



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

VIERINTÄLAAKERIT KONEENRAKENTEISSA

Oskari Mustonen

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2020

TIIVISTELMÄ

Vierintälaakerit koneenrakenteissa

Oskari Mustonen

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2020, 53 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Tapio Korpela

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on perehtyä koneenrakennuksessa käytettäviin vierintälaakereihin. Työssä tarkastellaan eri vierintälaakerityyppejä ja niiden ominaisuuksia, sekä tutustutaan vierintälaakeroinnin suunnitteluun. Työ suoritettiin kirjallisuuskatsauksena, jossa lähteinä käytettiin sekä kotimaisia että ulkomaisia kirjallisuus- ja verkkolähteitä.

Työn avulla lukija saa käsityksen vierintälaakereiden toiminnasta, erilaisista vierintälaakerityypeistä sekä niiden käytöstä osana koneiden rakenteita. Lukija pääsee perehtymään myös vierintälaakeroinnin suunnitteluun liittyviin seikkoihin, kuten laakerien kiinnitykseen ja kestoikäkaavoihin pohjautuvaan laakerikoon valintaan.

Asiasanat: laakeri, vierintälaakeri, laakerointi

ABSTRACT

Rolling bearings in structures of machines

Oskari Mustonen

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2020, 53 pp.

Supervisor at the university: Tapio Korpela

The aim of this bachelor's thesis is to get acquainted with the rolling bearings used in mechanical engineering. The thesis examines different types of rolling bearings and their features as well as designing of rolling bearing arrangement. The thesis was performed as a literature review, which consisted of both domestic and foreign literature as well as online sources.

This bachelor's thesis helps the reader to understand how rolling bearings work, what the different types of rolling bearings are and how they are used as a part of structures of machines. The reader will also familiarize himself with the aspects related to the planning of rolling bearing arrangement, such as mounting of bearings and bearing selection based on bearing lifetime calculation.

Keywords: bearing, rolling bearing, bearing arrangement

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty osana Oulun yliopiston konetekniikan koulutusohjelman kandidaatintutkintoa. Työn päätarkoituksena on tutustua vierintälaakereihin ja niiden käyttöön osana koneita. Työn tekeminen alkoi keväällä 2019 ja päättyi vuoden 2020 alussa. Haluan kiittää yliopisto-opettaja Tapio Korpelaa työn ohjaamisesta sekä avusta aiheen valinnassa ja rajaamisessa.

Oulu, 14.1.2020



Oskari Mustonen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	7
2 VIERINTÄLAAKERIEN PERUSTEET	8
2.1 Vierintälaakerin osat	8
2.2 Vierintälaakerien standardisointi	9
2.3 Valmistusmateriaalit	11
2.4 Historia	13
3 VIERINTÄLAAKERITYYPIT	14
3.1 Säteislaakerit	15
3.1.1 Urakuulalaakerit	15
3.1.2 Pallomaiset kuulalaakerit	16
3.1.3 Viistokuulalaakerit	17
3.1.4 Lieriörullalaakerit	19
3.1.5 Neulalaakerit	21
3.1.6 Pallomaiset rullalaakerit	23
3.1.7 Kartiorullalaakerit	25
3.2 Painelaakerit	27
3.2.1 Painekuulalaakerit	27
3.2.2 Lieriömäiset painerullalaakerit	28
3.2.3 Pallomaiset painerullalaakerit	29
4 VIERINTÄLAAKEROINNIN SUUNNITTELU	31
4.1 Laakerointijärjestelmä	31
4.2 Laakerikoon valinta kestoikäkaavojen avulla	33
4.3 Kiinnitys	35
4.3.1 Säteiskiinnitys	35
4.3.2 Aksiaalikiinnitys	39
4.4 Laakerivälitys	40
4.5 Esijännitys	41
4.6 Pyörimisnopeusrajat	42
4.7 Laakerien tiivistys	43

4.8 Laakerien voitelu.....	45
4.8.1 Rasvavoitelu	45
4.8.2 Öljyvoitelu.....	46
5 YHTEENVETO	49
LÄHDELUETTELO	

MERKINNÄT JA LYHENTEET

C	laakerin dynaaminen kantavuusluku
F_a	Kuormituksen aksiaalikomponentti
F_r	kuormituksen säteiskomponentti
L_{10}	laakerin nimellinen kestoikä miljoonina kierroksina
L_{10h}	laakerin nimellinen kestoikä tunteina
n	pyörimisnopeus
P	laakerin ekvivalenttikuormitus
p	eksponentti
X	laakerin säteiskerroin
Y	laakerin aksiaalikerroin

1 JOHDANTO

Tämän kandidaatintyön aiheena on vierintälaakerit koneenrakenteissa. Laakerit ovat erittäin olennaisia koneenosia lähes kaikissa koneissa, joissa esiintyy pyörivää tai kiertyvää liikettä. Vierintälaakereiden avulla liukukitka saadaan korvattua vierimiskitkalla, mikä mahdollistaa koneelle pienen tehohäviön ja pitkän käyttöiän.

Vierintälaakereita on useita erityyppisiä. Suunnittelijan on tärkeää tuntea vierintälaakerityyppien erot, jotta hän osaa valita sopivan vierintälaakerityypin suunnittelemaansa koneeseen. Laakeroinnin suunnittelussa on laakerityypin valinnan lisäksi huomioitava myös useita muita seikkoja, joista suunnittelijan on syytä olla tietoinen. Virheellisesti suunniteltu laakerointi voi pahimmillaan aiheuttaa vaurioita muillekin koneenosille kuin itse laakerille, kun taas onnistuneella ja kaikki tarpeelliset tekijät huomioivalla laakeroinnin suunnittelulla saavutetaan luotettava ja taloudellinen laakerointi.

Tämä työ on rajattu tarkastelemaan vain vierintälaakereita. Muiden laakerityyppien tarkastelu sivuutetaan, jotta työn laajuus ei paisu liiallisesti. Aluksi tutustutaan vierintälaakerien perusteisiin, jonka jälkeen käydään läpi erilaisia vierintälaakerityyppejä ominaisuuksineen. Lopuksi tutustutaan vierintälaakeroinnin suunnitteluun sekä siinä huomioitaviin asioihin.

2 VIERINTÄLAAKERIEN PERUSTEET

Vierintälaakerit ovat standardoituja sekä asennusvalmiita koneenosia (Björk ym. 2014, s. 296). Koneenrakenteissa niiden tehtävänä on ohjata ja tukea pyöriviä tai edestakaisin kiertyviä osia, kuten esimerkiksi akseleita. Vierintälaakereissa voimat välittyvät vierintäosien välityksellä. Tyypillisiä vierintäosia ovat kuulat, rullat tai neulat, joiden kosketuspinnan kuvio on teoreettisesti vain piste tai viiva. (Airila ym. 1987, s. 155)

Vierintälaakerit perustuvat havaintoon siitä, että kahden kappaleen välinen vierintävastus on pienempi kuin liukuvastus (Wuolijoki 1972, s. 361). Niinpä vierintälaakereiden oikeanlaisella hyödyntämisellä voidaan alentaa koneiden liikkuvien osien välistä kitkaa ja siten esimerkiksi parantaa koneen hyötysuhdetta.

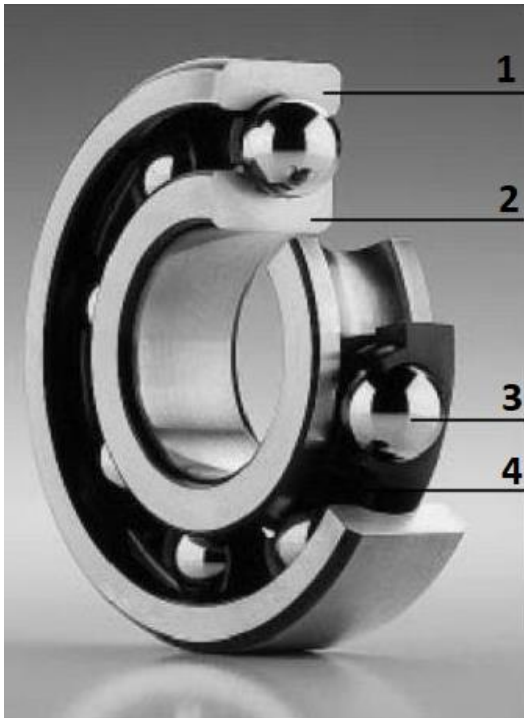
2.1 Vierintälaakerin osat

Vierintälaakerit koostuvat kahdesta rengasmaisesta kehästä, jotka ottavat voimat vastaan akselilta ja navalta sekä toimivat kulku-urina vierintäelimille. Vierintäelinten, eli kuulien, rullien tai neulojen tehtävänä on välittää voimat laakerin kehältä toiselle. (Blom ym. 1999, s. 121)

Kehien välissä vierintäelimiä voi ympäröidä pidin, jonka tehtävänä on pitää laakerin vierintäelimet oikealla etäisyydellä toisistaan ja estää kahden vierekkäisen vierintäelimen välinen kosketus. Kun vierintäelinten kosketus estetään, kitka alenee ja laakerin toimintalämpötila pysyy alhaisena. Pitimen tehtäviin voi kuulua myös vierintäelimien koossa pitäminen laakeria asennettaessa tai irrotettaessa sekä vierintäelinten ohjaaminen. (SKF Laakerikirja 1991, s. 90) Kaikissa laakereissa pidintä ei kuitenkaan ole, ja pitimettömiä laakereita voidaan käyttää esimerkiksi hitaita liikkeitä laakeroitaessa. Pitimettömissä laakereissa kantavuus voi olla parempi kuin pitimellisissä, mutta hintana tälle parannukselle on usein suurempi pyörimisvastus. (Blom ym. 1999, s. 121)

Voiteluaine, eli öljy tai rasva, kuuluu myös oleellisesti vierintälaakereihin. Voiteluaineen puhtaudella on ratkaiseva vaikutus laakerin toiminnalle, sillä voiteluaineeseen joutuneet epäpuhtaudet, kuten vesi sekä kuluma- ja likahiukkaset, voivat heikentää laakerin toimintakykyä huomattavasti. (Blom ym. 1999, s. 121-123)

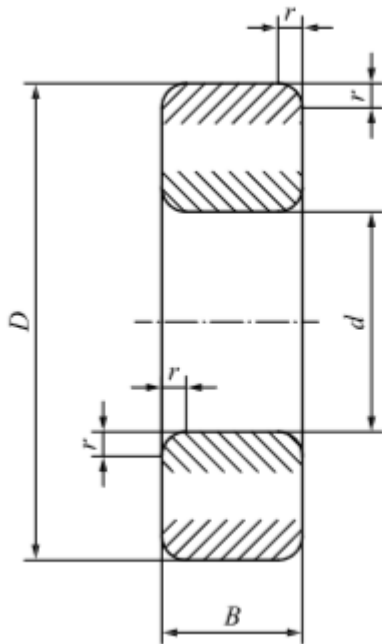
Kuvassa 1 vierintälaakerin tyypilliset osat: 1. ulkokehä, 2. sisäkehä, 3. vierintäelimet, 4. pidin. Lisäksi vierintälaakereihin voi kuulua erilaisia tiivistimiä ja kiinnityselimiä (Blom ym. 1999, s. 121).



Kuva 1. Vierintälaakerin osat (mukaiillen IEEE GlobalSpec 2019).

2.2 Vierintälaakerien standardisointi

Vierintälaakerien käyttäjät ja valmistajat ovat hinta-, laatu-, ja varaosasyiden vuoksi halunneet rajoittaa laakerikokojen määrää. Tämän takia kansainvälinen standardisointijärjestö ISO on laatinut mittataulukot, joissa määritellään metristen vierintälaakerien päämitat. Näitä päämittoja määritteleviä standardeja ovat ISO 15 (säteislaakereille lukuun ottamatta kartiorullalaakereita), ISO 355 (kartiorullalaakereille) ja ISO 104 (painelaakereille). Vierintälaakerin päämittoja on havainnollistettu kuvassa 2, ja niitä ovat reiän halkaisija d , ulkohalkaisija D , leveys B ja ulkosärmän pyöristys r . (SKF Laakerikirja 1991, s. 68)



Kuva 2. Vierintälaakerin päämitat (ISO 2017).

