

Raitiovaunun pyörien kulumisen mallinnus ja sorvausvälin optimointi

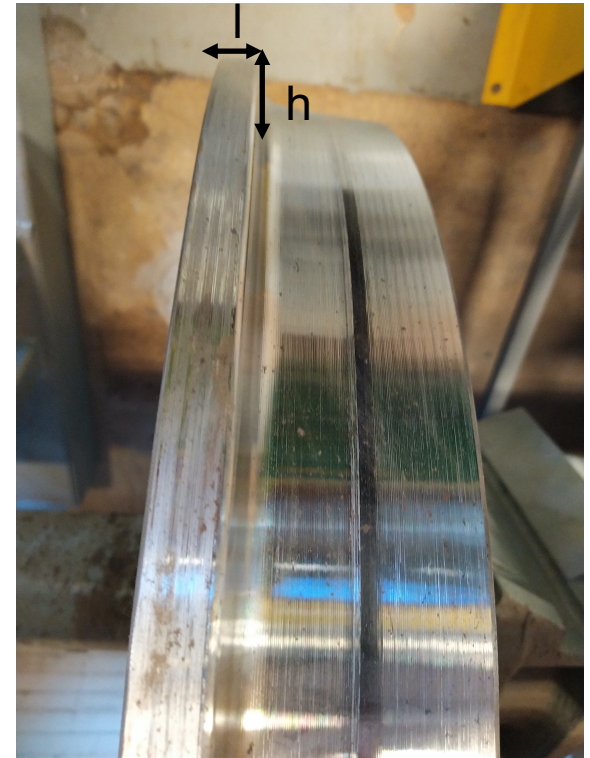
Aleksi Rintanen
päivämäärä muodossa 10.6.2020

Ohjaaja: *Riku Helanne*
Valvoja: *Antti Punkka*

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

Johdanto

- Kuluminen muuttaa pyörän muotoa
- Sorvauksella pyörä pidetään pyöreänä ja halutussa profiilissa
- Akseleidenkäännöllä tasataan kulumiseroja pyörissä
- Pyöriä voidaan sorvata joko kilometri- tai vikaperusteisesti (ennakoiva vs. vikaperustainen kunnossapito)
- Aineistona toimii Artic-raitiovaunujen pyöränmittaustulokset 7500km ajokilometrin välein
- Työn tavoitteena kehittää mallin pyörien kulumisesta ja määrittää optimaalinen sorvausväli mallin perusteella
- Työ on rajattu keskittymään vain sorvausväleihin, ei akselinkääntöihin



Kisko-pyöräkontakti

- Kiskon ja pyörän kontaktipinta on muodoltaan ellipsi
- Akselit ovat jäykät eivätkä siis salli pyörimiseroja akselin pyörien välillä
- Pyörien kartioisuus mahdollistaa erot vierimissäteissä
- Laipan sivuttaista kosketusta tapahtuu jyrkissä kaarteissa
- Laipan kärjen kosketusta tapahtuu vaunun ylittäessä ristikon osin vain laipan varassa

Kulumismekanismit ja -mallit

- Pyörään vaikuttaa useita kulumismekanismia, joista tärkeimmät adessiivinen ja abrasiivinen kuluminen
- On kehitetty useita malleja simuloimaan pyörien kulumista
- Archardin kulumisyhtälö:

$$V = K \frac{S N}{H}$$

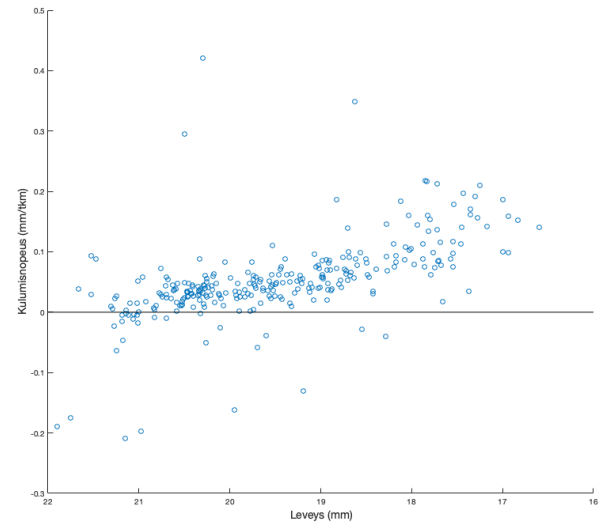
- USDF malli kulumiselle:
(Braghin et al., 2014)

