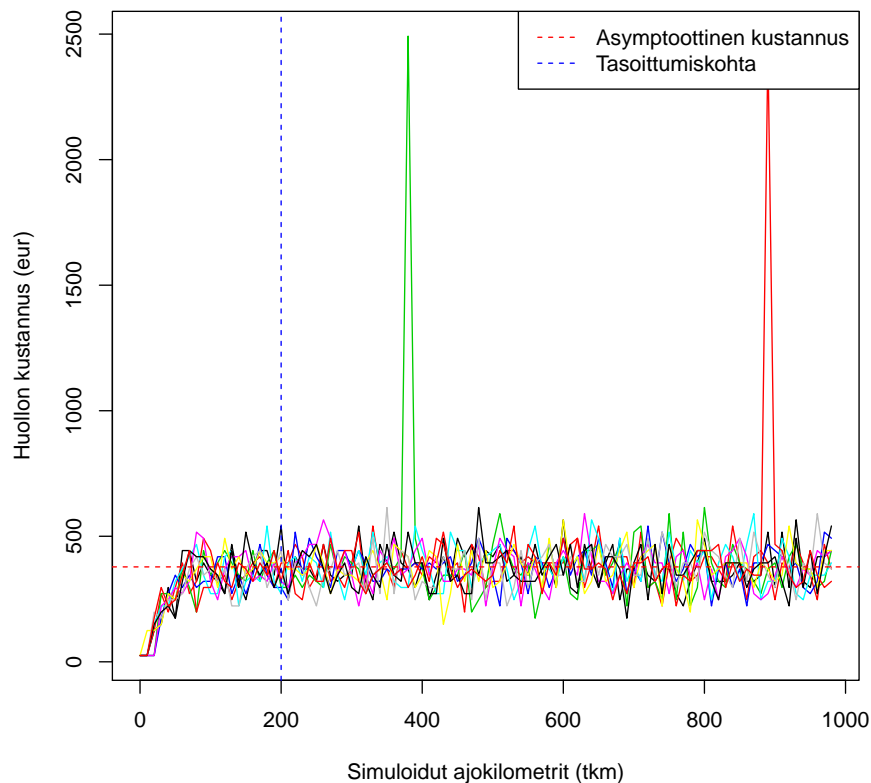
Kuvataan yhden junan 128 jarrupalan paksuutta millimetreinä vektorilla $\mathbf{x}_1 \in \mathbb{R}_+^{128}$ ja jarrupalojen kulumisnopeutta vektorilla $\mathbf{x}_2 \in \mathbb{R}_+^{128}$ (mm / milj. km). Alkutilanteessa asetetaan mallinnettuun junaan uudet jarrupalat eli $\mathbf{x}_1 = [35 \ \cdots \ 35]$. Otetaan kulumisnopeuksille \mathbf{x}_2 alkuarvaus gamma-jakaumasta parametrein X ja Y . Kun juna kulkee d miljoonaa kilometriä, tila päivittyy siten, että $\mathbf{x}_1^* = \mathbf{x}_1 - d\mathbf{x}_2$.

Koska kuluminen oletetaan lineaariseksi, voidaan simulaatiossa edetä aina seuraavaan päätöshetkeen asti. Tässä päätöshetkinä ovat huoltoon varatut ajankohdat. Huoltoja ei voida tehdä milloin tahansa, sillä junan tulee olla varikolla. Näin ollen diskreetoitu huoltoväli vastaa todellisuutta. Merkitään huoltoväliä p :llä, joka on simulaation parametri. Huollossa jokaisen jarrupalan kohdalla voidaan päättää, vaihdetaanko pala vai ei. Vaihdetujen palojen paksuus sekä hetkellinen- ja keskimääräinen kulu-

misnopeus otetaan talteen. Päätös vaihdettavista jarrupaloista tehdään strategian perusteella. Strategia määrittää mitattujen tilamuuttujien $\tilde{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^{128 \times 2}$ ja huoltovälin p avulla listan vaihdettavista jarrupaloista. Tässä työssä tarkastellaan neljää eri strategiaa, jotka on kuvattu myöhemmin. Koska käytännössä jokaisen jarrupalan tarkkaa paksuutta saati kulumisnopeutta ei voida määrittää virheettä oletetaan, että kummankin tilamuuttujan mittausvirhe on normaalijakautunut odotusarvolla 0 ja keskihajonnat ovat σ_{x_1} ja σ_{x_2} . Strategian syöte on mittavirheen sisältämä tila eli $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} + \epsilon$.

Jarrupalojen kulumisnopeus voi mittausdatan perusteella saada arvon hyvin läheltä nollaa, eli jarrupala ei käytännössä kulu lainkaan. Simulaatiossa tulee kuitenkin käsitellä tämä tapaus, koska ei ole realistista, että jokin jarrupala jää lähes kulumattomaksi koko simulaation loppuajaksi. Siitä syystä jarrupalojen kulumisnopeuksien jakaumassa jätettiin mallintamatta täysin kulumattomia tai todella hitaasti kuluvia jarrupaloja eli yksittäisten jarrupalojen kulumisnopeudet ovat aina selvästi positiiviset. Koska junassa on 128 jarrupalaa, niin junan keskimääräinen jarrupalojen kuluminen pysyy melko vakiona yksittäisten jarrupalojen vaihteluista riippumatta. Väitteen paikkansapitävyys kokeillaan laskemalla simulaatiomallissa junan jarrupalojen keskimääräinen kulumisnopeus huoltotapahtumien kohdalla.

Simulaatiota ajetaan ensin 200000 kilometriä, jotta alkutransientit saadaan poistettua lopputuloksista. Kuvassa 12 on esitetty alkutilan transientin aiheuttamaa varianssia mallin ulostulossa. Tältä ajalta simuloitujen huoltojen lokitietoja ei tallenneta. Tarvittavaa tasapainotilan ajoaikaa voidaan myös arvioida lyhyen ajon perusteella. Jos simuloidaan N huoltotapahtumaa, ja yhden huoltotapahtuman keskihajonnaksi on arvioitu lyhyen ajon perusteella σ , niin keskiarvon keskivirhe on tällöin $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$. Esimerkiksi kuvan tapauksessa kustannuksen keskihajonta on luokkaa 200 euroa huoltoa kohden, joten mikäli keskimääräinen huollon kustannus halutaan euron tarkkuudella, täytyy simuloida vähintään $N = \left(\frac{200}{1}\right)^2 = 40000$ huoltoa. Liian myöhään vaihdetuista jarrupaloista aiheutuvat 2000 euron korkuiset piikit normaalitasoon nähden pitää ottaa huomioon ajon pituutta suunniteltaessa. Mikäli keskihajonnan arviona käytetäänkin piikin korkeutta eli 2000 euroa, niin simulointijakson pituus tulisi olla 4 miljoonaa huoltoa. Huollon hinnan varianssi riippuu käytetystä strategiasta ja huoltovälistä, joten jokaiselle kombinaatiolle on varmistuttava erikseen siitä, että simulaatiota ajetaan tarpeeksi pitkään. Lisäksi simulaatio ajetaan rinnakkain kahdeksan kertaa kullakin konfiguraatiolla, ja mikäli tulokset replikaatioiden välillä vaihtelevat, kasvatetaan ajon pituutta. Useimmissa tapauksissa 100000 huollon simulointi on riittänyt saman tuloksen saavuttamiseen kullakin replikaatiolla. Simuloinnin jälkeen lasketaan eritellyt kustannukset kilometriä kohden huoltolokien avulla. Kustannusten muodostumistapa on eroteltu edellisessä luvussa.



Kuva 12: Huollon kustannuksen konvergenssi ajokilometriä edetessä. Eri värit kuvaavat eri ajoja. Korkeat piikit johtuvat sakkokustannuksista.

5.8 Tutkittavat strategiat

Tutkitaan neljää eri strategiaa, jotka edustavat erilaisia huoltomalleja. Kolmessa strategiassa oletetaan, että huollot suoritetaan tasaisin välein ajettujen kilometrien perusteella mitattuna. Yhdessä strategioista huolto voidaan jättää suorittamatta, mutta mahdollisuus huoltaa on aina tasaisin välein.

Strategia A Vaihetaan kaikki junan jarrupalat tietyn kilometrimäärän tultua täyteen. Strategia on ennaltaehkäisevää kunnossapitoa.

Strategia B Vaihetaan vain ne jarrupalat, jotka ovat huoltohetkellä saavuttaneet tietyn kuluneisuustason. Mittausepävarmuus on mallinnettu normaalijakaumalla. Parametreina ovat huoltoväli ja vaihtopaksuuskyynnys. Strategia on toteutus kuntoon perustuvasta kunnossapidosta.

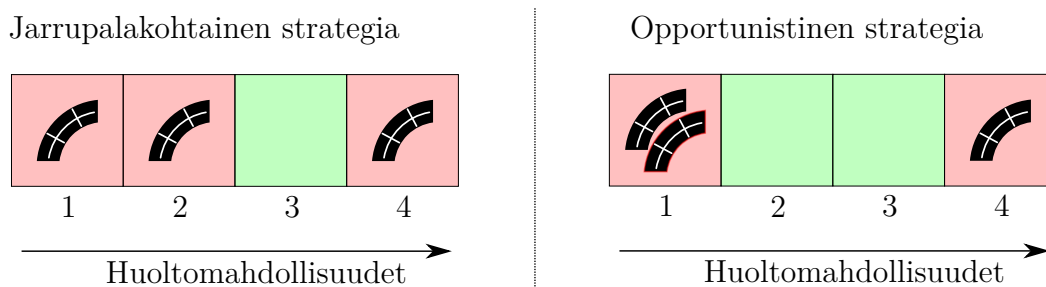
Strategia C Vaihetaan jarrupalat, jotka eivät mittausten perusteella kestä seuraavaan huoltoon. Mittausepävarmuus on mallinnettu normaalijakaumalla.

Strategia edustaa kuntoon perustuvaa kunnossapitoa, jossa on mukana myös ennakoivan kunnossapidon elementtejä.

Strategia D Opportunistisen kunnossapidon strategia, joka pohjautuu strategian C määrittämiin yksittäisten komponenttien optimaalisiin vaihtoaikoihin. Tavoitteena on minimoida kokonaiskustannus ryhmittelemällä jarrupalojen vaihdot tietyn mittaisen aikaikkunan sisällä esiintyviin huoltoihin.

Strategioiden algoritmit on kuvattu tarkemmin listauksissa 1 – 4.

Opportunistisen strategian D perusajatus on esitetty kuvassa 13. Kiinteät kustannukset pienenevät, kun huoltojen lukumäärä on matalampi, sillä useampi jarrupala vaihdetaan samassa huollossa. Kaikkia jarrupaloja ei kuitenkaan välttämättä kannata vaihtaa samalla, koska jokaisessa aikaistuksessa käyttökelpoista kitkapintaa menee hukkaan. Tavoitteena on löytää ryhmittely, joka minimoi kustannukset. Diskreettivälinä käytetään arvoa 1 tkm, sillä se vastaa suuruusluokaltaan päivittäistä huoltamista. Lisäksi tämän työn puitteissa huomioidaan vain kunkin jarrupalan RUL-estimaatin arvo, mutta olisi mahdollista ottaa huomioon myös ennusteen epävarmuuden huomioiva todennäköisyysjakauma RUL-estimaatille.



Kuva 13: Opportunistisen strategian idea suhteessa palakohtaiseen strategiaan. Huoltojen kokonaismäärän pieneminen voi alentaa kustannuksia.

Strategiassa D on käytännön syistä käytettävä heuristiikkaa, sillä ryhmittelykombinaatioita tulee todella paljon. Yksinkertainen heuristiikka on se, ettei jarrupalan huoltoa voi lykätä pidemmälle tulevaisuuteen, jos sen arvioidaan kuluvan loppuun tiettyyn huoltomahdollisuuteen mennessä. Esimerkiksi kuvassa 13 huoltomahdollisuuden 1 laatikossa olevaa jarrupalaa ei voida siirtää huoltomahdollisuuden 2 kohdalle, koska siitä seuraisi hyvin todennäköisesti sakkokustannus minimipaksuuden alittamisesta. Toinen käytetty heuristiikka on se, että uudelleenryhmittelystä ei todennäköisesti seuraa kustannussäästöä, ellei jokin huoltomahdollisuus jää kokonaan käyttämättä. Mikäli kuvan tilanteessa huoltomahdollisuuden 2 kohdalla olisikin kaksi jarrupalaa, todennäköisesti ei olisi järkevää siirtää vain yhtä jarrupalaa huoltomahdollisuuden 1 kohdalle, sillä tarvittavien huoltotapahtumien määrä ei pienenis, jolloin kustannushyöty jäisi saavuttamatta. Lisäksi huolto jätetään automaattisesti väliin, jos yhtäkään jarrupalaa ei ole pakko vaihtaa.

