



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

AAPO KORHONEN  
TELASORVIEN TUKIRULLIEN KEHITYS

Diplomityö

Tarkastaja: professori Asko Ellman  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Teknisten tieteiden tiedekuntaneuvoston  
kokouksessa 9. syyskuuta 2015

## TIIVISTELMÄ

**AAPO KORHONEN:** Telasorvien tukirullien kehitys

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 52 sivua, 20 liitesivua

Joulukuu 2015

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Koneiden ja järjestelmien suunnittelu

Tarkastaja: professori Asko Ellman

Avainsanat: kestoikä, sorvaus, suunnittelu, vauriomuodot, vierintälaakeri, voitelu

Tämän diplomityön aiheena on telasorvien tukirullien kehitys. Tukirullia käytetään kappaleiden tuennassa sorvattaessa paperikoneen teloja. Työn tavoitteena on tutkia syitä tukirullien vikaantumisiin ja huolloista aiheutuviin suuriin korjauskustannuksiin, sekä suunnitella uusi tukirullarakenne ja kehittää tukirullien huoltoa.

Työn alussa olevassa teoriaosuudessa on läpikäyty tukirullien ja sorvattavien kappaleiden välisiä kosketusjännityksiä, vierintälaakereiden kestoiän laskentaa ja vauriomuotoja sekä voitelumekanismeja. Käytössä olevaa tukirullarakennetta tutkittaessa havaittiin siinä sekä rakenteellisia, että käytössä esiintyviä ongelmia. Havaintojen pohjalta suurimmaksi syyksi tukirullien vikaantumiseen arvioitiin tukirulliin kohdistuvat kappaleiden nostoissa ja sorvauksessa syntyvät iskut. Tukirulliin kohdistuvien iskujen selvittämiseksi niitä mitattiin venymäliuskojen avulla.

Käytössä olevasta tukirullarakenteesta havaittujen ongelmien korjaamiseksi suunniteltiin uusi tukirullarakenne. Suurimmat muutokset koskivat laakeroinnin asennusasentoa ja sovitteita sekä voitelua. Uusi tukirullarakenne on hieman käytössä olevaa rakennetta yksinkertaisempi ja sen osien määrä on vähentynyt. Voiteluun käytetään korkean viskositeetin voitelurasvaa, joka soveltuu hyvin suurten kuormitusten alaisiin ja hitaiden pyörimisnopeuksien laakereihin.

Tukirullien huoltoa kehitettiin laatimalla tukirullille huolto-ohjeet ja suunnittelemalla huolloissa käytettäviä aputyökaluja. Uuden tukirullarakenteen ja huollon kehityksen myötä tukirullien huoltoon kuluva työtuntimäärä ja huollon läpimenoaika pystyttiin lyhentämään selvästi.

## **ABSTRACT**

**AAPO KORHONEN:** Development of roll lathe support rollers  
Tampere University of Technology  
Master of Science Thesis, 52 pages, 20 Appendix pages  
December 2015  
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering  
Major: Design of machines and systems  
Examiner: Professor Asko Ellman

Keywords: design, failure modes, lubrication, rating life, rolling bearing, turning

Topic of this master's thesis is development of roll lathe support rollers. Support rollers are used in turning of paper machine rolls. Aim of this thesis is to research the causes that lead to support roller failures and high expenses in support roller maintenance.

Theory part of this thesis consists of contact stresses between support rollers and turned part, rating life and failure modes of rolling bearings and lubrication of bearings. While studying support rollers both structural and use related problems were found. On the base of these observations the main cause for the support roller failure was the shock loads. Support rollers are subjected to shock loads during turning process and while the turned parts are lifted from and lowered to the lathe with cranes. To define the magnitude of these loads strain gauge measurements were carried out.

A new structure was designed for support rollers to correct the problems found from old structure. Major changes compared to the old structure were new mounting arrangement for bearings, change of fits and improvement of lubrication. A high viscosity grease is used for lubrication of support rollers. This kind of grease is very suitable for bearings subjected to heavy loads and slow rotation.

Maintenance of support rollers was developed by creating manual containing step-by-step instructions from maintenance procedures and by designing assembly tools to help in different stages of maintenance. Due to a new support roller structure and development of maintenance working hours spent on and lead time for support rollers maintenance were shortened.

## ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Valmet Technologies Oy:n Rautpohjan paperikonetehtaan Tehdaspalvelu-osaston toimeksiannosta vuoden 2015 kesän ja syksyn aikana.

Haluan kiittää työn tarkastajana toiminutta professori Asko Ellmania ja Valmetin puolelta työn ohjaajana toiminutta Jari Immosta. Kiitokset myös koko Valmetin Tehdaspalvelu-osaston väelle.

Lisäksi haluan kiittää vanhempiani ja siskoani tuesta tämän diplomityön teon ja opiskelujeni aikana.

Jyväskylässä, 16.11.2015

Aapo Korhonen

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	TEORIAOSUUS .....	2
	2.1 Hooken laki .....	2
	2.2 Venymäliuskamittaus .....	2
	2.3 Kontaktijännitykset .....	3
	2.4 Sorvaus .....	5
	2.5 Vierintälaakereiden kestoikä .....	6
	2.6 Vierintälaakereiden vauriomuodot .....	9
	2.7 Voitelu .....	13
3.	TUKIRULLIEN KÄYTTÖ TELASORVEILLA .....	17
	3.1 Käytössä olevien tukirullien rakenne .....	17
	3.2 Havaitut ongelmat .....	18
4.	MITTAUKSET .....	23
	4.1 Kappaleiden aiheuttamat kuormitukset tukirulliin .....	23
	4.2 Sorvauksesta tukirulliin kohdistuvat kuormitukset .....	24
	4.3 Kuormitusten mittaus .....	24
5.	UUDEN TUKIRULLARAKENTEEN SUUNNITTELU .....	31
	5.1 Materiaalivalinta .....	32
	5.2 Lujuustarkastelut .....	32
	5.3 Laakerointi .....	33
	5.4 Voitelu .....	35
	5.5 Tiivistys .....	37
	5.6 Laakeroinnin kestoikä .....	38
	5.7 Tukirullarakenteiden vertailu .....	38
6.	TUKIRULLIEN KUNNOSSAPITO .....	40
	6.1 Käytössä olevan tukirullarakenteen huolto .....	40
	6.2 Uuden tukirullarakenteen huolto .....	42
	6.3 Tukirullien huollon kehitys .....	44
7.	KEHITYSEHDOTUKSET .....	48
	7.1 Tukirulliin kohdistuvien iskujen ehkäiseminen .....	48
	7.2 Tukirullien kunnossapidon kehitys .....	48
8.	YHTEENVETO .....	49
	LÄHTEET .....	51
	LIITE A: KUORMITUSTEN MITTAUS .....	53
	LIITE B: TUKIRULLAN MITOITUS .....	58

**MERKINNÄT**

$a_{ISO}$	Vierintälaakerin muunnetun kestoian kerroin
$a_1$	Vierintälaakerin luotettavuuskerroin
$b$	Kontaktijännityksen kosketusalueen puolikas
$C$	Vierintälaakerin dynaaminen kantavuusluku
$C_u$	Vierintälaakerin väsymisraja
$C_0$	Vierintälaakerin staattinen kantavuusluku
$D_{pw}$	Vierintälaakerin jakohalkaisija
$e$	Neperin luku, luonnollisen logaritmin kantaluku
$e_c$	Vierintälaakerin voitelun epäpuhtauskerroin
$E$	Kimmokerroin
$E'$	Vierintäparin yhdistetty kimmokerroin
$E^*$	Vierintäparin tehollinen kimmokerroin
$E_a, E_b$	Vierintäparin kimmokertoimet
$F_N$	Vierintäparin pintaa vasten kohtisuora voima
$F_N'$	Vierintäparin tasainen kuormitus
$G$	Materiaaliparametri voitelukalvon ominaispaksuuden laskennassa
$h_{min}$	Voitelukalvon minimipaksuus
$L$	Vierintäparin kosketuksen pituus
$L_{nm}$	Vierintälaakerin muunnettu kestoikä
$L_0$	Kappaleen alkuperäinen pituus
$L_{10}$	Vierintälaakerin nimellinen kestoikä 90 % luotettavuudella
$\Delta L$	Kappaleen pituuden muutos
$n$	Vierintälaakerin pyörimisnopeus
$p$	Paine
$P$	Vierintälaakerin dynaaminen ekvivalenttikuormitus
$p_0$	Kontaktijännityksen maksimipintapaine
$p(x)$	Kontaktijännityksen pintapainejakauma x-suunnassa
$R'$	Vierintäparin yhdistetty säde
$R_a, R_b$	Vierintäparin kaarevuussäteet
$u$	Vierintäparin pintojen keskinopeus
$U$	Nopeusparametri voitelukalvon ominaispaksuuden laskennassa
$u_1, u_2$	Vierintäparin nopeudet
$W$	Kuormaparametri voitelukalvon ominaispaksuuden laskennassa
$x$	Kontaktijännityksen x-koordinaattiakseli
$y$	Kontaktijännityksen y-koordinaattiakseli
$z$	Kontaktijännityksen z-koordinaattiakseli
$\alpha$	Paine-viskositeetti-kerroin
$\eta$	Dynaaminen viskositeetti paineessa $p$
$\eta_0$	Dynaaminen viskositeetti normaalipaineessa
$\kappa$	Vierintälaakerin voitelun viskositeettisuhde

$\lambda$	Voitelukalvon ominaispaksuus
$\nu$	Vierintälaakerin voiteluaineen todellinen viskositeetti
$\nu_a, \nu_b$	Vierintäparin Poissonin vakiot
$\nu_1$	Vierintälaakerin tyydyttävään voiteluun vaadittava viskositeetti
$\sigma$	Jännitys
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Kontaktijännityksen pinnanlaiset jännitykset
$\varepsilon$	Venymä
$\tau_{max}$	Kontaktijännityksen maksimileikkausjännitys
$\psi$	Vierintäpinnan pinnankarheus (Ra keskipoikkeama)
$\psi'$	Vierintäpintojen yhdistetty pinnankarheus
$\psi_1, \psi_2$	Vierintäpintojen pinnankarheudet (neliöllinen keskipoikkeama)

# 1. JOHDANTO

Työn tilaajana toimi Valmet Technologies Oy:n Rautpohjan paperikonetehtas. Valmet on maailman johtava sellu-, paperi- ja energiateollisuuden teknologia- ja palvelutoimittaja ja se työllistää Rautpohjassa n. 1250 henkilöä. Työ käsittelee paperikoneen telojen sorvauksessa käytössä olevia tukirullia. Telat ovat tärkeä osa paperikonetta ja ne muodostavatkin jopa 60 % paperikoneen arvosta. Tehtaan kunnossapidossa oli huomattu telasovien tukirullien huoltojen ja korjausten suuret kustannukset, jotka ovat korkeita suhteutettuna tukirullien yksinkertaiseen rakenteeseen. Myös tukirullien vikaantumisten vaikea ennustettavuus ja siten huoltojen hallinta oli hankalaa. Työn tavoitteena on tutkia syitä tukirullien vikaantumisiin ja suuriin korjauskustannuksiin sekä suunnitella uusi tukirullarakenne ja kehittää tukirullien huoltoa.

Teoriaosuudessa on käyty lävitse tukirullien ja kappaleiden välille syntyviä kosketusjännityksiä, vierintälaakereiden kestoiän laskentaa, vierintälaakereiden vauriomuotoja ja voitelumekanismia. Toisessa luvussa on läpikäyty käytössä olevien tukirullien rakennetta, niiden käyttöä ja niissä havaittuja ongelmia. Kolmannessa luvussa on läpikäyty tukirulliin kohdistuvien kuormitusten mittausta venymäliuskojen avulla ja mittauksista saatuja tuloksia. Neljännessä luvussa on läpikäyty uuden tukirullamallin suunnittelu ja sen vertailu vanhaan tukirullamalliin. Viidennessä luvussa on läpikäyty tukirullien huoltoa ja sen kehitystä. Lopuksi on käsitelty kehitysehdotuksia.



## 2. TEORIAOSUUS

### 2.1 Hooken laki

Kappaletta kuormitettaessa se muuttaa muotoaan eli deformoituu ja siihen syntyy jännityksiä. Kuormituksen vaikutuksesta kappaleeseen syntyy venymää, mikä voidaan laskea kaavalla

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

missä  $\Delta L$  on kappaleen pituuden muutos ja  $L_0$  on kappaleen alkuperäinen pituus. [17]

Terästen tapauksissa materiaali käyttäytyy lineaarisesti kimmoisasti sen suhteellisuusrajaan asti eli kuormituksen aiheuttama venymä palautuu alkuperäiseen arvoon kuormituksen lakattua. Tätä jännityksen ja venymän suhdetta kutsutaan Hooken laiksi, jonka kaava on

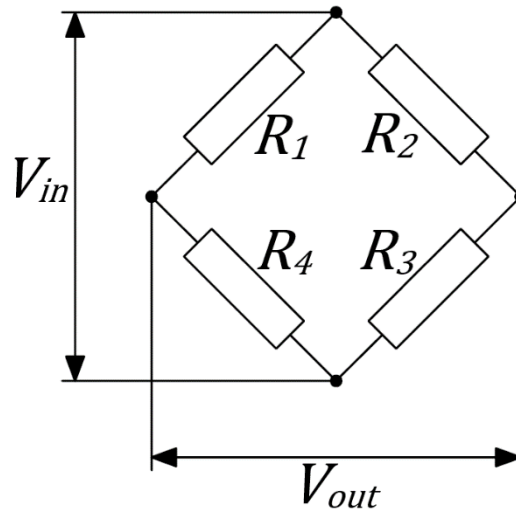
$$\sigma = \varepsilon E \quad (2)$$

missä  $\sigma$  on jännitys ja  $E$  on kimmokerroin. [17]

### 2.2 Venymäliuskamittaus

Venymäliuskan avulla pystytään määrittämään kuormitettuun materiaalin syntyvät jännitykset. Yleisesti käytetty metallikalvo-tyyppinen venymäliuska koostuu kahden muovikerroksen väliin laminoidusta metallihilasta. Venymäliuska liimataan huolellisesti tarkasteltavan kappaleen pintaan, jotta kappaleen muodonmuutokset välittyvät samansuuruisina venymäliuskaan. Venymäliuskan muodonmuutoksen vaikutuksesta metallihilan resistanssi muuttuu, jota mittaamalla pystytään määrittämään venymäliuskan venymä. [7]

Venymäliuska kytketään Wheatstonen siltakytkentään, jonka avulla pystytään havaitsemaan pienetkin resistanssin vaihtelut. Siltakytkentöjä on kolme eri tyyppiä: kokosilta, jossa käytössä neljä venymäliuskaa, puolisilta, jossa käytössä kaksi venymäliuskaa ja neljäsosasilta, jossa käytössä yksi venymäliuska. Puoli- ja neljäsosasiltojen tapauksissa puuttuvat venymäliuskat korvataan vastuksilla. Siltaan syötetään jännite ja ulostuleva jännite mitataan. Mikäli jännitteissä on eroa on venymäliuskan resistanssi muuttunut eli siihen on syntynyt venymää. Kuvassa 1 on esitetty Wheatstonen siltakytkentä. [7]



*Kuva 1. Wheatstonen siltakytkentä*

### 2.3 Kontaktijännitykset

Useimmiten koneenosien lujuustarkasteluissa ei huomioida kuormitusten vaikutuskohtiin syntyviä paikallisia jännityskeskittymiä. Tapauksissa joissa kahta elastista kaareva-pintaista kappaletta painetaan vastakkain ulkoisen voiman vaikutuksesta, syntyy niiden kosketuskohtaan suuria jännityksiä. Tällaisten kappaleiden pintojen kosketuskuviot ovat kuormittamattomina pistemäisiä tai viivamaisia, jolloin niiden kosketuspinta-alat ovat nolla. Pienikin kuormitus aiheuttaa kappaleisiin muodonmuutoksia, jolloin kosketuskuviot muuttuvat elliptisiksi tai suorakulmaisiksi. Kosketuspintojen ollessa pieniä kaarevuussäteisiin verrattuna käytetään kontaktijännitysten laskentaan Hertzin teoriaa. Hertzin teoria edellyttää, että tarkasteltavat kappaleet ovat homogeenisia, isotrooppisia ja lineaarisesti elastisia Hooken lain mukaisesti. [3]

Kahden lieriömäisen kappaleen, joiden pyörähdysakselit ovat yhdensuuntaiset, kuormit-tuessa vastakkain syntyvä kosketuskuvio on viivamainen, joka kuormituksen vaikutuk-sesta muuttuu suorakulmaiseksi. Kuvassa 2a on esitetty kahden lieriön kosketustapaus. Syntyvä painejakauma on muodoltaan paraabelimainen, jonka maksimiarvo esiintyy lieriöiden akselien lävitse kulkevan suoran kohdalla. Painejakauma on esitetty kuvassa 2b. [3]

Yhdistetty säde on

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} \quad (3)$$

missä  $R_a$  ja  $R_b$  ovat lieriöiden säteet. [9]

Yhdistetty kimmokerroin on

$$\frac{1}{E'} = \frac{1 - \nu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \quad (4)$$

missä  $E_a$  ja  $E_b$  ovat lieriöiden kimmokertoimet ja  $\nu_a$  ja  $\nu_b$  ovat lieriöiden Poissonin vakiot. [9]

Kosketusalueen puolikas saadaan kaavalla

$$b = \sqrt{\frac{4F_N R'}{\pi L E'}} \quad (5)$$

missä  $F_N$  on pintaa vasten kohtisuora voima ja  $L$  on kosketuksen pituus. [9]

Kahden lieriömäisen kappaleen tapauksessa maksimipintapaine lasketaan kaavalla [9]

$$p_0 = \frac{2F_N}{\pi b L} \quad (6)$$

Pintapainejakauma x-suunnassa saadaan kaavasta [9]

$$p(x) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{b^2}} \quad (7)$$

Pinnanalaiset jännitykset z-akselilla saadaan kaavoilla [4]

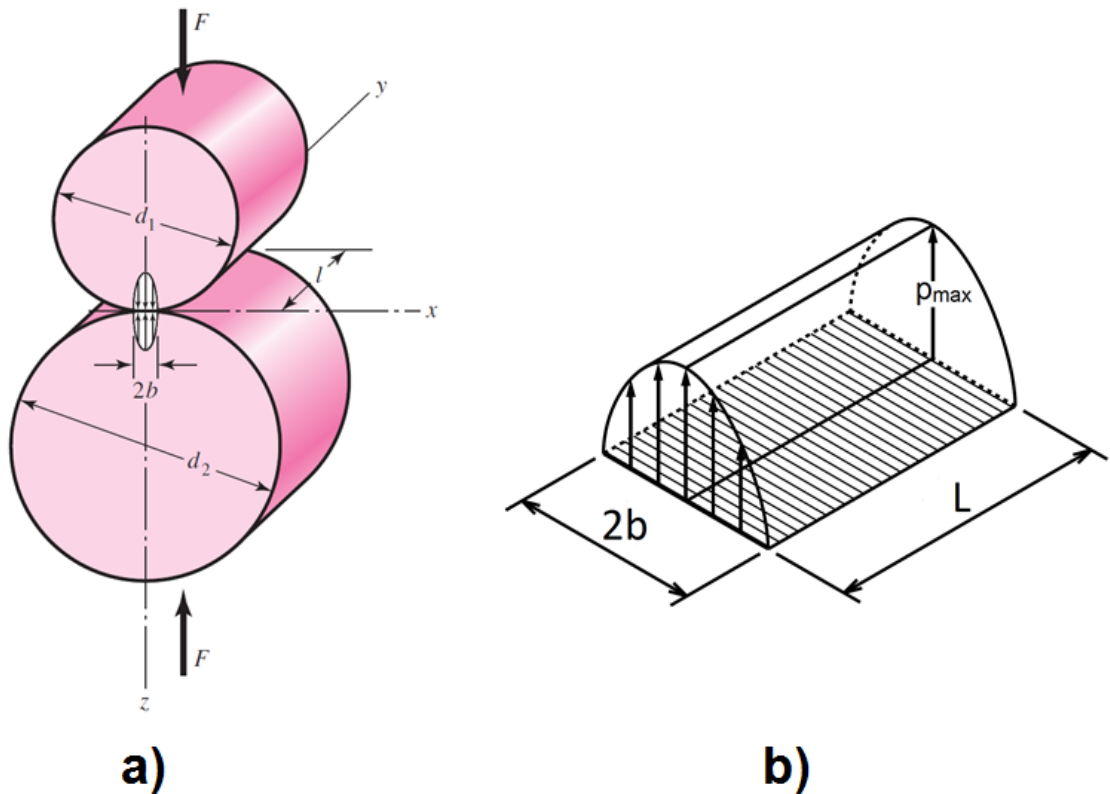
$$\sigma_x = -p_0 \left( \frac{1 + 2\frac{z^2}{b^2}}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{b^2}}} - 2\left|\frac{z}{b}\right| \right) \quad (8)$$

$$\sigma_y = -2\nu p_0 \left( \sqrt{1 + \frac{z^2}{b^2}} - \left|\frac{z}{b}\right| \right) \quad (9)$$

$$\sigma_z = \frac{-p_0}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{b^2}}} \quad (10)$$

Maksimileikkausjännitys on [3]

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \max[|\sigma_x - \sigma_y|, |\sigma_y - \sigma_z|, |\sigma_z - \sigma_x|] \quad (11)$$



*Kuva 2. Kahden lieriön kosketustapaus a) ja kosketuksen painejakauma b), muokattu lähteestä [4]*

## 2.4 Sorvaus

Sorvaus on lastuava työstömenetelmä, jolla valmistetaan pyörähdyssymmetrisiä kappaleita. Telojen sorvauksessa käytettävä sorvityyppi on kärkisorvi. Kärkisorvi koostuu rungosta, johteista, karapylkästä, kärkipylkistä ja teräkelkasta. Runko on sorvin perusosa ja sen varassa ovat muut sorvin osat. Rungon yläpinnassa olevilla pitkittäisjohteilla liikkuu kärkipylkkä ja teräkelkka. Karapylkä on asennettu kiinteästi rungon päälle. Johteiden päällä kulkevalla teräkelkalla saadaan aikaan kelkkaan kiinnitetyn terän syöttä- ja asetusliikkeet. Johteilla kulkeva kärkipylkkä toimii työstettävän kappaleen toisen pään tukipisteenä. [1],[11]

Työstöprosessissa tapahtuvan lastun irrottamiseen vaadittavaa voimaa kutsutaan lastuamisvoimaksi. Sen suuruus riippuu työstettävästä materiaalista, lastuamisarvoista ja käytettävistä teristä. Lastuamisvoima jakautuu kolmeen osaan: päälastuamisvoima, joka on tangentialisuuntainen, syöttövoima, joka on aksiaalisuuntainen ja passiivivoima, joka on radiaalisuuntainen. Päälastuamisvoima on näistä suurin. [1]

## 2.5 Vierintälaakereiden kestoikä

Vierintälaakereiden kestoiän laskentaan käytetään ISO 281 standardia. Standardin avulla voidaan laskea kestoiät laakereille, joiden geometriset mitat vastaavat ISO-standardia ja ovat oikeaoppisesti valmistettu yleisesti käytetyistä korkealaatuisista karkeista laakeriteräksistä. Nimellinen kestoikä 90% luotettavuudella rullalaakereilla lasketaan kaavalla

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}} \quad (12)$$

missä  $C$  on laakerin dynaaminen kantavuusluku ja  $P$  on laakerin dynaaminen ekvivalentikuormitus. Nimellinen kestoikä ilmoitetaan miljoonina kierroksina. [15]

Muunnetun kestoiän kaava ottaa huomioon halutun luotettavuuden, voiteluolosuhteet, voiteluaineen likaisuuden ja laakeria väsyttävän kuormituksen. Muunnettu kestoikä lasketaan kaavalla

$$L_{nm} = a_1 a_{ISO} L_{10} \quad (13)$$

missä  $a_1$  on luotettavuuskerroin ja  $a_{ISO}$  on muunnetun kestoiän kerroin. Taulukossa 1 on esitetty luotettavuuskertoimen  $a_1$  arvot eri luotettavuuksille. Luotettavuuskertoimella määritetään laskennan haluttu luotettavuusprosentti eli se vastaa sitä todennäköisyyttä, millä laakerin kestoikä vastaa vähintään laskennalla saatua. [15]

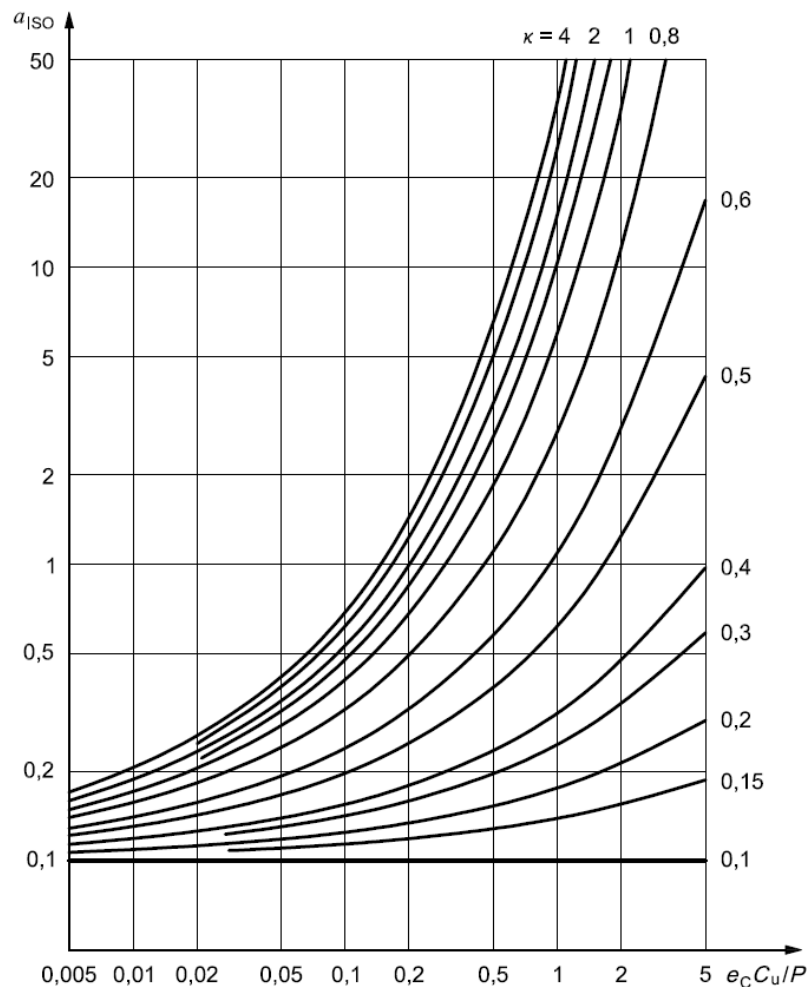
**Taulukko 1. Luotettavuuskerroin  $a_1$  [15]**

Reliability %	$L_{nm}$	$a_1$
90	$L_{10m}$	1
95	$L_{5m}$	0,64
96	$L_{4m}$	0,55
97	$L_{3m}$	0,47
98	$L_{2m}$	0,37
99	$L_{1m}$	0,25
99,2	$L_{0,8m}$	0,22
99,4	$L_{0,6m}$	0,19
99,6	$L_{0,4m}$	0,16
99,8	$L_{0,2m}$	0,12
99,9	$L_{0,1m}$	0,093
99,92	$L_{0,08m}$	0,087
99,94	$L_{0,06m}$	0,080
99,95	$L_{0,05m}$	0,077

Nykyaikainen korkealaatuinen vierintälaakeri voi saavuttaa ikuisen kestoiän kuormituksen ollessa tietyn rajan alapuolella ja kun voitelu-, ympäristö- ja käyttöolosuhteet ovat myönteisiä. Vierintälaakereilla väsymislujuden raja saavutetaan n. 1500 MPa kosketusjännityksillä. Monissa tapauksissa vierintälaakereissa esiintyvät kosketusjännitykset ovat korkeampia kuin 1500 MPa. Kosketusjännitysten lisäksi käyttöolosuhteet voivat kasvattaa jännityksiä, jotka osaltaan lyhentävät laakerin kestoikää. Muunnetun kestoiän kerroin  $a_{ISO}$  ottaa huomioon voitelun, ympäristön, epäpuhtauksien ja asennuksen vaikutuksen. Kerroin  $a_{ISO}$  on funktio epäpuhtauskertoimesta  $e_c$ , väsymisrajasta  $C_u$ , dynaamisesta ekvivalentikuormituksesta  $P$  ja viskositeettisuhteesta  $\kappa$  [15]

$$a_{ISO} = f\left(\frac{e_c C_u}{P}, \kappa\right) \quad (14)$$

Muunnetun kestoiän kerroin voidaan määrittää kuvan 3 avulla.