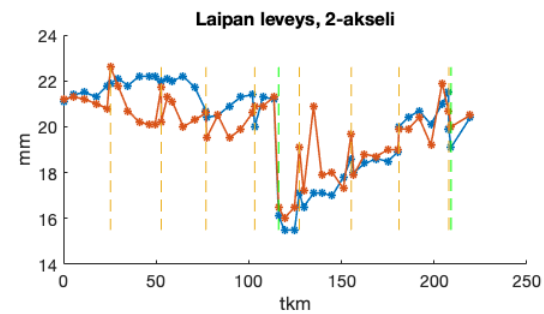
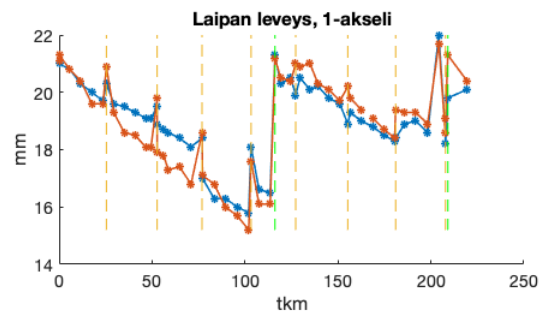
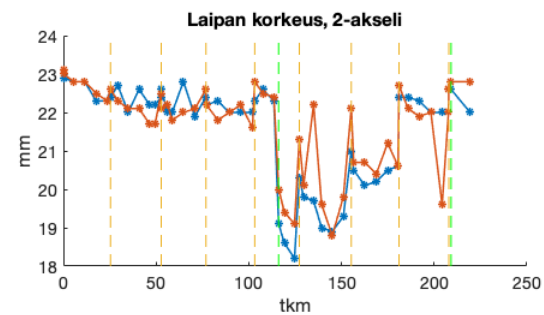
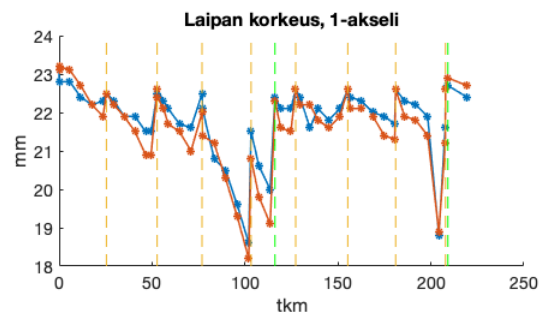
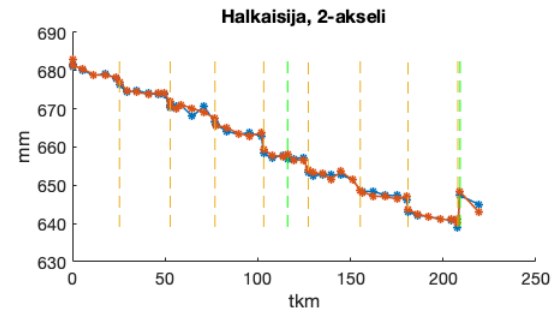
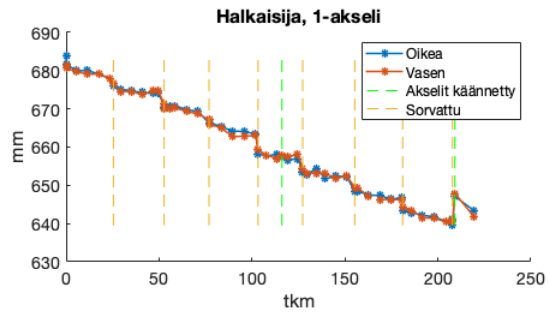
$$Wr = K_i \frac{\gamma N}{A}$$



Nykyinen kulumisnopeus

- Kuluminen voimakkainta 1-telillä
- Ensimmäisen akselin laippojen madaltuminen aiheuttaa ensisijaisen sorvaustarpeen
- Pyörät sorvataan nykyisellään noin 25 tkm välein ja akselit käännetään noin 100 tkm kohdalla
- Laipan korkeuden kulumisnopeus riippuu selvästi laipan leveydestä