Strategian D osalta tutkittiin kahta heuristiikkaa, koska haluttiin saada varmuus yksinkertaisen heuristiikan riittävydestä. Heuristiikalla 1 huoltoikkunoiden jarrupaloja siirretään nykyhetken huoltoikkuna kerrallaan ja tarkastellaan mahdollisen kustannussäästön suuruutta. Heuristiikalla 2 otetaan ikkunakohtaisen lähestymistavan sijaan jarrupalakohtainen lähestymistapa eli luodaan kombinaatiot jarrupala kerrallaan. Heuristiikalla 2 testattavia konfiguraatioita tulee huomattavasti enemmän kuin heuristiikalla 1, mikä selittää heuristiikan 2 hitautta.

Listaus 1 Strategia A

1. Huolto alkaa
 2. Vaihda kaikki jarrupalat
 3. Huolto loppuu
-

Listaus 2 Strategia B

1. Huolto alkaa
 2. Jokaiselle jarrupalalle
 - (a) Mittaa jarrupalan paksuus
 - (b) Vaihda jarrupala mikäli *mitattu paksuus* \leq *vaihtopaksuus*
 3. Huolto loppuu
-

Listaus 3 Strategia C

1. Huolto alkaa
 2. Jokaiselle jarrupalalle
 - (a) Estimoi jarrupalan nykyhetken paksuus mittausdatan perusteella
 - (b) Estimoi jarrupalan nykyhetken kulumisnopeus mittausdatan perusteella
 - (c) Vaihda jarrupala, mikäli *estimoitu paksuus* – *huoltoväli* \times *estimoitu kulumisnopeus* $<$ *vaihtopaksuus*
 3. Huolto loppuu
-

Listaus 4 Strategia D

1. Huoltomahdollisuus avautuu
 2. Jokaiselle jarrupalalle
 - (a) Estimoi jarrupalan nykyhetken paksuus mittausdatan perusteella
 - (b) Estimoi jarrupalan nykyhetken kulumisnopeus mittausdatan perusteella
 3. Jos millekään jarrupalalle ei päde
estimoitu paksuus – *huoltoväli* × *estimoitu kulumisnopeus* < *vaihtopaksuus*,
 älä suorita huoltoa, valmis.
 4. Jokaiselle huoltoikkunalle $w = 1 \dots N$
 - (a) Jokaiselle jarrupalalle, jolle
estimoitu paksuus – $w \times$ *huoltoväli* × *estimoitu kulumisnopeus*
 \leq *vaihtopaksuus* <
estimoitu paksuus – $(w + 1) \times$ *huoltoväli* × *estimoitu kulumisnopeus*
 - i. Laske kustannus huollon etuaikaistamisesta nykyhetken käyttämällä muuttuvien kustannusten avulla laskettua millimetrihintaa
 - ii. Ota talteen kustannus ja jarrupala
 - (b) Laske aikaistamisen kustannus jarrupalakohtaisten kustannusten summalla
 - (c) Mikäli huolto olisi pitänyt suorittaa eli *kustannus* > 0, hyöty ennenaikaistamisesta on huollon kiinteän kustannuksen suuruinen
 - (d) Ota talteen ikkunaan w liittyvä hinta *hyöty* – *kustannus* sekä lista vaihdettavista jarrupaloista
 5. Huolto alkaa
 6. Etsi yo. algoritmin tuottamasta listasta w , jolle hinta on pienin. Vaihda ikkunan pituuteen w liittyvät jarrupalat
 7. Huolto loppuu
-

6 Tulokset

Tässä kappaleessa esitetään simulointimallin tulokset strategioilla A, B, C ja D. Tavoitteena on löytää eri huoltostrategioiden kustannusten erot. Lisäksi selvitetään, kuinka herkkä kukin strategia on muutoksille strategian parametreissa ja mallin syötteissä. Simulointimallin syötteiden arvot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Simulaatiossa käytetyt syötteiden arvot.

Jarrupalan ominaisuudet	
Uuden jarrupalan paksuus	35 mm
Paksuuden sakkoraja	5 mm
Hinta	$2 \times 12 = 24$ euroa
Jarrusylinterin ominaisuudet	
Jarrupaloja	2 kpl
Käsijarrullisia junassa	12 kpl
Käsijarruttomia junassa	52 kpl
Jarrupalojen kuluminen	
Käsijarrulliset sylinterit	$\text{Gamma}(2,59; 0,00927) + 25$ mm / milj. km
Käsijarruttomat sylinterit	$\text{Gamma}(1,66; 0,00955) + 50$ mm / milj. km
Mittaaminen (nykytila)	
Paksuuden mittavirhe	$N(0; 3,5)$ mm
Mittaaminen (automaattimittaus)	
Paksuuden mittavirhe	$N(0; 0,5)$ mm
Kulumisnopeuden mittavirhe	$N(0, 20)$ mm / milj. km
Huollon kustannukset	
Kiinteä kustannus	$2 \times \frac{20}{60} \times 50 \approx 33$ euroa / toteutunut huolto
Työn kustannus	$2 \times \frac{5}{60} \times 50 \approx 8$ euroa / jarrupala
Sakko liian ohuesta jarrupalasta	2000 euroa / jarrupala

Lähtökohtaisesti tavoitteena on tutkia huoltovälejä 1 tkm, 2 tkm, 5 tkm, 10 tkm, 20 tkm ja 50 tkm. Pisin sallittu huoltoväli on nykyisen jarrupalahuollon huoltoväli 50 tkm. Lyhimmät huoltovälit eivät ole varteen otettavia vaihtoehtoja strategiaa A arvioitaessa, mutta validointimielessä simulaatio ajetaan laajemmalle joukolle parametreja kuin välttämättä olisi tarpeen. Strategioiden B ja C vaihtopaksuuden arvoja kokeiltiin siten, että huoltovälikohtainen minimi löydettiin millin tarkkuudella. Strategiassa D ikkunan pituudeksi on valittu 20 tkm.

Simulointitulosten tarkkuus on varmistettu pitkillä ajoajoilla ja usean ajokerran

avulla. Optimien ympäristössä ajokertojen tulosten keskiarvon keskivirhe on luokkaa 0,01 snt / km. Paljon sakkokustannuksia aiheuttavilla strategia- ja parametrikombinaatioilla kustannusten vaihtelu on suurta, jolloin keskiarvon keskivirhe on samoilla toistomäärillä suurempi. Toistomäärien kasvattamista ei nähty tarpeelliseksi, sillä kustannuksen arvo on suurten sakkokustannusten tapauksissa myös kertaluokkaa suurempi, joten tulokset ovat silti tarkkoja kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella.

6.1 Strategia A

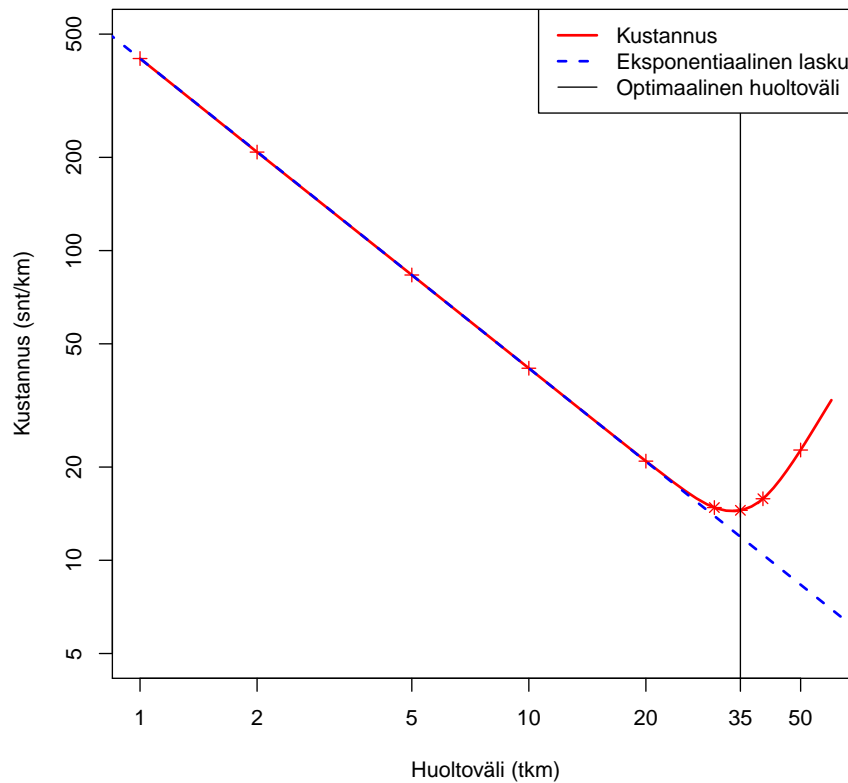
Määräaikaishuoltoon pohjautuvan strategian A kustannukset on esitetty taulukossa 2. Kustannus putoaa likimain eksponentiaalisesti huoltovälin välillä 1 tkm–20 tkm. Kun huoltoväli kaksinkertaistetaan, kustannukset putoavat puoleen. Palojen loppuun kulumisilta vältytään lähes kokonaan 20 tkm asti. 50 tkm kohdalla korjauskustannusten osuus on yli 14 snt / km, ja kokonaiskustannus ylittää huoltovälin 20 tkm kustannuksen. Epälineaarille osalle optimin ympäristössä simulaatiota on ajettu tiheämmällä jaolla, jolloin optimaaliseksi kustannukseksi saatiin 14,5 snt / km huoltovälillä 35 tkm.

Taulukko 2: Kokonaiskustannus (snt / km) strategialla A minimipaksuuden mukaan. Tarkempaa tarkastelua varten simuloidut huoltovälit on kursivoitu. Matalin kustannus on lihavoitu.

1 tkm	2 tkm	5 tkm	10 tkm	20 tkm	<i>30 tkm</i>	<i>35 tkm</i>	<i>40 tkm</i>	50 tkm
417	208	83,4	41,7	20,9	14,8	14,5	15,8	22,7

Kuvassa 14 on esitetty kustannuksen käyttäytyminen huoltovälin funktiona logaritmisella asteikolla. Kustannuksen käyrä seuraa eksponentiaalista laskua kuvaavaa suoraa välillä 1 tkm–20 tkm. Kun huoltovälin pituus ylittää 20 tkm, kustannuksen käyrä alkaa kaartua. Tällöin osaa jarrupaloista ei vaihdeta tarpeeksi ajoissa, mikä aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia. Kustannus saavuttaa minimin 14,5 snt / km noin 35 tkm kohdalla ja alkaa sen ylitettyään kasvaa rajusti.

Optimaalisella huoltovälillä 35 tkm sakkokustannus on 2,6 snt / km. Tämä tarkoittaa sitä, että strategialla A alimittaisena vaihtamista ei kannata täysin yrittää estää kustannusten näkökulmasta. Liian myöhään vaihtamisessa on kuitenkin aina myös turvallisuusriski, joten käytännössä huoltoväli kannattaisi asettaa tiheämmäksi kuin 35 tkm. Oletetaan, että hyväksytty osuus alimittaisille jarrupaloille on yksi tuhannesta. Kuvassa 15 on esitetty ajoissa vaihdettujen jarrupalojen osuus kaikista vaihdetuista jarrupaloista huoltovälin funktiona. Hyväksytty taso on piirretty punaisella katkoviivalla, jolloin maksimipituus huoltovälille on tuhannen kilometrin tarkkuudella 29 tkm. Huolto-ohjelmaan määritetty huoltovälin pituus sisältää usein jonkin verran toleranssia, esimerkiksi 10 %, ja sopiva tarkkuus tässä tapauksessa voisi



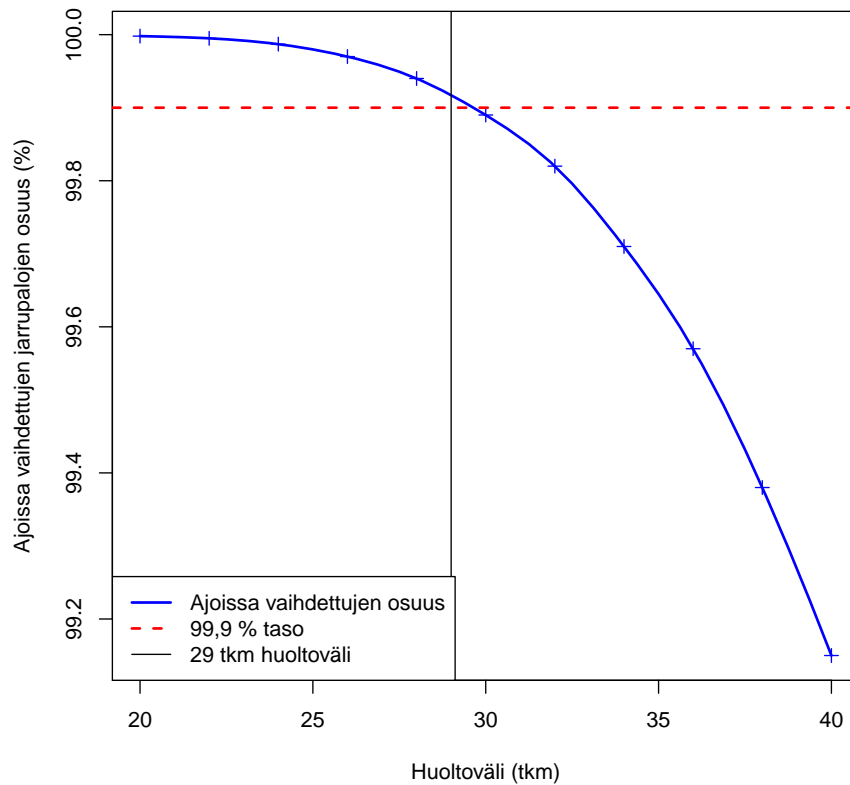
Kuva 14: Strategian A kustannukset huoltovälin funktiona logaritmisella asteikolla. Optimaalisen huoltovälin 35 tkm ympäristöstä simuloitua tulokset on merkitty tähdellä.

olla 5 tkm. Näin ollen strategialle A sopiva huoltoväli huolto-ohjelmaan kirjattavaksi olisi 25 tkm. Simuloimalla kustannukseksi saadaan tällöin 16,9 snt / km.