**Kuva 3.** Muunnetun kestoiän kerroin  $a_{ISO}$  [15]

Väsymisraja  $C_u$  vastaa kuormitusta, jolla väsymislujuus saavutetaan eniten kuormitetussa vierintäpintojen kosketuksessa. Väsymisrajan yksinkertaistettu arvo saadaan kaavalla

$$C_u = \frac{C_0}{8,2} \left( \frac{100}{D_{pw}} \right)^{0,3} \quad (15)$$

missä  $C_0$  on laakerin staattinen kantavuusluku ja  $D_{pw}$  on laakerin jakohalkaisija. [15]

Vieraiden partikkelien joutuessa voiteluaineen sekaan voivat ne aiheuttaa vierintäpinoille painaumuksia. Näihin painaumiin syntyy paikallisia jännityskeskittymiä, jotka pienentävät laakerin kestoikää. Epäpuhtauskerroin  $e_c$  voidaan määrittää taulukon 2 mukaan. [15]

**Taulukko 2.** Epäpuhtauskerroin  $e_c$  [15]

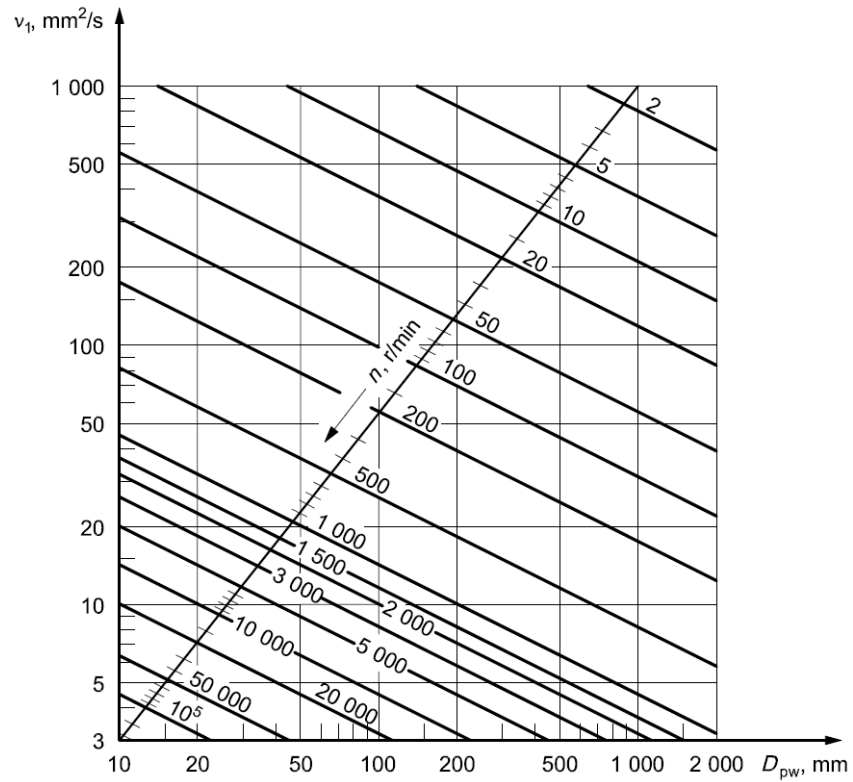
Level of contamination	$e_c$	
	$D_{pw} < 100 \text{ mm}$	$D_{pw} \geq 100 \text{ mm}$
<b>Extreme cleanliness</b> Particle size of the order of lubricant film thickness; laboratory conditions	1	1
<b>High cleanliness</b> Oil filtered through extremely fine filter; conditions typical of bearing greased for life and sealed	0,8 to 0,6	0,9 to 0,8
<b>Normal cleanliness</b> Oil filtered through fine filter; conditions typical of bearings greased for life and shielded	0,6 to 0,5	0,8 to 0,6
<b>Slight contamination</b> Slight contamination in lubricant	0,5 to 0,3	0,6 to 0,4
<b>Typical contamination</b> Conditions typical of bearings without integral seals; course filtering; wear particles and ingress from surroundings	0,3 to 0,1	0,4 to 0,2
<b>Severe contamination</b> Bearing environment heavily contaminated and bearing arrangement with inadequate sealing	0,1 to 0	0,1 to 0
<b>Very severe contamination</b>	0	0

Voiteluaineen toimivuus perustuu sen kykyyn erottaa vierintäpinnat toisistaan. Jotta tyydyttävä voitelukalvo syntyisi, täytyy voiteluaineella olla tietty minimiviskositeetti. Voiteluolosuhteita voidaan arvioida viskositeettisuhteen avulla

$$\kappa = \frac{\nu}{\nu_1} \quad (16)$$

missä  $\nu$  on voiteluaineen todellinen viskositeetti ja  $\nu_1$  on tyydyttävään voiteluun vaadittava viskositeetti. [15]

Tyydyttävään voiteluun vaadittava viskositeetti voidaan määrittää kuvan 4 avulla, missä  $n$  on laakerin pyörimisnopeus.

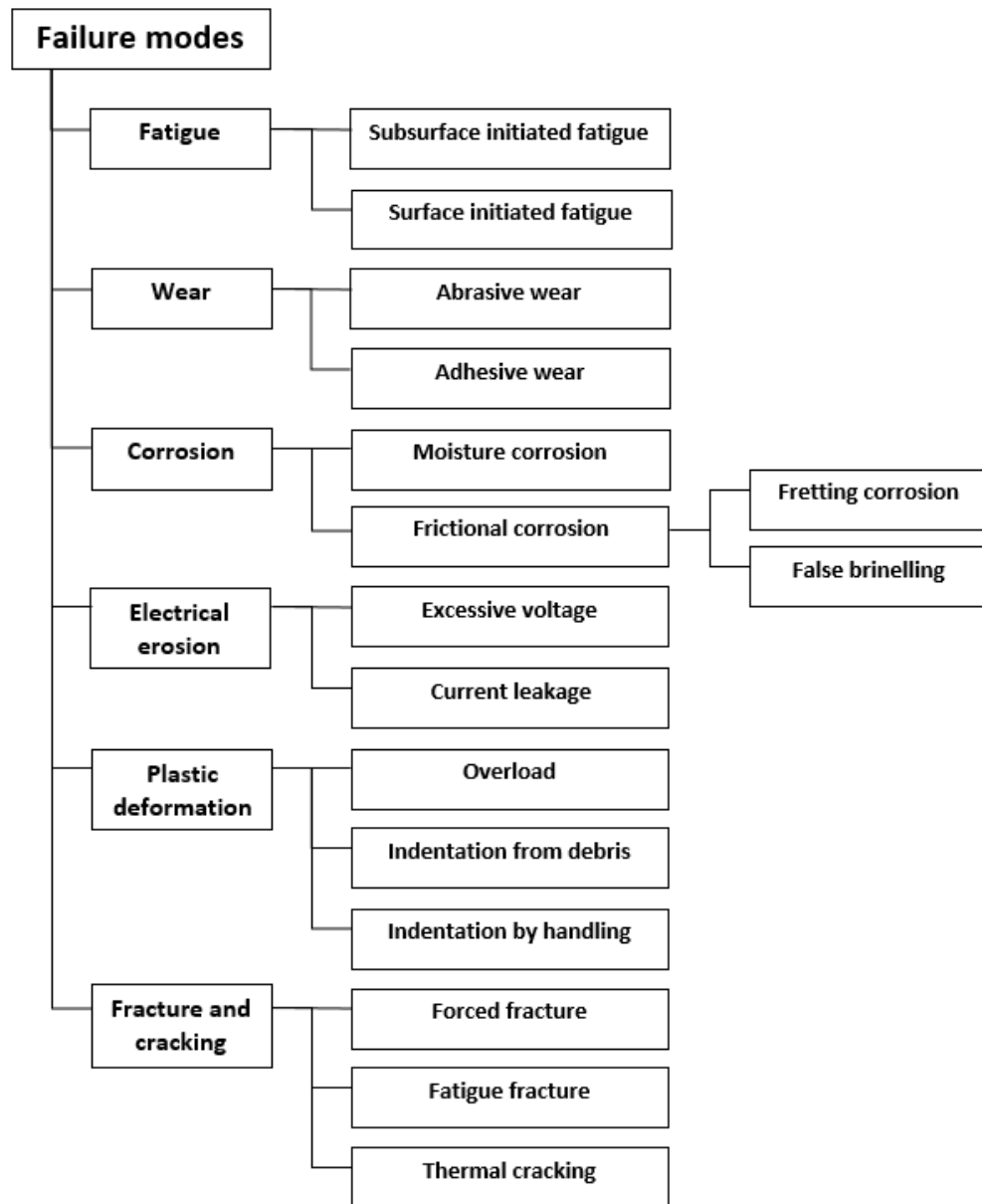


**Kuva 4.** Tyydyttävään voiteluun vaadittava viskositeetti  $v_1$  [15]

## 2.6 Vierintälaakereiden vauriomuodot

Vierintälaakereiden vauriomuodot jaetaan standardin ISO 15243 mukaan kuuteen päämuotoon: väsyminen, kuluminen, korroosio, sähkövirran aiheuttama kuluminen, plastinen muodonmuutos sekä murtuminen ja säröily. Kuvassa 5 on esitetty standardin ISO 15243 mukainen laakereiden vauriomuotojen jaottelu. [14]





*Kuva 5. Laakereiden vauriomuodot ISO 15243 mukaisesti [14]*

## Väsyminen

Väsymistä tapahtuu, kun materiaali joutuu vaihtokuormituksen alaiseksi joka ylittää sen väsymislujuuden. Väsyminen voidaan nähdä vierintäpintojen hilseilynä. Väsyminen on jaettu kahteen alamuotoon: pinnanalaiseen ja pinnalliseen väsymiseen. [14]

Pinnanalaisessa väsymisessä kuormituksen alaisiin vierintäpintoihin syntyy Hertzin teorian mukaisia pinnanalaisia jännityksiä. Laakerin pyörimisen vaikutuksesta nämä jännitykset aiheuttavat materiaaliin vaihtokuormitusta, mikä johtaa väsymiseen. Pinnan alle syntyy mikrosäröjä syvyydelle, jossa maksimileikkausjännitys esiintyy. Mikrosäröt leviävät materiaalin pinnalle, missä alkaa esiintyä hilseilyä. [2],[14]

Pinnallinen väsyminen syntyy pinnankarheushuippujen vaurioitumisesta, joka aiheutuu riittämättömästä voitelusta. Riittämätön voitelu voi johtua esimerkiksi väärästä voiteluaineesta, voiteluaineen vähyydestä tai vaurioituneesta vierintäpinnasta, joka muuttaa voiteluolosuhteita. Riittämätön voitelu johtaa pinnankarheushuippujen kosketukseen, jolloin ne leikkautuvat toisiaan vasten. Pinnankarheushuippujen leikkautuminen yhdessä vierintäelimien vierinnästä johtuvien mikroliikkeiden kanssa aiheuttaa pintaan mikrosäröjä, jotka lopulta johtavat vierintäpinnan hilseilyyn. [2],[14]

## **Kuluminen**

Kuluminen on kahden toisiaan vasten liikkuvan pinnan vuorovaikutuksesta johtuvaa materiaalihäviötä. Kuluminen jaetaan kahteen alamuotoon: abrasiiviseen ja adhesiiviseen kulumiseen. [14]

Abrasiivista kulumista esiintyy johtuen riittämättömästä voitelusta tai kosketuspintojen väliin joutuneista vieraista partikkeleista. Riittämättömän voitelun tapauksessa kosketuspintojen pinnankarheushuiput pääsevät kosketuksiin, jolloin kovempi pinnoista uurttaa pehmeämpää pintaa. Tätä kutsutaan kahden kappaleen abrasiiviseksi kulumiseksi. Vieraiden partikkelien tapauksessa kosketuspintojen väliin joutunut pintoja kovempaa materiaalia oleva partikkeli uurtaa molempia pintoja. Tällöin on kyseessä kolmen kappaleen abrasiivinen kuluminen. Usein abrasiivinen kuluminen alkaa kahden kappaleen kulumisena, joka kehittyy kolmen kappaleen abrasiiviseksi kulumiseksi. Abrasiiviselle kulumiselle on luonteenomaista laakerien vierintäpintojen himmeys. Abrasiivinen kuluminen on rappeuttava prosessi, joka ajan kuluessa tuhoaa laakerin mikromeetrian kulumispartikkelien heikentäessä voiteluaineen voitelukykyä. [2],[9],[14]

Adhesiivista kulumista esiintyy kahden huonosti voidellun toisiaan vasten liukuvan pinnan välisessä kosketuksessa. Adhesiiviselle kulumiselle on tyypillistä materiaalin siirtyminen kosketuspinnasta toiseen. Kosketuspintojen pinnankarheushuiput hitsautuvat kiinni toisiinsa johtuen kitkan aiheuttamasta lämpenemisestä, jonka jälkeen hitsaus murtuu liitospinnastaan tai heikommasta materiaalista. Tämä synnyttää pintoihin paikallisia jännityskeskittymiä, jotka voivat aiheuttaa säröjä tai hilseilyä kosketuspinoille. [2],[9],[14]

## **Korroosio**

Korroosio on metallien pinnoilla tapahtuva kemiallinen reaktio. Korroosio jaetaan kahteen alaluokkaan: kosteuden aiheuttamaan korroosioon ja kitkan aiheuttamaan korroosioon. [14]

Metallipinnan joutuessa kosketuksiin veden kanssa tapahtuu pinnalla hapettumista, joka johtaa korroosion syntymiseen. Kitkan aiheuttamassa korroosiossa kosketuspintojen väliset mikroliikkeet aiheuttavat pinnoille kemiallisen reaktion. Nämä mikroliikkeet johtavat pintojen hapettumiseen, joka ilmenee ruostepölynä tai materiaalihäviönä. Fret-

ting-korroosio johtuu laakerin ja navan tai akselin välisistä mikroliikkeistä. Nämä mikroliikkeet aiheuttavat partikkelien irtoamista pinnoilta, jonka jälkeen ne hapettuvat muodostaen rautaoksidia eli ruostetta. Fretting-korroosio johtuu yleensä vääränlaisista sovitteista tai liian suurista pinnankarheuksista. False brinelling- tapauksessa vierintäpintojen väliset mikroliikkeet ja värähtelyt aiheuttavat pinnoille painaumuksia. [2],[14]

### **Sähkövirran aiheuttama kuluminen**

Sähkövirran kulkeutuessa vierintäelinten lävitse aiheuttaa se kosketuspintojen hitsautumista toisiinsa. Hitsausliitos murtuu vierintäpintojen liikkeen vaikutuksesta irrottaen pinnasta materiaalia, joka kuluu pois. Vaurion tuntomerkkeinä ovat kuopat ja palojäljet vierintäpinnoilla. [2],[14]

### **Plastinen muodonmuutos**

Plastinen muodonmuutos on pysyvä muodonmuutos, joka syntyy aina materiaalin myötörajan ylityksen yhteydessä. Tyypillisesti tätä ilmenee kahdella tavalla. Makrotasolla, jossa kosketusala myötää kosketuspintojen kuormituksen vaikutuksesta ja mikrotasolla, jossa vieras partikkeli joutuu kosketuspintojen väliin aiheuttaen myötäämistä vain pienelle kosketusalalle. Plastinen muodonmuutos jaetaan kahteen alaluokkaan: ylikuormituksen aiheuttamaan muodonmuutokseen ja vieraiden partikkelien aiheuttamiin painaumiin. [2],[14]

Ylikuormituksen aiheuttama muodonmuutos voi syntyä staattisesta ylikuormituksesta, iskukuormituksesta tai vääränlaisesta käsittelystä. Laakerin vierintäpinnat saattavat vaurioitua jos asennus on suoritettu väärin tai kun laakerin ollessa paikallaan siihen kohdistuu suuria kuormituksia. Ylikuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset voivat olla laakereissa esimerkiksi vierintäelementtien kehityksen muodonmuutos tai vierintäpinnoilla esiintyvät vierintäelementtien jaolla olevat painaumamat. [2],[14]

Vieraiden partikkelien aiheuttamat painaumamat syntyvät kun vieraita partikkeleita pääsee laakerin vierintäpinnoille joko tiivisteen lävitse tai voiteluaineen seassa. Nämä partikkelit joutuessaan vierintäpinnoille aiheuttavat niihin painaumuksia, joiden kohonneet reunat aiheuttavat materiaalin enneaikaisen väsymisen. [2],[14]

### **Murtuminen ja säröily**

Säröt syntyvät kun materiaalin murtolujuus ylitetään. Särön kasvaessa siihen asti, että osa irtoaa kappaleesta, kutsutaan murtumaksi. Murtuminen ja säröily jaetaan kolmeen alaluokkaan: pakotettu murtuma, väsymismurtuma ja lämmön aiheuttama murtuma. [14]

Pakotettu murtuma syntyy kun materiaalin jännitykset ylittävät materiaalin murtorajan. Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi iskumainen ylikuormitus asennuksessa tai liian suuret ahdistussovitteet. [2],[14]

Väsymismurtuma syntyy kun materiaalin väsymislujuus ylitetään vaihtokuormituksen vaikutuksesta. Tästä syntyy kappaleeseen hiusmurtumia, jotka kehittyvät lopulta läpimurtumaksi. [2],[14]

Lämpötilan aiheuttamat murtumat syntyvät kitkan aiheuttamasta lämpötilan noususta kahden toisiaan vasten liukuvan pinnan välillä. Tästä syntyvät murtumat ovat yleensä kohtisuorassa liukumissuuntaa vasten. [2],[14]

## 2.7 Voitelu

Voitelun tehtävä on pienentää liikkuvien koneenosien välistä kulumista ja kitkaa. Voiteluaineen, joka voi olla kiinteää, nestemäistä tai kaasumaista, tehtävä on muodostaa toisiaan vasten liikkuvien osien kosketuspinoille voitelukalvon, mikä estää osittain tai kokonaan kosketukset osien välillä. [9]

### Voitelumekanismit ja voitelukalvon ominaispaksuus

Voitelutilanteet jaetaan kolmeen voitelualueeseen: rajavoitelu, sekavoitelu ja nestevoitelu. Nestevoitelu vallitsee silloin, kun voitelukalvo erottaa kokonaan kosketuspinnat toisistaan. Rajavoitelussa kosketuspintojen välille ei pääse syntymään voitelukalvoa, joten pinnat pääsevät kosketukseen keskenään. Sekavoitelutilanne on yhdistelmä nestevoitelua ja rajavoitelua. Kitkan ja kulumisen kannalta nestevoitelutilanne on edullisin, mutta käytännössä voitelutilanne vastaa sekavoitelua, jossa kosketuksen kuorma välittyy osittain voiteluaineen ja osittain pintojen välisen kosketuksen avulla. [9]

Voitelualueet erotetaan toisistaan voitelukalvon ominaispaksuuden perusteella, joka saadaan kaavalla

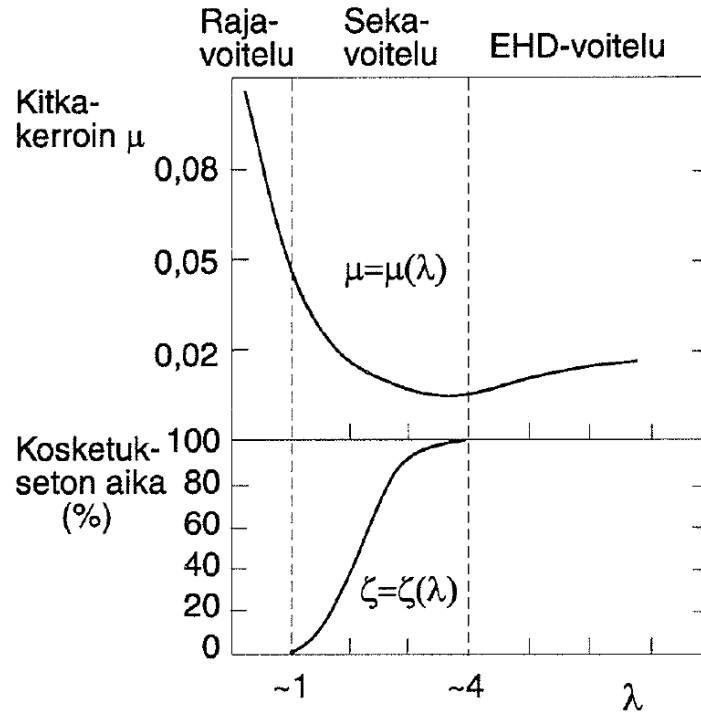
$$\lambda = \frac{h_{min}}{\psi'} \quad (17)$$

missä  $h_{min}$  on voiteluainekalvon minimipaksuus ja

$$\psi' = \sqrt{\psi_1^2 + \psi_2^2} \quad (18)$$

missä  $\psi_1$  ja  $\psi_2$  ovat pintojen karheuksien RMS- arvot (neliöllinen keskipoikkeama). Neliöllinen keskipoikkeama  $\psi \approx 1,3Ra$ , missä  $Ra$  on pintojen karheuksien keskipoikkeama. [9]

Rajavoitelualueella  $\lambda < \approx 1$  ja nestevoitelualueella  $\lambda > 4 \dots 5$ . Väliin jäävä alue on sekavoitelualue. Kuvassa 6 on esitetty voitelualueet ja kitkakerroin voitelukalvon ominaispaksuuden funktiona. [9]



*Kuva 6. Voitelualueet ja kitkakerroin voitelukalvon ominaispaksuuden funktiona [9]*

### Hydrodynaaminen ja elastohydrodynaaminen voitelu

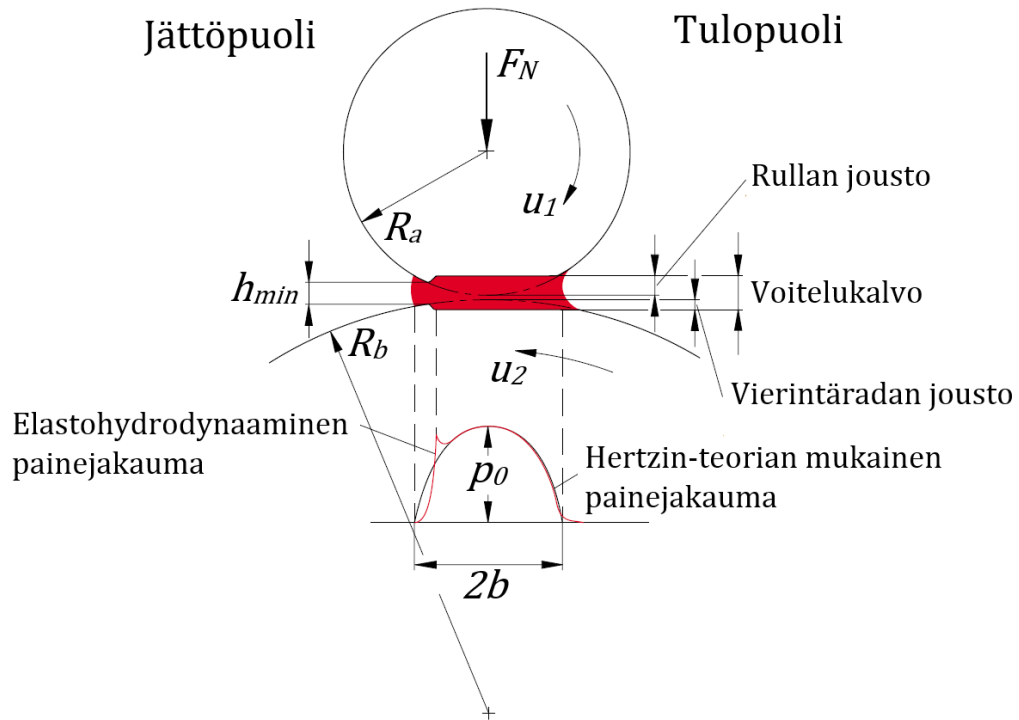
Hydrodynaamisessa voitelussa kosketuspintojen välissä olevaan voitelukalvoon syntyy hydrodynaaminen paine, joka erottaa pinnat toisistaan ja kantaa kuorman. Hydrodynaaminen paine syntyy kahdella tavalla: voiteluaine joutuu kapenevaan kiilamaiseen rakoon, jonka pinnat liikkuvat tangentialisesti toisiinsa nähden tai kun pinnat lähestyvät toisiaan, jolloin voiteluaine pusertuu ulos pintojen välisestä kapeasta raosta. [9]

Kosketuspintojen ollessa suuren kuormituksen alaisena ei niitä voida pitää jäykkinä kappaleina vaan ne deformoituvat. Myös voiteluaineen viskositeetti kasvaa eksponentiaalisesti korkeassa paineessa, joten voiteluaine ei puristu helposti pois kosketuskohdasta. Näitä tapahtumia kutsutaan elastohydrodynaamiseksi voiteluksi, jota esiintyy useimmiten suuren kuormituksen alaisissa viivamaisissa ja pistemäisissä kosketuksissa. Elastohydrodynaaminen voiteluteoria ottaa huomioon hydrodynaamisen yhtälön lisäksi kosketuksessa vaikuttavan paineen aiheuttaman muutoksen voiteluaineen viskositeettiin ja kosketuspintojen kimmoisen muodonmuutoksen. Paineen vaikutus voiteluaineen viskositeettiin otaksutaan eksponentiaalisiksi

$$\eta = \eta_0 e^{\alpha p} \quad (19)$$

missä  $\eta_0$  on dynaaminen viskositeetti normaalipaineessa,  $\alpha$  on viskositeetin paineeksponentti ja  $p$  on paine. [9]

Kuvassa 7 on esitetty elastohydrodynaaminen voitelutilanne kahden lieriön välisessä kosketuksessa. Syntyvä voitelukalvo on ohut ja voiteluaineen kulkuaika kosketuksen läpi on hyvin lyhyt. Voitelukalvon minimipaksuus esiintyy kosketuksen ulostulopuolella, jonka kohdalla painejakaumaan muodostuu painepiikki. [9]



**Kuva 7.** Elastohydrodynaaminen voitelu, muokattu lähteestä [19]

Kahden lieriön kosketustapauksessa voitelukalvon minimipaksuus voidaan laskea seuraavalla kaavalla

$$h_{min} = \frac{2,65G^{0,54}U^{0,7}R'}{W^{0,13}} \quad (20)$$

missä  $G$  on materiaaliparametri,  $U$  on nopeusparametri ja  $W$  on kuormaparametri. Parametrit saadaan seuraavilla kaavoilla.

$$G = \alpha E^* \quad (21)$$

$$U = \frac{\eta_0 u}{E^* R'} \quad (22)$$

$$W = \frac{F'_N}{E^* R'} \quad (23)$$

missä  $E^*$  on tehollinen kimmokerroin,  $u$  on pintojen keskinopeus,  $R'$  on yhdistetty säde ja  $F'_N$  tasainen kuormitus. Tehollinen kimmokerroin, pintojen keskinopeus ja tasainen kuormitus saadaan seuraavilla kaavoilla

$$E^* = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - \nu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right) \quad (24)$$

$$u = \frac{1}{2} (u_1 + u_2) \quad (25)$$

$$F'_N = \frac{F_N}{L} \quad (26)$$

missä  $u_1$  ja  $u_2$  ovat pintojen nopeudet. Voitelukalvon minimipaksuuden lausekkeesta nähdään, että kuormituksen ja kimmokertoimen merkitys on vähäinen. Nopeudella ja voiteluaineen viskositeetilla on huomattavasti merkittävämpi vaikutus voitelukalvon paksuuteen. [9]

### Voitelurasva

Voiteluaineen reologiset ominaisuudet, eli paineen ja viskositeetin vaikutukset voiteluaineen koostumukseen, säätelevät voitelukalvon muodostumista toisiaan vasten liikkuvien pintojen väliin. Viskositeetti kuvaa voiteluaineen leikkautumiseen tarvittavan jännityksen ja molekyylikerrosten liukumisnopeuden välistä suhdetta. Voiteluaineen viskositeetilla on merkittävä osuus voitelukalvon syntymisessä. Voitelurasvoissa nestemäisen voiteluöljyn sekaan on lisätty metallisaippuaa, joka saa aikaan voitelurasvan saentumisen. Voiteluöljyn osuus on yleisesti 80-90 % ja yleisimpiä saentimena käytettyjä saippuota ovat alumiini-, barium- ja litiumsaippuat. Voitelurasvojen ominaisuuksia voidaan parantaa erilaisilla EP-lisäaineilla (extreme pressure), joilla saavutetaan parempaa kulumuskestävyyttä ja paineensietokykyä. [9]

Voitelurasvoihin voidaan myös lisätä kiinteitä voiteluaineita, esimerkiksi molybdeeni-sulfidi ( $\text{MoS}_2$ ) ja grafiitti, joilla parannetaan puutteellista voitelua. Öljykalvon rikkoutuessa kiinteät voiteluaineet hoitavat voitelun, näin vähentäen voitelupintojen välistä kosketusta ja kulumista. Kiinteiden voiteluaineiden voitelukyky perustuu liuskeiseen rakenteeseen, jossa voiteluaineen atomit ovat liittyneet toisiinsa tasoiksi, jotka ovat suhteellisen kaukana toisistaan. Esimerkiksi grafiitilla hiiliatomit sijaitsevat heksagonaalisesti tasoilla ja niiden väliset sidokset ovat huomattavasti lujempia kuin tasojen väliset sidokset. Puristettaessa grafiitti on lujaa, mutta se leikkautuu helposti tasojen suunnassa, joten sen kitkakerroin jää pieneksi. [9]

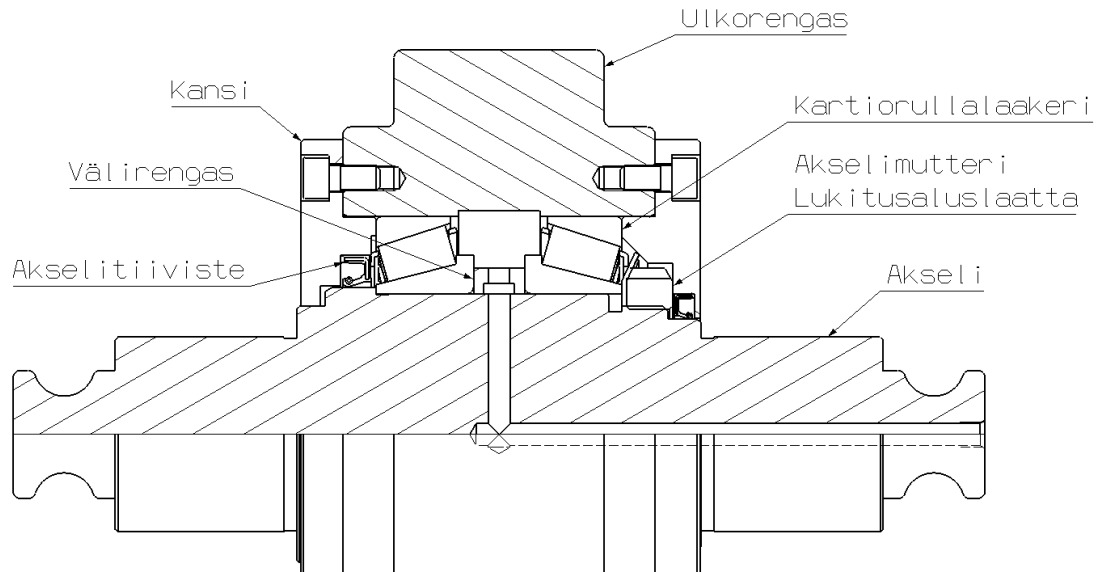
## 3. TUKIRULLIEN KÄYTTÖ TELASORVEILLA

Tukirullia käytetään telasorveilla sorvattavien kappaleiden tukemiseen, kun kappaletta ei ole kiinnitetty toisesta päästään kärkipylkkään. Sorvattavat kappaleet ovat normaalisti telavaippoja tai tela-akseleita. Kappaleet voivat olla massaltaan 40 t ja pituudeltaan 15 m. Tukirullat on sijoitettu sorvin johteilla liikkuviin rullapukkeihin. Esimerkiksi telavaippon sisäsorvauksessa vaippa tuetaan toisesta päästään sorvin istukkaan ja toinen pää lepää rullapukin varassa. Tukirullia on käytössä monta eri mallia. Mallit eroavat toisistaan niin halkaisijoiltaan, liityntämitoiltaan kuin laakerointityypeiltään. Tässä työssä on keskitytty ns. Poreba-tukirullaan, joka on käytössä valtaosalla sorveista. Poreba-tukirulla on jo pitkään käytössä ollut viimeksi 1980-luvulla päivitetty tukirullamalli.