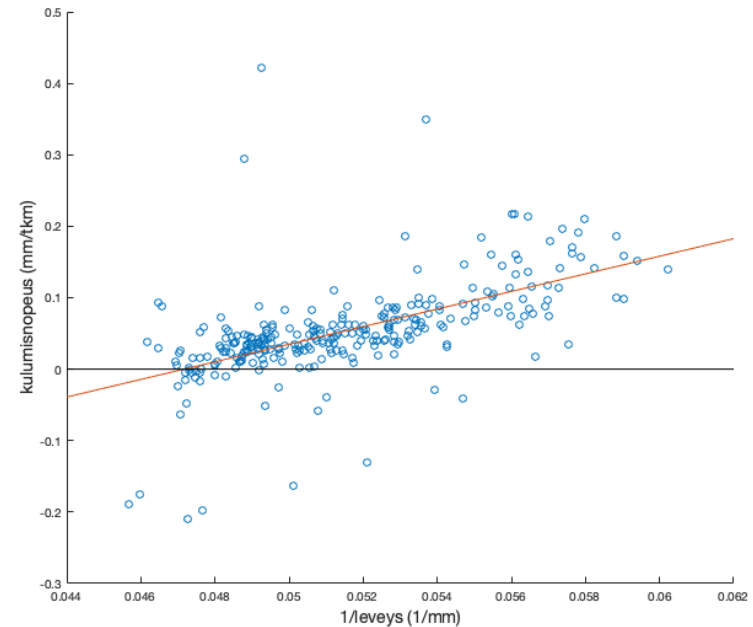




Mallin valinta

- Useissa kulumismalleissa pinnan kulumisnopeus on suoraan verrannollinen paineeseen
- Paine laipan kärjessä riippuu ainakin kuormasta, halkaisijasta ja laipan leveydestä
- Laipan kaventuessa paineen muutosta laipan kärjessä voidaan approksimoida:

$$\Delta p = \frac{F}{\Delta A} \approx \frac{1}{\Delta l}$$

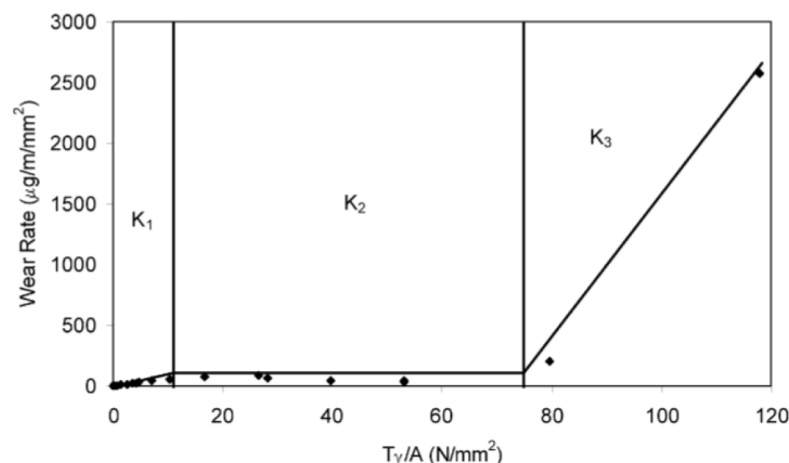


Mallin valinta

- Aikaisemmassa diplomityössä (Niippa Teemu 2014) kulumista oli mallinnettu lineaarisella regressiolla
- Mallinnetaan laipan leveyden kulumisnopeutta vakionopeudella ja huomioidaan leveyden vaikutus korkeuden kulumisnopeudessa

$$\begin{cases} l'(x) = -k_0 \\ h'(x) = -\frac{k_1}{l(x)} + k_2 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} l(x) = l_0 - k_0 x \\ h(x) = h_0 + k_2 x - k_1 \left(\frac{\log(l_0) - \log(l_0 - k_0 x)}{k_0} \right) \end{cases}$$



Kokeellisesti kaksoispyörällä määritetty kulumisnopeus (Braghin et al., 2014).
(Lupa julkaisuun opinnäytetyössä myönnetty)

Parametrien estimointi

- Oletetaan että mittausvirheet ovat riippumattomia ja normaalisti jakautuneet
- Estimoidaan parametrit PNS-menetelmällä $\min_{\bar{\beta}} \|\bar{y} - \hat{y}\|$

$$x = (x_{1,1}, x_{1,1}, \dots, x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{k,j})$$

$$\hat{l}_{k,j} = -\beta_0 x_{k,j} + \sum_{i=1}^m \delta_{i,j} \beta_j$$

$$\hat{h}_{k,j} = -\beta_0 x_{k,j} + \beta_1 g(x_{k,j}) + \sum_{i=1}^m \delta_{i,j} \beta_{j+1}$$