6.2 Strategia B

Nykyhetken paksuuteen perustuvan strategian B kustannukset huoltovälien ja vaihtopaksuuksien mukaan on esitetty taulukossa 3. Optimaalinen vaihtopaksuuden arvo riippuu huoltovälin pituudesta. Vaihtopaksuudella 35 mm huoltovälien 20 tkm ja 50 tkm kustannukset vastaavat strategian A kustannuksia. Lyhemmillä huoltoväleillä kustannus on hieman matalampi, koska mallinnetun mittausvirheen vuoksi jarrupalojen mitattu paksuus ei alita täysimittaisen jarrupalan paksuutta.

Taulukkoa 4 tarkastelemalla voidaan todeta, että pitkät huoltovälit matalalla vaihtopaksuudella eivät tule kysymykseen, sillä merkittävä osa vaihdettavista jarrupaloista



Kuva 15: Ajoissa vaihdettujen jarrupalojen osuus huoltovälin funktiona strategialla A.

on paksuudeltaan alle sallitun rajan. Tarkastelluilla huoltoväleillä 1 tkm – 20 tkm alamittaisten jarrupalojen osuus putoaa arvoon 0,00 %, kun vaihtopaksuutta nostetaan. Tämä tarkoittaa sitä, että huoltovälit ovat mahdollisia kalustoturvallisuuden kannalta. Mikäli huoltoväli on todella pitkä, kuten 50 tkm, alamittaisena vaihdettujen jarrupalojen osuus ei mene lähelle nollaa, vaikka vaihtopaksuutta kasvatettaisiin lähelle täysimittaisen jarrupalan paksuutta 35 mm.

Taulukkoon 5 on koottu kunkin tutkitun huoltovälin optimaalinen vaihtopaksuus ja koitua kustannus sekä alimittaisten jarrupalojen osuus optimaalisella vaihtopaksuudella. Matalin kustannus 3,47 snt / km saavutetaan 7 tkm huoltovälillä 11 mm vaihtopaksuudella, mutta se ei eroa merkittävästi huoltovälin 5 tkm vaihtopaksuudella 10 mm saavutetusta kustannuksesta 3,50 snt / km. Koska jarrupaloja tarkastetaan tällä hetkelläkin 5 tkm välein, huoltoväli suositellaan pitämään samana.

Lyhemmillä huoltoväleillä pieni vaihtopaksuus on kustannustehokkaampi kuin suuri vaihtopaksuus, koska tiheällä huoltovälillä sakkokustannuksilta vältytään, vaikka vaihtopaksuus on pieni. Harvemmillä huoltovälillä joudutaan ennakoimaan eli nosta-

Taulukko 3: Kokonaiskustannus (snt / km) strategialla B vaihtopaksuuden ja huoltovälin mukaan. Huoltovälin optimikustannus on lihavoitu.

	1 tkm	2 tkm	5 tkm	10 tkm	20 tkm	50 tkm
5 mm	53,0	84,6	117	129	133	127
6 mm	4,99	10,1	38,6	74,4	105	119
7 mm	4,40	4,03	9,76	33,6	71,9	107
8 mm	4,54	3,99	4,39	15,7	48,1	94,1
9 mm	4,69	4,11	3,55	8,26	32,5	82,0
10 mm	4,85	4,24	3,50	5,28	22,3	71,1
11 mm	5,02	4,38	3,59	4,10	15,6	61,6
12 mm	5,21	4,53	3,71	3,70	11,4	53,4
13 mm	5,41	4,70	3,85	3,60	8,66	46,4
14 mm	5,63	4,87	4,00	3,67	7,03	40,4
15 mm	5,87	5,05	4,16	3,77	5,51	34,3
16 mm	6,10	5,27	4,34	3,93	5,17	30,7
17 mm	6,38	5,49	4,55	4,12	5,20	27,4
18 mm	6,71	5,74	4,77	4,33	5,15	23,1
19 mm	7,05	6,03	5,02	4,56	4,91	17,5
20 mm	7,43	6,34	5,30	4,83	4,60	12,2
21 mm	7,87	6,70	5,63	5,13	4,70	11,2
22 mm	8,35	7,11	5,99	5,48	5,01	11,8
⋮						
35 mm	295	169	78,8	41,3	20,9	22,7

maan vaihtopaksuutta, jotta jarrupalat kestävät seuraavaan huoltoon asti. Kiinteät kustannukset asettavat kuitenkin rajan sille kuinka tiheä huoltoväli on kannattava valita. Kuvassa 16 on esitetty kustannusten riippuvuutta huoltovälistä ja vaihtopaksuudesta. Huoltovälikohtaiset optimit on esitetty kuvassa ja ne sopivat hyvin suoralle. Koska strategia B ei seuraa jarrupalojen kulumisnopeuksia, niin huoltovälin pituudesta johtuva ennakko pitää ottaa huomioon vaihtopaksuutta asettaessa.

6.3 Strategia C

Ennustavan strategian C kustannukset huoltovälien ja vaihtopaksuuden mukaan on esitetty taulukossa 6 ja kuvassa 17. Optimaalinen vaihtopaksuus riippuu hieman huoltovälin pituudesta, mutta kaikilla testatuilla huoltoväleillä optimaalinen vaihtopaksuus on joko 6 tai 7 mm, koska ennakointi on strategiasta B poiketen sisällytetty strategian logiikkaan vaihtopaksuuden parametrin sijaan. Optimikustannus alenee huoltovälin pidentyessä 1 tkm – 20 tkm. Vaikuttaa siis siltä, että ennustustarkkuus on hyvä aina 20 tkm asti. 50 tkm huoltovälillä kustannukset lähtevät selvään nousuun, mikä selittyy ennustustarkkuuden epävarmuudella pitkällä huoltovälillä. Alimittai-

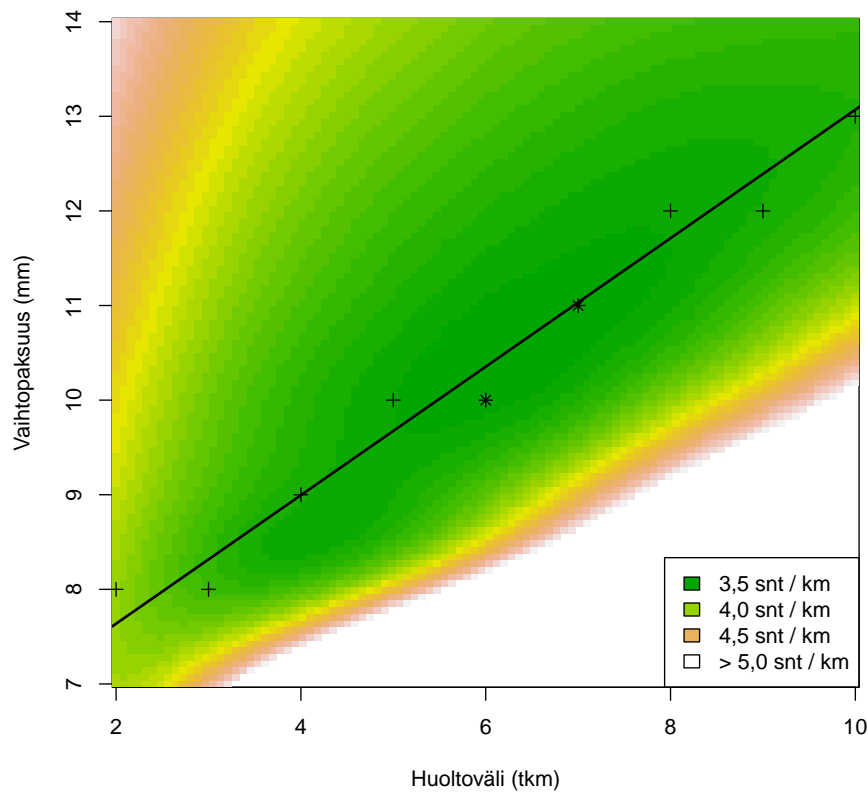
Taulukko 4: Alimittaisena vaihdettujen jarrupalojen osuus (%) strategialla B vaihtopaksuuden ja huoltovälin mukaan.

	1 tkm	2 tkm	5 tkm	10 tkm	20 tkm	50 tkm
5 mm	33	56	78	89	94	97
6 mm	0,47	4,1	24	49	71	88
7 mm	0,00	0,10	4,3	20	47	77
8 mm	0,00	0,00	0,70	8,1	30	65
9 mm	0,00	0,00	0,11	3,2	19	55
10 mm	0,00	0,00	0,02	1,3	12	46
11 mm	0,00	0,00	0,00	0,51	7,4	38
12 mm	0,00	0,00	0,00	0,21	4,7	32
13 mm	0,00	0,00	0,00	0,08	3,0	26
14 mm	0,00	0,00	0,00	0,04	1,9	22
15 mm	0,00	0,00	0,00	0,01	1,0	17
16 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	15
17 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,64	12
18 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	9,5
19 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,29	6,4
20 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	3,7
21 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,0
22 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,0
⋮						
35 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,8

Taulukko 5: Optimaalinen vaihtopaksuus ja vastaava kustannus strategialla B huoltovälin pituuden mukaan. Tarkempaa tarkastelua varten simuloitujen huoltovälien on kursivoitu. Matalin kustannus on lihavoitu.

	1 tkm	2 tkm	5 tkm	<i>6 tkm</i>	<i>7 tkm</i>	10 tkm	20 tkm
Vaihtopaksuus (mm)	7	8	10	10	11	13	20
Kustannus (snt / km)	4,40	3,99	3,50	3,48	3,47	3,60	4,60
Alimittaisten osuus (%)	0,00	0,00	0,02	0,08	0,05	0,08	0,07

senä vaihdettujen jarrupalojen prosenttiosuudet kullakin parametrikombinaatiolla on esitetty taulukossa 7, josta nähdään, että alimittaisena vaihdettujen osuus pysyy yli 3 % tasolla 50 tkm huoltovälillä. Muilla huoltoväleillä optimissa alimittaisena vaihdettujen osuus on alle 0,1 %. Parhaat huoltovälit strategialle C ovat 15 tkm ja 20 tkm, joilla kokonaiskustannus on 2,89 snt / km. Liian myöhään vaihtamisen todennäköisyys on tällöin 0,00 – 0,01 %.



Kuva 16: Strategian B kustannukset huoltovälin ja vaihtopaksuuden funktiona. Kunkin huoltovälin optimaalinen vaihtopaksuus on merkitty kuvaan. Optimit mukailevat suoraa. Optimaalinen huoltoväli vaikuttaisi olevan 6 tkm – 7 tkm ympäristössä.

Taulukko 6: Kokonaiskustannus (snt / km) strategialla C vaihtopaksuuden ja huoltovälin mukaan. Huoltovälin optimikustannus on lihavoitu.

