TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

EERO MAKKONEN

REUNAKUORMITUKSEN VAIKUTUS SÄTEISLIUKULAAKERIEN KITKA- JA VAURIOKÄYTTÄYTYMISEEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Arto Lehtovaara
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Teknisten tieteiden tiedekuntaneuvoston kokouksessa 15. elokuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Konetekniikan koulutusohjelma
MAKKONEN, EERO: Reunakuormituksen vaikutus säteisliukulaakerien kitka- ja vauriokäyttäytymiseen
Diplomityö, 54 sivua, 6 liitesivua
Tammikuu 2014
Pääaine: Koneiden ja rakenteiden analysointi
Tarkastaja: Professori Arto Lehtovaara
Avainsanat: Säteisliukulaakeri, reunakuormitus, hydrodynaaminen voitelutilanne, hydrodynaaminen painejakautuma, kuivakäynti, voiteluhäiriö

Liukulaakereita käytetään paljon liikkuvien koneenosien laakerointiin. Liukulaakerin toiminta perustuu liikkeen ja liukupintojen muodon yhteisvaikutuksessa syntyvään hydrodynamiseen voitelukalvoon, jolla saavutetaan alhainen liikekitka ja estetään koneenosien kuluminen. Tämän työn tavoitteena on selvittää reunakuormituksen vaikutus säteisliukulaakerin kitka- ja vauriokäyttäytymiseen. Työn keskeisenä osana on suunnitella ja toteuttaa tarvittavat koelaitemuutokset laakerien reunakuormituksen vaikutuksien tutkimiseen. Säteisliukulaakerin reunakuormitustilanteiden kitka- ja vauriokäyttäytymisen tunteminen mahdollistaa koneiden suunnitteluvaiheessa laakerin kuormankantokyvyn arvioinnin poikkeuksellisissa kuormitustilanteissa.

Työ alkaa esittelemällä hydrodynaamista voiteluteoriaa, teoriaan pohjautuvaa säteisliukulaakerien laskentaa ja laakerien vaurioteoriaa. Teoriaa seuraa säteisliukulaakerikoelaitteiston esittely ja koelaitemuutokset reunakuormituksen tuottamiseen kehitetyllä tunkkirakenteella. Koelaitemuutokset sisältävät myös hydrodynaamisen painejakautuman ja laakerikallistuman mittaamisen. Koelaitekuvauksen jälkeen esitetään koejärjestelyt ja mittaustulokset sekä tarkastellaan tuloksia kitkakäyttäytymisen ymmärtämiseksi laakerin eri kuormitustilanteissa.

Mittaustulokset osoittavat kitkan kasvavan reunakuormituksella ja laakerit kallistuvat reunakuormituksen suuruuteen verrannollisena. Kitka ja kallistuma käyttäytyvät lineaarisemmin sisäänajautuneilla laakereilla reunakuormitukseen nähden.

Hydrodynaamisen painejakautuman mittaustulokset ja laaditut hahmotelmat painejakautuman muodoista esitetään eri reunakuormitustilanteissa. Painejakautuman muotoon vaikuttaa merkittävimmin säteiskuormitus ja reunakuormitus. Reunakuormitus siirtää painejakautuman huippua kohti laakerireunaa.

Voiteluhäiriökoeajoissa laakereita ajetaan kasvavin ajanjaksoin ilman voiteluainesyöttöä laakerivaurioon saakka. Säteisliukulaakerin kestokyky voiteluhäiriötilanteissa lyheni merkittävästi reunakuormituksella. Tämä korostaa luotettavan voiteluainesyötön merkitystä reunakuormitetuissa laakereissa.

Työssä tutkittiin myös voiteluaineen määrän vaikutusta laakerikitkaan. Laakerien käyttölämpötila nousee kun kitkalämpöä ei kulkeudu rajoitetun öljyvirran mukana ja laakerikitka pienenee kuumemman voitelunesteen tehollisen viskositeetin pienentyessä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering
MAKKONEN, EERO: The effects of misalignment on the friction and failure behaviour of journal bearings
Master of Science Thesis, 54 pages, 6 Appendix pages
January 2014
Major: Analysis of machines and structures
Examiner: Professor Arto Lehtovaara
Keywords: Journal bearing, misalignment, hydrodynamic lubrication, hydrodynamic pressure, dry sliding, lubrication feed error

This master's thesis is a part of master's degree in Tampere University of Technology. The aim is to design, implement and test the modifications of the journal bearing test device that have the ability to measure bearing friction and failure behaviour in bearing's misaligned load conditions. Journal bearings are widely used in all types of machines. The simple principle of hydrodynamic lubrication is achievable in conjunction with sliding surfaces and their proper shape. Lubrication film provides very low friction and prevents surface contacts.

This work presents modifications of the journal bearing test device that introduces misaligned bearing load and bearings' misalignment angle and hydrodynamic pressure distribution measurements. Bearing friction is presented and analyzed with and without bearing's misaligned load conditions. In those conditions, bearing friction increases and bearings misalignment angle increases as the offset of radial load from bearing centerline increases. When using run-in bearings, friction and misaligned angle follows misaligned loading in more linear manner than have been observed with fresh bearings.

Hydrodynamic pressure curves and the drafts of pressure distribution are presented in different load conditions. Major impact to hydrodynamic pressure curve shape is the radial loading of the bearing. In misaligned conditions, bearing's hydrodynamic pressure curve shifts towards bearing's side following bearing's misaligned loading.

In lubrication error situations, failure behavior of journal bearings is observed with and without misalignment. The oil supply of bearings is shut off for increasing periods of time until bearing failure occurs. The results show that bearing's misaligned loading decreases dramatically the lubrication shut off time that is achievable until failure. This emphasizes the meaning of proper lubrication flow to the bearing in all time when misaligned load conditions are expected.

The sufficient amount of lubrication flow to the bearings is determined and friction is measured during starvation. Bearing's temperature increases as oil feed decreases since no friction heat is transported via the excess lubrication. Increasing bearing running temperature reduces bearing friction as the effective viscosity of oil in the bearing degrades.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston teknisten tieteiden tiedekunnalle. Aloitin työskentelyn konstruktiotekniikan laitoksella tutkimusapulaisena säteisliukulaakerikoelaitteen parissa Ecobearings projektiin liittyen. Kim Sandvikin aisaparina teimme koelaitteella laakerimateriaalitestausta projektiin liittyen. Ecobearings projektin yhtenä tavoitteena on tutkia reunakuormituksen vaikutusta laakerin kitka- ja vauriokäyttäytymiseen, johon tämä diplomityö vastaa.

Opintoni tulevat päätökseen tämän työn merkeissä. Haluan kiittää työssäni mukana ja tukena olleita henkilöitä. Kiitän konstruktiotekniikan laitoksen henkilökuntaa, joista erityismaininta kuuluu Olli Nuutilalle mittaustekniikan avustamisesta ja Kim Sandvikille koelaitteen kehittämisestä ja avustamisesta tämän työn keskeiseen sisältöön liittyen. Diplomityön ohjaaja ja tarkastaja professori Arto Lehtovaara ansaitsee erityiskiitokseni, sillä hän on jaksanut hyvässä yhteistyössä pitkäjänteisesti ohjata ja kehittää tämän työn sisältöä. Kiitokseni saa Metso Minerals Oy:n Ecobearings projektin parissa työskennelleet Marke Kallio, Petri Vuorinen ja Kari Kuvaja, jotka mahdollistivat tämän mielenkiintoisen diplomityöaiheen toteuttamisen.

Lopuksi haluan kiittää saamastani tuesta kaikkia ystäviäni, veljiäni Tuukkaa ja Jyrkiä sekä Äitiä ja Isää.

Tampereella 28.1.2014

Eero Makkonen

SISÄLLYS

Tiivistelmä II
Abstract III
Alkusanat IV
Sisällys V
Termit ja niiden määritelmät VII
Lyhenteet ja niiden määritelmät IX

1 Johdanto 1
2 Voiteluteoriaa 3
2.1 Kuivakitka 3
2.1.1 Kitkakerroin 3
2.1.2 Adhesiivinen kitka 3
2.2 Voiteluaine 3
2.3 Viskositeetti ja nestekitka 4
2.3.1 Viskositeetin riippuvuus lämpötilasta 5
2.3.2 Viskositeetin riippuvuus paineesta 5
2.4 Hydrodynaaminen voitelu 5
2.5 Seka- ja rajavoitelutilanteet 7
3 Liukulaakerointi 8
3.1 Laakerityypit 8
3.2 Liukulaakerin hydrodynamiikan laskenta 9
3.3 Reunakuormitetun säteisliukulaakerin laskenta 10
3.4 Stribeck-kuvaaja ja -laakeriparametri 11
3.5 Minimivoiteluainemäärä 12
4 Laakerin vaurioituminen 14
4.1 Adhesiivinen kuluminen 14
4.2 Abrasiivinen kuluminen 14
4.3 Laakerimateriaalien vaikutus kulumiseen 15
4.4 Sisäänajautuminen 15
4.5 Laakerin kiinnileikkaantuminen 16
5 Koelaitekuvaus 18
5.1 Säteisliukulaakerikoelaite 18
5.2 Koelaitemuutokset 20
5.2.1 Laakerin reunakuormitus 20
5.2.2 Laakerin hydrodynaaminen painejakautuma 25
5.3 Koejärjestelyt 27
5.3.1 Laskenta- ja asetusarvot 27
5.3.2 Koekappaleet 27
5.3.3 Käyttölämpötilamittaukset 28
6 Mittaustulokset ja niiden tarkastelu 29

6.1 Kitka-ajot 29
6.1.1 Kitka ilman reunakuormitusta 29
6.1.2 Kitka reunakuormituksella 31
6.1.3 Sisäänajautumisen vaikutus 34
6.2 Hydrodynaaminen painejakautuma 37
6.2.1 Hydrodynaaminen painejakautuma ilman reunakuormitusta 37
6.2.2 Hydrodynaaminen painejakautuma reunakuormituksella 41
6.3 Laakerivauriot 44
6.3.1 Voiteluhäiriön vaikutus kiinnileikkaantumiseen 44
6.3.2 Voiteluhäiriöajo ilman reunakuormitusta 45
6.3.3 Voiteluhäiriö 40 % reunakuormituksella 47
6.3.4 Voiteluhäiriö 60 % reunakuormituksella 48
6.3.5 Voitelumäärän vaikutus kitkakertoimeen 50
7 Yhteenveto ja kehityskohteet 52
Lähteet 54

LIITE A Kitka-ajojen mittaustulokset
LIITE B Havainne hydrodynaamisesta painejakautumasta
LIITE C Laskenta- ja asetusarvot
LIITE D Koekappaleet

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

$\boldsymbol{a}$	Kallistuma laakerin reunalla
$\boldsymbol{\alpha}$	Nivelvarren asetuskulma
$\boldsymbol{B}$	Laakeripituus
$\boldsymbol{d}$	Halkaisijamitta
$\boldsymbol{D}$	Koelaakerin halkaisija
$\boldsymbol{\gamma}$	Paine-eksponentti
$\boldsymbol{e}$	Epäkeskisyysmitta
$\boldsymbol{\varepsilon}$	epäkeskisyyssuhde
$\boldsymbol{f}$	Voima
$\boldsymbol{F}$	Säteiskuormitus
$\boldsymbol{F_N}$	Nivelvarren normaalivoima
$\boldsymbol{h}$	Voitelukalvon paksuus
$\boldsymbol{h_0}$	voitelukalvon minimipaksuus
$\boldsymbol{h_1}, \boldsymbol{h_2}$	Voitelukalvon paksuusmitta nestekerroksessa
$\boldsymbol{H}$	Mitattu kallistuma laakerin reunalla
$\boldsymbol{\eta}$	Dynaaminen viskositeetti,
$\boldsymbol{\eta_{eff}}$	Viskositeetti käyttölämpötilassa
$\boldsymbol{\eta_x}$	Vertailuviskositeetti
$\boldsymbol{\eta_0}$	viskositeetti normaalipaineessa
$\boldsymbol{L}$	Koelaakerin pituus
$\boldsymbol{L_N}$	Nivelvarren momenttivarsi akselilinjalle
$\boldsymbol{L_{e0}}, \boldsymbol{L_{e1}}, \boldsymbol{L_{e2}}$	Pyörrevirta-antureiden mittavälit
$\boldsymbol{M_R}$,	Reunakuormitusmomentti,

$\boldsymbol{M_{R_suht}}$	Reunakuormitusmomentti suhteessa maksimimomenttiin
$\boldsymbol{\mu}$	Mitattu kitkakerroin
$\boldsymbol{\mu_{mod}}$	Muokattu kitkakerroin reunakuormituksella
$\boldsymbol{\mu_{Stri}}$	Laakeriparametri
$\boldsymbol{p}$	paine, hydrodynaaminen paine
$\boldsymbol{P_{proj}}$	Projektiopaine
$\boldsymbol{Q}$	Voiteluaineen tilavuusvirtaus
$\boldsymbol{\rho}$	Voiteluaineen tiheys
$\boldsymbol{T}$	Keskimääräinen laakerien käyttölämpötila
$\boldsymbol{\tau}$	Leikkausjännitys
$\boldsymbol{\varphi}$	Kulmakoordinaatti, jossa 0º-180º ovat horisontit
$\boldsymbol{u, U_1, U_2}$	Liukunopeus
VG	Voiteluaineen ISO-VG lukuarvo
$\boldsymbol{x, y}$	Koordinaatisto
$\boldsymbol{\omega}$	Kulmanopeus

LYHENTEET JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

EP	Extreme pressure, joka ilmoittaa voiteluöljyn olevan lisäaineistettu suuria pintapaineita varten
ISO VG	Voiteluaineen viskositeetin ISO VG luokka

1 JOHDANTO

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston tehonsiirron ja tribologian tutkimusryhmässä yhteistyössä Ecobearings projektissa mukana olevien yritysten ja tutkimuslaitosten kanssa. Työssä selvitetään kokeellisesti reunakuormitettujen säteisliukulaakerien kitka- ja vauriokäyttäytymistä. Reunakuormituksella tarkoitetaan laakeriin kohdistuvan säteiskuormituksen jakautumista epäkeskisesti laakerin pituussuuntaan nähden. Reunakuormitustilanteiden ymmärtäminen ja hallinta on tärkeää raskaasti kuormitettujen koneiden laakeroinneissa kuten esimerkiksi kivenmurskaimien karalaakeroinneissa.

Liukulaakereita käytetään paljon liikkuvien koneenosien laakerointiin. Liukulaakerin toiminta perustuu liikkeen ja liukupintojen muodon yhteisvaikutuksessa syntyvään hydrodynamiseen voitelukalvoon. Voitelukalvolla saavutetaan alhainen liikekitka ja estetään koneenosien kuluminen.

Lyijyä käytetään raskaasti kuormitettujen koneenosien laakerimetalleissa, joista tavallisin on lyijytinapronssi. Pehmeällä lyijyllä on laakerikitkaa alentava vaikutus sekavoitelutilanteissa, joissa laakeripinnat osin koskettavat toisiaan hydrodynaamisen voitelukalvon ollessa liian ohut. Lyijy on ympäristölle myrkyllinen ja sen käsittelyyn liittyy useita terveysriskejä. Ecobearings projektin tavoitteena oli löytää lyijypitoisten metalliseosten korvaava liukulaakerimateriaali. Projektissa selvittiin laakerimateriaalien lyijypitoisuuden ja valumenetelmien vaikutuksia laakerikitkaan sekä testattiin uusia lyijyttömiä seosmetalleja. Koeajoja tehtiin säteisliukulaakerikoelaitteella, painelaakerikoelaitteella ja tappi-kiekko koelaitteella, joilla tarkasteltiin testikappaleiden kitka-, kulumis- ja vauriokäyttäytymistä.

Tämän työn tavoitteena on selvittää reunakuormituksen vaikutus säteisliukulaakerin kitka- ja vauriokäyttäytymiseen. Työn keskeisenä osana on suunnitella ja toteuttaa tarvittavat koelaitemuutokset laakerien reunakuormituksen vaikutuksen tutkimiseen. Säteisliukulaakerin reunakuormitustilanteiden kitka- ja vauriokäyttäytymisen tunteminen mahdollistaa koneiden suunnitteluvaiheessa laakerin kuormankantokyvyn arvioinnin poikkeuksellisissa kuormitustilanteissa.

Työ alkaa esittelemällä hydrodynaamista voiteluteoriaa, teoriaan pohjautuvaa säteisliukulaakerien laskentaa ja laakerien vaurioteoriaa. Teoriaa seuraa säteisliukulaakerikoelaitteiston esittely ja koelaitemuutokset reunakuormituksen tuottamiseen kehitetyllä tunkkirakenteella. Koelaitemuutokset sisältävät myös hydrodynaamisen painejakautuman ja laakerikallistuman mittaamisen.

Koelaitekuvauksen jälkeen esitetään koejärjestelyt ja mittaustulokset sekä tarkastellaan tuloksia kitkakäyttäytymisen ymmärtämiseksi laakerin eri

kuormitustilanteissa. Laakerikitkaa tarkastellaan ilman reunakuormitusta ja reunakuormituksella. Sisäänajautumisen vaikutus laakerikitkaan selvitettiin toistamalla koeajoja.

Hydrodynaamista painejakautumaa mitattiin laakerin eri kuormitustilanteissa ja mittaustuloksia havainnoidaan pisteisiin sovitetuin käyrin sekä laadituilla hahmotelmilla painejakautuman eri muodoista ilman reunakuormitusta ja reunakuormituksella.

Liukulaakerin vauriokäyttäytymistä voiteluhäiriötilanteissa havainnoitiin eri kuormitustilanteissa. Koeajoissa voiteluainesyöttö katkaistiin kasvavin ajanjaksoin kunnes seurasi koelaakerin havainnoitu kiinnileikkaantuminen. Tuloksena saadaan voiteluhäiriöön nähden kestoaika eri reunakuormitustilanteissa.

Yhdessä koeajossa voiteluaineen määrää laakeria kohden kuristettiin hallitusti. Voiteluöljyn määrän vaikutus laakerikitkaan mitattiin ja työssä esitetään koeajon tuloksena saatu kitka sekä laakerien käyttölämpötilan muutos voiteluainemäärään nähden.

Työn päättää yhteenveto ja kehitysehdotelmat.

2 VOITELUTEORIAA

Tribologia on tieteenala, joka tutkii kitkaa, kulumista ja voitelua liikkuvien koneenosien kosketuspinnoissa. Aihepiirin tutkimus etsii ja kehittää ratkaisuja esimerkiksi liikkeen aiheuttamien kitkavoimien minimoimiseksi hyödyntämällä laakerointia ja voitelua. (Khonsari, et al., 2008)

2.1 Kuivakitka

2.1.1 Kitkakerroin

Klassinen kitkalaki kuvaa koskettavien koneenosien liikkeen ylläpitämiseen tarvittavan voiman kitkakertoimella, joka on pintojen liikkeeseen tarvittavan pinnan suuntaisen voiman ja pinnat yhteen painavan normaalivoiman suhdeluku. Kitkakerroin ei ole riippuvainen näennäisestä kosketusalasta ja se on suoraan verrannollinen normaalivoimaan. Pinnat erottava voiteluaine pienentää merkittävästi kitkakertoimen arvoa. (Kivioja, et al., 2007)

2.1.2 Adhesiivinen kitka

Adhesiivisen kitkateorian mukaan kitka muodostuu koskettavien materiaaliparien plastisesta muodonmuutoksista, elastisen muodonmuutoksen sitomasta energiasta ja materiaalin leikkautumisesta. Kitkavoima on syntyneiden kosketuskohtien leikkautumiseen tarvittavan leikkausjännityksen ja todellisen kosketusalan tulo ja kosketusala on suoraan verrannollinen normaalivoimaan eli kuormaan. Ohuet pehmeät kalvot kovien materiaalien pinnoilla mahdollistavat alhaiset kuivakitkakertoimet. Perusmateriaalin suuri jäykkyys minimoi kosketusalaa ja pintojen luistossa esiintyvä leikkausvoima määräytyy ohuen pehmeämmän pinnoitteen alhaisemmasta leikkauslujuudesta. (Kivioja, et al., 2007)

2.2 Voiteluaine

Tavallisin voiteluaine on neste, jonka tehtävä on minimoida liikkuvien koneenosien välinen kitkavoima ja estää koneenosien kuluminen. Voiteluaine muodostaa kalvon koneenosien välille ja estää osien väliset kosketukset. Yleisesti käytetyt hiilivetypohjaiset voiteluaineet eli öljyt menettävät voiteluominaisuuksia käyttöiän aikana, mutta tämän on katsottu olevan merkittävästi pienempi haitta kuin olisi kuivakäyntisten koneenosien kuluminen.

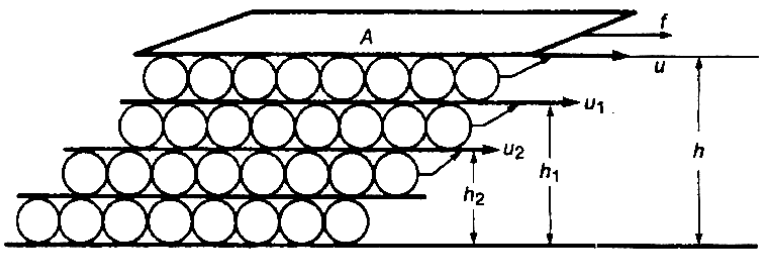
Voiteluaineen muita tehtäviä ovat esimerkiksi laakeroinnissa syntyvän kitkalämmön poiskuljettaminen, pintojen kosketuksessa syntyvien kulumispartikkelien poiskuljettaminen, kemiallisen korroosion ehkäiseminen estämällä veden ja muiden likapartikkeleiden pääsyn laakeroitaville pinnoille, kuorman jakaminen tasaisesti laakeripinnoille ja värähtelyä sekä melua vaimentava vaikutus.

Voiteluaine voi olla neste, rasva tai kaasu tai kiinteävoiteluaine kuten grafiitti tai koneenosan pinnoite. Kuivissa laakereissa käytetään materiaaleja, joilla on toisiinsa nähden alhainen tarttuvuus eli niiden seosaineet ovat toisiinsa liukenemattomia. (Kivioja, et al., 2007)

Voiteluöljyjen lisäaineistuksella parannetaan merkittävästi sen ominaisuuksia olosuhteissa, joissa öljyn kuormankantokyky ei ole riittävää. Tyypillisin lisäaineistus on merkinnältään Extreme Pressure (EP) -lisäaineistus, joka aktivoituu korkeassa paineessa pintojen kosketuksessa syntyvästä lämmöstä muodostaen koneenosien pinnoille kemiallisesti molekyyliketjujen paksuisen kiinteän voitelukalvon estäen koneenosien suoran kosketuksen. (Khonsari, et al., 2008)

2.3 Viskositeetti ja nestekitka

Viskositeetti kuvaa voiteluaineen kykyä vastustaa leikkautumista. Kuvassa 2-1 esitetään nestemolekyylikerrosten muodostama voitelukalvo kahden tason välillä. Toista tasoista vedettäessä suhteessa toiseen nähden tunnetaan levyjen välillä vaikuttava nestekitka. Newtonilaisen nesteen viskositeetti on vakio tasolevyn liikenopeuden ja samalla kalvossa vaikuttavan leikkausnopeuden suhteen.



Kuva 2-1 *Kahden tasolevyn välissä voiteluneste (Kivioja, et al., 2007).*

Kuvassa 2-1 ylempi tasolevyistä on liikkeessä nopeudella u alempaan tasoon nähden, jolloin liikkeen ylläpitämiseen vaadittava leikkausjännitys τ määritetään kaavalla 2-1, jossa f on ylemmän tasolevyn liikkeen ylläpitämiseen vaadittava vetovoima ja A on vedettävän tasolevyn pinta-ala.

$$\tau = \frac{f}{A} \tag{2-1}$$

Kaavassa 2-2 on esitettynä Newtonin mukaan viskositeetin määritelmä kahden levyn välisen leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden kautta.

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{\partial u}{\partial y}} \tag{2-2}$$

Yhdistämällä kaavat 2-1 ja 2-2 saadaan vaadittava vetovoima eli nestekitkavoima ratkaistua viskositeetin, liikenopeuden ja kalvonpaksuuden funktiona. Leikkautuvan nesteen sisäinen kitka muuntuu lämmöksi liikkeen aikana. (Kivioja, et al., 2007)

$$f = \eta A \frac{\partial u}{\partial y} \tag{2-3}$$

Olettamalla nesteen leikkausnopeus lineaariseksi kalvon paksuuden h suunnassa saadaan nestekitkavoimaksi kaavassa 2-4 esitetty tulos.

$$f = \eta A \frac{u}{h} \tag{2-4}$$

2.3.1 Viskositeetin riippuvuus lämpötilasta

Tavallisimpien hiilivetypohjaisten voiteluaineiden viskositeetti on voimakkaasti lämpötilariippuvainen. Tässä työssä käytetään viskositeetti-lämpötilariippuvuutta, joka esitetään kaavassa 2-5 keskimääräisen käyttölämpötilan T (°C) mukaan.

$$\eta_{eff}(T) = \eta_x e^{\left[\left(\frac{159,56}{T+95} - 0,181913\right) ln\left(\frac{\rho * VG}{10^6 \eta_x}\right)\right]} \tag{2-5}$$

Kaavassa 2-5 η_x on voiteluaineen vertailuviskositeetti, ρ on voiteluaineen tiheys ja VGon voiteluaineen ISO-VG luokka. (Kivioja, et al., 2007)

2.3.2 Viskositeetin riippuvuus paineesta

Viskositeetti muuttuu hydrodynaamisen paineen p vaikutuksen alaisena kaavan 2-6 mukaan.

