

LUT-yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

VIERINTÄLAAKEREIDEN JÄLKIVOITELUN TUTKIMUS

STUDY OF RELUBRICATION IN ROLLING BEARINGS

Lappeenrannassa 11.5.2021

Taneli Salonen

Tarkastaja TkT Kimmo Kerkkänen

Ohjaaja Ins Marko Tuuha

TIIVISTELMÄ

LUT-yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Taneli Salonen

Vierintälaakereiden jälkivoitelun tutkimus

Kandidaatintyö

2021

52 sivua, 14 kuvaa, 7 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastaja: TkT Kimmo Kerkkänen

Ohjaaja: Ins Marko Tuuha

Hakusanat: Sähkömoottori, vierintälaakeri, rasvavoitelu, rasvan ikääntyminen, jälkivoiteluväli, rasvamäärä

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia sähkömoottoreissa käytettävien rasvavoideltujen vierintälaakereiden jälkivoitelua. Tutkimuksessa keskityttiin jälkivoiteluvälin pituuteen eli rasvan ikääntymiseen vaikuttavien tekijöiden sekä jälkivoitelussa tarvittavien tietojen, kuten lisättävän rasvamäärän tutkimiseen. Tutkimuksista saatujen tulosten perusteella työssä rakennettiin Excel -pohjainen laskentaohjelmisto, jolla on mahdollista laskea rasvavoidelluille vierintälaakereille jälkivoiteluväli sekä lisättävän rasvan määrä. Työn toimeksiantajana toimi Danfoss Editron Oy, joka on erikoistunut sähköisten voimansiirtojärjestelmien valmistamiseen.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Taneli Salonen

Study of relubrication in rolling bearings.

Bachelor's thesis

2021

52 pages, 14 figures, 7 tables and 2 appendice

Examiner: D. Sc. (Tech.) Kimmo Kerkkänen

Supervisor: Eng. Marko Tuuha

Keywords: Electric motor, rolling bearing, grease lubrication, grease aging, grease amount.

The aim of this bachelor's thesis was to study the relubrication of grease-lubricated rolling bearings used in electric motors. The main study was to investigate the factors that has an influence in the relubrication interval as well as study the necessary factors needed for relubrication, such as the amount of grease added to the rolling bearing. Based on the results obtained from the studies, an Excel-based calculation software was built. The software makes it possible to calculate the relubrication interval for grease-lubricated rolling bearings and the amount of grease to be added. The work was commissioned by Danfoss Editron Oy, which specializes in manufacture of electric transmission systems.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT.....	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
SYMBOLILUETTELO.....	6
LYHENNELUETTELO.....	8
1 JOHDANTO.....	9
1.1 Tausta.....	9
1.2 Työn tavoite	9
1.3 Tutkimusmenetelmät	10
1.4 Työn rajaus	10
2 KIRJALLISUUSKATSAUS.....	11
2.1 Sähkömoottorin laakerointi.....	11
2.1.1 Vierintälaakereiden kestoiän laskenta	13
2.2 Kulumisteoria.....	14
2.3 Voiteluteoria	16
2.3.1 Voiteluaineen tehtävä laakerissa.....	16
2.3.2 Voiteluolosuhteet	16
2.4 Voitelurasvat.....	18
2.4.1 Perusöljy	19
2.4.2 Saennin ja lisäaineet.....	21
3 TULOKSET	22
3.1 Vierintälaakerin jälkivoitelun tutkiminen.....	22
3.1.1 Rasvan peruskäyttöikä	23
3.1.2 Kuormitus	25
3.1.3 Lämpötila.....	26
3.1.4 Laakerin värinä ja sysäyskuormitus.....	29
3.1.5 Oskilloiva liike.....	30
3.1.6 Epäpuhtaudet	31
3.1.7 Akselin asento.....	32

3.1.8	Jälkivoitteluväli.....	33
3.1.9	Rasvamäärä.....	33
3.1.10	Rasvojen sekoitettavuus.....	36
3.2	Laskentaohjelmiston kehittäminen	36
3.2.1	Laskentaohjelmiston rakenne	37
3.2.2	Voitelurasvan peruskäyttöään ja voiteluvälin määrittäminen	40
4	TULOSTEN ANALYSOINTI	43
4.1	Jälkivoiteluun vaikuttavien tekijöiden analysointi	43
4.2	Laskentaohjelmiston käytettävyyden analysointi	45
5	YHTEENVETO	47
	LÄHTEET	49
	LIITTEET	
	LIITE I: Alkuarvot	
	LIITE II: Tulokset	

SYMBOLILUETTELO

λ	Voitelukalvon ominaispaksuus
σ	Pinnankarheuden RMS-arvo
κ	Viskositeettisuhde
ν	Voiteluaineen kinemaattinen viskositeetti [mm ² /s]
ν_l	Voiteluaineen suhteellinen viskositeetti [mm ² /s]
B	Laakerin leveys [mm]
b_f	SKF:n käyttämä laakerikerroin
C	Laakerin dynaaminen kantavuusluku [kN]
C_0	Laakerin staattinen kantavuusluku [kN]
C/P (C_0/P)	Laakerin kuormitusuhde SKF, (FAG)
D	Laakerin ulkokehän halkaisija [mm]
d	Laakerin sisäkehän halkaisija [mm]
d_m	Laakerin keskihalkaisija [mm]
e	Aksiaalikuorman suhde radiaalikuormaan
F_a	Aksiaalikuorma [kN]
F_r	Radiaalikuorma [kN]
h_{min}	Voiteluainekalvon paksuus
k_f	Laakerityyppikerroin, FAG
L_{10}	Vierintälaakerin nimellinen kestoikä, miljoonina kierroksina
L_{10h}	Vierintälaakerin nimellinen kestoikä [h]
m	Laakerin massa [kg]
M	Jälkivoitelussa lisättävän rasvan määrä [g]
$M2$	Jälkivoitelussa lisättävän rasvan määrä, erittäin lyhyt voiteluväli [cm ³ /h]
n	Pyörimisnopeus [r/min]
p	Kestoikälaskelmissa käytettävä laakerityyppikerroin
P	Dynaaminen ekvivalenttikuormitus [kN]
t_f	Jälkivoiteluväli [h]
t_1	Laakerin sisäkehän lämpötila [°C]
t_2	Laakerin ulkokehän lämpötila [°C]
t_{max}	Voitelurasvan ylälämpötilaraja [°C]

t_{min}	Voitelurasvan alälämpötilaraja [°C]
$t_{uplimit}$	Voitelurasvan jatkuvan käytön lämpötilaraja [°C]
V	Laakerin vapaatila [m ³]
x	Jälkivoiteluvälin pituudesta riippuvainen kerroin
X	Laakerikohtainen kerroin säteen suuntaisille kuormituksille
Y	Laakerikohtainen kerroin akselin suuntaisille kuormille

LYHENNELUETTELO

<i>AW</i>	Anti Wear kulumisenestolisäaine
<i>D-end</i>	Drive-end (moottorin käyttöpää)
<i>EHD</i>	Elastohydrodynaaminen voitelu
<i>EP</i>	Extreme pressure paineenkestolisäaine
<i>hd</i>	hydrodynaaminen voitelu
<i>ND-end</i>	Non-drive-end (moottorin vapaa pää)
<i>NLGI</i>	National lubricating Grease Institute, rasvan kovuusluokitus

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Tämä kandidaatintyö on tehty Danfoss Editron Oy:lle. Danfoss Editron Oy on Danfoss-konserniin kuuluva yhtiö, joka on erikoistunut sähköisten voimansiirtojärjestelmien valmistamiseen. Danfoss Editron kehittää ja valmistaa hybridi- sekä täyssähkömoottoreita raskaisiin ajoneuvoihin. Käyttökohteita ovat muun muassa linja-autot, hissit, isot työkoneet ja meriliikenteen sovellukset. Yksi Danfoss Editronin toimipisteistä sijaitsee Lappeenrannassa.

1.2 Työn tavoite

Työn tavoitteena on tutkia rasvavoideltujen vierintälaakereiden jälkivoitelua. Pää tutkimuskohteena on vierintälaakereiden uudelleenrasvausväliin vaikuttavien parametrien selvittäminen sekä laakereihin lisättävä rasvamäärä. Tutkimuksesta saatujen tulosten avulla rakennetaan Excel-pohjainen laskentaohjelmisto, jolla rasvausvälin laskeminen vaihteleville olosuhteille ja laakereille on mahdollista. Tavoitteena on, että Excel-ohjelmistoa pystytään tulevaisuudessa käyttämään laakereiden rasvausvälien määrittämiseen ja täten osana yrityksen valmistamien koneiden kunnossapitosuunnitelmaa. Alla olevassa kuvassa 1 on esitetty yrityksen standardikonesarjan sähkömoottoreita, joissa tässä työssä kerättyjä tietoja tullaan hyödyntämään.



Kuva 1. Danfoss Editronin standardikonesarjan sähkömoottoreita. (Danfoss Editron)

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan rasvausvälin pituuteen vaikuttavia parametrejä, ja vertaillaan parametrien vaikutusta sähkömoottoreissa käytettäviin vierintälaakereihin. Vaikuttavien parametrien selvittämiseksi ja ymmärtämiseksi työssä on perehdyttävä pintaa syvemmin laakeri- sekä voiteluteoriaan. Teoriaosuuden aineistona käytetään suurimmaksi osaksi laakeri- sekä voiteluainevalmistajien määrittämiä raportteja, tutkimuksia ja laskentakaavoja. Valmistajilta saatavaa tietoa tuetaan tribologiaan ja konesuunnitteluun perustuvalla kirjallisuudella. Excel-ohjelmistossa käytettävät laskentayhtälöt pohjautuvat kirjallisuuskatsauksessa sekä jälkivoiteluvälin tutkimisessa kerättyihin tietoihin.

1.4 Työn rajaus

Työn tutkimuskohteena on rasvavoideltujen vierintälaakereiden jälkivoitelu. Kirjallisuuskatsauksessa sivutaan myös muita laakerityyppejä ja voitelutapoja johdonmukaisen esityksen takaamiseksi ja esitetyn teorian tukemiseksi. Kirjallisuuskatsauksessa käydään lävitse laakeri- kulumis- ja voiteluteorian perusteita, mutta teorioiden laajempaa käsittelyä ei tässä työssä tehdä työn rajaamiseksi. Yrityksen käyttämät laakerit ja käytettävä rasva on mitoitettu ja valittu yrityksen toimesta, jonka takia työssä ei syvennytä laakerien eikä rasvan valintaan liittyvään teoriaan tarkemmin, kuin mitä jälkivoiteluun liittyvän tutkimuksen mahdollistamiseksi on tarpeellista.

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

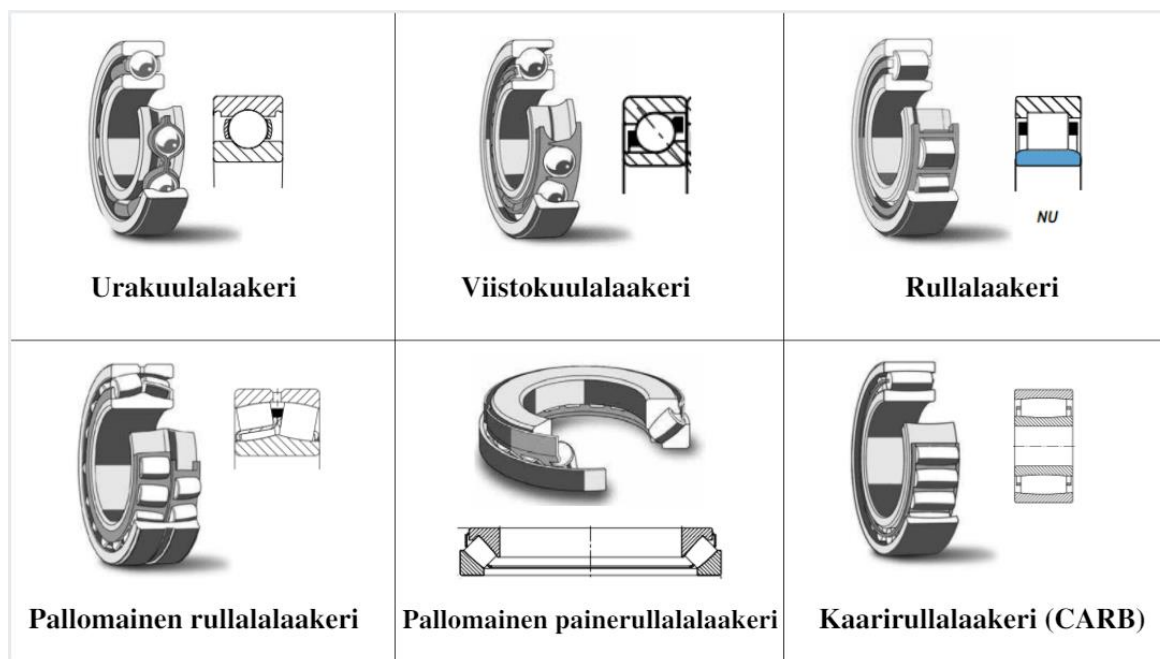
2.1 Sähkömoottorin laakerointi

Sähkömoottori on sähköenergiaa liike-energiaksi muuttava kone, jossa sähköenergian muutos mekaaniseksi energiaksi tapahtuu akselin mukana pyörivän roottorin ja paikallaan pysyvän staattorin välisen sähkömagneettisen yhteyden avulla (Motiva 2020). Laakeroinnin tehtävä sähkömoottorissa on pyörimisliikkeen mahdollistaminen ilman suuria energianhäviöitä, voiman siirtäminen akselilta moottorille sekä koneenosien erityisesti staattorin ja roottorin ohjaaminen ja tukeminen. Sähkömoottoreissa laakerointi osoittautuu erityisen tärkeäksi sen ollessa ainoa staattorin ja roottorin yhdistävä mekaaninen komponentti. (Engelmann R. & Middendorf W 1995, s. 630).

Laakerimalleja on aikojen saatossa kehitetty runsaasti erilaisiin käyttökohteisiin ja tarkoituksiin. Yleisimpiä tekijöitä, jotka otetaan huomioon laakereita valittaessa ovat laakeriin kohdistuvien kuormien suuruus ja suunta, pyörimisnopeus, tilantarve, rakenteen värähtely, ympäristöolosuhteet, melurajoitteet, elinikä sekä laakerilta vaadittava tarkkuus (Airila et al 2009, s. 417). Usein laakeria valittaessa onkin otettava huomioon monien tekijöiden yhteisvaikutus sekä käyttökohteen vaatimukset, kuten hiljaisuus. Laakerimallit voidaan karkeasti jakaa toimintaperiaatteensa mukaan liuku- ja vierintälaakereihin sekä kuormituksen mukaan säteis- ja aksiaalilaakereihin. Tukivoimien vaikuttaessa akselia vastaan kohtisuorassa suunnassa puhutaan säteislaakereista, ja akselin suuntaan vaikuttaessa aksiaalilaakereista. Vierintälaakereissa vierintäeliminä toimii esimerkiksi kuulat, rullat tai neulat, kun taas voideltavaksi tarkoitetuissa liukulaakereissa akselin ja laakerin välissä oleva voiteluainekalvo. (Kivioja 2004, s. 233).

Yleisesti sähkömoottoreiden laakerointi koostuu ohjaavasta ja vapaasta laakerista sekä tarvittaessa kolmannesta akselia tukevasta laakerista. Ohjaavan laakerin tehtävänä on ottaa vastaan akselin suuntaiset kuormitukset, kun taas vapaa laakeri mahdollistaa akselin vapaan siirtymisen, joka johtuu esimerkiksi valmistusepätkäarkkuuksista tai rakenteen lämpölaajenemisesta. Sähkömoottoreissa käytettäviä laakereita nimetään niiden sijainnin mukaan D-pääksi (Drive-end) ja ND-pääksi (Non-Drive-end). D-pää tarkoittaa sähkömoottorin päätä, jonka suunnasta moottorissa syntyvä liike-energia välitetään

eteenpäin. Sähkömoottoreissa käytettäviä yleisimpiä vierintälaakerityyppejä on esitetty alla olevassa kuvassa 2.