Standardoitujen vierintälaakerien päämitat on määrätty siten, että jokaista reiän halkaisijaa kohti on tietyt standardimitat leveydelle ja ulkohalkaisijalle. Jokaiselle reiän halkaisijalle on useita mahdollisia laakerin leveyksiä ja ulkohalkaisijoita. Kaikki standardilaakerit kuuluvat dimensiosarjoihin, joita merkitään kaksinumeroisella luvulla. Ensimmäinen numero kertoo halkaisijasarjan ja toinen leveysarjan. Kun reiän halkaisija muuttuu, myös ulkohalkaisija muuttuu, vaikka halkaisijasarja pysyy samana. Kaikkiin halkaisijasarjoihin kuuluu eri levyisiä laakereita. Myös painelaakereiden ja kartiorullalaakereiden dimensiosarjat muodostuvat samaan tapaan. (Airila ym. 1987, s. 182)

ISO on standardisoinut myös vierintälaakerien mitta- ja vierintätarkkuuden (SKF laakerikirja 1991, s. 71). Vierintälaakereiden mittatoleranssit ovat riippuvaisia reiän halkaisijasta (Airila ym. 1987, s. 183). Normaalikäyttöön tarkoitettujen toleranssien lisäksi on olemassa standardit myös normaalia tarkemmille laakereille, ja laakerivalmistajilta on saatavissa erikoislaakerointeihin, kuten työstökoneiden karoihin, erittäin tarkoilla toleransseilla olevia laakereita (SKF Laakerikirja 1991, s. 71).

2.3 Valmistusmateriaalit

Vierintälaakerien eri osien valmistusmateriaali vaikuttaa suuresti niiden suorituskykyyn ja luotettavuuteen. Laakerirenkaiden ja vierintäelinten valmistuksessa käytettävät teräslaadut on voitava karkaista siten, että saavutetaan suuri väsymislujuus ja kulumiskestävyys. Laakerin on sovelluttava niihin käyttölämpötiloihin, joissa sen täytyy toimia. Tämä tarkoittaa, että laakerin osien sisäisen kiderakenteen sekä mittojen on säilyttävä käyttölämpötilassa riittävän hyvin. (SKF Laakerikirja 1991, s. 89)

Useimmiten vierintälaakerit on valmistettu ns. kuulalaakeriteräksestä, eli teräksestä, joka on hiilikromiterästä ja sisältää noin 1% hiiltä ja 1,5% kromia. Laakeriosat, joilla on suuri poikkileikkauspinta, valmistetaan yleensä mangaania ja molybdeeniä sisältävistä seostetuista teräksistä, koska siten voidaan saavuttaa erinomaiset karkaisuominaisuudet. Vierintälaakerit voidaan valmistaa myös hiiletysteräksistä, joista eniten käytetty on krominikkeli- tai mangaanikromiteräs, jonka hiilipitoisuus on noin 0,15%. Useimmissa tapauksissa ei käytännössä huomata eroa kuulalaakeri- ja hiiletysteräksestä valmistettujen laakereiden toiminnan välillä. Tämä käy ilmi esimerkiksi ISO:n toteamuksesta, että laakereiden kestoikälaskelmissa ei tarvitse tehdä minkäänlaista eroa edellä mainittujen teräslaatuojen välillä. Sen sijaan tärkeitä tekijöitä ovat teräksen puhtaus, sopivat valmistusmenetelmät ja laakerien rakenne. (SKF Laakerikirja 1991, s. 89)

Vierintälaakerit on mahdollista valmistaa myös siten, että ne kestävät altistuksen syövyttävälle aineille. Tällaiset laakerit valmistetaan yleensä ruostumattomasta kromi- tai kromimolybdeeniteräksestä. Nämä teräkset eivät kuitenkaan ole yhtä kovia kuin normaalit laakeriteräkset, joten niistä valmistettujen laakerien kantokyky ei ole yhtä suuri kuin vierintälaakereilla normaalisti. Jotta vierintälaakerit kestäisivät korroosiota, täytyy kaikkien pintojen olla kiillotettu virheettömästi, eikä asennuksen yhteydessä saa syntyä naarmuja tai muita vaurioita. (SKF Laakerikirja 1991, s. 89)

Normaalit vierintälaakereiden laakerirenkaat ja vierintäelimet säilyttävät kiderakenteensa ja mittansa noin 125 – 150 °C toimintalämpötilaan saakka (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 83; SKF Laakerikirja 1991, s. 89). Tätä korkeammassa lämpötiloissa täytyy käyttää laakereita, jotka on erikoislämpökäsitelty. Jos käyttölämpötila ylittää 300 °C, on syytä käyttää erikoisteräksestä valmistettuja laakereita. (SKF Laakerikirja 1991, s. 89)

Vierintälaakereita on saatavilla myös joko osittain tai kokonaan keraameista valmistettuna. Keraamisilla laakereilla on teräksiin verrattuna suurempi kovuus ja kimmomoduuli, minkä ansiosta ne säilyttävät paremmin muotonsa suurten kuormitusten alaisina. Ne pystyvät myös vastustamaan hyvin korroosiota kosteissa tai kemikaalipitoisissa ympäristöissä. Muita keraamisten laakereiden etuja ovat mm. mahdollisuus olla käyttämättä voitelua, epämagneettisuus sekä pieni lämpölaajeneminen korkeissa lämpötiloissa. Keraamisten laakereiden käytössä on kuitenkin myös omat ongelmakohtansa. Teräksisiin laakereihin verrattuna niillä on huonompi kantavuus, ne kestävät huonosti lämpötilan vaihtelua sekä niiden valmistamisprosessi on haastava ja kallis, mikä tekee keraamisista laakereista huomattavasti teräksisiä kalliimpia. (BC Precision 2019)

Pitimien valmistusmateriaali vaikuttaa niin pitimen kuin koko laakerin suorituskykyyn. Pidinvälikappaleen täytyy tulla toimeen pidintä kuormittavien kitka- jännitys- ja hitausvoimien kanssa. Pitimet valmistetaan yleensä joko polyamidimuovista, teräksestä tai messingistä. (SKF Laakerikirja 1991, s. 90)

Polyamidimuovipitimet ovat lujia, kevyitä ja kimmoisia, sekä erinomaisten liukuominaisuuksien ansiosta niiden aiheuttama kitka voideltua teräspintaa vasten on hyvin pieni. Muovipidintä käytettäessä on voiteluaineen sopivuus otettava huomioon, jotta kemialliset reaktiot eivät pääse heikentämään pitimen toimintakykyä. Muovipidin ei myöskään sovellu käytettäväksi olosuhteissa, joissa käyttölämpötila on jatkuvasti yli 120 °C tai alle -40 °C. Sallitun lämpötilan ylittäminen aiheuttaa muovipitimestä vanhenemista, ja liian kylmässä lämpötilassa ne menettävät kimmoisuusominaisuutensa. (SKF Laakerikirja 1991, s. 90-91)

Teräspitimet puolestaan soveltuvat käytettäväksi 300 °C käyttölämpötilaan asti. Ne on mahdollista karkaista ja pintakäsitellä, jolloin kitkaa ja kulumista saadaan vähennettyä. Tavalliset voiteluaineet eivät vahingoita teräspitimiä, eivätkä myöskään laakereiden pesuun normaalisti käytettävät orgaaniset liuottimet. (SKF Laakerikirja 1991, s. 91)

Messinkipitimiä käytetään erityisesti tietyn tyyppisissä pienissä ja keskikokoisissa vierintälaakereissa, eivätkä nekään sovellu yli 300 °C käyttölämpötiloihin. Messinkipitimet eivät sovellu kaikkiin käyttöympäristöihin, vaan jotkin aineet, kuten esimerkiksi ammoniakki, voivat aiheuttaa messingissä säröjä. (SKF Laakerikirja 1991, s. 92)

2.4 Historia

Vierintälaakerin varhaisimpana versiona voidaan pitää muun muassa muinaisten egyptiläisten käyttämää tapaa liikutella raskaita esineitä paikasta toiseen pyöreiden puunrunkojen päällä. Egyptiläiset hyödynsivät keksintöä esimerkiksi pyramideja rakentaessaan. Tämä vierintälaakerin varhaisversio saattaa olla jopa keksitty aikaisemmin kuin pyörä. (Wikipedia 2018)

Ensimmäinen löydös varsinaisia vierintäelimiä sisältävästä laakerista ajoittuu vuodelle 40 eKr. Italiaan Nemi-järveen uponneen roomalaislaivan hyllystä on löydetty pyörivä pöytä, joka sisältää puisen kuulalaakerin. Ensimmäiset vierintälaakerit olivatkin yleisesti puusta valmistettuja. Myöhemmin niitä alettiin valmistamaan myös pronssista. (Wikipedia 2018)

Leonardo da Vincin tiedetään tehneen piirroksia vierintälaakereista vuoden 1500 paikkeilla helikopteria suunnitellessaan. Italialainen Agostino Ramelli oli kuitenkin ensimmäinen keksijä, joka julkaisi piirroksia vierintälaakereista. Galileo Galileita puolestaan pidetään ensimmäisen pitimellisen vierintälaakerin suunnittelijana. (Wikipedia 2018)

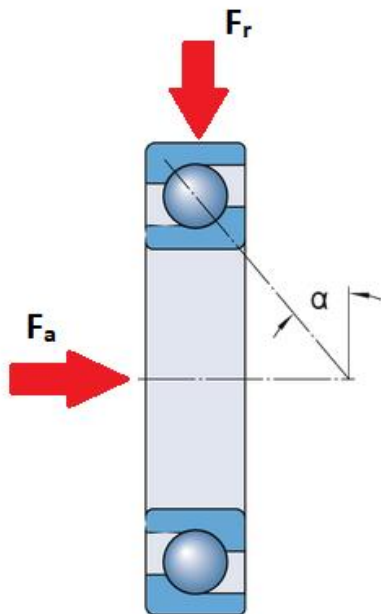
Ensimmäisen modernin patentin vierintälaakereille sai walesilainen keksijä Philip Vaughan vuonna 1794. Tämän jälkeen laakerit olivat tärkeässä roolissa teollisessa vallankumouksessa, sillä niiden avulla teollisuuden koneet saatiin toimimaan tehokkaammin. (Wikipedia 2018)

Vuonna 1883 vierintälaakerivalmistaja FAG:n perustaja Friedrich Fischer kehitti kuulahiomakoneen, jonka avulla saatiin valmistettua täsmälleen samankokoisia teräspalloja vierintäelimiksi laakereihin. Tämän jälkeen vierintälaakereiden teollisen suursarjatuotannon katsotaan alkaneen. (Wikipedia 2018)

3 VIERINTÄLAAKERITYYPIT

Vierintälaakereita on olemassa useita erityyppisiä. Jokaisella vierintälaakerityypillä on omat erikoisominaisuutensa, jotka määrittävät kunkin tyypin soveltuvuuden erilaisiin käyttökohteisiin. Laakerimallia valittaessa täytyy huomioida useiden tekijöiden yhteisvaikutus, joten oikean mallin valinta ei ole aina aivan yksinkertaista. Laakeroinnin sisältävän koneen toiminnan kannalta on kuitenkin todella tärkeää, että jokaiseen laakerointiin onnistutaan valitsemaan sopiva laakerimalli ja -koko. (SKF Laakerien kunnossapito 1994, s. 10-11)

Kuormituksen suuruus on yleensä käytettävän laakerikoon määräävä tekijä, kun taas kuormituksen suunta on vahvasti yhteydessä laakerityypin valintaan (SKF Laakerikirja 1991, s. 92). Vierintälaakerit jaetaan kahteen ryhmään sen perusteella, minkä suuntaisia kuormituksia ne pääsääntöisesti kantavat. Nämä ryhmät ovat säteislaakerit ja painelaakerit. Mahdollisia kuormitussuuntia ovat säteiskuormitus ja aksiaalikuormitus, joita on havainnollistettu kuvassa 3. Laakereiden kuormitus ei välttämättä ole puhdasta säteiskuormitusta tai aksiaalikuormitusta, vaan se voi olla myös näiden yhdistelmästä muodostuvaa yhdistettyä kuormitusta. (SKF 2019)



Kuva 3. Vierintälaakerin aksiaalikuormitus F_a ja säteiskuormitus F_r sekä kosketuskulma α (mukailten SKF 2019).