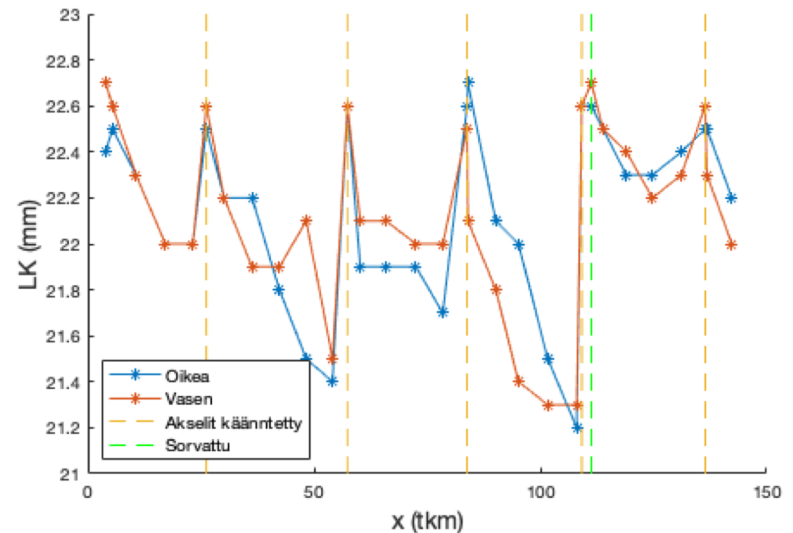
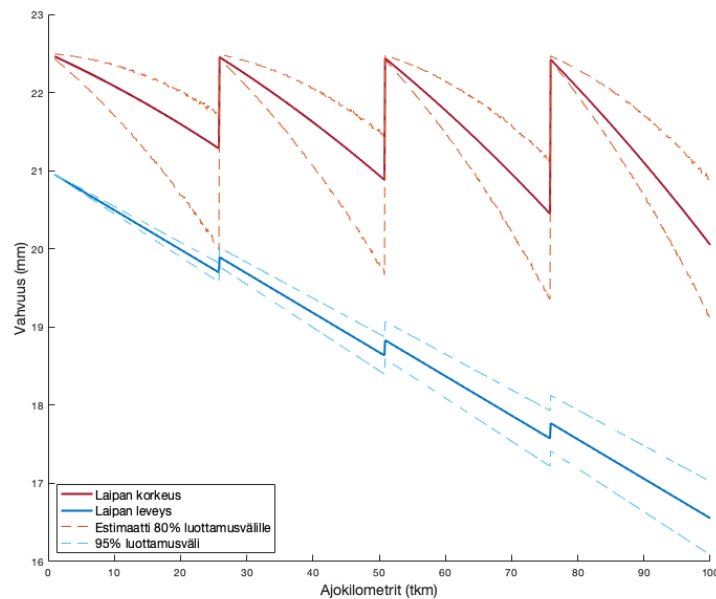
Optimaalisen sorvausvälin määrittäminen

- Mallinnetaan sorvauskustannuksia kiinteällä sorvauskustannuksella s_0 vikasorvauksesta aiheutuvien kulujen odotusarvolla
- Lasketaan kustannusfunktion arvo monte carlo – menetelmällä ja ratkaistaan minimikohta tasavälisellä etsinnällä

$$\arg \min_z z = \frac{s_0 + \mathbb{E}(s(x))}{x}, \quad s(x) = \begin{cases} 0, & h(x) > 19 \\ k s_0, & \text{muuten} \end{cases}$$
$$s.t.: \quad x \geq 0$$
$$\mathbb{E}(h(x)) \geq 18$$