Kuva 2. Sähkömoottoreissa yleisimmin käytettyjä vierintälaakerityyppejä. (SKF, Bearings and mounted products 2018)

Ura- ja viistokuulalaakerit ovat suosittuja sähkömoottoreissa, koska ne kestävät hyvin sekä säteen- että akselin suuntaisia kuormituksia ja korkeita kierrosnopeuksia. Urakuulalaakereille on ominaista alhainen kitkakerroin, hiljaisuus sekä kustannustehokkuus. Viistokuulalaakereita käytetään erityisesti ohjaavana laakereina pystysuuntaisissa akseleissa sekä kohteissa, joissa esiintyy suuria akselin suuntaisia kuormituksia. Rullalaakereita on tapana käyttää vapaana laakerina kohteissa, joissa esiintyy suuria säteisvoimia. Pallomaisten rullalaakerien ominaisuutena on niiden kyky kantaa korkeita kuormia sekä kulma- asennoituvat rullat, jotka mahdollistavat niiden käyttämisen kohteissa, joissa akselin ja laakeripesän välillä on mahdollisia yhdensuuntaisuuseroja. Kaarirullalaakerit kestävät hyvin aksiaalisuuntaisia voimia sekä ovat kulma- asennoituvia. Painerulla- ja painekuulalaakerien käyttö kohdistuu tilanteisiin, joissa laakeriin kohdistuu vain akselin suuntaisia voimia. (SKF 2013, s. 20...36)

Laakerivalintaa tehdessä on tärkeää huomioida myös laakerin välys sekä tiivistys. Radiaalisessa suunnassa välystä kuvataan laakerikoolin ja vierintäelimen väliin jäävän vapaana tilana, ja aksiaalisuunnassa vierintäelimen kykynä liikkua koolin sisällä (SKF 2013,

s. 15). Laakerin välyksen tunnuskirjain on C, johon liitetään numero 1-5 laakerin välyksen suuruuden perusteella. C1 ja C2 kuvaavat normaalivälystä pienempiä välyksiä ja C3-C5 väljempiä laakereita (SKF, Internal clearance). Sähkömoottoreissa yleinen käytettävä välys on C3, johtuen mahdollisesta lämpötilaerosta laakerin sisä- ja ulkorenaan välillä. Laakereilta vaadittavassa välyksessä esiintyy tapauskohtaisia eroja pyörimisen tarkkuudesta ja moottorin koosta riippuen (SKF 2013, s. 15). Yleissääntönä laakerin välykselle on, että mitä tarkempaa pyörimisliikettä laakerilta vaaditaan, sitä pienempi laakerivälitys otetaan käyttöön. Laakerien tiivistys pyrkii estämään pölyn ja kosteuden pääseminen laakerin sisälle sekä voiteluaineen vuotaminen laakerista pois vaikuttamalla mahdollisimman vähän laakerin toimintaan esimerkiksi lisäämällä kitkaa (Airila et al, s. 636). Tiivisteen valinnassa on huomioitava käytettävän voiteluaineen sopivuus tiivistemateriaalin kanssa, akselin asento, pyörimisnopeus, paine-erot, lämpötila ja ympäristöolosuhteet (SKF 2013, s. 57)

2.1.1 Vierintälaakereiden kestoiän laskenta

Vierintälaakereille on mahdollista laskea kestoikä, jos tiedetään käytössä olevan laakerin tyyppi sekä laakeriin kohdistuvat kuormitukset. Vierintälaakerien nimellinen kestoikä L_{10} kuvaa kierrosten lukumäärää, jonka 90 % samanlaisia laakereita kestäisi vallitsevissa olosuhteissa. (Salonen 2014, s. 299). Jos vierintälaakerin kestoikä on suurempi kuin käytettävän rasvan käyttöikä, on jälkivoitelulle tarvetta laakerin kestoiän maksimoimiseksi. Vierintälaakerin kestoiän laskeminen on mahdollista alla olevan kaavan avulla.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p, \quad (1)$$

missä L_{10} = nimellinen kestoikä miljoonina kierroksina

C = Dynaaminen kantavuusluku [N]

P = Laakerin ekvivalenttikuormitus [N]

p = Laakerityyppikerroin, kuulalaakereille 3 ja rullalaakereille 10/3.

Pyörimisnopeuden ollessa vakio, selkeämpi tapa nimelliskäyttöiän laskemiseen on laskea laakerin kestoikä käyttötunteina seuraavasti: (Salonen 2014, s. 299)

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \times n} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p, \quad (2)$$

missä n = pyörimisnopeus [rpm]

Dynaaminen kantavuusluku C on laakerikohtainen arvo, joka kuvastaa käytössä olevan laakerin kykyä kestää kuormituksia. Laakerivalmistajat ilmoittavat laakereille sekä dynaamisen- että staattisen kantavuusluvun. Dynaaminen kantavuusluku kuvaa kuormaa, jolla laakerin on mahdollista pyöriä 1 000 000 kierrosta ilman laakerivaurioita. Staattinen kantavuusluku C_0 kuvaa kuormaa, jolla hitaasti pyörivän laakerin kuormittunein kohta muuttuu muotoaan 0,0001 laakerin halkaisijasta pysyvästi (MRC 2015, s. 269). Laakerin ekvivalenttikuormitus P on laakeriin kohdistuvien kuormien summa. Kestöiän sekä myöhemmin luvussa 3.1.2 esille tulevan kuormitussuhteen laskennassa tarvittava ekvivalentti laakerikuormitus saadaan laskettua mekaniikan lainalaisuuksien avulla, kun laakeriin kohdistuvat voimat aksiaali- ja radiaalisuunnassa tiedetään. Jos laakeriin kohdistuvan laakerikuormituksen suunta- ja suurus ovat vakioita, sekä voima vaikuttaa säteislaakerissa säteen suuntaan, ja aksiaalilaakerissa akselin suuntaan, $P = F$. Jos näin ei ole, täytyy laakerille laskea ekvivalentti dynaaminen kuormitus seuraavasti. (Airila et al, s. 452)

$$P = XF_r + YF_a, \quad (3)$$

missä F_r = kuormituksen säteiskomponentti

F_a = kuormituksen aksiaalikomponentti

X = laakerikohtainen kerroin säteen suuntaisille kuormituksille

Y = laakerikohtainen kerroin akselin suuntaisille kuormille

Laakerikohtaiset kertoimet X ja Y on saatavilla laakerivalmistajan luetteloista. Radiaalikuulalaakereissa, kuten yksirivisessä urakuulalaakerissa aksiaalivoima otetaan huomioon vasta silloin, kun aksiaalikuormitus suhteutettuna radiaalikuormitukseen F_a/F_r on suurempi kuin laakerivalmistajan määrittämä lukuarvo e . (Airila et al, s. 452).

2.2 Kulumisteoria

Toisiaan vastaan liikkuvien pintojen keskinäinen vuorovaikutus voi johtaa kulumiseen eli materiaalihäviöön kappaleen/kappaleiden pinnalta. Kulumista esiintyy erityisesti pyörivässä liikkeessä olevissa koneenosissa kuten laakereissa ja hammaspyörissä. (VTT 200, s. 4). Kulumisen luokitellaan useimmiten haitalliseksi ilmiöksi ja materiaalihukaksi, ja sen kansantaloudelliset vaikutukset ovat merkittäviä. VTT:n teettämän tutkimuksen mukaan jopa 23 % maailman energiakulutuksesta on peräisin tribologisista tekijöistä eli kitkasta ja kulumisesta. (Holmber, Edmerir 2017, s. 1).

Kuluminen luokitellaan yleisesti joko kulumista aiheuttavan suhteellisen liikkeen tai kulumismekanismin mukaan. Suhteellisen liikkeen pohjalta kulumista aiheuttavia liiketyyppejä ovat liukuminen, vierintä, iskukuormitus, värähtely, nestevirtaus sekä nestevirtaus kiinteillä partikkeleilla. Yleistynyt tapa kulumismekanismien avulla tehtävään luokitteluun DIN 50320 standardin mukaisesti on luokitella kuluminen adesiivisen-, abrasiivisen-, väsymis-, ja tribokemiallisen kulumisen välillä (VTT 2000, s. 5; Kivioja et al. 2004, s. 102). Kappaleiden kosketuksessa kuluminen voi tapahtua usealla eri mekanismilla, joista yhden mekanismin katsotaan olevan hallitseva kulumisen kannalta (Kivioja et al. 2004, s. 100).

Adhesiivisessä kulumisessa eli hankauskulumisessa toisiaan vastaan vierivät pinnat ovat tarttuneet toisiinsa, ja kappaleiden kitkaliitokset tai pinnankarheudet ovat leikkautuneet yhteen. Pintojen välisen liitoksen revetessä muualta kuin kappaleiden rajapinnasta materiaalia siirtyy pinnalta toiselle ja syntyy kulumista. (VTT 2000, s. 7). Abrasiivisessa kulumisessa eli hiontakulumisessa toisiaan vastaan olevista kappaleista toisen kovuus on suurempi, jolloin kovemman kappaleen pinnan huiput sekä terävät kärjet kuluttavat pehmeämpää materiaalia (Kivioja et al. 2003, s. 109). Tribokemiallisessa kulumisessa vastinpintojen välille muodostuu kemiallisen reaktion aiheuttama kerros, kuten hapettumisen aiheuttama oksidikerros, joka pintojen suhteellisen kulumisen seurauksena kuluu ja rikkoutunut pinta reagoi ympäristön kanssa uudelleen aiheuttaen kulumista. (Hitsaustekniikka, s. 22). Väsymiskulumisessa kosketuspintoihin kohdistuvat kuormitukset, plastiset deformaatiot ja diskollaatioliikkeet voivat aiheuttaa kappaleen pinnalle säröjä, jotka aiheuttavat kulumispartikkelin irtoamisen kappaleen pinnalta. (VTT 2000, s. 9).

Laakereissa liuku- ja vierintäpintojen erottaminen toisistaan kokonaan voitelukalvon avulla mahdollistaa hankaus- ja hiontakulumisen estämisen vastinpintojen välillä. Lisäksi oikeinlaisella voiteluaineella vastinpintojen hapettuminen sekä muut kemialliset reaktiot ovat vähäisempiä. Väsymiskulumisen ilmeneminen ilman pintojen fyysistä kosketusta on kuitenkin mahdollista, minkä takia laakerin ja käytettävän rasvan oikeaoppinen valinta käyttökohte huomioiden on erityisen tärkeää. (VTT 2000, s. 9).

2.3 Voiteluteoria

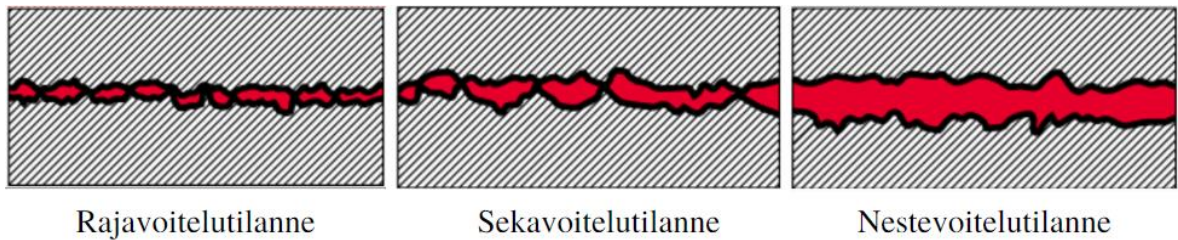
Laakereissa käytettävän rasvan oikeaoppisella valinnalla, oikealla määrällä sekä rasvan vaihtamisella rasvan ikääntyessä on merkittävä vaikutus laakerin toimintaan. Laakeri- ja rasvavalmistajan FAG:n teettämän tutkimuksen mukaan jopa 55 % laakerivaurioista on suoraan kytköksissä voitelussa tapahtuneisiin virheisiin, joita ovat muun muassa vääränlainen voiteluaine, voiteluaineen ikääntyminen, ja voiteluaineen puutteellisuus (Schaeffler Group 2013, s. 64). Oikeaoppisella ja hyvin suunnitellulla voitelulla voidaan suoraan vaikuttaa laitteiden kunnossapitokustannuksiin sekä varmistaa, että koneissa käytettävät laakerit toimivat pitkään ja luotettavasti.

2.3.1 Voiteluaineen tehtävä laakerissa

Voiteluaineen tehtävänä laakerissa on vastinpintojen kulumisen vähentäminen, kitkan pienentäminen, jäähdyttäminen, korroosion estäminen, tiivistäminen ja ei toivottujen partikkelien poistaminen laakerista. Vaihtelevat käyttökohteet ja olosuhteet asettavat voiteluaineille erilaisia vaatimuksia, jonka takia on olemassa laaja kirjo erilaisia voiteluaineita sekä tapoja voitelun suorittamiseksi. Yleisimmin laakerin voitelu tehdään joko öljyä tai voitelurasvaa käyttäen, mutta myös kiinteän aineen, kuten grafiitin tai kaasun, kuten ilman käyttäminen voiteluaineena on mahdollista. (Kivioja et al. 2004, s. 172)

2.3.2 Voiteluolosuhteet

Kitka- ja kulumisolosuhteet vierintälaakerissa riippuvat suuresti laakerissa vallitsevasta voiteluolosuhteesta. Optimaalisin voitelutilanne on nestevoitelu, jossa laakerissa liikkuvat osat on erotettu toisistaan kokonaan voitelukalvon avulla, jolloin pintojen välinen kitka on hyvin pientä. Jos kosketuksissa olevien pintojen väliin ei synny täydellistä nestevoitelukalvoa on kyse kosketusvoitelutilanteesta, jossa osa kuormasta kantautuu koskettavien pintojen välisten pinnankarheuksien avulla. Laakerissa vallitseva voitelutilanne jaotellaan kolmeen eri voitelualueeseen: rajavoiteluun, sekavoiteluun ja nestevoiteluun. (Kivioja 2004, s. 131; VTT 2004, s. 5). Voitelutilanteet on esitetty alla olevassa kuvassa 3.



Kuva 3. Voitelutilanteiden jaottelu. (FAG 1998, s. 3)

Laakerissa esiintyvää voitelualuetta voidaan arvioida voitelukalvon ominaispaksuuden λ avulla. Voitelukalvon ominaispaksuus saadaan laskettua seuraavasti:

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}, \quad (4)$$

jossa h_{min} = voiteluainekalvon paksuus

σ_1 ja σ_2 = vastakkaisten pintojen pinnankarheuksien RMS-arvot

σ_1 ja σ_2 saadaan selville, kun kappaleiden pinnankarheuksien keskipoikkeamien R_a -arvot kerrotaan 1,3:lla. Jos $\lambda \leq 1$ on kyse rajavoitelusta ja $\lambda > 4$ on kyse nestevoitelusta. Väliin jäävä alue kuvastaa sekavoitelutilannetta (Airila et al 2009, s. 422). Edellä esitetyn kaavan lisäksi voitelukalvon ominaispaksuus voidaan määrittää käytettävän öljyn, tai rasvavoitelussa rasvan perusöljyn viskositeettisuhteen κ avulla. Viskositeettisuhteen laskemiseen perehdytään tarkemmin kohdassa 4.3.1 Perusöljy.

Rajavoitelutilanteessa kappaleiden välissä oleva voitelukalvonpaksuus on äärimmäisen pieni, jonka takia toisiaan vasten liukuvien pintojen pinnankarheudet kantavat suuren osan kuormasta. Rajavoitelutilanteessa on tärkeää, että kappaleiden välille muodostuu kitkaa pienentävä pintakalvo, jonka muodostumista helpottaa esimerkiksi paineenestolisäaineen (EP) tai kulumisenestolisäaineen (AW) lisääminen voiteluaineeseen. Rajavoitelua esiintyy tilanteissa, joissa voitelumäärä on riittämätöntä, moottorin pyörimisnopeus pieni, kuormitukset suuria taikka voitelurasvan viskositeetti on pieni. (Opetushallitus)

Sekavoitelutilanteessa yhdistyy raja- ja nestevoitelun ominaisuudet. Osan esiintyvistä kuormista kantaa voitelukalvo, mutta pinnankarheuksien kautta välittyy vielä osa kuormituksista. Sekavoitelutilanteessa pienikin olosuhteiden muutos voi muuttaa voitelutilanteen raja tai nestevoiteluksi. Esimerkiksi lämpötilan kohoaminen

sekavoitelutilanteessa voi muuttaa voitelutilanteen rajavoitelutilanteeksi, ja pyörimisnopeuden kasvaminen puolestaan nestevoiteluksi. (Opetushallitus)

Nestevoitelutilanteessa voiteluaine erottaa toisiaan vastaan liikkuvat pinnat kokonaan toisistaan. Nestevoitelutilanteessa kitka on vähäistä ja materiaalien välillä esiintyvä kuluminen on pientä. Nestevoitelu jaotellaan yleisesti hydrodynaamiseen-, elastohydrodynaamiseen ja hydrostaattiseen voiteluun. Hydrodynaaminen voitelu (HD-voitelu) perustuu tilanteeseen, jossa laakerissa oleva neste muodostaa pintojen väliin hydrodynaamisen paineen, joka kantaa laakeriin kohdistuvia kuormia. (Kivioja 2004, s. 133). Elastohydrodynaamisessa voiteluteoriassa (EHD-voitelu) otetaan HD-voiteluteorian lisäksi huomioon materiaalien elastiset ominaisuudet sekä nesteen viskositeetista johtuva paineriippuvuus (VTT 2004, s. 6). EHD-voiteluteoriaa käytetään hyödyksi laakerien voiteluominaisuuksia laskiessa, koska yleisesti vierintälaakerit välittävät suuria kuormituksia pienten kosketuspinta-alojen kautta, jolloin elastiset muodonmuutokset ovat mahdollisia. Elastiset muodonmuutokset nopeuttavat materiaalin väsymistä. (Opetushallitus). Hydrostaattinen voitelu perustuu paineen muodostumiseen liukupintojen väliin, kun voiteluainetta tuodaan ulkoisen paineen avulla pintojen välissä sijaitsevaan taskuun. (VTT 2004, s. 6).