3.1 Säteislaakerit

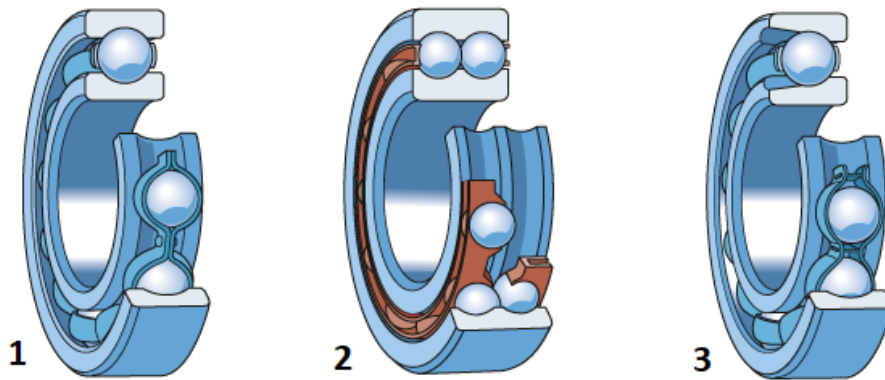
Säteislaakereiksi kutsutaan laakereita, jotka kantavat pääasiassa laakerin säteen suuntaista kuormitusta. Niiden kosketuskulma $\alpha \leq 45^\circ$. Lähes kaikki säteislaakerit muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta kestävät säteiskuormituksen lisäksi myös jossakin määrin aksiaalkuormitusta. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 14)

3.1.1 Urakuulalaakerit

Urakuulalaakereiden käyttöalue on erittäin laaja. Yksirivinen urakuulalaakeri onkin helppo- ja monikäyttöisyytensä sekä edullisen hintansa vuoksi eniten käytetty vierintälaakerityyppi. Urakuulalaakeri on rakenteeltaan yksinkertainen. Sen muodostavat kuulamaiset vierintäelimet sekä ulkokehä ja sisäkehä, joiden välissä kuulat liikkuvat uramaisella vierintäradallaan. Urakuulalaakerit ovat itsestään koossa pysyviä, eli niitä ei ole mahdollista purkaa. (Blom ym. 1999, s. 132-133)

Urakuulalaakeri soveltuu erityisesti laakerointeihin, jossa vallitseva kuormitus on pientä tai keskisuurta. Säteiskuormituksen lisäksi urakuulalaakerit pystyvät normaalisti kantamaan hyvin myös aksiaalkuormitusta kummassakin suunnassa. Tämä perustuu syviin vierintäratioihin sekä hyvään vierintäratiojen ja kuulien väliseen kosketukseen. Urakuulalaakerit soveltuvat hyvin suurillekin pyörimisnopeuksille, ja huollon tarve on yleensä pieni. (SKF Laakerikirja 1991, s. 175-176)

Urakuulalaakereita on saatavilla monena eri rakenteena ja kokona. Tavallisimman, eli yksirivisen urakuulalaakerin lisäksi, niitä on saatavilla myös kaksirivisenä. Kaksirivistä urakuulalaakeria voidaan käyttää silloin, kun yksirivisen kuormankantokyky ei ole riittävä. Urakuulalaakerit voivat olla molemmilta puolilta avoimia, tai niissä voi olla suoja- tai tiivistyslevyt joko laakerin toisella tai molemmilla puolilla. Molemmiin puoliin tiivistetyt laakerit on keuhoideltu rasvalla. Tavallisen yksirivisen sekä kaksirivisen urakuulalaakerin lisäksi on olemassa myös täyttöurallinen urakuulalaakerirakenne, jota käytetään erikoislaakeroinneissa. (SKF Laakerikirja 1991, s. 175-177) Täyttöura mahdollistaa standardilaakeria useamman kuulamaisen vierintäelimen sijoittamisen laakeriin, jolloin saadaan nostettua säteiskuormituksen kantokykyä. Aksiaalkuormituksen kantokyky on kuitenkin pieni, ja myöskään yhtä korkeat pyörimisnopeudet kuin täyttöurattomilla laakereilla eivät ole mahdollisia. (SKF 2019) Urakuulalaakerien rakennevaihtoehtoja havainnollistetaan kuvassa 4.



Kuva 4. Urakuulalaakerin rakennevaihtoehtoja: yksirivinen urakuulalaakeri (1), kaksirivinen urakuulalaakeri (2) ja urakuulalaakeri täyttöurilla (3) (mukaiillen SKF 2019).

3.1.2 Pallomaiset kuulalaakerit

Pallomaiset kuulalaakerit ovat vierintälaakereita, joissa vierintäeliminä on kuulia kahdessa kuularivissä. Kaksirivisistä urakuulalaakereista pallomaiset kuulalaakerit eroavat siten, että kuulariveillä on ulkorenkaalla yhteinen pallomainen vierintärata kuularivien omien erillisten vierintäurien sijaan. Sisäkehällä puolestaan myös pallomaisilla kuulalaakereilla on kummallekin kuulariville omat vierintäurat. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 209)

Pallomaiset kuulalaakerit eroavat urakuulalaakereista itseasettuvuusominaisuuksillaan. Ulkorenaan yhteisen vierintäradan ansiosta pallomaiset kuulalaakerit ovat itseasettuvia, eli ne sallivat akselin ja laakeripesän väliset pienet yhdensuuntaisuuserot paremmin kuin urakuulalaakerit. Tämä tekee pallomaisista kuulalaakereista sopivia erityisesti laakerointeihin, joissa asennusvirheet tai akselin taipuminen voivat aiheuttaa yhdensuuntaisuuseroja. Heikkoutena pallomaisilla kuulalaakereilla on huonohko aksiaalikuormituksen ja yhdistetyn kuormituksen kesto. Myös pallomaiset kuulalaakerit ovat itsestään koossa pysyviä, eikä niitä ole mahdollista purkaa. (SKF Laakerikirja 1991, s. 24-25, 255)

Pallomaisia kuulalaakereita on olemassa useana eri rakennevaihtoehtona. Kuvassa 5 esitetyn normaalirakenteisen lisäksi on saatavilla esimerkiksi tiivistimillä tai leveällä sisärenkaalla varustettuja pallomaisia kuulalaakereita. Pallomaisia kuulalaakereita on saatavana myös kartiomaisella sisäreiällä, joka mahdollistaa laakerin asentamisen

kartiomaiselle akselille. Kartiomaisella reiällä varustettuja laakereita on saatavana kiristysholkilla, joka mahdollistaa kartioreikäisen laakerin helpon ja nopean asentamisen myös lieriömäiselle tai olakkeelliselle akselille. (SKF Laakerikirja 1991, s. 255-256)



Kuva 5. Leikkauskuva normaalirakenteisesta pallomaisesta kuulalaakerista (Santora, M., 2016).

3.1.3 Viistokuulalaakerit

Viistokuulalaakerit muodostuvat kuulamaisista vierintäelimistä, sekä sisä- ja ulkorenkään muodostamista vierintäradoista, jotka ovat toisiinsa nähden aksiaalisesti siirtyneitä. Tämän rakenteen ansiosta viistokuulalaakerit sopivat erittäin hyvin kantamaan yhdistettyjä kuormituksia, eli samaan aikaan vaikuttavia säteis- ja aksiaalikuormituksia. (SKF Laakerikirja 1991, s. 285)

Viistokuulalaakerien aksiaalinen kantokyky riippuu kosketuskulmasta α . Mitä suurempi kosketuskulma on, niin sitä suurempi on myös aksiaalinen kantokyky. Kosketuskulma tarkoittaa kulmaa, joka muodostuu kuulun ja vierintäratojen kosketuspisteitä säteistasossa yhdistävän linjan, eli kuormituslinjan, ja laakerin geometrisen akselin kanssa kohtisuoran tason välille. Kosketuskulma havainnollistetaan kuvassa 3. (SKF Laakerikirja 1991, s. 285)

Viistokuulalaakereita on olemassa useana erilaisena rakenteena, joista yleisimmin konetekniikassa käytetään yksirivisiä ja kaksirivisiä viistokuulalaakereita sekä nelipiste-

viistokuulalaakereita. Nämä yleisimmät rakenteet on esitetty kuvassa 6. Laakerivalmistajilta, kuten SKF:ltä, on saatavissa myös erityistarkoituksiin suunniteltuja viistokuulalaakereita. Tällaisia ovat esimerkiksi työstökoneiden tarkkuusrakenteiset viistokuulalaakerit, suurikokoiset yksi- ja kaksiriviset raskaan teollisuuden käyttöön suunnitellut viistokuulalaakerit sekä autoteollisuuden tarvitsemat pyöränlaakeriyksiköt. (SKF Laakerikirja 1991, s. 285)

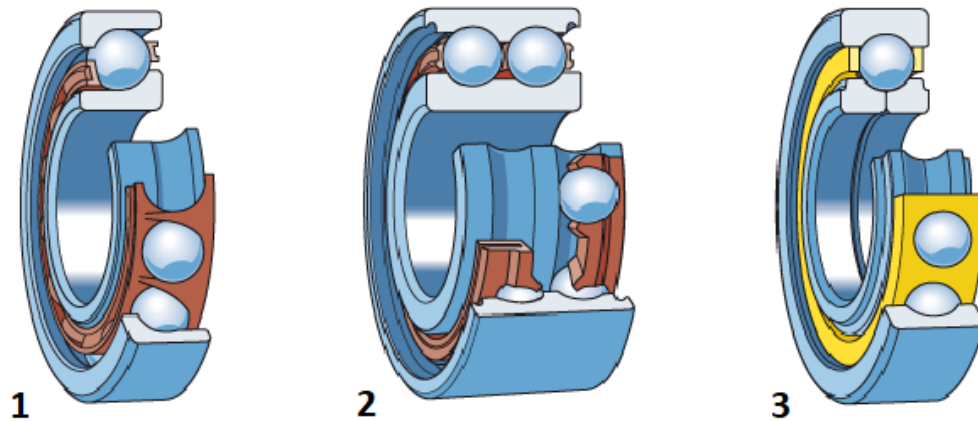
Yksittäinen yksirivinen viistokuulalaakeri pystyy kantamaan vain yhdensuuntaista aksiaalikuormitusta. Yksiriviset viistokuulalaakerit asennetaankin usein toista laakeria vasten, joka suorittaa vastaohjauksen. Akselin ja laakeripesän väliset yhdensuuntaisuuserot eivät ole hyväksi yksirivisille viistokuulalaakereille, sillä niiden kulma-assennoitumiskyky on todella vähäinen. Sen sijaan soveltuvuus korkeille pyörintänopeuksille on hyvä, mutta jos kaksi viistokuulalaakeria asennetaan välittömästi vierekkäin, niin pyörintänopeusrajat alentuvat yksittäisen viistokuulalaakerin vastaavista. Urakuulalaakereiden ja pallomaisten kuulalaakereiden tapaan myöskään tavalliset viistokuulalaakerit eivät ole purettavissa. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 161)

Yksirivisiä viistokuulalaakereita valmistetaan tyypillisesti myös pareittain asennettavaksi. Nämä laakerit ovat valmistettu siten, että kun ne asennetaan välittömästi kiinni toisiinsa, saavutetaan ennalta määritetty aksiaalivälitys tai tasainen kuormitusjakauma käyttämättä välilevyjä tai muita vastaavia keinoja. Pareittain asennusta käytetään tilanteissa, joissa tarvitaan suurempaa kantokykyä kuin yksittäisellä viistokuulalaakerilla, tai kun halutaan, että laakerointi pystyy kantamaan aksiaalikuormitusta kummassakin suunnassa. (SKF Laakerikirja 1991, s. 286-287)