### 3.1 Käytössä olevien tukirullien rakenne

Tukirullat ovat rakenteeltaan melko yksinkertaisia. Tukirulla koostuu akselista, ulkorenkaasta, laakeriparista ja kansista. Ulkorengas on kylmätyökaluteräksestä sorvaamalla valmistettu rengas, joka on karkaistu. Karkaisun jälkeen laakeri-, vierintä- ja sivupinnat on hiottu vaadittuihin toleransseihin. Akseli on valmistettu sorvaamalla nuorrutusteräksestä, jonka laakeripinnat ja akselikaulat on hiottu vaadittuihin toleransseihin. Akselin päästä akselin keskelle ja radiaalisuunnassa keskeltä laakeripinnalle on porattu reikä, jonka päähän asennetun voitelunipan avulla suoritetaan laakereiden voitelu. Laakerointi on toteutettu kartiorullalaakerein. Laakereiden sisärenkaat on asennettu ahdistussovitteella akselille akselimutterin ja akselilla olevan olakkeen väliin. Akselimutterin aukeaminen on estetty lukitusaluslaatalla. Laakereiden välissä on välirengas, joka säätelee laakereiden etäisyyden toisiinsa ja välirenkaaseen tehdyt poraukset välittävät voitelurasvan laakereille. Laakereiden ulkorenkaat on asennettu välisovitteella tukirullan ulkorenkaaseen ja niiden pyörintä tukirullan ulkorenkaaseen nähden on estetty lieriösokilla. Lieriösokat on asennettu tukirullan ulkorenkaan laakeripintaan ja laakerin ulkorenkaan pintaan hiottuun uraan. Kannot on valmistettu sorvaamalla rakenneteräksestä. Kansiin on asennettu akselitiivisteet laakeroinnin suojaamiseksi lialta. Kannot on kiinnitetty kuusiokoloruuvein tukirullan ulkorenkaaseen. Kuvassa 8 on esitetty käytössä olevan tukirullan rakenne.

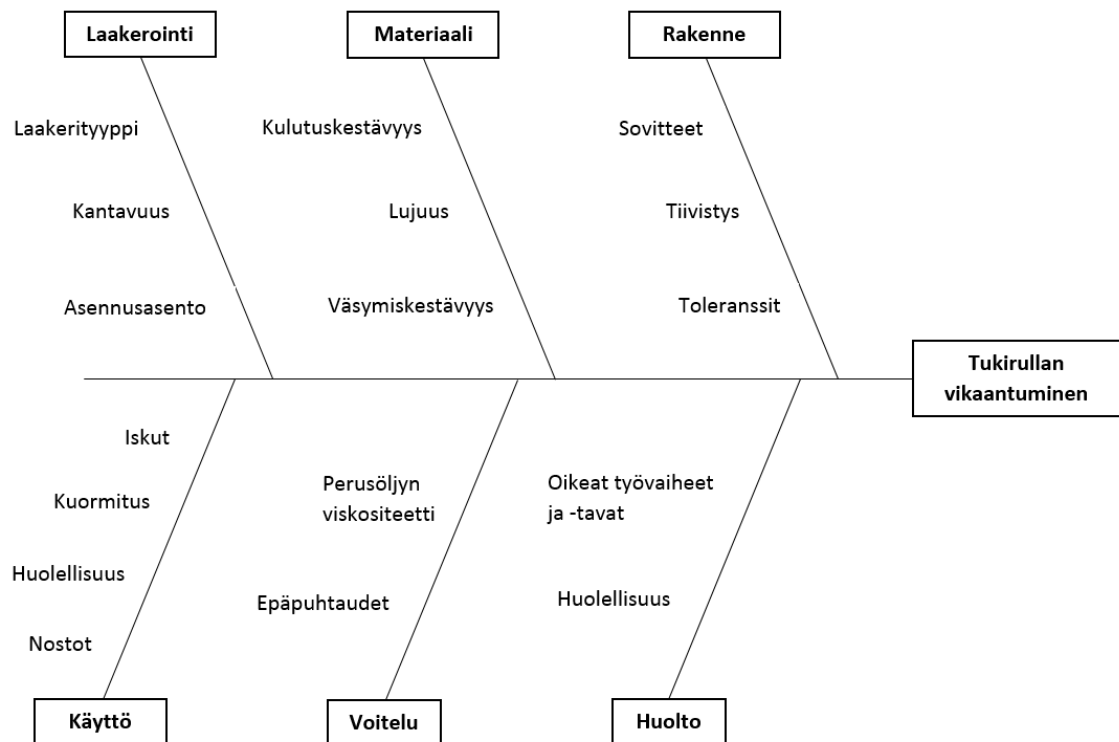




*Kuva 8. Käytössä olevan tukirullan rakenne*

### 3.2 Havaitut ongelmat

Tukirullien vikaantumiseen voi johtaa monet syyt. Näitä syitä on esitetty kuvan 9 kalantukirullien rakenteellisissa vikaantumissa päästiin tutkimaan korjaukseen tai huoltoon tulleista tukirullista, joita työn tekemisen aikana huollettiin 10 kappaletta.

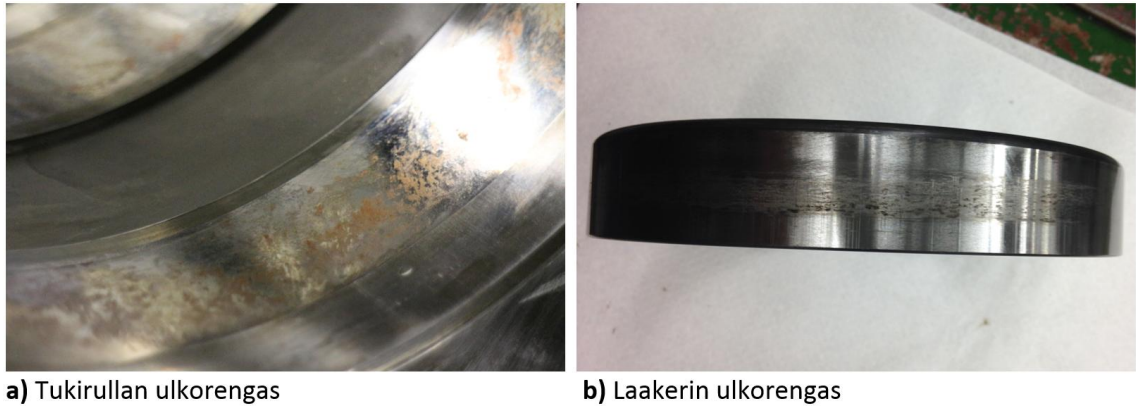


*Kuva 9. Tukirullien vikaantumissyitä*

Tukirullien laakereina käytetään kahta X-asentoon asennettua kartiorullalaakeria. Kartiorullalaakeri soveltuu hyvin tukirullan tapaukseen, koska se kestää hyvin sekä radiaalisia, että aksiaalisia kuormituksia. Kartiorullalaakerin etuna on myös laakerivälyksen säädön mahdollisuus. Tämä välyksensäädön mahdollisuus on eduksi, koska tukirullilta vaaditaan hyvää vierintätarkkuutta ja välyksettömyyttä. Tukirullien maksimikuormituksilla laakerin C/P-luku eli laakerin dynaamisen kantavuuden ja dynaamisen ekvivalentikuormituksen suhde on 3,36, joka on melko pieni. Pienen C/P-luvun takia laakerin kestoikä jää alhaiseksi.

Tukirullissa käytetyt materiaalit ovat käyttötarkoitukseensa nähden melko sopivia. Tukirullan ulkorenkaassa käytetty kylmätyökälyteräs on karkaistuna lujuudeltaan korkeaa ja hyvin kulutusta kestävä. Tukirullien käytön turvallisuuden varmistamiseksi ulkorenkaille suoritetaan aina tukirullien huoltojen yhteydessä magneettijauhetaulukastus mahdollisten säröjen havaitsemiseksi. Tukirullat myös tavallisesti toimitetaan särötarkastukseen, mikäli niihin on aiheutunut tavallista suurempi isku. Akseli on lujuudeltaan korkeaa sen nuorrutetun tilan ansiosta, mutta sen kulutuskestävyys ei ole paras mahdollinen, mikä on huomattu tukirullien huollossa alimitaan kuluneista ja heitollisista akseleiden laakeripinnoista.

Tukirullan ulkorenkään ja laakereiden ulkorenkaiden välillä on  $-20 - 5 \mu\text{m}$  välisovite. Tämä välyys mahdollistaa liityntäpintojen välisten mikroliikkeiden syntymisen, mikä johtaa pinnoille syntyvään fretting-korroosioon. Kuvassa 10 on fretting-korroosion aiheuttamia jälkiä tukirullan ja laakerin ulkorenkaissa. Fretting-korroosion vaikutuksesta erityisesti tukirullan ulkorenkästä, joka on materiaalina pehmeämpää, irtoava materiaali kasvattaa välystä entisestään, mikä vain kiihdyttää tapahtumaa. Fretting-korroosion aiheuttamat vauriot huomataan yleensä tukirullan kokonaisvälysten ja heiton kasvamisena tai laakerin epätavallisena äänenä. Näissä tapauksissa ylimitaan kuluneet tukirullan ulkorenkään laakeritilat joudutaan korjausten yhteydessä uudelleen pinnoittamaan vaadittuihin toleransseihin pääsemiseksi. Laakereiden ulkorenkaiden pyöriminen pesisään on estetty lieriösokilla, joita varten koneistetut urat aiheuttavat laakereiden sekä tukirullan ulkorenkäisiin jännityskeskittymiä. Nämä jännityskeskittymät heikentävät osien rakennetta ja voivat olla mahdollisten murtumasäröjen lähtöpisteitä.

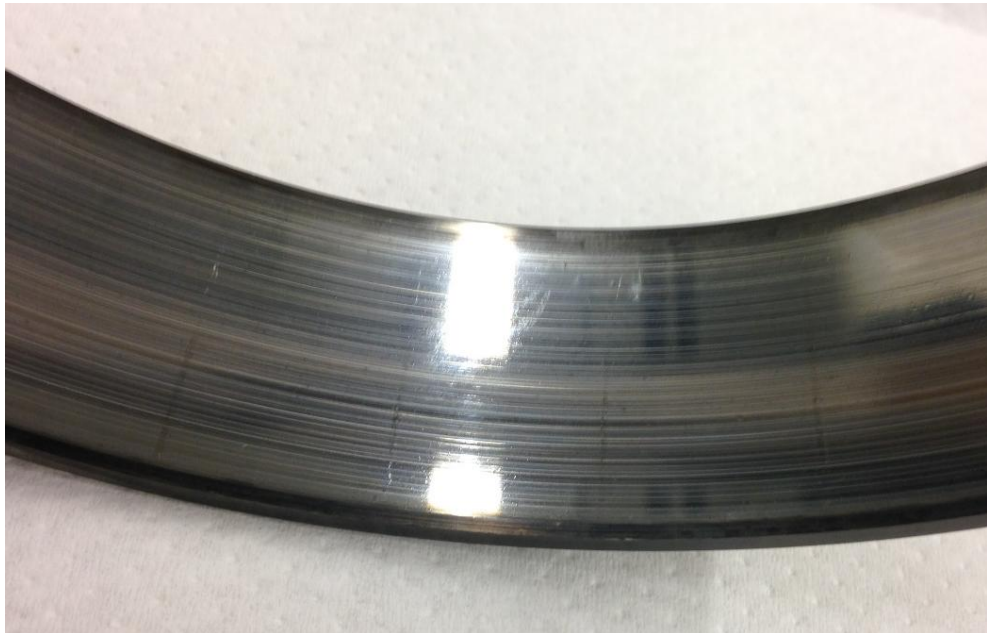


a) Tukirullan ulkorengas

b) Laakerin ulkorengas

***Kuva 10. Fretting-korroosio***

Kappaleiden nostojen ja laskujen yhteydessä tukirulliin kohdistuu iskuja, jotka voivat vaurioittaa laakerin vierintäpintoja ja –elementtejä. Tutkituissa neljässä laakeriparissa huomattiin vierintäpinnoilla poikittaissuuntaisia painaumia, jotka esiintyivät samalla jaolla vierintäelinten kanssa. Nämä painaumat ovat syntyneet laakeriin kohdistuneesta ylikuormituksesta. Laakereiden vierintäpinnoilla oli myös nähtävissä kehäsuuntaisia uria, jotka johtuvat voiteluaineen sekaan päässeistä partikkeleista. Nämä partikkelit voivat olla ulkopuolelta tiivistyksen läpi tulleita tai fretting-korroosion aiheuttamia rautaoksidihiuksia. Kuvassa 11 on esitetty laakerin vierintäpinnalla esiintyneet painaumat ja urat.



***Kuva 11. Laakerin vierintäpinnan painaumat ja kehäsuuntaiset urat***

Yhdellä tukirullaparilla tiivistys ei ollut pitänyt, vaan se oli päästänyt voiteluaineen sekaan työstökoneen leikkuunestettä. Leikkuunesteen sekoittuminen voiteluaineeseen johti kuvan 12 mukaiseen korroosioon. Syynä tiivistyksen pettämiseen huomattiin, että tiivisteiden asennus oli suoritettu väärin. Tiiviste oli asennettu paikalleen ilman asianmu-

kaista työkalua pelkällä vasaralla, mikä oli johtanut tiivisteiden rungon vääntymiseen ja vahingoittumiseen, mikä heikensi sen tiivistyskykyä selvästi.



*Kuva 12. Laakereiden korrosio*

Tukirullien voiteluun oli käytetty laakereille voiteluun soveltuvaa rasvaa, jonka kinemaattinen viskositeetti 40 °C oli 160 mm<sup>2</sup>/s. Käytetyn voiteluaineen alhaisen viskositeetin vaikutuksesta laakereiden voiteluolosuhteet eivät olleet parhaat mahdolliset pienillä pyörimisnopeuksilla. Tukirullan käyttöympäristö on olosuhteiltaan vaativa. Työstötapauksessa syntyy lastuja ja metallipölyä, jotka voivat kulkeutua tiivistyksen lävitse voiteluaineen sekaan. Erityisesti valurauta-aihioiden sorvauksessa syntyy paljon hienojakoista metallipölyä. Voiteluaineen sekaan päästessään vieraat partikkelit aiheuttavat ongelmia voitelukalvon syntymiseen ja siten laskevat laakeroinnin kestoikää.

Tukirullille ei ole käytössä minkäänlaista huolto-ohjelmaa tai kunnonvalvontaa, vaan niitä käytetään rikkoutumiseen asti, jonka jälkeen ne toimitetaan korjaukseen. Tukirullien kuntoon kiinnitetään huomiota vasta kun huomataan niiden aiheuttavan ongelmia työstöön tai kun tukirullan laakeri alkaa pitämään ääntä. Toisena ääripäänä on toiminta, jossa tukirullat toimitetaan huollettavaksi esimerkiksi työstökoneen kesäseisokin ajaksi ilman, että niissä on huomattu mitään vikaa. Pahimmillaan huoltoon toimitetaan varastossa olevia vararullia, joita ei ole käytetty ollenkaan edellisen huollon jälkeen. Tukirullille ei myöskään ole huolto-ohjeita, vaan tehtävät huoltotoimenpiteet ja työskentelytavat ovat perimätietona omaksuttuja ja käytännössä opittuja.

Yhdessä tukirullaparissa laakereiden sisärenkaat akselille kiinnittävät akselimutterit

olivat löysällä. Tämä saattoi johtua laakereiden asennuksen huolimattomuudesta. Laakereiden sisärenkaiden asennuksessa niitä lämmitetään induktiolämmittimellä 110 °C lämpötilaan asentamisen helpottamiseksi. Tämän tapauksen tukirullilla akselimutteri oli mahdollisesti kiristetty heti laakereiden asennuksen jälkeen, jolloin niiden lämpötila oli vielä korkea verrattuna akselin lämpötilaan. Lämpölaajenemisen vaikutuksesta laakereiden kasvanut leveys pieneni laakereiden jäähtyessä, jolloin laakereiden ja akselimutterin välille pääsi syntymään välystä.

## 4. MITTAUKSET

### 4.1 Kappaleiden aiheuttamat kuormitukset tukirulliin

Työstettävien kappaleiden nostot tapahtuvat verstaan siltanostureilla. Laskettaessa kappale työstökoneelle kappale tuetaan ensin sorvin istukan leukoihin, jonka jälkeen se lasketaan tukirullille. Laskujen yhteydessä tukirulliin kohdistuu iskuja johtuen nostureiden liian nopeista liikkeistä tai käyttäjien huolimattomuudesta. Käytettävistä nostureista osa on toteutettu kontaktoriohjauksella, jonka takia nosturin hitaat liikkeet eivät ole yhtä tasaisia ja liikenopeuksiltaan yhtä alhaisia verrattuna uudempiin taajuusmuuttajaohjauksella varustettuihin nostureihin.

Myös kappaleen nostoissa rulliin voi kohdistua iskuja. Kappaletta nostettaessa on oltava tarkkana painopisteen paikasta, jotta kappaleen nosto tapahtuu tasapainossa. Joillain sorveilla kappale pyritään nostamaan hieman painopisteen sorvin istukan puolelta, koska näin nostettaessa kappale ei vahingossakaan pääse heilahtamaan alaspäin istukan puoleisesta päästä. Mikäli kappale pääsisi heilahtamaan istukan puoleisesta päästä voisi se tällöin osua työstökoneen johteisiin, joka voisi johtaa johteiden vahingoittumiseen ja näin kalliiseen korjaukseen. Nostossa kappaletta nostetaan hieman vinossa kohti istukkaa, jotta kappale painautuisi istukkaa vasten näin mahdollistaen hallitun noston. Edellisestä johtuen kappaleen otsapinnan ja istukan välissä vaikuttava kitkavoima pitää kappaleen paikallaan, kun se nostetaan irti tukirullilta. Tämän jälkeen kappaletta siirretään vaakasuunnassa irti istukasta. Kappaleen irrotessa istukasta kappaleen ja istukan välinen kitkavoima häviää ja kappale saattaa heilahtaa tukirullien varaan ja jäädä tavallaan hyppimään tukirullien päälle.

Nostoissa kappale linjataan sorvin akselin suhteen silmämääräisesti. Tästä johtuen kappale voi olla hieman vinossa tai sivussa sorvin akselilinjaan nähden. Jos kappale on vinossa se osuu laskettaessa tukirullien vierintäpintojen sivuille aiheuttaen tukirullille vääntömomentin. Sorvin akselilinjalta sivussa laskettava kappale ei osu samanaikaisesti molempiin tukirulliin vaan aiheuttaa suuremman kuormituksen toiselle tukirullista.

Kappaleita nostetaan myös työstökoneille olevilla erikoistunkeilla. Tunkkien avulla kappaletta korotetaan irti tukirullilta, jonka jälkeen rullapukkia voidaan siirtää uuteen paikkaan. Tunkkien toiminta on toteutettu hydraulisylintereillä tai ruuvinostimilla. Tunkkien käytöstä tukirulliin kohdistuvat iskut johtuvat pääasiassa käyttäjien huolimattomuudesta, koska tunkin toimintaperiaate takaa tasaiset ja hallitut liikkeet oikein käytettynä.

## 4.2 Sorvauksesta tukirulliin kohdistuvat kuormitukset

Sorvauksessa lastun irrottamiseen vaadittavat voimat eli lastuamisvoimat aiheuttavat myös kuormituksia kappaleen välityksellä tukirulliin. Lastuamisvoimat vaihtelevat eri työvaiheiden ja työstettävien materiaalien vaikutuksesta. Lastuamisvoimat ovat suurimmillaan rouhintasorvauksessa, jossa kappaleesta irrotetaan lastua mahdollisimman tehokkaasti suurella syötöllä ja lastuamissyvyydellä. Valukappaleiden rouhintasorvauksissa lastuamisvoimat voivat vaihdella johtuen lastuamissyvyyden vaihteluista. Valukappaleiden ahiopinnat ovat epätasaisia, mistä johtuen lastuamissyvyys vaihtelee.

Sorvauksessa syntyvät lastut voivat joutua kappaleen ja tukirullan väliseen kitaan ja aiheuttaa teräviä iskumaisia kuormituksia. Lastujen paksaus voi olla rouhintasorvauksessa jopa muutamia millejä, joten niiden vaikutuksesta kappale voi heilahtaa hyvinkin paljon. Tavallisesti lastu tarttuu sorvattavan kappaleen pintaan ja mankeloituu tasaiseksi, aiheuttaen joka kierroksella uuden iskun.

## 4.3 Kuormitusten mittaus

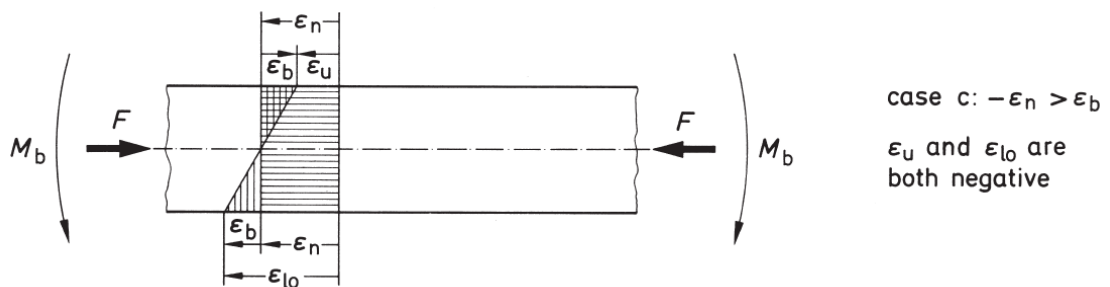
Tukirulliin kohdistuvien voimien selvittämiseksi päätettiin niitä mitata. Mittaus päädyttiin suorittamaan venymäliuskojen avulla niiden edullisuuden takia. Vaihtoehtona oli myös voima-antureilla mittaaminen mutta niiden korkea hinta muodostui rajoittavaksi tekijäksi. Mittausadapteri suunniteltiin kiinnitettäväksi rullapukkien päälle. Mittausadapteri koostuu runkolevystä, jonka koneistetut kiilapinnat asemoivat adapterin rullapukkiin ja korotuspaloista, jotka kiinnitettiin runkolevyyn hitsaamalla. Korotuspalojen kaulat ovat pyöreitä, joten niiden laskennallinen tarkastelu on helppoa. Korotuspaloihin on koneistettu rullapukkia vastaavat urat tukirullaa varten. Venymäliuskoja kiinnitettiin kaksi kappaletta per korotuspala siten, että ne ovat vastakkaisilla puolilla kaulaa. Yhteensä venymäliuskoja oli käytössä 8 kappaletta. Tukirullien varaan asetettava kappale kohdistaa adaptereiden korotuspalojen kauloille yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen tilanteen. Mittausjärjestely on esitetty kuvassa 13.





**Kuva 13** Voimamittausjärjestely

Mittausadapterin kaulalle syntyy kuvan 14 mukainen kuormitustapaus, jossa sitä kuormittaa aksiaalinen ja taivutuskuormitus. Kaulan reunapinnoille syntyvät venymät ovat erisuuruisia. Tästä johtuen reunapintojen venymiä täytyy tarkastella erikseen eli mittauksessa käytetään neljäsosasiltaan kytkettyjä venymäliuskoja. [7]



**Kuva 14.** Puristus- ja taivutuskuormitetun palkin venymät [7]

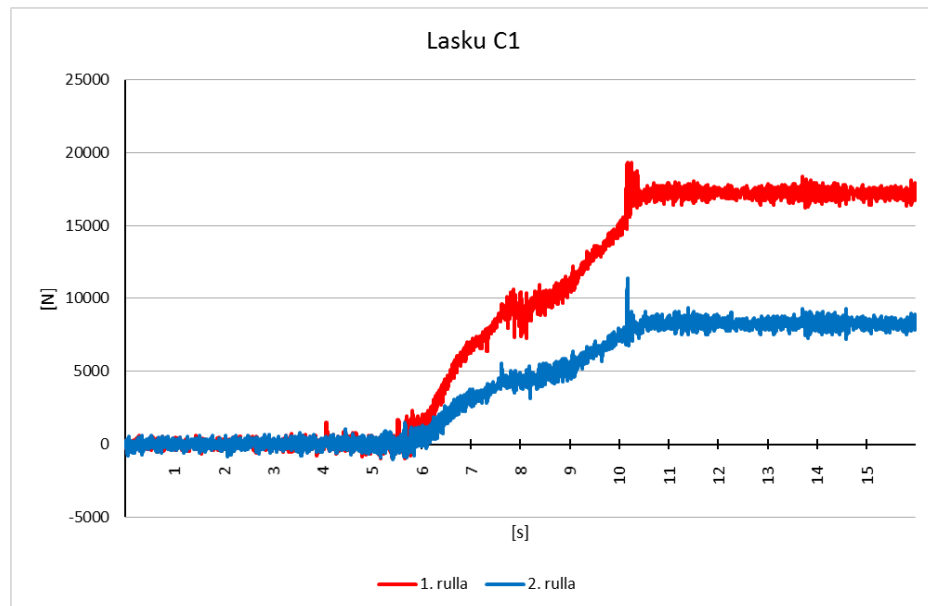
Kappaleen tukeutuminen sorvin istukkaan ja rullapukin varaan voidaan yksinkertaistettuna kuvata tasaisesti kuormitettuna kaksitukisena palkkina. Rullapukki tukirullineen tukee kappaletta ainoastaan pystysuunnassa ja sorvin istukka tukee kappaletta pystysuunnan lisäksi vaakasuunnassa. Sorvin istukka tukee kappaletta myös jossain määrin momenttia vastaan, mutta tämän suuruuden määrittäminen on hankalaa. Tästä syystä kuormitusten laskemiseen on käytetty edellä mainittua yksinkertaistettua mallia.



Mittauksia suoritettiin kappaleen laskujen, kappaleen pyöriksen ja itseaiheutettujen iskujen yhteydessä. Mittauksessa käytetty kappale oli massaltaan 22 t putkitela-aihiö, joka valmistetaan hitsaamalla kaksi levyä taivuttamalla tehtyä putkenpuolikasta toisiinsa. Kappaleelle oli tehty ulkopinnan rouhintasorvaus osalle matkaa ja sisäpinta oli aihioinnalla. Mittaus suoritettiin 1 kHz näytteenottotaajuudella. Liitteessä A on esitetty kuvia mittausjärjestelystä ja kuvaajat eri mittauksista.

Kappaleen laskujen mittauksia suoritettiin kolme sarjaa: A-, B- ja C-mittaus. A- ja B-mittauksessa tukirullilla lepävä kappale nostettiin suoraan ylöspäin, jonka jälkeen se laskettiin takaisin alas tukirullien varaan ilman, että kappaletta siirrettiin sivuttais- tai pitkittäissuunnassa. Näin tekemällä pyrittiin varmistamaan, että kappale laskeutui joka kerta samalla tavalla. A- ja B-mittauksissa nostoja suoritti kaksi eri koneenkäyttäjää ja C-mittauksessa B-mittauksen koneenkäyttäjää. C-mittauksessa kappaletta siirrettiin sivuttaissuunnassa nostojen välissä eli joka noston yhteydessä koneenkäyttäjää joutui linjaamaan kappaleen uudelleen.

Kuvassa 15 on esitetty kappaleen laskussa mitatut kuormitukset. Kuvaajan selkiyttämiseksi sen arvoina on käytetty 10 mittauspisteen liukuvaa keskiarvoa. Kuvaajasta nähdään kuinka kappaleen kohdistama kuormitus on noin puolet suurempi 1. tukirullalle kuin 2. tukirullalle. Kappaletta pyöritettäessä tukirullien välinen kuormitusero poistui. Syynä eroon saattoi olla kappaleen tukeutuminen sorvin avattuun nelileukaistukkaan siten, että kappale kääntyi enemmän 1. tukirullan varaan.



**Kuva 15** Kappaleen laskun kuormituksen kuvaaja

Taulukossa 3 on koottuna kaikki kappaleen laskuissa mitatut kuormitukset. Kaikkien kappaleiden laskuissa mitattujen iskujen keskimääräinen suhde staattiseen kuormitukseen oli 37 % staattista kuormaa suurempi. Suurin mitattu iskukuormitus laskuissa oli 115,5 % suuruinen.