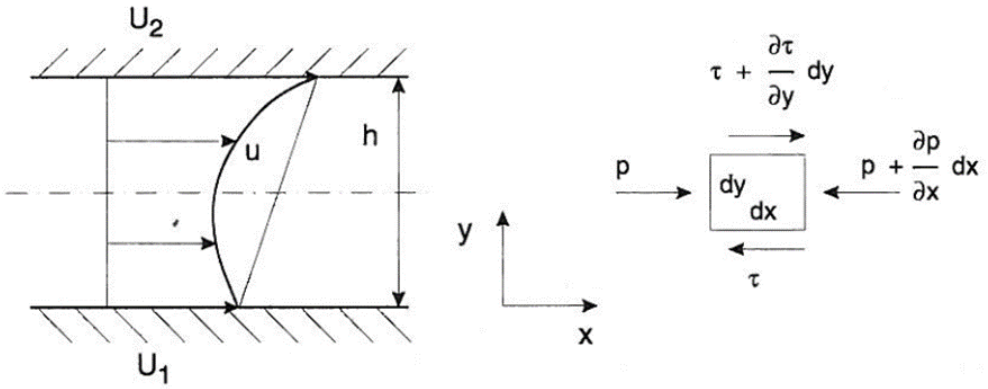
$$\eta(p) = \eta_0 e^{\gamma p} \tag{2-6}$$

Kaavassa 2-6 η_0 on voiteluaineen viskositeetti normaalipaineessa ja a on paine-eksponentti, jonka tyypillinen arvo mineraaliöljyille on välillä 2,2 x 10^{-8} m^2/N (40 ºC) - 1,5 x 10^{-8} m^2/N (100 ºC). (Kivioja, et al., 2007)

2.4 Hydrodynaaminen voitelu

Koneenosien pinnat voidaan erottaa toisistaan hydrodynaamisen tai hydrostaattisen voitelun avulla. Hydrodynaamisessa voitelutilanteessa koneenosien suhteellinen liike toisiinsa nähden yhdistettynä kapenevaan kiilamaiseen rakoon ajautuneeseen nesteeseen

mahdollistaa voitelunesteeseen syntyvän kuormaa kantavan hydrodynaamisen paineen. Hydrodynaamiseen voiteluun perustuu säteisliukulaakerien tai painelaakerien kuormaa kantava kyky koneenosien liikkuessa suhteessa toisiinsa nähden. Kuvassa 2-2 on esitettynä kahden levyn väliseen nestekerrokseen kehittynyt nopeusprofiili u, kun kuvassa pinnoilla 1 ja 2 on nopeuskomponentit U_1 ja U_2, sekä $U_2 > U_1$. (Kivioja, et al., 2007)



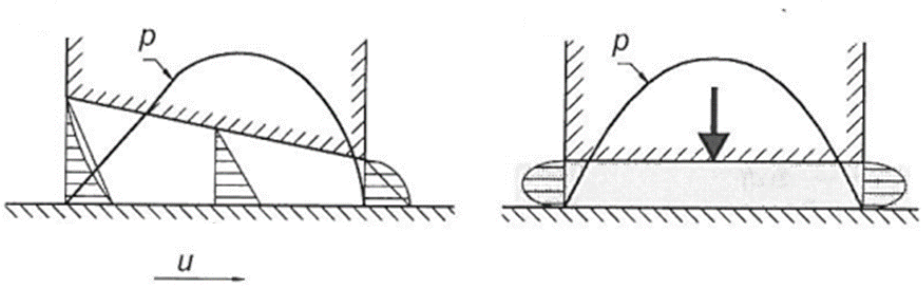
Kuva 2-2 *Kahden levyn välisessä tilassa nesteen nopeusprofiili u sekä nestealkio dxdy voimatasapainoyhtälön ratkaisemiseksi (Kivioja, et al., 2007).*

Nestealkion voimatasapainoyhtälö esitetään kaavassa 2-7.

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} dxdy = \frac{\partial p}{\partial x} dxdy \tag{2-7}$$

Kaava 2-7 voidaan soveltaa hydrodynaamisen painejakautuman ratkaisemiseksi mielivaltaisille pinnoille. Ratkaisussa käytetään hyväksi kaavan 2-2 yhteyttä leikkausjännityksen τ, viskositeetin η ja nopeusgradientin $\partial u / \partial y$ välillä. Kuvassa 2-3 esitetään hydrodynaaminen painejakautuma kapenevassa kiilamaisessa raossa. (Kivioja, et al., 2007) *Reynoldsin*-yhtälö säteisliukulaakerin hydrodynaamisen paineen ratkaisemiseksi esitetään kappaleessa 3.2.

Nestekerros voi kantaa hetkellisesti kuormaa myös puserrusvaikutuksella. Puserrustilanne syntyy, kun kaksi pintaa lähestyvät toisiaan ja niiden väliin jäävä neste ei ehdi poistua välitilasta. Kuvassa 2-3 esitetään puserrusvaikutuksen aikaansaama painejakautuma. (Kivioja, et al., 2007)



Kuva 2-3 *Hydrodynaaminen voitelutilanne kapenevassa kiilamaisessa raossa ja nesteen puserrustilanne (Kivioja, et al., 2007).*

2.5 Seka- ja rajavoitelutilanteet

Sekavoitelutilanne muodostuu kun hydrodynaaminen voitelukalvon paksuus ei ole riittävä erottamaan laakeripintoja toisistaan. Voideltavat pinnat koskettavat pintojen epätasaisuuksien, pinnankarheushuippujen kohdalta. Laakerin suotuisassa sisäänajossa, jossa vallitsee sekavoitelutilanne, kuitenkin pinnat tasoittuvat ja kiillottuvat. Perinteisen suunnittelufilosofian mukaisesti laakeripinnasta toinen materiaali on pehmeämpi, uhrautuva, jolloin kulumista ja kiillottumista esiintyy pehmeällä laakeripinnalla.

Rajavoitelutilanteessa laakeriin kohdistuneen kuormituksen kantaa koskettavat pinnat. Pinnoille tarttunut voiteluneste kuitenkin leikkaantuu helposti ja vähentää pintojen kulumista. Rajavoitelutilanteessa kitkakertoimen raja-arvo määräytyy laakeripintojen materiaaliparin liukenevuudesta toisiinsa, käytetyistä kuivavoiteluaineista ja pinnoitteista ja voiteluöljyn EP-lisäaineistuksesta. (Kivioja, et al., 2007).

3 LIUKULAAKEROINTI

Liukulaakereita ovat säteittäiset, aksiaaliset ja tasomaiset laakerit. Tyypillinen liukulaakeri koostuu yhdistelmästä toisiinsa sopivista laakerimateriaaleista, joista toinen on pinnaltaan pehmeämpi, uhrautuva komponentti ja laakerimateriaalien välinen liukenevuus toisiinsa on vähäistä. Laakeroinnissa käytetään nestettä tai rasvaa voiteluaineena. Liukupintojen teksturoinnilla voidaan parantaa voiteluaineen pysyvyyttä liukupinnoilla ja hallita pintojen kulumista sekavoitelutilanteissa. (Khonsari, et al., 2008)

3.1 Laakerityypit

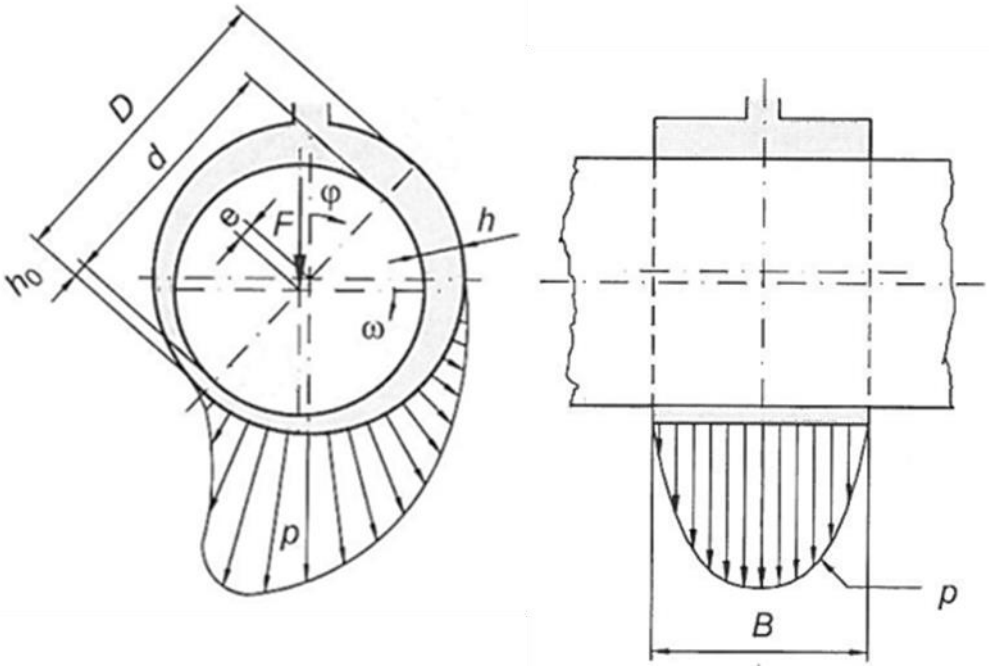
Liukulaakerit jaotellaan pyörivän liikkeen tapauksessa painelaakereihin ja säteisliukulaakereihin. Tasopintojen suuntainen liike, kuten johteilla liukuvat kelkat, voivat myös olla liukulaakeroituja. Liukulaakereita sovelletaan kohteissa, joissa kohdistuvat kuormitukset ovat suuria, kuten esimerkiksi kauhakuormaajan etukuormaajan runkokiinnityksen laakeroinnissa ja kivenmurskaimen pääkaran laakeroinnissa.

Liukulaakerit ovat usein voideltuja, mutta kuiviakin laakereita käytetään erikoissovellutuksissa. Tällöin voiteluaineen korvaa laakeroinnin pinnoite tai teksturointi, myös näiden yhdistelmiä käytetään yhdessä voiteluaineen kuten rasvan kanssa. Tavallisimmat voiteluaineet ovat öljyt, rasvat ja erikoistapauksissa kaasut sekä kiinteisiin voiteluaineisiin lukeutuvat pinnoitteet. Liukulaakeriholkit ovat tavallisesti laakeroitavaa akselimateriaalia pehmeämpiä metalliseoksia kulumisen hallitsemiseksi seka- ja rajavoitelutilanteissa. Kokonaan polymeereistä valmistettuja laakereita on käytössä, joskin niiden käyttöä rajoittaa alhaisempi pintapaineen kestokyky sekä lämmön aiheuttaman adheesion lisääntyminen eli laakerin sulaminen perinteiseen pronssista valmistettuun liukulaakeriin verrattuna. (Kivioja, et al., 2007)

Liukulaakeri on edullinen valmistaa vierintälaakeriin nähden, sillä liukulaakerin rakenne on huomattavasti yksinkertaisempi. Lisäksi liukulaakeri ei useimmissa sovellutuksissa vaadi erityisen tarkkaa osien mittatolerointia muodon ja pinnankarheuksien suhteen kuin esimerkiksi vierintälaakerin vierintäelementit vaativat. Lisäksi liukulaakeripintoihin kohdistuu tyypillisesti selvästi alhaisemmat kuorman tuottamat pintapaineet. Liukulaakerien heikkous vierintälaakereihin verrattuna on koneiden käynnistystilanteet tai tilanteet, jossa pintojen suhteellinen liike on alhainen tai liikettä ei ole, milloin koneenosien pinnat erottavaa hydrodynaamista voitelukalvoa ei muodostu ja osat kuluvat kosketuksessa.

3.2 Liukulaakerin hydrodynamiikan laskenta

Tavallisesti liukulaakerin laakeriholkin sisähalkaisija on laakeroitavaa akselia suurempi noin kahden promillen verran. Kuvassa 3-1 esitetään säteisliukulaakerin hydrodynaaminen painejakautuma, joka muodostuu akselin epäkeskisestä asemasta ja sen liikkeestä suhteessa liukulaakeriholkin kehään. (Kivioja, et al., 2007)



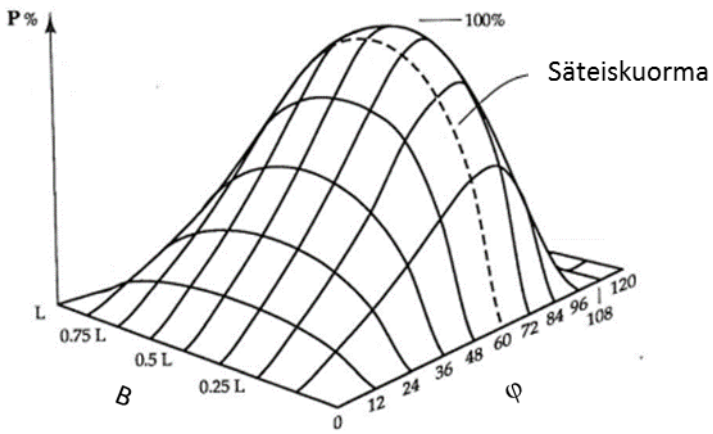
Kuva 3-1 *Säteisliukulaakerissa vallitseva hydrodynaaminen voitelutilanne (Kivioja, et al., 2007).*

Kuvassa 3-1 p on hydrodynamiikan muodostama paine, h voitelukalvon paksuus, h_0 minimivoitelukalvonpaksuus, e epäkeskisyysmitta, φ kulmakoordinaatti kuormitussuunasta, F säteiskuormitus, D laakerin sisähalkaisija, B laakeripituus, d akselin ulkohalkaisija ja ω pyörivän akselin kulmanopeus, josta johdetaan liukunopeus u laakeripinnalle.

Hydrodynaamista säteisliukulaakerin toimintaa voidaan mallintaa *Reynoldsin*-yhtälöön perustuvalla teorialla, jossa kiilamaiseen rakoon ajautuu laakerin ja akselin suhteellisen liikkeen aikana voiteluainevirta. Tässä työssä käytetään Tampereen teknillisen yliopiston Konstruktiotekniikan laitoksella kehitettyä *Reynoldsin*-yhtälöön pohjautuvaa säteisliukulaakerimallia käyttölämpötilassa vaikuttavalla viskositeetilla η_{eff}. Yhtälöstä ratkaistaan painejakautuma ja voitelukalvon paksuus käyttäen differenssimenetelmää siten, että iteroidaan käyttöolosuhteissa vallitseva lämpötasapaino perustuen lämpötilasta riippuvaan viskositeettiin, nesteen leikkautumisesta syntyvään kitkaenergiaan ja voiteluainevirtauksen määrään. Kavitaatioalueella paine p saa arvon nolla. Laskentamallin yksityiskohtainen kuvaus on esitetty lähteessä (Lehtovaara, 2007). Laakerin mallintamiseen käytetty yksinkertaistettu *Reynoldsin*-yhtälö esitetään kaavassa 3-1. Akselin suuntaista liikettä ei esiinny.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(h^3\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(h^3\frac{\partial p}{\partial y}\right)=6\eta_{eff}u\frac{\partial h}{\partial x} \tag{3-1}$$

Kuvassa 3-2 esitetään *Reynoldsin*-yhtälön ratkaisu säteisliukulaakerin painejakautumalle.



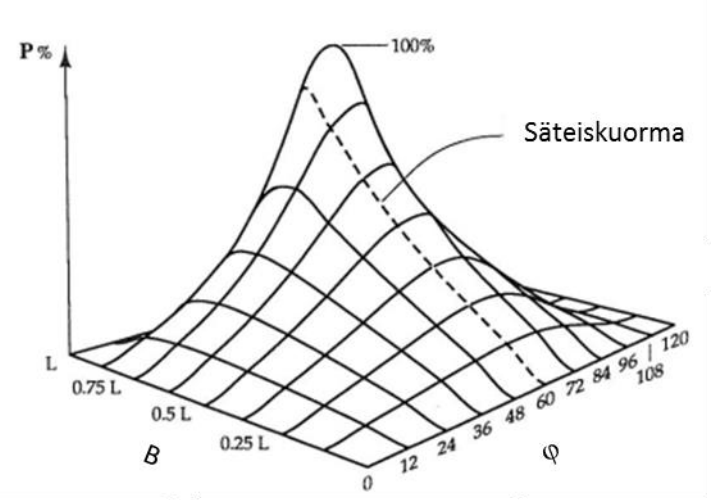
Kuva 3-2 *Säteisliukulaakerin painejakautuma (Stachowiak, et al., 1993).*

Kuvan 3-2 tuloksesta nähdään symmetrinen painehuippu laakerin pituussuunnassa. Painejakautuman huipun maksimi sijaitsee säteiskuormituksen vaikutussuunnan jälkeen ja sitä seuraa jyrkkä pudotus nollapaineeseen.

3.3 Reunakuormitetun säteisliukulaakerin laskenta

Tämän työn keskeinen sisältö on selvittää kokeellisesti säteisliukulaakerin kitka- ja vauriokäyttäytymistä reunakuormitustilanteissa. Reunakuormituksella tarkoitetaan laakeriin kohdistuvan kuormituksen epäkeskisyyttä laakerin pituussuunnassa siten, että symmetriseen tilanteeseen verrattuna kuormitusresultantti on siirtynyt pituussuunnassa sivuun laakerin keskilinjalta.

Kuvassa 3-3 esitetään painejakauman muoto, kun säteisliukulaakeriin kohdistuu reunakuormitusta. Reunakuormituksenalainen painejakautuman painemaksimi on symmetristä ratkaisua suurempi ja sijaitsee laakerin pituussuunnassa sivussa keskilinjalta. Reuna-alueella hydrodynaaminen paine on kohonnut ja voitelukalvo on ohuempi.



Kuva 3-3 *Reunakuormituksen alainen säteisliukulaakerin painejakautuma (Stachowiak, et al., 1993).*

Tässä työssä reunakuormituksen laskentaan käytettyyn laakerimalliin syötetään pituussuuntainen geometrinen muutos kuvaamaan akselin kallistumaa suhteessa laakeriholkkiin. Kallistuma syötetään malliin a-mitalla, joka ilmoittaa akselin säteissiirtymän laakeriholkin reunalla minimiöljykalvon kohdalla. Pituusuunnassa kallistuma johtaa paineen nousuun reuna-alueella, jolla voitelukalvo on pakotetusti ohuempi. Mallinnetusta hydrodynaamisesta paineesta määritetään integroimalla voimaresultantti ja sen siirtyminen laakerin pituussuunnassa. Resultantin suuruudesta ja etäisyydestä keskilinjaan lasketaan reunakuormitusmomentin suuruus. (Lehtovaara, 2007)

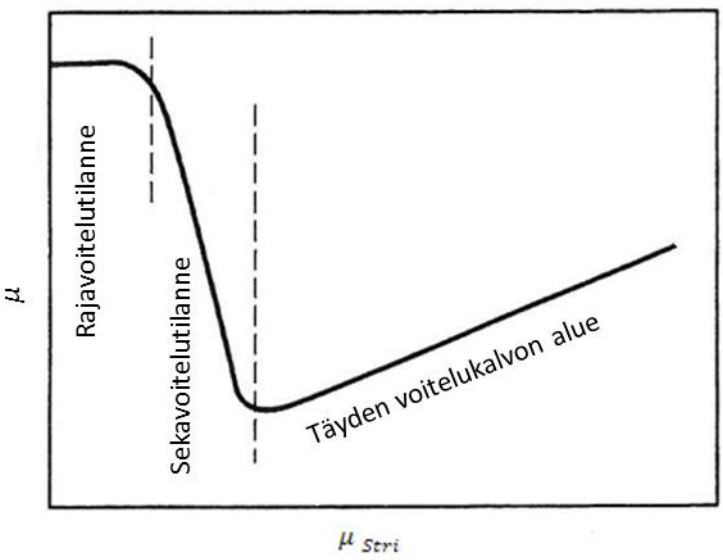
3.4 Stribeck-kuvaaja ja -laakeriparametri

Mitattu tai laskettu säteisliukulaakerin kitkakerroin esitetään *Stribeck*-kuvaajalla laakeriparametrin μ_{Stri} mukaan. Laakeriparametri sisältää liukunopeuden, säteiskuormituksen, laakerivälyksen, epäkeskisyyssuhteen ja käyttölämpötilassa vallitsevan viskositeetin vaikutuksen kaavojen 3-2 ja 3-3 mukaisesti. (Khonsari, et al., 2008)

$$\mu_{Stri} = \frac{u\,\eta_{eff}}{P_{proj}\,C} K(\varepsilon) \tag{3-2}$$

$$K(\varepsilon) = \frac{2\pi}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \quad , \quad jossa \quad \varepsilon = (C-e)/C \quad . \tag{3-3}$$

Projektiopaine P_{proj} lasketaan säteiskuormituksen kuormitusvoimasta laakerin projektio-alalle $d * B$. C on laakerivälys, ε on epäkeskisyyssuhde ja e epäkeskisyysmitta. Kuvassa 3-4 esitetään tyypillinen *Stribeck*-kuvaaja, jossa kitkakerroin μ esitetään laakeriparametrin μ_{Stri} mukaan. (Khonsari, et al., 2008)



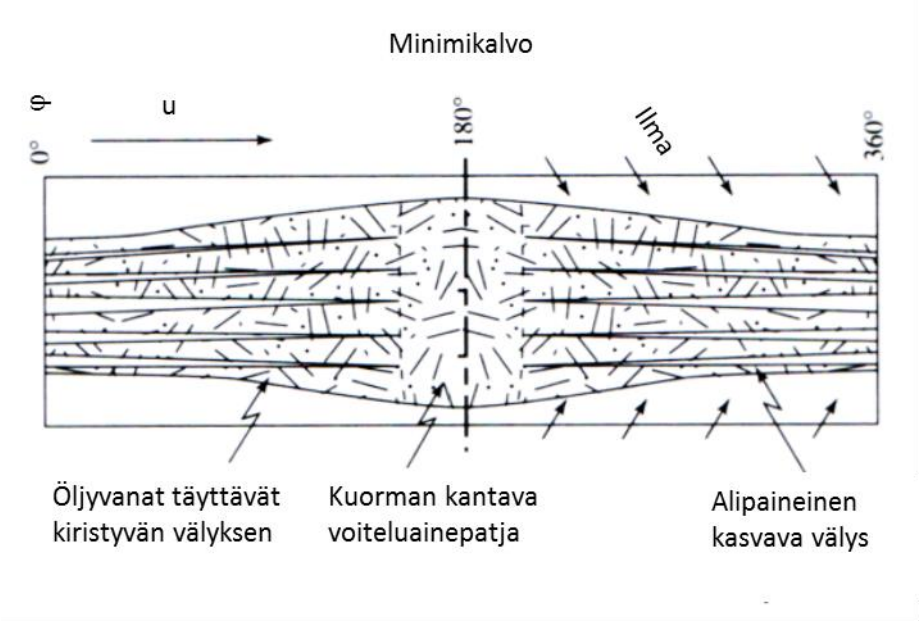
Kuva 3-4 *Stribeck-kuvaaja (Khonsari, et al., 2008).*

Todellisessa säteisliukulaakerissa μ_{Stri}-parametri ei saa loputtoman pieniä arvoja, vaan kitkakerroin lähtee nousemaan, kun voitelukalvon paksuus alittaa pinnankarheushuippujen korkeuden ja koneenosat koskettavat toisiaan. Minimikitkakerroin saavutetaan siirryttäessä sekavoitelualueelle täyden voitelukalvon alueelta. Kuvaajassa pienemmillä μ_{Stri}-parametrin arvoilla esiintyy rajavoitelutilanne, jossa kitkakertoimeen vaikuttaa keskeisesti esimerkiksi materiaalien ja nesteen lisäaineistuksen ominaisuudet.

Stribeck-kuvaajalla kitkakerroin kasvaa rajatta siirryttäessä täyden voitelukalvon alueelle kun esimerkiksi μ_{Stri} arvo kasvaa nostettaessa liukunopeutta u. Nopeuden kasvu ja nestekerrokseen muodostunut nopeusgradientin kasvu kasvattaa kitkaa leikkausjännityksen lisääntyessä voitelukalvon nestemolekyylikerrosten välillä. Kitkahäviöistä johtuen laakerikitkan nousua hillitsee käytännössä laakerin käyttölämpötilan kohoaminen, jolloin voitelunesteen viskositeetti-lämpötila-riippuvuuden kautta η_{eff} lukuarvo pienenee.

3.5 Minimivoiteluainemäärä

Säteisliukulaakerien on havaittu toimivan hyvin alhaisella voiteluainemäärällä vakaassa kuormitustilanteessa. Sileät pinnat vaativat vähemmän voiteluainetta, mitä edesauttaa laakeripinnoista pehmeämmän pinnan kiillottuminen kulumisen seurauksena. Vaadittu minimikalvonpaksuus on tyypillisesti vain yli kolme kertaa kovemman pinnan pinnankarheuden. Liukunopeuden tai laakerivälyksen kasvaessa voiteluaineen ulosvirtausmäärä laakerilaidoilta lisääntyy. Vähimmäismäärä voiteluainetta pitää kitkatehon maltillisena kun kuluminen minimoituu ja kitkatehon muodostama käyttölämpötila ei vaikuta voiteluun ratkaisevasti. Kuvassa 3-5 esitetään vaikuttavat mekanismit pienen voiteluainemäärän säilymiseen liukulaakerissa. (Khonsari, et al., 2008)



Kuva 3-5 *Liukulaakerin voitelukalvo pienellä öljymäärällä (Khonsari, et al., 2008).*

Kuvan 3-5 mukaisesti voiteluaine riittää muodostamaan kosketusalueella yhtenäisen voitelukalvon. Kosketuksen ulkopuolella voiteluainevirta voi esiintyä jo öljyvanoina.