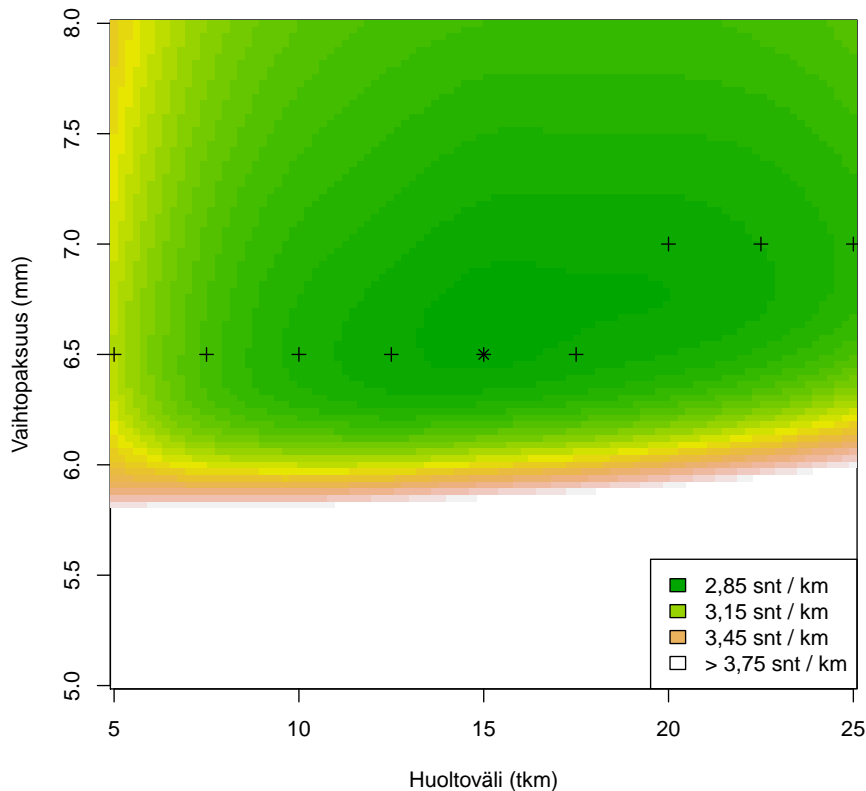
	1 tkm	2 tkm	5 tkm	10 tkm	15 tkm	20 tkm	50 tkm
5 mm	23,4	30,3	27,1	19,7	15,9	14,0	16,4
6 mm	4,30	3,86	3,38	3,24	3,31	3,46	10,5
7 mm	4,43	3,92	3,25	2,96	2,89	2,89	8,90
8 mm	4,57	4,03	3,35	3,06	2,99	2,99	8,95

6.4 Strategia D

Opportunistinen strategia D toteutettiin kahdella heuristiikalla. Kustannus vaihtopaksuudella 7 mm ennusteikkunan pituuden funktiona on esitetty kuvassa 18. Kuvasta nähdään, että heuristiikalla ei ole suurta merkitystä, joten jatkoanalyseissa on käytetty nopeampaa heuristiikkaa 1. Lisäksi kuvasta voidaan nähdä, että ennusteikkunan pituus kannattaa valita 20 tkm kohdalle, koska kustannus lähtee lievään

Taulukko 7: Alimittaisena vaihdettujen jarrupalojen osuus (%) strategialla C vaihtopaksuuden ja huoltovälin mukaan.

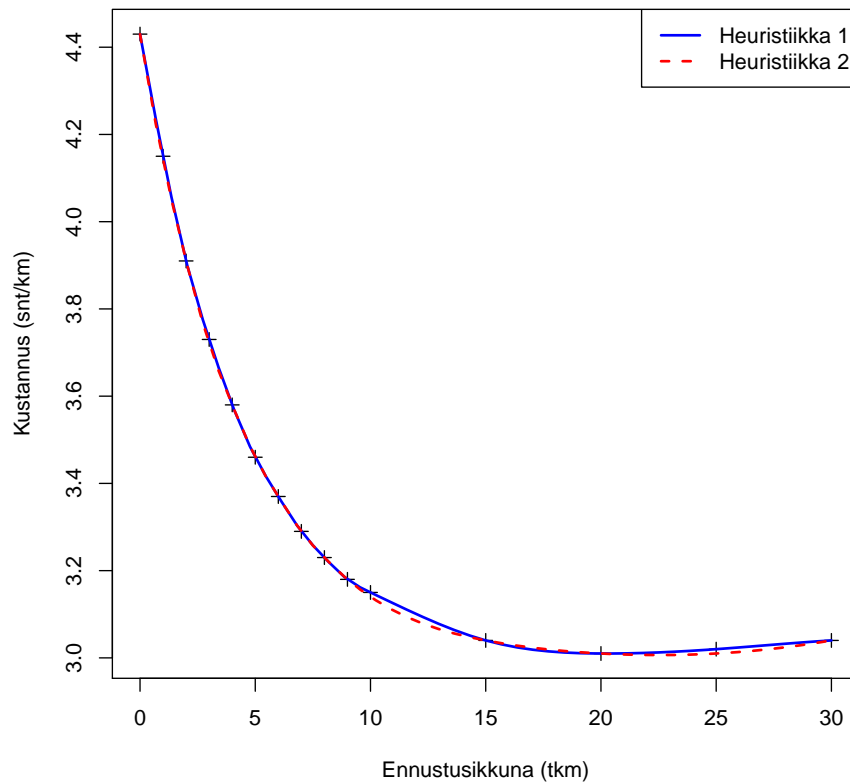
	1 tkm	2 tkm	5 tkm	10 tkm	15 tkm	20 tkm	50 tkm
5 mm	13	18	16	11	8,6	7,2	8,0
6 mm	0,00	0,04	0,15	0,24	0,32	0,42	4,3
7 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	3,2
8 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,0



Kuva 17: Strategian C kustannukset huoltovälin ja vaihtopaksuuden funktiona. Kunkin huoltovälin optimaalinen vaihtopaksuus on merkitty kuvaan. Optimaalinen vaihtopaksuus kasvaa hieman huoltovälin kasvaessa. Optimaalinen huoltoväli näyttää olevan 15 tkm ympäristössä.

nousuun pitkän ikkunan aiheuttamien ennustevirheiden vuoksi.

Toinen tapa arvioida sopivaa ennustusikkunan pituutta on tarkastella jarrupalojen maksimikestoja tekemällä otanta jarrupalojen kulumisnopeuksien jakaumasta ja laskeamalla jarrupalojen kesto olettaen, että kaikki käytettävissä oleva kitkapinta 30 mm käytetään hyödyksi. Kuvaan 19 on piirretty maksimikestojen jakauma. Tiheysfunk-

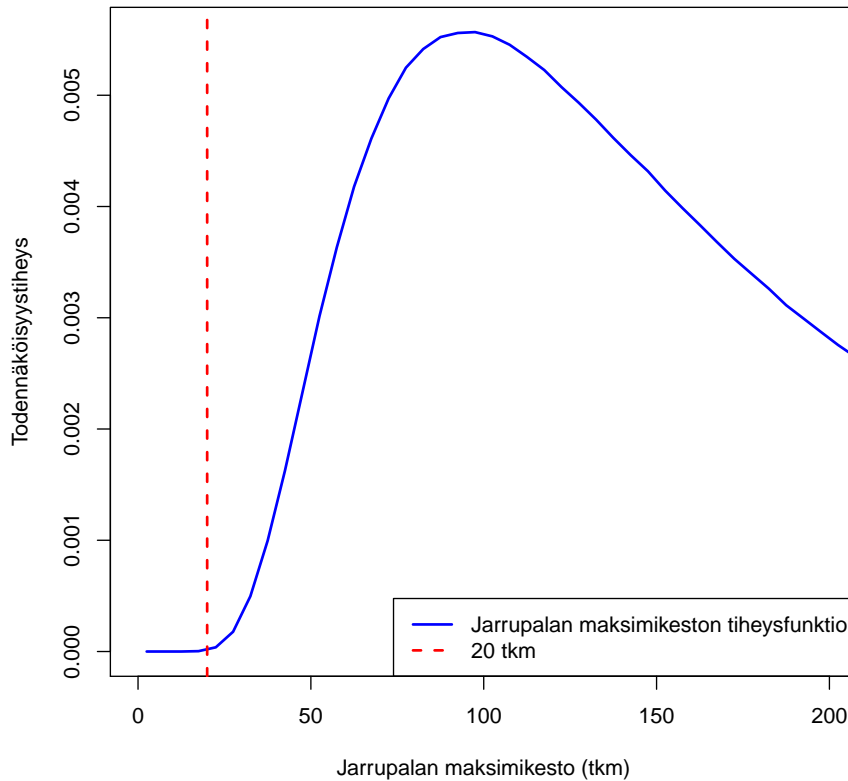


Kuva 18: Strategian D kustannukset kahdella eri heuristiikalla vaihtopaksuudella 7 mm ennustusikkunan pituuden funktiona. Kustannus laskee 20 tkm asti, jonka jälkeen kustannus alkaa nousta hieman ennusteen epätarkkuuden seurauksena. Heuristiikat tuottavat käytännössä saman kustannuksen.

tiosta nähdään, että käytännössä kaikki jarrupalat kestävät vähintään 20 tkm. Tämän tiheysfunktion perusteella 20 tkm alituksen todennäköisyys onkin noin 0,002 %. Ennustusikkuna on liian pitkä, mikäli jarrupaloilla on suuri todennäköisyys kulua loppuun ennustusikkunan aikana, sillä toteutettu algoritmi ei ota huomioon tilannetta, jossa jarrupalat kuluvat loppuun useamman kerran ennustusikkunan aikana.

Taulukossa 8 on esitetty strategian D kustannus ja alimittaisena vaihdettavien jarrupalojen osuus joukolla vaihtopaksuuksia. Vaihtopaksuudet ovat hyvin lähellä alarajaa 5 mm, koska huoltoväli on tihein mahdollinen eli 1 tkm. Kustannukset ovat matalat ja alimittaisten osuus pieni vaihtopaksuuksilla 5,2 mm, 5,4 mm, 5,6 mm ja 5,8 mm. Vaihtopaksuudella 5,4 mm ja 5,6 mm kustannus saavuttaa optimin 2,86 snt / km. Kustannusten tasosta optimissa ja kuvan 18 käyrän laskevasta osasta voidaan todeta, että opportunistinen ryhmittely toimii.

Kustannusten riippuvuus huoltomahdollisuuden välistä ja vaihtopaksuuden arvoista



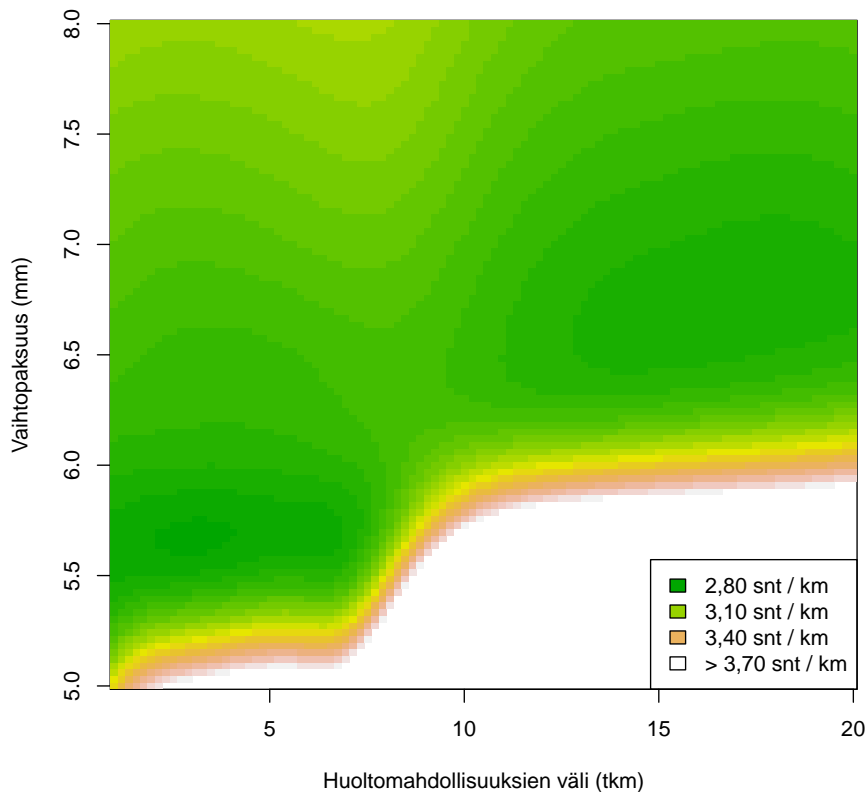
Kuva 19: Jarrupalojen maksimikestojen jakauman tiheysfunktio.

Taulukko 8: Strategian D kustannus ja alimittaisena vaihdettujen jarrupalojen osuus vaihtopaksuuden mukaan, kun ennustusikkunan pituus on 20 tkm. Huoltomahdollisuus on 1 tkm välein.

	5,0 mm	5,2 mm	5,4 mm	5,6 mm	5,8 mm
Kustannus (snt / km)	3,27	2,92	2,86	2,86	2,88
Alimittaisten osuus (%)	0,29	0,06	0,01	0,00	0,00

on myös esitetty kuvassa 20. Lähellä huoltomahdollisuuksien väliä 20 tkm strategia D vastaa strategiaa C, kun huoltojen ryhmittely ei tuota lisäsäästöjä, sillä kustannustehokkainta on suorittaa jarrupalojen vaihtoja jokaisessa huollossa. Toteutettu opportunistinen strategia vaikuttaa toimivan kohtuullisen hyvin huoltomahdollisuuksien väleillä 1 tkm – 5 tkm.