Kaksirivisten viistokuulalaakerien rakenne muistuttaa kahta yksirivistä viistokuulalaakeria, jotka on asennettu vierekkäin niin että niiden kuormituslinjat osoittavat toisistaan pois päin. Etuna kaksirivisillä viistokuulalaakereilla on se, että ne ovat kapeampia kuin kaksi vierekkäin asennettua yksirivistä laakeria. Ne sopivat hyvin laakerointeihin, joissa vaaditaan yhdistetyn kuorman kantokykyä, sillä kaksiriviset viistokuulalaakerit kykenevät kantamaan suuria säteiskuormituksia ja myös aksiaalikuormituksia kummassakin suunnassa. (SKF Laakerikirja 1991, s. 306)

Tavallisten yksirivisten ja kaksirivisten viistokuulalaakerien lisäksi on olemassa myös nelipiste-viistokuulalaakereita. Ne ovat yksirivisten viistokuulalaakerien muunnos, jossa vierintäradat on suunniteltu siten, että laakeri pystyy kantamaan aksiaalikuormitusta

kummassakin suunnassa. Niitä voidaan käyttää esimerkiksi silloin, kun halutaan säästää tilaa, sillä ne vievät aksiaalisuunnassa vähemmän tilaa kuin kaksiriviset viistokuulalaakerit. Muista viistokuulalaakereista poiketen nelipistelaakerit eivät ole itsestään koossa pysyviä, vaan niiden molemmat sisärenkaat ja ulkorengas sekä kuulat ja pidin voidaan haluttaessa asentaa myös erillisenä. (SKF Laakerikirja 1991, s. 320)



Kuva 6. Viistokuulalaakerin yleisimmät rakennevaihtoehdot: yksirivinen viistokuulalaakeri (1), kaksirivinen viistokuulalaakeri (2) ja nelipiste-viistokuulalaakeri (3) (mukaillen SKF 2019).

3.1.4 Lieriörullalaakerit

Lieriörullalaakereissa vierintäelininä on kuulien sijaan lieriön muotoisia rullia. Rullien hyvän kantavuuden vuoksi lieriörullalaakerit soveltuvat erityisesti keski- ja suurikuormaisiin laakerointeihin. Samankokoisiin urakuulalaakereihin verrattaessa lieriörullalaakereiden kantavuusluvut ovatkin noin kaksinkertaisia. (Blom ym. 1999, s. 137-138)

Lieriörullalaakerit eroavat olennaisesti monista muista säteislaakereista siinä, että ne on mahdollista purkaa. Tämä voi helpottaa esimerkiksi asennustilanteita. Ne myös soveltuvat erittäin hyvin suurien pyörimisnopeuksien laakerointeihin saavuttaen lisäksi hyvän vierintätarkkuuden. Haittapuolena on, että lieriörullalaakerit eivät kestä juurikaan akselin ja laakeripesän välisiä yhdensuuntaisuuseroja. (SKF Laakerikirja 1991, s. 24)

Lieriörullalaakereita on saatavissa monena eri kokona ja rakenteena. Yleisimpiä lieriörullalaakereita ovat yksiriviset pitimelliset lieriörullalaakerit sekä yksi- tai

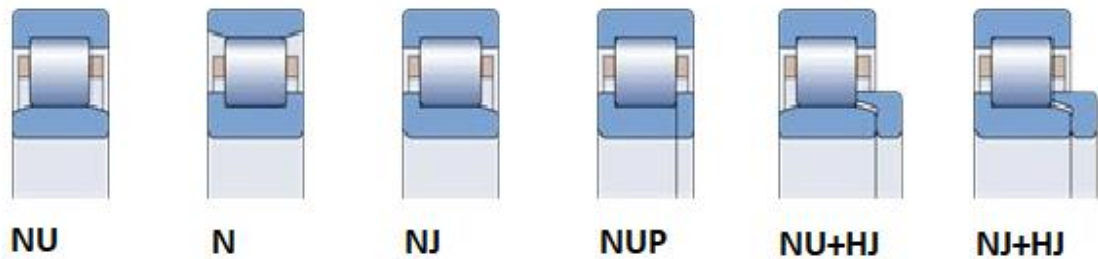
kaksiriviset pitimettömät täysrullalaakerit. Lisäksi laakerivalmistajilta on saatavissa erikoistarkoituksiin soveltuvia lieriörullalaakereita, kuten monirivisiä korkean kantavuuden laakereita esimerkiksi valssaimien ja muiden raskaiden laakerointien tarpeeseen. Myös tarkkuusrakenteisia lieriörullalaakereita työstökoneiden laakerointeihin on saatavilla. (SKF Laakerikirja 1991, s. 329) Kuvassa 7 on esitettyä yleisimpiä lieriörullalaakerityyppejä: yksirivinen pitimellinen lieriörullalaakeri ja pitimetön lieriömäinen täysrullalaakeri



Kuva 7. Yksirivinen pitimellinen lieriörullalaakeri (1) ja pitimetön lieriömäinen täysrullalaakeri (2) (mukaiillen NKE Bearings 2019; SKF 2019).

Yksirivisiä lieriörullalaakereita on olemassa erilaisina rakenteina eri käyttökohteita varten. Erilaiset rakenteet eroavat toisistaan olakkeiden sijoituksella. NU-rakenteisen yksirivisen lieriörullalaakerin ulkorenkaassa on kaksi olaketta, mutta sisärenkas on olakkeeton. N-rakenteessa puolestaan ulkorengas on olakkeeton, ja sisärenkaassa on kaksi olaketta. NJ-lieriörullalaakerissa ulkorenkaassa on kaksi olaketta ja sisärenkaassakin yksi. Rakenteensa ansiosta NJ-laakeri soveltuu vastaanottamaan aksiaalivoimia yhdestä suunnasta, kun taas NU- ja N- rakenteiset laakerit eivät siihen sovellu. Jos tarvitaan yksirivistä lieriörullalaakeria, joka pystyy ottamaan vastaan aksiaalivoimia molemmista suunnista, käytetään NUP-rakennetta. Siinä ulkorenkaissa on kaksi olaketta ja sisärenkaassa yksi kiinteä olake sekä yksi irrallinen olakerengas. Lisäksi on olemassa kulmarenkaalliset vaihtoehdot NJ+HJ ja NU+HJ. NJ+HJ on NJ-lieriörullalaakeri, johon on lisätty kulmarengas HJ, jonka avulla saadaan muodostettua NUP-laakerin tapainen kummankin suuntaisia aksiaalivoimia kestävä laakeri. NU+HJ on puolestaan NU-lieriörullalaakeri, jonka toiselle puolelle on lisätty kulmarengas. Tällä toimenpiteellä NU-laakeri saadaan kantamaan yhdensuuntaisia aksiaalivoimia NJ-

laakerin tapaan. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 233) Yksirivisen lieriörullalaakerin rakennevaihtoehdot on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Yksirivisen lieriörullalaakerin rakennevaihtoehdot (mukaillen SKF 2019).

Lieriömäiset täysrullalaakerit eroavat normaaleista yksirivisistä lieriörullalaakereista siten, että niissä ei ole ollenkaan pidintä. Pitimettömyyden ansiosta niihin saadaan sijoitettua mahdollisimman suuri määrä vierintäelimiä toimivia lieriörullia, jolloin saavutetaan erittäin hyvä säteiskuormituksen kantokyky. Lieriömäisen täysrullalaakerin poikkileikkauksen korkeus on yleensä leveyteen verrattuna pieni, mikä mahdollistaa tilan säästämisen koneiden laakeroinneissa. Heikkoutena lieriömäisillä täysrullalaakereilla on pitimellisiä lieriörullalaakereita alhaisemmat pyörimisnopeusrajat, mikä johtuu vierekkäisten rullien suoran kosketuksen aiheuttamista epäedullisista kinemaattisista ominaisuuksista. Myös lieriömäisiä täysrullalaakereita on olemassa erilaisilla laipparakenteilla, jotka mahdollistavat käytön erilaisissa käyttökohteissa. (SKF Laakerikirja 1991, s. 374-375)

Lieriömäisiä täysrullalaakereita on saatavissa niin tiivistettynä kuin tiivistämättömänäkin. Tiivistämättömien yksi- ja kaksirivisten pääasiallinen käyttökohde on vaihteistovalmistus, kun taas tiivistettyjä kaksirivisiä täysrullalaakereita laitetaan eniten nostureihin. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 273)

3.1.5 Neulalaakerit

Neulalaakerit ovat vierintälaakereita, joissa vierintäeliminä on ohuita ja pitkiä neulamaisia lieriörullia. Tyypillinen neulalaakerirakenne koostuu sisäkehästä, ulkokehästä, neularullista ja niitä yhdistävästä pitimestä. Neulalaakereita on olemassa myös ilman sisäkehää, jolloin neulamaiset vierintäelimet asennetaan suoraan kosketuksiin akselin kanssa. Kuulalaakereihin verrattuna neulalaakereiden

vierintäelimillä on suuri kosketuspinta-ala, minkä ansiosta voidaan saavuttaa suuri säteiskuormituksen kesto. (Cummins 2010)

Vierintäeliminä toimivien neularullien vaippapinta ei ole normaalisti aivan suora, vaan se kaareutuu hieman rullien päitä kohti. Tällä tavoin mahdollistetaan neularullien ja vierintäratojen välinen joustava viivakosketus, joka estää vahinkoa aiheuttavat reunakuormitukset. (SKF Laakerikirja 1991, s. 415)

Neulalaakereiden suurena etuna on, että niissä yhdistyy matala poikkileikkauskorkeus ja suuri kantokyky. Tämä tekee niistä erittäin käyttökelpoisia sellaisissa laakeroinneissa, joissa säteissuuntainen tila on rajoitettu. Säteissuuntaista tilaa pystytään säästämään erityisen paljon silloin, kun käytetään sisäkehättömiä neulalaakereita. Neulalaakerit eivät kuitenkaan sovellu kaikenlaisiin laakerointeihin, sillä niiden aksiaali- ja yhdistetyn kuormituksen kantokyky on heikkoa, eivätkä pyörimisnopeusrajatkaan ole yhtä korkeita kuin useimmilla muilla säteislaakereilla. Neulalaakerit eivät myöskään sovellu tilanteisiin, joissa akselin ja laakeripesän välillä on yhdensuuntaisuuseroa. (SKF Laakerikirja 1991, s. 415, 24)

Jos halutaan käyttää kuvan 9 kaltaisia sisäkehättömiä neulalaakereita, se onnistuu parhaiten sellaisissa tilanteissa, joissa akselin vierintäradan hionta ja karkaisu on mahdollista. Näillä toimenpiteillä saadaan valmistettua laakerin sisäkehää vastaava vierintärata suoraan akselille. Sisäkehättömyys mahdollistaa akselin suuremman halkaisijan, jolloin akselista voidaan saada myös jäykempi. Sisäkehättömän neulalaakerin avulla toteutettu laakerointi mahdollistaa hyvin esimerkiksi lämpölaajenemisesta johtuvat aksiaalisiirtymät, sillä akselin ja laakeripesän välistä aksiaalisiirtymää rajoittaa vain vierintäradan leveys. (SKF Laakerikirja 1991, s. 426)



Kuva 9. Sisäkehätön neulalaakeri (IndiaMART InterMESH Ltd. 2019a).

Sisäkehällisiä neulalaakereita puolestaan käytetään silloin, kun halutaan toteuttaa laakerointi neulalaakereilla, mutta vierintäradan tekeminen suoraan akselille hionnan ja karkaisun avulla on teknisesti mahdotonta tai ei kannata taloudellisesti. Sisäkehällisillä neulalaakereilla mahdolliset aksiaaliset siirtymät eivät ole yhtä suuria kuin kehättömillä. Akselin ja laakeripesän välisen maksimisiirtymän suuruus saadaan laakeritaulukoista, ja jos se ei ole riittävä, on mahdollista käyttää myös leveämpiä sisärenkaita sallitun aksiaalisiirtymän kasvattamiseksi. (SKF Laakerikirja 1991, s. 426) Sisäkehällinen neulalaakeri on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Sisäkehällinen neulalaakeri (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2019).