EHD-voiteluteoria on pääsääntöisesti tarkoitettu voiteluöljyllä voidelluille vierintälaakereille, mutta teorian lainalaisuudet ovat myös osittain käytössä rasvavoidelluissa vierintälaakereissa. Rasvavoitelussa nestemäinen perusöljy on sitoutunut saentimeen, eikä se virtaa laakerissa öljyvoitelun tavoin, jonka takia rasvavoidelluissa laakereissa voitelutilanne on yleisesti sekavoitelua (opetushallitus). Käytön aikana rasvavoidelluissa laakereissa rasva pyrkii työntymään laakerin sivuille, josta rasva luovuttaa jatkuvasti tarvittavan määrän perusöljyä toimintapintojen voiteluun. Öljyn luovutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat rasvalaatu, rasvan perusöljyn viskositeetti, lämpötila, öljyä luovuttavan pinnan suuruus sekä rasvan mekaaninen rasitus (FAG 1998, s. 12).

2.4 Voitelurasvat

Voitelurasvat ovat saentimen avulla plastiseen muotoon jalostettuja voiteluöljyjä, joihin on sekoitettu lisäaineita fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien parantamiseksi. Perusöljyn ja saentimen määrää, perusöljyn viskositeettia sekä lisäaineistusta vaihtelemalla

pystytään muodostamaan rasvoja eri käyttöolosuhteisiin. Voitelurasvan käytön kannalta tärkeitä ominaisuuksia, joiden perusteella käyttöön otettava rasva valitaan ovat muun muassa (VTT 2004, s. 7):

- rasvan kovuus
- viskositeetti
- Käyttäytyminen korkeissa ja alhaisissa lämpötiloissa
- öljyn erottuminen
- korroosion-, veden-, lämpötilan ja hapettumisenkestokyky

Voitelurasvojen kovuutta kuvataan NLGI (National Lubricating Grease Institute) -luokituksella. Rasvan kovuuden testaaminen tapahtuu siihen standardisoidulla mittalaitteistolla, josta saadut tulokset luokitellaan 000...6 välillä. 000 kuvastaa erittäin nestemäistä rasvaa, ja 6 erittäin kovaa (Teboil, Rasvavoitelun perusasioita). Vierintälaakereissa käytettäville rasvoille tyypillinen NLGI-luokka on yleensä 1...3 (Airila et al 2010, s. 439)

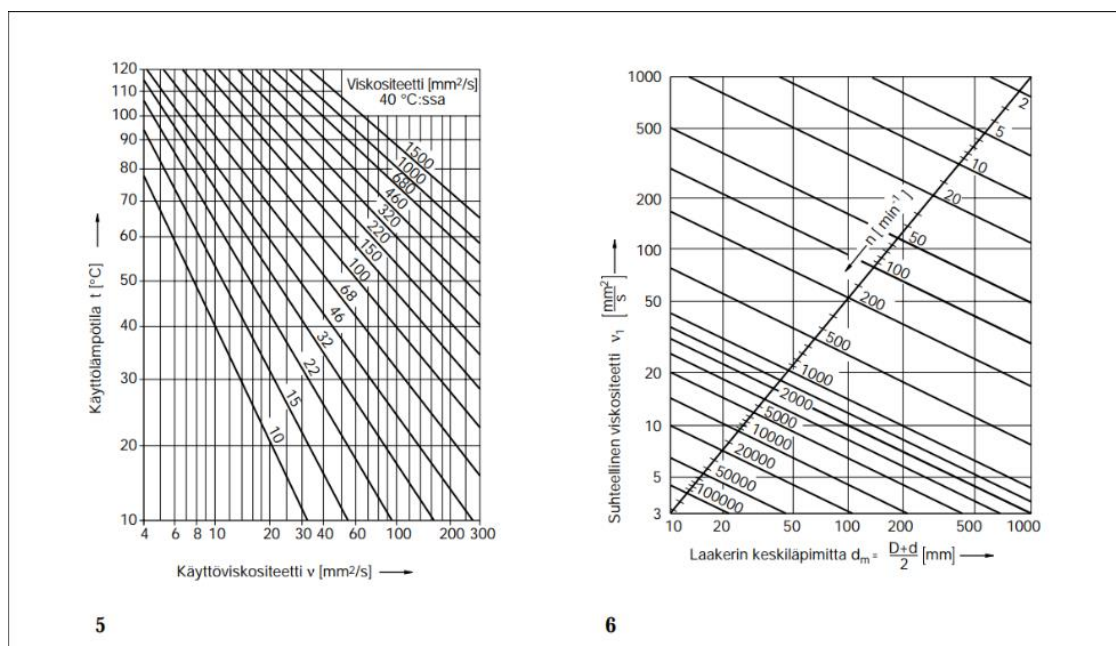
2.4.1 Perusöljy

Rasvoissa nestemäisen perusöljyn osuus on jopa 80–90 % rasvasta, jonka takia monet öljyvoitelulle olennaiset voitteluteoriat ovat sovellettavissa myös rasvavoiteluun. Perusöljyn suuresta osuudesta johtuen perusöljyllä on merkittävä vaikutus rasvan voiteluominaisuuksiin. Yleisimmin perusöljynä käytetään mineraaliöljyä tai synteettisiä öljyjä. Mineraaliöljyt ovat raakaöljystä jalostamalla valmistettuja, ja niiden hyviin ominaisuuksiin lukeutuu tiivistävällisyys sekä hyvä kyky liuottaa lisäaineita. Huonona puolena mineraaliöljyissä on voiteluominaisuuksien heikkeneminen normaalioloista poikkeavissa lämpötiloissa. Synteettiset öljyt ovat mineraaliöljyjä pidemmälle jalostettuja, ja niille on tyypillistä paremmat kylmyyden- sekä lämmönsieto-ominaisuudet. Synteettisten öljyjen käyttämisestä monessa kohteessa rajoittaa niiden korkeampi hinta. (Teboil, 2020).

Perusöljyn viskositeetilla on suuri vaikutus rasvan kuormankantokykyyn, virtausominaisuuksiin sekä kitka- ja kulumiskäyttämiseen. Mitä suurempi perusöljyn viskositeetti on, sitä paremmin rasva kantaa kuormia, mutta heikkenevän virtauskyvyn takia suurilla nopeuksilla sisäisen kitkan kasvu ja täten lämpötilan nousu on suurta. Rasvan

valinnassa periaatteena on, että käytettävän rasvan perusöljyn viskositeetti tulee olla yhtä suuri kuin samantyyppiseen, öljyvoideltuun kohteeseen valittavan öljyn viskositeetti (SKF 2003, s. 59).

Laakeri- sekä rasvavalmistajista SKF, FAG ja Klüber Lubricant ovat määrittäneet käyrästöt, joiden avulla rasvan suhteellinen vähimmäisviskositeetti saadaan selville. Vähimmäisviskositeetin määrittämiseksi on tiedettävä laakerin pyörimisnopeus, lämpötila sekä keskihalkaisija eli laakerin sisäkehän d ja ulkokehän D keskiarvo d_m . Kuvassa 4 oikealla puolella on esitetty käyrästö, jonka avulla saadaan määritettyä tarvittava perusöljyn suhteellinen viskositeetti v_1 . Vasemmalla kuvassa on esitetty mineraaliöljyjen viskositeetti-lämpötila-käyrästö (FAG 1998, s. 6). Käytettävän perusöljyn viskositeetti on myös mahdollista lukea rasvavalmistajan määrittämistä taulukoista. Kun perusöljyn suhteellinen viskositeetti v_1 , ja käytössä olevan perusöljyn viskositeetti v käyttökohteessa tiedetään, on mahdollista laskea viskositeettisuhde $\kappa = \frac{v}{v_1}$. Viskositeettisuhden avulla on mahdollista arvioida laakerissa esiintyvää voitelukalvonpaksuutta. Suhteen ollessa 2...4, kosketuspintojen väliin muodostuu täysin kantava voitelukalvo. Mitä pienempi κ :n arvo on, sitä suurempi on sekakitkan osuus ja sitä tärkeämmäksi oikean lisäaineistuksen valitseminen tulee (FAG 1998, s. 7).



Kuva 4. Vasemmalla mineraaliöljyjen viskositeettilämpötila-käyrästö, ja oikealla suhteellisen viskositeetin riippuvuus laakerikoosta ja pyörimisnopeudesta. Taulukoista saatavien viskositeettien avulla on mahdollista laskea viskositeettisuhde κ . (FAG 1998, s. 6)

2.4.2 Saennin ja lisäaineet

Saennin, toiselta nimeltään myös paksunnin muodostaa voitelurasvojen toisen perusrakenneposan. Saentimen tehtävä on pitää rasva koossa sekä jäykistää rasvaa, jonka ansioista rasva pysyy laakerissa. Saentimen osuus riippuen perusöljyn määrästä on 5–30 prosenttia rasvan tilavuudesta. Yleisimmin saentimena käytetään metallisaippuonia, tai metallikompleksisaippuonia. Metallisaippuonia ovat esimerkiksi litium, kalsium, natrium ja alumiini, joista litium on selkeästi eniten käytetty sen hyvien ominaisuuksien kuten lämmön- ja kosteudenkeston, korroosionsiedon sekä tiivistysominaisuuksien takia. Metallikompleksisaippuonia on yhdistetty montaa eri metallia, ja niillä onkin yleisesti metallisaippuonia paremmat voitelu- ja lämmönsietokyvyt. (SKF 2010, s. 183; Opetushallitus, voitelurasvat).

Lisäaineistuksen avulla pyritään parantamaan rasvan voiteluominaisuuksia sekä elinikää. Pienemmän voiteluainetilavuuden, ja voitelurasvalta usein vaadittavan pidemmän toimintaiän takia voiteurasvoihin lisätään yleisesti enemmän lisäaineita kuin voiteluöljyihin. (VTT 2004, s. 10). Lisäaineistuksella haettavia ominaisuuksia ovat muu muassa rasvan viskositeetin parantaminen, hapettumisen estäminen, korroosion estäminen, kulumisen vähentäminen, paineenkestämisen lisääminen, sekä lämmönsietokyvyn parantaminen (VTT 2004, s. 11; Opetushallitus, voitelurasvat).

3 TULOKSET

3.1 Vierintälaakerin jälkivoitelun tutkiminen

Laakereissa käytettäville rasvoille on tyypillistä, että ajan saatossa niiden voiteluominaisuudet heikkenevät eli rasva pääsee ikääntymään. Jos käytettävä voiteluaine pääsee ikääntymään, se ei pysty enää voitelemaan laakeria toivotulla tavalla, jolloin laakeri vaurioituu suhteellisen nopeasti (Schaeffler Technologies 2019, s. 17). Tilanteissa, joissa rasvan käyttöikä on lyhyempi kuin laakerille laskettu elinikä, laakerin jälkivoitelu on suositeltavaa (SKF 2003, s. 237). Onnistuneessa jälkivoitelussa huomioitavia seikkoja ovat voiteluvälin pituus, lisättävän voiteluaineen määrä, käytettävien rasvojen sekoitettavuus, sekä voitelutavan määrittäminen (VTT 2004, s. 15).

Rasvan käyttöiän määrittäminen pohjautuu suurelta osin laakeri- sekä rasvavalmistajien teettämiin testeihin valmistamillensa rasvoille. Eri rasvojen testaamiseen sekä eri tekijöiden vaikutukseen rasvan ikääntymiseen on rakennettu laitteistoja, joilla pystytään testaamaan käytettävien rasvojen ominaisuuksia ja vaihtelevien olosuhteiden vaikutuksia rasvojen ikääntymiseen. Rasvojen testaamiseen pohjautuvan teorian oletuksena on olosuhteiden pysyminen vakiona, sekä voitelurasvan oikea määrä laakerissa. Käytännössä tilanne on kuitenkin harvoin tällainen, minkä takia laskennallinen rasvan käyttöikä on vain likimääräinen ohjearvo (Schaeffler Technologies 2019, s. 18). Käyttöiän määrittäminen, laskennassa käytettävät käyrästöt sekä laskentayhtälöt vaihtelevat valmistajakohtaisesti, minkä takia tässä kappaleessa verrataan suosituimpien laakeri sekä rasvavalmistajien käyttämiä tapoja käyttöiän sekä rasvamäärän laskemiseen, sekä selvitetään mihin valmistajien antamat tiedot pohjautuvat.

Kaikista merkittävin tekijä laakerin käyttöiän sekä rasvan eliniän maksimoimisessa on käyttökohteesta riippuen oikeantyyppisen rasvan sekä laakerin käyttäminen. Väärin valittu rasva ikääntyy nopeammin, sekä toimii epäluotettavasti. Jos jokin alla mainituista tilanteista on laakerin toimiessa jatkuvaa eikä käytössä oleva rasva ole annettuihin oloihin soveltuvaa, suosituksena on vaihtaa rasva toiseen käyttökohteeseen sopivampaan, jolloin rasvan ikääntyminen on kontrolloitua ja jälkivoiteluvälin määrittäminen tarkempaa.

3.1.1 Rasvan peruskäyttöikä

Laakerivalmistajat ovat määrittäneet voitelurasvoille peruskäyttöiän, kun laakeri ja käytettävä rasva toimivat molemmille edullisessa toimintaympäristössä. Edullisessa toimintaympäristössä rasva toimii sille optimaalisessa ympäristössä, vaikuttavat kuormitukset ja kierrosluvut ovat vakioita eivätkä lämpötila, värinä, lika ja kosteus poikkea rasvalle ja laakerille määritellyistä edullisista olosuhteista (Schaeffler technologies 2019, s. 19). Laakerivalmistajat FAG ja SKF esittävät laakerin peruskäyttöikää käyrästoilla, jotka on esitetty kuvassa 5. SKF:n peruskäyttöiän käyrästo on määritetty 70 °C lämpötilassa toimivalle litiumpohjaiselle voitelurasvalle, jonka takia tilanteissa, joissa laakerissa käytetään laadukkaampia voitelurasvoja rasvan peruskäyttöikä voi olla taulukosta saatua arvoa suurempi. Voitelurasvan peruskäyttöikä saadaan selville, kun laakerikohtainen kierrostunnusluku tiedetään. Kierrostunnusluvun suuruus riippuu käytettävän laakerin koosta, laakerityypistä sekä moottorin pyörimisnopeudesta. Mitä suurempi laakeri on käytössä, ja mitä nopeammin laakeri pyörii, sitä nopeammin käytössä oleva voitelurasva ikääntyy. Kierrostunnusluvun laskemisessa käytettävä yhtälö on muotoa:

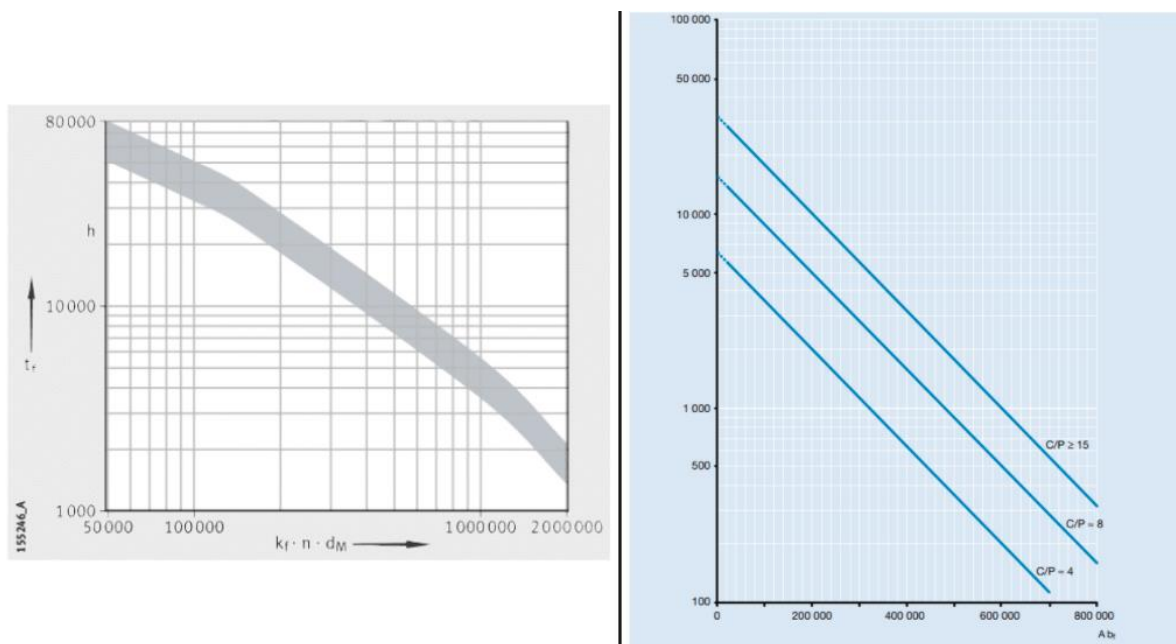
$$t_f = b_f \cdot n \cdot d_m \text{ [h]} \quad (5)$$

missä b_f = Laakerityypistä riippuva kerroin

Laakerityyppikertoimen avulla pyritään arvioimaan käytettävän laakerityypin vaikutusta rasvan ikääntymiseen. Kertoimen suuruuteen vaikuttaa muun muassa laakerin liukukitkaominaisuudet sekä sisäpinnan geometria (VTT 2003, s. 14). Mitä suurempi laakerityyppikertoimen arvo on, sitä lyhyempi on laakerin jälkivoiteluväli. Laakerityyppikertoimia on saatavilla laakerivalmistajien oppaista. SKF:n lyhenne laakerityyppikertoimelle on b_f ja FAG:n lyhenne k_f . Sähkömoottoreissa yleisimpien laakerityyppien kertoimia on esitetty kootusti alla olevassa taulukossa 1. SKF ottaa peruskäyttöiän määrittämisessä lisäksi huomion kuormitussuhteen C/P , jossa C kuvaa laakerikohtaista dynaamista kantavuuslukua, ja P ekvivalenttia dynaamista kuormitusta. Kuormitussuhteesta kerrotaan lisää luvussa 4.1.2 kuormitus.