Kuvaan 21 on piirretty toteutuneet huoltovälit 1 tkm huoltomahdollisuudella, 5,5 mm vaihtopaksuudella ja 20 tkm ennustusikkunan pituudella. Nähdään, että suurin osa huolloista tapahtuu 15 tkm – 20 tkm välein. Jakauman vasemmanpuoleinen loiva häntä ja 1 tkm korkea arvo johtuvat mittausepä-tarkkuuden aiheuttamasta



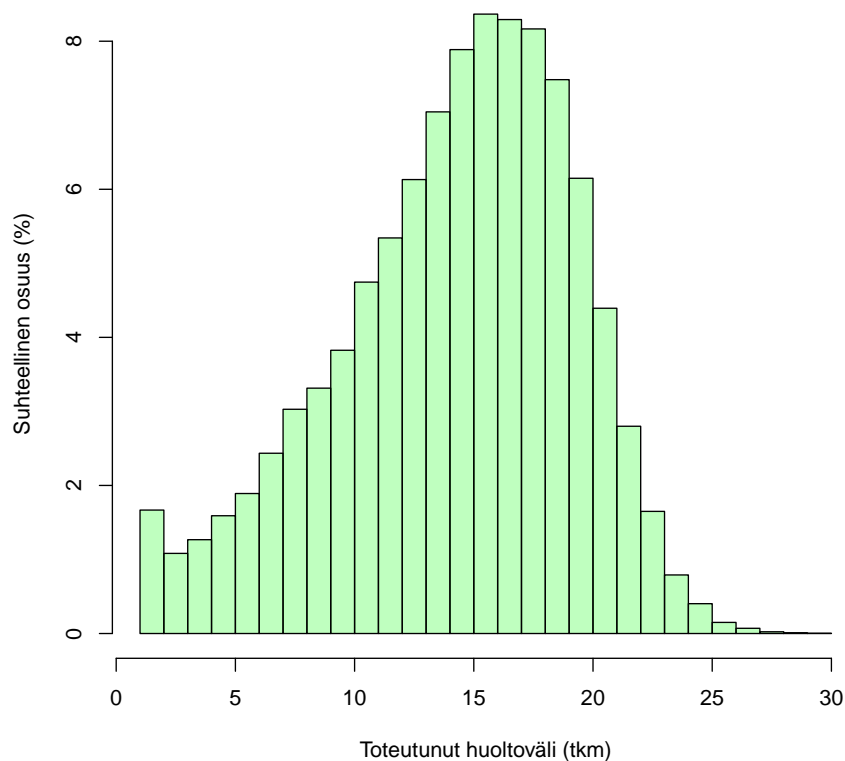
Kuva 20: Strategian D kustannukset huoltomahdollisuuden ja vaihtopaksuuden funktiona.

epävarmuudesta.

6.5 Nykytilan kustannukset

Tällä hetkellä tuotannossa oleva jarrupalojen vaihtostrategia vastaa strategiaa B. Taulukossa 1 esitetty mittaustarkkuuden keskihajonta 0,5 mm vastaa automaattisella mittalaitteella saavutettavaa mittaustarkkuutta. Nykykäytännön mukaan jarrupalojen paksuus määritetään silmämääräisesti, joten paksuus vaihtelee huomattavasti, kuten kuvassa 22 on esitetty. Simuloidut arvot vastaavat havaittuja arvoja melko hyvin, kun mittauksen epätarkkuutta kuvaavana hajontana käytetään arvoa 3,5 mm, huoltovälinä alustan tarkastuksen väliä 5 tkm ja strategian B vaihtorajana 10 mm. Kustannukset ovat tällöin 5,27 snt / km ja alimittaisena vaihdettujen jarrupalojen osuus on 0,72 %.

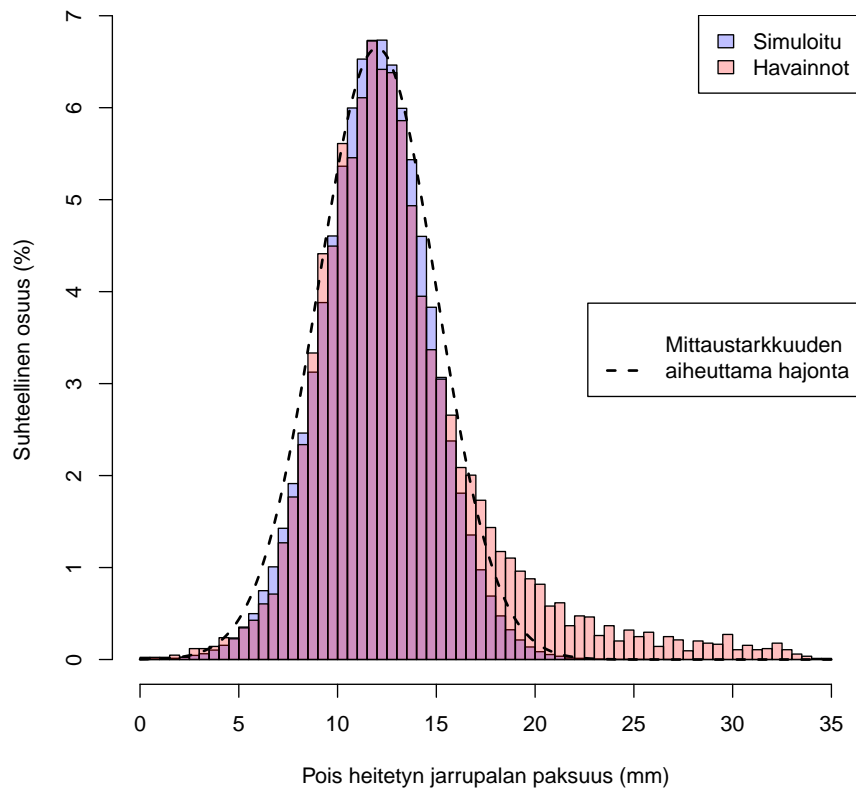
Tarkastellaan simulaation ulostuloa strategialla B ja nykytilaa vastaavilla parametreil-



Kuva 21: Strategian D toteutuneiden huoltovälien jakauma.

la. Kuvassa 23 on esitetty yhden jarrupalan kulumista ja uusimista 500000 km ajalta. Ulostulo muistuttaa havaittua kulumiskäyttäytymistä (kuva 9), joten simulaation voidaan katsoa mallintavan yksittäisten jarrupalojen kulumistrendiä hyväksyttävällä tarkkuudella.

Junan kaikkien 128 jarrupalan simuloitujen kulumisnopeuksien keskiarvon jakauma 5 tkm välein mitattuna nykytilaa parhaiten vastaavalla strategialla ja parametreilla on esitetty kuvassa 24. Jakaumasta nähdään, että koko junan jarrupalojen kulumisnopeuden keskiarvon vaihtelu on pieni verrattuna yksittäisten jarrupalojen kulumisnopeuksien jakaumaan (kuva 10). Mikäli koko junan jarrupalojen kulumisnopeuksien keskiarvo saisi arvoja läheltä nollaa, voitaisiin todeta, ettei simulaatio ole realistinen. Keskiarvon tulee pysyä selvästi positiivisena, sillä juna ei pysähdy, jos mikään jarrupala kulu lähes ollenkaan. Vastaavasti todella suuri keskimääräinen kulumisnopeus ei vastaisi todellisuutta hyvin normaalitilanteessa. Simulaation ulostulo näyttää myös tältä osin uskottavalta.

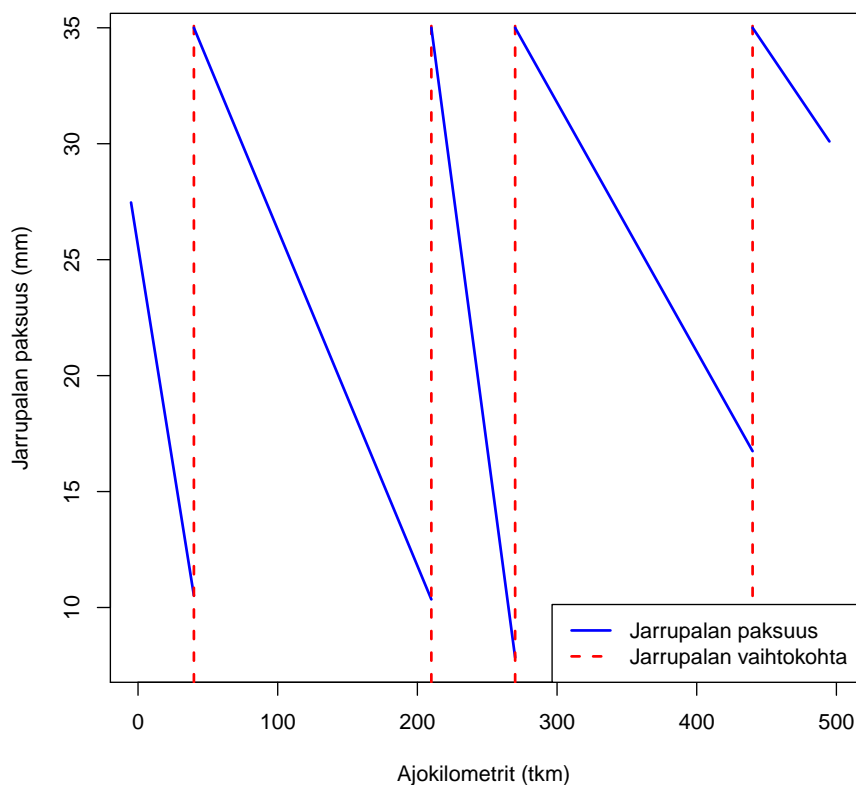


Kuva 22: Simuloitujen ja havaittujen vaihtopaksuuksien jakaumat, missä mittauksen hajonta on 3,5 mm ja strategian parametrit ovat 10 tkm ja 12 mm.

6.6 Strategian parametrien vaikutus

Kunkin strategian kohdalla havaittiin riippuvuuksia kokonaiskustannuksen ja strategioiden parametrien välillä. Strategian A kustannukset putoavat likimain eksponentiaalisesti huoltovälin funktiona pienillä huoltoväleillä, mutta optimaalisen huoltovälin 35 tkm ympäristössä kokonaiskustannusten suhteellinen muutos huoltovälin funktiona ei ole erityisen suuri. Huoltovälin lyhentäminen 20 % arvoon 28 tkm kasvattaa kustannukset arvosta 14,5 snt / km arvoon 15,5 snt / km eli noin 7 %. Vastaavasti huoltovälin pidentäminen 20 % arvoon 42 tkm kasvattaa kustannukset arvoon 16,8 snt / km eli noin 16 %. Kokonaiskustannus ei siis ole erityisen herkkä huoltovälin pituuden parametrille strategialla A optimin ympäristössä.

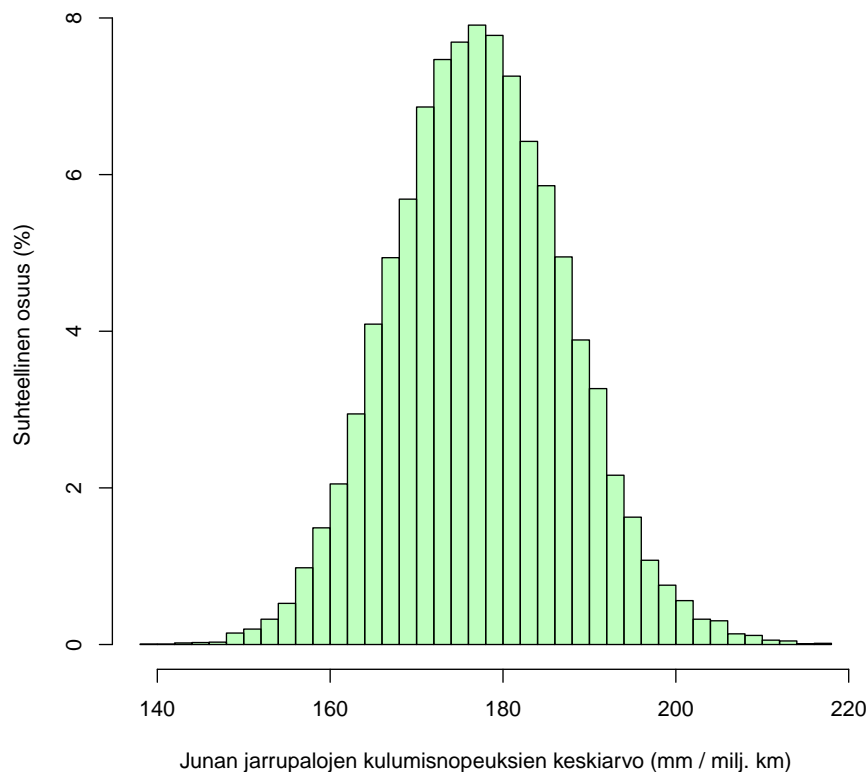
Strategialla B huoltovälillä ja vaihtopaksuudella on vahva yhteys, kuten kuvasta 16 voidaan todeta. Mikäli parametripari valitaan kuvaan piirretyn suoran ympäristöstä, kustannus käyttäytyy melko sileästi. Kustannus kuitenkin kasvaa todella nopeasti, jos kutakin huoltoväliä vastaava paras vaihtopaksuus alitetaan.