Voiteluaineen paine-viskositeetti-yhteyden kautta hyvin pieni kalvo riittää elastohydrodynaamisessa voitelutilanteessa. Pintojen joustot, voiteluaineen lukittuminen ja mahdollisesti EP-lisäaineiden reagointi edesauttavat tasaisen vain molekyyliketjujen paksuisen voitelukalvon muodostumista. Ohuen kalvon ulosvirtaus on vähäistä. (Khonsari, et al., 2008)

4 LAAKERIN VAURIOITUMINEN

Laakerin kulumisella tarkoitetaan tribologista tilannetta, jossa koneenosien kosketuksesta tai koneenosiin vaikuttavat kemialliset vuorovaikutukset irrottavat osien pinnoilta partikkeleita. Kuluminen johtaa koneenosan pinnan mittojen, geometrisien toleranssien muutoksiin ja lopulta pitkälle edennyt kuluminen on vaurioittanut koneenosan siten, ettei sen suunniteltu toiminta toteudu. Merkittävimmät kulumismekanismit ovat adhesiivinen kuluminen, abrasiivinen kuluminen, tribokemiallinen kuluminen sekä väsymiskuluminen. Kulumista esiintyy myös pintojen plastisena muokkautumisena koneenosia yhteen painettaessa, mutta sen ei katsota sisältyvän tribologisiin kulumismekanismeihin. (Kivioja, et al., 2007)

Kulumista esiintyy liukulaakereissa seka- ja rajavoitelutilanteissa, joissa voiteluaine ei pysty estämään laakeripintojen kosketusta toisiinsa, milloin useampi kulumismekanismi johtaa laakeripintojen vaurioitumiseen. Kulumista voidaan hallita pintojen teksturoinnilla, toisiinsa alhaisen adheesion omaavien laakerimateriaaliparin valinnalla ja voiteluaineen kulumista vähentäviä lisäaineita hyödyntämällä. Suunniteltaessa koneenosiin kohdistuvat kuormitukset verrattain maltilliseksi, pienennetään pintojen väsymiskulumisen riskiä. (Kivioja, et al., 2007)

4.1 Adhesiivinen kuluminen

Adheesio on pintojen kylmähitsautumista eli tarttumista toisiinsa. Adhesiivinen kuluminen eli tartuntakuluminen on seurausta kosketuksiin tulleiden pintojen kiinnittymisestä toisiinsa silloin, kun tartunnan irtoamisesta seuraa kulumispartikkeli. Tarttumisesta seurannut kuluminen on riippuvainen irti revenneestä kohdasta. Esimerkiksi materiaalia voi irrota leikkautumalla pelkästään toisesta pinnasta tartunnan säilyessä toisessa pinnassa. Tällöin myös tahmautumiseksi kuvattu ilmiö havaitaan materiaalin siirtymisenä pinnalta toiselle. (Kivioja, et al., 2007)

4.2 Abrasiivinen kuluminen

Abrasiivinen kuluminen, joka tunnetaan myös hiontakulumisena, tarkoittaa pintojen naarmuuntumisen seurauksena syntyvää materiaalin irtoamista. Abrasiivisessa kulumisessa kovempi pinta kuluttaa pehmeämpää kyntäen kulumispartikkeleita irti. Hiontakulumisen erikoismuotona muokkauslujittunut molempia laakeripintoja kovempi kulumispartikkeli voi kyntää pintojen välissä irrottaen uusia kulumispartikkeleita. Kyntämisessä toista pintaa rakenteellisesti jäykempi pinnanmuoto tai pinnankarheus painaa muodon pehmeämpään vastinpintaansa. (Kivioja, et al., 2007)

Abrasiivinen kuluminen hallitaan sileillä pinnanlaaduilla ja nestevoitelun avulla kulumispartikkelit huuhdotaan liukupinnoilta hioutumisen estämiseksi sekä voiteluaine

suodatetaan tehokkaasti siten, että voiteluainevirran mukana ei pintojen väliin kulkeudu kovia hiovia partikkeleita.

4.3 Laakerimateriaalien vaikutus kulumiseen

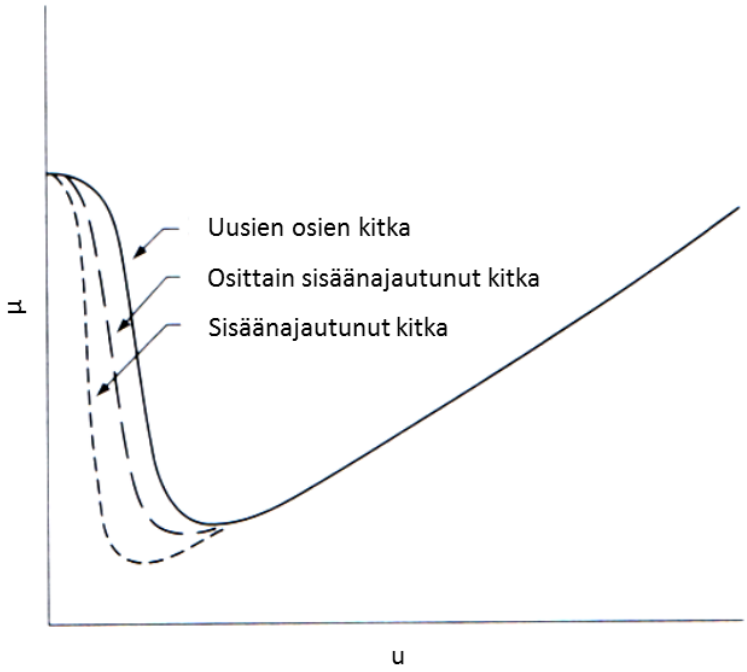
Tyypillinen liukulaakerointi on esimerkiksi kova teräsakseli ja akselimateriaalia pehmeämpi pronssinen laakeriholkki asennettuna laakeripesäänsä. Lyijytinapronssi on pehmeä kuparin, tinan sekä lyijyn seosmetalli, jota käytetään raskaasti kuormitettujen koneiden, kuten esimerkiksi kivenmurskainten, karalaakerimateriaalina. Lyijypitoisilla seosmetalleilla on laakeroinnissa alhainen kitka toimittaessa seka- ja rajavoitelutilanteissa, kuten esimerkiksi konetta käynnistettäessä. Seokseen liukenematon pehmeä lyijysulkeuma puristuu väliaineesta voideltaville pinnoille vähentäen pintojen adheesiota. Pehmeät lyijysulkeumat pystyvät hautaamaan voitelukalvossa kulkeutuvia kovia kulumispartikkeleita vähentäen abrasiivista kulumista. (Kivioja, et al., 2007)

Lyijy on kuitenkin ympäristömyrkyksi luokiteltu alkuaine ja sen käyttöä on rajattu selvästi Euroopan unionin alueella ja tulevaisuudessa lyijyn käyttöä tullaan edelleen vähentämään ja laakerointisovellutuksissa lyijypitoiset seosmetallit korvataan ympäristöystävällisemmillä vaihtoehdoilla.

4.4 Sisäänajautuminen

Tietyissä sovellutuksissa on tarkoituksenmukainen pinnan kuluttaminen haluttua, mikä voidaan toteuttaa, kun kulumismekanismien vaikutusta pinnan muokkautumiseen hallitaan. Sisäänajautuneilla pinnoilla on alhaisempi pinnankarheus ja sisäänajautuneiden laakerien kitkakäyttäytyminen on vakaampaa. Tasoittuneet pinnankarheushuiput eivät aiheuta adheesio- ja abraasiokulumista verrattuna osien valmistustyöstön jälkeisiin pintoihin. Hallittu sisäänajo on taloudellista tavoiteltaessa sileitä toisiinsa asettuneita pintoja, mikä olisi työstön kautta liki mahdotonta saavuttaa.

Sisäänajautumisen seurauksena sileämmät pinnat mahdollistavat ohuemman voitelukalvon muodostumisen esimerkiksi pienemmällä liukunopeuden arvolla. Kuvassa 4-1 sisäänajautuminen siirtää Stribeck-käyrällä minimikitkan paikkaa sekavoitelualueella liukunopeuden mukaan. (Khonsari, et al., 2008)



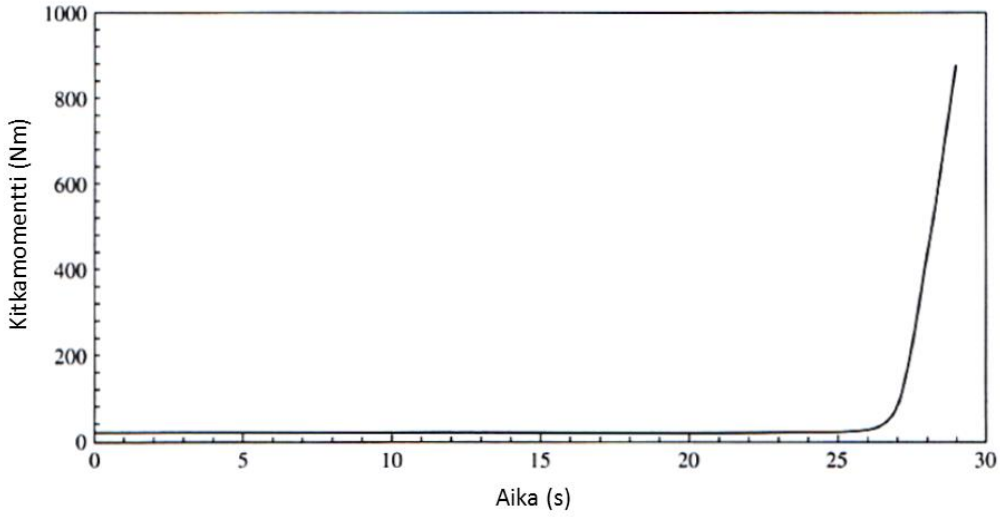
Kuva 4-1 *Sisäänajautumisen vaikutus kitkaan sekavoitelualueella (Khonsari, et al., 2008).*

Kuva 4-1 osoittaa sisäänajautumisen vaikuttavan sekavoitelualueen kitkakertoimeen siten, että minimikitka saavutetaan pienemmillä laakeri liukunopeuden arvoilla. Oletetaan kuvan kitkakäyttäytymisen olevan samankaltaista yleisemmin laakeriparametrin mukaan esitettynä.

4.5 Laakerin kiinnileikkaantuminen

Laakerin kiinnileikkautumisella tarkoitetaan tilannetta, jossa suuresti kuormitettu tai voiteluhäiriötilanteessa kuivana käyvät koneenosien pinnat tarttuvat adhesiivisesti toisiinsa muodostaen kiinteän sidoksen, jonka leikkausvoima on suurempi kuin on saavutettavissa liikkuvien osien ylläpitämän ulkoisen voiman kautta. Kiinnileikkaantuessa koneenosien liike estyy ja kone pysähtyy. Kiinnileikkaantuminen havaitaan sitä edeltäneenä nopeasti kohonneena laakerin käyttölämpötilana, voiteluöljyn hapettumisena korkeassa lämpötilassa ja laakeriosien hitsautumisella toisiinsa. Kiinnileikkaantuessaan laakeri pitää kuuluvaa korkeataajuista ääntä, joka syntyy kun koneenosat vielä liikkuvat ja kitkakäyttäytyminen on epävakaa.

Kuivan laakerin kiinnileikkaantuminen lämpölaajentumisesta johtuvasta kosketuspinta-alakasvusta on nopeasti etenevä vaurioprosessi, joka ei varoita itsestään etukäteen. Kuvan 4-2 mittaustulos on käyttölämpötilan nousun aikaansaaman laakerivälyksen kiinnikuroutumisesta seurannut kiinnileikkaantuminen. (Khonsari, et al., 2008)



Kuva 4-2 *Laakerin kiinnileikkaantuminen koneen kuivakäynnistyksessä. ω 250 rpm, F 4400 N, C 12,5 µm, B 51 mm, D 51 mm. (Khonsari, et al., 2008).*

Kuvan 4-2 tulos osoittaa kuivan laakerin kitkan noudattavan laakeroinnin rajavoitelutilanteen kitkaa juuri ennen ajanhetkeä, jolloin akselin lämpölaajeneminen kuroo laakerivälyksen kiinni ja adhesiivisen kulumisen pinta-ala kasvaa erittäin nopeasti hitsaten koneenosat toisiinsa. Empiiriset kokeet ovat osoittaneet, että laakerivälyksen kasvattamisella voidaan pidentää kuivakäyntiaikaa ennen kuin lämpölaajeneminen kuroo välyksen kiinni. (Khonsari, et al., 2008)

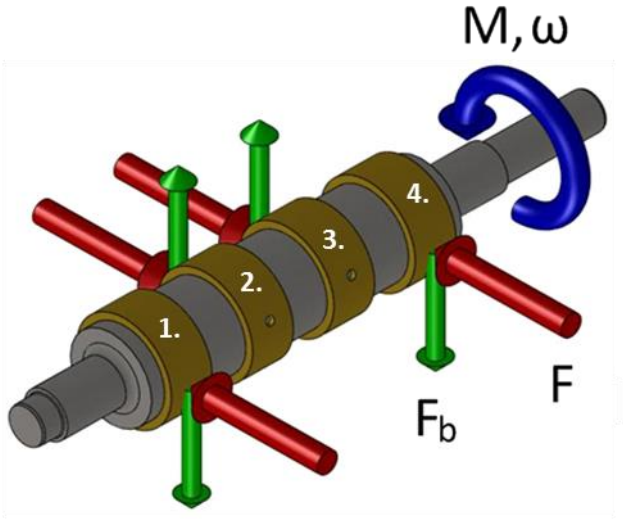
5 KOELAITEKUVAUS

Tässä työssä kehitettiin Tampereen teknillisen yliopiston teknisten tieteiden laitoksen tribologian ja tehonsiirron tutkimusryhmän säteisliukulaakerikoelaitteelle muutoksia, joilla voidaan selvittää reunakuormitetun laakerin kitka- ja vauriokäyttäytymistä. Vaatimukset muutoksille määritettiin yhteistyöyrityksen asiantuntijoiden kanssa.

5.1 Säteisliukulaakerikoelaite

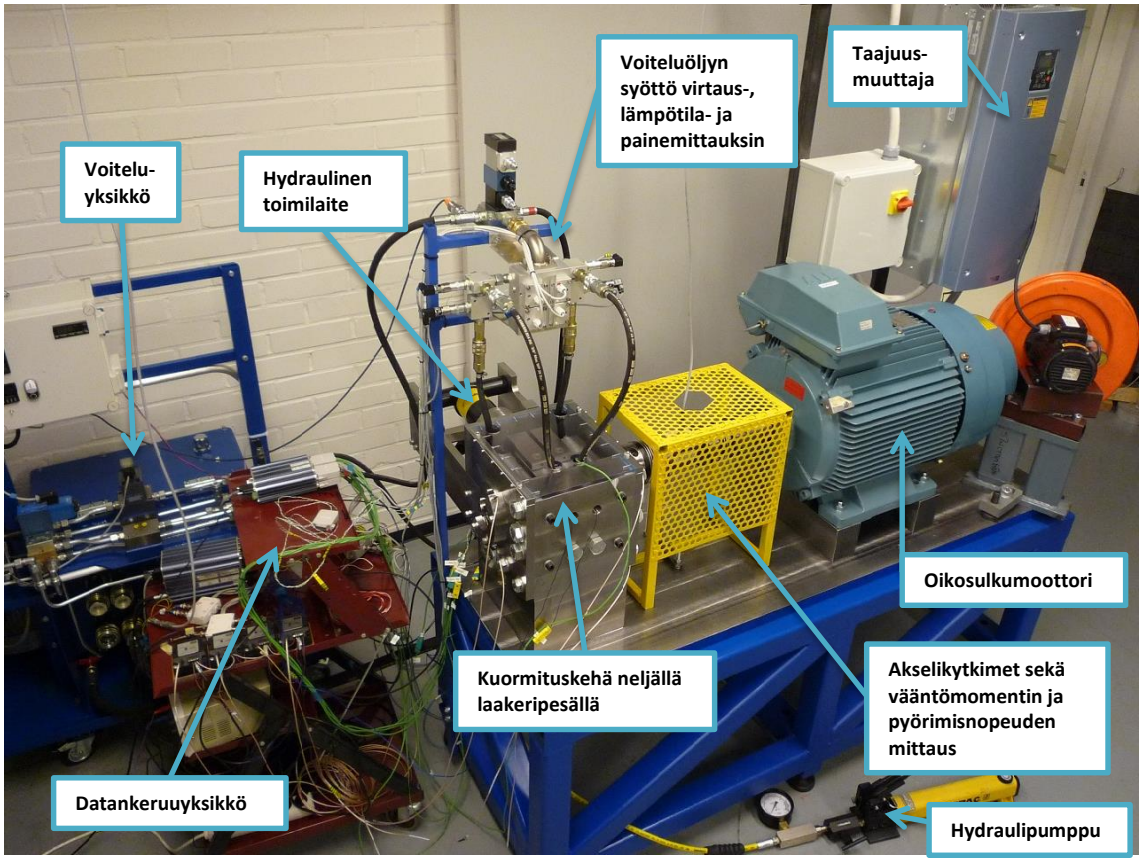
Ennen tämän työn aloittamista on Tampereen teknillisen yliopiston teknisten tieteiden laitokselle kehitetty säteisliukulaakerikoelaite osana Ecobearings projektia. Projektin tavoitteena oli löytää lyijypitoisille laakerimateriaaleille ympäristöystävällinen korvaava vaihtoehto. Suoritettujen koeajojen kautta arvioitiin lyijyn vaikutusta kitkaan.

Säteisliukulaakerikoelaitteessa testataan yhtä aikaa neljää samanlaista liukulaakeria, joilla on yhteinen akseli. Laakereihin kohdistuva säteiskuormitus tuotetaan hydraulisella toimilaitteella neljästä laakerista kahteen keskimmäiseen, jolloin kaksi reunimmaista laakeria kokevat vastaavansuuruisen reaktiovoiman laakereiden symmetrisestä sijoittelusta johtuen. Kuvassa 5-1 esitetään säteisliukulaakerikoelaitteessa vaikuttavat kuormituskomponentit ja kuvassa 5-2 on säteisliukulaakerikoelaite ennen reunakuormitusta varten tehtyjä koelaitemuutoksia. (Sandvik, et al., 2012)



Kuva 5-1 *Säteisliukulaakerikoelaitteen kuormitusjärjestelyssä vaikuttavat voimakomponentit (Sandvik, et al., 2012).*

Kuvassa 5-1 F (punaisella) on laakeriin kohdistunut säteiskuormitus, F_b (vihreällä) on laakerin voitelukitkavoima ja M akselin pyöritysmomentti sekä ω kulmanopeus.



Kuva 5-2 *Säteisliukulaakerikoelaite (Sandvik, 2010).*

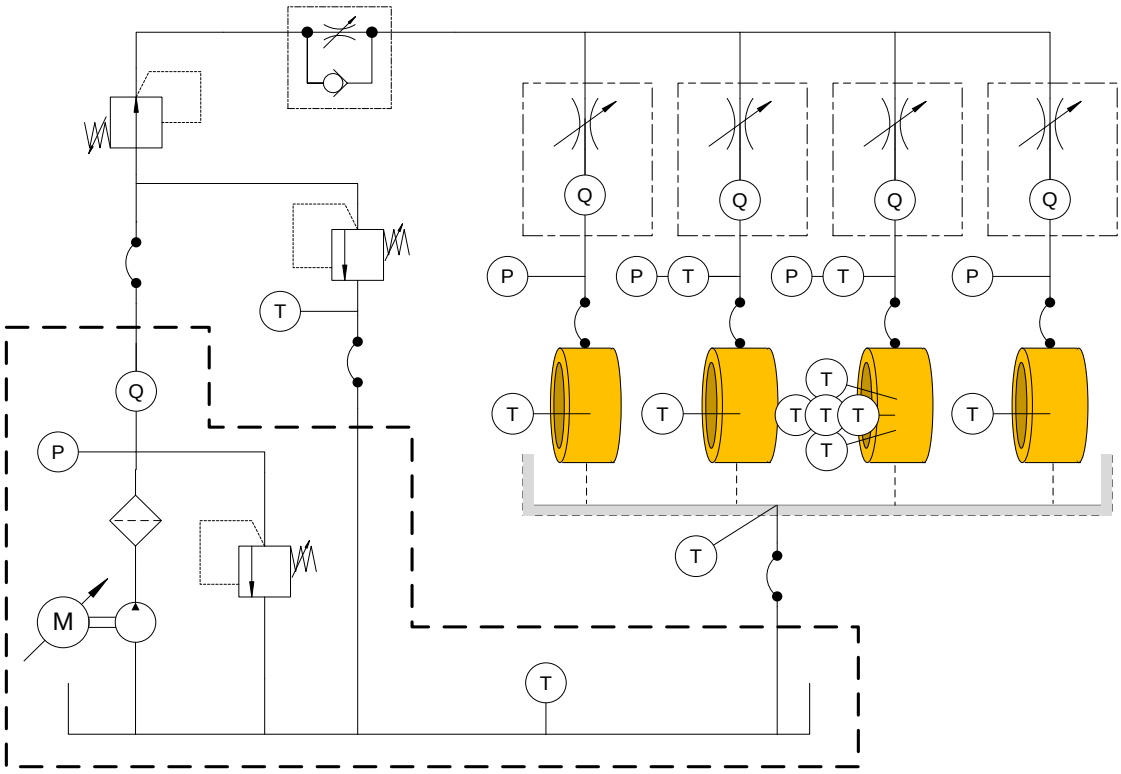
Koelaitteessa hydraulitoimilaitteella tuotetaan laakerien säteiskuormitus, jossa hydraulisylinteriä käytetään käsikäyttöisellä pumpulla. Sylinterin yhteyteen on kytketty kaksi voima-anturia mittaamaan asetettu säteiskuormitus, joka kohdistuu kahteen keskimmäisiin laakeripesiin. Laakerien yhteistä laakerikitkaa mitataan pyöritysmomenttianturilla. Testattavaa akselia käytetään oikosulkumoottorilla, jonka pyöritysnopeutta voidaan säätää taajuusmuuttajalla. Testiakseli ja oikosulkumoottori kytkeytyvät toisiinsa kahdella joustokytkimellä, jotka kytkeytyvät toisiinsa momenttianturilla. Momenttianturin yhteydessä on akselin pyörimisnopeusanturi. Kaikkien laakerien käyttölämpötilaa mitataan laakeriholkin taustapuolelta laakeripesään asennetuilla termopariantureilla. Mittausjärjestelmä pohjautuu IMC Meßsysteme GmbH valmistamiin datankeruuyksiköihin.

Säteisliukulaakerikoelaitteen keskeisen mittaustuloksen kitkakertoimen μ laskenta ilman reunakuormitusta esitetään kaavassa 5-1.

$$\mu = \frac{M}{2dF} \tag{5-1}$$

Kaavassa 5-1 M on mitattu pyöritysmomentti, d koeakselin ulkohalkaisija ja F asetettu säteiskuormitus laakeria kohden, joka mitataan hydraulisen toimilaitteen yhteyteen asennetuilla kahdella voima-anturilla.

Voiteluaineyksiköllä syötetään koelaakereille öljyä säädettävällä tilavuusvirralla ja lämpötilalla. Voiteluainesyöttöpiiri sisältää ohikierron voiteluainesyötön lämpötilan säädettävyyden parantamiseksi. Kuvassa 5-3 esitetään koelaitteen kiertovoitelujärjestelmä ja käytetyt mittauspisteet voiteluainesyöttöpaineen P, tilavuusvirtauksen Q ja lämpötilan T mittaukseen.



Kuva 5-3 *Säteisliukulaakerikoelaitteen kiertovoitelujärjestelmä ja syöttöpaineen P, lämpötilan T ja tilavuusvirtauksien Q mittauspisteet (Sandvik, et al., 2012).*

5.2 Koelaitemuutokset

5.2.1 Laakerin reunakuormitus

Reunakuormituksella tarkoitetaan säteiskuormituksen jakautumista liukulaakerin pituussuunnassa eli aksiaalissuunnassa epäkeskisesti. Laakeriin kohdistuneesta epäkeskisestä kuormituksesta seuraa laakeria kiertävä momentti. Kiertoliikkeen estämiseksi laakeripinta tukeutuu käyttävään akseliin. Pyöritettäessä akselia hydrodynaamisen voiteluperiaatteen mukaisesti syntyy epäsymmetrinen painejakautuma laakerin pituussuunnassa. Laakeria kallistava epäkeskinen resultanttivoima vaati tuennan voiman ja vastavoiman periaatteen mukaisesti.

5.2.1.1 Vaatimukset

Koelaitteella on pystyttävä selvittämään reunakuormituksen vaikutuksen testilaakerien kitka- ja vauriokäyttäytymiseen. Kun vaaditaan laakerin kitka- ja vauriokäyttäytymisen

selvittämistä kokeellisesti, on koelaitteella voitava mitata kyseisiin ilmiöihin vaikuttavia perussuureita kuten laakeroidun akselin pyöritysmomenttia, laakereihin kohdistuvaa säteiskuormitusta ja voideltujen laakerien voitelukalvon ominaisuuksia muun muassa laakerilämpötilan kautta.

Koska alkuperäinen koelaite sisältää neljä itsestään linjaavaa laakeripesää reunakuormituksen minimoimiseksi testilaakereilta, vaaditaan koelaitteelta rakenteellinen muutos reunakuormituksen tuottamiseen erillisellä toimilaitteella. Reunakuormituksen salliva rakenne tulee hyödyntää käytössä ollutta säteiskuormituskoelaitetta pääkomponenteiltaan, joita ovat koelaiterunko, hydraulitoimilaite, käyttävä oikosulkumoottori ja sen taajuusmuuttaja sekä voiteluaineyksikkö ja pyöritysmomenttianturi. Testilaakerit ja akselit ovat päämitoiltaan samat kuin aikaisemmin käytetyt.