Taulukko 1. SKF:n ja FAG:n määrittämiä laakerityyppikertoimia sähkömoottoreissa yleisille laakerityypeille. (Schaeffler Technologies 2013, s. 98; SKF 2013, s. 81)

Laakerityyppi	Laakerityyppikerroin k_f (FAG)	Laakerityyppikerroin b_f (SKF)
Urakuulalaakeri	1...1,5	1
Viistokuulalaakeri	1,6...2	1
Kartiorullalaakeri	2...5,3	1,5...4
Pallomainen rullalaakeri	8...10,5	2...6
Pallomainen painekuulalaakeri	3,6	4
Kaarirullalaakeri (CARB)	3,6	4



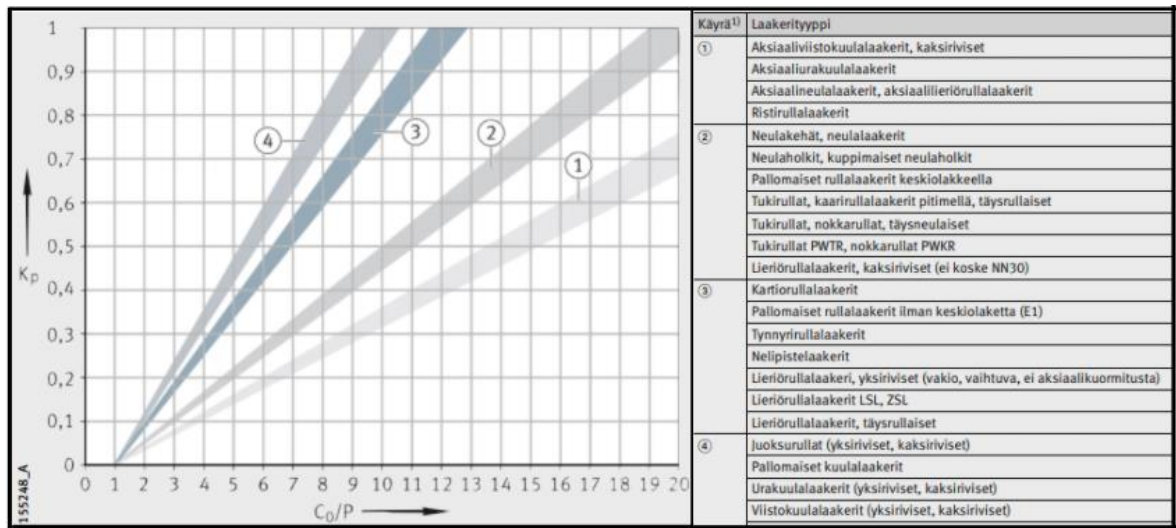
Kuva 5. Peruskäyttöiän määrittämisessä käytettäviä käyrästäjä. Vasemmalla FAG:n, ja Oikealla SKF:n käyrästä. (Schaeffler Technologies 2019, s. 19; SKF 2003, s. 238)

Tilanteissa, joissa laakeri ei toimi edullisessa ympäristössä, laskentayhtälöön lisätään vaihtoväliä lyhentäviä kertoimia. Vaihtovälin pituuteen vaikuttavia kertoimia on määritetty muun muassa korkealle kuormitukselle, lämpötilalle, epäpuhtauksille, tärinälle sekä keskipakoisvoimalle.

3.1.2 Kuormitus

Laakeriin kohdistuvien kuormitusten ollessa liian suurina käytössä olevalle laakerille rasvausvälin lyhentäminen on suositeltavaa. Laakereissa kuormituksen vaikutusta rasvan ikääntymiseen arvioidaan kuormitussuhteen avulla, joka saadaan selville, kun laakerin kohdistuvien ulkoisten kuormien suuruus ja suunta, sekä laakerikohtainen valmistajan laakeritaulukoista luettava kantavuusluku kuormitukselle tiedetään (Schaeffler Technologies 2019, s. 22). Sähkömoottoreissa laakereihin kohdistuvat kuormitukset koostuvat roottorin massasta, staattorin ja roottorin välillä olevasta sähkömagneettisesta vetovoimasta ja moottorilla tuotetun liike-energian siirtämisessä toiseen toimilaitteeseen (Engelmann R & Middendorf W 1995, s. 631). FAG käyttää kuormitussuhteen laskennassa staattista kantavuuslukua C_0 , ja SKF ja Klüber puolestaan dynaamista kantavuuslukua C . Kantavuusluvut C_0 ja C sekä ekvivalentti laakerikuormitus P selitettiin tarkemmin luvussa 2.1.1.

SKF ottaa kuormitussuhteen huomioon määrittäessään rasvalle peruskäyttöikä. FAG ottaa korkean kuormituksen huomioon kuvassa 6 vasemmalla esitetyn käyrästäön mukaan tilanteissa, kun kuormitussuhde $C_0/P < 20$ (Schaeffler technologies 2013, s. 100). Koska kuormankantokyvyssä sekä kuorman vaikutuksessa rasvan ikääntymiseen on laakerikohtaisia eroja, luokittelee FAG laakerit neljään eri luokkaan. Laakereiden luokittelu on esitetty alla olevassa kuvassa oikealla (Schaeffler technologies 2019, s. 19). Klüber ottaa korkean kuormituksen huomioon rasvausväliä lyhentävällä kertoimella. Klüberin korkean kuormituksen kertoimia on esitetty alla olevassa taulukossa 2.



Kuva 6. FAG:n käyrästä korkean kuormituksen kertoimen määrittämiseksi, sekä oikean käyrän valintaa helpottava taulukko. (Schaeffler technologies 2019, s. 22)

Taulukko 2. Klüberin määrittämiä, korkean kuormituksen huomioivia kertoimia. (Klüber lubrication, s. 17)

Kuormitussuhde	Korkean kuormituksen huomioiva kerroin
$C/P = 10 \dots 7$	1,0...0,7
$C/P = 7 \dots 4$	0,7...0,4
$C/P = 4 \dots 3$	0,4...0,1

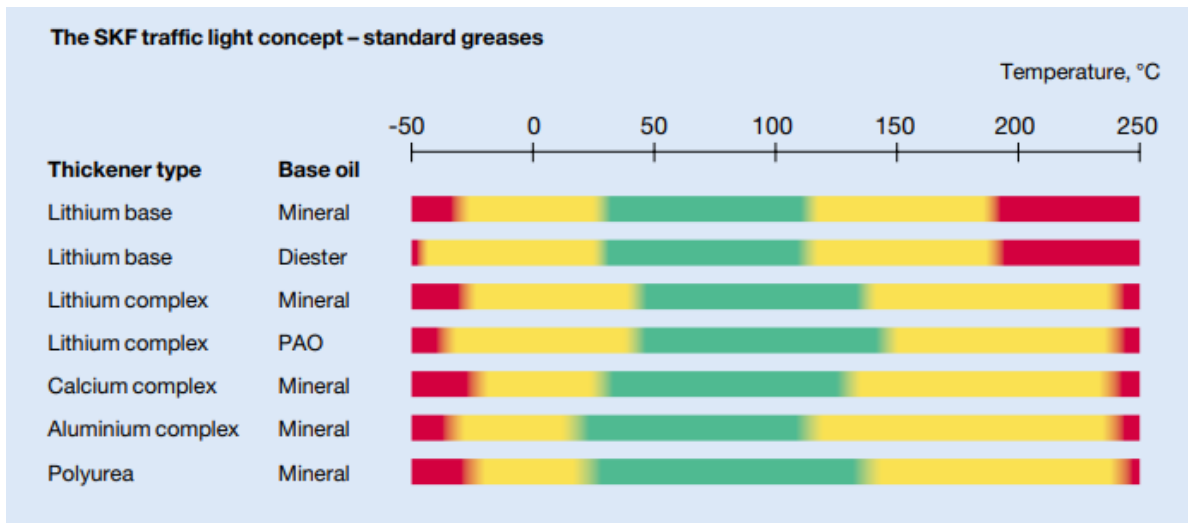
Korkeissa kuormitusolosuhteissa on suositeltavaa käyttää voitelurasvoja, joiden perusöljyn viskositeetti on korkea ja joihin on lisätty paineensietolisäaineita eli EP-lisäaineita. (Schaeffler Technologies 2019, s. 8). Mitoittamalla käytettävät laakerit oikein ja huomioimalla laakereihin kohdistuvat kuormitukset vältetään korkean kuormituksen vaikutukselta rasvan ikääntymiseen.

3.1.3 Lämpötila

Laakerin ja laakerirasvan lämpötila kohoaa, kun käytettävässä laakerissa esiintyy paljon liukumaa, korkeita kuormia, vastinpintojen kosketusta, tai käyttöympäristön lämpötila on korkea (FAG 1998, s. 7). Liian korkea lämpötila laakerissa saa aikaan rasvan perusöljyn hapettumisen, ja hapettumisen seurauksena syntyvät sivuaineet vaikuttavat rasvan voiteluominaisuuksiin negatiivisesti. Liian alhainen lämpötila sitkeyttää rasvaa, sekä estää perusöljyn irtoamista, jonka takia laakerin rasvausominaisuudet heikenevät suuresti (SKF

2011, s. 186). Rasvan lämpötilan muuttuminen vaikuttaa lisäksi rasvan perusöljyn viskositeettiin, jolloin riittävän voiteluainekalvon paksuuden määrittäminen vaikeutuu (Schaeffler Technologies 2013, s. 10). Lämpötilan vaikutuksen huomioiminen on erityisen tärkeää rasvavoidelluissa laakereissa, koska niiden heikkoutena on voitelurasvan heikko lämmönjohtokyky. Tämän takia esimerkiksi kitkalämmön poistaminen rasvavoidelluista laakereista on hankalaa (VTT 2004, s. 7).

Voitelurasvoille suositeltavat käyttölämpötilat vaihtelevat rasvakohtaisesti, jonka takia rasvoille on määritetty valmistajien puolesta ylä- sekä alakäyttölämpötilarajat. Näiden lämpötilarajojen sisäpuolella pysyttäessä lämpötilalla ei ole vaikutusta rasvan ikääntymiseen eikä voiteluominaisuuksiin. Rajojen ulkopuolelle mentäessä rasvan viskositeetti muuttuu normaalitilanteesta merkittävästi, eikä rasvan käyttöä pidemmän aikaa vallitsevassa olosuhteessa voida suositella. (SKF 2011, s. 187). FAG käyttää voitelurasvaa valitessa perussääntönä, että käytettävän rasvan tulee jäädä 20 astetta ylärajan alapuolelle sekä 20 astetta alarajan yläpuolella toimiakseen luotettavasti (VTT, rasvavoitelu, s. 13). Lämpötilarajojen esittämisessä on valmistajakohtaisia eroja ja rasvalle määritetyt lämpötilarajat ovat saatavissa rasvavalmistajan taulukoista. SKF:n rasvan lämpötilarajojen esittämisessä käytetty liikennevalokonsepti (Traffic Light Concept), jonka avulla rasvan alälämpötilaraja t_{min} , ja ylälämpötilaraja t_{max} on arvioitavissa, esitetään kuvassa 7. liikennevalokonseptin mukaan vihreällä alueella toimittaessa lämpötilalla ei ole vaikutusta rasvan voiteluominaisuuksiin ja ikääntymiseen. Keltaisella alueella rasvan ikääntyminen on nopeampaa, ja perusöljyn viskositeetti poikkeaa normaalista, jonka takia rasvan käyttäminen pidemmän aikaa tällä lämpötila-alueella ei ole suositeltavaa. Punaisella alueella rasvan rakenne on muuttunut niin paljon, että laakeririkon riski tällä lämpötila-alueella on suuri. (SKF 2003, s. 234).



Kuva 7. SKF liikennevalokonsepti (traffic light concept). (SKF 2003, s. 234)

Voitelurasvoille määritetyt lämpötilarajat pohjautuvat rasvojen testauslaitteistoilla suoritettuihin testeihin, joissa rasvojen lämpötilan vaikutusta laakerin rikkoutumiseen kohonneen kitkan takia vertaillaan. Yksi lämpötilarajojen testaamiseen käytetty laitteisto on DIN 51821 -standardin mukainen FE 9-testauslaite. FE 9-testauslaitteistolla pyöritetään standardissa määrättyissä olosuhteissa rasvaa viidessä viistokuulalaakerissa niin kauan, että kohonneen kitkan takia syntyy laakeririkko. Jos testattavassa lämpötilassa 50 % testatuista laakereista saavuttaa yli 100 tunnin käyttöajan, voidaan testeissä käytettyä lämpötilaa DIN 51825 -standardin perusteella pitää jatkuvan käytön ylimpänä lämpötilarajana. (Klüber Lubricant, lubricant testing, 28; Schaeffler Group 2013, s. 160)

Korkean lämpötilan vaikutusta rasvan ikääntymiseen voidaan arvioida nyrkkisäännöllä, jonka mukaan laakerin lämpötilan kohotessa 15 °C, rasvan vaihtoväli on syytä puolittaa (SKF 2003, s. 195). Jos laakerissa käytetään korkealaatuista, korkeita lämpötiloja kestävästä rasvasta, edellä esitetty ehto tulee voimaan vasta, kun lämpötila ylittää jatkuvan käytön ylimmän lämpötilarajan $t_{uplimit}$, joka on saatavilla rasvavalmistajan taulukoista (Schaeffler Technologies 2020, s. 21). Yleisesti käytössä oleville litiumsaippuapohjaisille vakiorasvoille tämä käyntilämpötila on 70 °C, jonka jälkeen yllä esitetty nyrkkisääntöä suositellaan käytettäväksi. Jos laakerin käyntilämpötila on normaalitilannetta alhaisempi, ja rasva toimii kuitenkin alalämpötilarajan yläpuolella, on rasvausvälin kaksinkertaistaminen 15 °C välein mahdollista (SKF 2011, s. 195).

3.1.4 Laakerin tärinä ja sysäyskuormitus

Rasvavoidelluissa laakereissa hallitun tärinän voidaan katsoa olevan laakerin voitelulle hyödyksi, koska tärinä saa voitelurasvan liikkumaan laakerissa, ja kosketuspisteet saavat uutta rasvaa johtaen parempaan voitelutilanteeseen (Opetushallitus). Jos Laakeriin kohdistuu kovaa ja jatkuvaa tärinää voi seurauksena olla rasvan liiallinen työstäminen. Tärinä saa rasvan uudelleensijoittumaan vastinpintojen väliin, jonka seurauksena rasva kirnuuntuu eli perusöljy ja paksunnin erkanevat toisistaan. Rasvan rakenteen rikkoutuminen johtaa voiteluominaisuuksien heikkenemiseen. (Schaeffler technologies 2019, s. 9: SKF 2003, s. 240). Vierintälaakerin tärinän aiheuttajana voi olla laakeriin kohdistuvien kuormien aiheuttamat pysyvät, sekä hetkelliset muodonmuutokset, laakerin löysä sovitus, laakerin sisäiset epäpuhtaudet sekä laakeripinnan säröt kuten halkeamat (SKF 2003, s. 115). Laakerissa esiintyvä, normaalitilannetta kovempi tärinä onkin yleisesti merkki siitä, että laakeroinnissa voi olla jotakin häiriötä. Korkean tärinän ja sysäyskuormitukset laakerivalmistajat huomioivat laakerissa suuntaa antavilla kertoimilla, joita on esitetty alla olevassa taulukossa 3.