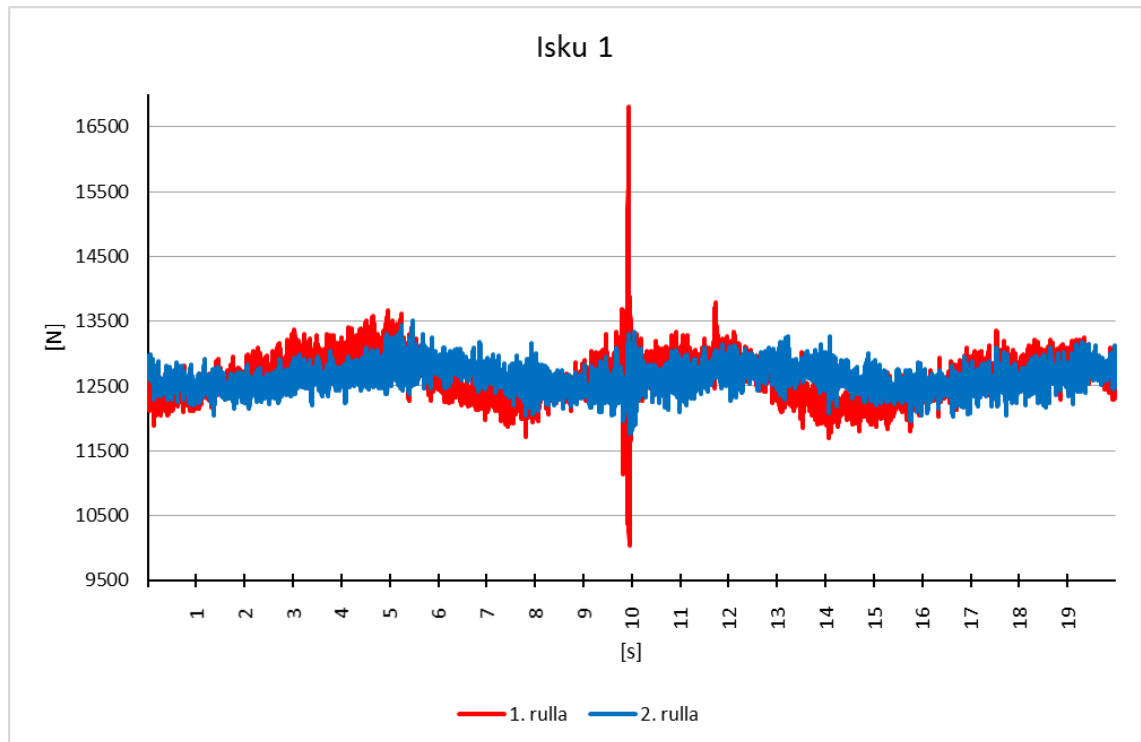
**Taulukko 3 Kuormitukset kappaleen laskuissa**

		Iskukuorma [N]	Staattinen kuorma [N]	Iskun suuruus
<b>Lasku A1</b>	1. rulla	20670	17190	20,2 %
	2. rulla	11630	7930	46,7 %
<b>Lasku A2</b>	1. rulla	20200	16180	24,8 %
	2. rulla	11490	7680	49,6 %
<b>Lasku A3</b>	1. rulla	19970	17150	16,4 %
	2. rulla	11260	8280	36,0 %
<b>Lasku A4</b>	1. rulla	20040	16860	18,9 %
	2. rulla	11700	8170	43,2 %
<b>Lasku A5</b>	1. rulla	20880	17100	22,1 %
	2. rulla	11400	8260	38,0 %
<b>Lasku B1</b>	1. rulla	20270	16830	20,4 %
	2. rulla	11150	8090	37,8 %
<b>Lasku B2</b>	1. rulla	20370	17060	19,4 %
	2. rulla	11630	8180	42,2 %
<b>Lasku B3</b>	1. rulla	23710	17050	39,1 %
	2. rulla	17760	8240	115,5 %
<b>Lasku B4</b>	1. rulla	20290	17040	19,1 %
	2. rulla	13190	8010	64,7 %
<b>Lasku B5</b>	1. rulla	19850	17090	16,1 %
	2. rulla	11010	8020	37,3 %
<b>Lasku C1</b>	1. rulla	21290	17200	23,8 %
	2. rulla	12690	8260	53,6 %
<b>Lasku C2</b>	1. rulla	21690	17320	25,2 %
	2. rulla	14070	8840	59,2 %
<b>Lasku C3</b>	1. rulla	20270	17330	17,0 %
	2. rulla	13210	8460	56,1 %
<b>Lasku C4</b>	1. rulla	21650	17320	25,0 %
	2. rulla	12380	8400	47,4 %

Lastujen tukirulliin aiheuttamia iskuja simuloitiin syöttämällä pyörivän kappaleen ja tukirullan väliseen kitaan kankaan pala. Käytetty kangas oli tavallisesta teollisuuspyyhkeestä leikattu 5 cm kertaa 5 cm pala. Taulukossa 4 on esitetty mitatut tulokset. Kuvasta 16 nähdään kuinka pehmeäkin materiaalia oleva teollisuuspyyhkeenpala saa aikaan 73 % normaalikuormitusta suuremman iskun. Pahimmassa tapauksessa kyseessä voi olla muutaman millin paksuinen rouhintasorvauksessa syntynyt lastu ja sen aiheuttamat iskut ovat aivan eri kokoluokkaa. Kuvaajan selkiyttämiseksi sen arvoina on käytetty 20 mittauspisteen liukuvaa keskiarvoa.

**Taulukko 4 Iskukuormitukset**

		Iskukuorma [N]	Kuorman keskiarvo [N]	Iskun suuruus
<b>Isku 1</b>	1. rulla	21850	12630	73,0 %
	2. rulla	15540	12630	23,0 %
<b>Isku 2</b>	1. rulla	15690	12630	24,2 %
	2. rulla	15300	12630	21,1 %
<b>Isku 3</b>	1. rulla	16150	12630	27,9 %
	2. rulla	15870	12630	25,7 %



**Kuva 16.** Iskukuormituksen kuvaaja

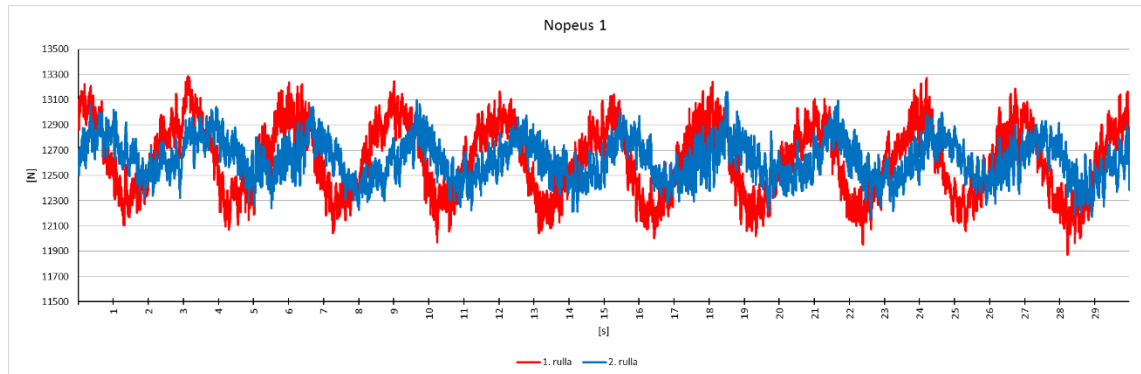
Pyörivän kappaleen tukirulliin aiheuttamia kuormituksia tutkittiin pyörittämällä kappaletta tukirullien varassa sen maksimipyörimisnopeudella. Mitatut tulokset on esitetty taulukossa 5. Nopeus 1. mittauksessa pyörimisnopeus oli 20 r/min, jolloin syntyneet kuormitukset vaihtelivat n. 27 % kuormituksen keskiarvosta. Nopeus 2. mittauksessa pyörimisnopeus oli 25 r/min ja syntyneet kuormitukset vaihtelivat n. 25 % kuormituksen keskiarvosta.

**Taulukko 5** Kuormitukset kappaleen pyöriessä

		Kuorman keskiarvo [N]	Maksimikuorma [N]	Minimikuorma [N]	Vaihteluväli [N]	Kuormanvaihtelun suuruus
<b>Nopeus 1</b>	1. rulla	12630	16070	9410	6660	26,4 %
	2. rulla	12630	15950	8990	6960	27,6 %
<b>Nopeus 2</b>	1. rulla	12630	15880	9280	6600	26,1 %
	2. rulla	12630	15780	9870	5910	23,4 %

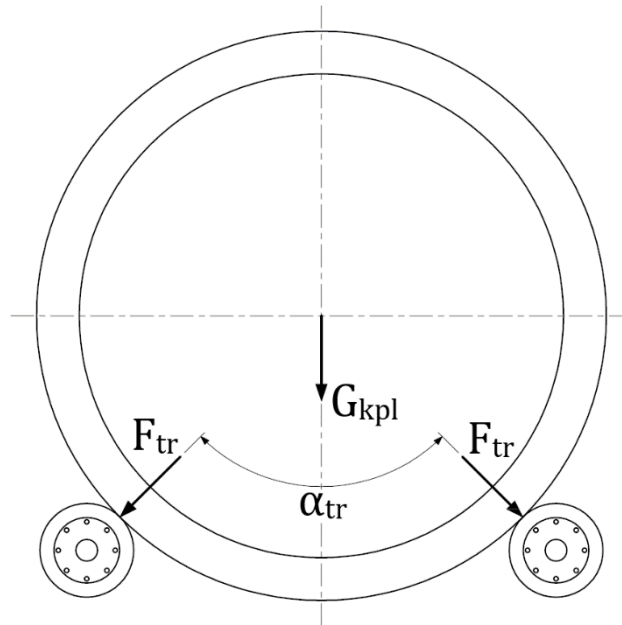
Kuvasta 17 on nähtävissä kuinka pyöritettävässä kappaleessa esiintyy epätasapainoa, koska kuormitus vaihtelee aaltomaisesti aallonpituuden ollessa sama kuin kappaleen pyörähtämiseen kulunut aika. Epätasapaino johtuu pyörähdys epäsymmetrisestä muodosta eli kappaleen massakeskipiste ei sijaitse sen pyörähdys akselilla. Tämä massakeskipisteen poikkeaman aiheuttama keskipakovoima kuormittaa tukirullia sen ollessa pyörähdys akselin alapuolella eli tukirullien ja kappaleen pyörähdys akselin välissä ja keventää kappaletta massakeskipisteen ollessa pyörähdys akselin yläpuolella. Mittauksessa kappale pyöri 1. tukirullaa vasten eli epätasapainokohta saapui ensin 1. rullalle ja heti sen perään 2. rullalle. Tämä on nähtävissä kuvaajasta kuinka 2. tukirullan kuormitus

seuraa 1. tukirullan kuormitusta samansuuruisena pienellä viiveellä. Kuvaajan selkiyttämiseksi sen arvoina on käytetty 30 mittauspisteen liukuvaa keskiarvoa.



**Kuva 17.** Pyörivän kappaleen kuormituksen kuvaaja

Tukirullien akselien ja kappaleen akselin läpikulkevat viivat muodostavat tukirullien ja kappaleen välisen kontaktikulman, joka on esitetty kuvassa 18. Kontaktikulman johdosta kappaleen pystysuuntainen painovoimakomponentti jakautuu tukirullia kuormittaviksi vaak- ja pystysuuntaisiksi kuormituskomponenteiksi. Näiden kuormituskomponenttien resultantti on tukirullaan kohdistuva kokonaiskuormitus, joka kasvaa kontaktikulman kasvaessa. Mittauksessa käytetyn kappaleen halkaisijasta johtuen tukirullien välinen kontaktikulma oli 104 astetta, joka on normaalia tilannetta suurempi. Suuresta kontaktikulmasta johtuen tukirullaan kohdistuu suurempi voima kuin pienillä kontaktikulmilla, mutta kappaleesta välittyvä isku ei ole niin voimakas, koska kappaleen pystysuuntaisesta voimasta suurempi osa muuttuu tukirullaan vaikuttavaksi vaakasuuntaiseksi voimakomponentiksi. Kappaletta tukirullille laskettaessa tukirullat pääsivät pyörryttämään pois kappaleen tieltä, jolloin syntyneet iskut eivät olleet niin suuria, kuin esimerkiksi tapauksessa, jossa kappale laskettaisiin tukirullalle suoraan ylhäältäpäin. Venymäliuskojen etäisyys kontaktipinnoilta vaimensi iskuja, koska kontaktipinnan ja venymäliuskan välissä oli monta osaa. Tukirullan ulkorengas, laakerit, tukirullan akseli ja tukirullan akselin ja mittausadapterin välinen liitos osaltaan vaimensivat syntynyttä iskuja ennen kuin se välittyi mittausadapterin kaulojen muodonmuutoksen kautta venymäliuskoihin.



**Kuva 18** Tukirullien ja kappaleen välinen kontaktikulma  $\alpha_{tr}$

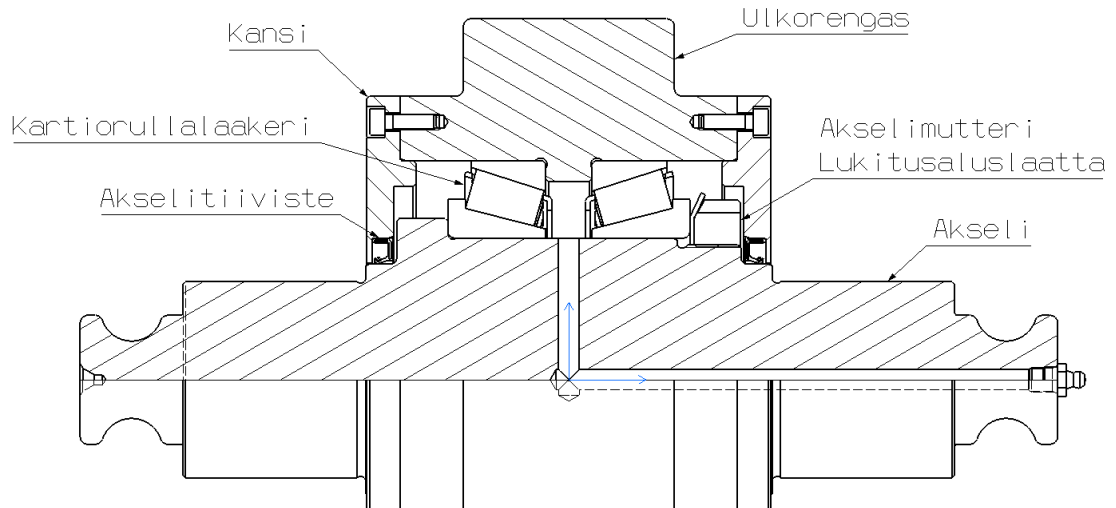
Voimamittauksista saadut tulokset eroavat käsin laskennalla arvioiduista kuormituksista. Osa erosta voidaan selittää sorvin istukan momenttia tukevalla ominaisuudella, joka pienentää tukirulliin kohdistuvaa kuormitusta. Käsin lasketun ja mitatun välinen ero ei aiheuta ongelmia, koska mittauksella haluttiin selvittää tukirulliin kohdistuvien iskujen suuruus suhteessa staattiseen kuormitukseen. Vaikkakin mitatut tulokset ovat pienempiä käsin laskettuihin verrattuna, ovat iskujen suuruudet samoja staattiseen kuormitukseen suhteutettaessa.

Rullapukki asetetaan tavallisesti lähelle kappaleen päätä, joten tuennallisesti kyseessä on kaksitukisen palkin tapaus. Käsinlaskennassa kappaleen aiheuttama kuormitus on oletettu yhtä suureksi niin rullapukille, kuin sorvin istukalle. Suhteuttamalla mitatut tulokset käsinlaskennalla saatuihin staattisiin kuormituksiin ovat kappaleiden laskujen yhteydessä tukirulliin syntyvät iskut 40 t kappaleilla 299 kN suuruisia. Tukirullien ja kappaleen väliin joutuvien lastujen aiheuttamat iskut ovat varovaisesti arvioituna kolminkertaiset kangaspalalla mitattuihin arvoihin nähden, jolloin iskujen suuruudet ovat jopa 440 kN luokkaa.

## 5. UUDEN TUKIRULLARAKENTEEN SUUNNITTELU

Käytössä olevasta rullarakenteesta huomattujen ongelmien myötä päädyttiin uuden rullarakenteen suunnitteluun. Ulkoisilta mitoilta uusi tukirullarakenne ei eroa juurikaan olemassa olevasta, koska vanha tukirullarakenne saneli uuden rakenteen ulkoiset mitat. Akselikaulojen pituus, rullan leveys ja ulkorenkaan vierintäpinnan leveys tuli säilyttää samana. Ulkorenkaan vierintäpinnan leveyttä kasvattamalla tukirullan ja kappaleen välistä pintapainetta voitaisiin pienentää, mutta sorvattavien kappaleiden geometria ei sallinut sen leventämistä. Tietyn telavaippatyypin sorvauksessa kappale tuetaan tukirullille telavaipan päissä olevilta kapeilta olakkeilta joita kutsutaan kongeiksi. Mikäli tukirullan vierintäpinta olisi leveämpi, niin se ei osuisi koko leveydeltään kongille, jolloin tukirullan laakereille kohdistuva kuormitus ei olisi symmetrinen. Epäsymmetrinen kuormitus aiheuttaisi laakereihin kallistusmomenttia, joka on epäedullista laakerin toiminnan kannalta. Ulkorenkaan vierintäpinnan molemmiin puoliin olevien olakkeiden korkeutta kasvatettiin 10 mm, jotta kaikkia telavaippatyyppejä pystyttäisiin pyörittämään kongeilta. Tukirullan halkaisijaa kasvattamalla olake olisi korkeampi, mutta suurempi tukirullan halkaisija pienentäisi sorvin suurinta mahdollista kappalehalkaisijaa.

Rakenteen suunnittelua ei perustettu rakenteiden optimointiin ja mahdollisimman pieniin kustannuksiin vaan tärkeimpänä oli rakenteen kestävyys. Tukirullien määrä huomioiden valmistusmäärät ovat niin pieniä, että rakenteen optimointi mahdollisimman pienille kustannuksille ei ole merkitsevää. Tästä johtuen rakenne on joiltain osien kestävyyksiltä reilusti ylimitoitettu. Kuvassa 19 on esitetty uuden tukirullan rakenne.



**Kuva 19.** Uuden tukirullan rakenne

Mitoituksessa käytettäviksi kuormituksiksi valittiin tukirulliin kohdistuvat maksimi-kuormitukset. Sorvattavien kappaleiden maksimimassa on 40 t ja tukirullien maksimipyörimisnopeus 100 r/min. Kuormitukset ja pyörimisnopeudet vaihtelevat suuresti riippuen sorvista ja sorvattavasta kappaleesta. Tukirullien tyypillinen maksimikontaktikulma on  $90^\circ$ , joten 40 t kappale aiheuttaa tukirullaan 138,7 kN kuormituksen. Mitoituslaskelmat on esitetty liitteessä B.

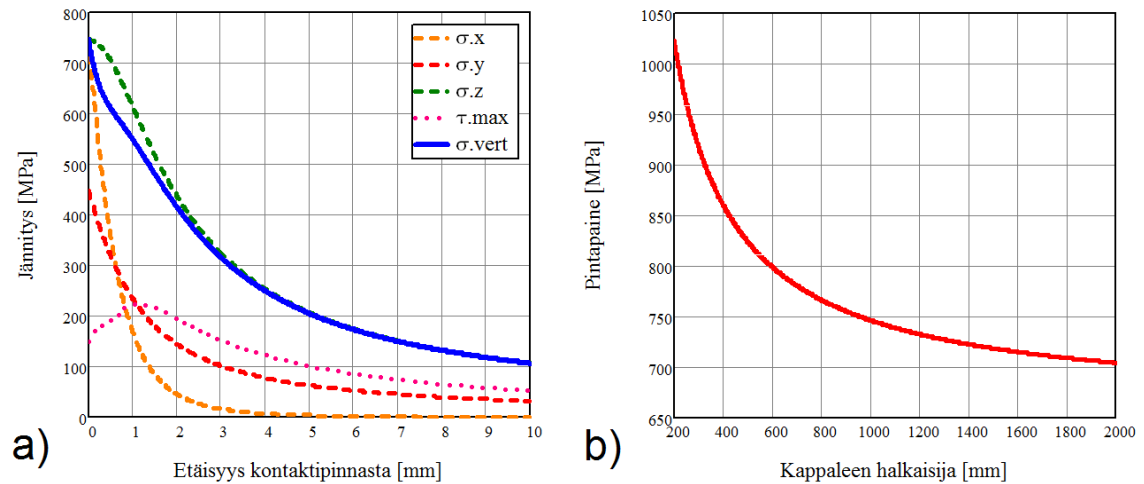
## 5.1 Materiaalivalinta

Uuden tukirullan ulkorengkaan materiaaliksi valittiin Böhler K340 kylmätyökaluteräs. Kylmätyökaluteräs on ominaisuuksiltaan sitkeää ja hyvin abrasiivista ja adhesiivista kulutusta kestävä. Ulkorengas on vakuunikarkaistu HRC 58-59 kovuuteen. [5] Akselin materiaaliksi valittiin 18CrNiMo7-6 hiiletysteräs. Hiiletysteräs on ytimeltään sitkeää ja suuren lujuuden omaavaa ja pinnaltaan karkaistuna kulutuksenkestävää. Akselille on tehty vakuumihiiletys arvoon  $CHD=0,8$ , pinnan kulutuskestävyyden parantamiseksi. [20] Laakerien asennusasennon muutoksen myötä kansien tehtävä on pelkästään suojata laakereita ja toimia akselitiivisten pesänä, joten niiden materiaaliksi valittiin edullinen S355 rakenneteräs.

## 5.2 Lujuustarkastelut

Tukirullan akselille ja ulkorengkaalle suoritettiin lujuustarkastelut, jotka on esitetty liitteessä B kohdissa 1-3. Tukirullan ulkorengkaan kosketusjännitykset laskettiin Hertzin teorian mukaisesti. Laskennassa tukirullan halkaisija on 280 mm ja kappaleen halkaisija 1000 mm. Kuvassa 20b on esitetty sorvattavan kappaleen halkaisijan vaikutus tukirullaan syntyvän pintapaineen suuruuteen. Pieniä kappalehalkaisijoita esiintyy taipumakompensoitujen telojen akseleiden sorvauksessa, joilla myös kappalemassat ovat korkeita. Telavaippojen tapauksissa suurilla kappalemassoilla halkaisijat ovat isompia.

Laskennan tuloksena saatiin maksimipintapaineeksi 751 MPa ja maksimileikkausjännitykseksi 225 MPa, joka sijaitsee 1,1 mm pinnan alapuolella. Kuvassa 20a on esitetty tukirullan ulkorenaan pinnanalaiset pääjännitykset, leikkausjännitys ja Von Mises-jännitys. Saatuja tuloksia verrattiin karkaistun (HRC 57-59) Böhler K340 kylmätyökä-luteräksen myötölujuuksiin [6] ja varmuuksiksi puristukselle saatiin 3,3 ja leikkaukselle 5,5. Pieniä kappalehalkaisijoita sorvattaessaan kosketusjännitykset eivät muodostu rajoittavaksi, koska 40 t ja halkaisijaltaan 200 mm kappaleen varmuus puristukselle on 2,4.



**Kuva 20.** Tukirullan ulkorenaan pinnanalaiset jännitykset a) ja kappaleen halkaisijan vaikutus pintapaineeseen b)

Akselin lujuustarkastelu suoritettiin nimellisjännitysten menetelmällä. Tukirullan akseli ei pyöri ja siihen vaikuttava kuorma pysyy paikallaan. Akselin kokemat kuormitukset syntyvät kappaleiden nostoissa ja sorvaustapahtumassa esiintyvistä kuormista. Nämä kuormitukset ovat tykyttäviä eli kuormitus vaihtelee ainoastaan nollan ja kuormituksen aiheuttaman puristus- tai vetojännityksen välillä. Kappaleiden nostojen aiheuttamat kuormitukset ovat niin pieniä, että akselin todennäköinen kestoikä väsymiseen nähden on ääretön. Sorvauksessa syntyvien kuormien tapauksessa esiintyvien voimien tulisi olla vähintään 2,7-kertaisia, jotta akselin todennäköinen kestoikä väsymiseen nähden olisi äärellinen. Tällaiset iskut ovat kuitenkin niin harvinaisia, että kuormitusmäärät jäävät alhaisiksi. Tästä syystä voidaan todeta, että akselin kestoikä ei aiheuta ongelmia. Akselin staattinen varmuus maksimikuormituksen aiheuttamaan taivutukseen nähden on 11,6 ja leikkaukseen nähden 26,4. Akselin maksimitaipuma laskettiin yksinkertaistamalla akseli tasapaksuksi keskeltä kuormitetuksi kaksitukiseksi palkiksi. Maksimitaipumaksi saatiin 0,05 mm.

### 5.3 Laakerointi

Laakerointitavan valinta suoritettiin kolmen laakerityypin kesken: vierintälaakeri, hydrodynaaminen liukulaakeri ja hydrostaattinen liukulaakeri. Laakerityyppejä vertailtiin



taulukon 6 mukaisesti eri kategorioissa, joille oli asetettu tärkeys kertoimet. Laakerin käyttöalueelta vaaditaan pyörimisnopeutta välillä 0-100 r/min ja kantavuutta 0-40 000 kg kappalemassoilla. Tukirullan vierintätarkkuudella on suora vaikutus sorvauksen mitattarkkuuteen, joten myös laakerilta vaaditaan hyvää vierintätarkkuutta. Laakeroinnin kokoon vaikuttaa rullapukin tukirullalle määräämät liityntämitat ja tukirullan maksimiulkohalkaisija.

*Taulukko 6 Laakerointityyppien vertailu*

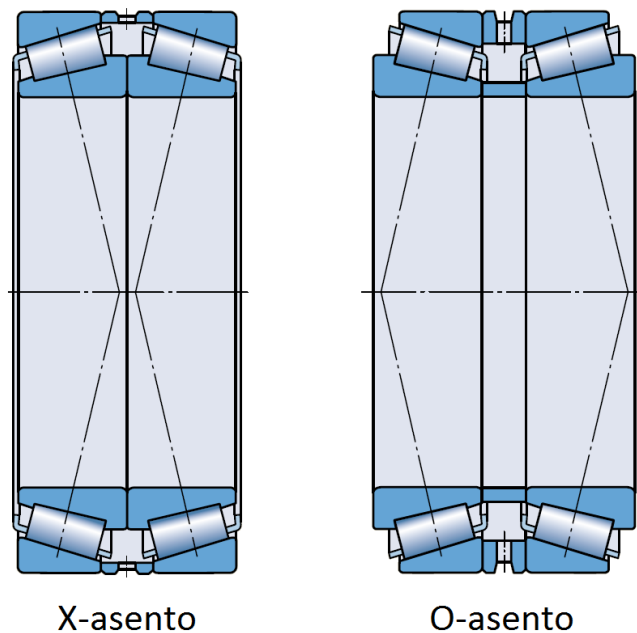
	Kerroin	Vierintälaakeri	Hydrodynaaminen liukulaakeri	Hydrostaattinen liukulaakeri
Käyttöalue	0,5	8	6	9
Kuormituskyky	0,5	7	6	9
Tarkkuus	0,3	8	7	8
Tilantarve	0,5	7	9	3
Kestoiäkä	0,4	7	6	9
Huollettavuus	0,2	7	8	4
Kustannukset	0,4	6	7	2
		<b>20</b>	<b>19,4</b>	<b>18,1</b>

Käyttöalueeltaan paras on hydrostaattinen liukulaakeri, tosin sen optimointi käyttöalueelle vaatii voitelujärjestelmän tarkkaa mitoittamista. Kappaleiden laskujen yhteydessä tapahtuvien iskujen aiheuttamat vauriot laakereissa eivät aiheudu ongelmaksi hydrostaattiselle liukulaakerille, koska kosketuspintojen välillä on voitelukalvo myös laakerin ollessa pysähdyksissä, toisin kuin vierintä- ja hydrodynaamisilla liukulaakereilla. Pienillä pyörimisnopeuksilla ja korkeilla kuormilla vierintä- ja hydrodynaamisten liukulaakereiden kosketuspintojen väliin ei pääse syntymään nestevoitelutilanteen mukaista voitelukalvoa, jolloin kosketuspintojen välillä on raja- tai sekavoitelutilanne. Raja- ja sekavoitelutilanteissa kosketuspinnat pääsevät kosketuksiin, jolloin alkaa esiintyä kulumista. Telasorvauksessa vaadittavan tarkkuuden osalta kaikki laakerointityypit ovat melko tasavertaisia. Tilantarpeeltaan paras vaihtoehto on hydrodynaaminen liukulaakeri ja huonoin hydrostaattinen liukulaakeri, koska se vaatii toimiakseen voitelujärjestelmän. Hydrostaattinen liukulaakeri on kestoikänsä paras, mutta sen huollettavuus on huomattavasti huonompi verrattuna vierintä- ja hydrodynaamiseen liukulaakeriin. Kustannuksiltaan vierintä- ja hydrodynaaminen liukulaakeri ovat melko samoja, mutta hydrostaattisen liukulaakerin kustannukset ovat huomattavasti korkeammat. Vertailun perusteella laakerointityypiksi valittiin vierintälaakeri.

Laakerityyppinä päädyttiin pitäytymään kartiorullalaakereissa. Kartiorullalaakereiden etuna on suuri jäykkyys ja laakerin välyksen säätömahdollisuus. Kartiorullalaakeri sallii myös aksiaalikuormitusta, jota saattaa syntyä rullapukin linjauksivirheistä johtuvasta tukirullan aurauksesta. Laakerimalli säilyi samana 32022 X/Q kartiorullalaakerina. Laakeri-

koon kasvattaminen olisi pienentänyt ulkorenkaan seinämänpaksuutta, jolla olisi ollut heikentävä vaikutus ulkorenkaan lujuuteen.