Kuva 23: Simulaation mallintama yhden jarrupalan kuluminen nykytilaa parhaiten vastaavilla parametreilla.

Kuvasta 17 voidaan havaita, että strategialla C parametreilla ei ole selkeää yhteisvaikutusta, ja kustannus on alle 3,75 snt / km kaikilla huoltoväleillä 5 tkm – 25 tkm ja vaihtopaksuuden arvoilla 6 mm – 8 mm. Tarkastelemalla taulukon 6 kustannuksia havaitaan, että kustannus on alle 5 snt / km myös huoltoväleillä 1 tkm ja 2 tkm, kun vaihtopaksuus on 6 mm – 8 mm. Huoltovälin pituudella 50 tkm kustannukset ovat selkeästi korkeammat kuin huoltovälillä 20 tkm. Kokonaiskustannus ei siis ole herkkä parametrien arvoille optimin ympäristössä, mutta liian pienellä vaihtopaksuudella tai liian suurella huoltovälillä kustannukset lähtevät jyrkkään kasvuun.

Strategian D kokonaiskustannus ei riipu merkittävästi ennustusikkunan pituudesta optimin ympäristössä, kuten kuvasta 18 nähdään. Kun huoltomahdollisuuksien väli on 1 tkm – 5 tkm, optimaalinen vaihtopaksuus on noin 5,5 mm. Kun huoltomahdollisuuksien väliä kasvatetaan arvosta 5 tkm arvoon 10 tkm, pienin hyväksyttävä vaihtoväli kasvaa nopeasti. Kun huoltomahdollisuuksien väli on välillä 10 tkm – 20 tkm, strategian D käyttäytyminen muistuttaa strategiaa C, jolloin opportunistisen strategian idea ei enää pääse toteutumaan. Voidaan siis sanoa, että strategia D ei ole herkkä, kun huoltomahdollisuuksien väli kuuluu välille 1 tkm – 5 tkm ja



Kuva 24: Simuloitu junan jarrupalojen keskiarvon muodostama jakauma.

vaihtopaksuus on 5,5 mm – 8,0 mm.

6.7 Kustannusten vaikutus

Huollon muuttuvien kustannusten 20 % kasvamisen vaikutus on esitetty strategialle A taulukossa 9. Optimia tiheämmillä huoltoväleillä muuttuvien kustannusten nousu menee lähes suoraan kokonaiskustannuksen nousuun. Tämä tarkoittaa myös sitä, etteivät kiinteät kustannukset ole merkittävä tekijä optimin ympäristössä. Kun huoltoväliä pidennetään, muuttuvien kustannusten korotus ei mene suoraan kokonaiskustannusten nousuun. Tämä johtuu siitä, että pitkillä huoltoväleillä sakkokustannusten osuus lähtee nousuun. Muuttuvien kustannusten 20 % nousu ei muuta optimaalisen huoltovälin pituutta 35 tkm.

Strategialla B optimissa 5 tkm huoltovälillä ja 10 mm vaihtopaksuudella kustannus oli 3,50 snt / km. Mikäli muuttuvat kustannukset nousevat 20 %, kokonaiskustannus nousee 16 % arvoon 4,06 snt / km. Huoltovälillä 5 tkm optimaalinen vaihtopaksuus

Taulukko 9: Muuttuvien kustannusten eli jarrupalakohtaisten kustannusten (materiaali ja työ) 20 % kasvun vaikutus strategian A kokonaiskustannuksiin.

	20 tkm	25 tkm	30 tkm	35 tkm	40 tkm
Kokonaiskustannukset (snt / km)	25,0	20,2	17,6	16,9	17,9
Kokonaiskustannusten kasvu (%)	20	20	19	17	13

on kustannusten nousun jälkeen silti 10 mm. Myös pidemmällä 10 tkm huoltovälillä ja lyhyemmällä 2 tkm huoltovälillä optimaalinen vaihtopaksuus pysyy millimetrin tarkkuudella samana. Kiinteiden kustannusten noustessa 20 % kokonaiskustannus nousee puolestaan 4 %, koska sakkokustannusten osuus kokonaiskustannuksesta on hyvin pieni. Optimaalinen huoltoväli ja vaihtopaksuus pysyvät silti muuttumattomina kokeiltujen parien perusteella.

Kun tarkastellaan strategiaa C, havaitaan, että optimin ympäristössä kustannusten suhde kiinteiden ja muuttuvien kustannusten välillä kokonaiskustannuksissa on samaa luokkaa kuin strategialla B. 20 tkm huoltovälillä ja 7 mm vaihtopaksuudella 20 % nousu muuttuvissa kustannuksissa nostaa kokonaiskustannuksia 16 % ja vastaavasti 20 % nousu kiinteissä kustannuksissa nostaa kokonaiskustannuksia 4 %. Optimaaliset parametrit eivät eroa kokeillun joukon puitteissa muuttuvien eikä kiinteiden kustannusten noustessa.

Myös strategialla D muuttuvien kustannusten kasvulla on merkittävästi suurempi vaikutus kuin kiinteiden kustannusten kasvulla, kuten taulukossa 10 on esitetty. Mikäli muuttuvat kustannukset nousevat 20 %, kokonaiskustannus nousee 17 %–19 % kokeillailla vaihtopaksuuden arvoilla. Muuttuvien kustannusten nousu aiheuttaa sen, että 5,4 mm vaihtopaksuus on 0,02 snt / km kustannustehokkaampi kuin 5,6 mm vaihtopaksuus, vaikka perustapauksessa kustannukset olivat yhtä suuret. Kohonnut muuttuva kustannus aiheuttaa sen, että jarrupalan kulutuspinnasta kannattaa käyttää hieman enemmän hyödyksi silläkin uhalla, että alimittaisten jarrupalojen osuus kasvaa hieman. Eroa ei voida pitää kovin merkittävänä, sillä vaihtopaksuus 5,4 mm antaa matalimman kustannuksen kummassakin tapauksessa.

Taulukko 10: Strategian D muuttuvien kustannusten 20 % kasvun vaikutus kokonaiskustannuksiin vaihtopaksuuden mukaan, kun ennustusikkunan pituus on 20 tkm. Huoltomahdollisuus on 1 tkm välein.

	5,0 mm	5,2 mm	5,4 mm	5,6 mm	5,8 mm
Kokonaiskustannukset (snt / km)	3,81	3,45	3,38	3,40	3,41
Kokonaiskustannusten kasvu (%)	17	18	18	19	18

6.8 Mittausvirheen vaikutus

Edellisissä tuloksissa oli mukana taulukon 1 mukainen mittausvirheen mallinnus. Strategiassa A ei tehdä mittauksia, joten mittausvirhe ei vaikuta tuloksiin. Strategiassa B käytettäessä jarrupalan paksuuden mittausvirhe on oleellinen, mutta kulumisnopeutta ei estimoida. Strategioilla C ja D myös kulumisnopeuden virhe vaikuttaa strategian hyvytyteen. Seuraavaksi käsitellään strategioiden B – D tulokset simulaatioajoissa, joissa ei mallinnettu mittausvirhettä.

Strategian B tulokset ilman mittausvirheen mallinnusta on esitetty taulukossa 11. Tiheillä huoltoväleillä 1 tkm ja 2 tkm optimaalinen vaihtopaksuus alenee yhdellä millimetrillä ja kustannus alenee noin 3 %. Tiheällä huoltovälillä kulumisnopeuden satunnaisuus ei vaikuta yhtä paljon kuin pidemmällä huoltoväleillä, joten merkittävä osa epävarmuudesta syntyy mittauksen epätarkkuudesta. 5 tkm ja 10 tkm huoltoväleillä optimaalinen vaihtopaksuus pysyy samana ja kustannukset alenevat alle 1 %, eli mittausvirheen vaikutus on pieni. Pitkällä 20 tkm huoltovälillä optimaalinen vaihtopaksuus pysyy samana, mutta kustannukset pienenevät lähes 4 % pienentyneiden sakkokustannusten seurauksena. Kokonaisuutena mittausvirheen muutos strategialla B on pieni, koska optimaaliset parametrien arvot pysyvät samoina 5 tkm ja 10 mm eikä kokonaiskustannus muutu merkittävästi.

Taulukko 11: Optimaalinen vaihtopaksuus ja vastaava kustannus strategialla B huoltovälin pituuden mukaan. Jokaiselle huoltovälille on lisäksi laskettu vaihtopaksuuden ja kustannuksen ero mittausvirheen sisältämään tapaukseen nähden.

	1 tkm	2 tkm	5 tkm	10 tkm	20 tkm
Vaihtopaksuus (mm)	6	7	10	13	20
Kustannus (snt / km)	4,24	3,86	3,47	3,58	4,43
Vaihtopaksuuden ero (mm)	-1	-1	0	0	0
Kustannuksen ero (%)	-3,6	-3,3	-0,9	-0,6	-3,7

Tulokset strategialle C on esitetty taulukossa 12. Ilman mittausvirhettä strategialla C vaihtopaksuus kannattaa kaikilla testatuilla huoltoväleillä asettaa minimiin eli arvoon 5 mm. Lyhyillä huoltoväleillä 1 tkm ja 2 tkm kustannussäästö on noin 4 % eli samaa luokkaa kuin strategialla B. Selkeä ero verrattuna strategiaan B on se, että kustannussäästö kasvaa huoltovälin pidentyessä. 50 tkm huoltovälillä mittausepä-tarkkuuden poistosta saatava säästö on yli 10 %. Optimaalinen huoltoväli pysyy silti samana eli se on 20 tkm myös mittausvirheettömässä tapauksessa. Kustannussäästön suuruus optimissa on 6,9 % eli mittausvirhettä kannattaa pyrkiä parantamaan.

Strategialla D mittausvirhe poistamalla optimi saavutetaan vaihtopaksuudella 5 mm. Kustannus on tällöin 2,68 snt / km. Mittausvirheen kanssa optimi saavutettiin vaihtopaksuudella 5,5 mm ja kustannus oli 2,85 snt / km. Mittausepä-tarkkuuden poisto säästää noin 6 % eli merkitys on samaa luokkaa kuin strategialla C.

Taulukko 12: Optimaalinen vaihtopaksuus ja vastaava kustannus strategialla C huoltovälin pituuden mukaan. Jokaiselle huoltovälille on lisäksi laskettu vaihtopaksuuden ja kustannuksen ero mittausvirheen sisältämään tapaukseen nähden.

	1 tkm	2 tkm	5 tkm	10 tkm	20 tkm	50 tkm
Vaihtopaksuus (mm)	5	5	5	5	5	5
Kustannus (snt / km)	4,12	3,68	3,06	2,78	2,69	7,96
Vaihtopaks. ero (mm)	-1	-1	-2	-2	-2	-2
Kustannuksen ero (%)	-4,2	-4,7	-5,8	-6,1	-6,9	-11

6.9 Huoltovälin epävarmuuden vaikutus

Yllä olevissa tuloksissa on oletettu, että suunniteltu huoltoväli toteutuu täydellisesti. Todellisuudessa toteutunut huoltoväli noudattaa jotakin jakaumaa. Tarkastellaan mitä eri strategioiden kustannuksille tapahtuu, jos huollot toteutetaan tasajakautuneesti suunnitellun huoltovälin ympärillä 20 % marginaalin sisällä.

Strategialla A huoltovälin satunnaisuus ei vaikuta kovinkaan merkittävästi. Suositellulla 25 tkm huoltovälillä kustannus nousee arvosta 16,9 snt / km arvoon 17,0 snt / km eli alle 1 %. Tämä näkyy myös siitä, että kustannusfunktio kuvassa 14 on melko tasainen optimin ympäristössä.

Strategian B kustannus vaihtelevalla huoltovälillä parametreilla 5 tkm ja 10 mm on 3,51 snt / km, joka on 0,01 snt / km suurempi kuin kustannus deterministisellä huoltovälillä. Kustannus ei siis muutu havaittavasti. 5 tkm huoltoväli on sen verran lyhyt, ettei 20 % ero vaikuta jarrupalojen kuluneisuuteen merkittävästi. Lisäksi strategian B täytyy sietää vaihtelua jarrupalojen kulumisnopeuksissa, jossa erot voivat olla moninkertaisia. Näistä syistä optimiparametreissa ei näy muutosta.