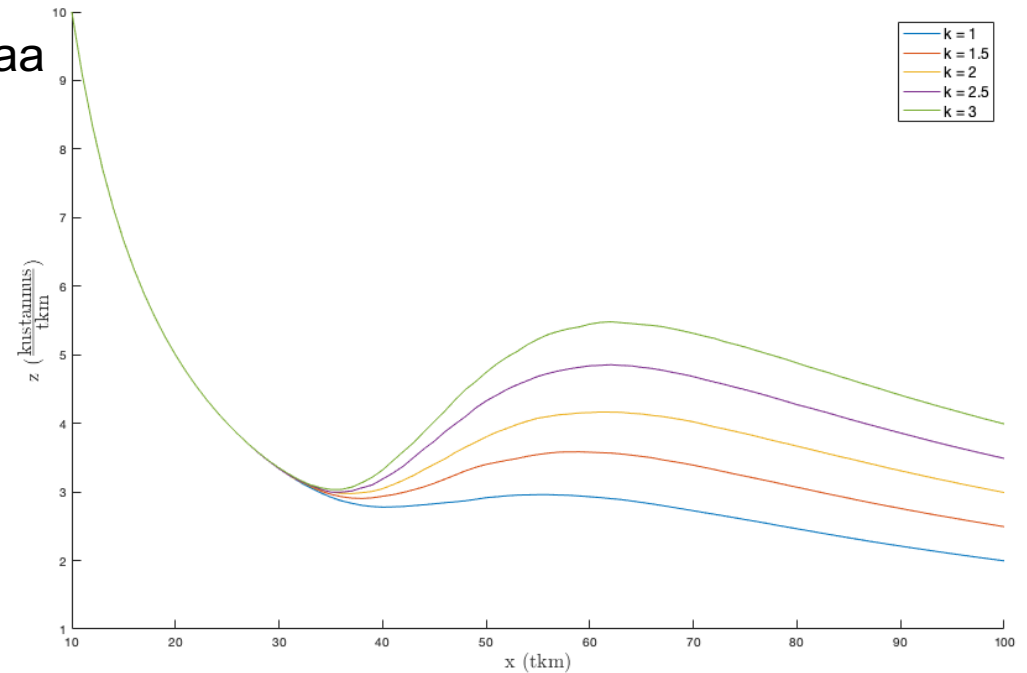
Tulokset

- Kulumisnopeus kasvaa laipan kaventuessa, mikä oli oletettua
- Alla olevassa mallissa simuloitu kulumista nykyisellä sorvausstrategialla
- Kuvaajassa luottamusväliä on estimoitu numeerisesti kvantiileilla