5.2.1.2 Ratkaisuun päätyminen

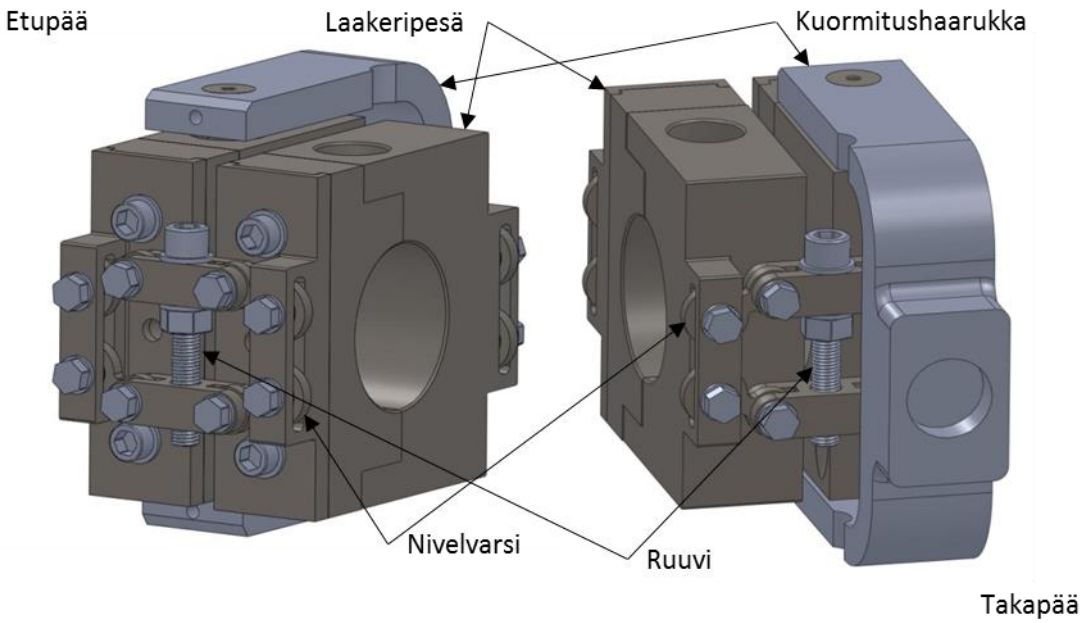
Tässä työssä toteutetussa koelaitemuutoksissa käytettiin hyviä koneensuunnittelun periaatteita. Systemaattisen koneensuunnittelun askelein haettiin vaihtoehtoisia ratkaisutapoja reunakuormitusmomentin tuottamiseksi laakeripesiin, joiden paremmuutta toisiinsa nähden arvioitiin vaatimusten ja toiveiden toteutumisen pohjalta. Merkittävä ohjaus valittuun ratkaisuun tuli tilankäytöstä, kun vaatimuksena oli sisällyttää reunakuormitusvoiman tuottama rakenne koelaitteen rungon määräämään tilaan. Tilantarve, rakenteellinen yksinkertaisuus ja modifikaation valmistettavuus olivat valitun ratkaisun merkittävimmät edut. Kun havaittiin valitun reunakuormituksen tuottavan ratkaisun soveltuvan pieneen tilaan, voitiin toteuttaa toiveena olleita voitelukalvon ominaisuuksia määrittäviä mittauksia, joita olivat laakerikallistuman ja hydrodynaamisen painejakautuman mittaus.

Valittu ratkaisu tuottaa reunakuormitusmomentin neljästä laakerista kahteen keskimmäiseen, jolloin reunakuormituksen vaikutukset kitkakertoimeen ratkaistaan suhteellisena käyttäytymisenä. Suhteellisten tulosten tulkinta reunakuormituksen osuudesta onnistui laakeriparametrin määrittämisen kautta hyvin. Selvä haaste valitussa ratkaisussa on reunakuormitusmomentin mittaaminen.

Suunnittelun tuloksena reunakuormituksen toteuttavan rakenteen koneistettavien osien lukumäärä jäi alhaiseksi ja osien työstön toteuttamiseen riitti kolmiakselinen työstökonekeskus. Ensimmäisessä erässä tilatut koelaitteen osat sisälsivät reunakuormituksen tuottamiseen soveltuvat laakeripesät ja tunkkirakenteen. Näiden osien toimitusaika oli suhteellisen lyhyt. Ylimääräiseen laakeripesään koneistettiin paineanturipesät ja kanavoinnit viisiakselisella työstökonekeskuksella. Paineanturilaakeripesän koneistus kesti odotettua huomattavasti pidempään työstökoneen käyttöön liittyvän opetustarkoituksen vuoksi.

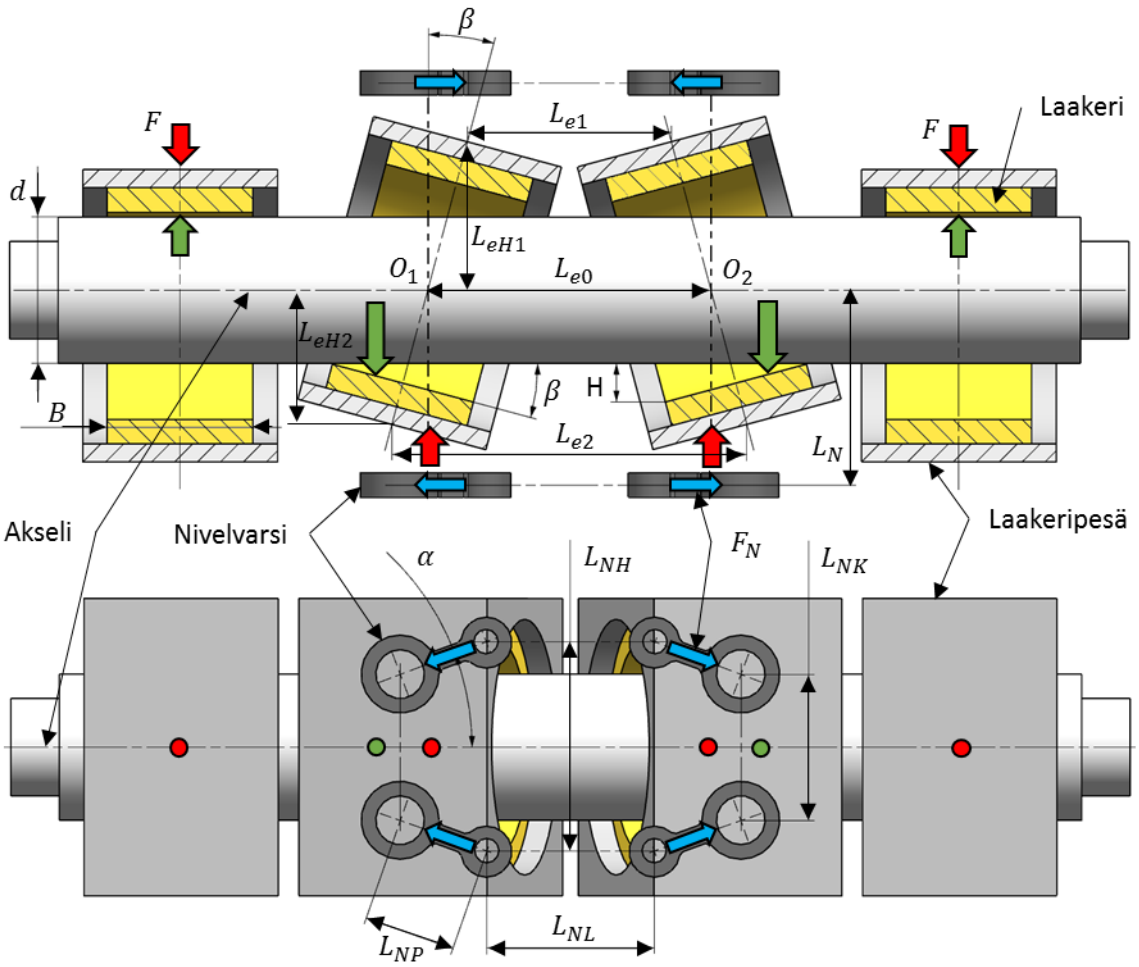
5.2.1.3 Tunkkirakenne

Laakerien reunakuormituksen mahdollistavat rakennemuutokset toteutettiin neljästä säteisliukulaakerikoelaitteen laakeripesästä kahteen keskimmäiseen. Reunakuormituksen vaikutus laakerikitkaan laskettaisiin verrannollisesti nolla-tilanteen kitkaan. Reunakuormituksen tuottamiseen tarvittava momentti asetetaan tunkkirakenteella, joka muodostaa symmetrisen kuormituskehän kahden keskimmäisen laakeripesän välille. Kuvassa 5-4 esitetään 3D-havainne toteutetusta tunkkirakenteesta kahdessa keskimmäisessä laakeripesässä.



Kuva 5-4 *Tunkkirakenne kahden laakeripesän välillä.*

Tunkkirakenne on samanlainen koelaitteen kahden keskimmäisen laakeripesän etu- ja takapäässä sekä laakeripesien aksiaalisuunnassa. Ruuveja kiertämällä saadaan laakeripesien päädyt lähentymään tai loitontumaan toisiinsa nähden aksiaalisuunnassa. Kuvassa 5-5 esitetään periaatteellisesti koelaitteen neljä laakeripesää, joista kaksi keskimmäistä on tunkkirakenteella kallistettu reunakuormitukselle. Reunakuormitusta tuotettaessa ruuveja kierretään vastakkaisiin suuntiin toisiinsa nähden, jolloin laakeripesät kallistuvat kuvan 5-5 pisteiden O_1 ja O_2 ympäri.



Kuva 5-5 *Akselin, laakerien ja tunkkirakenteen nivelvarsien suhteellinen sijainti reunakuormituksella.*

5.2.1.4 Reunakuormituksen mittaus

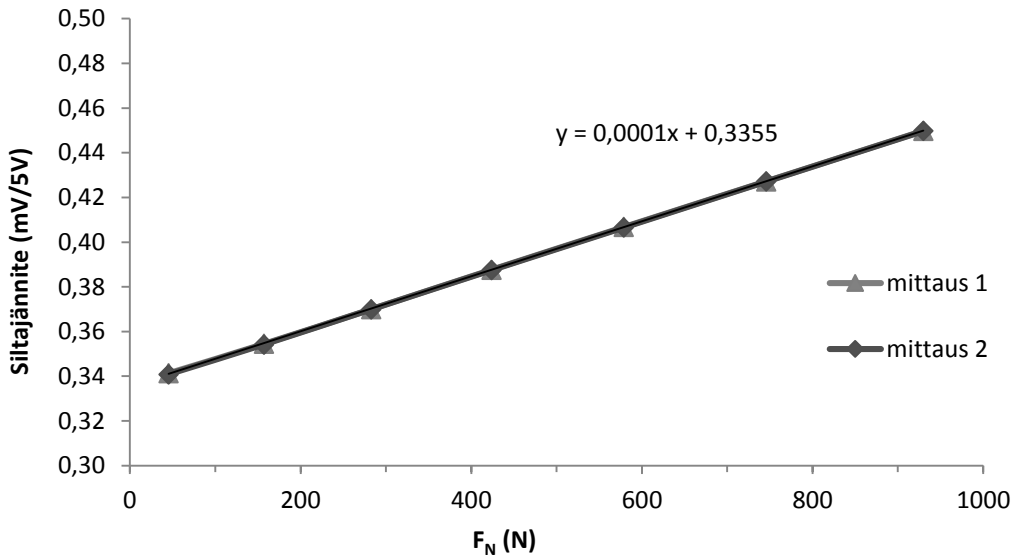
Säteiskuormituksen (kuvassa 5-5 punainen nuoli) painaessa kallistuneita laakereita syntyy laakeripesää oikaiseva voima laakeripinnalle (vihreä voima) epäkeskisesti laakerin pituussuunnassa ja samalla tunkkirakenteen nivelvarsiin kohdistuu reaktiovoima (sininen nuoli). Nivelvarsissa vaikuttavan voiman F_N mittauksella voidaan määrittää reunakuormitusmomentti M_R kaavalla 5-2.

$$M_R = 2 * 2F_N L_N \cos(\alpha) \tag{5-2}$$

Kaavassa 5-2 F_N on mitattu nivelvarren normaalikuormitus, L_N on nivelvarsien etäisyys akselilinjasta eli momenttivarsi, ja kulma α on nivelvarren asetuskulma 20°, jonka suuruus muuttuu ruuvikierrettä kierrettäessä. Kulma α muuttuu kallistuskulmaan β verrannollisena. Nivelvarren kulmamuutoksen suuruus on tyypillisesti muutaman asteen luokkaa koeajoissa käytetyillä reunakuormituksen arvoilla. Kaavan 5-2 reunakuormitusmomentti ilmoitetaan suhteellisena reunakuormituksena laakerin maksimimomenttiin $(F * B/2)$. Kaavassa 5-3 esitetään suhteellisen reunakuormituksen laskenta.

$$M_{R_suht} = 2M_R/(F * B) \tag{5-3}$$

Reunakuormitusta mitataan käyttämällä venymäliuskoja asennettuina tunkkirakenteen nivelvarsiin. Kun käytetään venymäliuskoja voiman mittaamiseen, on nivelvarsiin kohdistuva kuormitus kalibroitava erikseen tunnetun voiman kohdistuessa nivelvarteen. Nivelvarren venymäliuskan kalibrointimittaus toteutettiin kannattelemalla punnuksia nivelvarrella. Kannatuskuormituksesta saadaan venymäliuskamittauksen näyttämä normaalivoimaksi. Havaittiin näyttämän toistettavuuden ja lineaarisuuden olevan linjassaan 0-1 kN kuormitusalueella, jollaiseksi kuormitus nivelvarressa arvioidaan yltävän reunakuormituskoeajoissa. Kun kalibroidaan nivelvarsi vetokuormitukselle, voidaan reunakuormituskoeajojärjestelyssä mitata laakeripäätyä, joka kokee vetokuormituksen. Koejärjestelyssä oletetaan nivelvarsien kuormituksen olevan vastakkaissuuntainen puristuspuolen päädyssä. Kuvassa 5-6 esitetään venymäliuskamittauksen kalibrointitulos punnuksia käyttäen. Kalibroinnin aikana ympäristön lämpötila oli 21,5 °C. Venymäliuskamittauksen kalibroinnin mittaustulos osoittaa hyvää lineaarisuutta ja mittauksen toistettavuutta.



Kuva 5-6 *Reunakuormituksen toteuttavan vetokuormitetun nivelvarren venymäliuskan näyttämä kalibrointimittauksessa 24.3.2012.*

5.2.1.5 Laakerikallistuman mittaus

Reunakuormitettujen laakeripesien kallistuma H laakerin reunalla akselin pintaan mitataan siirtymämittauksilla. Kahdella pyörrevirta-anturilla mitataan tunkkirakenteen kallistamien laakeripesien etu- ja takapäiden välistä etäisyyttä L_e. Kuvan 5-5 laakeriholkkien kallistumakulma β ja laakereiden kallistuma H laakerin reunalla saadaan kaavalla 5-4.

$$H_i = B * \tan(\beta_i) \quad , \quad jossa \quad \beta_i = \operatorname{atan}\left(\left|\frac{L_{ei}-L_{e0}}{L_{eHi}}\right|\right). \tag{5-4}$$

Kallistuma H voidaan laskea molemmille laakeripesän päädyn siirtymämittaukselle erikseen. Koeajon aikana kallistuma molemmissa laakeripesäpäätyjen siirtymämittauksista asetetaan ruuveja käyttämällä samoiksi, jolloin laakeripesät kiertyvät kuvassa 5-5 esitettyjen pisteiden O_1 ja O_2 ympäri. Akselin suuntaisia kuormituksia ei tällöin esiinny.

5.2.1.6 Kitkakertoimen määritys reunakuormituksella

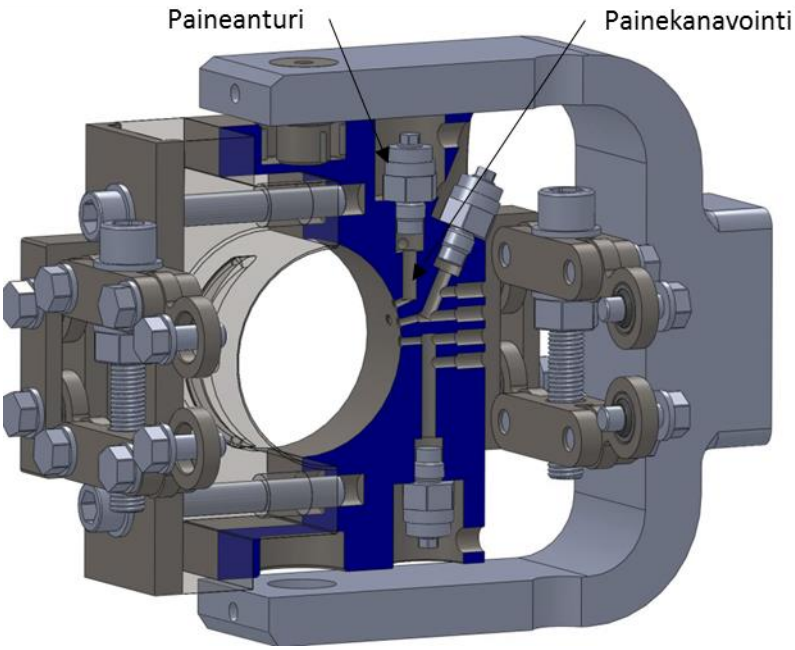
Reunakuormituksen vaikutus mitattuun kitkakertoimeen täytyy huomioida suhteellisena vaikutuksena koejärjestelyssä, jossa kahteen keskimmäiseen laakeriin neljästä laakerista kohdistuu reunakuormitus. Muokatun kitkakertoimen μ_{mod} määritys sisältää reunakuormitusmittauksen kitkakertoimen μ ja samoissa olosuhteissa, mutta ilman reunakuormitusta mitatun kitkakertoimen μ_0 välisen erotuksen. Ennen erotuksen laskentaa on μ_0 kerrottava vastaavien laakeriparametrien välisellä suhteellisella muutoksella, kun oletetaan kitkakertoimen muuttuvan suoraan verrannollisena laakeriparametriin nähden. μ_{mod} on reunakuormitustilanteen mitattu kitkakerroin μ summattuna muokatulla erotuksella kaavan 5-5 mukaan. Kaavassa μ_0 ja μ_{Stri_0} ovat ilman reunakuormitusta sekä μ ja μ_{Stri} ovat reunakuormituksella mitattuja arvoja.

$$\mu_{mod} = \mu + \left(\mu - \mu_0 {}^{\mu_{Stri}}/_{\mu_{Stri_0}}\right) \tag{5-5}$$

Muokatun kitkakertoimen μ_{mod} laskennassa huomioidaan laakeriparametrin suhdeluvulla μ_{Stri} / μ_{Stri_0} laakerien mitatun keskimääräisen käyttölämpötilan muutos sekä säteiskuormituksen ja liukunopeuden pienet vaihtelut asetusarvoistaan.

5.2.2 Laakerin hydrodynaaminen painejakautuma

Mittausjärjestely hydrodynaamisen painejakautuman määrittämiseksi toteutettiin laakeripesällä, joka vaihdettiin toisen kahden keskimmäisen tunkkirakenteella kytketyn laakeripesän tilalle. Paineanturilaakeripesässä on viisi kiinteää mittauspistettä hydrodynaamisen voitelupainejakautuman määrittämiseksi. Kuvassa 5-7 esitetään halkileikattuna 3D-havainne paineanturoidusta laakeripesästä.



Kuva 5-7 *Lakeripesään koneistetut paineanturipesät ja painekanavat.*

Painejakautumamittauksessa käytetään laakeripesää, johon on viidelle paineanturille porattuna anturipesät sekä kanavoinnit kuorman kantavalla hydrodynaamisella painealueella. Laakeripesän kanssa käytetään laakeriholkkia, johon on porattu viisi halkaisijaltaan 1 mm painekanavaa, jotka kohtaavat laakeripesän kanavointien kanssa. Kiinteät mittauspisteet ovat laakerin keskilinjalla φ kulmassa 180, 190 ja 200 astetta ja 190 asteen kulmassa keskilinjalta laakerin pituussuunnassa ±7,5 mm.

Paineantureiden sijoittelu päätettiin laskennan tuottamien hydrodynaamisten painejakautumamuotojen perusteella. Taulukossa 5-1 esitetään laskennan tuloksia painemaksimin sijainnista, missä p_{max} on maksimi hydrodynaaminen paine ja φ_{p_max} on painemaksimin sijainti. Laskennan tulokset osoittavat projektiopaineilla P_{proj} 2-11 MPa ja liukunopeuden u 2-8 m/s arvoilla painehuipun maksimin sijoittuvan laakerin keskilinjalle kulmaan φ noin 190 astetta.

Taulukko 5-1 *Laskennan tuloksia hydrodynaamisen painemaksimin sijainnista.*

P_{proj} [MPa]	u [m/s]	p_{max} [MPa]	φ_{p_max} [°]
1,7	2,5	5,50	194,6
1,7	3,9	5,20	194,1
5,6	2,4	23,70	193,5
5,7	4,7	21,80	191,4
11,1	1,6	72,30	188,2
11,1	6,3	54,0	189,3

Paineantureina käytetään Kulite HEM-375M-1000PSI, joiden maksimipainemittaus yltää 70 MPa absoluuttista nesteen tai kaasun painetta. Paineanturin lineaarisuus on tyypillisesti ±0,1 % ja toistettavuus ±0,5 % maksimista. Paineanturi kestää ylikuormitusta kaksi kertaa maksiminsa. Anturin käyttölämpötila on -55 °C - +232 °C ja kompensoitu käyttölämpötila +25 - +232 °C. Lämpötila vaikuttaa tyypillisesti lukemaan sallitusta maksimipaineesta ±1 % / 37 °C.

5.3 Koejärjestelyt

5.3.1 Laskenta- ja asetusarvot

Koejärjestelyissä käytetyn voiteluaineen ominaisuudet ja tulosten laskennassa käytetyt parametrit kaavoille 2-5 ja 3-2 esitetään liitteessä C. Taulukossa 5-2 esitetään voiteluainemäärä Q testilaakereille ja testikohtaisesti ajetuille liukunopeuksille.

Taulukko 5-2 *Voiteluainemäärät koelaakerien ja liukunopeuden mukaan laakeria kohden*

u $[m/s]$	Q [ml/min]	
R2012_01-03		
2	400	Reunakuormitusajot
5	600	Voiteluhäiriöajot
R2012_04		
2-8	400	Kitka- ja reunakuormitusajot
T03		
5	< 250	Voitelumäärän vähennys

Koehuoneen lämpötila oli koekappaleiden R2012_01-03 ja R2012_04 kitka-ajon yhteydessä 23-25 ℃ ja R2012_04 koekappaleilla seuraavana päivänä suoritetun reunakuormitusajon yhteydessä 26-28 ℃. Koelaitetta lämmitettiin vuorokauden ajan kiertovoitelu päällä koeajon vaatiman voitelumääräasetuksen mukaan. IMC mittauslaitteet olivat päälle kytkettyinä vuorokauden ajan ennen koeajojen aloittamista.

5.3.2 Koekappaleet

Säteisliukulaakerikoelaitteistolla testataan yhtä aikaa neljää laakeriholkkia ja yhtä yhteistä akselia. Akselin ulkohalkaisija d on 60 mm ja akseliaihio on lämpökäsitelty 34CrNiMo6 (EN 10027-1) ulkohalkaisijaltaan 70 mm pyörötanko. Akseliaihion pintakovuus on 300 HB (Ovako). Liukulaakerin valmistuksessa käytettiin aihiona pyörötankoa JM-5 CuSn10Pb10 (Johnson Metall), jossa lyijypitoisuus on 10 %. Laakeripituus B on 30 mm. Koelaakerien ja -akselien toiminnalliset mitat sekä pinnankarheudet esitetään liitteessä D.

Tunnisteella R2012_01-03 on kolme laakerierää ja niiden akselit. Näillä suoritettiin kasvavalla reunakuormituksella laakerikitkamittaukset käyttäen vakio projektiopainetta ja liukunopeutta. Ajot toistettiin sisäänajautuneen laakerikitkan mittaamiseksi. Ajon jälkeen laakereilla suoritettiin voiteluhäiriöajot katkaisemalla jaksoittain voiteluainesyöttö laakereille. Voiteluhäiriöajoissa käytettiin nolla reunakuormituksella R2012_01 koekappaleilta, 40 % suhteellisella reunakuormituksella R2012_02 koekappaleita ja 60 % suhteellisella reunakuormituksella R2013_03 koekappaleita.

Tunnisteen R2012_04 laakereilla ajettiin laakerikitkamittaus eri projektiopaineen ja liukunopeuden arvoilla ilman reunakuormitusta. Tämän jälkeen koekappaleilla ajettiin eri projektiopaineilla reunakuormitustilanteita vakio liukunopeudella. Näistä kahdesta koeajosta mitattiin hydrodynaamista voitelupainetta. Hydrodynaamisessa painejakautumamittauksessa on laakerin 11R09 painealueelle porattu 1 mm painekanavat.

T03 laakerit ja akseli olivat käytössä voitelumäärän vähennysajossa, jossa mitattiin voiteluainetilavuusvirtauksen kuristamisen vaikutusta laakerikitkaan.