Huoltovälin satunnaisuus kasvattaa strategian C kustannukset optimaaliseksi todetuilla parametrien arvoilla 20 tkm ja 7 mm arvosta 2,89 snt / km arvoon 3,00 snt / km. Tiheämmällä huoltovälillä 10 tkm kustannukset eivät muutu merkittävästi, sillä kustannukset vaihtopaksuudella 7 mm ovat 2,97 snt / km. Satunnaisella huoltovälillä 10 tkm huoltoväli on hieman kustannustehokkaampi kuin 20 tkm. Strategia C on suhteellisen pitkän optimaalisen huoltovälinsä takia hieman herkkä huoltovälin satunnaisuudelle.

Strategialla D huoltovälin pituus on luonnostaan muuttuva, sillä mahdollisten huoltojen väli on 1 tkm, mutta algoritmi päättää huoltojen väliin jättämisestä. Mikäli 1 tkm potentiaalista väliä varioidaan 20 %, kustannus ei muutu havaittavasti. Vaikka mahdollisten huoltojen väli tuplataan arvoon 2 tkm, päästään silti samaan kustannukseen. Strategia D ei siis ole herkkä huoltovälin satunnaisuudelle.

6.10 Jarrupalojen kulumisnopeuserojen vaikutus

Mikäli kaikki jarrupalat kuluisivat samaa nopeutta, olisi huoltaminen halvempaa, koska kaikki kitkapinta saataisiin hyötykäyttöön ja huoltotapahtumien määrä minimoituisi. Käsijarruttomien ja käsijarrullisten sylinterien jarrupalat kuluvat keskimäärin eri nopeuksia, joten deterministisessäkin systeemissä ei päästäisi minimikustannukseen strategialla A. Lasketaan kuitenkin kustannuksen ala- ja ylärajat strategialla A sillä oletuksella, että alarajalla oletetaan kaikki sylinterit käsijarruttomiksi ja ylärajalla huolletaan käsijarrullisen sylinterin kulumisen mukaan.

Keskimääräisellä kulumisnopeudella käsijarruttoman sylinterin jarrupala kestäisi

$$\begin{aligned} \bar{d}_{\text{käsijarruton}} &= E \left[\frac{35 \text{ mm} - 5 \text{ mm}}{(\Gamma(1, 66; 0,00955) + 50) \text{ mm/milj.km}} \right] \\ &\approx 185000 \text{ km}, \end{aligned}$$

ja käsijarrullisen sylinterin jarrupala vastaavasti

$$\begin{aligned} \bar{d}_{\text{käsijarrullinen}} &= E \left[\frac{35 \text{ mm} - 5 \text{ mm}}{(\Gamma(2, 59; 0,00927) + 25) \text{ mm/milj.km}} \right] \\ &\approx 139000 \text{ km}. \end{aligned}$$

Kun kaikki jarrupalat vaihdetaan kerralla, yhden huoltokerran kustannus on

$$\begin{aligned} p_{\text{kerta}} &= 128 \times \left(2 \times 12 \text{ EUR} + 2 \times \frac{5}{60} \text{ h} \times 50 \frac{\text{EUR}}{\text{h}} \right) + 2 \times \frac{20}{60} \text{ h} \times 50 \frac{\text{EUR}}{\text{h}} \\ &= 4172 \text{ EUR}. \end{aligned}$$

Kun huolto, jossa vaihdetaan kaikki jarrupalat, suoritetaan keskimääräisen keston mukaan, saadaan kilometrihinnoiksi

$$p_{\text{käsijarruton}} = \frac{4172 \text{ EUR}}{185000 \text{ km}} \approx 2,26 \text{ snt / km}$$

$$p_{\text{käsijarrullinen}} = \frac{4172 \text{ EUR}}{139000 \text{ km}} \approx 3,00 \text{ snt / km}.$$

Tämän tuloksen perusteella voidaan sanoa, että deterministisen systeemin kustannus optimistrategialla on välillä 2,26 – 3,00 snt / km. Mikäli kaikki käsijarruttomat jarrupalat vaihdetaan 185000 km välein ja käsijarrulliset 139000 km välein toisistaan riippumatta, niin kokonaiskustannus olisi noin 2,42 snt / km. Jarrupalojen kulumisnopeuksien satunnaisuus moninkertaistaa kustannuksen strategialla A, sillä huoltovälin satunnaisuutta mallintavan systeemin optimikustannus strategialla A oli 14,5 snt / km. Strategioilla C ja D päästään kuitenkin lähelle deterministisen systeemin optimikustannusta, joten kulumisen satunnaisuuden vähentäminen esimerkiksi

älykkäiden jarrusylinterien avulla tuottaa ideaalitalanteessakin vain 10–20 % säästön. Suuria investointeja ei siis ole järkevää tehdä kulumisnopeuksien tasaamiseen. Kalluston käytettävyyden kannalta huoltokertojen minimoimisella voisi olla suurempi merkitys, mutta käytettävyyttä ei tämän työn puitteissa tarkasteltu.

6.11 Strategioiden vertailu

Tasaväliseen ennakoivaan huoltoon pohjautuva strategia A ei toimi hyvin jarrupaloille, koska jarrupalat eivät kulu samaan tahtiin. Strategia A:n optimi 14,5 snt / km on yli neljä kertaa kalliimpi kuin strategian B kustannus 3,50 snt / km. Kuntoon perustuva strategia B toimii suhteellisen hyvin, mutta sopivan huoltovälin ja vaihtopaksuuden valinta on tärkeä kustannustehokkuuden kannalta. Seuraamalla jarrupalojen paksumuksien lisäksi myös yksilöllisiä kulumisnopeuksia ennakoivan strategian C avulla kustannukset saadaan laskettua arvoon 2,89 snt / km eli säästö on 17 %. Strategia C mahdollistaa huoltovälin pidentämisen, josta seuraa kustannussäästön lisäksi myös herkkyys mittavirheelle ja huoltovälin epätasaisuudelle. Opportunistinen strategia D ei pääse merkittävästi alhaisempiin kustannuksiin kuin strategia C, mutta huoltovälin pituus ei ole merkittävä tekijä, mikä parantaa strategian D robustisuutta. Huonona puolena strategiassa D voidaan nähdä epäsäännöllinen huoltoväli, joka voi aiheuttaa haasteita käytännön toteutuksessa.

7 Automaattimittausperusteiseen huollon aikataulutukseen siirtymisen riskit ja edellytykset

Kun huoltoprosessia muutetaan, olisi syytä arvioida muutokseen liittyviä riskejä. Kalustoturvallisuus on ensiarvoisen tärkeää, eikä sitä saa vaarantaa. Jarrut ovat turvallisuutta ajatellen erittäin tärkeitä, joten niiden toimivuus tulee olla taattu. Mikäli jarrupala kuluu loppuun tai jopa tippuu pois paikaltaan, kyseisen jarrupalan jarrutusteho on vähentynyt. Mikäli merkittävä osa jarrupaloista ei jarruta täydellä teholla, vaikutus näkyy junan pysähtymismatkassa.

Pendolino-junassa on 64 jarrusylinteriä, joten yhden jarrusylinterin osuus kokonaisjarrutusvoimasta on alle 2 %. Turvallisuus ei vaarannu, vaikka yhden jarrusylinterin jarrupalat olisivat kuluneet niin loppuun, etteivät ne jarruttaisi ollenkaan. Lisäksi junissa on kiskojaru hätätilanteita varten, ja visuaalinen tarkastus voidaan varmuuden vuoksi tehdä strategian vaihtamisen jälkeenkin esimerkiksi nykyisen jarrupalahuollon eli 50 tkm välein. Voidaan siis todeta, että junan pysähtymiseen vaikuttava riski on muutoksessa hyvin pieni. Suurin riski automaattimittaukseen siirtymisessä on loppuun kuluneen jarrupalan aiheuttama vahinko jarrujärjestelmään, mikäli mittauslaitteessa, algoritmin toteutuksessa tai parametreissa on vikaa. Vanhaan toimintamalliin eli manuaalimittaukseen voidaan siirtyä helposti automaattimittauksen vikaantuessa, joten muutos ei ole peruuttamaton.

Suuremman riskin aiheuttavat tilanteet, jossa automaattimittaus väittää, ettei paloja tarvitse vaihtaa, vaikka todellisuudessa palat olisivat loppuun kuluneet. Tämä johtaa siihen, ettei manuaalimittaukselle nähdä tarvetta, jolloin virhetilannetta ei havaita kohtuullisessa ajassa. Tästä syystä käyttäjää varoitetaan tilanteissa, joissa mittausdata ei sovi oletettuun kulumismalliin. Lisäksi tarkkaillaan, milloin kukin jarrupala on viimeksi kehoitettu vaihtamaan. Mikäli jotakin jarrupalaa ei ole kehoitettu vaihtamaan tarpeeksi pitkään aikaan, järjestelmä antaa hälytyksen, koska joko kulumista ei ole tapahtunut tai sitä ei ole havaittu.

Vaikka mittausdata ei olekaan täysin virheetöntä, automaattimittauksen edellytyksenä on tarpeeksi luotettava mittausprosessi. Mikäli mittausdatan perusteella kuluminen on täysin normaalia, mutta todellisuudessa jarrupala onkin äkisti kulunut, vian havaitseminen on täysin mahdotonta. Jatkuvasti täysin virheellisiä mittaus tuloksia tuottavaa mittalaitetta ei tuotantokäyttöön kelpuutettaisi, mutta kohinan takia näin voi jollakin todennäköisyydellä tapahtua, vaikka mittalaitteessa olisikin hyväksyttävä määrä virhettä. Käytössä oleva laser-mittaus mittaa kunkin palan vain yhdestä kohdasta, joten vinoutta tai halkeamia ei myöskään pystytä havaitsemaan. Yksittäisten mittauservojen tarkkuuden lisäksi myös mittaustiheys vaikuttaa estimoinnin ja virheiden havaitsemisen tarkkuuteen. Tästä syystä on syytä asettaa mittaustiheydelle jokin minimiarvo, joka ohjaa junien kulkua mittalaitteen yli.

Automaattinen mittausjärjestelmä mahdollistaa vikatilojen paremman havaitsemisen, joka on parannus kalustoturvallisuuteen. Esimerkiksi vikatila, jossa tietyn akselin tai sylinterin jarrupalat eivät kulu lainkaan, voidaan havaita automaattimittauksen avulla. Manuaalimittauksella tällaisen virhetilanteen havaitseminen on vaikeaa, koska manuaalimittauksessa ei nähdä kulumisen trendiä – pelkästään nykyhetken paksuus. Kyseinen vika käytännössä aiheuttaa jarrutehon huononemisen aivan kuten loppuun kulunut jarrupalakin. Vauriota jarrulevyyn ei tosin synny toisin kuin loppuun kuluneen jarrupalan takia.

Mallin rakentamisessa käytetyt oletukset saattavat myös aiheuttaa virhettä. Mittausdatan perusteella voidaan havaita, ettei jarrupalojen kuluminen ole todellisuudessa täysin toisistaan riippumatonta. Saman jarrusatulan jarrupalojen hetkelliset kulumisnopeudet ovat lähempänä toisiaan kuin kahden satunnaisesti valitun jarrupalan. Tätä voidaan selittää sillä, että sylinterissä on jokin ominaisuus, joka vaikuttaa kumpaankin puoleen. Tässä työssä ei mallinneta jarrusylintereitä, vaan pelkästään 128 erillistä jarrupalaa. Mikäli esimerkiksi jarrupalan vaihtoon kuluva aika riippuisi sen sijainnista, tämä malli ei olisi tarpeeksi tarkka. Tässä mallissa kuitenkin oletetaan, että kaikki jarrupalat ovat homogeenisia eikä kahden eri päädyssä olevan jarrupalan vaihtaminen ole yhtään hitaampaa kuin kahden saman sylinterin jarrupalan. Todellisuudessa korrelaatiota kulumisnopeudessa esiintyy myös saman akselin ja saman vaunun jarrupalojen välillä, mutta mittausdatan perusteella se on huomattavasti jarrusatulan tasolla esiintyvää riippuvuutta pienempää, eikä niitäkään mallinneta tässä simulaatiossa. Lisätutkimus kulumisnopeuksien erojen syistä voisi mahdollistaa tarkemman mallinnuksen ja sitä kautta matalammat huoltokustannukset.