Taulukko 3. FAG:n ja Klüberin määrittämiä rasvausväliä lyhentäviä kertoimia tärinälle ja sysäyskuormitukselle. (Schaeffler Technologies 2013, s. 102; Klüber lubrication, s. 17)

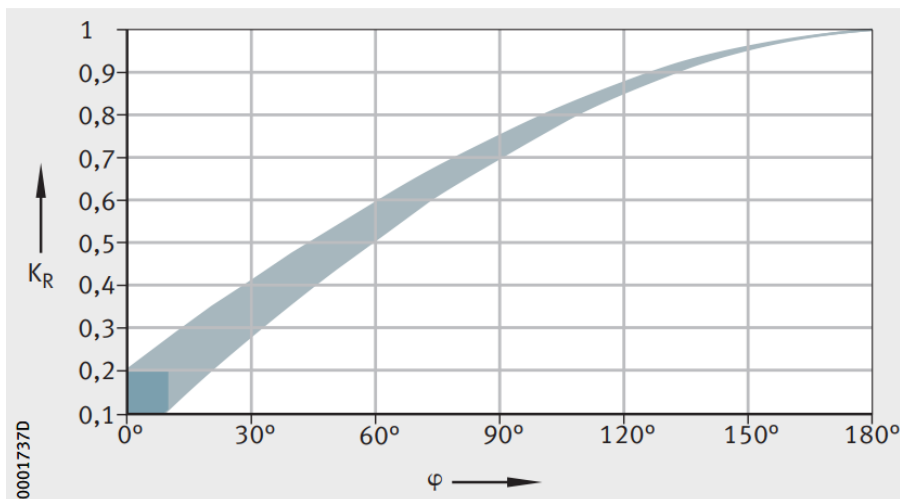
Tärinän luokittelu	FAG	Klüber
Lievä tärinä. Esiintyy mm. rasvojen testauslaitteissa	1	1
Hillitty tärinä. Käytetään ns. normaaliolosuhteissa	0,8	0,7...0,9
Kova tärinä.	0,5	0,4...0,7
Erittäin kova tärinä	-	0,4...0,1

Jos kovan ja jatkuvan tärinän esiintyminen on tiedossa, on suositeltavaa käyttää voiteluaineena rasvoja, joiden mekaaninen stabiliteetti on testattu, ja rasvan kovuus on vähintään NLGI 3(SKF 2011, s. 82).

3.1.5 Oskilloiva liike

Oskilloivalla liikkeellä tarkoitetaan laakerin pyörimissuunnan vaihtumista ennen kuin laakeri on pyörähtänyt kokonaisen kierroksen (SKF 2003, s. 114). Oskillaatiota kuvataan usein kääntökulmalla, joka tarkoittaa kulmaa asteina, jonka laakeri pyörähtää ennen kuin se vaihtaa pyörimissuuntaansa. Laakerin kääntökulman ollessa pieni laakerin sisällä oleva rasva ei sekoitu laakerin pyöriessä ja kohtaan, johon kuormitus kohdistuu voitelurasva ei pääse vaihtumaan. Lisäksi jatkuvan pyörimissuunnan vaihtumisen takia tasaisen voitelukalvon muodostuminen kosketuspintojen välille on haastavaa, jonka takia nestevoitelutilanteen ja erityisesti EHD-voiteluteorian toteutuminen oskilloivassa liikkeessä olevalle laakerille on vaikeaa. Vastinpintojen koskettaminen toisiinsa ilman kunnollista voitelukalvoa nopeuttaa laakerin, sekä rasvan kulumista. (Klüber Lubrication, s. 28)

FAG on määrittänyt oskilloivan liikkeen huomioimiseksi käyrästä, jossa oskillaatiokertoimen suuruus riippuu laakerin kääntökulmasta. Jos kääntökulma on yli 180 astetta, pyörimissuunnan vaihtumisella ei ole FAG:n mukaan vaikutusta laakerin ikään. Rasvausväli on syytä puolittaa, jos kääntökulma on noin 50 astetta. FAG:n määrittämä käyrä on esitetty alla olevassa kuvassa 8. (FAG 2019, s. 23)



Kuva 8. FAG:n määrittämä käyrä, josta saadaan selville oskilloivan liikkeen vaikutus rasvan ikääntymiseen. (FAG Arcanol Greases, s. 23)

3.1.6 Epäpuhtaudet

Jos laakeri toimii ympäristössä, jossa ulkopuolisten partikkeleiden eli epäpuhtauksien ja kosteuden pääseminen laakeriin on mahdollista, on rasvausvälin lyhentäminen suositeltavaa. Laakerin sisälle pääsevät epäpuhtaudet voivat rikkoa rasvan muodostaman voitelukalvon, nostattaa lämpötilaa, nopeuttaa laakerin kulumista sekä lisätä laakeripintojen väsymistä (FAG 1998, s. 53). Esimerkiksi kosteassa ympäristössä, kuten ulkokäytössä laakerin sisälle pääsevä kosteus voi kondensoitua vedeksi, ja rikkoa hydrolyysin takia voiteluaineen rakenteen johtaen käytettävän voiteluaineen ominaisuuksien heikkenemiseen. (FAG 2013, s. 73).

Veden ja lian vaikutusta käyttökohteessa on vaikeaa arvioida tarkasti ilman käytössä olevan rasvan tarkkaa analysointia erilaisilla laboratoriotutkimuksilla. Rasvan rakennetta tutkittaessa laboratoriotutkimusten avulla hyödynnetään rasvassa olevien materiaalien tunnistamista esimerkiksi infrapunaspektrometrian avulla, jolloin rasvassa vaikuttavat likapartikkelit saadaan silmämääräistä tutkimusta tarkemmin selville (FAG 2013, 155). Rasvan likapartikkelien määrän ja vesipitoisuuden selvittäminen jokaisessa käyttökohteessa on kuitenkin hankalaa laboratoriolaitteiden korkean hinnan takia.

Ympäristöolosuhteiden vaikutusta rasvan ikääntymiseen voi arvioida suuntaa antavilla kertoimilla, jotka laakerivalmistajat ovat määrittäneet suorittamalla erilaisia testejä vaihtelevissa ympäristöolosuhteissa (SKF 2003, s. 62). FAG:n ja Klüberin ympäristövaikutukset huomioon ottavia kertoimia esitetään alla olevassa taulukossa 4. Jatkuvasti epäpuhtaassa ympäristössä toimivalle laakerille SKF suosittelee jatkuvaa voitelua, ja laakerin tiivistyksen parantamista (SKF 2011, s. 195).

Taulukko 4. FAG:n ja Klüber lubricationin määrittämiä ympäristökertoimia. (Schaeffler Technologies 2013, s. 102; Klüber lubrication, s. 17)

Ympäristövaikutus	Ympäristökerroin (FAG)	Ympäristökerroin (Klüber lubrication)
Vähäinen. Todella puhdas ja kuiva ympäristö. Esimerkiksi testipenkki	1	1
Normaali. Käytetään ns. normaaliolosuhteissa	0,8	0,7...0,9
Voimakas: Epäpuhtauksien ja kosteuden pääsemisen riski laakerin sisälle suurta. Esimerkiksi ulkokäyttö	0,5	0,4...0,7
Erittäin voimakas kosteuden ja pölyn vaikutus	-	0,1...0,4

Rasvan vaihtovälin lyhentämisen lisäksi on tärkeää, että ympäristön kosteus ja likaisuus otetaan huomioon laakerien ja voiteluaineen varastoinnissa sekä asentamisen aikana. (FAG, 2019, s. 10). Varastoinnissa on tärkeää ottaa huomioon, ettei voiteluaine pääse reagoimaan tilassa muiden aineiden kanssa. Lisäksi varastointitilan lämpötilan tulee pysyä välillä 0–40 celsiusastetta, sekä ilman suhteellinen kosteuden on hyvä pysyä alle arvon 65 %. Laakereita suositellaan säilytettäväksi alkuperäisissä pakkauksissa asentamiseen asti, sekä laakerin asentaminen ja rasvan lisääminen suositellaan tehtäväksi puhtaassa ympäristössä oikeanlaisilla asennustyökaluilla, jotta haitallisten epäpuhtauksien pääseminen asennusvaiheessa laakeriin olisi vähäistä. (FAG 2019, s. 32; SKF 2011, s. 41)

3.1.7 Akselin asento

Pystysuorassa käytössä olevissa koneissa, joissa akseli ja täten laakerointi toimii pystysuorassa suunnassa, rasva pyrkii valumaan painovoiman takia laakerista ulos. Jos moottorin akseli on pystysuorassa, lyhennetään laakerien rasvausväliä puoleen entisestään. (SKF, 2011, 195). Rasvan pysymistä pystysuorassa akselissa voidaan pyrkiä parantamaan tehostamalla laakerin tiivistystä sekä käyttämällä kovemman luokan ja viskositeetin rasvaa. SKF ottaa pystysuoran akselin laskuissaan aina huomioon puolittamalla rasvausvälin. FAG ja Klüber kertovat rasvausvälin näin asennetuille laakereille 0,5:llä tai 0,7:llä, riippuen

käytettävästä rasvan kovuudesta sekä laakerin tiivistyksestä. (Schaeffler Technologies 2011, s. 102; Klüber Lubrication, s. 17)

3.1.8 Jälkivoitteluväli

Rasvavoidellulle vierintälaakereille saadaan laskettua jälkivoitteluväli selvittämällä rasvan peruskäyttöikä ja lisäämällä peruskäyttöikään käyttökohteesta riippuen jälkivoitteluväliä lyhentäviä kertoimia, joita tässä teoriaosuudessa esitettiin. SKF:n laskelmilla saatu peruskäyttöikä kuvastaa aikaa tunteina, jonka jälkeen 99 % samalla tavalla rasvavoidelluista vierintälaakereista on luotettavasti voideltu (SKF, 2003, s. 37). FAG:n laskelmilla saatu tulos kuvastaa käyttöikää, jonka jälkeen käytettävä rasva on käyttökelvottomassa kunnossa, ja sen puristaminen laakerista ulos on vaikeaa. FAG:n teoriaan perustuva jälkivoitteluväli saadaan, kun rasvalle määritetty käyttöikä puolitetaan. Jälkivoitteluvälin määrittäminen pohjautuu rasvoille tehtyihin tutkimuksiin, sekä kokemuspohjaiseen tietoon (Schaeffler Technologies 2013, s. 102). Molempien valmistajien määrittämä jälkivoitteluväli kuvastaa rasvan kestoikää tunteina, kun vaikuttavat tekijät ovat vakioita, ja moottori pyörii pysähtymättä.

3.1.9 Rasvamäärä

Laakerin oikeaoppisessa voitelussa on tärkeää, että rasvaa lisätään laakeriin niin että kaikki toimintapinnat saavat voitelua. Rasvaa lisättäessä on pidettävä huolta, ettei laakeripesää eikä laakeria rasvata liikaa. Jos laakeriin lisätään rasvaa liikaa, vapaaseen tilaan käynnistyksen yhteydessä puristunut rasva pursuaa laakerista pois. Jos ylimääräisen rasvan poistuminen laakerista ei ole mahdollista esimerkiksi tiivistyksen takia, ylimääräinen rasva alkaa vatkaautumaan laakerissa aiheuttaen muun muassa lämpötilan nousua. Lämpötilan nousu voi vaurioittaa laakeria tai pahimmassa tapauksessa tuhota koko laakerin. (Schaeffler technologies 2019, s.14; SKF 2003, s. 231).

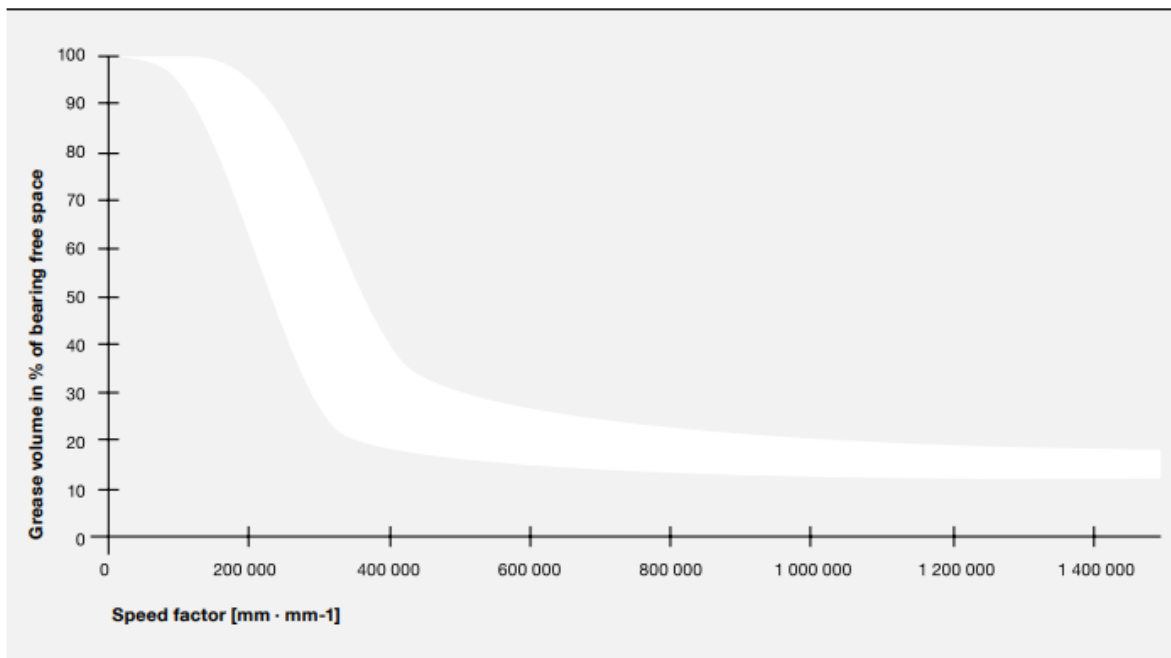
Rasva- sekä laakerivaurioiden välttämiseksi laakerin sisällä oleva vapaatila eli tila, joka ei ole kosketuksissa pyörivien osien kanssa täytetään rasvalla tietyn prosenttiosuuden mukaan. Täyttöasteeseen vaikuttaa erityisesti laakerin pyörimisnopeus sekä tiivistys. Laakerin vapaa tila V saadaan laskettua seuraavalla yhtälöllä:

$$V \approx \left[\frac{\pi}{4} \cdot B \cdot (D^2 - d^2) \cdot 10^{-9} - \frac{G}{7800} \right] \text{ m}^3, \quad (6)$$

missä B = Laakerin leveys [mm]

G = Laakerin paino [kg]

Laakerityyppien sekä laakerivalmistajien laakereiden välisten erojen takia edellä esitettyä kaavaa voidaan käyttää vain suuntaa antavana kaavana vapaan tilan määrittämiseen. Tarkempi vapaatilan tilavuus saadaan selville ottamalla yhteyttä laakerivalmistajaan (Klüber Lubrication, s. 12). SKF ohjeistaa vapaatilan täyttöasteeksi noin 30...50 % vapaasta tilasta. Täyttöastetta suositellaan kuitenkin nostettavaksi jopa 90 %:iin käyttökohteissa, joissa laakerin pyörimisnopeus on alhainen, ja laakeriin kohdistuvat kuormat ovat suuria. Laakerin täyttäminen kokonaan voitelurasvalla on mahdollista, jos laakeri on tiivistämätön. Tällöin ylimääräinen voitelurasva pääsee poistumaan laakerista pois käyttöönoton yhteydessä (SKF, 2010, s. 190). Klüber on määrittänyt laakerin täyttöasteelle käyrän, josta laakerin kierrosluvun, eli moottorin pyörimisnopeuden ja laakerin keskihalkaisijan avulla saadaan selvitettyä suuntaa antavasti laakerin vapaan tilan täyttöaste prosentteina. Klüber Lubricationin määrittämä käyrä on esitetty alla olevassa kuvassa 9.



Kuva 9. Laakerin vapaan tilan täyttöaste laakerin kierrosluvun mukaan. (Klüber Lubrication, s. 12)

Jos laakerille laskettu rasvausväli on lyhyempi kuin laakerin ikä, on jälkivoitelu tarpeellista. Jälkivoitelussa lisättävän rasvan määrä saadaan selville seuraavaa yhtälöä hyödyntäen. (Klüber Lubrication, s. 13)

$$M = D \cdot B \cdot X [g], \quad (7)$$

missä x = Jälkivoiteluvälin pituudesta riippuvainen kerroin.

x :n arvo riippuu rasvalle lasketun jälkivoiteluvälin pituudesta. Klüber lubrication on määrittänyt kertoimen niin, että päivittäin tapahtuvalle voitelulle $x = 0,001$, viikoittaiselle $x = 0,002$, kuukausittaiselle $x = 0,003$ ja vuosittaiselle $x = 0,004$. (Klüber Lubrication, s. 13)

Jos jälkivoiteluväli on erityisen lyhyt eli päivittäin tai tiheämmin, saadaan tarkempi rasvamäärä M2 laskettua alla esitetyllä kaavalla.

$$M2 = (0,5 \dots 20) \cdot V [cm^3/h], \quad (8)$$

Sulkujen sisällä oleva kerroin 0,5...20 kuvaa virtauskerrointa, jonka avulla pyritään arvioimaan voiteluvälin pituutta sekä rasvan virtaamista pois laakerin sisältä (Klüber Lubrication, s. 14). Erittäin lyhyelle jälkivoitelulle on tarvetta tilanteissa, kun rasvaan kohdistuu äärimmäistä räsitusta, ja laakerin pyörimisnopeus on erityisen suuri. Erittäin lyhyille jälkivoiteluväleille SKF suosittelee rasvavoitelun vaihtamista öljyvoiteluun, sekä voitelun automatisointia, jos vain mahdollista.