5.3.3 Käyttölämpötilamittaukset

Kaikissa koeajoissa laakerien käyttölämpötiloja mitattiin kahden reunimmaisen laakerin taustalta keskilinjalta pyörimissuuntaan φ 200 astetta. Keskimmäisissä kahdessa laakeripesässä mittauspisteet vaihtelivat. Koeajoissa, joissa käytettiin laakereita tunnisteella R2012_01-03, laakerin kaksi keskilinjalta mitattiin kohdalta 190 astetta ja laakerista kolme keskilinjalta 160, 180, 200 astetta ja 180 asteen kohdalla keskilinjalta sivusta ±7,5 mm. Koeajoissa, joissa käytettiin laakereita R2012_04, vastaavasti laakerista kaksi mitattiin keskilinjalta 190 astetta laakeripesään poratusta painekanavasta ja laakerista kolme mitattiin keskilinjalta 190 astetta ja keskilinjalta sivusta ±7,5 mm.

6 MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Laakerikitkakertoimen arvoa mitattiin vaihdellen säteiskuormituksen ja liukunopeuden arvoja. Reunakuormitusajoissa eri reunakuormitusmomentin arvoilla mitattiin laakerikitkaa ja toistettaessa reunakuormitusajoja mitattiin sisäänajautumisen vaikutusta kitkaan. Hydrodynaamista painejakautumaa mitattiin ilman reunakuormitusta ja reunakuormituksella. Laakerin vaurioitumista testattiin voiteluhäiriökoeajoissa, joissa voitelu laakereille katkaistiin jaksoittain testilaakerin kiinnileikkaantumiseen asti. Voiteluainemäärän vaikutusta laakerikitkaan testattiin.

6.1 Kitka-ajot

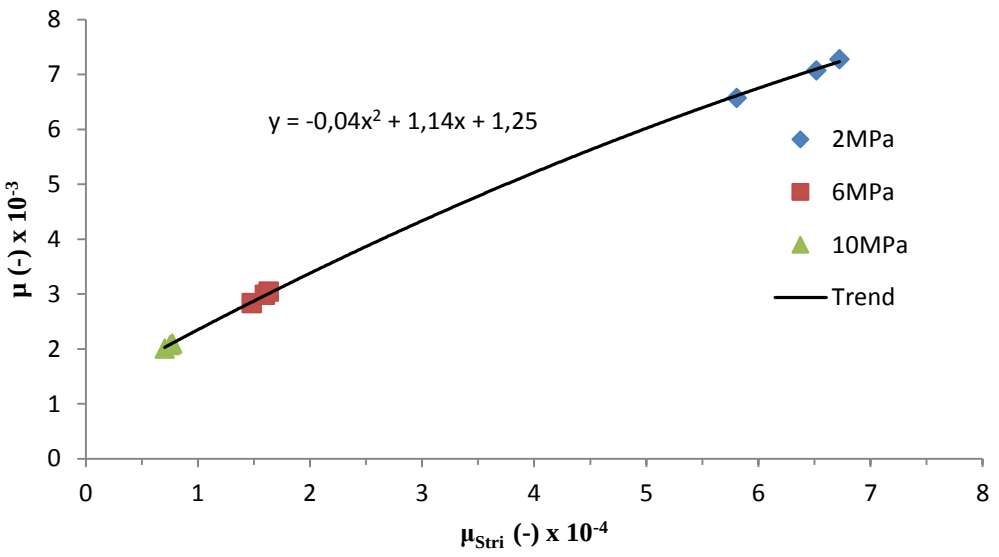
6.1.1 Kitka ilman reunakuormitusta

Kitka-ajot aloitettiin kuormittamalla laakereita R2012_04 eri säteiskuormituksella kutakin kolmella eri liukunopeuden arvolla pienimmästä kuormitusarvosta suurimpaan. Projektiopaine P_{proj} oli 2, 6 ja 10 MPa sekä kullakin projektiopaineella ajettiin liukunopeudella u 4, 6 ja 8 m/s. Reunakuormitusta ei ollut. Kunkin mittauspisteen asetusarvoilla ajettiin vähintään puolituntia lämpötilan ja kitkan stabiloitumiseksi verran ennen laakeriparametrin määrittämistä. Taulukossa 6-1 esitetään mittaustulokset μ_{Stri} -laakeriparametri laskentaa varten. Mitattu kitkakerroin on μ ja T on keskiarvo laakerien mitatuista käyttölämpötiloista. Kitkakertoimen mittaustulos on liukuvan keskiarvon suodattama siten, että kitkakerroin tulee määritetyksi useamman akselin täyden pyörähdyksen ajalta kussakin mittapisteessä.

Taulukko 6-1 *Kitka-ajon kuormitusparametrit, mitattu laakerien käyttölämpötila, laskennallinen laakeriparametri ja mitattu kitkakerroin.*

P_{proj} [MPa]	u [m/s]	T [℃]	μ_{Stri} [10^{-4}]	μ [10^{-3}]
2,078	4,002	58,045	5,807	6,574
2,043	5,998	65,145	6,518	7,081
2,042	7,994	71,633	6,723	7,282
5,995	4,002	65,180	1,480	2,840
6,033	5,997	73,418	1,596	2,992
5,999	7,993	81,029	1,631	3,049
10,040	4,002	70,923	0,703	2,008
10,114	5,997	79,980	0,753	2,073
10,036	7,993	88,147	0,772	2,105

Taulukoissa ilmoitetut lukuarvot on annettu useamman desimaalin tarkkuudella, kuin on ollut käytetty mittaustarkkuus. Kuvassa 6-1 esitetään mitattujen yhdeksän mittauspisteen kitkakertoimet μ_{Stri} laakeriparametrin mukaan.



Kuva 6-1 *Kitkakerroin ilman reunakuormitusta.*

Valittu yhdeksän pisteen mittausmatriisi tuottaa erisuuruisia laakeriparametrin arvoja kolmessa säteiskuormituksen painottamissa ryhmissä, koska laakerilämpötilan muuttuminen liukunopeuden muuttuessa saa parametrin arvon pysymään mittauspisteen stabiloitumisajan jälkeen lähes samassa lukuarvossaan. Kuitenkin kolme pisteryhmittymää asettuvat Stribeck-käyrän mukaisesti täyden voitelukalvon alueelle. Arvioidaan sovitetun trendikäyrän mukaisesti laakerikitkakertoimen arvo eri laakerin

toimintatiloissa esitettyjen laakeriparametrien arvojen välillä kun reunakuormitusta ei esiinny. Laakeriparametrin kasvaessa kitkakerroin kasvaa ja alhaisin mitattu kitkakerroin saadaan suurella 10 MPa säteiskuormituksella.

6.1.2 Kitka reunakuormituksella

Reunakuormitusajo laakeriparametria muutettaessa suoritetaan kitka-ajon jälkeen samoilla testilaakereilla ja akselilla, jotka ovat tunnuksella R2012_04. Laakerien sisäänajautuminen reunakuormitukselle suoritetaan kolmen laakerierän mittaussarjana laakeritunnuksilla R2012_01-03, joita kutakin seuraa voiteluhäiriöajo.

6.1.2.1 Reunakuormitustilanteen kitkakerroin

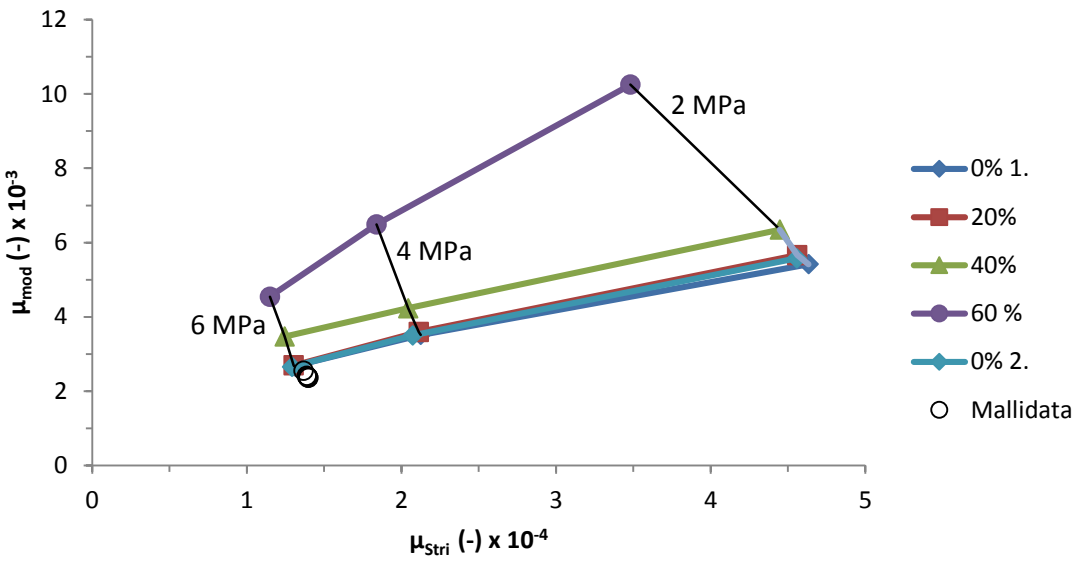
Laakeriparametrin ja reunakuormituksen yhteisvaikutusta kitkakertoimeen mitattiin 12 kuormituspisteessä, joissa 2, 4 ja 6 MPa projektiopaineilla kullakin ajettiin 0, 20, 40 ja 60 % suhteellinen reunakuormitusmomentti M_{R_suht} kuhunkin säteiskuormitukseen nähden. Liukunopeus u asetettiin vakioksi 2 m/s kussakin mittauspisteessä. Taulukossa 6-2 esitetään reunakuormituskoeajossa mitattujen 12 reunakuormitustilanteiden reunakuormitusmomentti, mitattu kitkakerroin, käyttölämpötila sekä laskettu laakeriparametri ja muokattu reunakuormitustilanteen kitkakerroin μ_{mod}.

Taulukko 6-2 *Kitkakerroin reunakuormituksella, u=2 m/s.*

P_{proj} [MPa]	M_R [Nm]	T [°C]	μ_{Stri} [10^{-4}]	μ [10^{-3}]	μ_{mod} [10^{-3}]	H [µm]
2,030	-0,860	48,786	4,633	5,4837	5,4837	0,048
2,040	12,015	48,998	4,560	5,5764	5,6642	29,876
2,048	24,365	49,420	4,446	5,8702	6,3883	40,977
2,071	34,160	54,180	3,481	7,4153	10,6400	56,736
2,014	-6,087	49,259	4,558	5,5316	5,5316	0,505
4,007	-0,166	50,763	2,125	3,4731	3,4731	0,044
4,006	20,803	50,877	2,113	3,5093	3,5647	18,618
4,011	44,683	51,533	2,043	3,7975	4,2554	33,299
4,025	65,196	53,627	1,840	4,8416	6,6761	50,327
4,026	-2,556	51,170	2,072	3,4446	3,4446	0,942
6,005	-0,796	52,427	1,306	2,7075	2,7075	0,029
5,997	33,689	52,502	1,303	2,7161	2,7221	15,677
5,998	67,369	53,453	1,245	3,0805	3,5729	30,736
6,009	100,082	55,092	1,149	3,5761	4,7620	44,934
5,997	1,688	52,678	1,292	2,6925	2,6925	1,127

Taulukossa 6-2 μ_{mod} on muokattu kitkakerroin, M_R mitattu reunakuormitusmomentti ja H mitattu laakerikallistuma.

Kuvassa 6-2 esitetään muokattu laakerikitkakerroin laakeriparametrin mukaan. Kuvassa käyrät ovat reunakuormitusmomentin mukaan suhteellisena. Tällöin samalle laakeriparametrin arvolle saadaan eri reunamomentin arvoja. Kuvassa mustat viivat esittävät asetettuja projektiopaineita niitä vastaavissa laakeriparametrin pisteissä.



Kuva 6-2 *Suhteellisen reunakuormituksen vaikutus kitkakertoimeen.*

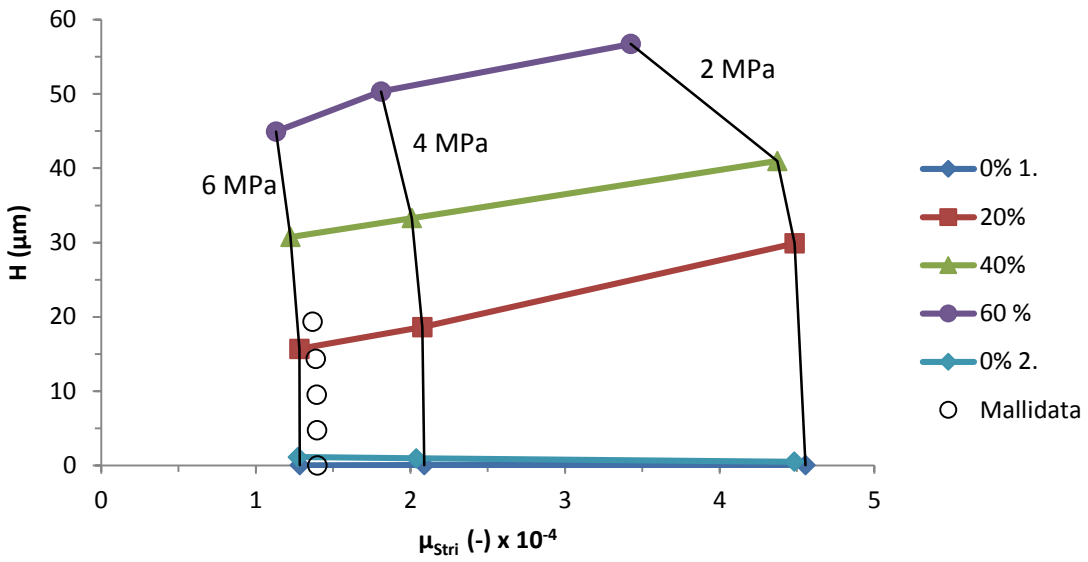
Alle 20 % suhteellisella reunakuormituksella kitkakerroin ei muutu merkittävästi. 60 % reunakuormituksella kitkakerroin kohoaa selvästi, jolloin laakerin reuna-alue on raja- ja sekavoitelutilanteessa ja laakeri kuluu.

Laskennallinen reunakuormituksen vaikutus kitkakertoimeen esitetään kuvassa 6-2 mustin ympyröin alueelta 0-51 % suhteellista reunakuormitusta. Laskennan tuloksena saatu kitkakerroin keskittyy pienelle alueelle ja saa keskimääräiseksi arvoksi 2,42 x 10^{-3} kun μ_{Stri} parametri on 1,389 x 10^{-4}.

Laskennan tulokset vastaavat mitattua kitkakertoimen ja reunakuormituksen suhdetta 20 % suhteelliseen reunakuormitukseen saakka. Lasketun ja mitatun 40 % ja 60 % suhteellisella reunakuormituksella selviä eroavaisuuksia selittää siirtyminen raja- ja sekavoitelutilanteeseen ja laakerin kuluminen reuna-alueella, mitä laskenta ei ota huomioon.

6.1.2.2 Laakerikallistuma reunakuormituksella

Voitelukalvon paksuuden muutosta reunakuormituksella arvioidaan mitatusta laakeripesien kallistumasta. Kuvassa 6-3 esitetään taulukon 6-2 laakerikallistuma laakeriparametrin mukaan ja piirretyt käyrät edustavat suhteellisia reunakuormituksen arvoja. Kuvassa mustat viivat esittävät asetettuja projektiopaineen arvoja koeajon mittauspisteissä.



Kuva 6-3 *Reunakuormituksen vaikutus laakerikallistumaan.*

Mitattu laakerikallistuma on verrannollinen suhteelliseen reunakuormitukseen. Mitattu kallistuma on alle koekappaleiden keskimääräisen laakerivälyksen, jolloin laakeri koskettaa mitatuissa reunakuormitustilanteissa laakerin reunakuormitetulta kyljeltä akselia.

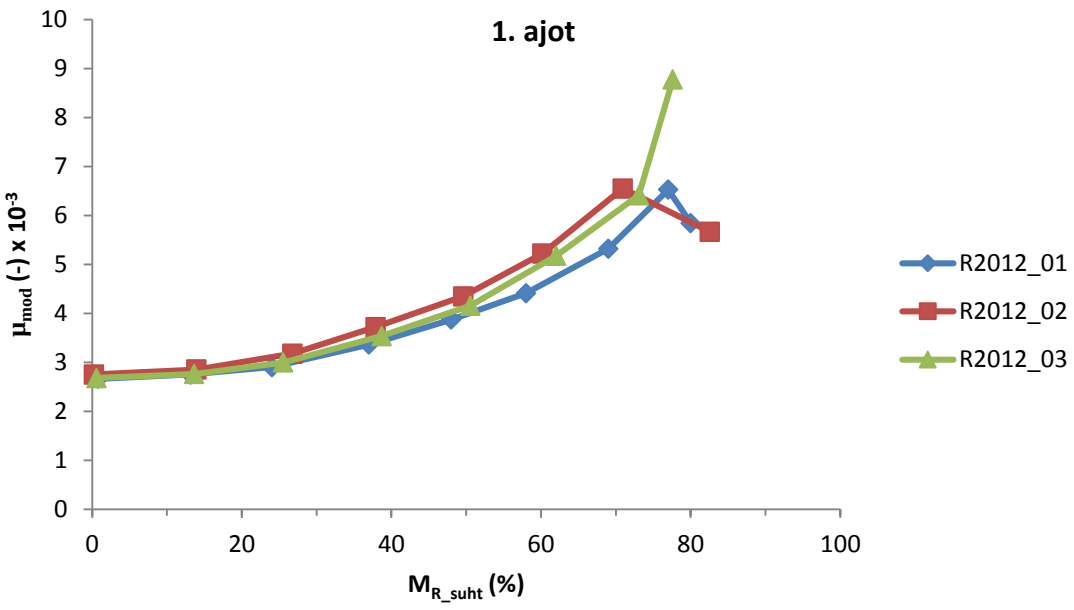
Laskennallinen laakerikallistuma reunakuormituksella esitetään kuvassa 6-3 mustin ympyröin. Laskennallinen kallistuma on suhteellisella reunakuormituksella 0-51 %, jolla kallistuma on välillä 0-20 µm. Laskennalliseen laakerikallistumaan nähden mitattu kallistuma on selvästi suurempi. Tämä on seurausta laakerireunan kulumisesta raja- ja sekavoitelutilanteessa, jota laskenta ei ota huomioon.

6.1.3 Sisäänajautumisen vaikutus

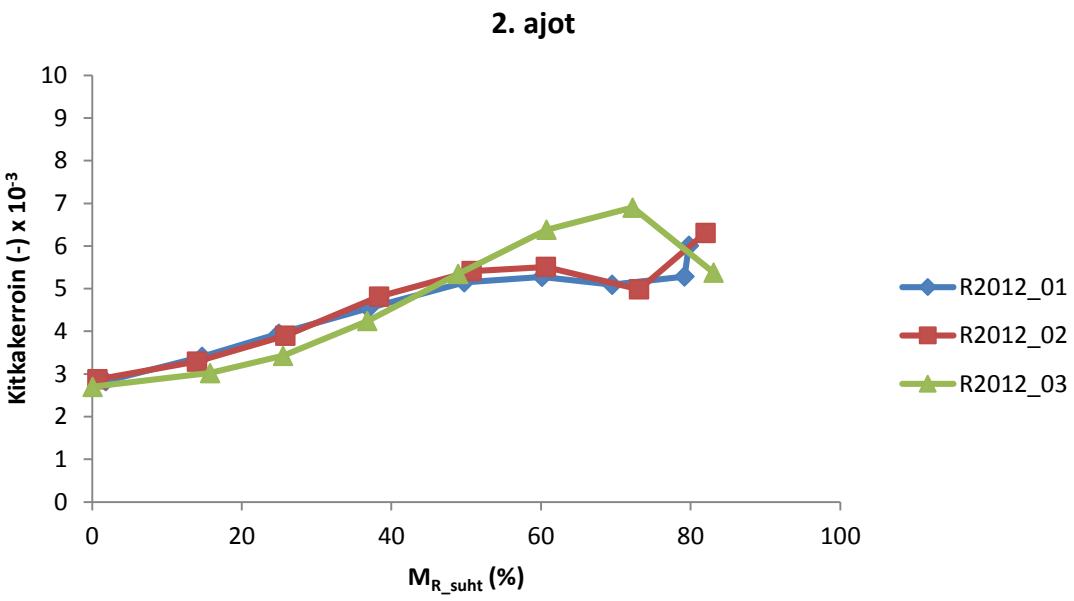
Laakerin sisäänajautumista reunakuormitukselle testattiin kolmen laakerierän ja kolmen testiakselin mittaussarjalla. Käytetyt koekappaleet olivat tunnisteella R2012_01-03. Koeajossa P_{proj} oli 6 MPa ja u oli 2 m/s, joilla laakerien reunamomentin suuruutta kasvatettiin asteittain 0-80 % maksimiarvostaan. Ajot toistettiin sisäänajautumisen vaikutuksen selvittämiseksi samoilla laakeri- ja akselierillä. Ennen mittauspisteen kirjaamista ylös laakerien käyttölämpötila oli vakiintunut. Liitteessä A on mittaustulokset sisäänajautumisen vaikutuksesta kitkakertoimeen ja laakerikallistumaan.

6.1.3.1 Sisäänajautunut kitkakerroin

Kuvassa 6-4 esitetään kolmen laakerierän ensimmäisien ajokertojen muokattu laakerikitkakerroin μ_{mod} suhteellisen reunakuormituksen mukaan ja kuvassa 6-5 esitetään sisäänajautunut kitka toistoajoista.



Kuva 6-4 *Uusien laakerien kitkakerroin reunakuormituksella.*

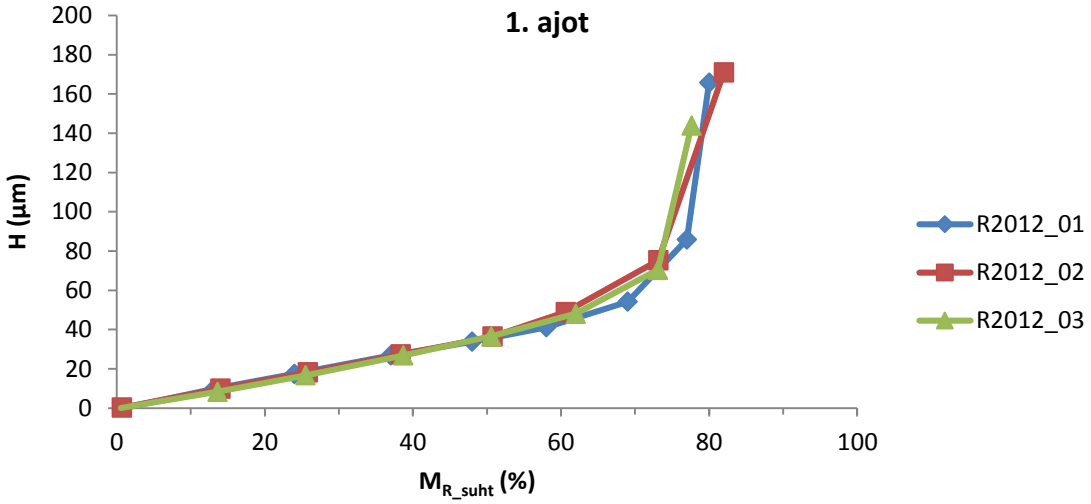


Kuva 6-5 *Sisäänajautuneiden laakerien kitkakerroin reunakuormituksella.*

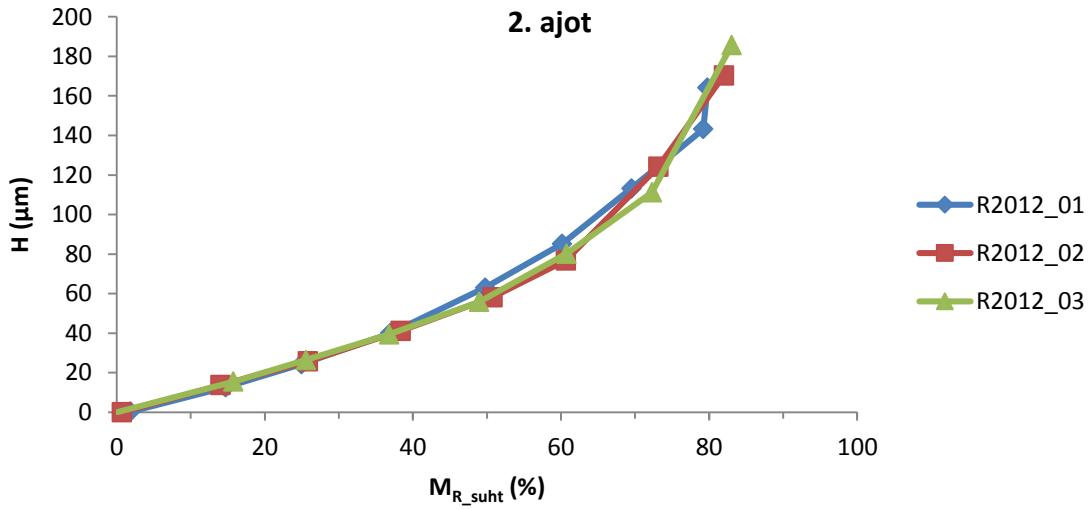
Mitattujen uusien laakerien kitka ja sisäänajautuneiden laakerien kitka kasvaa verrannollisesti reunakuormitukseen. Sisäänajautunut kitkakerroin on korkeampi alle 40 % suhteelliseen reunakuormitukseen asti kuin uusien laakerien kitka. Suuremmilla reunakuormituksen arvoilla kitkakerroin on alhaisempi sisäänajautuneilla laakereilla, mitä selittää laakerireunan kuluminen suotuisaksi reunakuormitukselle. Laakerin ja akselin kontakti toisiinsa tasoittuu laakerin reuna-alueen hioutuessa ja viistäytyessä. Mittaustuloksien toistettavuus on hyvä ja kitkakäyttäytyminen samankaltaista.