8 Yhteenveto

Työssä tarkasteltiin neljää strategiaa jarrupalojen vaihtoon Pendolino-junissa simuloinnin avulla. Jarrupalojen vaihtostrategiat valittiin edustamaan eri kunnossapitolajeja: ennaltaehkäisevää, kuntoon perustuvaa, ennustavaa ja opportunistista kunnossapitoa. Työssä kehitettiin simulointimalli, joka kuvaa jarrupalojen kulumista yhdessä junassa ajokilometrien suhteen riittävän todenmukaisesti mittausdataan pohjautuen. Mahdollisia huoltoajankohtia mallinnettiin tasavälisellä huoltovälillä, joka on yksi mallin parametreista. Huoltoajankohdan kohdalla strategia määritteli mitkä jarrupalat vaihdettiin. Mikäli huollossa vaihdettiin vähintään yksi jarrupala, huollosta katsottiin koituvan kiinteä kustannus. Muuttuvat kustannukset koostuivat uusittujen jarrupalojen materiaalikustannuksista ja vaihtotyön kustannuksista. Lisäksi simulaatiossa mallinnettiin sakko jarrupalan minimipaksuuden alittamisesta. Simulaatiota ajettiin riittävän suuri määrä kilometrejä, ja jokaisen huollon kustannukset summattiin yhteen. Mallin ulostuloksi laskettiin kustannus kilometriä kohti jakamalla kokonaiskustannus simuloituilla kilometreillä. Kappaleessa 6 tarkasteltiin kutakin strategiaa eri parametreilla ja etsittiin kustannustehokkain vaihtoehto. Strategioita verrattiin keskenään ja pohdittiin eroja niiden välillä. Tarkoituksena oli ennen kaikkea vertailla erilaisten huoltostrategioiden suorituskykyä eikä niinkään mallintaa jarrupalojen kulumista mahdollisimman hyvin.

Tulosten perusteella strategioiden kustannukset poikkeavat merkittävästi. Yksinkertainen ennakoivan huollon strategia, jossa kaikki junan jarrupalat vaihdetaan tasavälein, ei toimi kovinkaan hyvin. Huollon kustannus on korkea, ja merkittävä osa jarrupaloista vaihdetaan alimittaisena. Jarrupalojen kuntoa kannattaa siis mitata, mikä on nykyinenkin toimintatapa. Mitatun paksuuden huomioivalla kuntoon perustuvan kunnossapidon strategialla kustannukset voidaan pudottaa noin neljäsosaan verrattuna yksinkertaiseen ennakoivan huollon strategiaan. Optimaalisen vaihtorajapaksuuden ja huoltovälin pituuden välillä huomattiin olevan selkeä korrelaatio kuntoon perustuvan kunnossapidon strategiassa. Pelkkään jarrupalan paksuuteen perustuvan strategian ongelmana on se, ettei se ota huomioon jarrupalan kulumisnopeuden trendiä. Vaikka jarrupalojen kulumisnopeudet vaihtelevat paljon jarrupalasta toiseen, niin elinikänsä aikana pala kuluu melko tasaista tahtia. Tästä syystä ennustavaa strategiaa käyttämällä kustannukset alenivat vielä 17 % kuntoon perustuvaan kunnossapitoon verrattuna. Neljäntenä testattiin myös opportunistisen kunnossapidon strategiaa, jonka perusajatuksena on ryhmitellä jarrupalojen vaihdot huomioimalla tulevaisuuden huoltomahdollisuudet. Opportunistisella strategialla päästiin samaan kustannustasoon kuin ennustavalla strategialla, mikä kieli siitä, että strategia ja sen toteutus ovat toimivia. Opportunistisen strategian toteuttamisen monimutkaisuuden ja epätasaisen huoltovälin aiheuttaman resurssitarpeen vaihtelun vuoksi ennustavaa strategiaa voidaan kuitenkin pitää soveltuvimpana strategiana tähän ongelmaan.

Mittausaseman tuottamaa jarrupalojen paksuutta kuvaavaa dataa analysoitiin paljon,

joten kulumisnopeuksien jakaumat ovat melko hyvin tiedossa. Jarrupalan vaihtotyön kustannukset arvioitiin asiantuntijan toimesta, mutta tilastollisen otoksen kerääminen tuotantoon jalkautumalla voisi parantaa kustannusarvion tarkkuutta. Myöskään tarkkoja määriä tai kustannusseurauksia alimitalle menolle ei ollut käytettävissä, mutta niiden puuttuminen aiheuttaa epätarkkuutta suurimmaksi osaksi vain nykytilan kustannusten arviointiin, sillä jokaisen strategian optimissa sakkokustannukset ovat matalat. Mikäli päivitettyä kustannustietoa on myöhemmin saatavilla, tulokset on helppo päivittää. Mittaustarkkuuden arviot perustuivat niin ikään mittaustilanteen tuottaman datan ja arvioiden yhdistelmään, sillä verrokkidataa ei ollut käytettävissä. Lisäksi oletettiin, että mittalaitteen tuottamat virhemittaukset saadaan suodatettua pois. Mittaustuloksia hyödyntävien strategioiden tehokkuutta olisi mahdollisesti voitu parantaa ottamalla mittauksen epätarkkuus huomioon strategioiden algoritmeissa.

Tämän työn puitteissa toteutettiin ainoastaan simulointimalli. Todellisuudessa mittaustilanteen dataa hyödyntävät strategiat vaativat vaihdettavat jarrupalat listaavan algoritmin toteuttamisen ja tuotantoon viemisen. Tässä vaiheessa on tutkittu vain teoreettisia säästöjä, mutta sen jälkeen, kun algoritmi saadaan toimimaan jatkuvassa prosessissa ja toimintatapa jalkautettua tuotantoon, niin toteutuneita säästöjä voidaan arvioida jälkikäteen. Siitä huolimatta tämän työn tulokset auttavat ymmärtämään käytettävän huoltostrategian tärkeyden. Pelkästään käytössä olevan toimintatavan parametrien muuttamisella, kuten huoltovälin pituuden optimoinnilla, parasta mahdollista säästöpotentiaalia ei välttämättä saada hyödynnettyä. Seuraamalla komponentin kuntoa ja kunnan trendiä sekä ryhmittelemällä huolto-työt älykkäästi voidaan löytää kustannussäästöjä, joita ei ole mahdollista saavuttaa esimerkiksi yksinkertaisella aikaan perustuvalla huolto-ohjelmalla. Näin ollen data ja analytiikka ovat merkittäviä kyvykkyyksiä kilpaillulla markkinalla toimiville kunnossapitäjille.

Viitteet

- [1] Maintenance – Maintenance terminology. *Standardi SFS-EN 13306*, 2017, Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry.
- [2] How to improve efficiency of rolling stock maintenance operations. *Lean Rolling Stock Maintenance*, 2009, Oliver Wyman, <https://docplayer.net/27728804-Lean-rolling-stock-maintenance-how-to-improve-efficiency-of-rolling-stock-maintenance-operations.html>, haettu 28.5.2018.
- [3] Baumgartner, J.P. Prices and costs in the railway sector. *Laboratoire d'Intermodalité des Transports Et de Planification*, 2009, Lausanne.
- [4] Jardine, A., Lin, D., Banjevic, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, vol. 20, nro 7, s. 1483–1510.
- [5] CBM Policy Memorandum. Department of Defense, 2002, https://web.archive.org/web/20140701070946/http://www.acq.osd.mil/log/mpp/cbm+/cbm_policy_memorandum.pdf, haettu 19.2.2018.
- [6] Bell, J. Condition based maintenance plus DoD guidebook. *Assistant Deputy Under Secretary of Defense for Maintenance Policy and Programs*, 2007.
- [7] Ab-Samat, H., Kamaruddin, S. Opportunistic maintenance (OM) as a new advancement in maintenance approaches: A review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2014, vol. 20, s. 98–121.
- [8] Shi, H., Zeng, J. Real-time prediction of remaining useful life and preventive opportunistic maintenance strategy for multi-component systems considering stochastic dependence. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, vol. 93, s. 192–204.
- [9] Tambe, P., Mohite S., Kulkarni M. Optimisation of opportunistic maintenance of a multi-component system considering the effect of failures on quality and production schedule: A case study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 69, s. 1743–1756.
- [10] Bohoris, G.A., Desai A., Edge D.J. Modelling rail vehicle brake pad wearout and replacement. *Quality and Reliability Engineering International*, 1995, vol. 11, s. 129–137.
- [11] Gailis, M., Berjoza, D. On prediction of motor vehicle brake pad wearout. *Engineering for Rural Development*, 2012, vol. 11, s. 349–354.
- [12] Ding, F., Tian, Z. Opportunistic maintenance for wind farms considering multi-level imperfect maintenance thresholds. *Renewable Energy*, 2012, vol. 45, s. 175–182.

- [13] Besnard, F., Patrikssont, M., Stromberg, A., Wojciechowski, A., Bertling, L. An optimization framework for opportunistic maintenance of offshore wind power system. *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, 2009.
- [14] Shannon, R. Introduction to the art and science of simulation. *1998 Winter Simulation Conference. Proceedings*, 1998, vol. 1, s. 7–14.
- [15] Dowsland, K., Thompson, J. Simulated Annealing. *Handbook of Natural Computing*, Berlin, Springer, 2012, s. 1623–1655.
- [16] Law, A. *Simulation Modeling and Analysis*. New York, McGraw-Hill Education, 2015.
- [17] Law, A., McComas, M. How to build valid and credible simulation models. *Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001, vol. 1, s. 22–29.
- [18] Robinson, S. *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. Chichester, Wiley, 2004.
- [19] Law, A. A tutorial on how to select simulation input probability distributions. *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*, 2012, s. 1–15.
- [20] Roy, C. Review of code and solution verification procedures for computational simulation. *Journal of Computational Physics*, 2005, vol. 205, s. 131–156.
- [21] Carson, J. Model Verification and Validation. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 2002, vol. 1, s. 52–58.
- [22] Canny, J. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, vol. PAMI-8, s. 679–698
- [23] Aminikhanghahi, S., Cook, D. A Survey of Methods for Time Series Change Point Detection. *Knowledge and Information Systems*, 2017, vol. 51, s. 339–367.
- [24] Kalman, R. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME - Journal of basic Engineering*, 1960, vol. 82, s. 35–45.
- [25] Chang, G. Robust Kalman filtering based on Mahalanobis distance as outlier judging criterion. *Journal of Geodesy*, 2014, vol. 88, s. 391–401.
- [26] Mellin, I. *Todennäköisyyslaskenta*. Espoo, TKK, 2005, <http://math.tkk.fi/opetus/sovtoda/luennot/vanhat/TODSM100.pdf>, haettu 10.2.2019.
- [27] Lindley, D.V. *Understanding uncertainty*. Hoboken, New Jersey, Wiley, 2014.
- [28] Tuominen, P., Norlamo, P. *Todennäköisyyslaskenta, osa 2*. Helsinki, Limes, 1974.
- [29] Filmus, Y. *Two Proofs of the Central Limit Theorem*. University of Toronto, 2010, <http://www.cs.toronto.edu/~yuvalf/CLT.pdf>, haettu 10.2.2019.

- [30] Mori S., Nakata, D., Kaneda, T. An Application of Gamma Distribution to the Income Distribution and the Estimation of Potential Food Demand Functions. *Modern Economy*, 2015, vol. 6, s. 1001–1017.
- [31] de Almeida A.T., Bohoris, G.A. Decision theory in maintenance strategy of standby system with gamma-distribution repair-time. *IEEE Transactions on Reliability*, 1996, vol. 45, s. 216–219.
- [32] Clauset, A. *A brief primer on probability distributions*. Santa Fe Institute, 2011, http://tuvalu.santafe.edu/~aaronc/courses/7000/csci7000-001_2011_L0.pdf, haettu 10.2.2019.
- [33] Mellin, I. *Tilastolliset menetelmät: Varianssianalyysi*. Espoo, TKK, 2006, <http://math.tkk.fi/opetus/sovtoda/oppikirja/Varanal.pdf>, haettu 23.9.2018.
- [34] Myung I.J. Tutorial on maximum likelihood estimation. *Journal of Mathematical Psychology*, 2003, vol. 47, s. 90–100.
- [35] Pitkäranta, J. *Calculus Fennicus*. Helsinki, Avoimet oppimateriaalit ry, 2015.
- [36] Delignette-Muller M.L., Dutang C. fitdistrplus: An R Package for Fitting Distributions. *Journal of Statistical Software*, 2015, vol. 64, s. 1–34.
- [37] Mellin, I. *Tilastolliset menetelmät: Tilastolliset testit*. Espoo, TKK, 2006, <https://math.aalto.fi/opetus/sovtoda/oppikirja/Testit.pdf>, haettu 11.7.2018.
- [38] Holopainen, M., Pulkkinen, P. *Tilastolliset menetelmät*. Helsinki, WSOY Oppimateriaalit, 2008.
- [39] Wallsten, T.S., Budescu, D.V. State of the Art—Encoding Subjective Probabilities: A Psychological and Psychometric Review. *Management Science*, 1983, vol. 29, s. 151–173.
- [40] Pendolino-junan kuva, VR-Yhtymä Oy, https://www.vr.fi/cs/vr/img/d/1/1/Pendolino-kopio_Fi.png, haettu 11.5.2018.