Neulalaakereiden tyypillisiä käyttökohteita ovat esimerkiksi vaihdelaatikat, autojen voimansiirtojärjestelmät, kaksi- ja nelitahtimoottorit, planeettavaihteistot ja paineilmakompressorit. (Cummins 2010)

3.1.6 Pallomaiset rullalaakerit

Pallomaiset rullalaakerit ovat rullalaakeriversio pallomaisista kuulalaakereista. Ne koostuvat sisäkehästä, ulkokehästä, pitimestä ja kahdessa rivissä laakeria kiertävistä vierintäelimistä, eli tynnyrimäisistä rullista. Kuten pallomaisissa kuulalaakereissakin, myös pallomaisissa rullalaakereissa on sisäkehällä erilliset vierintäurat molemmille rullariveille, ja ulkokehä on uraton kummankin rullarivin yhteinen pallomainen kehä. Voitelun helpottamiseksi pallomaisten rullalaakerien ulkokehällä on yleensä voitelu-ura ja voitelureikiä. Laakereiden mikrogeometria ja pidinten muotoilu voi vaihdella valmistajakohtaisesti. (Blom ym. 1999, s. 141-142)

Pallomaisen kuulalaakerin tapaan pallomaisen rullalaakerinkin erikoisominaisuutena on, että sen sisäkehä ja rullasto voivat kallistua ulkokehään nähden. Tämä johtuu rullarivien yhteisestä ulkokehän kaarevasta vierintäradasta. Mahdollinen kallistuksen suuruus riippuu laakerimallista, ja suurinta se on tiivistimettömällä malleilla. Tiivistimettömien pallomaisten rullalaakerien mahdollinen kallistus on luokkaa $\pm 1^\circ - 2,5^\circ$, kun taas tiivistimellisillä malleilla mahdollinen kallistus on luokkaa $\pm 0,5^\circ$. Pallomaisten rullalaakereiden käytön tärkein peruste onkin yleensä juuri kulma-asettuvuus yhdistettynä siihen, että tarvitaan pallomaisia kuulalaakereita korkeampaa kantavuutta. (Blom ym. 1999, s. 141-142)

Pallomaiset rullalaakerit kykenevät säteiskuormituksen lisäksi kantamaan aksiaalikuormituksia kummassakin suunnassa (SKF Laakerikirja 1991, s. 459). Suuri aksiaalikuormitus ei kuitenkaan ole niille kovin edullista, sillä se kiilaa toista rullariviä. Kuormitettavuutta on vuosien saatossa saatu parannettua jatkuvalla kehitystyöllä ja parantelemalla esimerkiksi pitimiä sekä laakerin mikrogeometriaa. Pallomaisen kuulalaakerin heikkouksia ovat alhaisemmat pyörimisnopeusrajat kuin monilla kuulalaakereilla, sekä myös korkea hinta. (Blom ym. 1999, s. 142)

Kuvan 11 mukaisten tavallisten lieriöreikäisten pallomaisten rullalaakerien lisäksi niitä on saatavissa myös kartioreikäisenä. Kartioreikäisiin laakereihin on lisäksi olemassa kiristys- ja vetoholkkeja, jotka mahdollistavat tiukan kiinnityksen akselille ja helpon irrotuksen. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 331)

Pallomaisia rullalaakereita käytetään lukuisissa teollisuuden sovelluksissa. Tyypillisessä käyttökohteessa on suuret kuormitukset, keskisuuri pyörimisnopeus ja mahdollisuus akselin sekä laakeripesän väliselle yhdensuuntaisuuserolle. Pallomaisen rullalaakerin käyttökohde voi olla vaikkapa tuulimylly, tuuletin, kaivoksilla tai rakennustyömailla käytettävät raskaat ajoneuvot, pumppu tai paperiteollisuuden koneet. (Wikipedia 2019)



Kuva 11. Pallomainen rullalaakeri (Würth Oy 2019).

3.1.7 Kartiorullalaakerit

Kartiorullalaakerien vierintäeliminä toimivat kartiomaiset rullat, joita yhdistää yleensä pidin. Rullien vierintärata ulko- ja sisärenkaalla on myös kartiomainen. Kartiomaisten pintojen oletetut jatkeet suuntaavat kohti laakerin geometrisellä akselilla sijaitsevaa pistettä. Tämän kaltaisella kartiomuodolla saavutetaan optimaaliset vierintäolosuhteet. Kartiorullalaakereiden sisärenkas ja rullasto muodostavat tavallisesti oman kokonaisuuden, joka on tarvittaessa mahdollista asentaa ilman ulkorengasta. Kartiorullalaakerit eivät siis normaalisti ole itsestään koossa pysyviä. (SKF Laakerikirja 1991, s. 513)

Kartiomuodon ansiosta kartiorullalaakerit soveltuvat erittäin hyvin laakerointeihin, joissa esiintyy säteis- ja aksiaalikuormituksista muodostuvia yhdistettyjä kuormituksia. Aksiaalisen kantokyvyn suuruus riippuu viistokuulalaakerien tapaan pääasiassa kosketuskulmasta α , joka kartiorullalaakereilla tarkoittaa ulkorengaan vierintäradan kulmaa. Kosketuskulman suurentuessa aksiaalinen kantokyky kasvaa. (SKF Laakerikirja 1991, s. 513)

Kartiorullalaakerit eivät salli juurikaan akselin ja laakeripesän välistä yhdensuuntaisuuseroa. Sallitut sisärenkaan ja ulkorengaan väliset yhdensuuntaisuuserot ovat tavallisesti vain muutaman kulmaminuutin luokkaa, joten kartiorullalaakerit pystyvät tasaamaan käytön aikana tai asennuksessa syntyviä suuntausvirheitä vain hyvin rajoitetusti. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 293)

Kartiorullalaakereita on saatavissa niin yksirivisenä, kaksirivisenä kuin useampirivisenäkin. Lisäksi yksirivisiä kartiorullalaakereita valmistetaan ja toimitetaan pareittain asennettavina sarjoina. Yksiriviset kartiorullalaakerit pystyvät ottamaan aksiaalikuormituksia vastaan vain toisesta suunnasta. Tämän vuoksi niitä ei useimmiten voida käyttää yksin, vaan niille täytyy luoda tuenta asentamalla laakeri jotain toista laakeria vasten. Vaihtoehtona on myös pareittain asennettavien kartiorullalaakerien käyttäminen. Pareittain asennettavien yksirivisten kartiorullalaakereiden sarjoja käytetään myös silloin, kun halutaan suurempaa kantokykyä. Asennusvalmiit laakerisarjat tarjoavat monia etuja, joita ovat esimerkiksi yksinkertainen asennus, akselin tarkka aksiaaliohjaus, yksinkertainen huolto ja taloudellisuus. (SKF Laakerikirja 1991, s. 513, 522, 586)

Kartiorullalaakerin tyypillinen käyttökohde on esimerkiksi autojen pyörien laakeroinnit, joissa kahta kartiorullalaakeria käytetään vastakkain siten, että laakerointi pystytään kiristämään mutterilla melkein välyksettömäksi (Wuolijoki 1972, s. 374). Yksirivistä kartiorullalaakeria ja sen itsestään koossa pysymättömyyttä on havainnollistettu kuvassa 12.



Kuva 12. Kartiorullalaakeri, jonka ulkokehä on irrotettu sisäkehästä ja rullastosta (Isojoen Konehalli Oy 2019).

3.2 Painelaakerit

Painelaakereiksi kutsutaan laakereita, jotka kantavat pääasiassa aksiaalikuormitusta. Niiden kosketuskulma $\alpha > 45^\circ$. Rakenteestaan riippuen painelaakerit voivat ottaa aksiaalivoimia vastaan joko yhdestä tai molemmista suunnista. Osa painelaakereista kykenee kantamaan myös aksiaalikuormituksesta ja säteiskuormituksesta koostuvaa yhdistettyä kuormitusta. Painelaakerit eivät kuitenkaan pysty toimimaan yhtä suurella pyörimisnopeudella kuin vastaavan kokoiset säteislaakerit. (SKF 2019)

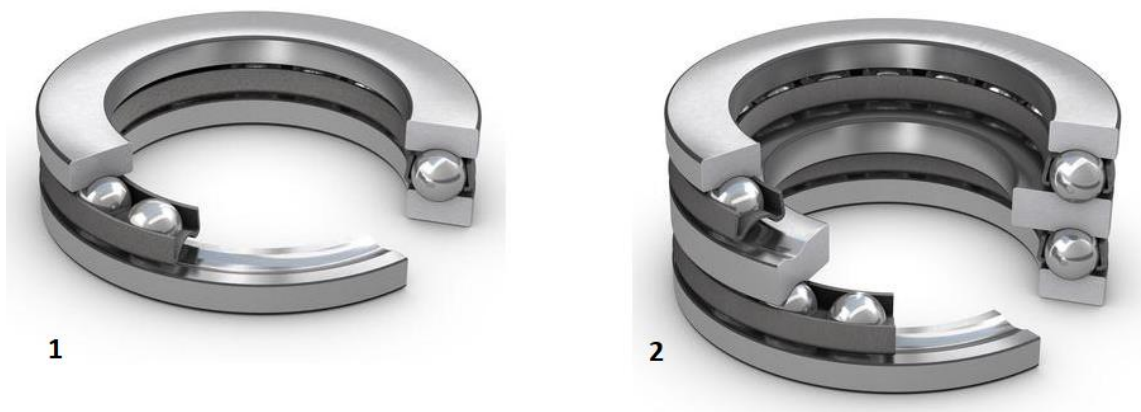
3.2.1 Paineakuulalaakerit

Paineakuulalaakerit ovat muiden painelaakerien tapaan tarkoitettu ottamaan vastaan aksiaalivoimia. Paineakuulalaakeri tunnetaan myös nimellä aksiaalikuulalaakeri. Säteen suuntainen kuormitus ei ole niille sallittua, eikä siis siten myöskään yhdistetty kuormitus. (Airila ym. 1987, s. 185)

Paineakuulalaakerit koostuvat muiden kuulalaakerien tapaan kuulamaisista vierintäelimistä, pitimestä ja kahdesta vierintäelimiä reunustavasta renkaasta (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 409-410). Poiketen säteislaakereista, paineakuulalaakereilla tai muillakaan painelaakereilla renkaita ei kutsuta sisä- ja ulkokehiksi, vaan ne ovat akselilaatta ja napa- tai pesälaatta (Blom ym. 1999, s. 142; FAG Vierintälaakerit 1996, s. 409). Paineakuulalaakerit eivät ole itsestään koossa pysyviä. Tämän ansiosta niiden asennus on yksinkertaista, sillä laakerin eri osat voidaan asentaa erikseen. (SKF Laakerikirja 1991, s. 595-596)

Laakerivalmistajat valmistavat yksisuuntaisia ja kaksisuuntaisia paineakuulalaakereita (SKF Laakerikirja 1991, s. 595; FAG Vierintälaakerit 1996, s. 409). Yksisuuntaiset kykenevät ohjaamaan akselia sekä kantamaan aksiaalikuormituksia vain yhdessä suunnassa, kun taas kaksisuuntaiset pystyvät vastaanottamaan aksiaalivoimia kummastakin suunnasta. Yksisuuntaisissa paineakuulalaakereissa on yhdellä vierintäuralla varustetut akseli- ja pesälaatat sekä vierintäelininä toimivat kuulat pitiminen. Kaksisuuntaisissa paineakuulalaakereissa puolestaan on yksi akselilaatta, jonka kummankin puolen tasopinnoilla on vierintäurat. Kuulakehiä ja vierintäurallisia pesälaattoja on kumpiakkin kaksi kappaletta. (SKF Laakerikirja 1991, s. 595)

Painekuulalaakereiden pesälaatat voivat olla tasa- tai pallopintaisia. Pallopintaisella pesälaataalla varustetut laakerit kykenevät yhdessä vastaavan pallopintaisen aluslaatan kanssa käytettynä korjaamaan asennuksesta tai suuntauksesta aiheutuneita yhdensuuntaisuuseroja. Normaalit kuvan 13 mukaiset painekuulalaakerit tasapintaisilla pesälaatoilla eivät puolestaan salli laakeripesän ja akselin välisiä yhdensuuntaisuuseroja. Painekuulalaakereiden sallitut pyörimisnopeudet eivät yllä useimpien säteiskuulalaakereiden tasolle, ja myöskin käyntiääni on kovempi. (SKF Laakerikirja 1991, s. 595-596, 24)



Kuva 13. Yksisuuntainen painekuulalaakeri (1) ja kaksisuuntainen painekuulalaakeri (2) (mukaillen SKF 2019).