6.1.3.2 Sisäänajatunut laakerikallistuma

Kuvassa 6-6 esitetään reunakuormituksella laakerikallistuma uusien laakerien kanssa ja sisäänajautuneiden laakerien osalta laakerikallistuma esitetään kuvassa 6-7.



Kuva 6-6 *Uusien laakereiden kallistuma reunakuormituksella.*



Kuva 6-7 *Sisäänajautuneiden laakereiden kallistuma reunakuormituksella.*

Reuna-alueen kuluminen reunakuormituksella nähdään uusien laakerien ja sisäänajautuneiden laakerien kallistuman käytöksestä. Sisäänajautuneilla laakereilla laakerikallistuma on suoraan verrannollisempi reunakuormitukseen nähden ja kallistuma on uusiin laakereihin nähden suurempaa. Uusilla laakereilla laakerikallistuma muuttuu merkittävästi 60 % suhteellisen reunakuormituksen jälkeen voimakkaasti kasvavaksi alhaisempien kuormituksien vakaaseen käytökseen verrattuna. Sisäänajautuneilla laakereilla laakerikallistuma on johdonmukaisempaa kuormituspisteiden välillä. Laakerikallistumassa mitataan jäännöskallistuma uusien laakerien ajojen jälkeen, mikä selittyy pysyvällä muotovirheellä laakerin reuna-alueella. Laakeripesä asettuu kallistuneena sisäänajautumisen synnyttämän laakerimuodon mukaan akseliin.

Kitkakerroin ja laakerikallistuma kasvavat reunakuormituksen lisääntyessä. Suuremmilla reunakuormituksilla kitkakerroin ja laakerikallistuma kasvavat voimakkaasti, mutta toistettaessa koeajot mittaustulokset osoittavat, että sisäänajautumisella voidaan hallita laakerien kitkakäyttäytymistä ja laakerikallistumaa suurilla reunakuormituksilla.

6.2 Hydrodynaaminen painejakautuma

6.2.1 Hydrodynaaminen painejakautuma ilman reunakuormitusta

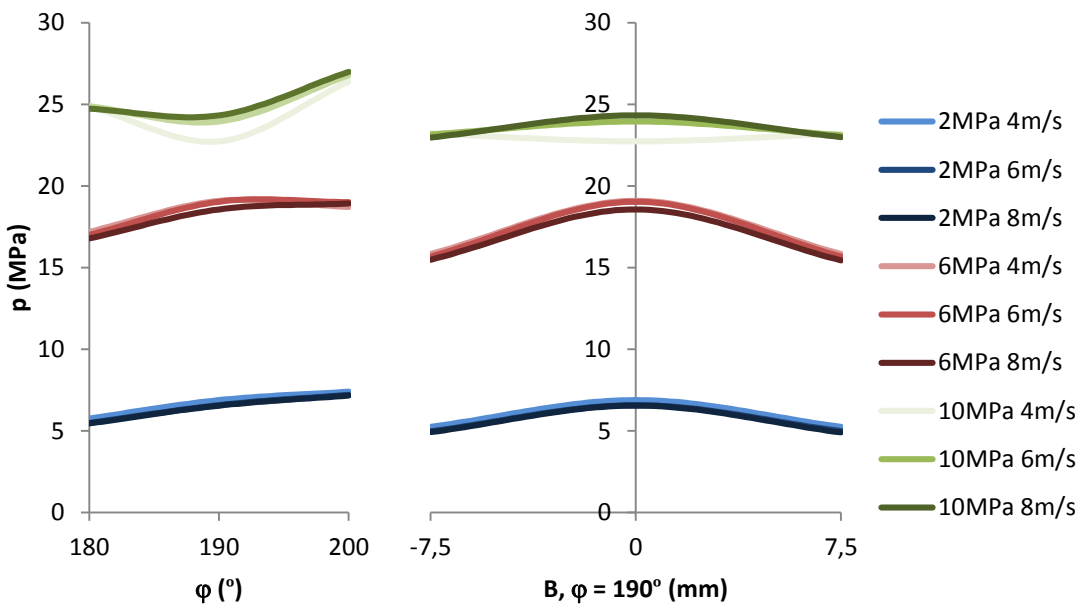
Hydrodynaamista painejakautumaa mitattiin viidellä kiinteällä mittauspisteellä yhdestä laakerista. Koeajossa olivat koekappaleet tunnisteella R2012_04. Kolme anturia mittaavat laakerin keskilinjalta: φ 180 asteen kulmassa anturi vastaa säteiskuormitustasoa eli horisonttia, josta 190 ja 200 asteen asetuskulman anturit ovat hydrodynaamisen painehuipun suuntaan 10 ja 20 asteen verran horisontista. Kaksi paineanturia mittasivat painetta 190 asteen asetuskulmassa ±7,5 mm laakerin keskilinjalta. Teorian mukaan ilman reunakuormitusta keskilinjalta sivussa olevat anturit tulisi näyttää yhtä suurta lukemaa ja hydrodynaaminen paine pyörähdyssuunnassa tulisi olla pienin horisontissa ja kasvaa painehuippua kohden siirryttäessä.

Taulukossa 6-3 esitetään mittaustulokset hydrodynaamisesta painejakautumasta ilman reunakuormitusta. Kuormitusparametrit ovat kuten aikaisemmin taulukossa 6-1 esitetyt ja taulukossa 6-2 kuormitustilanteeseen viitataan laskennallisella laakeriparametrilla, jotka ovat yhtenevät molemmissa taulukoissa.

Taulukko 6-3 *Hydrodynaaminen painejakautuma laakeriparametrin mukaisesti. Laskentaan käytetyt kuormitusparametrit esitetään taulukossa 6-1.*

μ_{Stri} [10^{-4}]	180°	190°	200°	190° -7,5 mm	190° +7,5 mm
5,807	57,599	68,807	73,960	52,406	52,433
6,518	54,776	65,759	72,114	49,842	49,702
6,723	54,523	65,443	71,629	48,992	49,198
1,480	171,909	190,865	187,063	158,386	158,349
1,596	170,008	190,357	190,129	156,737	156,756
1,631	167,841	185,655	189,189	154,405	154,810
0,703	248,707	227,279	264,043	232,083	232,082
0,753	248,846	239,513	267,723	231,134	231,608
0,772	247,328	243,248	269,951	229,912	229,687

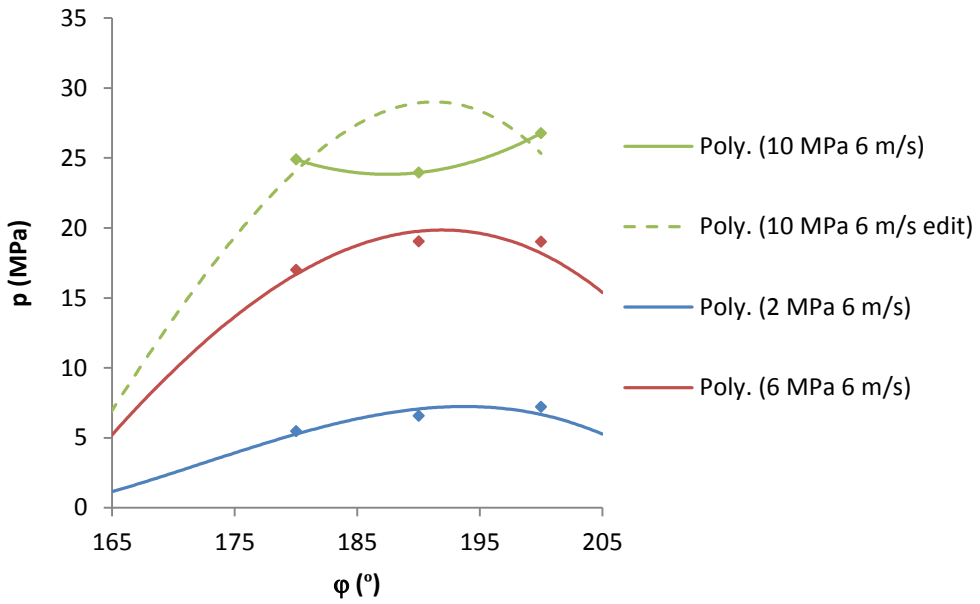
Taulukossa 6-2 on punaisella merkitty painemittaustulos, joka ei noudata aiemmin kuvattua laskennallista käyttäytymistä. Poikkeava tulos aiheutuu todennäköisestä vuodosta voitelupainemittauskanavassa. Mittauskanavan termoparianturijohdotuksen läpiviennin tiivistysliimaus on todennäköisesti pettänyt. Kuvassa 6-8 esitetään hydrodynaamiset painemittaustulokset ilman reunakuormitusta. Kuvan käyrät kulkevat mittauspisteiden kautta ja ne eivät välttämättä kuvaa tarkasti todellista painejakautuman muotoa pisteiden välillä.



Kuva 6-8 *Mitattu hydrodynaaminen painejakautuma laakerin pyörähdys- ja pituussuunnassa ilman reunakuormitusta.*

Painemaksimin suuruus ja sijainti ei merkittävästi muutu liukunopeuden muuttuessa. Huippu siirtyy 2 ja 6 MPa projektiopaineilla akselin pyörimissuuntaan. Merkittävästi eniten paineen suuruuteen vaikuttaa laakeriin kohdistunut säteiskuormitus.

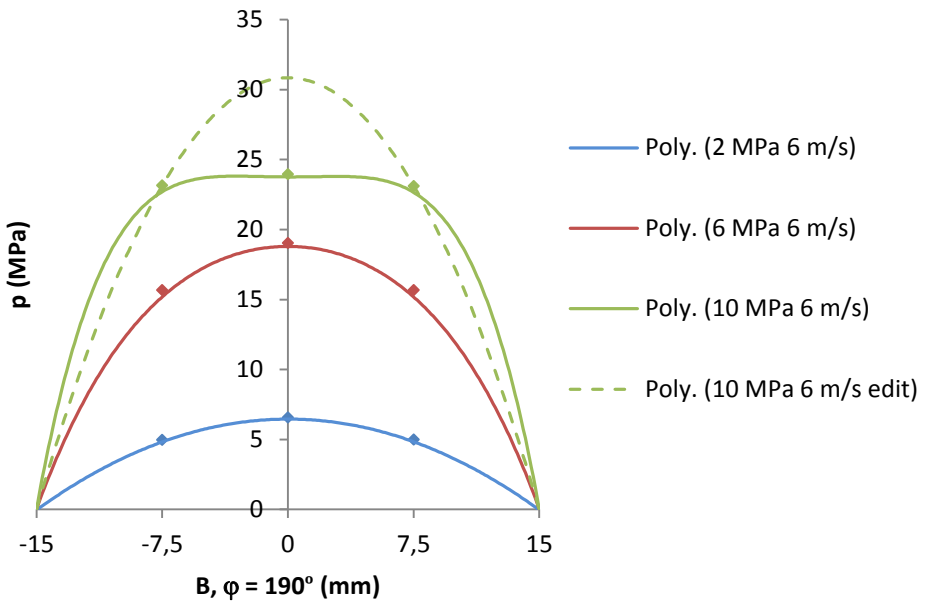
Kuvassa 6-9 esitetään hahmotelma laakerin pyörähdyssuuntaisesta painejakautumasta perustuen mittausdataan. Mitatut hydrodynaamiset paineet on merkitty kuvaan. Kuvassa 6-9 on katkoviivalla arvio mittaustuloksesta 10 MPa kuormituksella, mikä noudattaisi mitattuja painearvoja ilman virheellistä notkoa 190 asteen kohdalla. Liite B sisältää kuvaajan mitattujen painejakautumapisteiden väliin sovitetuista pinnoista.



Kuva 6-9 *Painejakautuman hahmotelma laakerin pyörähdyssuunnassa ilman reunakuormitusta.*

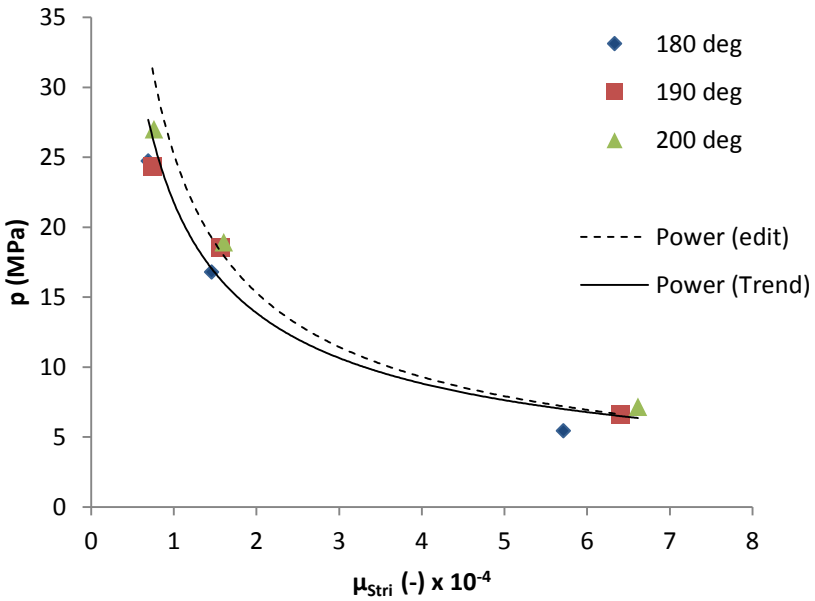
Kuvan 6-9 painejakautumamuotojen hahmotelmat noudattavat teorian esittämää muotoa. Hahmotelmat osoittavat hydrodynaamisen painehuipun olevan voimakkaasti terävämpi projektiopaineen kasvaessa eli paine kasvaa voimakkaasti huippua lähestyttäessä ja se putoaa voimakkaasti lyhyellä matkalla huippukohdan jälkeen.

Kuvassa 6-10 on hahmotelma laakerin pituussuuntaisesta painejakautumasta mittaustuloksien pohjalta, kun tehdään oletus paineenjakautuman nolla-arvosta laakerin molemmilla reunoilla. Mitatut hydrodynaamiset paineet on merkitty kuvaan. Painejakautumamittaus ei sovi 10 MPa projektiopaineen osalta paraabelikäyrälle, vaan huippu on tasainen. Kuvassa 6-10 on katkoviivalla arvio painejakautuman muodosta 10 MPa kuormituksella, mikä noudattaisi mitattuja reunapisteiden painearvoja ilman virheellistä painealenemaa.



Kuva 6-10 *Painejakautuman hahmotelma laakerin pituussuunnassa ilman reunakuormitusta.*

Kuvan 6-10 painejakautumamuodot noudattavat teorian esittämää ja ovat mahdollisia. Kuvassa 6-11 on poimittuja laakerikeskilinjan hydrodynaamisia paineita vallitsevan laakeriparametrin mukaan. Kuvaan 6-11 on lisätty myös katkoviivalla arvioidun paineen suuruus laakeriparametrin mukaan kuvassa 6-10 esitettyyn hahmotelmaan perustuen. Pisteitä yhdistää trendikäyrät.



Kuva 6-11 *Laakeriparametrin vaikutus hydrodynaamiseen paineeseen laakerin keskilinjalla.*

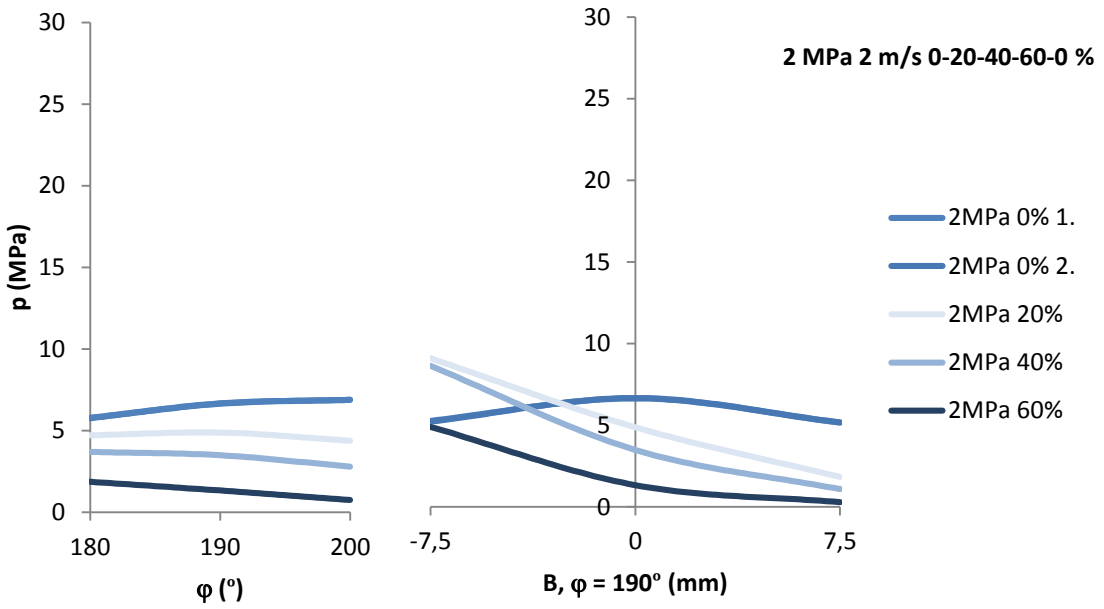
Kuvassa 6-11 hydrodynaaminen paine kasvaa exponentiaalisesti laakeriparametrin arvon pienentyessä. Kun tiedetään, että voitelukalvon paksuus on verrannollinen hydrodynaamiseen paineeseen, voidaan mittauksen perusteella todeta

minimivoitelukalvon h_0 paksuuden pienenenevän exponentiaalisesti laakeriparametrin pienentyessä.

6.2.2 Hydrodynaaminen painejakautuma reunakuormituksella

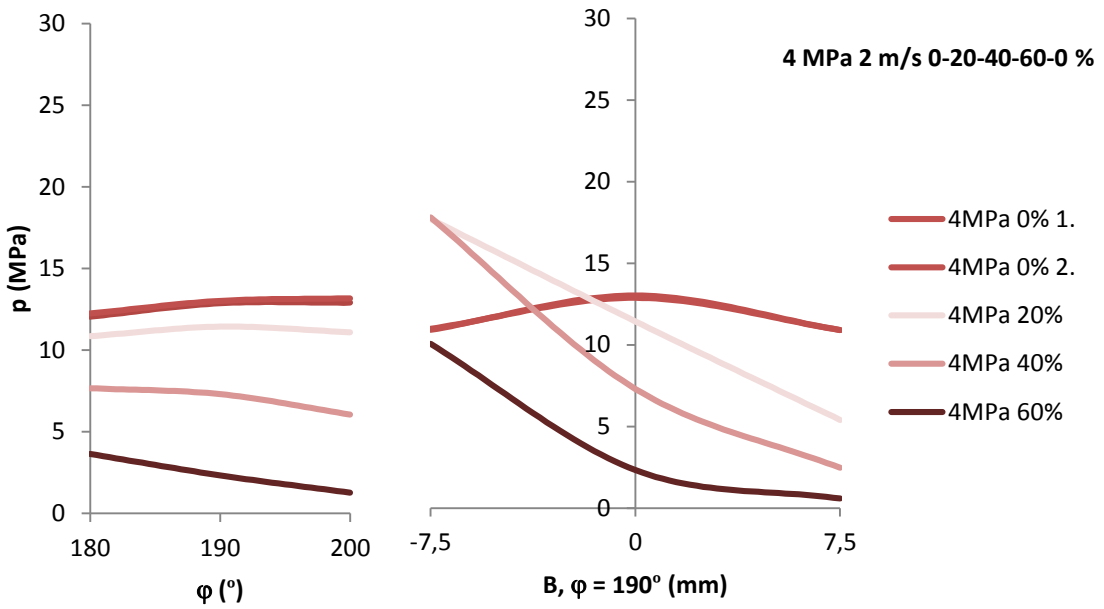
Hydrodynaamisen painejakautuman muotoa reunakuormituksella mitattiin neljällä reunakuormituksen arvolla kussakin projektiopaineen P_{proj} 2, 4 ja 6 MPa arvoilla. Mittauksissa u on 2 m/s. Esitetyissä reunakuormitettujen hydrodynaamisten painejakautumien kuvissa piirretyt käyrät kulkevat mittauspisteiden kautta. Piirretyt käyrät eivät kuvaa tarkasti todellista painearvoa mittauspisteiden välisellä alueella.

Kuvassa 6-12 esitetään projektiopaineella P_{proj} 2 MPa reunamomentin vaikutus hydrodynaamiseen painejakautumaan 0-60 % suhteellisella reunakuormituksella.



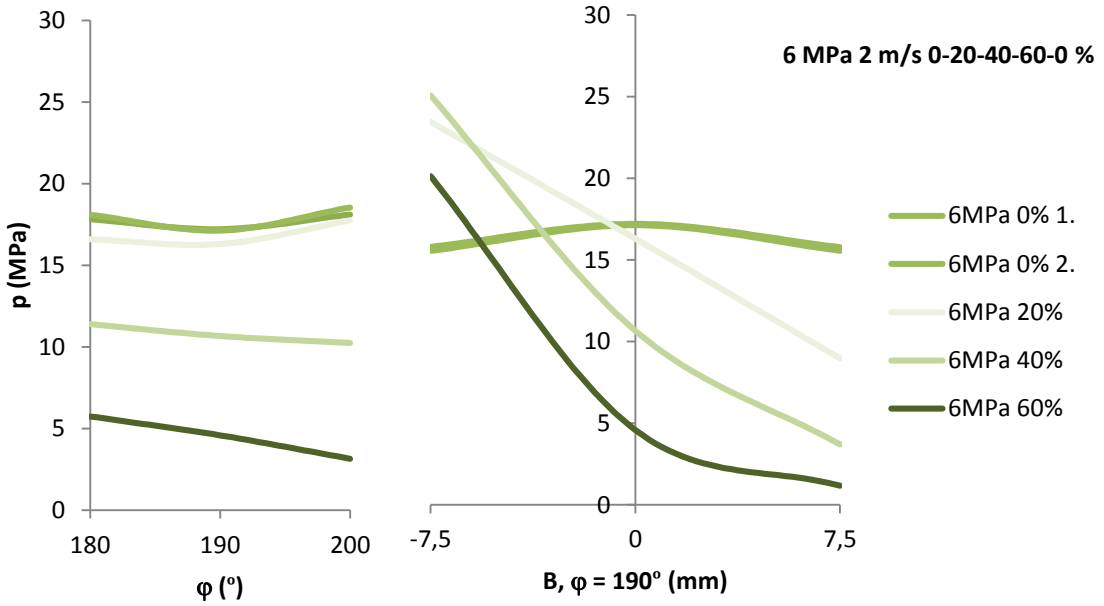
Kuva 6-12 *Reunakuormituksen vaikutus hydrodynaamiseen paineeseen,* P_{proj} *= 2 MPa.*

Kuvassa 6-13 on edelliseen nähden korotettu P_{proj} 4 MPa projektiopaineella 0-60 % suhteellisen reunamomentin vaikutus hydrodynaamiseen painejakautumaan.



Kuva 6-13 *Reunakuormituksen vaikutus hydrodynaamiseen paineeseen,* P_{proj} *= 4 MPa.*

Kuvassa 6-14 on edelleen korotettu P_{proj} 6 MPa projektiopaineella reunamomentin vaikutus hydrodynaamiseen painejakautumaan 0-60 % suhteellisella reunakuormituksella.

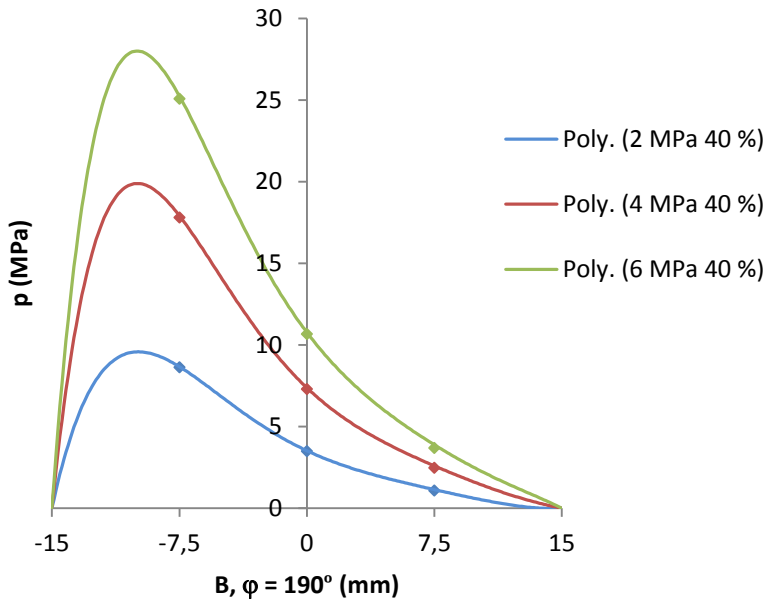


Kuva 6-14 *Reunakuormituksen vaikutus hydrodynaamiseen paineeseen,* P_{proj} *= 6 MPa.*

Reunamomentin vaikuttaessa kuvaajissa 6-12, 6-13 ja 6-14 esitettyjen painejakautumien muodot käyttäytyvät teorian mukaisesti vallitsevaan kuormitustilanteeseen nähden. Reuna-alueella hydrodynaaminen paine lisääntyy, kun reunamomenttia tai projektiopainetta kasvatetaan.