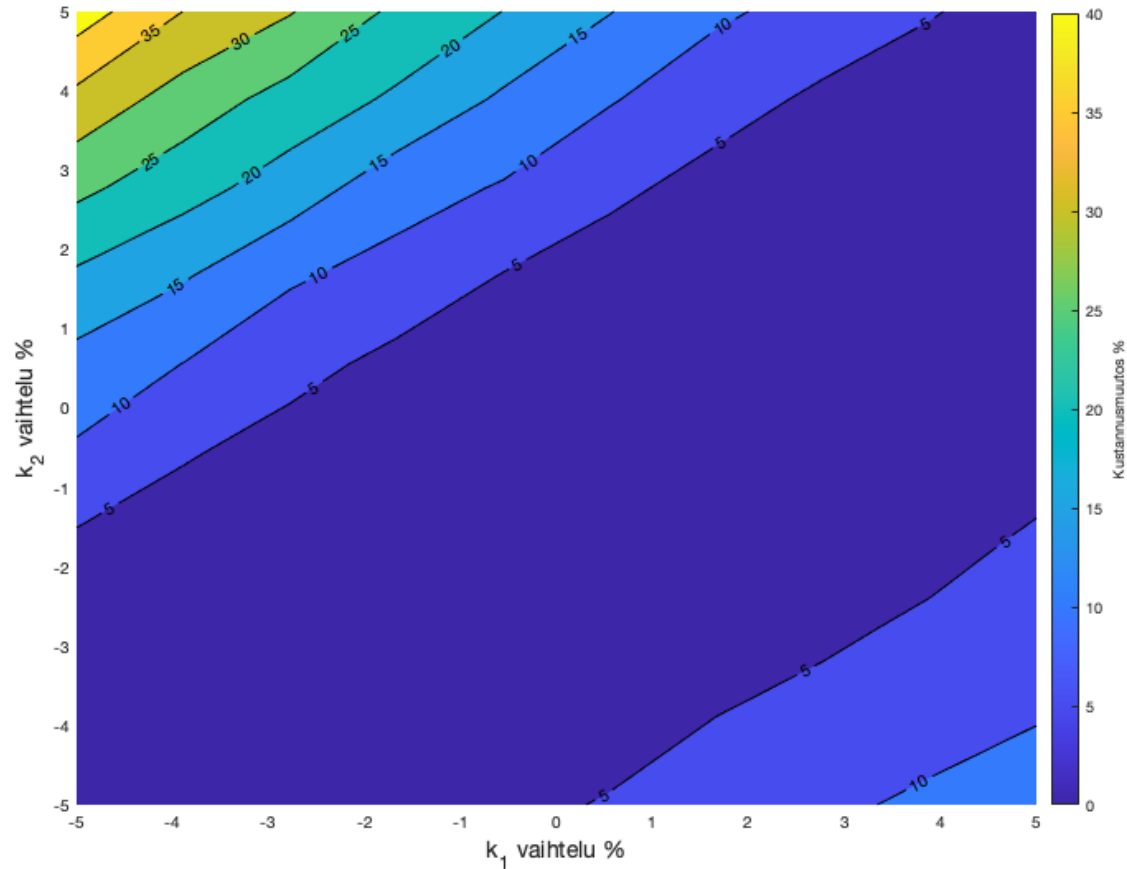


Optimaalinen sorvausväli

- Tarkkaa kustannusarviota vikasorvaukselle on vaikeaa antaa
- Minimikohta on kuitenkin suhteellisen stabiili eri kustannusarvioilla

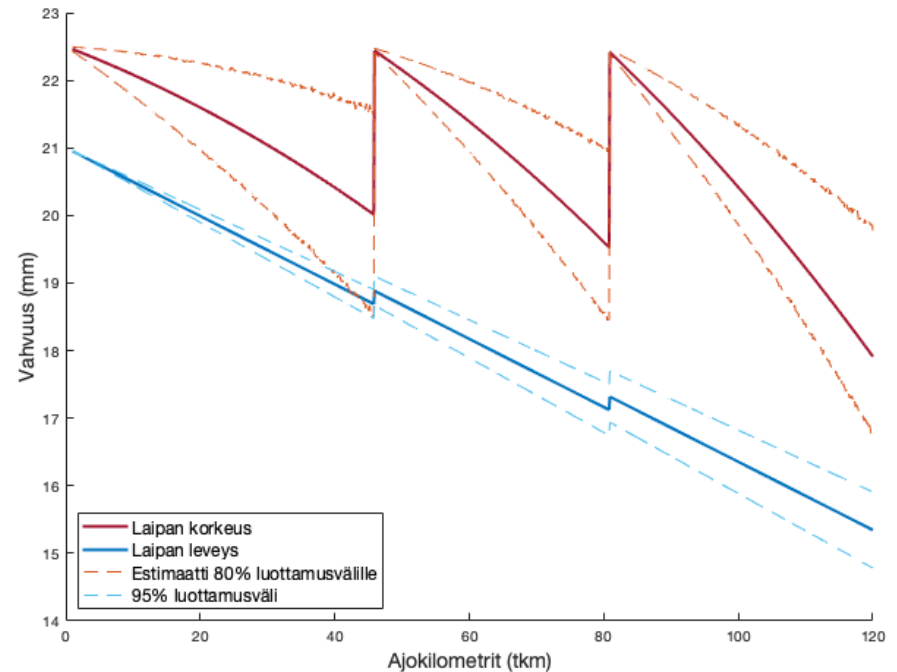


Ratkaisun herkkyys



Johtopäätökset

- Sorvausvälin tulisi riippua laipan leveydestä
- Mallin perusteella sorvauksien lukumäärää voisi vähentää jos akselienkääntö tehdään ajoissa
- Rataverkossa tapahtuvat muutokset vaikuttavat kulumismalleihin (mm. tulevat syväuravaihteet) jolloin optimi muuttuu



Lähteet

- T. Niippa. Raitiovaunun pyörien ennakoivan huolto-ohjelman suunnittelu. Diplomi-työ, Aalto yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu, Espoo, 2014
- B. Peng, S. Iwnicki, P. Schakleton, ja D. Crosbee. Comparison of wear models for simulation of railway wheel polygonalization. *Wear*, 436–437, 2019
- B. Dirks. Simulation and measurement of wheel on rail fatigue and wear. Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2015.
- M. Pau, F. Aymerich, ja F. Ginesu. Distribution of contact pressure in wheel–rail contact area. *Wear*, 253:265—274, 2002.
- F. Braghin, R. Lewis, R.S. Dwyer-Joyce, ja S. Bruni. A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear. *Wear*, 261:1253–1264, 2006.