SKF käyttää jälkivoitelussa lisättävän rasvamäärän laskemissa edellä esitettyä kaavaa 5, mutta yhtälössä käytettävä kerroin X määräytyy rasvan lisäämistavan perusteella. Jos rasva lisätään laakerin sivusta, x saa arvon 0,005, ja jos laakeri täytetään laakerin keskellä olevasta täyttöreistä kuten voitelunipasta käytetään x :n arvona 0,002 (SKF 2003, s. 242). Kun laskuissa käytetään tilavuuden yksiköitä massayksiköiden sijaan, vältytään rasvojen eri tiheyksistä johtuvista laskuvirheistä (Klüber Lubrication, s. 14). Kun rasvan tiheys vallitsevassa lämpötilassa on tiedossa, voidaan laakeriin lisättävä rasvamäärä grammoina laskea.

3.1.10 Rasvojen sekoitettavuus

Jälkivoitelua tehtäessä on tärkeää tietää laakereissa käytetty voitelurasva ja pyrittävä tekemään jälkivoitelu käyttäen samaa rasvaa. Tilanteissa, joissa rasva joudutaan vaihtamaan toiseen, yhdistettävien rasvojen yhteensopivuus on tärkeää varmistaa. Jos kaksi yhteensopimatonta rasvaa sekoitetaan yhteen, on mahdollista, että eri rasvojen sekoitus ei tuota riittävää voitelukalvoa kosketuspintojen välille (SKF 2003, s. 236). Lisäaineiden kemiat voivat kumota esimerkiksi korroosionesto-ominaisuudet (Opetushallitus). Jos alkuperäinen rasva joudutaan vaihtamaan toiseen, kaikista paras valinta uudeksi rasvaksi on samaa perusöljyä ja saenninta käyttävä saman NLGI-luokan ja viskositeetin omaava rasva (Schaeffler Technologies 2019, s. 12). Myös rasvoja eri perusöljyllä ja saentimella on mahdollista yhdistää rasvavalmistajan antamien ohjeiden mukaisesti, mutta kaikista varmin tapa tällaisia rasvoja sekoittaessa on putsata laakeri vanhasta rasvasta, ja lisätä ainoastaan uutta rasvaa laakeriin (Schaeffler Technologies 2019, s. 14).

3.2 Laskentaohjelmiston kehittäminen

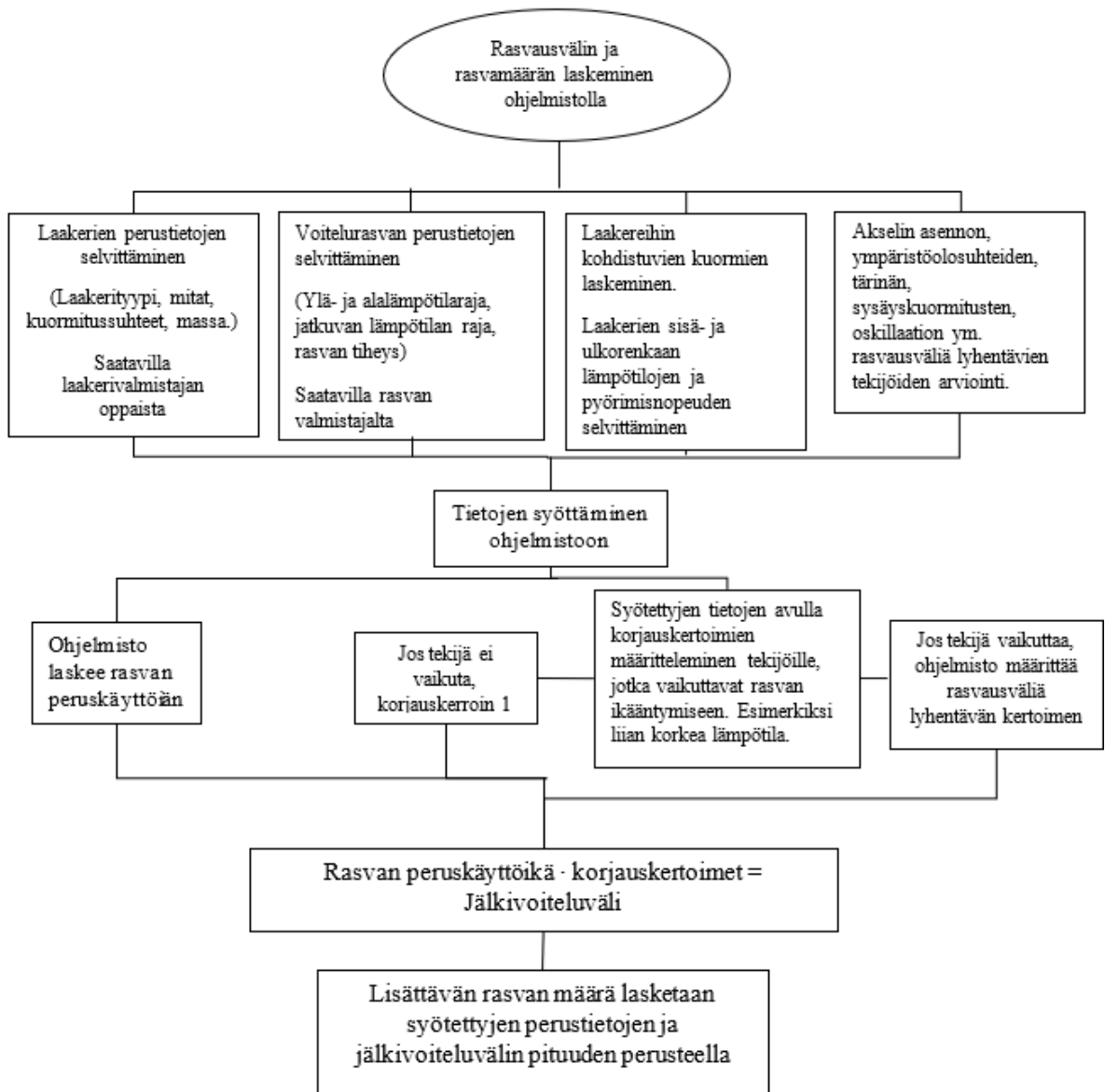
Tässä kandidaatintyössä kerättyjen tietojen pohjalta rakennettiin laskentaohjelmisto, jonka avulla on mahdollista laskea koneessa käytettäville laakereille rasvan jälkivoiteluväli, sekä laakereihin lisättävä rasvamäärä esitäytössä ja jälkivoitelussa. Excel ohjelman tarkoituksena on toimia tukena sähkömoottorien kunnossapitosuunnitelman laatimisessa, sekä olla apuna laakereille lisättävän rasvamäärän ja rasvausvälin määrittämisessä. Laakeri- sekä rasvavalmistajilla on jo olemassa laakerilaskentaan tarkoitettuja ohjelmistoja, joiden avulla on mahdollista arvioida laakereissa käytettävän rasvan määrä ja jälkivoiteluväli. Laakeri- ja rasvavalmistajien teettämien laskentaohjelmistojen puutteeksi on osoittautunut epäselvyys mitkä jälkivoiteluväliin vaikuttavat parametrit otetaan laskuissa huomioon. Epäselvien tulosten ja laskentaohjelmistoilla saatujen voiteluvälien ja rasvamäärien analysoinnin hankaluuden takia yritys halusi teettää työssä kerättyihin tietoihin pohjautuvan laskentaohjelmiston.

Rasvan ikääntymiseen perustuva laskenta pohjautuu rasvoille suoritettujen testien tuloksiin ja tilastoihin, joissa oletuksena on vakio-olosuhteet. Todellisissa tilanteissa laakereihin kohdistuvat rasvan ikääntymiseen vaikuttavat tekijät kuten pyörimisnopeus, lämpötila ja kuormitukset ovat harvoin vakioita, jonka seurauksena tarkkojen voiteluvälien ja rasvamäärien selvittäminen on lähes mahdotonta. Tässä kandidaatintyössä tehdyllä

laskentaohjelmistolla saatavia tuloksia voidaan pitää ohjeellisina, minkä takia laskentaohjelmistolla saatuja tuloksia on hyvä verrata rasva- ja laakerivalmistajien laskentaohjelmistoilla saatuihin tuloksiin.

3.2.1 Laskentaohjelmiston rakenne

Työssä tehdyn laskentaohjelmiston toimintaperiaatetta on pyritty kuvaamaan alla olevassa kuvassa 10. Laskentaohjelmisto perustuu teoriaosuudessa esitettyihin laakerivalmistajien rasvoille suorittamiin testeihin, ja testien pohjalta määritettyihin käyrästöihin ja kertoimiin. Laskentaohjelmiston tekemisessä on hyödynnetty SKF:n, FAG:n ja Klüberin tietoja.



Kuva 10. Laskentaohjelmiston toimintaperiaate.

Ohjelman käyttäminen aloitetaan syöttämällä tarvittavat lähtöarvot. Moottorimallista riippuen moottorissa esiintyvien laakerien määrä voi vaihdella 2–3 laakerin välillä, jonka takia ohjelmistossa on mahdollista samanaikaisesti laskea jälkivoiteluväli sekä rasvamäärä kolmelle erikokoiselle, ja eri kuormitus- ja lämpötilaolosuhteessa olevalle laakerille. Alla olevassa kuvassa 11 on esitetty laakerilta tarvittavat lähtötiedot, jotka syötetään ohjelmaan jokaiselle käytössä olevalle laakerille erikseen. Tarvittavia tietoja ovat laakerityyppi, laakerin mitat, ulko- ja sisäkehän lämpötila, kuormituskertoimet ja laakeriin kohdistuva ekvivalentti dynaaminen kuormitus. Sisä- ja ulkokehän lämpötila, sekä ekvivalentti dynaaminen kuormitus on määritettävä itse, mutta muut tiedot ovat saatavilla laakerin valmistajan tiedoista. Käytettävän laakerin tyyppin valinnan helpottamiseksi laakerityyppi on valittavissa alavetovalikosta, johon on listattu yleisimmät sähkömoottoreissa käytettävät vierintälaakerit. Jos moottorissa on käytössä erikoisempi laakerityyppi, jota ei alavetovalikkoon ole määritetty, laskuissa tarvittavan laakerityyppikertoimen voi syöttää itse laskentaohjelmistoon.

BEARING INFORMATION				
D-end bearing	Bearing type		Deep groove ball bearing, single row	
	Bore diameter	d	150	mm
	Outer diameter	D	225	mm
	Width	B	35	mm
	Mass	m	4,9	kg
	Temperature (inner ring)	t_1	110	°C
	Temperature (outer ring)	t_2	110	°C
	Basic dynamic load rating	C	125	kN
	Basic static load rating	C_0	125	kN
	Equivalent dynamic load	P	10,193	kN

Kuva 11. Ohjelmistossa tarvittavia laakeritietoja.

Käytettävästä rasvasta tarvittavia tietoja ovat rasvan lämpötilarajat sekä tiheys. Lämpötilarajoja tarvitaan selvittämään, toimiiko laakeri rasvalle määritettyjen lämpötilarajojen sisäpuolella, ja tiheyttä käytetään hyödyksi rasvamäärien laskemisessa. Kuvassa 12 on esitetty käytettävän rasvan lähtötiedot.

GREASE INFORMATION				
Grease	Minimum operating temperature	t_{min}	-50	°C
	Maximum operating temperature	t_{max}	140	°C
	Continuous Limit Operating temperature	$t_{uplimit}$	80	°C
	Density	ρ	0,87	g/cm ³

Kuva 12. Tarvittavat rasvan tiedot

Lisäksi aloitussivulla on kolmas taulukko, jossa kysytään teoriaosuudessa ilmi tulleita rasvan ikääntymiseen vaikuttavia tekijöitä. Näitä tekijöitä ovat akselin asento, moottorin pyörimisnopeus, ympäristöolosuhteet, sysäyskuormitusten ja tärinän vaikutus, pyörivä ulkokehä sekä moottorin oskillointi. Ohjelman käyttämisen helpottamiseksi arvoa määrittäessä ohjelma näyttää infolaatikon, jossa on kerrottu tekijän vaikutuksesta hieman teoriaa. Tämän avulla ohjelmaa voi käyttää, vaikka käyttäjän tietämys laakeri- ja voiteluteoriasta olisi vähäistä tai käyttäjä ei olisi tutustunut tähän kandidaatintyöhön. Ohjelmassa kysyttävät perustiedot on esitetty kuvassa 13.

OPERATING CONDITIONS				
	Shaft orientation		Horizontal	▼
	Motor Rotating speed	n		rpm
D-end	Rotating outer ring		N	Effect of shaft orientation Due to gravity, the grease tends to get out of the bearing in vertical direction more easily. For vertical shafts Regrease interval is halved.
ND-end			N	
Third bearing			N	
	Operating environment		Moderate	
	Shock loads, vibration		Moderate	
	Angle of oscillation	ϕ	0	°(Deg)

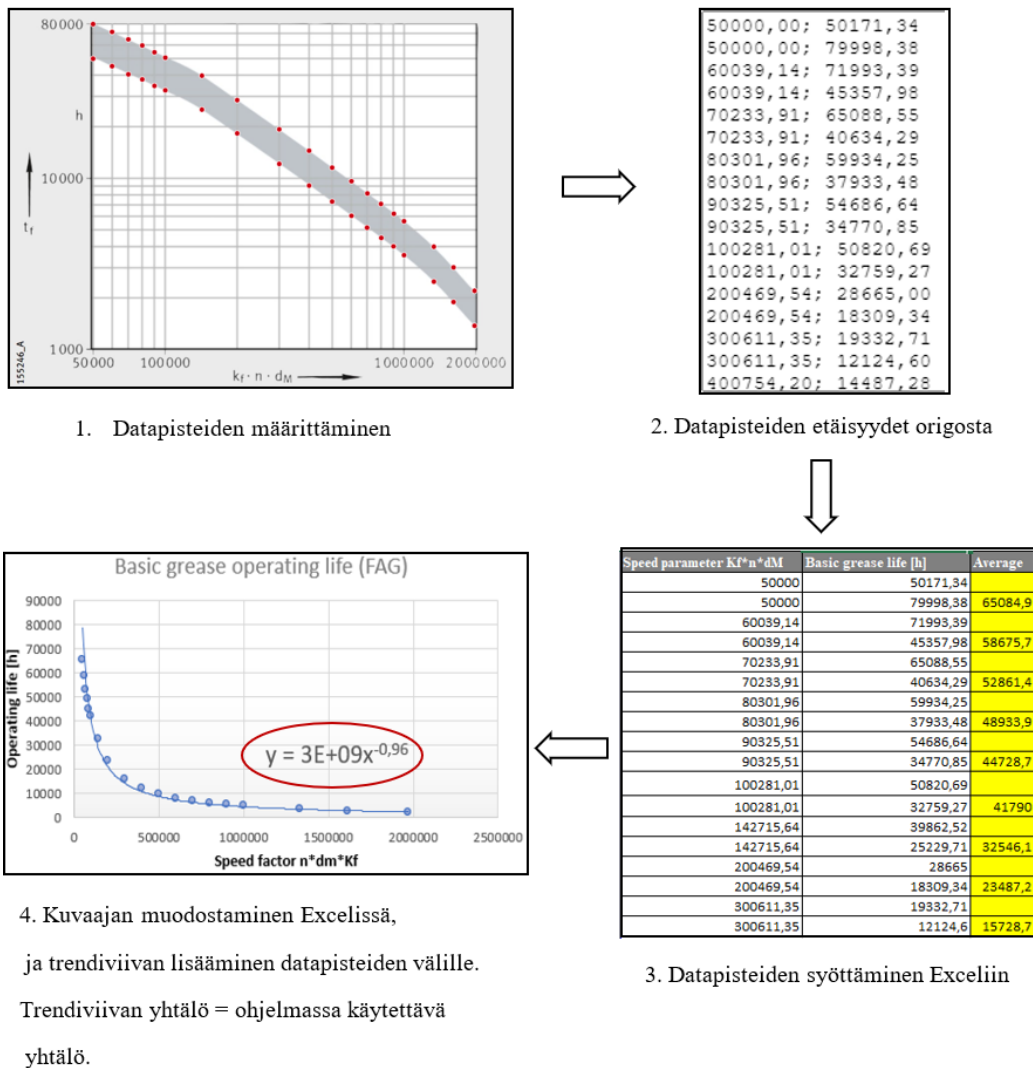
Kuva 13. Laakerilaskennassa tarvittavia perustietoja. Kuvassa näkyy myös arvoa määrittäessä esille tuleva infolaatikko.