Kuvassa 6-15 esitetään hahmotelma hydrodynaamisesta painejakautuman muodosta suhteellisella 40 % reunakuormituksella 2, 4 ja 6 MPa projektiopaineilla. Hahmotelman

käyrät on piirretty oletuksella, että paine saa arvon nolla laakerin molemmilla laidoilla ja että sovitettu polynomi muodostaa vain yhden huippupisteen laakeripituudella. Mitatut hydrodynaamiset paineet on merkitty kuvaan. Liitteessä B on hahmotelma mitattujen painejakautumapisteiden väliin sovitetuista pinnoista projektiopaineella 2 MPa ja suhteellisella reunakuormituksella 0-60 %.



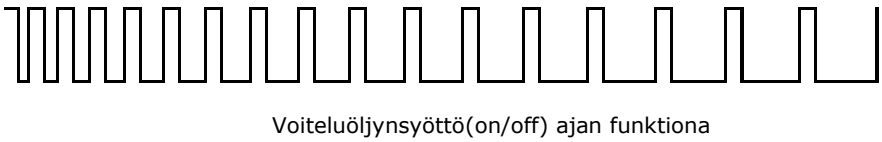
Kuva 6-15 *Painejakautumamuodon hahmotelma reunakuormituksella.*

Kuvan 6-15 hahmotelman muoto on teorian mukainen ja osoittaa kuinka painejakautuma saa maksiminsa reuna-alueella laakeripituudella 7,5-15 mm laakeriin kohdistuessa reunakuormitusta. Painemaksimi on verrannollinen projektiopaineeseen, mutta huippujen todelliset arvot ovat arvioita.

6.3 Laakerivauriot

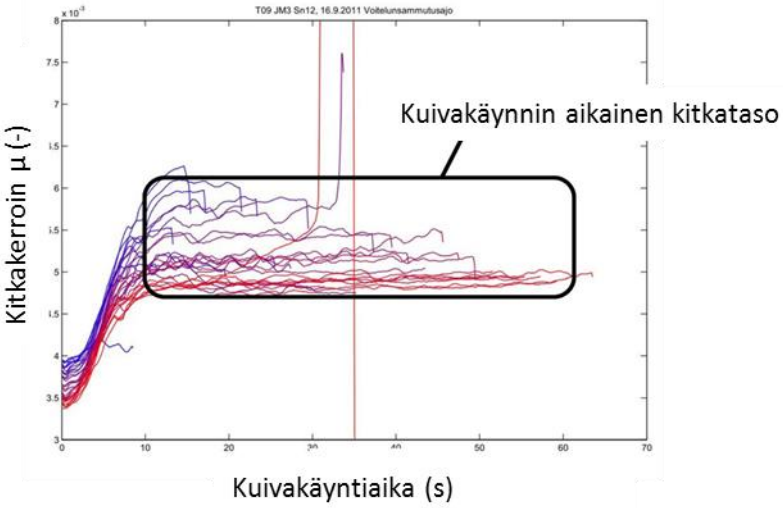
6.3.1 Voiteluhäiriön vaikutus kiinnileikkaantumiseen

Voiteluhäiriötestissä koelaakereita ajetaan kasvavin ajanjaksoin voiteluöljysyöttö sammutettuna. Kuivakäyntijaksojen välillä voiteluöljysyöttö palautetaan asetusarvoonsa yhden minuutin ajaksi. Ensimmäisen kerran voitelu katkaistaan 10 sekunnin ajaksi, jota seuraavat kuivakäyntijaksot ovat edellistään 2 sekuntia pidempiä eli 10, 12, 14 sekuntia ja niin edelleen. Kuvassa 6-16 esitetään voiteluöljyvirtauksen kuivakäyntijaksonmuoto.

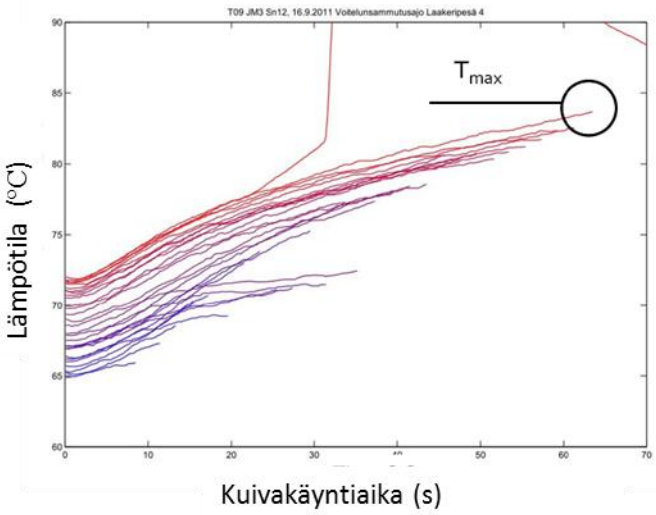


Kuva 6-16 *Voiteluainevirtauksen kuivakäyntijaksotus 10, 12, 14 sekuntia jne. sekä 1 minuutin toipumisaika.*

Voiteluhäiriökoeajon mittaustuloksena saadaan pisin kuivakäyntiajanjaksonpituus ennen havaittavaa kiinnileikkaantumista. Kiinnileikkaantuminen havaitaan seuraamalla laakerien yhteistä kitkakerrointa, käyttölämpötiloja tai koelaitteesta kantautuvaa ääntä tarkkailemalla. Ajo päätetään sammuttamalla akselia pyörittävä sähkömoottori. Jokaisesta testattavasta laakerista saadaan maksimilaakerilämpötila T_{max} erikseen ennen kiinnileikkautunutta kuivakäyntijaksoa. Kuvassa 6-17 esitetään periaatteellisesti mittaustuloksena saatu yhteisen kitkakertoimen kehittyminen siten, että kukin kuivakäyntijakso alkaa ajanhetkeltä 0 sekuntia ja piirtää kitkakäyrää värillä, joka on verrannollinen jakson pituuteen. Lyhin jaksonaika on sininen viivaväri, josta ajo alkaa ja punainen väri on pisimmän kuivakäyntijakson viivaväri, johon ajo päättyy. Samankaltaista esitysmuotoa sovelletaan kiinnileikanneen laakerin käyttölämpötilan esittämiseksi. Periaate käyttölämpötilan kehittymisestä esitetään kuvassa 6-18.



Kuva 6-17 *Esitysmuodon kuvaus voiteluhäiriöajon yhteisen kitkakertoimen kehittymisestä kuivakäyntijaksojen aikana.*

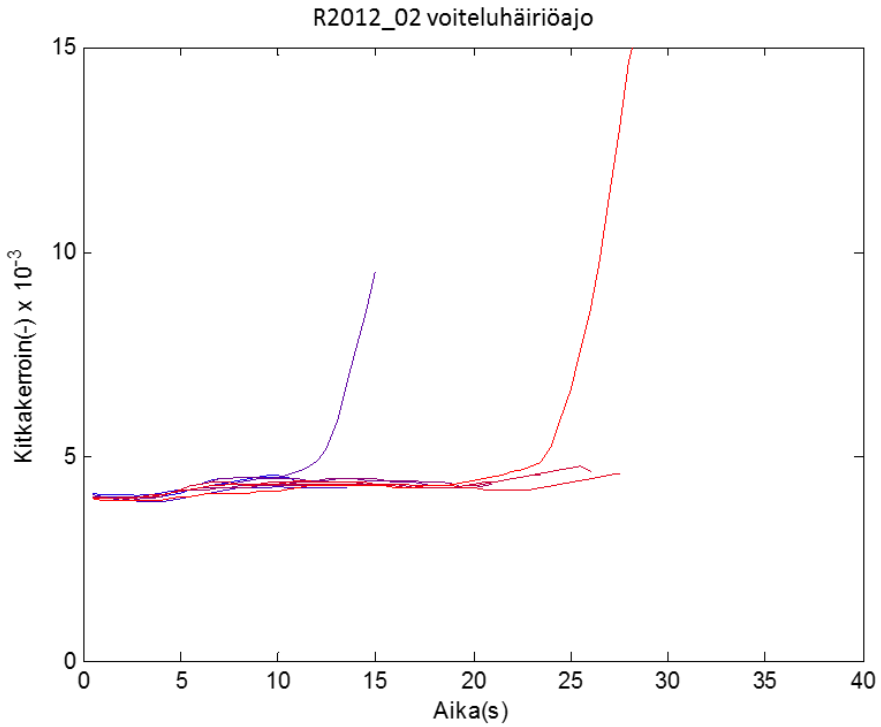


Kuva 6-18 *Esitysmuodon kuvaus voiteluhäiriöajon kiinnileikanneen laakerin taustalämpötilan kehittymisestä kuivakäyntijaksojen aikana.*

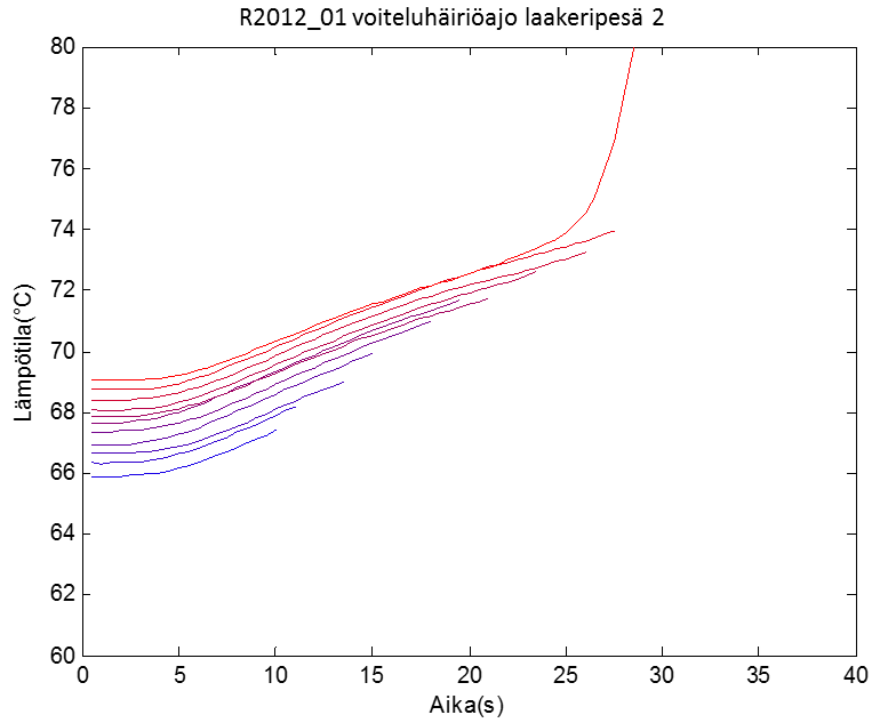
Voiteluhäiriökoeajoissa öljyn syöttö katkaistaan jokaiselta testattavalta laakerilta yhtäaikaisesti sammuttamalla yhteinen kiertovoitelupumppu. Kuivakäyntiajanjakson jälkeen voiteluainetilavuusvirtaus palautetaan asetusarvoonsa käynnistämällä pumppu. Laakerien kuivakäyntiä testataan myös reunakuormituksella. Voiteluhäiriökoeajossa reunakuormitus kohdistetaan kahteen keskimmäiseen testattavista neljästä laakerista. Voiteluhäiriöajo eri reunakuormituksen arvoilla toteutetaan kolmella 0 %, 40 % ja 60 % säteiskuormitukseen nähden suhteellisella reunakuormituksen arvolla. Koeajoissa käytetään koelaakereita tunnisteella R2012_01-03, joilla on ajettu ennen voiteluhäiriö ajoa sisäänajautumisen kitka-ajot. Voiteluhäiriöajoissa P_{proj} on 4 MPa ja u on 5 m/s.

6.3.2 Voiteluhäiriöajo ilman reunakuormitusta

Voiteluhäiriökoeajot aloitettiin vertailuajolla 0 % suhteellisella reunakuormituksella käytetystä säteiskuormituksesta. Vertailuajossa koekappaleet olivat tunnisteella R2012_01. Mittaustuloksena saatiin kuivakäyntijaksojen kitkakertoimen kehittyminen esitettynä kuvassa 6-19 ja kuvassa 6-20 on vertailuajon kiinnileikanneen laakerin käyttölämpötilan kehittyminen.



Kuva 6-19 *Voiteluhäiriöajon yhteisen kitkakertoimen kehittyminen.*



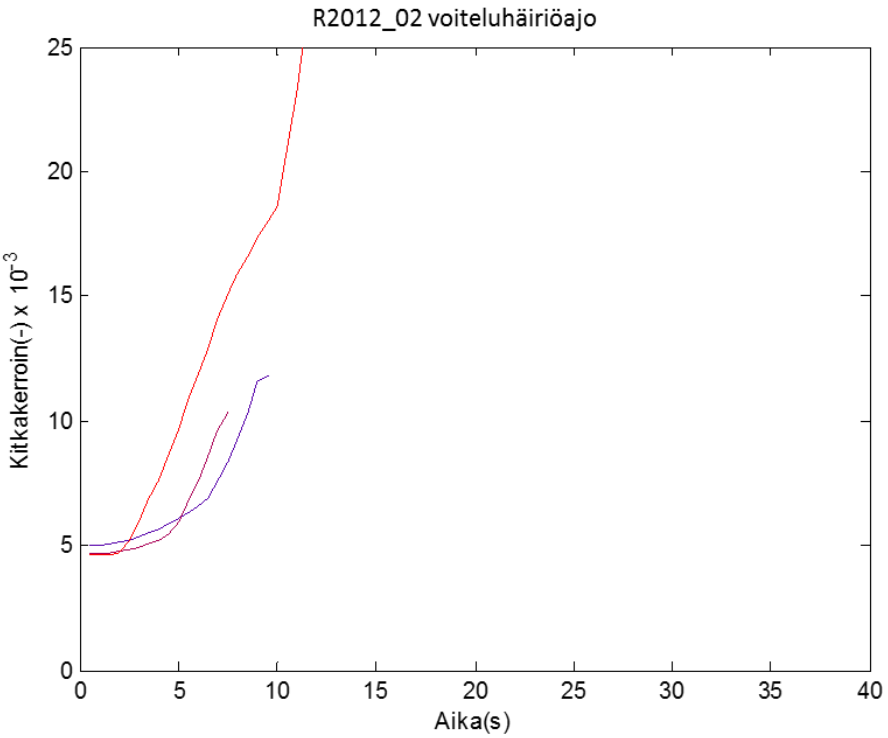
Kuva 6-20 *Voiteluhäiriöajon kiinnileikanneen laakerin käyttölämpötilan kehittyminen.*

Kuvassa 6-19 voiteluhäiriön vertailuajossa laakerit kestävät 10 kuivakäyntijaksoa eli pisimmillään 28 sekuntia ilman voiteluainesyöttöä ennen kiinnileikkaantumista. Kuvassa 6-20 laakerin taustalämpötila saavuttaa 74 celsiusastetta ennen kiinnileikkaantumiseen johtanutta 11. kuivakäyntijaksoa.

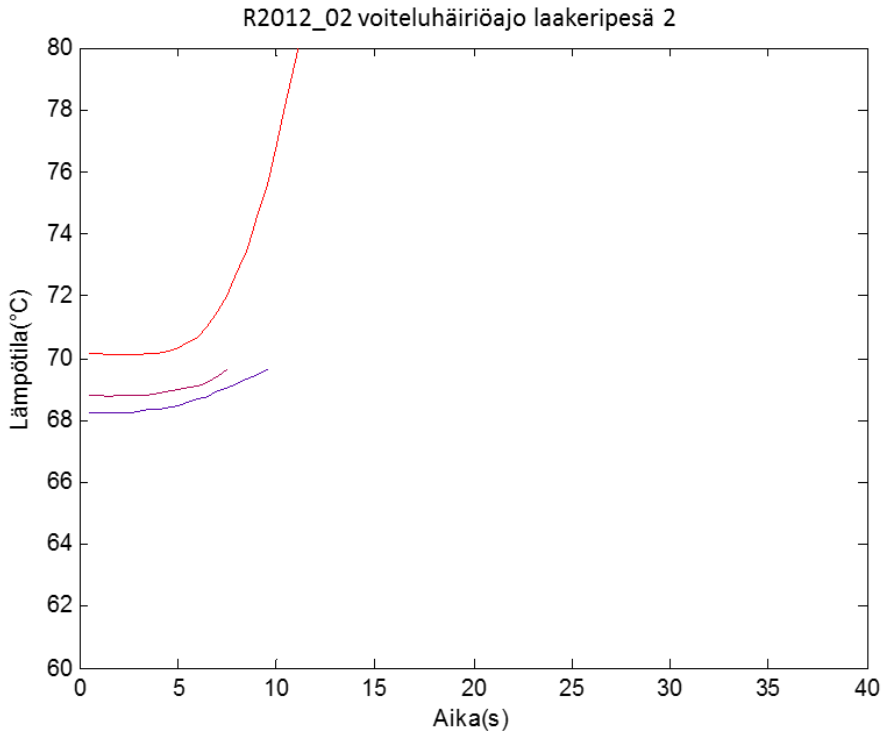
Vertailukoeajossa yksi laakereista näyttäisi kokeneen vertailuajon aikana tahmautumista viidennellä kuivakäyntijaksolla, mutta sen ajoittuminen juuri kuivakäyntijaksonajan loppuun on mahdollistanut ajon jatkamisen seuraavilla kuivakäyntijaksoilla 1 minuutin toipumisajan jälkeen. Vaikkakin kitkakerroin on ehtinyt saavuttaa kohtalaisen korkean arvon viidennen kuivakäyntijakson lopussa, jatkettiin koeajoa, sillä selvää merkkiä kiinnileikkaantumisesta ei havaittu koelaitteen äänen tai mittauskoneen ruudulta seuratun kohonneen laakerilämpötilan kautta. Viidennettä jaksoa seuranneilla kuivakäyntijaksoilla ei esiinny vastaavaa tahmautumista kuin vasta kiinnileikkauksen tulkintaan johtaneessa 11. kuivakäyntijaksossa, jolloin koelaitteesta kuului voimakasta ääntä ja laakerilämpötila sekä kitkakerroin kohosivat hyvin nopeasti toisessa keskimmäisistä laakeripesistä.

6.3.3 Voiteluhäiriö 40 % reunakuormituksella

Voiteluhäiriövertailuajon jälkeen suoritettiin koeajo keskimmäisten kahden laakeripesän ollessa säteiskuormituksesta 40 % suhteellisella reunakuormituksella. Koeajossa laakerit ja akseli olivat tunnisteella R2012_02. Kuvassa 6-21 on esitettynä reunakuormitetun ajon yhteinen kitkakerroin ja kuvassa 6-22 esitetään kiinnileikanneen laakerin käyttölämpötilan kehittyminen.



Kuva 6-21 *40 % reunakuormitettu voiteluhäiriöajon yhteisen kitkakertoimen kehittyminen.*

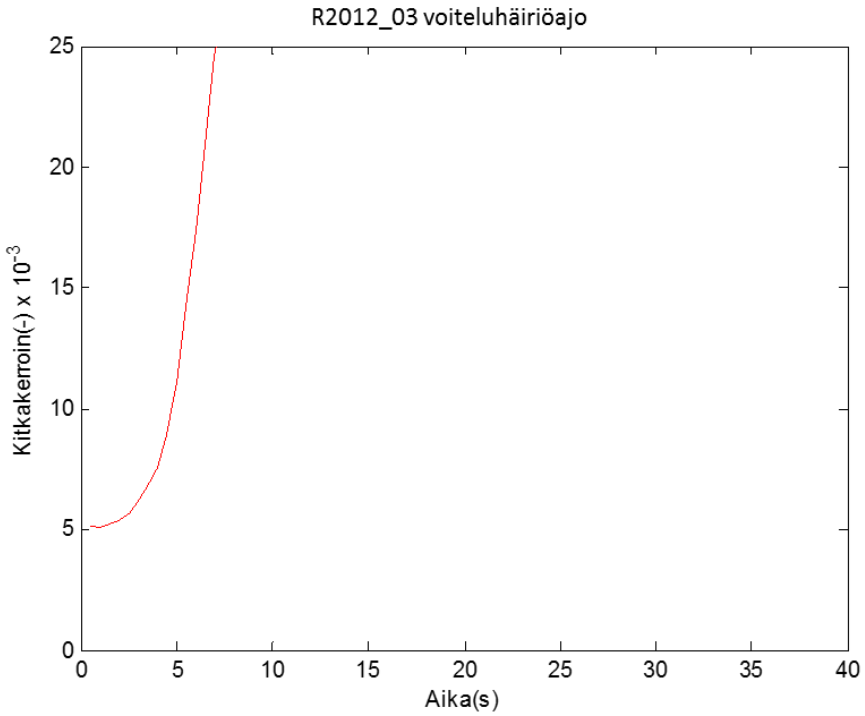


Kuva 6-22 *40 % reunakuormitetun voiteluhäiriöajon kiinnileikanneen laakerin käyttölämpötilan kehittyminen.*

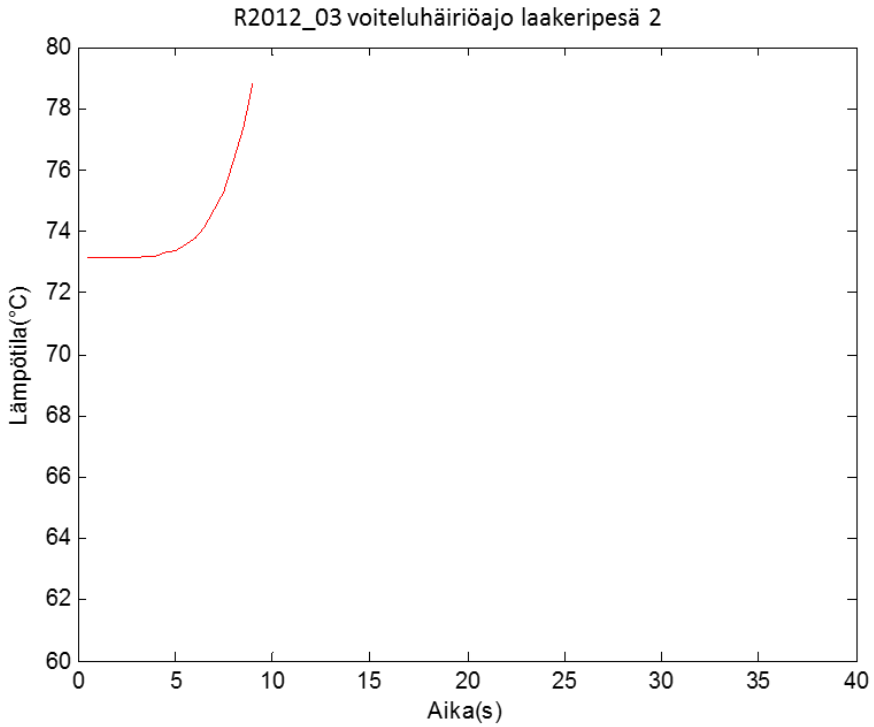
40 % reunakuormituksella laakerit eivät kestäneet kuin yhden kokonaisen kuivakäyntiajanjakson ilman kiinnileikkaantumista. Laakerien yhteinen mitattu kitkakerroin käyttäytyi hallitsemattomasti vertailuajoon verrattuna ja osoitti voitelutilanteen olevan rajavoitelualueella. Koeajo suoritettiin toisen ajanjakson osalta lyhennettynä 8 sekunnin kestoisena ja kolmannella seurasi kiinnileikkaantuminen. Kitkakertoimessa ei havaita suotuisaa kehittymistä sisäänajautumisella kitkan hallitsemiseksi.

6.3.4 Voiteluhäiriö 60 % reunakuormituksella

Edelleen suoritettiin reunakuormitettu voiteluhäiriöajo 60 % suhteellisella reunakuormituksen arvolla laakerien kokemaan säteiskuormitukseen nähden. Koekappaleet olivat tunnisteella R2012_03. Kuvassa 6-23 esitetään reunakuormitetun voiteluhäiriöajon yhteinen kitkakerroin sekä kuvassa 6-24 esitetään kiinnileikanneen laakerin käyttölämpötila.



Kuva 6-23 *60 % reunakuormitettu voiteluhäiriöajon yhteisen kitkakertoimen kehittyminen.*



Kuva 6-24 *60 % reunakuormitetun voiteluhäiriöajon kiinnileikanneen laakerin käyttölämpötilan kehittyminen.*

Kuvan 6-23 kitkakäyttäytymistä havainnoitaessa ja koelaitteesta tulleen voimakkaan äänen perusteella, lopetettiin ajo jo ensimmäisen kuivakäyntiajanjakson aikana. Koeajon alusta alkaen kitkakerroin kohosi merkittävästi kuivakäyntijakson aikana. 60 %

reunakuormitettu laakeri ei kestä kuivakäyntiä kiinnileikkaantumatta viittä sekuntia pidempään.