Suurin muutos laakeroinnin osalta oli asennusasennon kääntäminen päinvastaiseksi ja sovitteiden muuttaminen. Käytössä olevissa tukirullissa kartiorullalaakeripari oli asennettu X-asentoon ja sovitteet olivat siten, että ahdistussovite oli laakerin ja akselin välillä ja välisovite laakerin ja ulkorenkaan välillä. Kartiorullalaakerin asennus käännettiin O-asentoon, jolloin laakerivälitys pystytään säätämään akselille tulevalla akselimutterilla. Laakerivälityksen säätö akselimutterilla poistaa kansien sovitehionnan tarpeen ja siten yksinkertaistaa tukirullien huoltoa ja vähentää kustannuksia. Kuvassa 21 on esitetty kartiorullalaakerin asennusasennot. O-asennossa rullien akseleita vastaan kohtisuorien kuormitusviivojen ja laakerin pyörimisakselin välisten leikkauspisteiden etäisyys on suurempi kuin X-asennossa. Tästä johtuen O-asentoon asennettu laakeriparin jäykkyys ja kallistusmomenttien vastaanottokyky on parempi kuin X-asentoon asennetulla laakeriparilla. Tukirullan tapauksessa laakerin sisärenkas on paikallaan, laakerin ulkorengas pyörii ja kuormitus vaikuttaa yhdeltä suunnalta. Tällaisessa tapauksessa laakerin ulkorenkaan ja tukirullan ulkorenkaan välille valitaan ahdistussovite ja laakerin sisärenkaan ja tukirullan akselin välille valitaan välisovite. Tukirullan ulkorenkaan reiälle valittiin toleranssiksi P7 ja akselin toleranssiksi g6. [13]



*Kuva 21. Kartiorullalaakeriparin asennusasennot, muokattu lähteestä [13]*

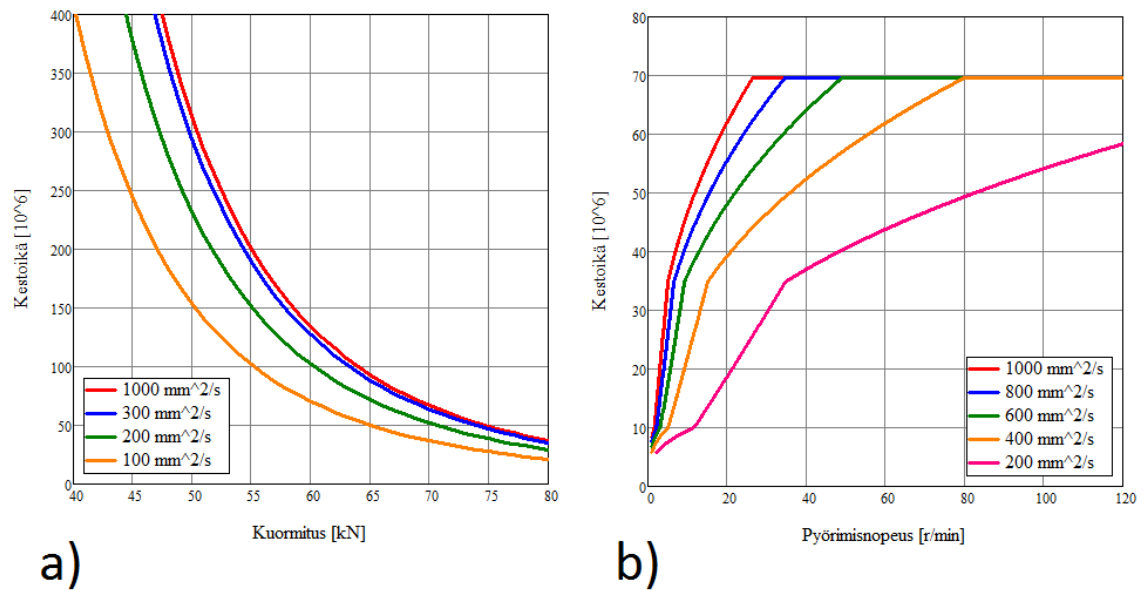
## 5.4 Voitelu

Koska uudessa tukirullamallissa käytetään samoja kartiorullalaakeita kuin käytössä olevassa mallissa, päästään tukirullan laskennallista kestoikää kasvattamaan ainoastaan voiteluaineen valinnalla. Nimellinen kestoikä on molemmilla malleilla sama, mutta uu-

den tukirullamallin voitelu toteutetaan paremmin käyttötilanteeseen soveltuvalla rasvala.

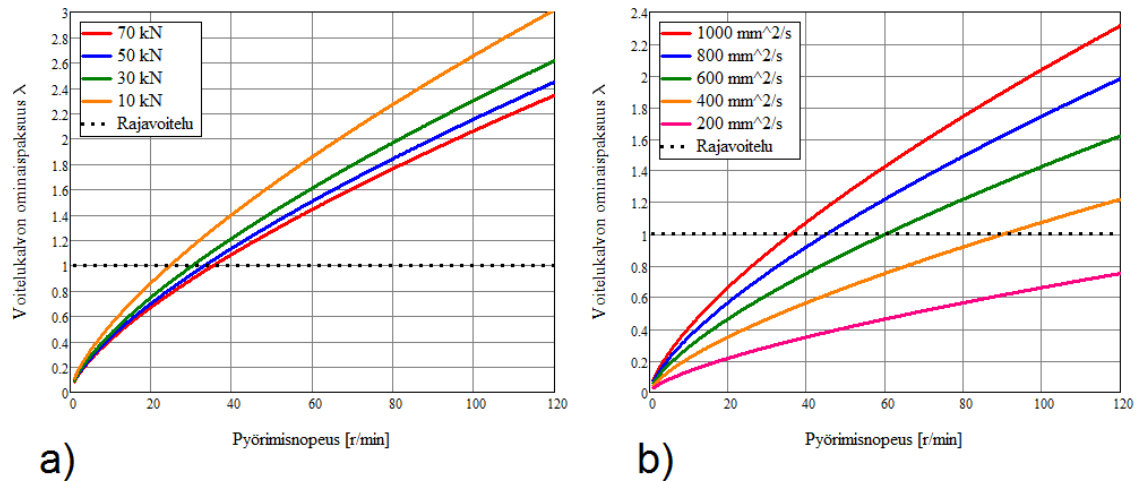
Kuvasta 22a näkee voiteluaineen viskositeetin vaikutuksen laakerin kestoikään. Kuvassa pyörimisnopeus on vakio 100 r/min ja kuormitus vaihtelee. Maksimipyöritysnopeudella viskositeettia kasvattamalla ei pystytä lisäämään kestoikää, koska ISO 281 mukainen laskenta asettaa viskositeettisuhteen maksimiarvoksi 4. Tukirullan tapauksessa 100 r/min pyörimisnopeudella tyydyttävään voiteluun vaadittava viskositeetti on  $83 \text{ mm}^2/\text{s}$ , joten viskositeettisuhteen arvo 4 saavutetaan  $332 \text{ mm}^2/\text{s}$  viskositeetilla, jonka jälkeen laakerin laskennallinen kestoikä ei enää kasva.

Alhaisemmilla pyörimisnopeuksilla viskositeettia kasvattamalla pystytään lisäämään laakerin kestoikää. Kuvan 22b mukaisesti korkeammalla voiteluaineen viskositeetilla muodostuu vierintäpintojen välille voitelukalvo jo pienemmillä pyörimisnopeuksilla ja siten laakerin kestoikä kasvaa. Kuvaajan arvot on laskettu  $69,3 \text{ kN}$  maksimikuormituksella ja sen epäjatkuvuuskohtat johtuvat  $a_{\text{ISO}}$ -kertoimen eri laskentakaavasta eri viskositeettisuhteilla.



**Kuva 22** Laakerin kuormituksen a) ja pyörimisnopeuden b) vaikutus kestoikään eri voiteluaineen viskositeeteilla

Kuvassa 23a on esitetty kuormituksen vaikutus voitelukalvon ominaispaksuuteen  $1020 \text{ mm}^2/\text{s}$  viskositeetin omaavalla voiteluaineella. Kuvaajasta nähdään kuinka kuormituksella on vähäinen vaikutus syntyvän voitelukalvon ominaispaksuuteen. Kuvassa 23b on esitetty voiteluaineen viskositeetin vaikutus voitelukalvon ominaispaksuuteen  $69,3 \text{ kN}$  maksimikuormituksella. Kuvaajasta nähdään, kuinka alhaisilla voiteluaineen viskositeeteilla voitelu ei poistu rajavoitelualueelta edes tukirullan maksimipyörimisnopeudella eli pintojen välille ei pääse syntymään voitelukalvoa.



**Kuva 23** Laakerin kuormituksen a) ja voiteluaineen viskositeetin b) vaikutus voitelukalvon ominaispaksuuteen pyörimisnopeuden suhteen

Kuvista 22 ja 23 voidaan päätellä, että kasvattamalla voiteluaineen viskositeettia voidaan laakerien kestoikää lisätä. Korkean viskositeetin hyödyt esiintyvät erityisesti korkeilla kuormituksilla ja hitailla pyörimisnopeuksilla, koska korkean viskositeetin omaava voiteluaine pystyy muodostamaan näissä olosuhteissa voitelukalvon huomattavasti paremmin kuin matalan viskositeetin voiteluaine. Esimerkiksi käytössä olevien tukirullien voitelussa käytetty  $160 \text{ mm}^2/\text{s}$  voitelurasva vaatisi maksimikuormituksen alaisena  $227 \text{ r/min}$  pyörimisnopeuden, jotta sen aikaansaama voitelutilanne edes poistuisi rajavoitelualueelta.  $1020 \text{ mm}^2/\text{s}$  viskositeetin voitelurasvalla tämä rajavoitelutilanteesta poistuminen tapahtuu jo  $36 \text{ r/min}$  pyörimisnopeudella.

Voiteluun käytetään laakerivalmistajan NLGI 2 kovuusluokan mineraaliöljypohjaista rasvaa. Rasvan saentimena toimii litium-kalsium-saippua ja se sisältää molybdeenisulfidia ja grafiittia, joiden ansiosta voitelukyky säilyy vaikka perusöljyn voitelukalvo särkyisi. Rasvan perusöljyn viskositeetti on  $40$  celsiusasteessa  $1020 \text{ mm}^2/\text{s}$  ja  $100$  celsiusasteessa  $58 \text{ mm}^2/\text{s}$ . Tämän tyyppinen rasva soveltuu hyvin raskaasti kuormitettujen ja hitaasti pyörivien laakereiden voiteluun. Tukirullien laakereiden tapauksessa rasva sallii valmistajan mukaan pyörimisnopeudet  $176 \text{ r/min}$  asti eli se ei muodostu rajoittavaksi. [10]

## 5.5 Tiivistys

Tiivistimen tehtävä on estää tiivistyskohdan molemmiin puolin olevien aineiden liiallinen sekoittuminen tai paineiden tasaantuminen. Tiivistimen valintaan vaikuttaa lämpötila, nopeus, paine-ero, voiteluaine, asennusasento ja tiivistettävien osien toleranssit. Rasvavoitelussa käytettäviltä tiivistimiltä ei vaadita huippuluokan tiivistyskykyä voitelurasvan korkean viskositeetin ansiosta. [8],[9]

Tukirullan tapauksessa tiivistimenä käytetään pyörimisliikkeen tiivistävää standardin DIN 3760 A mukaista nitrilikumista valmistettua akselitiivistettä. Akselitiiviste koostuu metallirungosta, jonka ympärille on valettu nitrilikumia. Tiivistyshuulta kuormitetaan akselin pintaa vasten tiivisteessä olevalla metallijousella. Tukirullan tapauksessa käyttölämpötila on arviolta 40 °C ja tiivistyksessä ei synny paine-eroa. Maksiminopeus tiivistyksessä tukirullan pyöriessä 100 r/min on 0,47 m/s, joten nitrilikumin rasvavoitelussa sallima maksiminopeus 15 m/s ei ylity. Akselitiiviste huuli asennetaan ulospäin, koska tällöin se suojaa parhaiten ulkoa tulevalta lialta. Tiiviste asennusasento myös mahdollistaa ylimääräisen rasvan poistumisen laakeroinnista, mitä voi tapahtua kun tukirullalle suoritetaan jälkivoitelua. Tukirullan kansien tiivistepesät ovat toleranssissa H8, akseli toleranssissa h11 ja akselin pinnanlaatu on Ra 0,4. [8]

## 5.6 Laakeroinnin kestoikä

Laakerin kestoikä laskettiin standardin ISO 281 mukaisesti ja se on esitetty liitteessä B kohdassa 4. Laskennan tulokseksi maksimikuormituksella (40 t kappale ja 100 r/min pyörimisnopeus) saatiin laakerin kestoiksi 90 % luotettavuudella 11 600 tuntia. Tukirullien käyttömääräksi kuukaudessa arvioitiin 200 h, kun sorvi on käytössä kahdessa vuorossa ja tukirullia käytetään n. 60 % sorvausvaiheista. Tällä käyttötuntimäärällä laakerin kestoiksi kuukausina saatiin 58 kk, joka on n. 5 vuotta.

Laakerin staattinen kantavuus laskettiin ISO 76 standardin mukaisesti. Standardin mukaan laakerin staattinen kantavuusluku vastaa tilannetta, jossa vierintäelinten kokonaismuodonmuutokset ovat maksimissaan 0,0001 kertaa niiden halkaisijoiden suuruisia. Näillä muodonmuutoksilla eniten kuormitetun vierintäelimen ja vierintäpinnan välinen kosketusjännitys on rullalaakereilla 4000 MPa. [16] Lasketulla tukirullan staattisella maksimikuormituksella laakerin staattisen kantavuuden varmuusluvuksi saatiin 5,6. Kuormitusten mittausten perusteella arvioitujen 440 kN iskukuormitusten tapauksessa vastaava varmuusluku on 1,8. Laakerin staattisen kantavuuden ylittämiseksi tukirulliin kohdistuvien iskujen tulisi olla 780 kN suuruisia, mikä vastaisi 40 t kappaleella 5,6 kertaa staattista kuormitusta suurempia iskuja.

## 5.7 Tukirullarakenteiden vertailu

Rakenteeltaan uusi tukirulla on hieman yksinkertaisempi kuin käytössä oleva. Uuden tukirullan osien määrä väheni 13 erilaisesta osasta 9 osaan. Uuden tukirullamallin kannet ovat samanlaisia ja sen myötä myös molemmat akselitiivisteet ovat samanlaisia, toisin kuin käytössä olevassa rakenteessa. Uudessa rakenteessa ei ole laakereiden etäisyyden säätävää välirengasta vaan tämä on toteutettu tukirullan ulkorenkaassa olevalla olakkeella. Myös laakereiden ulkorenkaiden pyörintää estävät lieriösokat puuttuvat, mikä poistaa myös tukirullan ja laakerin ulkorenkaaseen tehdyt urat. Kustannuksiltaan uusi tukirullarakenne on hieman käytössä olevaa edullisempi. Osien materiaalikustan-

nukset ovat hyvin samanlaiset, koska käytetyt materiaalit eivät suuresti eroa toisistaan. Uuden tukirullarakenteen akselin hiiletys tuo lisäkustannuksia, mutta se ei ylitä vähentyneen osamäärän tuomaa säästöä.

Laakeroinnin kestoiän osalta uusi tukirullarakenne on parempi uuden voitelurasvan ansiosta. Uuden tukirullan 11 600 tunnin kestoikä verrattuna käytössä olevan nykyisellä voitelurasvalla voidellun tukirullan 8100 tuntiin on 43 % suurempi. Lasketut kestoiät ovat maksimikuormitukselle, mutta uuden voitelurasvan edut tulevat paremmin esiin pienemmillä pyörimisnopeuksilla. Esimerkiksi 50 r/min pyörimisnopeudella uuden voitelurasvan tuoma kestoiän lisäys on 92 % suurempi nykyiseen voitelurasvaan verrattuna ja tämä etu vain kasvaa pienemmille pyörimisnopeuksille mentäessä. Vaikkakin ainoa laskennallinen ero kestoiässä on saavutettu pelkällä voitelurasvan vaihdolla, on myös laakereiden sovitteiden vaihdolla varmasti kestoikää pidentävä vaikutus.

## 6. TUKIRULLIEN KUNNOSSAPITO

Tukirullien huollosta vastaa kunnossapitoon erikoistunut yritys, joka vastaa myös koko tehdasalueen konekunnossapidosta. Huolto tehdään kunnossapitoyrityksen tiloissa, jotka sijaitsevat tehdasalueella. Huoltoon tarvittavat koneistukset ja mahdolliset uusien osien valmistukset tehdään tehtaalla omalla protopajalla.

### 6.1 Käytössä olevan tukirullarakenteen huolto

Käytössä olevan tukirullarakenteen huolto koostuu seuraavista vaiheista: purku, osien tarkastus, laakereiden asennus, hionnat ja viimeistely. Kuvassa 24 on käyty lävitse käytössä olevan tukirullarakenteen läpikäymät työvaiheet sen huollon aikana.

#### Purku

Käytössä olevien tukirullien purku aloitetaan poistamalla rullien sivuilla olevat kannet. Tämän jälkeen akseli laakereineen painetaan puristimella pois rullan keskeltä. Tukirullan ulkorenkaaseen jäänyt laakerin ulkorengas poistetaan puristimella. Akselilla oleva akselimutteri ja lukitusaluslaatta poistetaan ja laakereiden sisärenkaat irrotetaan puristimella. Purkamisen jälkeen tukirullan osat pestään puhtaaksi voitelurasvasta ja liasta.

#### Osien tarkastus

Kaikki osat tarkastetaan silmämääräisesti, kiinnittäen erityistä huomiota osien laakeripintoihin. Havaitut viat (purseet, naarmut, jne.) poistetaan käsin hiomalla, mutta suurempien vikojen tapauksissa osat uusitaan. Mikäli ulkorengas laakeritilat ovat selvästi kuluneet ja pinnat ovat huonoja, toimitetaan se laakeripintojen pinnoitukseen. Ulkorengas laakeritilat hiotaan protopajalla ylittämällä, jonka jälkeen se toimitetaan ulkopuoliselle yritykselle pinnoitukseen. Pinnoitus suoritetaan kovakromauksena. Pinnoituksen jälkeen ulkorengas laakeritilat hiotaan toleransseihin protopajalla. Ulkorengas laakeritilat hiotaan myös magneettijauhetarkastus mahdollisten säröjen havaitsemiseksi. Tarkastuksen suorittaa tehtaalla oma tarkastaja.

#### Laakereiden asennus

Laakereiden asennus alkaa laakereiden sisärenkaiden asennuksella akselille. Laakereiden sisärenkaat lämmitetään 110 °C lämpötilaan ennen asennusta. Laakerit lukitsevaa akselimutteria on ohennettu ja sen reunaviistettä on kasvatettu, jotta se ei törmäisi akseliliiviteeseen ja väistäisi laakerin rullakehdon. Samalla myös lukitusaluslaatta on muokattu törmäysten estämiseksi. Laakereiden sisärenkaiden lopullinen aksiaalikiristys suo-

ritetaan vasta osien jäähtyttyä. Seuraavaksi rullaan asennetaan toinen laakereiden ulkorenkaista, lieriösokka ja toinen kansista, johon on asennettu uusi akselitiiviste. Laakerin asennuksen helpottamiseksi tukirullan ulkorengas lämmitetään 70 °C lämpötilaan. Tämän jälkeen akseli asennetaan rullan sisälle ja asennetaan toisen laakerin ulkorengas lieriösokkineen paikalleen. Laakereiden ulkorenkaiden sokkaurat teetetään ulkopuolisella yrityksellä, joka valmistaa urat kipinätyöstöllä. Laakereiden lopullisen esikuormituksen ja välyksen suuruus määräytyy vestipalojen avulla, joilla painetaan laakereita yhteen. Ennen laakereiden välyksen säätöä tulee osien olla jäähtyneitä samaan lämpötilaan. Vestipalojen avulla säädetään välys siten, että tukirullaa pystyy pyörittämään käsin. Laakereiden välystä mitataan tukirullan akselille kiinnitetyllä mittakellolla, joka asetetaan tukirullan ulkorengaan sivupinnalle. Ulkorengaan vastakkaiseen sivupintaan kohdistetaan käsin vivun avulla akselin suuntaista kuormitusta, mikä aiheuttaa laakereille kallistusmomentin. Suurin sallittu rullan välys on 0,01 mm.

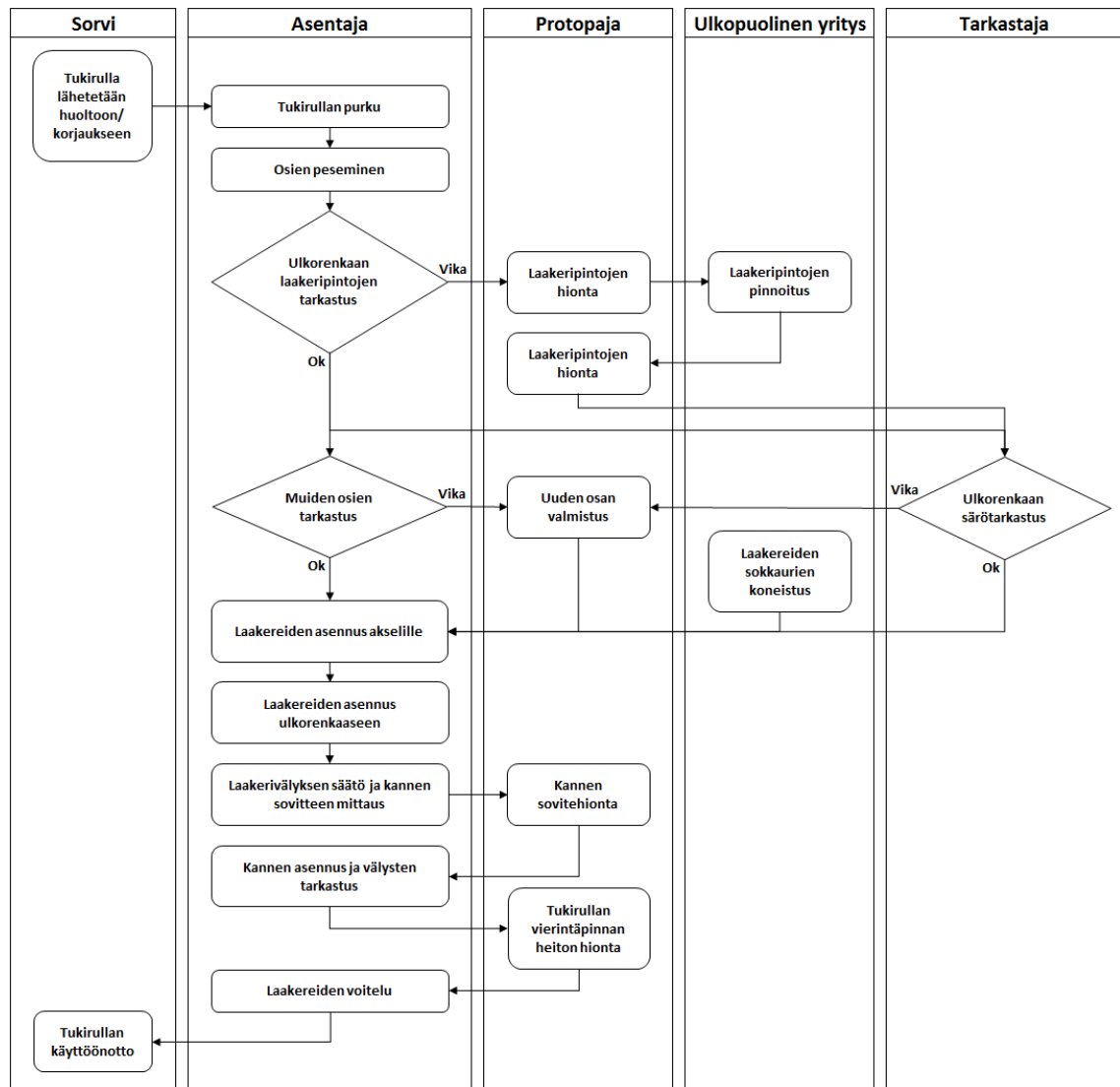
## **Hionnat**

Oikean laakereihin kohdistuvan välyksen aikaansaamiseksi toinen kansista hiotaan sovitmittaan. Tarvittava kannen mitta mitataan rullan sivupinnan ja laakerin ulkorengaan etäisyydestä 0,01 mm tarkkuudella. Sovitehiottu kansi asennetaan paikalleen ja tukirullan välys tarkastetaan uudestaan. Tämän jälkeen tukirullan vierintäpinta hiotaan heitotomaksi. Hionnassa tukirulla tuetaan hiomakoneen kärkien väliin ja akselin pyöräminen estetään. Yksi kannen kiinnitysruuveista poistetaan ja sen kierrereikään asennetaan pyörityslaite, jolla tukirullaa pyöritetään pyöröhionnan aikana. Laakerit voidellaan pienellä määrällä alhaisen viskositeetin omaavaa öljyä rullan pyörinnän helpottamiseksi. Vierintäpinnan maksimi sallittu heitto on 0,01 mm. Hionnat suoritetaan tehtaan omalla protopajalla.

## **Viimeistely**

Rullan hionnan jälkeen toinen kansista poistetaan ja suoritetaan laakereiden voitelu. Voitelurasvaa lisätään tukirullaa koko ajan pyörittäen kunnes sitä alkaa tulla lävitse laakerista. Tämän jälkeen kansi asennetaan paikalleen ja tukirulla on taas valmis käyttöön.





*Kuva 24. Käytössä olevan tukirullarakenteen huollon vuokaavio*

## 6.2 Uuden tukirullarakenteen huolto

Uuden tukirullarakenteen huolto koostuu seuraavista vaiheista: purku, osien tarkastus, laakereiden asennus ja viimeistely. Kuvassa 25 on käyty lävitse uuden tukirullarakenteen läpikäymät työvaiheet sen huollon aikana.

### Purku

Uuden tukirullarakenteen purku aloitetaan irrottamalla rullan kannet. Tämän jälkeen akselimutteri ja lukitusaluslaatta poistetaan ja akseli laakereineen painetaan puristimella pois rullan keskeltä. Tukirullan ulkorenkaaseen jääneet laakereiden ulkorenkaat poistetaan puristimella, samoin kuin akselilla oleva laakerin sisärengas. Purkamisen jälkeen tukirullan osat pestään puhtaaksi voitelurasvasta ja liasta.

## **Osien tarkastus**

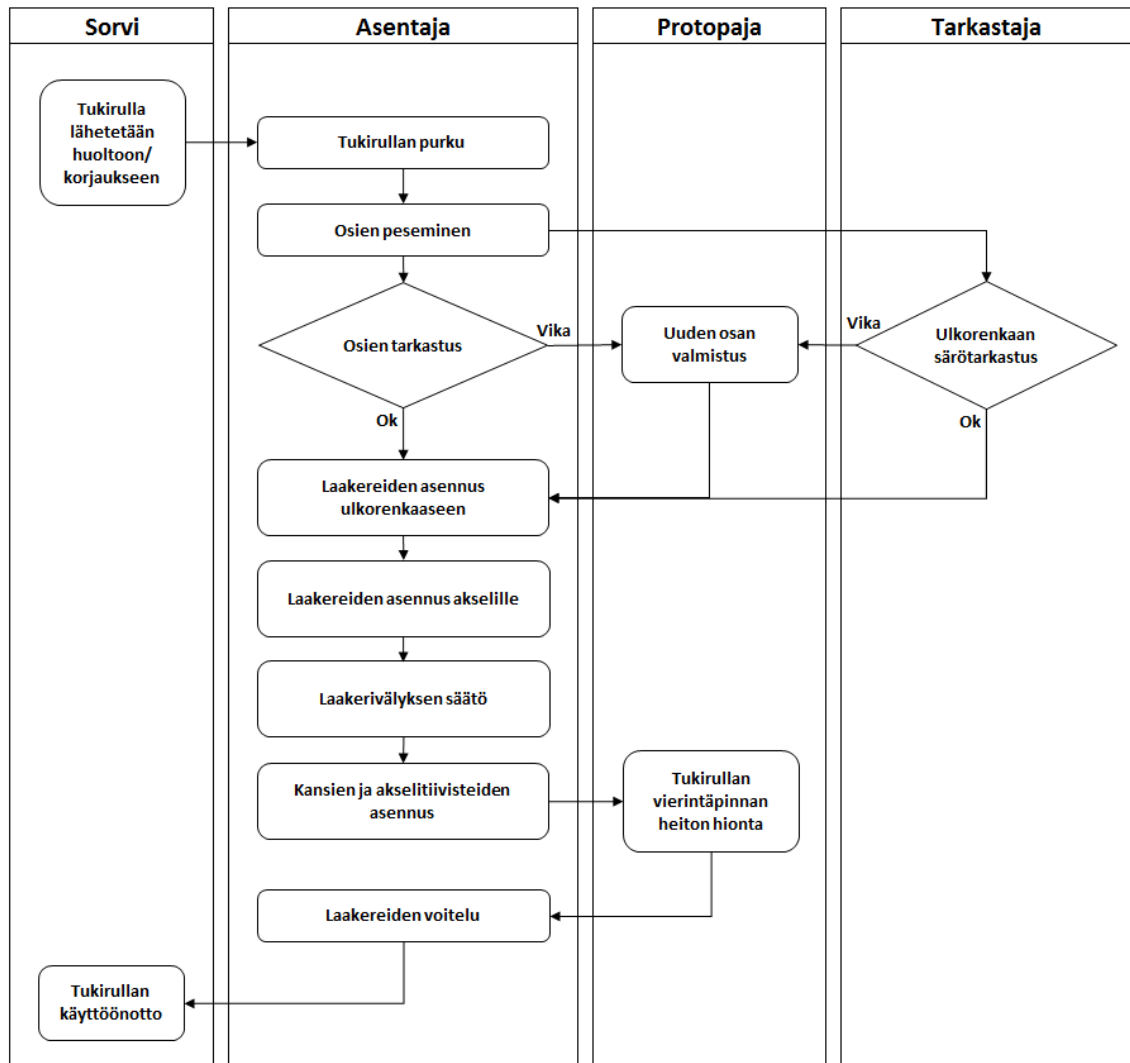
Osien tarkastuksessa käydään lävitse samat asiat kuin käytössä olevan tukirullarakenteen tapauksessa. Samoin tukirullan ulkorenkaalle suoritetaan magneettijauhetarkastus mahdollisten säröjen havaitsemiseksi.