Ohjelmaan syötettyjen perustietojen avulla ohjelma laskee käytettävälle rasvalle peruskäyttöiän, sekä lisää käyttökohteesta riippuen peruskäyttöikää lyhentäviä kertoimia. Rasvan peruskäyttöiän, ja ikään vaikuttavien kertoimien laskeminen tapahtuu tiedoston muilla välilehdillä, joissa laskentakaavat ja apuna käytettävät käyrästöt on esitetty tarkemmin siltä varalta, jos ohjelmiston käyttäjä haluaa varmistua tulosten paikkansapitävyydestä, sekä laskentatavoista. Lisäksi yrityksen toivomuksena oli määrittää kaikille sähkömoottorin laakereille yhteinen jälkivoiteluväli, jonka käyttäminen moottoriin tulevassa tyyppikilvessä olisi mahdollista. Aloitussivulla ohjelman käyttäjä näkee vain syötettävät lähtöarvot ja syötettyjen tietojen perusteella lasketut uudelleenrasvausvälit, tyyppikilpeen lisättävä yhteinen jälkivoiteluvälin sekä lisättävän rasvan määrän esi- ja uudelleentäytössä. Erillisten välilehtien ansioista ohjelmasta saatiin selkeämpi. Lisäksi

lähtöarvot ja tulokset on mahdollista tulostaa erikseen, jolloin ohjelmasta saatavia tietoja on helppo tulostaa ja jatkokäyttää osana moottorin kunnossapitosuunnitelmaa.

3.2.2 Voitelurasvan peruskäyttöään ja voiteluvälin määrittäminen

Voitelurasvan peruskäyttöään määrittämiselle ei ollut valmistajien toimesta olemassa suoraan yhtälöitä. Tämän takia Excelissä käytettävät yhtälöt jouduttiin muodostamaan keräämällä datapisteitä valmistajien muodostamista käyristä. Kuvaajista tarvittavien datapisteiden määrittämisessä käytettiin apuna WebPlotDigitizer -ohjelmistoa, jonka avulla datapisteiden määrittäminen kuvaajasta oli silmämääräistä tarkempaa, ja näin saatavat tulokset tarkempia (Rohatgi, 2020). Exceliin koottiin saadut datapisteet, joiden avulla muodostettiin pisteikaavio. Pisteikaavion pisteiden välille sovitettiin käyrä, jonka yhtälöä käytettiin Excelissä tapahtuvissa laskelmissa. Peruskäyttöään määrittämiseen tarvittavia tietoja olivat moottorin pyörimisnopeus, laakerityyppikerroin sekä laakerin keskihalkaisija. SKF:n peruskäyttöään laskemisessa tarvitsee tietää lisäksi kuormitussuhde, jonka avulla laskennassa käytettävä käyrä valittiin. Alla olevassa kuvassa 14 esitetään, miten FAG:n antamasta rasvan peruskäyttöään käyrästä saatiin selville yhtälö, jota käytettiin laskentaohjelmistossa. Alla olevassa kuvassa esitettyä tapaa käytettiin apuna myös SKF:n peruskäyttöään selvittämisessä, sekä monen korjauskertoimen määrittämisessä kuvaajista.



Kuva 14. Tapa, jolla laakerivalmistajien antamia käyrästäjä käytettiin hyödyksi laskentaohjelmistossa käytettävien kaavojen määrittämisessä.

Ohjelmaan määritettiin rasvaväliä lyhentäviä kertoimia korkealle lämpötilalle, korkealle kuormitukselle, tärinälle, sysäyskuormitukselle, epäpuhtauksille, pystysuoralle akselille, pyörivälle ulkokehälle, sekä oskilloivalle liikkeelle. Korjauskertoimien määrittämisessä jouduttiin joissakin tilanteissa yhdistämään ja vertailemaan laakerivalmistajien antamia kertoimia ja kaavoja keskenään. Esimerkiksi SKF:n jälkivoiteluvälin määrittämisessä käyttämiä kertoimia kosteuden ja lian eikä tärinän ja sysäyskuormitusten vaikutuksesta rasvan ikääntymiseen saatu tietoon, jolloin SKF:n laskelmissa käytettiin Klüberin ja FAG:n kertoimia, jotka olivat likimain samat molemmilla valmistajilla. Korkean lämpötilan-, korkean kuormituksen-, ja oskilloivan liikkeen kertoimien määrittämisessä Excelissä

suoritettaviin laskuihin hyödynnettiin samaa tapaa, kuin peruskäyttöään yhtälöiden määrittämisessä.

Laakereiden jälkivoiteluväli laskettiin peruskäyttöään ja korjauskertoimien tulona. Jos laakerissa ei esiintynyt jonkin rasvan ikääntymistä lyhentävän parametrin vaikutusta, kuten liian korkeaa lämpötilaa, määritti ohjelma korjauskertoimeksi 1, jolloin parametrilla ei ollut vaikutusta jälkivoiteluväliin. SKF:n laskelmilla saatu tulos näytti suoraan SKF:n oppaisiin perustuvan jälkivoiteluvälin, kun taas FAG:n tulos kertoi rasvan maksimikäyttöään, joka puolittaessa saatiin FAG:n suosittama jälkivoiteluväli käyttötunneissa.

Ensimmäisellä välilehdellä tulokset -osiossa näkyy eri valmistajien teorioiden avulla lasketut jälkivoiteluvälit. Eri valmistajien kertoimien sekä peruskäyttöään välisiä eroja pyrittiin ohjelmassa tasoittamaan laskemalla eri käyrien, kertoimien ja yhtälöiden avulla laskettujen jälkivoiteluvälien keskiarvo. Yrityksen toiveena ohjelmalta oli myös mahdollisuus laskea laakereille yhteinen jälkivoiteluväli, jonka avulla laakereiden jälkivoitelu voitaisiin suorittaa saman aikaisesti ja arvoa voitaisiin käyttää moottoriin tulevassa tyyppikilvessä. Yhteisen jälkivoiteluvälin määrittäminen toteutettiin laskennoissa lyhyimmän jälkivoiteluvälin keskiarvon mukaan. Lyhyintä jälkivoiteluväliä käytettäessä varmistutaan siltä, että jokaisessa laakerissa on riittävä voitelu. Jälkivoiteluvälin avulla pystyttiin selvittämään laakeriin lisättävän rasvan määrä teoriaosuudessa esitettyjen kaavojen, sekä laakeri- ja rasvavalmistajien määrittämien voiteluvälin pituudesta riippuvan kertoimen x avulla. Laskelmista saadut tulokset esitettiin kootusti ohjelmiston ensimmäisellä välilehdellä.

4 TULOSTEN ANALYSOINTI

4.1 Jälkivoiteluun vaikuttavien tekijöiden analysointi

Jälkivoiteluvälin tutkimiseen tarjolla ollut teoria painottui lähes täysin laakeri- ja voiteluainevalmistajien teettämien tutkimusten tilastollisiin tuloksiin, ja saatujen tulosten pohjalta määritettyihin käyrästöihin ja yhtälöihin. Voiteluaineille suoritettavat testit vaativat rasvan testaamiseen vartavasten suunniteltuja ja rakennettuja testauslaitteita sekä tuhansia testitunteja, minkä takia rasvan ikääntymisen tutkiminen on lähes kokonaan laakeri- ja voiteluainevalmistajien suorittamaa. Eri tekijöiden vaikutusta rasvan ikääntymiseen vaikeutti myös valmistajien ulkopuolisille antaman julkisen tiedon niukkuus. Alla olevassa taulukossa 5 on esitetty valmistajakohtaisesti tekijät, joita pystyttiin hyödyntämään jälkivoiteluvälin tutkimisessa, ja laskentaohjelmiston tekemisessä. Musta pallo kuvastaa, että valmistajan teettämistä tutkimuksista ja tilastoista oli hyötyä vaikuttavaa parametria analysoitaessa. Jos taulukossa on viiva, valmistaja ei ollut huomoinut parametria jälkivoiteluvälin määrittämisessä, tai tekijän vaikutusta jälkivoiteluväliin ei oltu selitetty valmistajan aineistoissa niin tarkasti, että siitä olisi ollut hyötyä tai vaikutusta työn tuloksiin.

Taulukko 5. Jälkivoiteluvälin tutkimisessa hyödynnetyt parametrit valmistajakohtaisesti esitettyinä.

Parametri	SKF	FAG	Klüber
Peruskäyttöikä	•	•	-
Korkea kuormitus	•	•	•
Korkea lämpötila	•	•	-
Epäpuhtaudet	-	•	•
Tärinä/ Sysäyskuormitukset	-	•	•
Oskillaatio	-	•	•
Akselin Asento	•	•	•
Lisättävän rasvan määrä	•	•	•

Peruskäyttöiän määrittämiseksi oli FAG:n ja SKF:n puolesta määritetty käyrästöt, josta käytettävälle rasvalle on mahdollista määrittää suuntaa-antava ikä, kun laakeri ja voiteluaine toimivat edullisessa ympäristössä. Klüber lubrication oli määrittänyt peruskäyttöiän jokaiselle valmistamallensa rasvalle erikseen, jonka takia työssä hyödynnettävissä olevaa käyrästöä ei Klüberilta lyötynyt. Alla olevassa taulukossa 6 on esitetty eri kierrostunnusluvuilla saatavia tuloksia SKF:n ja FAG:n peruskäyttöiän käyrästöistä.

Taulukko 6. Peruskäyttöiälle määritetyistä käyrästöistä saatavien tulosten vertailua.

Kierrostunnusluku $A \cdot b_f$	Peruskäyttöikä (FAG)	Peruskäyttöikä (SKF)
200 000 mm/min	25 000 h	10 000 h
400 000 mm/min	12 500 h	3 000 h
600 000 mm/min	8 000 h	1 000 h

Tulosten suuren eron selittää valmistajien jälkivoiteluvälin määrittämisessä käyttämä eri teoria. FAG:n käyrästöstä saatava peruskäyttöikä kuvasi aikaa, kun käytettävä rasva on täysin kykenemätön voitelemaan laakeria, ja suositeltava jälkivoiteluväli saadaan, kun käyrästöstä saatu peruskäyttöikä puolitetaan. SKF:n teorian perusteella saatava tulos puolestaan kuvasi tilannetta, kun 99 prosenttia laakerissa olevasta rasvasta on vielä kykenevä voitelemaan laakerin, ja käyrästä saatava aika kuvasi suoraan suositeltavaa jälkivoiteluväliä. Puolittamalla taulukossa 5 FAG:n käyrästöstä saadut tulokset, ovat valmistajien väliset tulokset lähempänä toisiaan. Huomioitavaa taulukoissa esitetyissä tuloksissa on, mitä suuremmaksi kierrostunnusluku kasvaa, sitä suurempi eroavaisuus valmistajien välisissä tuloksissa on. Lisäksi on tärkeää huomioida, että kierrostunnusluvun määrittämisessä tarvittava laakerityyppikerroin b_f vaihteli valmistajakohtaisesti, joka voi lisätä valmistajien välisten tulosten eroa.

Jälkivoiteluväliä lyhentävien kertoimien välillä ei laakerivalmistajien puolesta ollut suuria eroavaisuuksia. Suurin eroavaisuus korjauskertoimien välillä oli tapa, jolla vaikuttavat parametrit esitettiin aineistoissa. Esimerkiksi SKF otti korkean kuormituksen suoraan huomioon peruskäyttöikä määrittäessä, kun taas FAG oli määrittänyt korkean kuormituksen huomioimiseksi oman käyrästön, josta korjauskerroin korkealle kuormitukselle oli mahdollista määrittää. Klüberin aineistossa korkea kuormitus huomioitiin puolestaan suoraan kuormitussuhteen mukaan määritetyillä kertoimilla. Vaikka valmistajien

välillä oli eroa tavassa esittää eri tekijöiden vaikutus jälkivoiteluvälin pituuteen, olivat korjauskertoimet lähes identtisiä valmistajien välillä.

4.2 Laskentaohjelmiston käytettävyyden analysointi

Työssä tehdyn laskentaohjelmiston toimivuutta arvioitiin vertailemalla tuloksia yrityksen teettämiin laskelmiin SKF:n SimPro Quick-simulointiohjelmalla, jossa yhtenä laakerianalyysin kohteena on jälkivoiteluvälin pituus, ja lisättävän voitelurasvan määrä (SKF, SimPro Quick). Ohjelman toimivuutta testattiin moneen eri simulointiohjelmalla suoritettuun analyysiin käyttämällä samoja lähtöarvoja laskentaohjelmistossa ja vertailemalla saatuja tuloksia keskenään. Liitteessä I on esitetty yhdelle sähkömoottorin laakeroinnille tehdyn analyysin lähtöarvot sekä SKF:n SimPro Quickissä ja laskentaohjelmistossa. Simulointiohjelmalla ja laskentaohjelmistolla saadut tulokset on esitetty liitteessä II, sekä kootusti alla olevassa taulukossa 7.

Taulukko 7. SKF SimPro Quick -simulointiohjelmalla, ja työssä tehdyllä laskentaohjelmistolla saatujen jälkivoiteluvälien ja rasvamäärien vertailua.

Laakeri	Jälkivoiteluväli (SKF SimPro)	Rasvamäärä jälkivoitelussa (SKF SimPro)	Jälkivoiteluvälit (Laskentaohjelmisto)	Rasvamäärät Jälkivoitelussa. (Laskentaohjelmisto)
D-end	1800 h	39,4 g	2992 h (FAG) 1175 (SKF) 2084 h (Keskiarvo)	39 g (SKF) 24 g (FAG, Klüber)
ND- end_1	2500 h	38 g	2287 h (FAG) 2748 h (SKF) 2518 h (Keskiarvo)	38 g (SKF) 23 g (FAG, Klüber)
ND- end_2	2500 h	38 g	2287 h (FAG) 2748 h (SKF) 2518 h (Keskiarvo)	38 g (SKF) 23 g (FAG, Klüber)

Laskentaohjelmistolla ja SKF:n simulointiohjelmalla saatuja tuloksia vertaillen huomataan, että laskentaohjelmistolla saatujen jälkivoiteluvälien keskiarvo on likimain sama, mitä SKF:n simulointiohjelma antoi tulokseksi. Kuitenkin SKF:n ja FAG:n teorioihin perustuneissa jälkivoiteluväleissä saattoi tilanteesta riippuen olla huomattaviakin

eroavaisuuksia toisiinsa nähden. Tulosten välinen suuri ero voi johtua valmistajien erilaisesta teoriasta, johon jälkivoiteluvälin laskeminen pohjautuu. SKF:n laskelmilla saatujen tulosten tarkkuuteen voi hieman myös vaikuttaa, ettei SKF:n omia kertoimia korkean tärinän ja epäpuhtauksien vaikutukselle saatu selville, jolloin laskelmissa jouduttiin käyttämään FAG:n ja Klüberin määrittämiä kertoimia. Kuitenkin jälkivoiteluvälien keskiarvo osoittautui samoihin tuntimääriin kuin SKF:n simulointiohjelmalla saadut tulokset. SKF:n simulointiohjelmasta saatua jälkivoiteluväliä ja tekijöitä, joista ohjelmalla saadut jälkivoiteluvälit koostuivat ei myöskään ilmoitettu simulointiohjelmassa, joka vaikeutti saatujen tuloksien vertailua keskenään. Yksi kandityössä rakennetun ohjelmiston eduista on, että laskelmia tekevä käyttäjä pystyy selvien välivaiheiden, ja välilehdille välivaiheittain suoritettavien laskujen avulla tarkkailemaan jälkivoiteluväliin vaikuttavia tekijöitä. Saatuja tuloksia tarkkailemalla voidaan mahdollisesti muuttaa käytettävää rasvaa tai laakeria käyttökohteeseen sopivammaksi, jos ohjelmistosta saatavat kertoimet ovat kriittisen pieniä.

Laskentaohjelmistossa laakeriin lisättävä rasvamäärä laskettiin SKF:n sekä FAG:n ja Klüberin identtisiä jälkivoiteluvälin pituudesta riippuvia kertoimia hyödyntäen. SKF:n teoriaan pohjautuva rasvamäärä oli likimain sama kuin simulointiohjelmalla saatu arvo. FAG:n ja Klüberin yhdistetyillä kertoimilla laskettaessa arvo oli aina SKF:n laskelmilla saatuja arvoja pienempi. Tämä johtui siitä, että FAG:n ja Klüberin käyttämät jälkivoiteluvälin pituudesta riippuvaiset kertoimet olivat aina pienempiä, kuin SKF:n käyttämä vakioarvo 0,005. FAG:n ja Klüberin laskelmilla saatua arvoa voidaan pitää tarkempana, koska jälkivoiteluvälin pituudesta riippuvaisia, lisättävän rasvan määrän laskemisessa tarvittavia x :n kertoimia oli määritetty tarkemmin ja enemmän kun taas SKF käytti lisättävän rasvan määrittämisessä aina samaa kerrointa riippumatta jälkivoiteluvälin pituudesta.