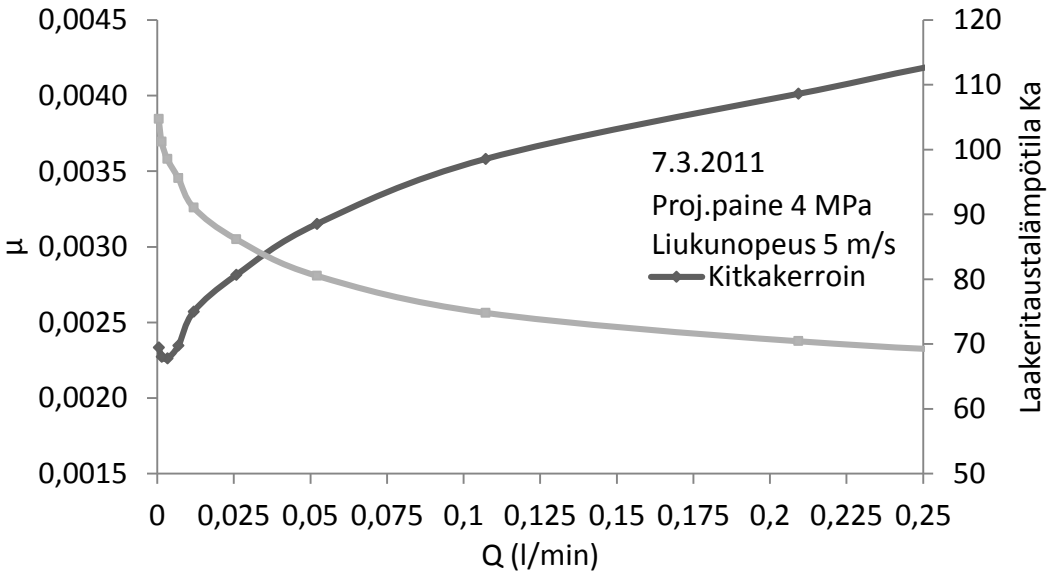
Kuvan 6-24 kiinnileikanneen laakerin taustalämpötilassa ei nähdä merkittävää lämpötilan nousua kiinnileikkaantumisen aikana, sillä tahmautumista esiintyy laakerin reuna-alueella eikä laakerin keskilinjalla, josta käyttölämpöä mitannut lämpötila-anturi sijaitsee.

Voiteluhäiriökoeajoissa käytetyt laakerit olivat sisäänajautuneet niillä aiemmin suoritetun koeajon tuloksena. Laakerit olivat aiemmin suoritetussa koeajossa kuormitettu voideltuina 80 % suhteelliselle reunakuormitukselle 6 MPa projektiopaineella, millä saavutettiin kitkakertoimen ja käyttölämpötilan vakaa käyttäytyminen. Laakerit olivat siten sisäänajautuneita voiteluhäiriöajoa suuremmalle reunakuormitukselle. Tulosten pohjalta voidaan todeta, etteivät reunakuormitukselle sisäänajautuneet laakerit kestä käytännössä lainkaan kuivakäyntiä kohtalaisen suurella 40 % ja suurella 60 % reunakuormituksella.

Voiteluhäiriökoeajojen mittaustulokset osoittavat laakeroinnissa käytettävän voiteluaineen tärkeyttä kiinnileikkaantumisen ehkäisemiseksi. Voiteluainehäiriöt sekä reunakuormitukset ovat tavallisia teollisuuden raskaiden työkoneiden sovellutuksissa. Tämän työn pohjalta käytännössä laakeroinnin pitkäaikainen kestävyys voidaan taata, kun siihen kohdistuu vähäistä reunakuormitusta ja vähäisiä voiteluhäiriötilanteita.

6.3.5 Voitelumäärän vaikutus kitkakertoimeen

Voiteluöljymäärän vaikutusta laakerikitkaan tarkasteltiin T03 alkuvuodesta 2011. Koejärjestelyssä ei ollut reunakuormituksen koelaitemuutoksia. T03 koeajossa pienennettiin hallitusti voiteluöljyvirtausta laakereille. P_{proj} oli 4 MPa ja u oli 5 m/s. Mitattu kitkakerroin ja laakerien keskimääräinen käyttölämpötilan kehittyminen esitetään kuvassa 6-25 voiteluaineen tilavuusvirtauksen Q mukaan.



Kuva 6-25 *Voiteluöljymäärän vaikutus laakerikitkaan ja laakerien käyttölämpötilaan.*

Laakerien käyttölämpötila nousee kuristettaessa voiteluaineen tilavuusvirtausta, kun kiertovoiteluöljyn mukana poistuu laakereista vähemmän kitkalämpöä. Kitkakerroin laskee, kun laakerissa vaikuttavan voiteluaineen tehollinen viskositeetti pienenee käyttölämpötilan kasvaessa. Voiteluainetilavuusvirran kuristamisella ei koeajossa saavutettu selvästi rajaa, jossa voiteluaineen vähentäminen olisi johtanut kitkan kasvamiseen kokeen käyttöolosuhteissa. Vähäinen voiteluöljyn tilavuusvirtaus mahdollistaa laakerin toiminnan vakaassa toimintaympäristössä.

Suurilla tilavuusvirtauksilla on mahdollista kuljettaa laakerin kitkahäviössä syntynyt lämpö pois voiteluaineen mukana. Kylmemmän laakerin voiteluaineen tehollinen viskositeetti säilyy korkeana. Toisaalta tarpeettoman suuri voiteluvirtaus johtaa tehohäviöihin voiteluainetuottoyksikön tehohäviöiden kuin laakeroinnissa kohonneen kitkan vuoksi. Tästä syystä esimerkiksi hyvää hyötysuhdetta vaativissa koneissa voidaan laakeroinnin tehohäviöitä optimoida hallitsemalla käyttölämpötiloja tarkasti voiteluainetilavuusvirran avulla.

7 YHTEENVETO JA KEHITYSKOHTEET

Tässä diplomityössä toteutettiin koelaitemuutoksia sekä mitattiin siihen liittyviä koemittaussarjoja säteisliukulaakereihin kohdistetun reunakuormituksen vaikutuksen selvittämiseksi laakerien kitka- ja vauriokäyttäytymiseen. Tämä työ on osa Ecobearings projektia, jossa selvitetään lyijypitoisten laakerimateriaalien korvaamista ympäristöystävällisemmillä vaihtoehdoilla. Työ suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston Konstruktiotekniikan laitoksen tehonsiirron ja tribologian tutkimusryhmässä.

Säteisliukulaakerikoelaitteistolla testattiin yhtä aikaa neljää samanlaista laakeriholkkia yhdellä yhteisellä testiakselilla. Kahteen koelaitteen keskimmäisestä laakerista kohdistetaan yhtä suuri säteiskuormitus samalla, kun kahteen reunimmaiseen laakeriin kohdistuu symmetrian ja reaktiovoiman kautta vastaavansuuruinen säteiskuormitus. Käytetyt laakeripesät linjaavat itsensä akseliin ja kuormitukseen nähden. Neljän laakerin yhteistä akselia käytetään joustavin kytkinelementein suoraan taajuusohjatulla oikosulkumoottorilla. Koelaakerit olivat lyijytinapronssia ja koeakselit terästä.

Koelaitemuutos kytkee kaksi keskimmäistä laakeripesää tunkkirakenteella, joiden ruuvikierteitä käyttämällä voidaan laakereita kallistaa hallitusti akselilinjaan nähden. Reunimmaiset laakeripesät linjaavat itsensä vapaasti akseliin ilman reunakuormitusta. Tunkkirakenteen ruuvien kautta tuotettu reunakuormitus mitataan venymäliuskapohjaisella mittaustekniikalla rakenteen nivelvarresta. Reunakuormituksella tapahtuva laakeripesien kallistuma käyttöakselilinjaan nähden mitataan laakeripesiin asennetuilla kahdella pyörrevirtapohjaisella anturilla. Akselin pyörimisnopeuden ylläpitämiseen vaadittu neljän koelaakerin kitkamomentti mitataan. Koelaitemuutokset mahdollistavat myös hydrodynaamisen painejakautuman mittauksen eri kuormitustilanteissa yhdestä laakeripesästä. Paineanturimittaus sisältää viisi kiinteää mittauspistettä laakerin hydrodynaamisella paine-alueella.

Voiteluainesyötön määrää ja öljyn lämpötilaa hallitaan kiertovoiteluyksiköllä. Voiteluaineen tilavuusvirtaus laakeripesää kohden on säädettävissä ja vakioidaan samaksi laakeripesien kesken. Voiteluaineena käytettiin mineraaliöljyä. Laakeripesien käyttölämpötilaa mitattiin termopariantureilla laakerien kuormitusalueen taustapuolelta.

Työssä esitetyllä laakeriparametrilla kytketään käytetty laakerigeometria, laakeriin kohdistunut kuormitustilanne ja käyttölämpötila. Esitetyt kitkatulokset laakeriparametrin mukaan edesauttavat suunnitteluvaiheessa laakeroinnin mitoittamisesta.

Koeajoissa tuotetun reunakuormitusmomentin kasvaessa kitkakerroin kasvaa. Reunakuormitus muuttaa voitelukalvon paksuutta ja pienentää minimikalvon paksuutta, mikä todettiin laakerien kallistumamittauksilla. Reunakuormitus muuttaa

painejakautumaa siirtäen painemaksimia reunaa kohden, mikä todettiin mittaamalla hydrodynaamista painejakautumaa laakerin eri kohdista. Hydrodynaamisen painejakautuman muoto noudattaa oletettua käyttäytymistä ilman reunakuormitusta ja reunakuormituksella. Painemaksimin suuruus ja sijainti eivät merkittävästi muuttuneet ajetuissa testipisteissä liukunopeuden vaihdellessa. Merkittävästi eniten hydrodynaamisen paineen suuruuteen vaikuttavat laakerin säteiskuormitus ja reunakuormitus.

Sisäänajautumisen vaikutus laakerikitkaan mitattiin toistamalla reunakuormituskoeajoja. Sisäänajautumisella saatiin laakerien kitka pienemmäksi suurilla reunakuormituksen arvoilla. Sisäänajautuneiden laakerien kitka ja kallistuma käyttäytymisestä tulee lineaarisempi reunakuormitukseen nähden kun niitä verrataan uusien laakerien käyttäytymiseen.

Laakerien vaurioitumista arvioitiin voiteluhäiriökoeajoilla eri reunakuormitustilanteissa. Voiteluhäiriöajossa voiteluainesyöttö laakereille katkaistiin kasvaviksi ajanjaksoiksi ja tarkasteltiin kitkan sekä laakerilämpötilan kehittymistä. Voiteluhäiriöajoa jatkettiin niin kauan kunnes laakerivaurio havaittiin yhdessä koelaakerissa. Tulosten pohjalta havaitaan, että reunakuormitus vaikuttaa merkittävästi laakerin kuivakäyntiominaisuuksiin lyhentäen käytettävissä olevaa kuivakäyntiaikaa verrannollisena käytettyyn reunakuormitusmomenttiin. Tilastollisen epävarmuuuden vuoksi saadut tulokset eivät välttämättä kuvaa todellista käyttäytymistä tarkasti. Säteisliukulaakerin vaatimaton kitkakäyttäytyminen ja suuri kiinnileikkaantumisen riski voiteluhäiriötilanteissa korostaa luotettavan voiteluainevirtauksen tärkeyttä reunakuormitustilanteissa. Sisäänajautuminen ei pelastanut laakerin suorituskykyä kuivakäyntitilanteissa, sillä koeajoissa käytetyt laakerit olivat sisäänajettuja käytetyille reunakuormituksille.

Kokeissa mitattiin myös voiteluainemäärän vaikutusta laakerikitkaan. Voiteluaineen vähentäminen laakeria kohden nostaa laakerilämpötilaa, sillä laakerista ulosvirtauksen mukana kuljettama kitkalämpö vähenee. Laakerilämpötilan kasvaessa kitka pienenee kun voiteluaineen tehollinen viskositeetti laakerissa tietyissä rajoissa pienenee. Voiteluaineen määrällä voidaan hallita laakerin käyttölämpötilaa ja laakerikitkaa.

Tämä työ on luonut edellytykset arvioida laakerien käyttäytymistä reunakuormitustilanteissa. Voiteluhäiriöajojen osalta lisämittauksia tulisi toteuttaa reunakuormituksen vaikutuksen selvittämiseksi maltillisilla reunakuormituksen arvoilla. Hydrodynaamisen painejakautumamittauksen tulosten vertailu laakerimallin tuloksiin tarkentaisi tässä työssä tehtyjä arvioita reunakuormituksen aikaansaaman painemaksimin suuruudesta reuna-alueella ja sekavoitelutilanteen vaikutuksesta kitkaan.

LÄHTEET

Johnson Metall. Kuparimetallien valuseosnormit. [WWW] [Viitattu: 6. Elokuu 2012.] Saatavissa: http://www.johnson-metall.fi/suomi/kuparimetallien_valuseosnormit.php.

Khonsari, Michael M. ja Booser, E. Richard. Applied Tribology - Bearing design and lubrication. 2nd edition. Chichester, Wiley & Sons, Ltd, 2008. ISBN 978-0-470-05711-7.

Kivioja, Seppo, Kivivuori, Seppo and Salonen, Pekka. Tribologia - Kitka, kuluminen ja voitelu. 5. korjattu painos. Helsinki, Otatieto, 2007. ISBN 978-951-672-355-9.

Lehtovaara, Arto. A numerical model for hydrodynamic lubrication of jounal bearings with axial lubricant supply groove and axially variable geometry. TRIBOLOGIA – Finnish journal of tribology, 2007, Vol 26, pp. 3-14.

Ovako. Bar products from Ovako. [WWW] [Viitattu: 8. Elokuu 2012.] Saatavissa: http://www.ovako.com/Global/Downloads/Product_information/Bar_products/EN/Bar%20products%20from%20Ovako.pdf.

Sandvik, K., Lehtovaara , A., Makkonen, E., Kallio, M., Kuvaja, K., Kuokkala, V-T. Development of a test device for the evaluation of journal bearings. TRIBOLOGIA – Finnish journal of Tribology, 2012, Vol 32, pp. 12-21. ISSN 0780-2285.

Sandvik, Kim. Koelaitteen kehittäminen säteisliukulaakerin testaukseen ja analysointiin. Tampere, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2010. Diplomityö.

Stachowiak, G. W. ja Batchelor, A. W. Engineering tribology. Amsterdam, Elsevier, 1993. ISBN 0-444-89235-4.

LIITE A KITKA-AJOJEN MITTAUSTULOKSET

Taulukko R2012_01 *Uusien ja sisäänajautuneiden laakereiden reunakuormitusmittaustuloksia, u 2 m/s ja P_{proj} 6 MPa.*

M_R [Nm]	M_{R_suht} [%]	T [°C]	μ_{Stri} [10^{-4}]	μ [10^{-3}]	μ_{mod} [10^{-3}]	H [µm]
R2012_01 1. ajo						
1,305	0,788	53,884	1,1360	2,667	2,667	-0,053
21,661	13,143	54,572	1,1040	2,674	2,756	9,798
39,528	24,000	54,909	1,0886	2,730	2,904	17,412
61,170	37,000	55,616	1,0530	2,920	3,368	26,853
78,654	48,000	56,396	1,0143	3,129	3,877	33,852
96,184	58,000	57,164	0,9779	3,356	4,416	41,191
114,762	69,000	58,626	0,9116	3,732	5,324	54,190
129,624	77,000	60,607	0,8266	4,235	6,530	85,917
135,496	80,000	62,241	0,7635	3,819	5,846	165,735
-2,279	-1,405	56,604	1,0207	2,725	3,054	24,760
R2012_01 2. ajo						
2,949	1,807	55,202	1,0822	2,829	2,829	0,281
23,919	14,700	56,356	1,0288	3,046	3,403	12,601
40,555	24,944	57,307	0,9857	3,260	3,943	24,270
60,102	36,936	58,155	0,9478	3,509	4,540	39,943
81,339	49,751	59,176	0,9013	3,752	5,148	62,979
98,785	60,134	59,545	0,8824	3,791	5,275	85,178
115,016	69,489	59,307	0,8851	3,703	5,092	113,146
132,334	79,194	59,689	0,8619	3,769	5,285	143,185
134,165	79,757	60,906	0,8118	4,065	6,008	164,146
-1,280	-0,803	56,683	1,0338	2,775	2,848	0,163

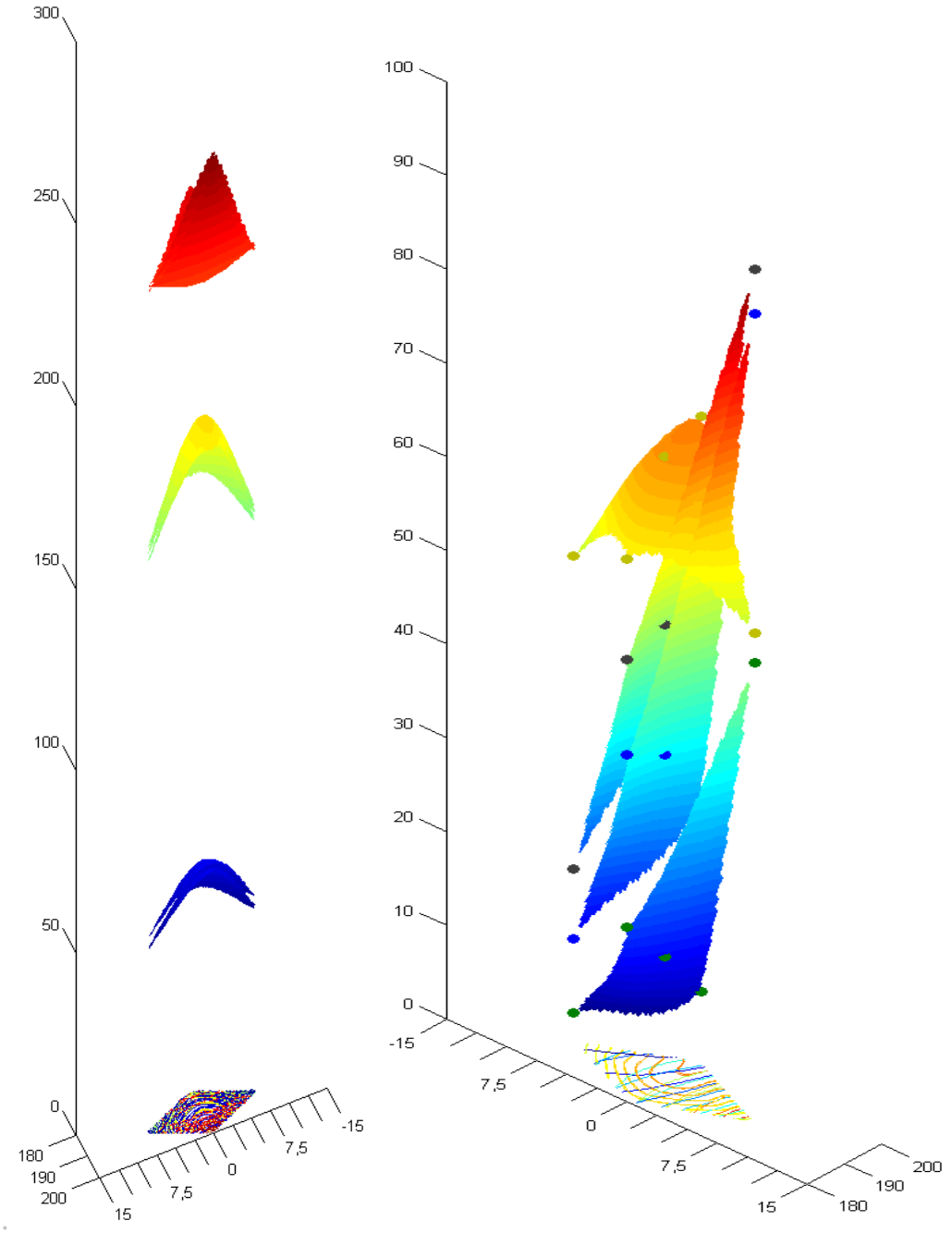
Taulukko R2012_02 *Uusien ja sisäänajautuneiden laakereiden reunakuormitusmittaustuloksia, u 2 m/s ja P_{proj} 6 MPa.*

M_R [Nm]	M_{R_suht} [%]	T [°C]	μ_{Stri} [10^{-4}]	μ [10^{-3}]	μ_{mod} [10^{-3}]	H [µm]
R2013_02 1. ajo						
0,371	0,224	52,720	1,244	2,754	2,754	0,260
23,106	13,940	53,018	1,228	2,787	2,856	9,938
44,393	26,779	53,452	1,202	2,920	3,179	18,194
62,803	37,873	54,287	1,155	3,139	3,721	27,290
82,375	49,593	55,114	1,109	3,402	4,349	36,477
100,278	60,158	56,392	1,041	3,764	5,223	48,931
119,169	70,921	58,330	0,946	4,323	6,552	75,221
140,588	82,548	59,491	0,886	3,816	5,671	170,978
-1,401	-0,835	54,581	1,126	2,844	3,196	19,850
R2012_02 2. ajo						2,8750
1,181	0,716	53,609	1,199	2,875	2,875	0,010
23,115	14,017	54,273	1,162	3,039	3,291	13,668
42,551	25,796	55,193	1,113	3,283	3,897	25,764
63,367	38,355	56,444	1,048	3,664	4,814	41,126
84,100	50,731	57,372	1,001	3,906	5,411	58,159
100,859	60,629	57,562	0,989	3,941	5,510	76,705
123,256	73,122	56,915	1,005	3,698	4,985	124,127
140,464	81,988	59,043	0,898	4,231	6,307	170,297
0,147	0,091	54,602	1,164	2,858	2,924	1,913

Taulukko R2012_03 *Uusien ja sisäänajautuneiden laakereiden reunakuormitusmittaustuloksia, u 2 m/s ja P_{proj} 6 MPa.*

M_R [Nm]	M_{R_suht} [%]	T [°C]	μ_{Stri} [10^{-4}]	μ [10^{-3}]	μ_{mod} [10^{-3}]	H [µm]
R2012_03 1. ajo						
0,916	0,562	53,746	1,200	2,684	2,684	-0,002
22,161	13,613	53,929	1,190	2,713	2,764	8,327
41,501	25,526	54,256	1,173	2,812	2,999	16,729
62,917	38,678	55,015	1,131	3,035	3,539	26,815
82,879	50,562	55,971	1,074	3,281	4,160	36,536
101,975	62,000	57,344	1,005	3,713	5,178	48,119
121,016	73,084	59,176	0,919	4,236	6,417	70,457
130,607	77,614	61,846	0,805	5,289	8,778	143,865
-2,812	-1,749	54,864	1,153	2,707	2,839	14,626
R2012_03 2. ajo						
0,075	0,047	54,373	1,187	2,767	2,699	-0,003
26,287	15,754	54,915	1,108	2,835	3,022	15,431
42,579	25,529	55,692	1,069	2,991	3,428	26,388
61,514	36,783	56,975	1,005	3,321	4,241	39,343
82,307	48,922	58,339	0,939	3,794	5,345	55,783
102,937	60,714	59,984	0,866	4,224	6,379	80,130
123,724	72,253	60,990	0,821	4,431	6,901	111,173
142,995	83,051	60,363	0,839	3,691	5,378	185,665
1,306	0,797	56,162	1,064	2,802	3,061	8,276

LIITE B HAVAINNE HYDRODYNAAMISESTA PAINEJAKAUTUMASTA



Kuva *Havainne voitelupainemittaustuloksista, vasemmalla ilman reunakuormitusta mitatut kitka-ajot koottuna ja oikeanpuoleinen kuva 2 MPa reunakuormitusajosta. Kuvaajien akselit: voitelupaine(bar), pyörähdyssuunta(°) ja laakeripituus(mm).*

LIITE C LASKENTA- JA ASETUSARVOT

Kaavaan 2-5 sijoitetaan voiteluaineen vertailuviskositeetti η_x $0{,}18x10^{-3}$Pa $*$ s ja tiheys ρ on 900 kg/m^3. Kaavassa 3-2 P_{proj}. lasketaan projektio-alalle 60x30 mm^2.

Taulukossa esitetään kiertovoitelun asetusparametrit testilaakereille.

Taulukko kiertovoitelun asetusparametreista.

Öljyn syöttöpaine[MPa]:	0,05-0,35
Öljyn sisäänsyöttö lämpötila [℃]:	50
Laakerien asetuskulma [deg]:	20
Öljytyyppi:	Mineraaliöljy
Öljyn suodatusaste [µm]:	10

LIITE D KOEKAPPALEET

Taulukko koekappaleet. *Ra pinnankarheus, D halkaisijamitta asennettuina ja* σ_x *mittausten keskihajonta.*

$Tunniste$	Ra (σ_x) [µm]	D (σ_x) [mm]
R2012_01		
11R05	0,29 (0,01)	60,060 (0,002)
11R07	0,28 (0,01)	60,065 (0,002)
11R08	0,29 (0,01)	60,063 (0,002)
11R06	0,29 (0,01)	60,059 (0,002)
Akseli 11R01	0,28 (0,03)	-
R2012_02		
11R24	0,29 (0,01)	60,051 (0,002)
11R09	0,28 (0,01)	60,066 (0,002)
11R16	0,29 (0,01)	60,062 (0,003)
11R17	0,29 (0,01)	60,052 (0,003)
Akseli 11R13	0,28 (0,02)	-
R2012_03		
11R34	0,31 (0,01)	60,058 (0,002)
11R33	0,28 (0,01)	60,079 (0,002)
11R36	0,22 (0,01)	60,071 (0,004)
11R35	0,30 (0,01)	60,057 (0,002)
Akseli 11R10	0,28 (0,02)	-
R2012_04		
11R24	0,29 (0,01)	60,058 (0,002)
11R09	0,28 (0,01)	60,071 (0,000)
11R16	0,29 (0,01)	60,058 (0,003)
11R17	0,29 (0,01)	60,058 (0,002)
Akseli 11R12	0,27 (0,02)	-
T03		
4R03	0,34 (0,02)	60,062 (0,003)
4R04	0,35 (0,01)	60,045 (0,004)
4R07	0,37 (0,02)	60,040 (0,004)
4R02	0,29 (0,01)	60,064 (0,002)
Akseli 4R02	0,13 (0,02)	-