## **Laakereiden asennus**

Laakereiden ulkorenkaiden asennus tapahtuu lämmittämällä tukirullan ulkorengas 150 °C lämpötilaan. Ulkorengaan jäähtyttyä laakereiden asettuminen välyksettömästi vasten tukirullan ulkorengaan olaketta varmistetaan puristimella painamalla. Toinen laakerin sisärenkaista asennetaan akselille lämmittämällä se 80 °C lämpötilaan. Tämän jälkeen tukirullan ulkorengas laakereiden ulkorenkaineen asennetaan akselille ja toinen laakereiden sisärenkaista asennetaan paikalleen. Lukitusaluslaatta ja akselimutteri asennetaan ja laakereiden välys säädetään. Maksimi sallittu välys on sama 0,01 mm, kuin käytössä olevalla tukirullarakenteella. Lopuksi asennetaan akselitiivisteet paikalleen kansiin ja kannet kiinnitetään tukirullan ulkorengaaseen kuusiokoloruuvein.

## **Viimeistely**

Uuden tukirullarakenteen vierintäpinnan heitottomaksi hionta tapahtuu samalla tavoin kuin käytössä olevalla tukirullarakenteella, maksimi sallitun heiton pysyessä 0,01 mm. Hionnan jälkeen tukirullan laakerit voidellaan voitelurasvalla siten, että rasvan täyttöaste on 90-100 %. Voitelun jälkeen tukirulla on valmis käyttöön.



*Kuva 25 Uuden tukirullarakenteen huollon vuokaavio*

### 6.3 Tukirullien huollon kehitys

#### Huollon työtuntien ja läpimenoajan lyhentäminen

Yhteen käytössä olevan tukirullarakenteen mukaisen tukirullan huoltoon kuluu keskimäärin 35 tuntia. Tästä ajasta n. 30 tuntia kuluu asentajan toimesta ja loput protopajan. Mikäli tukirullien osissa ilmenee vikoja ja niitä joudutaan uusimaan voi huoltoon kulua aika jopa kolminkertaistua. Arviolta ainoastaan puolet asentajan ajasta on itse huollon tekoa, loput on odottelua, osien kuljetuksia tai muita viivästyksiä. Esimerkiksi osien pesu tehdään teollisuuspesukoneella, jonka ajan asentaja ei pysty tekemään muita toimenpiteitä kuin odottamaan pesun valmistumista. Samoin aikaa kuluu laakereiden asennuksessa osien jäähtymisen odotteluun, jotta laakerivällys päästään säätämään taasaantuneessa lämpötilassa. Näissä odottelutapauksissa asentajan tekemät tunnit menevät tukirullien huollolle, koska odotusajat ovat kuitenkin niin lyhyitä, että asentajan ei kannata lähteä tekemään toisia työtehtäviä toiselle puolelle tehdasaluetta.

Huollon läpimenoaika on normaalisti 1-2 kuukautta, mikä on huomattavasti huoltoon kulutettua työaikaa pidempi. Tukirullat eivät ole tärkeydeltään yhtä kriittisiä kuin työstökoneet ja muut tärkeät laitteet, joten niiden huoltoa suoritetaan silloin, kun ei ole muita kriittisempiä työtehtäviä. Tästä johtuen tukirullien huolto voi myös keskeytyä jos tärkeämpiä kunnossapitokohteita ilmenee. Protopajan keskimääräinen reagointiaika hionnoille on normaalisti 1-2 päivää ja mikäli joitain osia joudutaan uusimaan vievät materiaalihankinnat oman aikansa. Esimerkiksi ulkorenkaan uudelleenpinnoitus kestää 4 viikkoa.

Uuden tukirullarakenteen ansiosta pystytään työvaiheita ja osien kuljetuksia paikasta toiseen vähentämään. Uuden tukirullarakenteen huollossa tapahtuvat työvaiheet vähenevät n. 20 % verrattuna käytössä olevaan tukirullarakenteeseen. Näistäkin työvaiheista monet ovat yksinkertaisempia ja vähemmän aikaa vieviä. Laakeroinnin asennusasennon muuttamisen myötä kansien sovitehionnat jäävät pois, joten tukirullan tarvitsee käydä protopajalla ainoastaan vierintäpinnan hionnassa. Laakerivälyksen säätö tapahtuu uudessa tukirullarakenteessa akselimutterilla, mikä lyhentää laakerivälyksen säätöön kulunutta aikaa huomattavasti. Työvaiheiden vähenemisen ja yksinkertaistumisen myötä uuden tukirullarakenteen huollon työtunnit vähenevät arviolta 30 %. Myös huollon läpimenoaika lyhenee huomattavasti, koska tukirullan osien siirtelyt toimijalta toiselle vähenevät.

Arviot tukirullien huoltoon kuluneista työtunneista ja läpimenoajoista perustuvat tämän työn teon aikana tehtyihin 10 tukirullan huoltoihin ja huoltoa tekevien asentajien arvioihin. Uuden tukirullarakenteen osalta arviot perustuvat kahteen valmistettuun uuden rakenteen mukaiseen tukirullaan. Otantojen ollessa näin pieniä arvioita ei voida olettaa kovin tarkoin. Uuden tukirullarakenteen tuomiin säästöihin päästään paremmin kiinni vasta vuosien kuluessa, mikäli uusi tukirullarakenne osoittautuu toimivaksi ja käytössä olevaa rakennetta ruvetaan korvaamaan uudella.

## **Huolto-ohjeen laatiminen**

Tukirullien huollolle ei ollut laadittu minkäänlaisia ohjeita vaan huoltotoimenpiteet olivat pääasiassa perimätietona tulleita tai itseopittuja. Tästä johtuen vain muutama henkilö osasi tehdä tukirullille oikeaoppisen huollon. Tukirullille laadittiin huolto-ohje tiedon säilyttämiseksi ja uusien henkilöiden työhön perehdytyksen helpottamiseksi. Huolto-ohjeen avulla pystytään varautumaan esimerkiksi tilanteeseen, jossa kunnossapitokumppani vaihtuu, jolloin tiedot ja osaaminen rullien huollosta saattavat hävitä.

Huolto-ohjeessa on läpikäyty jokainen kohta tukirullan huollosta purkamisesta viimeistelyhiontaan. Työvaiheet on valokuvattu ja selitetty siten, että huoltotyön perustaidot omaava henkilö joka ei ole ennen huoltanut tukirullia pystyy suorittamaan huollon.

Huolto-ohjeen avulla pystytään estämään ja ehkäisemään tulevaisuudessa mahdollisia huollossa tehtyjä asennusvirheitä ja vääränlaisia huoltotoimenpiteitä. Asennusvirheiden

ja vääränlaisten huoltotoimenpiteiden vähentämisen avulla pystytään pidentämään tukirullien kestoikiä ja pienentämään tukirullien käytössä esiintyviä turvallisuusriskejä. Huolto-ohje myös pienentää tukirullien huoltoon kuuluvien työtuntien määrää, koska se kuvaa työvaiheet tarkasti, joten asentajan ei tarvitse itse suunnitella työvaiheita ja työtapoja.

### **Aputyökalujen suunnittelu**

Tukirullien huollon helpottamiseksi ja tiettyjen työvaiheiden nopeuttamiseksi suunniteltiin aputyökaluja. Näiden aputyökalujen avulla huollon työvaiheita pystytään toteuttamaan tehokkaammin ja siten vähentämään niihin kuluva aikaa. Kuvassa 26 on esitetty osa suunnitelluista aputyökaluista.

Käytössä olevan tukirullarakenteen laakereiden välyksensäätö on työlästä, aikaa vievää ja tarkkuutta vaativaa työtä. Työn nopeuttamiseksi suunniteltiin laakerivälyksen säätötyökalu, jonka avulla toimenpiteeseen kuluva aika lyheni ja työ yksinkertaistui. Säätötyökalu koostuu kahdesta toisiinsa kierteytetystä laipasta. Ulompi laippa kiinnitetään tukirullan ulkorenkaaseen kuusiokoloruuvein, jonka jälkeen sisempää laippaa kiertämällä pystytään pienentämään laakereiden välystä. Molemmat laipat on hiottu toisiinsa kierrettynä pakettina samaan paksuuteen, jolloin tarvittava kanteen hiottava sovite voidaan mitata suoraan laippojen otsapintojen välisestä erosta. Vestipalojen avulla suoritettu laakerivälyksen säätö kesti normaalisti n. 4-6 tuntia, mutta uuden säätötyökalun avulla sama työ pystytään tekemään 1-2 tunnissa. Samalla myös työ yksinkertaistui huomattavasti.

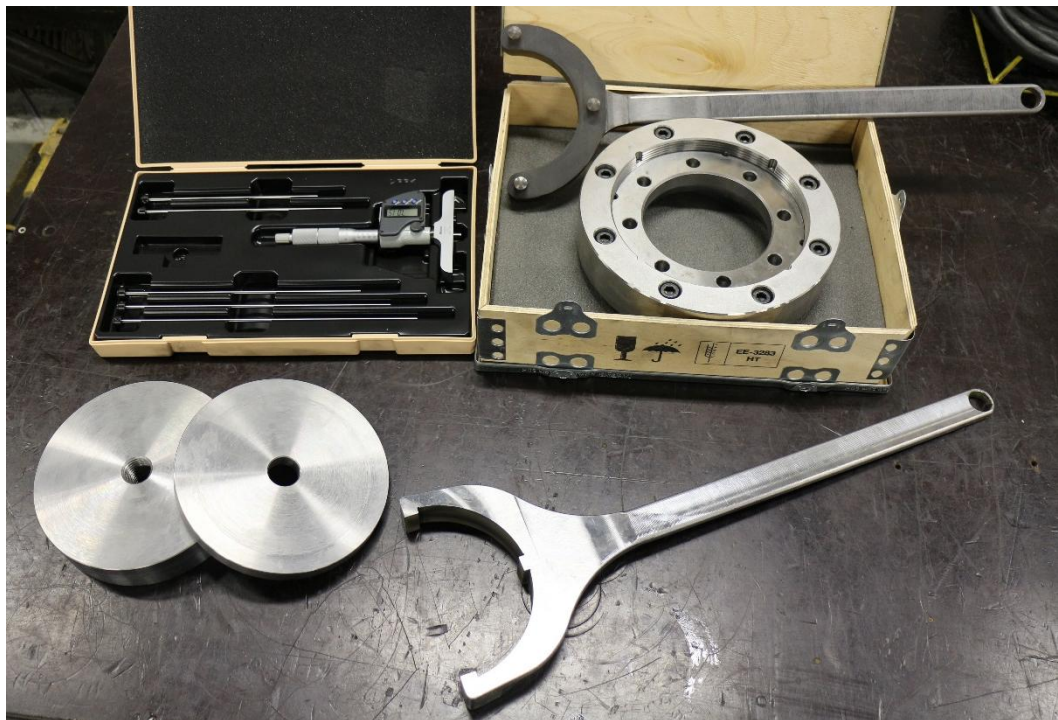
Samalla hankittiin myös välyksenmittaukseen uusi mitta. Kannen sovite oli tähän asti mitattu syvyystyöntömetrillä. Syvyystyöntömetrin mittatarkkuus oli 0,03 mm, jolloin sitä ei voi pitää luotettavana mittavälineenä mitattaessa 0,01 mm toleransseja. Uudeksi mittavälineeksi hankittiin syvyysmikrometri, jonka avulla pystyttiin mittaamaan vaadittava sovite riittävällä tarkkuudella.

Uudessa tukirullarakenteessa laakerin ahdistussovite siirtyi akselilta ulkorenkaan puolelle. Laakerin ulkorenkaat asennetaan tukirullan ulkorenkaan reiän keskellä olevan olakkeen kahta puolen. Asennus tapahtuu lämmittämällä tukirullan ulkorengasta 150 °C lämpötilaan. Asennuksen helpottamiseksi suunniteltiin asennustyökalu jonka tehtävä on varmistaa, että laakerin ulkorenkaat asemoituvat välyksettömästi vasten tukirullan ulkorenkaan olaketta. Asennustyökalu koostuu pyöreästä holkista ja laipasta, jotka asettuvat laakerin ulkorenkaiden molemmille puolille. Holkin ja laipan välillä olevalla ruuvilla kiristetään laakereiden ulkorenkaat tiukasti vasten tukirullan ulkorenkaan olaketta. Kun asetelma on jäähtynyt, laakereiden ulkorenkaiden välyksettömyys varmistetaan puristimella painamalla.

Uuden tukirullan laakereiden irrotusta varten suunniteltiin työkalu. Tukirullan ulkorenkaan sisäreiän olakkeeseen on tehty kevennykset 120° välein laakereiden ulkorenkaiden

irrottamisen helpottamiseksi. Irrotustyökalu on leikattu teräslevystä ja siinä on kolme sakaraa 120° jaolla. Sakaroiden päissä on poraukset, joihin on asennettu halkaisijaltaan 16 mm tapit. Tappien alla porauksen pohjalla on jouset, jotka päästävät tapit painumaan sisään työkalua asennettaessa ja työntävät tapit ulkoasentoon kun työkalu asemoituu tukirullan ulkoreenkaan kevennyksen kohdalle.

Uudessa tukirullarakenteessa akselimutteri asettui tukirullan ulkoreenkaan sisälle niin paljon, että akselimutterin kiinnitys ei ole tavallisella haka-avaimella mahdollista. Suunnittelussa haka-avaimessa on vääntövarsi ja ympyräkaarella 90° jaolla kolme tappia, jotka asemoituvat akselimutterin uriin. Haka-avain on käytössä tukevampi eikä aiheuta yhtä paljoa vahinkoa akselimutterille kuin tavallinen DIN 1810 A mukainen haka-avain.



*Kuva 26 Aputyökaluja*

## **7. KEHITYSEHDOTUKSET**

### **7.1 Tukirulliin kohdistuvien iskujen ehkäiseminen**

Kappaleiden nostoissa syntyvien iskujen estämiseksi tulisi kiinnittää huomiota käyttäjien huolellisuuteen ja varovaisuuteen nostojen yhteydessä. Sorvauksessa syntyvien lastujen aiheuttamien iskujen vähentämiseksi rullapukeissa olevat kappaleen ja tukirullan välistä kitaa suojaavat kitasuojat voitaisiin varustaa pyyhkijällä, joka estäisi lastujen kulkeutumisen kitaan. Kitasuojat ovat tavallisesti metallilevystä taivutettuja ja niiden säätö tapahtuu manuaalisesti kappaleen halkaisijan mukaan. Kitasuoja asetetaan mahdollisimman lähelle kappaletta kuitenkin niin, että se ei kosketa kappaleeseen. Pyyhkijä voisi olla yksinkertaisimmillaan harjalista, joka kiinnitetään kitasuojan etureunaan. Kitasuojan asetuksen yhteydessä harja asetetaan kiinni kappaleen pintaan, jolloin se estää lastujen kulkeutumisen kitaan.

### **7.2 Tukirullien kunnossapidon kehitys**

Tukirullia ei ole millään tavalla identifioitu, mistä johtuen tukirullien vikahistoriaa on erittäin hankalaa kartoittaa. Tukirullille tulisi luoda identifiointijärjestelmä, jotta jokainen tukirulla voitaisiin nimetä ja syöttää käytössä olevaan kunnossapito-ohjelmaan. Tukirullien identifiointi voisi perustua sorvikohtaisesti eli tukirullat on kohdennettu sille sorville, jossa ne ovat käytössä. Sorvikohtaiset tukirullat eroteltaisiin juoksevalla numerolla. Identifioinnin myötä tukirullat voitaisiin kirjata kunnossapitojärjestelmään, jonka avulla pystyttäisiin seuraamaan tukirullien käyttöä ja suorittamaan ajoitettuja kunnossapitotoimenpiteitä.

## 8. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoite oli selvittää syitä telasorvien tukirullien vikaantumiseen ja suuriin korjaus- ja huoltokustannuksiin. Tukirullille tuli myös suunnitella uusi rakenne ja kehittää tukirullien huoltoa siten, että tukirullien kestoikä kasvaa ja korjauksiin kuluvat kustannukset pienenevät

Suurimmaksi syyksi tukirullien vikaantumiseen arvioitiin tukirullien kokemat iskut. Näiden kappaleiden laskuissa ja työstön yhteydessä syntyvien iskujen aiheuttamaa kuormitusta selvitettiin suorittamalla voimamittauksia venymäliuskojen avulla. Mittauksessa saatujen tulosten perusteella saatiin iskujen suuruudet arvioitua 3-4-kertaisiksi staattiseen kuormaan verrattuna. Tällaiset iskut aiheuttavat tukirullien laakereiden vierintäelementteihin plastisia muodonmuutoksia, jotka lyhentävät laakereiden kestoikää.

Käytössä olevien tukirullien rakenteessa huomattiin virheitä laakereiden sovitteiden valinnassa, mistä johtuen tukirullien ulkorenkaiden laakeripesiin syntyi frettingkorroosiota. Tämä vauriomekanismi oli hyvin yleinen syy tukirullien vikaantumiseen ja se myös aiheutti suuria kustannuksia korjauksiin.

Tukirullalle suunniteltiin uusi rakenne, jossa pyrittiin poistamaan käytössä olevasta tukirullasta havaitut ongelmat. Ulkoisilta mitoiltaan uusi rakenne noudattaa vanhaa. Suurimmat muutokset tapahtuivat laakereiden asennusasennon vaihtamisella ja sovitteiden oikeaoppisella valinnalla. Laakerimalli pysyi samana, joten laskennallisen kestoian kasvattaminen tapahtui voiteluaineen valinnalla. Voiteluaineeksi valittiin korkean perusöljyn viskositeetin omaava voitelurasva, joka sisältää kiinteitä voiteluaineita haastavien voiteluolosuhteiden hallitsemiseksi. Toki laakereiden sovitteiden ja asennusasennon vaihtamisella on myös parantava vaikutuksensa tukirullien kestoikään.

Uuden rakenteen mukaisia tukirullia valmistettiin kaksi kappaletta. Uuden rakenteen ansiosta huollossa tehtävät työvaiheet vähenevät 20 % ja monet jäljelle jäävistä työvaiheista yksinkertaistuivat. Näiden perusteella arvioitiin uuden tukirullarakenteen huoltoihin kuluvan 30 % vähemmän työtunteja verrattuna käytössä olevan tukirullarakenteen huoltoihin. Myös uuden tukirullarakenteen huollon läpimenoaika lyhenee huomattavasti.

Tukirullien huoltoa kehitettiin laatimalla tukirullille huolto-ohje ja suunnittelemalla erilaisia aputyökaluja. Huolto-ohjeen avulla tukirullien huolto pystytään vaiheistamaan ja jokaisen työvaiheen läpikäynti vähentää asennusvirheiden todennäköisyyttä. Aputyöka-



lujen avulla tietyt työvaiheet pystytään tekemään tehokkaammin, näin säästäen aikaa huoltoon kuluvista työtunneista.

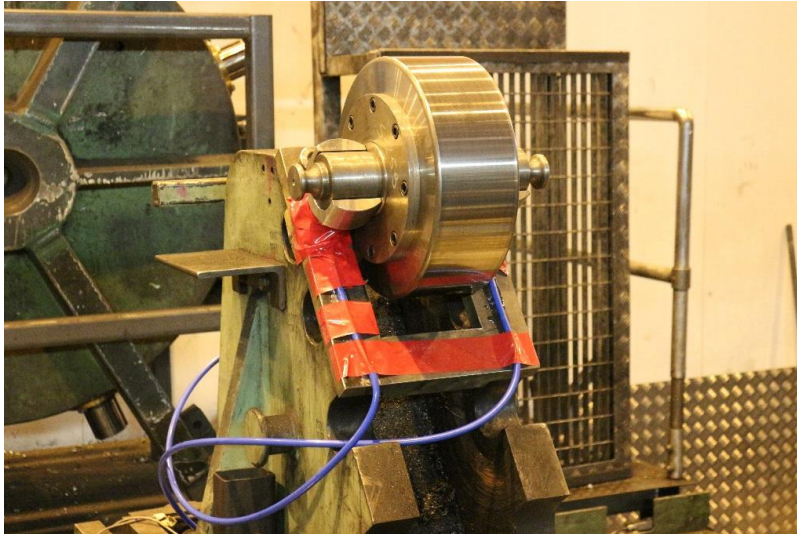
## LÄHTEET

- [1] K. Aaltonen, P. Andersson, V. Kauppinen, Koneistustekniikat, 1. painos, WSOY, Porvoo, 1997, 322 s.
- [2] Bearing damage and failure analysis, SKF Group, 2014, 103 p.
- [3] T. Björk, P. Hautala, K. Huhtala, S. Kivioja, M. Kleimola, M. Lavi, H. Martikka, J. Miettinen, A. Ranta, J. Rinkinen, P. Salonen, Koneenosien suunnittelu, 6. uudistettu painos, Sanoma Pro Oy, Helsinki, 2014, 517 s.
- [4] R. G. Budynas, J. K. Nisbett, Shigley's Mechanical Engineering Design, 9th edition., The McGraw-Hill Companies, New York, USA, 2011, 1082 p.
- [5] Böhler K340 Isodur, Sten & Co Oy Ab, 2003, 3 s. Saatavissa:  
[http://www.sten.fi/sten\\_fin/tuotteet/kylmatyoterakset/kylmatyoterastaadut/](http://www.sten.fi/sten_fin/tuotteet/kylmatyoterakset/kylmatyoterastaadut/)
- [6] Cold work tool steel, Böhler Edelmetall GmbH & Co KG, 2009, 53 p. Saatavissa:  
[http://www.boehler.com.cn/chinese/files/downloads/AL022\\_E\\_Cold\\_work\\_tool\\_steel.pdf](http://www.boehler.com.cn/chinese/files/downloads/AL022_E_Cold_work_tool_steel.pdf)
- [7] K. Hoffman, An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges, HBM, 257 p. Saatavissa:  
[http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/applications/stressanalysis/refbook/Strain\\_Gauge\\_Measurements\\_Book\\_2012\\_01.pdf](http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/applications/stressanalysis/refbook/Strain_Gauge_Measurements_Book_2012_01.pdf)
- [8] Industrial shaft seals, SKF Group, 2013, 484 p. Saatavissa:  
<http://www.skf.com/group/knowledge-centre/media-library/index.html>
- [9] S. Kivioja, S. Kivivuori, P. Salonen, Tribologia.-.Kitka ja kuluminen, 6. painos, Gaudeamus Helsinki University Press, Helsinki, 2010, 346 s.
- [10] LGEV 2 Product sheet, SKF Group, 2014, Saatavissa:  
<http://www.skf.com/group/products/lubrication-solutions/lubricants/extremely-high-viscosity-grease-with-solid-lubricants/index.html>
- [11] K. Maaranen, Koneistustekniikat, 5. uudistettu painos, WSOY, Porvoo, 2004, 325 s.
- [12] Technical Report, CAT. No. E728g, NSK, 2013, 301 p. Saatavissa:  
<http://www.nsk.com/services/basicknowledge/technicalreport/>

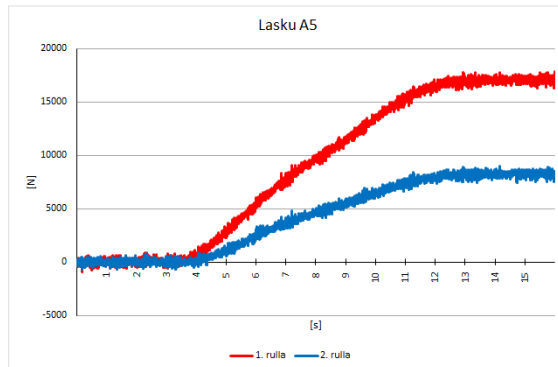
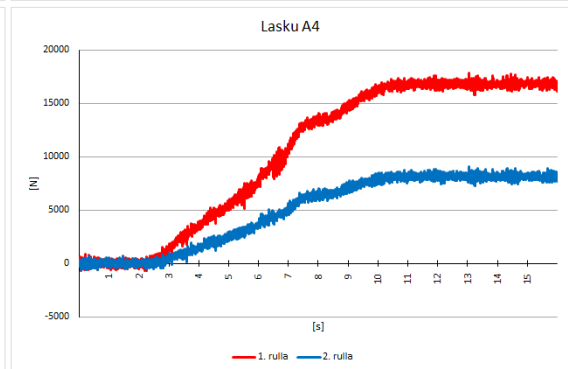
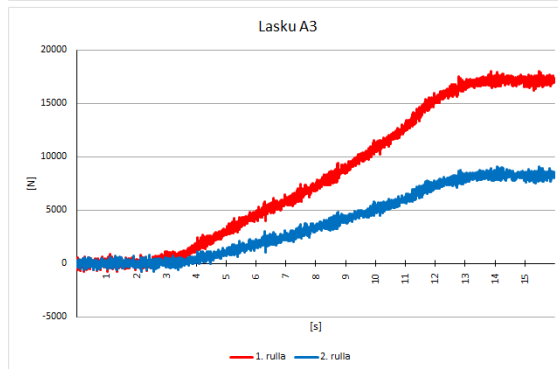
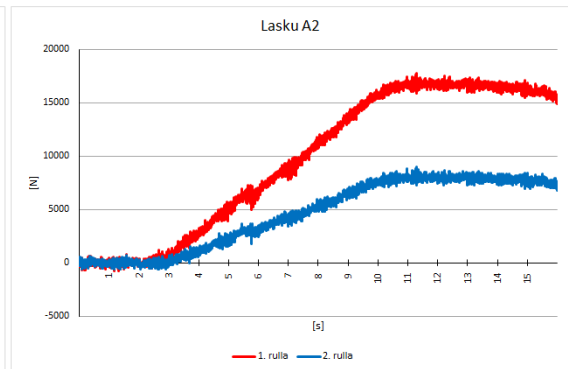
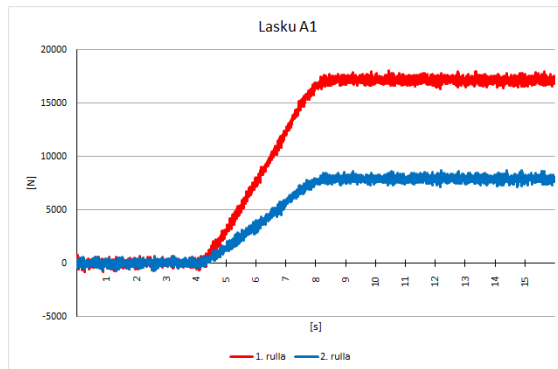
- [13] Rolling Bearings, SKF Group, 2013, 1373 p. Saatavissa:  
<http://www.skf.com/group/knowledge-centre/media-library/index.html>
- [14] Rolling bearings.-.Damage and failures.-.Terms, characteristics and causes, Suomen standardisoimisliitto, SFS-ISO 15243, Helsinki, 2012, 41 s.
- [15] Rolling bearings - Dynamic load ratings and rating life, Suomen standardisoimisliitto, SFS-ISO 281, Helsinki, 2012, 51 s.
- [16] Rolling bearings - Static load ratings, Suomen standardisoimisliitto, SFS-ISO 76, Helsinki, 2012, 14 s.
- [17] T. Salmi, S. Pajunen, Lujuusoppi, Pressus Oy, Tampere, 2010, 462 s.
- [18] E. Valtanen, Tekniikan taulukkokirja, 16. painos, Genesis-kirjat Oy, Jyväskylä, 2008, 1152 s.
- [19] Vierintälaakereiden voitelu, Julkaisu no. WL 81 115/4 F1b, FAG Sales Europe - Finland, 65 s. Saatavissa: <http://www.schaeffler.fi/content.schaeffler.fi/fi/mediathek/library/library.jsp>
- [20] 18CrNiMo7-6, Sten & Co Oy Ab, 2006, 2 s.  
Saatavissa: [http://www.sten.fi/sten\\_fin/tuotteet/nuorrutusterakset/](http://www.sten.fi/sten_fin/tuotteet/nuorrutusterakset/)

## LIITE A: KUORMITUSTEN MITTAUS

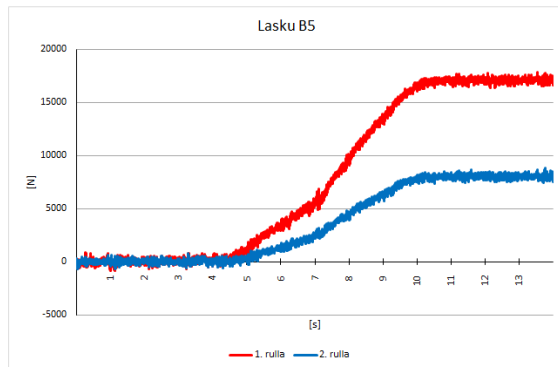
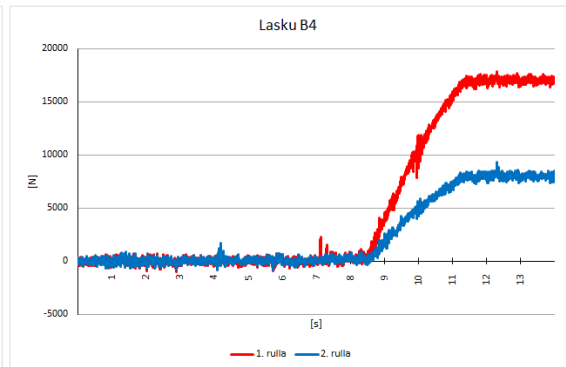
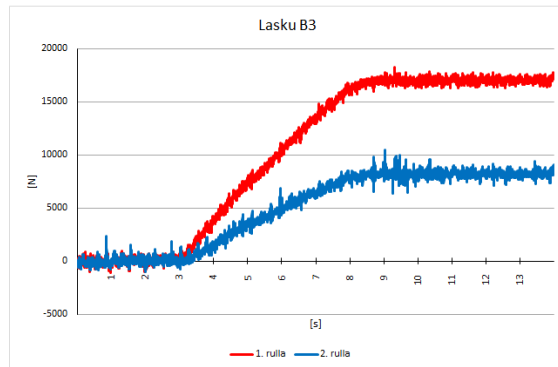
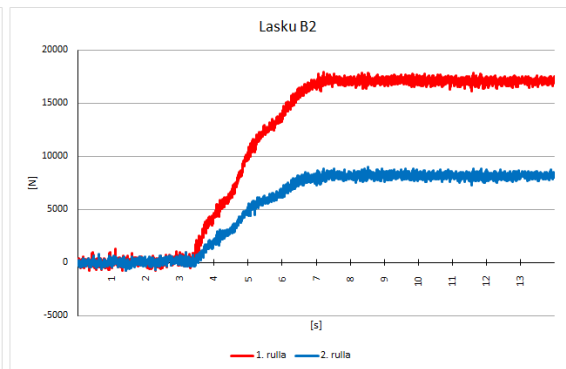
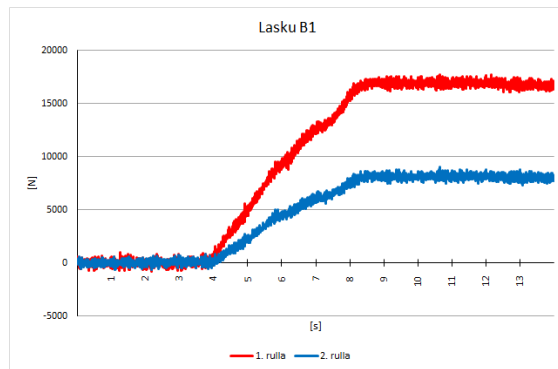
### Kuormitusten mittausjärjestely