Ohjelmistosta saatavien tulosten tarkkuuteen voidaan olla tyytyväisiä ottaen huomioon jälkivoiteluvälin määrittämiselle tarjolla olevan tiedon, sekä vaikuttavien parametrien analysoinnin hankaluus. Laskentaohjelmiston valmistuttua valmis ohjelma lähetettiin yritykselle testattavaksi. Laskentaohjelmiston antamiin tuloksiin, sekä ohjelman käytettävyyteen oltiin yrityksessä tyytyväisiä.

5 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää sähkömoottoreissa käytettyjen rasvavoideltujen vierintälaakereiden jälkivoiteluväliin vaikuttavia tekijöitä ja kerättyjen tietojen avulla rakentaa laskentaohjelmisto, jolla vierintälaakereiden jälkivoiteluväli sekä lisättävän rasvan määrä on mahdollista laskea.

Rasvan ikääntymiseen, jälkivoiteluvälin suuruuteen ja lisättävän rasvan määrään vierintälaakereissa vaikuttaa laaja kirjo eri tekijöitä. Tärkeimmät jälkivoitelua määritettäessä huomioitavat tekijät ovat:

- käytettävä voitelurasva
- laakerityyppi ja laakerin koko
- pyörimisnopeus
- laakeriin kohdistuvien kuormitusten suuruus- ja suunta
- ympäristön ja laakerin lämpötila
- laakerin värinän, sysäyskuormitusten ja oskilloivan liikkeen arviointi
- epäpuhtauksien, kuten lian ja kosteuden pääseminen laakeriin
- akselin asento
- lisättävän rasvan määrä esi- ja jälkivoitelussa.

Työssä kävi ilmi, että vierintälaakereissa käytettävän rasvan ikääntymiseen vaikuttavia parametrejä on olemassa runsaasti, ja monen parametrin kohdalla vaikutukset voitelurasvan ikääntymiseen voivat olla merkittäviä. Teoriaosuudessa kerätty tieto osoittaa myös sen, että yhden voitelurasvan ikää lyhentävän parametrin vaikuttaessa on hyvin todennäköistä, että myös muita rasvan voiteluominaisuuksia heikentäviä parametrejä alkaa ilmaantua. Voitelurasvan ikääntyminen on hallittua, ja jälkivoiteluvälin määrittäminen on tarkempaa silloin, kun laakeri- ja voitelurasva on valittu käyttökohteeseen oikein ja voitelurasva muodostaa riittävän, liialta kulumiselta suojaavan voiteluainekalvon.

Suurin osa jälkivoiteluvälin määrittämisessä käytetyistä teorioista perustui rasva- ja laakerivalmistajien suorittamien testien tilastoihin, joissa oletuksena on olosuhteiden pysyminen vakiona. Todellisissa tilanteissa on kuitenkin harvinaista, että laakerit toimivat

vakio-olosuhteissa, joissa esimerkiksi laakeriin kohdistuvat kuormitukset, lämpötila tai moottorin pyörimisnopeus pysyisi jatkuvasti samana. Lisäksi monen rasvan ikääntymiseen vaikuttavan tekijän, kuten epäpuhtauksien pääseminen laakerin sisälle sekä tärinän vaikutus käyttökohteessa voi olla hankalaa määrittää, jonka takia laskuista saatu jälkivoiteluväli voi todellisuudessa olla eri kuin laskennallinen arvo. Koska työssä jouduttiin turvautumaan kokonaan ulkopuoliseen tietoon, joissa eri lähteistä saatavien tietojen välillä saattoi olla ristiriitaisuuksia ja suuria eroavaisuuksia, tiedon yhdistäminen järkeväksi kokonaisuudeksi ja laskentaohjelmistossa hyödynnettäväksi tuotti haasteita.

Tässä kandidaatintyössä saatiin selvitettyä ja analysoitua laajasti rasvavoideltujen vierintälaakereiden jälkivoitelua, ja teoriaosuudessa kerättyjen tietojen avulla saatiin kehitettyä kohdeyrityksen toivoma laskentaohjelmisto. Kohdeyritys oli tyytyväinen kasattuun laskentaohjelmistoon ja sen avulla saataviin tuloksiin.

LÄHTEET

Airila, M. Ekman, K. Hautala, P. Kivioja, S. Kleimola, M. Martikka, H. Miettinen, J. Niemi, E. Ranta, A. Rinkinen, J. Salonen, P. Verho, A. Vilenius, M. Välimaa, V. 2009. Koneenosien suunnittelu [Käsikirja]. Helsinki: WSOYpro Oy. 796 s.

Björk, T. Hautala, P. Huhtala, K. Kivioja, S. Kleimola, M. Markku, L. Martikka, H. Miettinen, J. Ranta, A. Rinkinen, J. Salonen, P. 2014. Koneenosien suunnittelu [Käsikirja]. Kuudes uudistettu painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy. 517 s.

Engelmann R. & Middendorf W. 1995. Handbook of Electric Motor. New York [Käsikirja]. Mercel Dekker. 801 s.

FAG. 1998. Vierintälaakereiden voitelu [verkkodokumentti]. [Viitattu 22.3.2021]. 65 s. Saatavissa PDF-Tiedostona:
https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/publication/downloads_18/wl_81115_4_fi_fi.pdf

Hitsaustekniikka. 2012. Kuluminen ja kulumiskestävyys. Hitsaustekniikka 1/2012. Suomen hitsausteknillinen yhdistys ry. s. 22.

Holmberg, K. Erdemir, A. 2017. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. [Verkkotietokanta]. Springer Link. Julkaistu 6.9.2017 [Viitattu 2.4.2021]. s. 1. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40544-017-0183-5>

Kivioja, S. Kivivuori, S. Salonen, P. 2004. Tribologia – Kitka, kuluminen ja voitelu [Käsikirja]. Neljäs korjattu painos. Helsinki: Hakapaino Oy. 351 s.

Klüber lubrication. Julkaisuaika tuntematon. The element that rolls the bearing. Tips and advice for the lubrication of rolling bearings [verkkodokumentti]. [viitattu 6.4.2021]. 44 s. Saatavissa PDF-tiedostona:
https://www.klueber.com/ecomaXL/files/Competence_brochure_rolling_bearing%5B1%5D.pdf

Klüber lubrication. Julkaisuaika tuntematon. Lubricant testing [verkkodokumentti]. [viitattu 31.3.2021]. s. 28...32. Saatavissa PDF-tiedostona:

<http://www.klueber.co.kr/index/images/pdf/Lubricant-testing.pdf>

Motiva. 2020. Sähkömoottorityypit [www-sivut]. [Viitattu 27.2.2021]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot/sahkomoottorityypit

MRC. 2015. Engineering handbook [verkkodokumentti]. [viitattu 21.4.2021]. Julkaistu 2005, päivitetty 7/2015. s. 269. Saatavissa PDF-tiedostona:

https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968024f8c3-M190-730_MRC_Engineering_Handbook_2015_tcm_12-279709.pdf

Opetushallitus. Julkaisuaika tuntematon. Kunnossapito – menestystekijä: Voiteluhuolto – voiteluaineet [www-sivut]. [Viitattu 13.4.2021]

Saatavissa: <http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/sivukartta.html>

Rohatgi, A. 2020. WebPlotDigitizer: Web based tool to extract data from plots, images, and maps [www-sivut]. Päivitetty 28.11.2020 [viitattu 23.3.2021]. Saatavissa:

<https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>

Schaeffler Technologies. 2013. Lubrication of rolling bearings [verkkodokumentti]. Julkaistu 3/2013 [viitattu 16.3.2021]. 223 s. Saatavissa PDF-tiedostona:

https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_176_de_en.pdf

Schaeffler Technologies. 2019. FAG Arcanol vierintälaakerirasvat [verkkodokumentti]. Julkaistu 3/2019 [viitattu 21.3.2021]. 82 s. Saatavissa PDF-tiedostona:

https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_168_fi_fi.pdf

SKF. 2003. General Catalogue [verkkodokumentti]. Julkaistu 6/2003 [viitattu 24.3.2021]. 354 s. Saatavissa PDF-tiedostona:

<http://www.imparayaycia.com/SKF%20CATALOGO%20GENERAL.pdf>

SKF. 2011. Bearing maintenance handbook [verkkodokumentti]. Julkaistu 9/2011 [viitattu 11.3.2021]. 447 s. Saatavissa PDF-tiedostona:

https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968013be94-SKF-bearing-maintenance-handbook---10001_1-EN%281%29_tcm_12-463040.pdf

SKF. 2013. Rolling bearings and seals in electric motors and generators [verkkodokumentti]. Julkaistu 8/2013 [viitattu 12.4.2021]. 141 s. Saatavissa PDF-tiedostona:

https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196802b0348-13459-EN-Rolling-bearings-and-seals-in-electric-motors-and-generators_tcm_12-134586.pdf

SKF. 2018. Bearings and mounted products [verkkodokumentti]. Julkaistu 2008, päivitetty 4/2018. 587 s. Saatavissa PDF-tiedostona:

https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196807026e8-100-700_SKF_bearings_and_mounted_products_2018_tcm_12-314117.pdf

SKF. Julkaisuaika tuntematon. SimPro Quick -simulointiohjelma. [Yrityksen www-sivulla]. [Viitattu 25.4.2021]. Saatavissa: <https://www.skf.com/fi/support/engineering-tools/simpro-quick>

SKF. Julkaisuaika tuntematon. Internal Clearance. [Yrityksen www-sivulla]. [viitattu 18.4.2021]. Saatavissa:

<https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/general-bearing-knowledge/bearing-basics/internal-clearance>

Teboil. 2020. Rasvavoitelun perusasioita. [Yrityksen www-sivulla]. [Viitattu 2.3.2021]. Saatavissa:

<https://www.teboil.fi/tuotteet/voiteluaineet/yleista-voiteluaineista/rasvavoitelun-perusasioita/>

VTT. 2000. Kulumismekanismit ja niiden merkitys vierintälaakereiden eliniälle [Julkinen tutkimusraportti]. Julkaistu 29.11.2000 [viitattu 20.3.2021]. S. 4...10. Saatavissa PDF-tiedostona:

<http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/kulumismekf.pdf>

VTT. 2004. Vierintälaakereiden rasvavoitelun perusteet [Julkinen tutkimusraportti]. Julkaistu 7.6.2004 [viitattu 25.3.2021]. 31 s. Saatavissa PDF-tiedostona:

http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/rasvavoitelu_btuo43_041258.pdf

LIITTEET

1 Lähtöarvot

Liite I, 1

2. Input

2.1. Bearing data

Bearing	Bearing designation	Bearing type	Bearing execution	Bore diameter (d) [mm]	Outer diameter (D) [mm]	Bearing width (B) [mm]
D-END	6030 M	DGBB	Standard	150.000	225.000	35.000
ND-END_1	7222 BECBM	ACBB	SKF EXPLORER	110.000	200.000	38.000
ND-END_2	7222 BECBM	ACBB	SKF EXPLORER	110.000	200.000	38.000

Bearing	Basic dynamic load rating (C) [kN]	Basic static load rating (C0) [kN]	Fatigue load limit (Pu) [kN]	Reference speed [rpm]	Limiting speed [rpm]
D-END	125.0	125.0	3.90	6000	5000
ND-END_1	163.0	156.0	5.30	4000	5000
ND-END_2	163.0	156.0	5.30	4000	5000

2.2. Lubricant data

Lubricant	Lubrication type	etaC selection method	Viscosity at 40 C [mm ² /s]	Viscosity at 100 C [mm ² /s]	Contains EP additives
LGHP 2	Grease	ISO 281 2007	96.00	10.50	Off

2.3. Temperatures

Bearing	Shaft / Inner ring [C]	Outer ring / Housing [C]
D-END	110	110
ND-END_1	110	110
ND-END_2	110	110

Bearing	Bearing radial load [N]	Bearing axial load [N]	Forces [N]			Moments [Nm]		
			X	Y	Z	YZ	ZX	XY
D-END	3704	-5615	0	-3704	-5615	144	0	0
ND-END_1	2760	10359	0	2760	10359	173	0	0
ND-END_2	1	-26	0	-1	-26	0	0	0

Bearing	Equivalent static bearing load (P0) [N]	Static safety factor s0	Equivalent dynamic bearing load (P) [N]	C/P
D-END	5030	24.9	10193	12.3
ND-END_1	4073	38.3	6871	23.7
ND-END_2	7	> 100	15	> 100

Alkuarvot SKF SimPro Quick laskentaohjelmistossa

BEARING INFORMATION				
D-end bearing	Bearing type		Deep groove ball bearing, single row	
	Bore diameter	d	150	mm
	Outer diameter	D	225	mm
	Width	B	35	mm
	Mass	m	4,9	kg
	Temperature (inner ring)	t_1	110	°C
	Temperature (outer ring)	t_2	110	°C
	Basic dynamic load rating	C	125	kN
	Basic static load rating	C_0	125	kN
Equivalent dynamic load	P	10,193	kN	
ND-end bearing	Bearing type		Angular contact ball bearing single row	
	Bore diameter	d	110	mm
	Outer diameter	D	200	mm
	Width	B	38	mm
	Mass	M	4,6	kg
	Temperature (inner ring)	t_1	110	°C
	Temperature (outer ring)	t_2	110	°C
	Basic dynamic load rating	C	163	kN
	Basic static load rating	C_0	156	kN
Equivalent dynamic load	P	6,871	kN	
Third bearing if applicable	Bearing type		Angular contact ball bearing single row	
	Bore diameter	d	110	mm
	Outer diameter	D	200	mm
	Width	B	38	mm
	Mass	m	4,45	kg
	Temperature (inner ring)	t_1	110	°C
	Temperature (outer ring)	t_2	110	°C
	Basic dynamic load rating	C	151	kN
	Basic static load rating	C_0	118	kN
Equivalent dynamic load	P	5,403	kN	
GREASE INFORMATION				
Grease	Minimum operating temperature	t_{min}	-50	°C
	Maximum operating temperature	t_{max}	140	°C
	Continuous Limit Operating temperature	t_{plimit}	80	°C
	Density	ρ	0,87	g/cm ³
OPERATING CONDITIONS				
	Shaft orientation		Horizontal	
	Motor Rotating speed	n	700	rpm
D-end	Rotating outer ring		No	
ND-end			No	
Third bearing			No	
	Operating environment		Moderate	
	Shock loads, vibration		Moderate	
	Angle of oscillation	ϕ	0	°(Deg)

Alkuarvot kandityössä tehdyssä laskentaohjelmistossa

2 Tulokset

Liite II, 1

Bearing	Catalogue grease life [h]	Catalogue relubrication interval [h]	Grease relubrication quantity from the side [gr]
D-END	N/A	1800	39.4
ND-END_1	N/A	2500	38.0
ND-END_2	N/A	2500	38.0

SKF SimPro Quick- Simulointiohjelmalla saadut tulokset liitteen I lähtöarvoilla

Liite II,2

RESULTS: REGREASE INTERVAL						
D-end bearing	Regrease interval (FAG)		2992	h		
	Regrease interval (SKF)		1175	h		
	Average regrease interval: (SKF+FAG)/2		2084	h		
ND-end bearing	Regrease interval (FAG)		2287	h		
	Regrease interval (SKF)		2748	h		
	Average regrease interval: (SKF+FAG)/2		2518	h		
Third bearing	Regrease interval (FAG)		2287	h		
	Regrease interval (SKF)		2748	h		
	Average regrease interval: (SKF+FAG)/2		2518	h		
RESULTS: GREASE QUANTITY						
D-end bearing	Grease amount, first fill		100	g		
	Grease amount, relubrication (FAG + Klüber)		24	g		
	Grease amount, relubrication (SKF)		39	g		
ND-end bearing	Grease amount, first fill		179	g		
	Grease amount, relubrication (FAG + Klüber)		23	g		
	Grease amount, relubrication (SKF)		38	g		
Third bearing	Grease amount, first fill		179	g		
	Grease amount, relubrication (FAG + Klüber)		23	g		
	Grease amount, relubrication (SKF)		38	g		
RESULTS WHEN BEARINGS ARE REGREASED AT THE SAME TIME						
	Relubrication interval		3	mths	Regreasing amount / Operational hours	
D-end bearing	Grease amount		25	g	25	g 2084 h
ND-end bearing	Grease amount		25	g	25	g 2084 h
Third bearing	Grease amount		25	g	25	g 2084 h

Kandityössä tehdyllä laskentaohjelmistolla saadut tulokset liitteen I lähtöarvoilla