3.2.2 Lieriömäiset painerullalaakerit

Lieriömäiset painerullalaakerit ovat painelaakereita, joissa vierintäelimet ovat lieriömäisiä rullia. Lieriörullat muodostavat yhdessä niitä yhdistävän pitimen kanssa rullakehän, ja lisäksi laakeriin kuuluu pallomaisen kuulalaakerin tapaan akselilaatta ja pesälaatta. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 451)

Lieriömäisillä painerullalaakereilla saadaan toteutettua jäykkiä laakerointeja, jotka lieriömäisten vierintäelimiensä ansiosta kestävät suuria yhdensuuntaisia aksiaalikuormia ja sysäysvoimia. Säteiskuormitusta ne eivät kuitenkaan kykene kantamaan laisinkaan. Niillä ei ole myöskään kulma-assennoitumisominaisuuksia, joten ne eivät kestä akselin ja laakeripesän välistä yhdensuuntaisuuseroa. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 451)

Tilan säästäminen laakeroinneissa onnistuu hyvin lieriömäisiä painerullalaakereita käyttämällä, sillä ne vievät aksiaalisuunnassa vain vähän tilaa. Ne eivät ole itsessään

koossapysyviä, eli ne voidaan tarvittaessa purkaa kuvan 14 mukaisiin osiin. Tämä mahdollistaa myös sen, että tietyissä tilanteissa on mahdollista käyttää laakerina pelkkää rullakehää, mikä säästää tilaa vielä entisestään. Pelkkää rullakehää ilman akseli- ja pesälaittoja voidaan käyttää sisäkehättömien neulalaakereiden tapaan silloin, kun laakeroitavien koneenosien pinnat soveltuvat vierintäradoiksi ja ovat mahdollista karkaista ja hioa. Pelkän rullakehän käytöllä on mahdollista saavuttaa tilansäästön lisäksi myös tavallista laakerointia suurempi vierintätarkkuus. Laakerivalmistajat toimittavat painerullalaakerien eri osia myös erikseen, mikä mahdollistaa tarvittaessa pelkän rullakehän hankkimisen. (SKF Laakerikirja 1991, s. 619).

Lieriömäisiä painerullalaakereita käytetään ottamaan vastaan aksiaalivoimia erityisesti sellaisissa laakeroinneissa, joissa painekuulalaakerien kantokyky ei riitä. Lieriömäisten painerullalaakerien pyörimisnopeusrajat ovat kuitenkin alhaisempia kuin painekuulalaakerien. (SKF Laakerikirja 1991, s. 619, 24) Tyypillisiä lieriömäisten painerullalaakereiden käyttökohteita ovat esimerkiksi vaihteistot. (Gonzalez 2015)



Kuva 14. Painerullalaakeri, jossa pesälaitto, akselilaitto ja rullakehä ovat irrallaan toisistaan (Laakerinetti 2019).

3.2.3 Pallomaiset painerullalaakerit

Pallomaiset painerullalaakerit eroavat painekuulalaakereista ja lieriömäisistä painerullalaakereista siten, että ne kykenevät suurten aksiaalivoimien lisäksi kantamaan myös samaan aikaan vaikuttavia säteisvoimia. Tämä johtuu siitä, että pallomaisissa painerullalaakereissa vierintäradat ovat akseliin nähden vinossa. Laakeriin vaikuttava

säteisvoima saa olla maksimissaan noin puolet siihen vaikuttavasta aksiaalivoimasta. Vierintäeliminä pallomaisissa painerullalaakereissa toimivat epäsymmetriset tynnyrirullat, ja sallitut pyörimisnopeudet ovat suhteellisen suuria. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 459)

Toinen pallomaisten painerullalaakerien tärkeä ominaisuus on itseasettuvuus. Sen ansiosta niiden toiminta ei kärsi akselin pienestä taipumisesta tai akselin ja laakeripesän välisestä yhdensuuntaisuuserosta. Sallitut yhdensuuntaiserot riippuvat laakerista ja ovat suurimmillaan muutaman prosentin luokkaa. Myös kuormituksen suuruus vaikuttaa siten, että sen kasvaessa sallittu yhdensuuntaisuusero pienenee. (SKF Laakerikirja 1991, s. 643)

Painelaakereille tyypillisesti myöskään pallomaiset painerullalaakerit eivät ole itsestään koossa pysyviä. Tämä tarkoittaa, että sen akselilaatta sekä rullasto ja pesälaatta on mahdollista asentaa erikseen. Pallomaiset painerullalaakerit ovat siitä erikoisia, että niiden rakenteen vuoksi voiteluna on käytettävä pääosin öljyvoitelua. Rasvavoitelua voidaan käyttää vain erikoistapauksissa, esimerkiksi silloin kun pyörimisnopeus on alhainen ja kuormitus pieni. (SKF Laakerikirja 1991, s. 643-645)

Pallomaisten painerullalaakereiden tyypillisiä käyttökohteita ovat esimerkiksi vaihdelaatikot, ekstruuderit, pumput ja ruuvikuljettimet (Timken Company 2019). Pallomaisen painerullalaakerin rakenne on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Pallomainen painerullalaakeri (IndiaMART InterMESH Ltd. 2019b).

4 VIERINTÄLAAKEROINNIN SUUNNITTELU

Vierintälaakeroinnin suunnittelun tavoitteena on saada aikaiseksi taloudellinen laakerointi, jolla on pitkä käyttöikä ja suuri käyttövarmuus. Tähän tavoitteeseen päästäkseen suunnittelijan on tiedettävä kaikki laakerointiin vaikuttavat tekijät ja vaatimukset. Pelkkä oikean laakerikoon ja -mallin valitseminen ei riitä, vaan useimmiten on määritettävä myös muut laakerointiin välittömästi liittyvät osat, kuten akseli, laakeripesä ja tiivistimet sekä muut tärkeät tekijät, kuten voitelu ja kiinnitystapa. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 10)

Tärkeitä vierintälaakeroinnin suunnittelussa huomioitavia asioita ovat esimerkiksi kantokyky, kestoikä, kitka, sallittu pyörimisnopeus, laakerivälitys ja esijännitys. Laakerointia suunnitellessaan suunnittelija joutuu tekemään useita päätöksiä, joista jokainen vaikuttaa koko laakeroinnin ja myös koko laakeroinnin sisältävän koneen toimintaan, luotettavuuteen ja taloudellisuuteen. (SKF Laakerikirja 1991, s. 7,14)

4.1 Laakerointijärjestelmä

Pyörivien koneenosien, kuten akselien, laakeroinnit toteutetaan yleensä laakerointijärjestelmillä, joihin tarvitaan kaksi laakeria. Toinen laakereista on ohjaava laakeri, jonka tehtävänä on pitää akseli paikallaan aksiaalisuunnassa ja ottaa vastaan säteiskuormituksen lisäksi myös aksiaalikuormitus. Toinen laakerointijärjestelmän laakereista puolestaan on vapaa laakeri, joka sallii esimerkiksi lämpölaajenemisesta johtuvan aksiaalisuuntaisen liikkeen, mutta ei ota vastaan kuin pelkästään säteiskuormitusta. (Björk ym. 2014, s. 298)

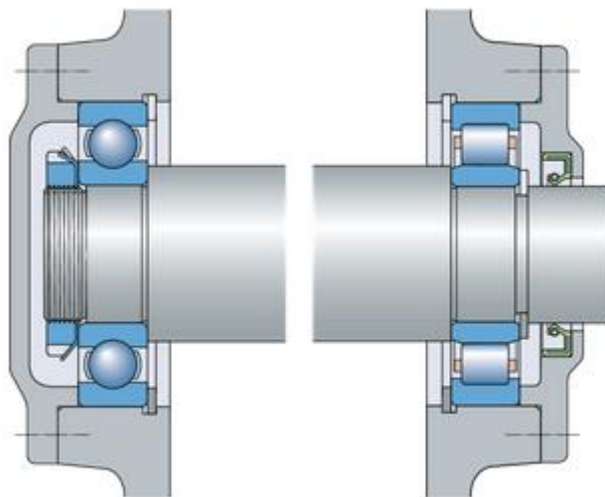
Ohjaavan laakerin on oltava sivusuunnassa tuettu niin akselilla kuin laakeripesässäkin, jotta se kykenee kantamaan akselia säteen suunnassa ja ohjaamaan sitä molemmissa aksiaalisuunnassa. Ohjaaviksi laakereiksi soveltuvia vierintälaakerityyppejä ovat esimerkiksi urakuulalaakerit, pallomaiset rullalaakerit ja kaksiriviset tai pareittain asennetut yksiriviset viistokuulalaakerit. (SKF Laakerien kunnossapito 1994, s. 26)

Vapaan laakerin on pystyttävä liikkumaan akselin suuntaisesti, ja tämä voi tapahtua joko itse laakerissa tai yhden laakerirenkaan ja akselin tai laakeripesän välillä (SKF Laakerien kunnossapito 1994, s. 26). Vapaiksi laakereiksi ihanteellisesti soveltuvia

vierintälaakerityyppejä ovat N ja NU -malliset lieriörullalaakerit, sillä näissä laakereissa rullakehä pääsee siirtymään vapaasti olakkeettoman renkaan puoleisella vierintäradalla. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 24)

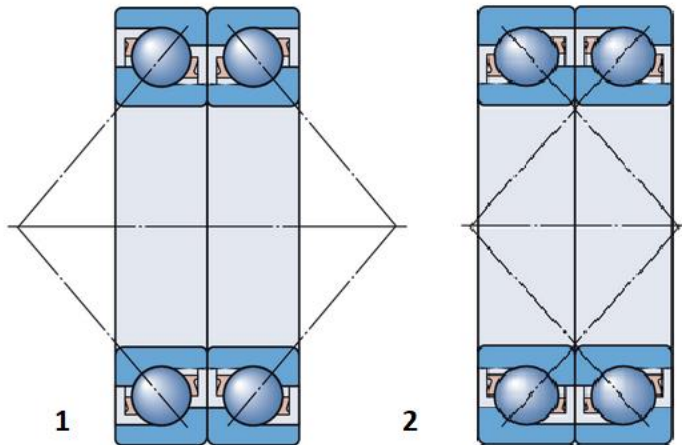
Monesti on myös tilanteita, joissa kaksi laakeria ei riitä akselin tuentaan. Tällöin tarvitaan useampi laakeri, joista kuitenkin vain yhdestä tehdään ohjaava laakeri loppujen ollessa vapaita laakereita. Näin pystytään vähentämään aksiaalijännityksiä, jotka voisivat olla laakeroitavalle kohteelle haitallisia. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 24)

Kuva 16 esittää tyypillistä kahden vierintälaakerin avulla toteutettua akselin laakerointia, jossa ohjaavana laakerina toimii yksirivinen urakuulalaakeri ja vapaana laakerina NU-lieriörullalaakeri, jossa rullakehä pääsee laipattoman sisärenkaan ansiosta siirtymään vapaasti sisäkehän vierintäradalla.



Kuva 16. Laakerointi, jossa ohjaavana laakerina on urakuulalaakeri ja vapaana laakerina NU-lieriörullalaakeri (SKF 2019).