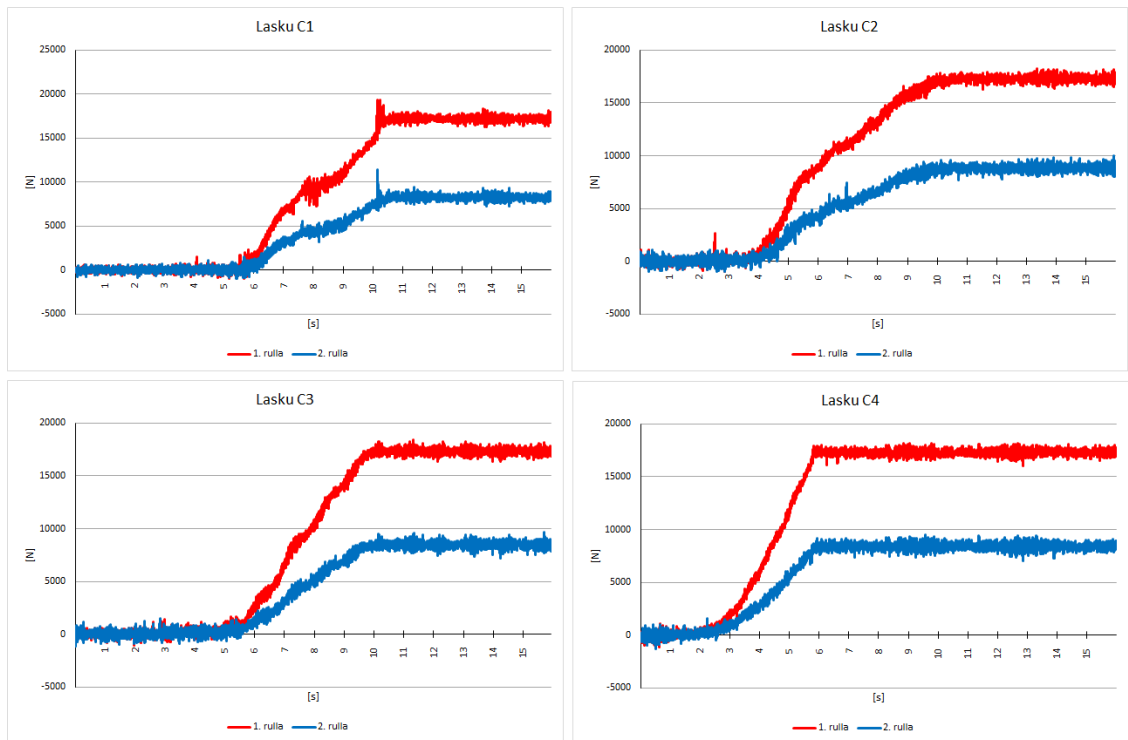
## Kappaleiden laskut A



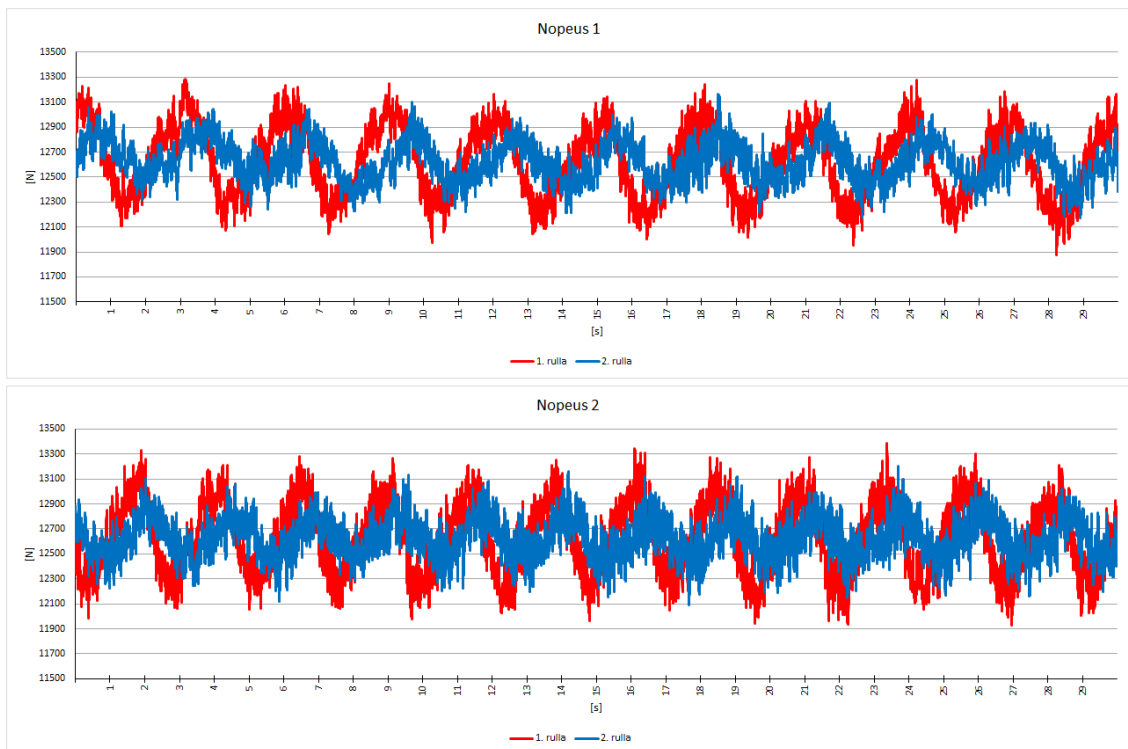
## Kappaleiden laskut B



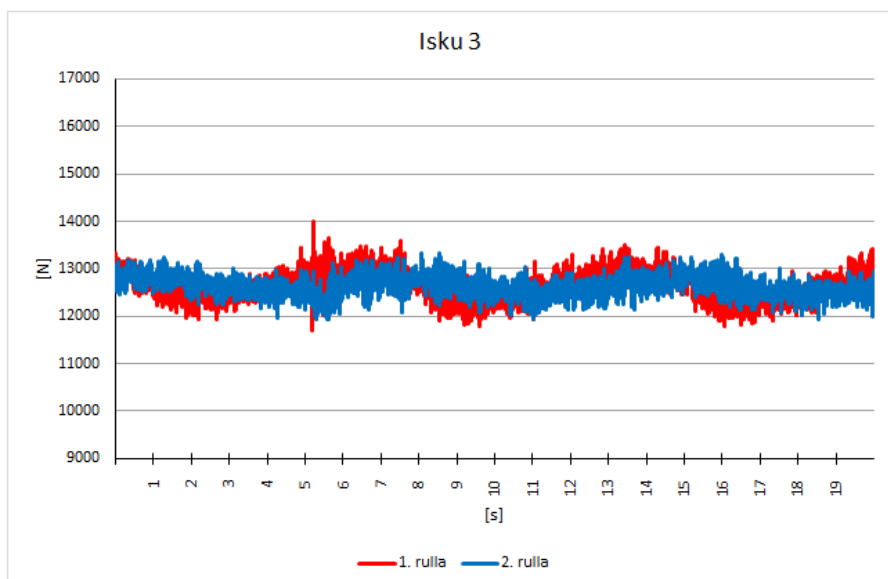
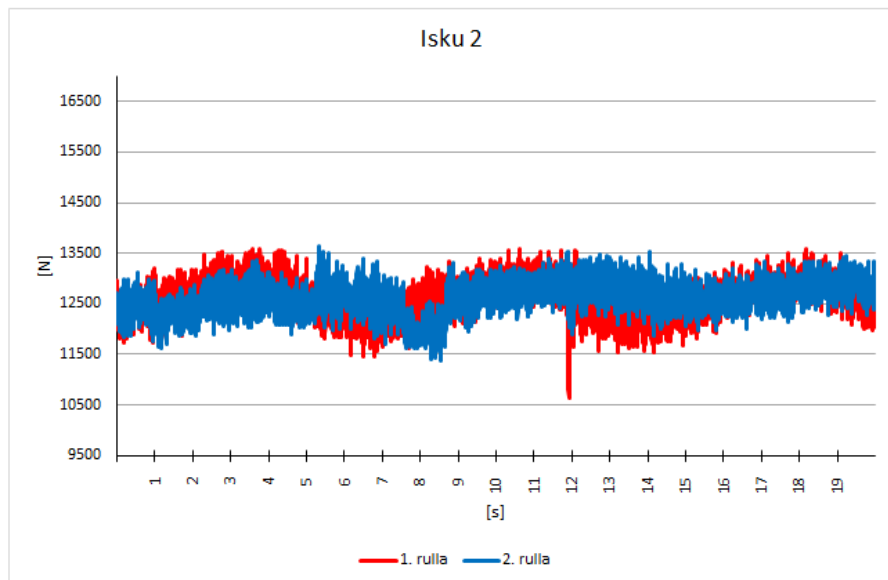
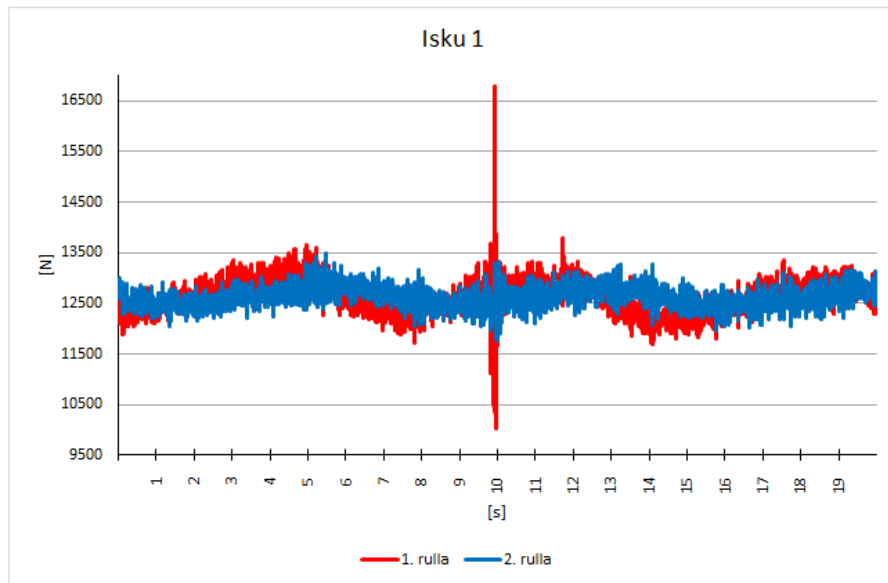
## Kappaleiden laskut C



## Kappaleen pyörittys



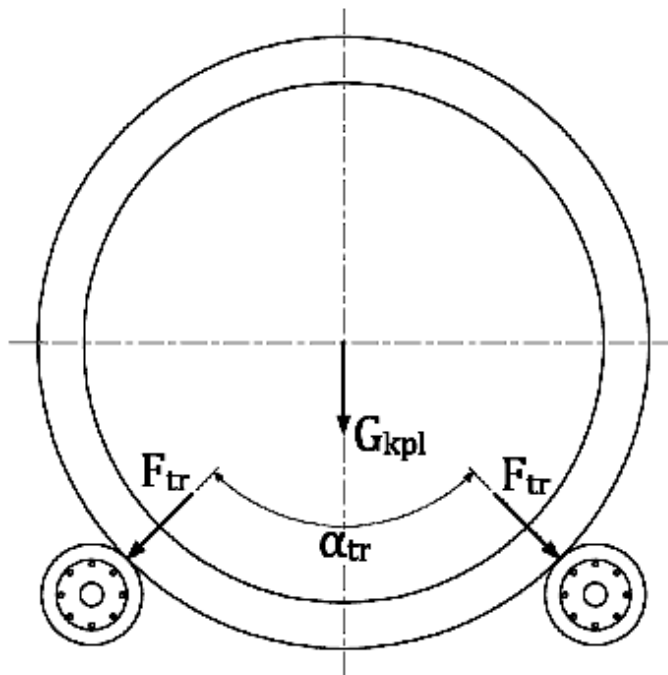
## Iskukuormitus





## LIITE B: TUKIRULLAN MITOITUS

### B.1 Kuormitus



$$m_{kpl} := 40000\text{kg}$$

$$G_{kpl} := m_{kpl} \cdot g = 392.266\text{ kN}$$

$$\alpha_{tr} := 90\text{deg}$$

$$F_{tr} := \frac{G_{kpl}}{4 \cos\left(\frac{\alpha_{tr}}{2}\right)} = 138.687\text{ kN}$$

Sorvattavan kappaleen massa

Sorvattavan kappaleen painovoima

Tukirullien ja kappaleen välinen kontaktikulma

Tukirullan ja kappaleen välinen kohtisuora tukivoima

### B.2 Ulkorenkkaan tarkastelu [6]

Ulkorenkkaan materiaali Böhler K340 kylmätyökälyteräs

$$E_b := 211\text{GPa}$$

$$R_{p0.2.U_p} := 2480\text{MPa}$$

$$R_{p0.2.U_v} := 2064\text{MPa}$$

Ulkorenkkaan kimmokerroin

Ulkorenkkaan myötöraja puristuksessa

Ulkorenkkaan myötöraja vedossa

### B.2.1 Kosketusjännitykset (Hertzin teoria) [9]

$$L_1 := 82\text{mm}$$

Kosketuksen pituus

$$R_a := 500\text{mm}$$

Kappaleen säde

$$R_b := 140\text{mm}$$

Ulkorenaan säde

$$E_a := 206\text{GPa}$$

Kappaleen kimmokerroin

$$\nu_a := 0.3$$

Kappaleen Poissonin vakio

$$\nu_b := 0.3$$

Ulkorenaan Poissonin vakio

$$R_{\text{kok}} := \left( \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} \right)^{-1} = 109.375\text{-mm}$$

Yhdistetty kaarevuussäde

$$E_{\text{kok}} := \left( \frac{1 - \nu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right)^{-1} = 114.544\text{-GPa}$$

Yhdistetty kimmokerroin

$$b_1 := \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{tr}} \cdot R_{\text{kok}}}{\pi \cdot L_1 \cdot E_{\text{kok}}}} = 1.434\text{-mm}$$

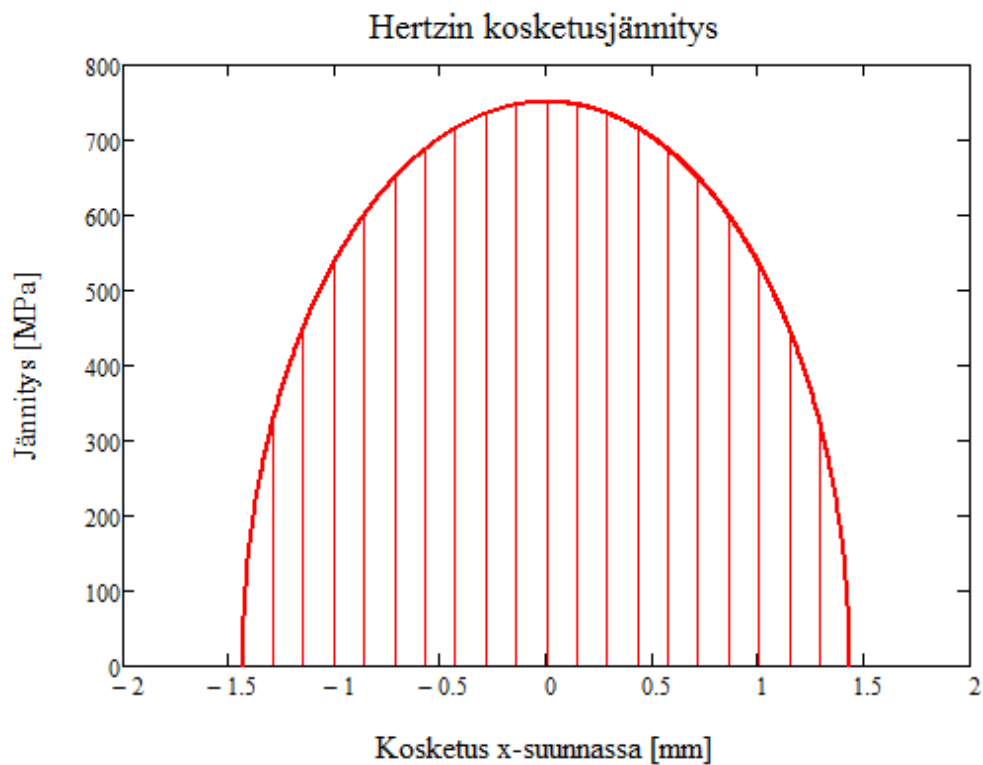
Kosketusalueen puolikas x-suunnassa

$$p_0 := \frac{2 \cdot F_{\text{tr}}}{\pi \cdot b_1 \cdot L_1} = 750.867\text{-MPa}$$

Hertzin maksimipaine

$$p_i := p_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{(x_i)^2}{b_1^2}}$$

Hertzin pintapainejakauma



## B.2.2 Jännityskomponentit z-akselin suunnassa [4]

$$z_{\text{syv}} := 10\text{mm}$$

Tarkastelussyvyys

$$z_i := \frac{z_{\text{syv}}}{i} \cdot i$$

$$\sigma_{x_i} := -p_0 \cdot \left[ \frac{1 + 2 \cdot \frac{(z_i)^2}{b_1^2}}{\sqrt{1 + \frac{(z_i)^2}{b_1^2}}} - 2 \cdot \left| \frac{z_i}{b_1} \right| \right]$$

Jännityskomponentti x-suunnassa

$$\max(|\sigma_{x_i}|) = 750.867 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{y_i} := -2 \cdot \nu_b \cdot p_0 \cdot \left[ \sqrt{1 + \frac{(z_i)^2}{b_1^2}} - \left| \frac{z_i}{b_1} \right| \right]$$

Jännityskomponentti y-suunnassa

$$\max(|\sigma_{y_i}|) = 450.52 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{z_i} := \frac{-p_0}{\sqrt{1 + \frac{(z_i)^2}{b_1^2}}}$$

Jännityskomponentti z-suunnassa

$$\max(|\sigma_{z_i}|) = 750.867 \cdot \text{MPa}$$

$$\tau_{\max_i} := \frac{1}{2} \cdot \left( \max(|\sigma_{x_i} - \sigma_{y_i}|, |\sigma_{y_i} - \sigma_{z_i}|, |\sigma_{z_i} - \sigma_{x_i}|) \right) \quad \text{Maksimileikkajännityskomponentti}$$

$$\max(|\tau_{\max_i}|) = 225.472 \cdot \text{MPa}$$

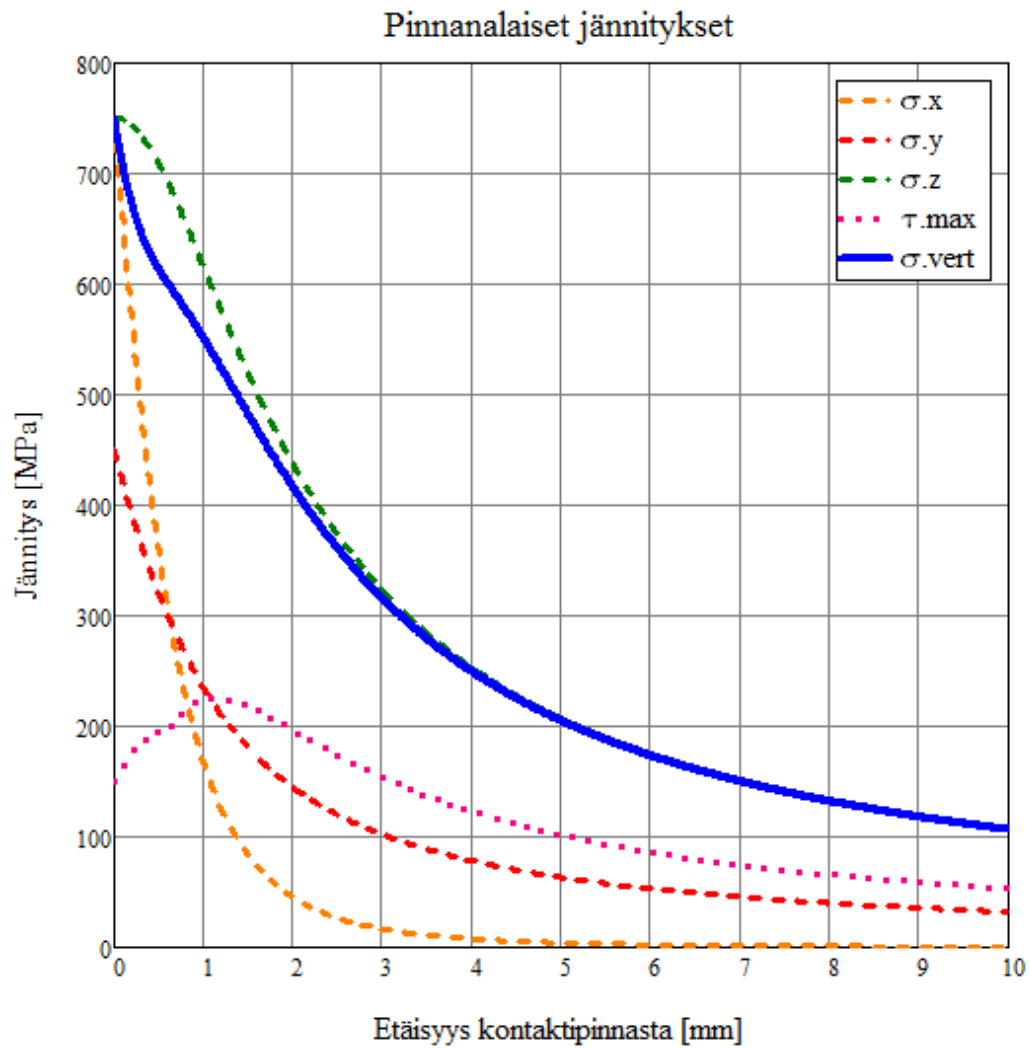
$$z \left| \text{match} \left( \max(|\tau_{\max_i}|), |\tau_{\max_i}| \right) \right| = 1.13 \cdot \text{mm}$$

Maksimileikkajännityksen esiintymissyvyys

$$\sigma_{\text{vert}_i} := \sqrt{(\sigma_{x_i})^2 - \sigma_{x_i} \cdot \sigma_{z_i} + (\sigma_{z_i})^2}$$

Von Mises-vertailujännitys

$$\max(|\sigma_{\text{vert}_i}|) = 750.867 \cdot \text{MPa}$$



### B.2.3 Varmuudet [18]

$$n_{N,U} := \frac{R_{p0.2,U_p}}{\max(|\sigma_{vert}|)} = 3.303 \quad \text{Ulkorenaan varmuus puristukseen}$$

$$n_{\tau,U} := \frac{0.6R_{p0.2,U_v}}{\max(|\tau_{max}|)} = 5.492 \quad \text{Ulkorenaan varmuus leikkaukseen}$$

### B.3 Akselin tarkastelu [20]

Akselimateriaali hiiletysteräs 18CrNiMo7-6

$$R_{e,A} := 690 \text{ MPa}$$

$$R_{m,A} := 1080 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{tW,A} := 0.9 \cdot R_{m,A} = 972 \text{ MPa}$$

$$E_A := 210 \text{ GPa}$$

$$j := 0..5$$

$$x_A := (35.5 \ 47.5 \ 67.5 \ 156.5 \ 181.5 \ 193.5)^T \text{ mm}$$

Akselimateriaalin myötöraja

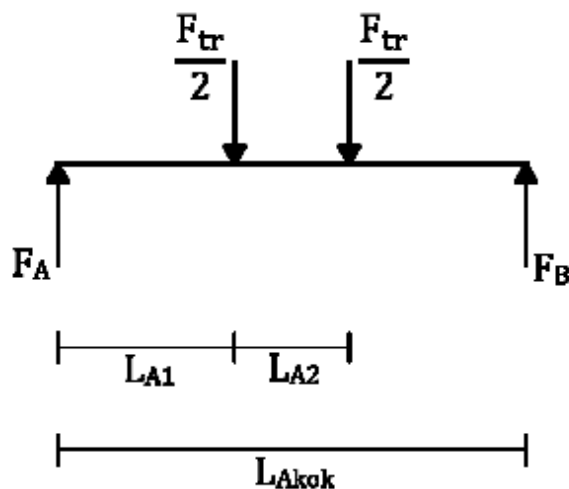
Akselimateriaalin murtoraja

Akselimateriaalin taivutusvaihtolujuus

Akselimateriaalin kimmokerroin

Akselin tarkastelukohdat

#### B.3.1 Kuormitukset



$$L_{Akok} := 229 \text{ mm}$$

$$L_{A1} := 86.5 \text{ mm}$$

$$L_{A2} := 56 \text{ mm}$$

$$\frac{F_{tr}}{2} = 69.343 \text{ kN}$$

$$F_A := \frac{F_{tr}}{2} = 69.343 \text{ kN}$$

$$F_B := F_A = 69.343 \text{ kN}$$

Tukien etäisyys

Laakerin etäisyys tuesta

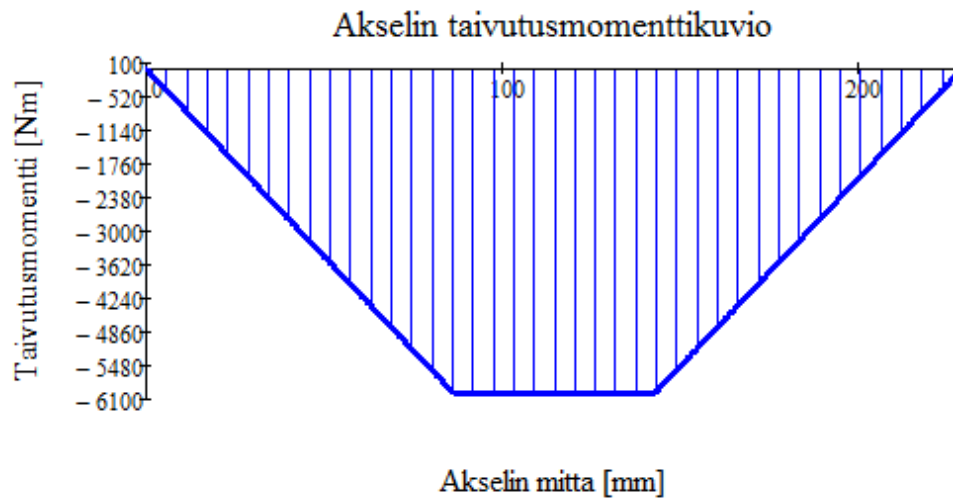
Laakereiden etäisyys

Kuormitus

Tukivoimat

(kaikki voimat samansuuruisia, koska kuormitukset symmetrisiä)

$$M_t(x) := \begin{cases} -F_A \cdot x & \text{if } 0 \leq x < L_{A1} \\ -F_A \cdot x + \frac{F_{tr}}{2} \cdot (x - L_{A1}) & \text{if } L_{A1} \leq x < L_{A1} + L_{A2} \\ -F_A \cdot x + \frac{F_{tr}}{2} \cdot (x - L_{A1}) + \frac{F_{tr}}{2} \cdot [x - (L_{A1} + L_{A2})] & \text{if } L_{A1} + L_{A2} \leq x < L_{Akok} \\ 0 & \text{if } L_{Akok} \leq x \end{cases}$$