Ohjaavana laakerina voidaan yhden laakerin sijaan käyttää myös esimerkiksi pareittain asennettuja viistokuulalaakereita joko X- tai O-järjestelmässä. Kuvan 17 mukaisesti O-järjestelmän laakereilla kuormituslinjat ovat toisistaan poispäin, kun taas X-järjestelmässä ne ovat ristikkäin toisiaan vastaan. Tällaisen laakeroinnin ansiosta aksiaalikuormitukset pystytään kantamaan kummassakin suunnassa, kun toinen laakeri kantaa toisen suuntaisen aksiaalikuormituksen. O-järjestelmän laakerointi on jäykempi kuin X-järjestelmän. (SKF Laakerikirja 1991, s. 287) Vastaavanlaista pareittain asennusta voidaan käyttää myös kartiorullalaakereiden kanssa (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 26).



Kuva 17. Pareittain asennetut viistokuulalaakerit O-asennossa (1) ja X-asennossa (2) (mukaillen SKF 2019).

4.2 Laakerikoon valinta kestoikäkaavojen avulla

Koneeseen tai laitteeseen laakeria valittaessa laakerin sisähalkaisija on useimmiten jo määritetty laakeroitavan akselin halkaisijan perusteella. Jotta saataisiin selville laakerin muut päämitat ja laakerityyppi, täytyy suorittaa mitoituslaskelmat. Laskelmissa verrataan laakeriin kohdistuvia kuormituksia laakerin kantokykyyn, ja tämän perusteella nähdään, täyttyvätkö käyttöiälle ja käyttövarmuudelle asetetut vaatimukset. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 30)

Vierintälaakerien nimellinen kestoikä tarkoittaa sellaista kestoikää, jonka 90% samanlaisista laakereista saavuttaa tai ylittää (Björk ym. 2014, s. 299). Kestoiän ylittyessä laakerin vierintäelimiin tai vierintäratoihin alkaa ilmestyä merkkejä metallin väsymisestä (SKF Laakerien kunnossapito 1994, s. 16). Vierintälaakerien nimellinen kestoikä L_{10} voidaan laskea kaavan (1) mukaisella yhtälöllä

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

missä L_{10} on nimellinen kestoikä miljoonina kierroksina,
 C on laakerin dynaaminen kantavuusluku [N],
 P on laakerin ekvivalenttikuormitus [N],
 p on eksponentti; kuulalaakereille $p = 3$ ja rullalaakereille $p = 10/3$.
 (Björk ym. 2014, s. 299)

Laakerin pyörimisnopeuden ollessa vakio, saadaan nimelliskestoikä käyttötunteina laskettua kaavan (2) mukaisesti:

$$L_{10h} = \frac{1000000}{60 \cdot n} * \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (2)$$

missä L_{10h} on nimellinen kestoikä tunteina [h],
 n on laakerin pyörimisnopeus [r/min]
 (Björk ym. 2014, s. 299).

Jos laskettu laakerikuormitus F on suunnaltaan ja suuruudeltaan vakio, sekä vaikuttaa säteislaakerissa pelkästään säteiskuormituksena ja painelaakerissa pelkästään aksiaalikuormituksena, niin $P = F$. Jos näin ei ole, täytyy ensiksi laskea dynaaminen ekvivalenttikuormitus P kaavan (3) mukaisesti:

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

missä F_r on kuormituksen säteiskomponentti [N],
 F_a on kuormituksen aksiaalikomponentti [N],
 X on laakerin säteiskerroin,
 Y on laakerin aksiaalikerroin.
 (Björk ym. 2014, s. 299-300)

Laskentakertoimet X ja Y tai niiden määrittystapa saadaan laakerien valmistajien luetteloista laakerityyppi- ja laakerikohtaisesti (Blom ym. 1999, s. 126).

Laakerien kestoikävaatimukset vaihtelevat käyttökohteesta riippuen, ja niihin voi vaikuttaa esimerkiksi viranomais määräykset sekä laakeroitavan koneen käyttäjän tarpeet. Sopivan käyttöiän määrittäminen kuhunkin laakeroitavaan kohteeseen on tärkeää. Liian lyhyestä käyttöiästä seuraa suuria korjauskustannuksia ja koneen käytön keskeytymisestä mahdollisesti aiheutuvia kustannuksia, kun taas tarpeettoman pitkä kestoikävaatimus tarkoittaa, että valitaan tarpeettoman suuri laakeri ja aiheutetaan siten ylimääräisiä kustannuksia. Esimerkiksi maatalous- ja kotitalouskoneilta vaaditaan ohjeellisesti 300-3000:n tunnin kestoikää, kun taas jatkuvasti käytössä olevien voimaloiden koneiden ja isojen sähkökoneiden kestoikävaatimus voi olla 100 000 tuntia. (Blom ym. 1999, s. 129)

Toisinaan perinteinen nimellisen kestoian laskeminen ei riitä, vaan halutaan tarkempia tuloksia. Tällöin voidaan käyttää muunnettua kestoian kaavaa, jolla saadaan otettua huomioon laakerin käyttöolosuhteet, laakerimateriaali ja haluttu luotettavuus. Myös

tilanteisiin, joissa laakerien pyörimisnopeus ja kuormitus vaihtelevat, on olemassa omat laskentakaavansa. (Björk ym. 2014, s. 300-303)

4.3 Kiinnitys

Oikeanlaisten kiinnitystapojen valinta on tärkeää, kun halutaan suunnitella toimiva laakerointi. Virheellisesti kiinnitetyt laakerirenkaat voivat vahingoittaa itse laakeria, tai pahimmillaan laakerin lisäksi myös sen viereisiä koneenosia. (SKF Laakerikirja 1991, s. 100) Sopiva kiinnitystapa riippuu käytetystä laakerityypistä, laakeriin kohdistuvista kuormituksista ja laakeria ympäröivistä osista (Blom ym. 1999, s. 149).

Kiinnitystä suunniteltaessa on huomioitava laakerin käyttökohde. Aina ei ole välttämättä tarkoituksenmukaista kiinnittää laakeria mahdollisimman tiukasti, vaan välillä pyritään myös laakerin helppoon asennukseen ja irrotukseen. Ohjaavat laakerit kiinnitetään tyypillisesti säteittäisesti sekä aksiaalisesti, kun taas vapaiden laakerien kiinnityksen on oltava sellainen, joka sallii tietyn aksiaalisuuntaisen liikkeen. (SKF Laakerikirja 1991, s. 100)

4.3.1 Säteiskiinnitys

Kun halutaan hyödyntää laakerin koko kuormankantokyky, sen kehät täytyy tukea koko kehältä ja koko vierintäpinnan leveydeltä. Käytännössä riittävä tuenta saadaan yleensä aikaan asentamalla laakerikehät sopivalla ahdistussovitteella paikoilleen. Hyvä säteensuuntainen kiinnitys on tärkeää, jotta laakerin kehät eivät kuormitettuna pääse pyörimään sijoillaan. Jos kehät pääsevät pyörimään sijallaan joko akselilla tai laakeripesässä, voi se aiheuttaa kyseisen laakerisijan kulumisen, mistä voi aiheutua monenlaista haittaa koneen toiminnalle. (SKF Yhtymä 2016, s.31)

Sopivaa sovitetta valittaessa on ensimmäiseksi huomioitava käyntiolosuhteet, joita on kolme erilaista: Pyörivä kuormitus, paikoillaan oleva kuormitus ja epämääräinen kuormitus (SKF Yhtymä 2016, s. 32).

Pyörivä kuormitus tarkoittaa, että laakerin kehä pyörii ja siihen kohdistuvan kuormituksen suunta ei muutu. Pyörivällä kuormituksella voidaan tarkoittaa myös tilannetta, jossa laakerin kehä on paikallaan ja kuormituksen suunta pyörii. Kierroksen

aikana kuormitus suuntautuu siis vierintäradan jokaiseen pisteeseen. (SKF Yhtymä 2016, s. 32)

Paikoillaan oleva kuormitus tarkoittaa, että laakerin kehä sekä myös kuormituksen suunta pysyvät paikoillaan. Paikoillaan olevalla kuormituksella voidaan tarkoittaa myös tilannetta, jossa laakerin kehä pyörii samalla nopeudella kuin kuormitus. Kuormitus vaikuttaa siis koko ajan samaan vierintäradan pisteeseen. (SKF Yhtymä 2016, s. 32)

Epämääräinen kuormitussuunta tarkoittaa, että vaihtuvat ulkoiset kuormitukset, iskumaiset kuormitukset tai suurella nopeudella pyörivien koneiden epätasapaino aiheuttavat kuormitussuuntaan muutoksia, joita ei tarkemmin pystytä määrittämään (SKF Yhtymä 2016, s. 32).

Laakerin kehistä se, jonka kuormitus on pyörivä, vaatii kiinnityksen tiukalla sovitteella. Jos näin ei tehdä, kehä pääsee pyörimään laakerin pyörimissuuntaan sijallaan akselissa tai laakeripesässä. Paikoillaan olevalla kuormituksella kuormitettu kehä puolestaan voidaan kiinnittää löysällä sovitteella, joka helpottaa laakerin asentamista ja sallii kehän aksiaalisen siirtymän. (Blom ym. 1999, s. 146) Sovitteen valintaa laakerien käyttö- ja kuormitusolosuhteiden perusteella on havainnollistettu seuraavassa taulukossa (Taulukko 1).

Taulukko 1. Laakerikehien ja kuormituksen käyttöolosuhteet ja niiden vaikutus sovitevalintoihin. (Mukaiillen Blom ym. 1999, s. 147; SKF Yhtymä 2016, s. 32)

Käyttöolosuhteet	Kaaviokuva	Esimerkkejä	Kuormitusolosuhde	Suosittelut sovitteet
Pyörivä sisäkehä Paikoillaan oleva ulkokehä Kuormituksen suunta vakio		Akselin painovoima Hihnäkäytöt Hammaspyörävoima	Sisäkehän pyörivä kuormitus Ulkokehän paikoillaan oleva kuormitus	Sisäkehä: Tiukka sovite välttämätön Ulkokehä: Löysä sovite sallitaan
Paikoillaan oleva sisäkehä Pyörivä ulkokehä Kuormitus pyörii ulkokehän mukana		Karamurskain Suuri epätasapaino		
Paikoillaan oleva sisäkehä Pyörivä ulkokehä Kuormituksen suunta vakio		Auton pyörien napalaakeriyksiköt Kuljettimien kannatusrullat	Sisäkehän paikoillaan oleva kuormitus Ulkokehän pyörivä kuormitus	Sisäkehä: Löysä sovite sallitaan Ulkokehä: Tiukka sovite välttämätön
Pyörivä sisäkehä Paikoillaan oleva ulkokehä Kuormitus pyörii sisärenkaan mukana		Tärisevät käyttökohteet Linko Täryseula		

Sisäkehän pyörivän kuormituksen tapauksessa kuormituksen suuruus ja sysäyksellisyys vaikuttaa siihen, kuinka tiukka sovite tarvitaan. Tämä johtuu siitä, että kuormitusvoimat pyrkivät laajentamaan laakerikehiä, jolloin pyörivällä kuormituksella kuormitettu sisäkehä voi alkaa vaeltamaan akselilla. Mitä suurempi ja sysäyksellisempi sisäkehän pyörivä kuormitus on, sitä tiukempi sovite sisäkehälle tarvitaan. (Blom ym. 1999, s. 146)