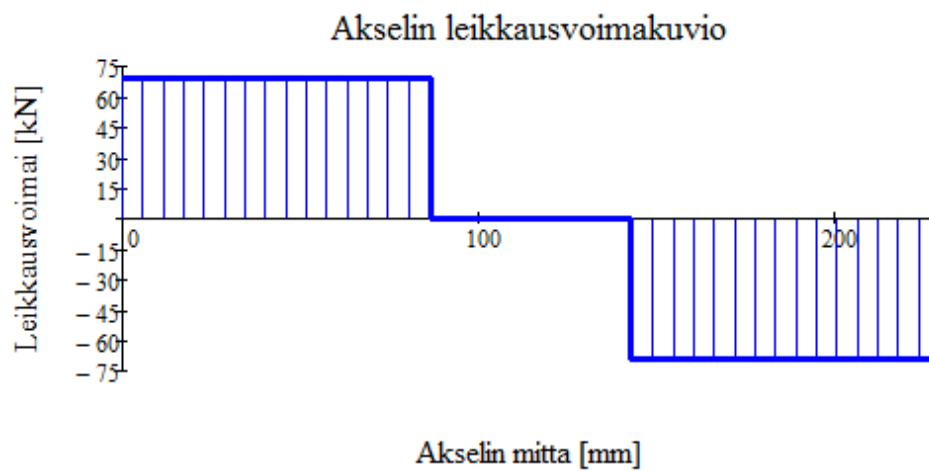


$$M_{t,\max} := \max\left(\left|\max\left(\overrightarrow{M_t}(xx)\right)\right|, \left|\min\left(\overrightarrow{M_t}(xx)\right)\right|\right)$$

$$M_{t,\max} = 5.998 \times 10^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Akselin maksimitaivutusmomentti

$$Q(x) := \begin{cases} F_A & \text{if } 0 \leq x < L_{A1} \\ F_A - \frac{F_{\text{tr}}}{2} & \text{if } L_{A1} \leq x < L_{A1} + L_{A2} \\ F_A - \frac{F_{\text{tr}}}{2} - \frac{F_{\text{tr}}}{2} & \text{if } L_{A1} + L_{A2} \leq x < L_{\text{Akok}} \\ 0 & \text{if } L_{\text{Akok}} \leq x \end{cases}$$



$$Q_{\max} := \max\left(\left|\max\left(\overrightarrow{Q}(xx)\right)\right|, \left|\min\left(\overrightarrow{Q}(xx)\right)\right|\right)$$

$$Q_{\max} = 69.343 \cdot \text{kN}$$

Akselin maksimileikkausvoima

### B.3.2 Taivutusjännitykset (Nimellisjännitysten menetelmä) [3]

$k_1 := (0.73 \ 0.73 \ 0.73 \ 0.73 \ 0.73 \ 0.73)^T$	Pinnanlaatukertoimet tarkastelukohdissa
$k_2 := (0.77 \ 0.75 \ 0.73 \ 0.74 \ 0.75 \ 0.77)^T$	Koon vaikutuskerroin tarkastelukohdissa
$k_3 := (0.814 \ 0.814 \ 0.814 \ 0.814 \ 0.814 \ 0.814)^T$	Luotettavuuskerroin (99 % luotettavuus)
$k_4 := (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)^T$	Lämpötilakerroin
$d_A := (75 \ 90 \ 109 \ 102 \ 90 \ 75)^T \text{ mm}$	Akselin halkaisijat tarkastelukohdissa
$r_A := (2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2)^T \text{ mm}$	Lovien säteet tarkastelukohdissa
$K_t := (2.95 \ 3.1 \ 3.1 \ 3.05 \ 3.1 \ 2.95)^T$	Lovenmuotoluvut tarkastelukohdissa
$q := (0.92 \ 0.93 \ 0.92 \ 0.93 \ 0.93 \ 0.92)^T$	Loviherkkyydet tarkastelukohdissa
$K_{f_j} := 1 + q_j \cdot (K_{t_j} - 1)$	
$K_f^T = (2.794 \ 2.953 \ 2.932 \ 2.906 \ 2.953 \ 2.794)$	Lovenvaikutusluvut tarkastelukohdissa
$k_{5_j} := \frac{1}{K_{f_j}}$	
$k_5^T = (0.358 \ 0.339 \ 0.341 \ 0.344 \ 0.339 \ 0.358)$	Jännityshuippukertoimet tarkastelukohdissa
$\sigma_{D,A_j} := k_{1_j} \cdot k_{2_j} \cdot k_{3_j} \cdot k_{4_j} \cdot k_{5_j} \cdot \sigma_{tW,A}$	Väsymislujuus (taivutusvaihto) tarkastelukohdissa
$\sigma_{D,A}^T = (159.176 \ 146.694 \ 143.804 \ 147.053 \ 146.694 \ 159.176) \cdot \text{MPa}$	
$M_{t,A_j} := \left  \overrightarrow{M_t(x_{A_j})} \right $	Taivutusmomentit tarkastelukohdissa
$M_{t,A}^T = (2461.7 \ 3293.8 \ 4680.7 \ 5027.4 \ 3293.8 \ 2461.7) \cdot \text{N} \cdot \text{m}$	
$W_{A_j} := \frac{\pi \cdot (d_{A_j})^3}{32}$	Taivutusvastukset tarkastelukohdissa
$W_A^T = (4.142 \times 10^4 \ 7.157 \times 10^4 \ 1.271 \times 10^5 \ 1.042 \times 10^5 \ 7.157 \times 10^4 \ 4.142 \times 10^4) \cdot \text{mm}^3$	
$\sigma_{t,A_j} := \frac{M_{t,A_j}}{W_{A_j}}$	Taivutusjännitykset tarkastelukohdissa
$\sigma_{t,A}^T = (59.436 \ 46.023 \ 36.815 \ 48.255 \ 46.023 \ 59.436) \cdot \text{MPa}$	
$\sigma_{t,A} < \sigma_{D,A} \Rightarrow$ todennäköinen kestoikä ääretön	

### B.3.3 Leikkausjännitykset [18]

$$A_{A_j} := \frac{\pi \cdot (d_{A_j})^2}{4} \quad \text{Akselin poikkipinta-alat tarkastelukohdissa}$$

$$A_{A_j}^T = (4.418 \times 10^3 \quad 6.362 \times 10^3 \quad 9.331 \times 10^3 \quad 8.171 \times 10^3 \quad 6.362 \times 10^3 \quad 4.418 \times 10^3) \cdot \text{mm}^2$$

$$Q_{A_j} := \left| Q(x_{A_j}) \right| \quad \text{Akselin leikkausvoimat tarkastelukohdissa}$$

$$Q_{A_j}^T = (69.343 \quad 69.343 \quad 69.343 \quad 69.343 \quad 69.343 \quad 69.343) \cdot \text{kN}$$

$$\tau_{A_j} := \frac{Q_{A_j}}{A_{A_j}} \quad \text{Akselin leikkausjännitykset tarkastelukohdissa}$$

$$\tau_{A_j}^T = (15.696 \quad 10.9 \quad 7.431 \quad 8.486 \quad 10.9 \quad 15.696) \cdot \text{MPa}$$

$$\tau_{e,A} := 0.6 \cdot R_{e,A} = 414 \cdot \text{MPa} \quad \text{Akselimateriaalin leikkausjännityslujuus}$$

$$\tau_A < \tau_{e,A} \Rightarrow \text{Leikkausjännitys ei muodostu rajoittavaksi}$$

### B.3.4 Varmuudet [18]

$$n_{t,A_j} := \frac{R_{e,A}}{\sigma_{t,A_j}} \quad \text{Taivutuksen varmuudet myötöön}$$

$$n_{t,A_j}^T = (11.609 \quad 14.993 \quad 18.742 \quad 14.299 \quad 14.993 \quad 11.609)$$

$$n_{\tau,A_j} := \frac{\tau_{e,A}}{\tau_{A_j}} \quad \text{Leikkauksen varmuudet myötöön}$$

$$n_{\tau,A_j}^T = (26.376 \quad 37.981 \quad 55.711 \quad 48.785 \quad 37.981 \quad 26.376)$$

$$n_{\text{kok},A} := \min(n_{t,A}, n_{\tau,A}) = 11.609 \quad \text{Akselin varmuus myötöön}$$

### B.3.5 Taipuma [18]

$$d_{A,\text{tark}} := \text{mean}(d_A) = 90.167 \cdot \text{mm} \quad \text{Taipumatarkasteltavan akselin halkaisija (tarkastelukohdienten halkaisijoiden keskiarvo)}$$

$$I_A := \frac{\pi \cdot d_{A,\text{tark}}^4}{64} = 3.245 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4 \quad \text{Taipumatarkasteltavan akselin neliömomentti}$$

$$f_m := \frac{F_{\text{tr}} \cdot L_{\text{Akok}}^3}{48 \cdot E_A \cdot I_A} = 0.051 \cdot \text{mm} \quad \text{Akselin maksimitaipuma (kaksitukisen keskeltä kuormitetun palkin mukaisesti)}$$



## B.4 Laakeroinnin mitoitus

### B.4.1 Laakerin 32022 X/Q tiedot [13]

$$D_L := 170\text{mm}$$

$$d_L := 110\text{mm}$$

$$T_L := 38\text{mm}$$

$$C_L := 233\text{kN}$$

$$C_{L0} := 390\text{kN}$$

$$Z := 28$$

$$\alpha_{lk} := 16\text{deg}$$

$$D_{pw} := \frac{1}{2} \cdot (d_L + D_L) = 140\text{-mm}$$

$$n_1 := 100 \frac{1}{\text{min}}$$

$$F_r := \frac{F_{tr}}{2} = 69.343\text{-kN}$$

$$F_a := 0\text{kN}$$

$$Y := 1.4$$

$$e := 0.43$$

$$\frac{F_a}{F_r} = 0 < e$$

=>

$$P_L := F_r = 69.343\text{-kN}$$

Laakerin ulkohalkaisija

Laakerin sisähalkaisija

Laakerin leveys

Laakerin dynaaminen kantavuusluku

Laakerin staattinen kantavuusluku

Laakerin rullien lukumäärä

Laakerin kontaktikulma

Laakerin vierintähalkaisija

Tukirullan pyörimisnopeus

Kuormituksen säteiskomponentti

Kuormituksen aksiaalikomponentti

Laakerin aksiaalikerroin

Laskentakerroin

Ekvivalentti laakerikuormitus

### B.4.2 Laakerin staattinen kantavuus [16]

$$S_0 := \frac{C_{L0}}{P_L} = 5.624$$

Laakerin staattisen kantavuuden varmuusluku

### B.4.3 Laakerin kestoikä [13],[15]

$$a_1 := 1$$

Luotettavuuskerroin (90%)

$$\nu_{val} := 1020 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

Voiteluaineen viskositeetti (40°C)

$$\nu_1(n) := \left[ 45000 \cdot \left( \frac{n}{1} \right)^{-0.83} \cdot \left( \frac{D_{pw}}{\text{mm}} \right)^{-0.5} \right] \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

Tyydyttävään voiteluun vaadittava viskositeetti

$$\nu_1(n_1) = 83.205 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

$$e_C := 0.3$$

Epäpuhtauskerroin (tyypillinen epäpuhtaustaso)

$$C_u := \frac{C_{L0}}{8.2} \cdot \left( \frac{100\text{mm}}{D_{pw}} \right)^{0.3} = 42.994\text{-kN}$$

Väsymisraja

$$\kappa(\nu, n) := \begin{cases} \frac{\nu}{\nu_1(n)} & \text{if } \frac{\nu}{\nu_1(n)} \leq 4 \\ 4 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Viskositeettisuhte}$$

$$\kappa(\nu_{\text{val}}, n_1) = 4$$

Yhdistetty voitelu-,  
ympäristö-, epäpuhtaus-  
ja asennuskohdekerroin

$$a_{\text{ISO}}(\nu, n, P) := \begin{cases} \text{if } 0.1 \leq \kappa(\nu, n) < 0.4 \\ \left[ \begin{array}{l} 0.1 \cdot \left[ 1 - \left( 1.5859 - \frac{1.3993}{\kappa(\nu, n)^{0.054381}} \right) \cdot \left( \frac{e_C \cdot C_u}{P} \right)^{0.4} \right]^{-9.185} \\ 50 \text{ if } \left[ 0.1 \cdot \left[ 1 - \left( 1.5859 - \frac{1.3993}{\kappa(\nu, n)^{0.054381}} \right) \cdot \left( \frac{e_C \cdot C_u}{P} \right)^{0.4} \right]^{-9.185} \right] \geq 50 \end{array} \right. \\ \text{if } 0.4 \leq \kappa(\nu, n) < 1 \\ \left[ \begin{array}{l} 0.1 \cdot \left[ 1 - \left( 1.5859 - \frac{1.2348}{\kappa(\nu, n)^{0.19087}} \right) \cdot \left( \frac{e_C \cdot C_u}{P} \right)^{0.4} \right]^{-9.185} \\ 50 \text{ if } \left[ 0.1 \cdot \left[ 1 - \left( 1.5859 - \frac{1.2348}{\kappa(\nu, n)^{0.19087}} \right) \cdot \left( \frac{e_C \cdot C_u}{P} \right)^{0.4} \right]^{-9.185} \right] \geq 50 \end{array} \right. \\ \text{if } 1 \leq \kappa(\nu, n) \leq 4 \\ \left[ \begin{array}{l} 0.1 \cdot \left[ 1 - \left( 1.5859 - \frac{1.2348}{\kappa(\nu, n)^{0.071739}} \right) \cdot \left( \frac{e_C \cdot C_u}{P} \right)^{0.4} \right]^{-9.185} \\ 50 \text{ if } \left[ 0.1 \cdot \left[ 1 - \left( 1.5859 - \frac{1.2348}{\kappa(\nu, n)^{0.071739}} \right) \cdot \left( \frac{e_C \cdot C_u}{P} \right)^{0.4} \right]^{-9.185} \right] \geq 50 \end{array} \right. \end{cases}$$

$$a_{\text{ISO}}(\nu_{\text{val}}, n_1, P_L) = 1.226$$

$$L_{10m}(\nu, n, P) := a_1 \cdot a_{\text{ISO}}(\nu, n, P) \cdot \left( \frac{C_L}{P} \right)^{\frac{10}{3}}$$

Laakerin kestoikä, miljoonaa kierrosta  
(90% luotettavuus)

$$L_{10m}(\nu_{\text{val}}, n_1, P_L) = 69.66$$

$$L_{10mh}(\nu, n, P) := \left[ \frac{1 \cdot 10^6}{60 \left( \frac{n}{1} \right) \left( \frac{1}{\text{min}} \right)} \cdot L_{10m}(\nu, n, P) \right] \cdot \text{hr}$$

Laakerin kestoikä tunteina

$$L_{10mh}(\nu_{\text{val}}, n_1, P_L) = 11609.98 \cdot \text{hr}$$

$$t_{kk} := 200\text{hr}$$

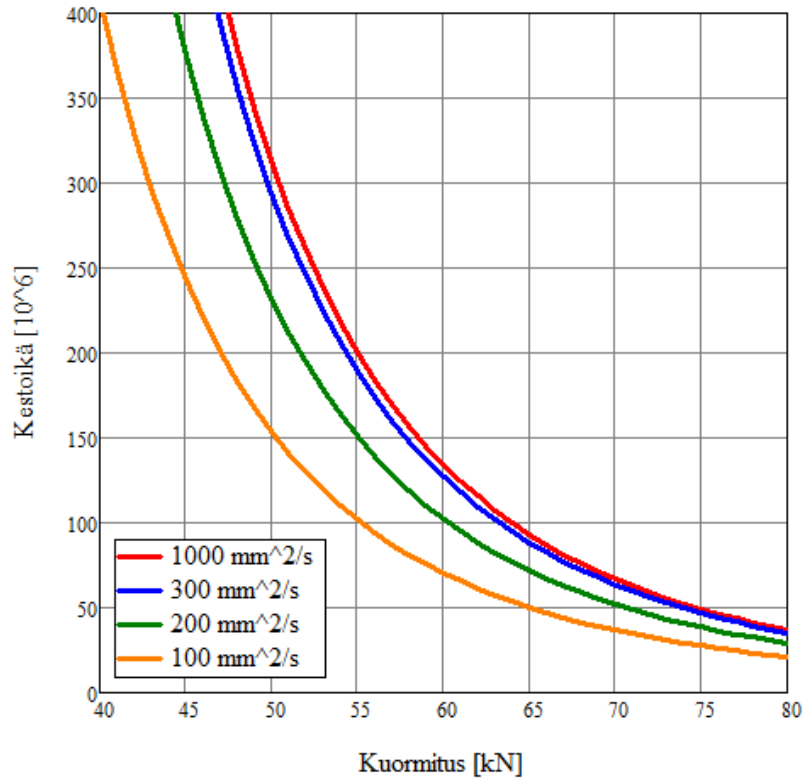
Arvioidut käyttötunnit kuukaudessa

$$L_{10mkk}(\nu, n, P) := \frac{L_{10mh}(\nu, n, P)}{t_{kk}}$$

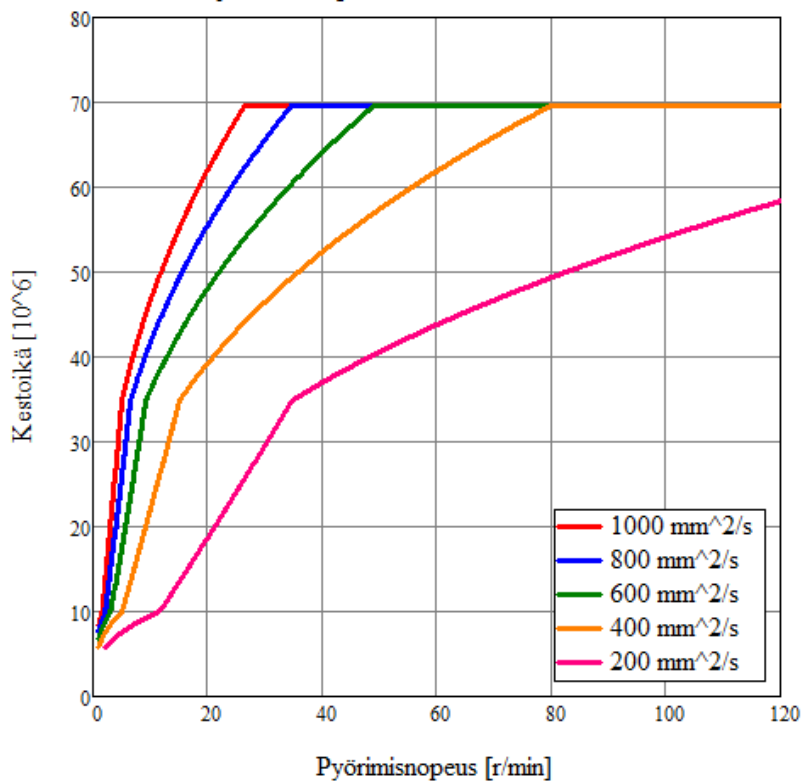
Laakerin kestoikä kuukausina

$$L_{10mkk}(\nu_{val}, n_1, P_L) = 58.05$$

Kuormituksen vaikutus kestoikään



Pyörimisnopeuden vaikutus kestoikään



#### B.4.4 Laakerin voitelukalvon ominaispaksuus [9], [12]

$P_{lk}(P) := \frac{4.6 \cdot P}{Z \cdot \cos(\alpha_{lk})}$	Rullien maksimikuormitus
$P_{lk}(P_L) = 11.851 \cdot \text{kN}$	
$\alpha_{va} := 2.75 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{N}}$	Voiteluaineen paine-viskositeetti-kerroin
$\rho_{va} := 0.90 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3}$	Voiteluaineen tiheys
$\eta_0(\nu) := \nu \cdot \rho_{va}$	Voiteluaineen dynaaminen viskositeetti
$\eta_0(\nu_{val}) = 0.918 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$	
$E_r := 206 \text{GPa}$	Vierintäelinten kimmokerroimet
$E_v := 206 \text{GPa}$	
$\nu_r := 0.3$	Vierintäelinten Poissonin vakiot
$\nu_v := 0.3$	
$R_r := 7.525 \text{mm}$	Laakerin rullan säde
$R_v := 63.071 \text{mm}$	Laakerin sisärenkaan vierintäpinnan säde
$R_{lk} := \left( \frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_v} \right)^{-1} = 6.723 \cdot \text{mm}$	Vierintäpintojen tehollinen säde
$\omega(n) := \left( \frac{2 \cdot \pi}{60} \frac{n}{1} \right) \cdot \frac{1}{\text{min}}$	Kulmanopeus
$\omega(n_1) = 10.472 \frac{1}{\text{s}}$	
$u_1(n) := \omega(n) \cdot R_v$	Vierintäpintojen nopeudet
$u_2(n) := u_1(n)$	
$u(n) := \frac{1}{2} \cdot (u_1(n) + u_2(n))$	
$u(n_1) = 0.66 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	
$L_{lk} := 27.512 \cdot \text{mm}$	Kosketuksen leveys
$F_{Np}(P) := \frac{P_{lk}(P)}{L_{lk}}$	Kuormitus kosketuksen leveydellä jaettuna
$F_{Np}(P_L) = 430.766 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$	
$E_{lk} := \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1 - \nu_r^2}{E_r} + \frac{1 - \nu_v^2}{E_v} \right) \right]^{-1} = 226.374 \cdot \text{GPa}$	Vierintäparin tehollinen kimmokerroin
$G_{va} := \frac{\alpha_{va}}{\frac{\text{m}^2}{\text{N}}} \cdot \frac{E_{lk}}{\frac{\text{N}}{\text{m}^2}} = 6.225 \times 10^3$	Materiaaliparametri

$$U_{va}(n, \nu) := \frac{\frac{\eta_0(\nu)}{\text{Pa}\cdot\text{s}} \cdot \frac{u(n)}{\frac{\text{m}}{\text{s}}}}{\frac{\frac{E_{flk}}{\frac{\text{N}}{\text{m}^2}} \cdot \frac{R_{flk}}{\text{m}}}{\frac{\text{N}}{\text{m}^2}}} \quad \text{Nopeusparametri}$$

$$W_{va}(P) := \frac{\frac{F_{Np}(P)}{\frac{\text{N}}{\text{m}}}}{\frac{\frac{E_{flk}}{\frac{\text{N}}{\text{m}^2}} \cdot \frac{R_{flk}}{\text{m}}}{\frac{\text{N}}{\text{m}^2}}} \quad \text{Kuormaparametri}$$

$$h_{min}(n, P, \nu) := \frac{2.65 \cdot G_{va}^{0.54} \cdot U_{va}(n, \nu)^{0.7} \cdot \frac{R_{flk}}{\text{m}}}{W_{va}(P)^{0.13}} \cdot \text{m} \quad \text{Minimikalvonpaksuus}$$

$$h_{min}(n_1, P_L, \nu_{val}) = 1.518 \cdot \mu\text{m}$$

$$\sigma_r := 1.3 \cdot 0.4 \mu\text{m} = 0.52 \cdot \mu\text{m}$$

Vierintäpintojen RMS-arvot

$$\sigma_v := 1.3 \cdot 0.4 \mu\text{m} = 0.52 \cdot \mu\text{m}$$

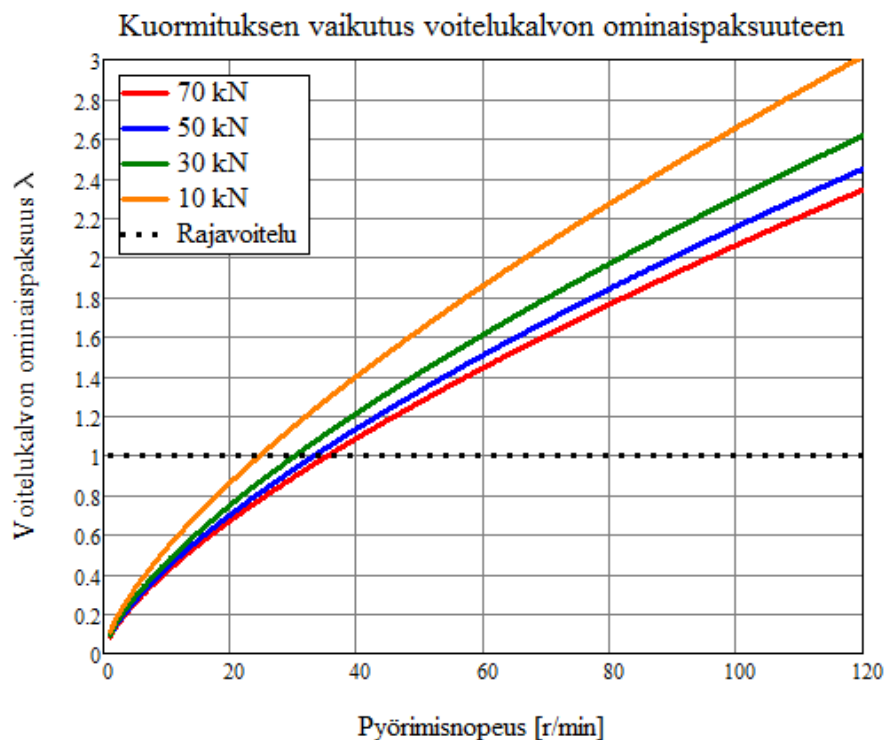
$$\sigma_p := \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_v^2} = 0.735 \cdot \mu\text{m}$$

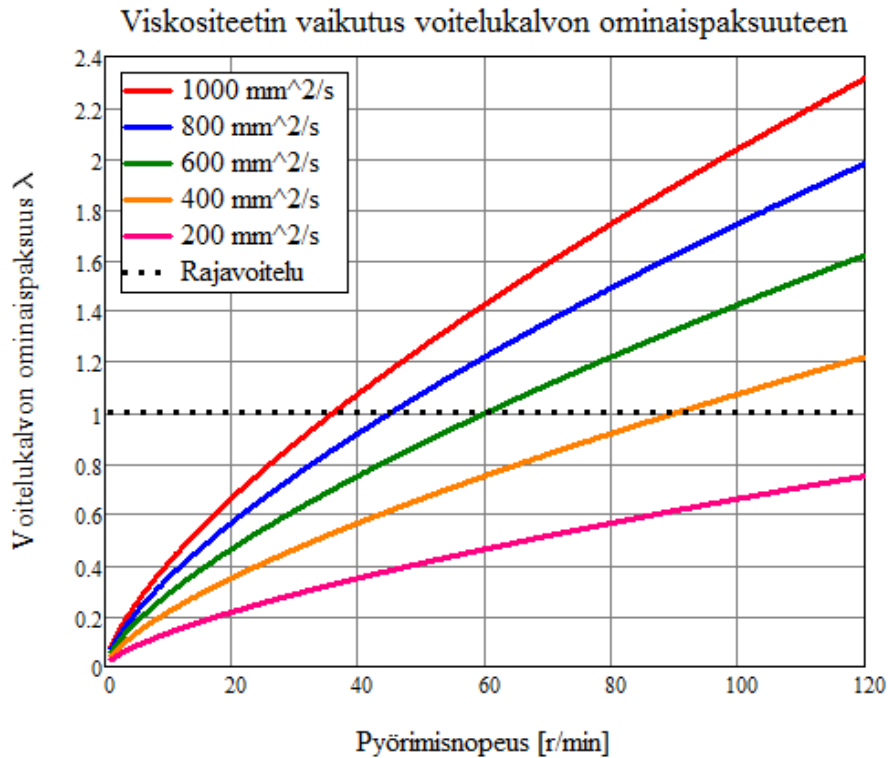
Vierintäpintojen yhdistetty karheus

$$\lambda(n, P, \nu) := \frac{h_{min}(n, P, \nu)}{\sigma_p}$$

Voitelukalvon ominaispaksuus

$$\lambda(n_1, P_L, \nu_{val}) = 2.064$$





#### B.4.5 Laakerin kosketusjännitykset (Hertzin teoria) [9]

$$E_{Hk2} := \left( \frac{1 - \nu_r^2}{E_r} + \frac{1 - \nu_v^2}{E_v} \right)^{-1} = 113.187 \text{ GPa} \quad \text{Vierintäelinten yhdistetty kimmokerroin}$$

$$b_{Hk} := \sqrt{\frac{4 \cdot P_{Hk}(P_L) \cdot R_{Hk}}{\pi \cdot L_{Hk} \cdot E_{Hk}}} = 0.144 \text{ mm} \quad \text{Vierintäelinten kosketusalueen puolikas x-suunnassa}$$

$$P_{0.Hk} := \frac{2 \cdot P_{Hk}(P_L)}{\pi \cdot b_{Hk} \cdot L_{Hk}} = 1906 \text{ MPa} \quad \text{Vierintäelinten Hertzin maksimipaine}$$

#### B.4.6 Laakerin voiteluväli [13]

$$A_L := n_1 \cdot D_L = 17000 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{min}} \quad \text{Nopeuskerroin}$$

=> erittäin hidas

$$\frac{C_L}{P_L} = 3.36 \quad \text{=> korkea} \quad \text{Kuormitussuhde}$$

$$b_f := 2 \quad \text{Laakerikerroin}$$

$$t_f := 2000 \text{ hr} \quad \text{Voiteluväli (katsottu taulukosta)}$$

$$t_{f.kk} := \frac{t_f}{t_{kk}} = 10 \quad \text{Voiteluväli kuukausina}$$

$$G_p := \left[ 2 \cdot 0.005 \cdot \left( \frac{D_L}{\text{mm}} \right) \left( \frac{T_L}{\text{mm}} \right) \text{ gm} \right] = 0.065 \text{ kg} \quad \text{Rasvan jälkivoitelumäärä}$$

**B.4.7 Akselimutterin lujuustarkastelu [13]**

$$C_{am} := 290 \text{ kN}$$

Akselimutterin aksiaalikuorman kantokyky

$$F_{am} := \frac{F_{tr} \cdot \sin(\alpha_{lk})}{2} = 19.114 \text{ kN}$$

Akselimutteriin kohdistuva kuormitus

$$n_{am} := \frac{C_{am}}{F_{am}} = 15.172$$

Akselimutterin varmuus aksiaalikuormitukseen

**B.4.8 Laakereiden asennus [3]**

$$\Theta_R := 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Ympäristön lämpötila

$$\Theta_r := 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Laakerin ulkorenkkaan lämpötila

$$\alpha_I := 12 \cdot \frac{10^{-6}}{\text{K}}$$

Laakerin lämpöpiteneemiskerroin

$$\alpha_A := 11.1 \cdot \frac{10^{-6}}{\text{K}}$$

Ulkorenkkaan lämpöpiteneemiskerroin

$$D_F := D_L = 170 \text{ mm}$$

Liitospinnan halkaisija

$$A_{oA} := -28 \mu\text{m}$$

Ulkorenkkaan sisähalkaisijan yläeromitta

$$A_{uA} := -68 \mu\text{m}$$

Ulkorenkkaan sisähalkaisijan alaeromitta

$$A_{oI} := 0 \mu\text{m}$$

Laakerin ulkohalkaisijan yläeromitta

$$A_{uI} := -25 \mu\text{m}$$

Laakerin ulkohalkaisijan alaeromitta

$$P_o := A_{oA} - A_{uI} = -3 \mu\text{m}$$

Minimiahdistus

$$P_u := A_{uA} - A_{oI} = -68 \mu\text{m}$$

Maksimiahdistus

$$P_{s\Theta} := 0.001 D_F = 170 \mu\text{m}$$

Liittämisyvälys

$$P_{UF} := |P_u| + P_{s\Theta} = 238 \mu\text{m}$$

Ahdistus liitettäessä

$$\Theta_{Aerf} := \Theta_R + \frac{P_{UF}}{\alpha_A \cdot D_F} + \frac{\alpha_I}{\alpha_A} \cdot (\Theta_I - \Theta_R) = 146.126 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Liittämislämpötila}$$