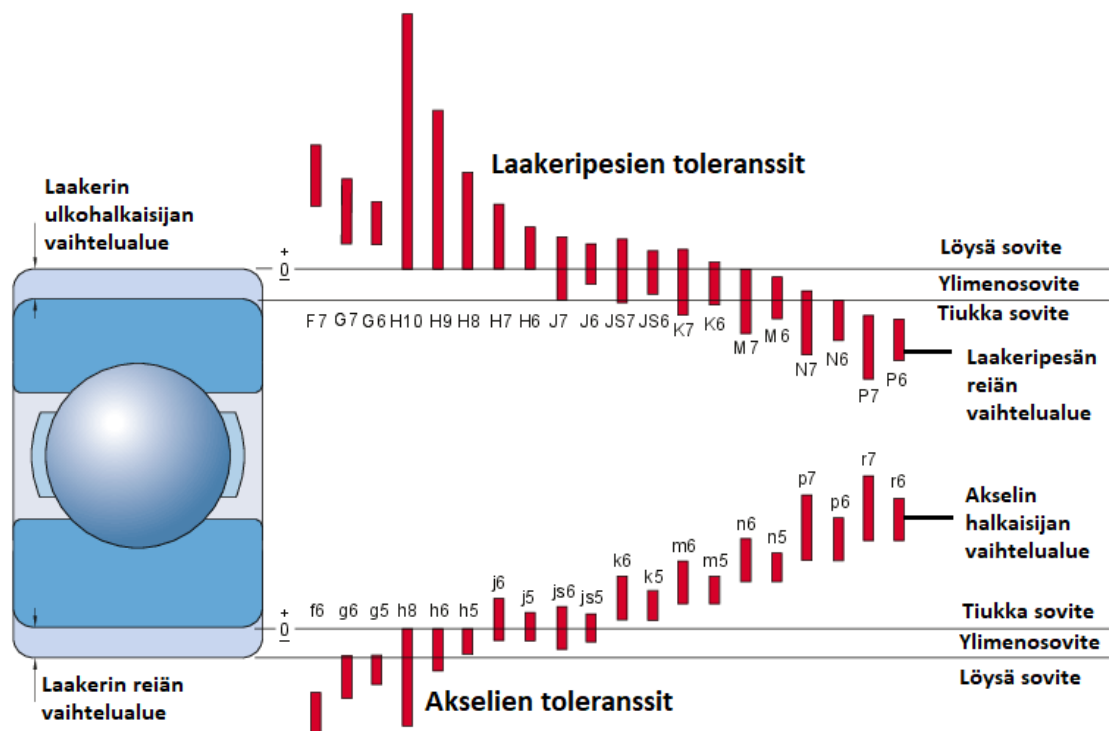
Lämpötilaolot voivat myös vaikuttaa laakerin kiinnitykseen. Laakerin kehät lämpenevät käytön aikana yleensä enemmän kuin akseli ja laakeripesä, jolloin ne myös laajenevat enemmän kuin akseli ja laakeripesä. Tällöin sisärenkaan sovite voi löystyä ja ulkorenkaan tiukentua, jolloin mahdollisesti tarpeellinen laakerin aksiaalinen siirtyminen laakeripesässä estyy. Laakerointia ja sen kiinnitystä suunniteltaessa on siis kiinnitettävä huomiota siihen, millaisia lämpötilaeroja voi syntyä, ja johtuuko lämpöä laakerista pois päin vai laakeriin. (SKF Laakerikirja 1991, s. 101)

Muita sopivan sovitteen valintaperusteita ovat laakeroinnin vierintätarkkuusvaatimukset ja akselin sekä navan rakenne ja materiaali. Kun laakeroinnilta vaaditaan suurta

vierintätarkkuutta, pyritään joustoja ja värähtelyjä estämään tiukoilla sovitteilla. Rakenne ja materiaali puolestaan vaikuttavat siten, että jos akseli on ontto tai valuraudasta tehty, niin sisäkehä vaatii silloin tiukemman soviteen. Ulkokehä sen sijaan vaatii tiukemman soviteen, kun laakeripesä on ohutseinäinen tai tehty alumiinista. Sovitteen valinnassa täytyy kuitenkin huomioida myös se, että liian tiukat sovitteet voivat aiheuttaa laakeriin haitallista säteisahdistusta, joka voi lopulta johtaa laakerin tuhoutumiseen. (Blom ym. 1999, s. 146-147)

Vierintälaakerien reiälle ja ulkohalkaisijalle on olemassa kansainvälisesti standardisoidut toleranssit, jotka määrittävät kunkin laakerikoon suurimmat ja pienimmät sallitut mitat. Haluttu tiukka tai löysä sovite saadaan, kun valitaan akselin ja laakeripesän laakerisijoille käyttökohteeseen sopivat toleranssit ISO:n toleranssitaulukoista. Vierintälaakerien laakerointeihin on valittu käytettäväksi rajoitettu määrä ISO-sovitteita. Kuvassa 18 on esitetty akselin ja laakeripesän tavallisimpien toleranssien sijainti suhteessa laakerin ulkohalkaisijan ja reiän toleransseihin. ISO:n toleranssiluokat kuvataan kirjaimen ja numeron avulla. Kirjain kertoo toleranssivyöhykkeen sijainnin suhteessa nimellismittaan. Akselien toleransseissa käytetään pientä kirjainta ja pesän reiän toleransseissa isoa kirjainta. Numero puolestaan kertoo toleranssivyöhykkeen suuruuden siten, että mitä suurempi numero on, sitä suurempi on myös toleranssivyöhyke. (SKF Yhtymä 2016, s. 35)

Akselin ja laakeripesän toleranssiluokan tarkempaa valintaa ohjataan laakerivalmistajien taulukoissa sekä koneensuunnittelun oppaissa. Niistä saadaan toleranssiluokkasuositus, kun tiedetään laakerin koko, tyyppi, kuormitusolosuhde ja kuormituksen suuruus. Taulukoissa on myös mainittu tyypillisiä esimerkkikäyttökohteita kunkin kuormitusolosuhteen ja kuormituksen suuruusluokan yhdistelmästä. (Blom ym. 1999, s. 148; SKF Yhtymä 2019, s. 334-338)



Kuva 18. Tavallisimmat toleranssit ja niiden sijainti suhteessa laakerin reiän ja ulkohalkaisijan toleransseihin (mukailten SKF Yhtymä 2016, s. 35).

4.3.2 Aksiaalikiinnitys

Pelkkä tiukka ahdistusovite ei yksinään riitä laakerin aksiaalisuuntaiseen kiinnitykseen. Tämän vuoksi pyörivä laakerikehä tulee lukita akselille myös mekaanisesti. Ohjaavana laakerina toimivan laakerin kummatkin kehät vaativat aksiaalikiinnityksen niiden kummaltakin puolelta. Vapaina laakereina toimivien laakerien aksiaalinen kiinnitys riippuu laakerin rakenteesta. Jos vapaana laakerina käytetään itsestään koossa pysyviä laakereita, täytyy vain tiukemmalla soviteella asennettua kehää tukea aksiaalisesti. Toinen kehä pääsee tällöin liikkumaan vapaasti aksiaalisuunnassa sovitepinnallaan. Jos taas vapaana laakerina käytetään purettavia laakereita, kuten lieriörullalaakereita, täytyy kummatkin laakerin kehät tukea aksiaalisesti. (SKF Yhtymä 2016, s. 37)

Tiukkasovitteisten laakerikehien aksiaalikiinnitys toteutetaan tyypillisesti niin, että sen toinen sivu tukeutuu akselilla tai laakeripesällä olevaan olakkeeseen. Sisäkehä kiinnitetään toiselta sivulta yleensä akselimutterilla ja varmistinlaatalalla tai akselin päähän kiinnitetyllä päätylevyllä. Ulkokehä puolestaan kiinnitetään yleensä laakeripesän päätykannella tai joissakin tapauksissa kierrerenkaalla. Myös muita erikoistarkoituksiin soveltuvia kiinnitysmenetelmiä on olemassa useita. (SKF Laakerikirja 1991, s. 128-129)

4.4 Laakerivällys

Laakerivällyksellä tarkoitetaan matkaa, jonka laakerin kehät pääsevät liikkumaan toisiinsa nähden (Airila ym. 1987, s. 183). Laakerin säteen suuntaista välystä kutsutaan säteisvällykseksi ja akselin suuntaista välystä aksiaalivällykseksi (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 74).

Laakerointia suunniteltaessa on hyvä ottaa huomioon, että asentamattoman laakerin vällys poikkeaa paikoilleen asennetun ja käyttölämpötilansa saavuttaneen laakerin vällyksestä. Vällys on paikoilleen asennetussa laakerissa pienempi kuin asentamattomassa laakerissa, sillä sovitteiden tiukkuus pienentää vällystä. Myös käytön aiheuttama lämpötilan kohoaminen voi pienentää vällystä, esimerkiksi tilanteessa, jossa laakerin sisäkehä laajenee voimakkaamman lämpenemisen vuoksi enemmän kuin ulkokehä. Tilanteissa, joissa käyttöolosuhteet vaikuttavat voimakkaasti laakerivällyksen muutokseen, on suositeltavaa käyttää normaalia pienempi- tai suurempivällyksellisiä laakereita. Tarkka ohjaus ja pieni kitka saavutetaan, kun paikoilleen asennetun laakerin vällys on muutaman mikrometrin luokkaa. (Airila ym. 1987, s. 183)

Tilanteet, joissa tarvittaisiin normaalia pienempää laakerivällystä, ovat harvinaisia. Sen sijaan normaalia suuremman laakerivällyksen laakereita tarvitaan useammin. Niitä saatetaan tarvita tilanteissa, joissa sisäkehän sovittteen on oltava tiukka, kun molemmat laakerikehät asennetaan puristussovitteella, tai kun sisäkehä laajenee lämpenemisen vuoksi huomattavasti ulkokehää enemmän. (Airila ym. 1987, s. 183)

Säteisvällys vaikuttaa merkittävästi laakerin moitteettomaan toimintaan. Kuulalaakerien on normaalisti toimittava lähes vällyksettöminä, mutta pallomaiset- ja lieriörullalaakerit vaativat moitteettomasti toimiakseen aina jonkun verran vällystä. Myös kartiorullalaakerit vaativat hieman vällystä lukuun ottamatta erityisen suuren jäykkyyden laakerointeja, jollaisia ovat esimerkiksi vaihteistojen vetopyörien laakeroinnit. Asentamattomien laakerien vällykset on ilmoitettu laakerivalmistajien taulukoissa. (SKF Laakerikirja 1991, s. 88)

4.5 Esijännitys

Laakerissa täytyy käytön aikana olla käyttöoloista riippuen joko positiivinen tai negatiivinen välyk. Yleisempi tilanne on, että käytön aikaisen välyksen on oltava positiivinen, jolloin laakerissa on tietyn suuruinen sisäinen laakerivälyk. On kuitenkin olemassa myös sellaisia tilanteita, että laakeroinnissa käytetään negatiivista käyttövälystä, joka saavutetaan esijännittämällä laakerit. Tyypillisesti esijännitetyjä laakerointeja käytetään esimerkiksi työstökoneiden karoissa, pienten sähkömoottoreiden laakeroinneissa, autojen voimansiirtojen kardaaniaakseleissa ja heilahteleavan liikkeen laakeroinnissa. (SKF Laakerikirja 1991, s. 131)

Esijännityksen avulla laakeroinnista saadaan tehtyä jäykempi ja saavutetaan suurempi vierintätarkkuus sekä mahdollisesti myös pidempi käyttöikä. Myös käyntiääni on esijännitetyllä laakerilla hiljaisempi kuin vastaavalla laakerilla olisi ilman esijännitystä. Esijännitettyjen laakerien tukema akseli saa tarkemman ohjauksen kuin ilman esijännitystä, sillä esijännitys rajoittaa akselin taipumista. Esimerkiksi käyttämällä esijännitystä vaihteistojen tasauspyörästöjen ja vetopyörästöjen laakeroinneissa, saavutetaan suurempi jäykkyys ja tarkempi ohjaus, jolloin pyörästöjen hammaskosketus ei vaihtele, vaan pysyy vakiona, minkä ansiosta dynaamiset lisävoimat saadaan pidettyä pieninä. Tästä seuraa hammaspyörien hiljaisempi käyntiääni ja pidempi kestoikä. (SKF Laakerikirja 1991, s. 131-132)

Säteittäinen esijännitys luodaan yleisimmin käyttämällä tarpeeksi tiukkaa sovitetta joko toisen tai molempien laakerikehien kiinnityksessä, jolloin asentamattomassa laakerissa ollut välyk pienenee nolaksi ja muuttuu käytön aikana negatiiviseksi välykseksi, eli esijännitykseksi. Säteittäistä esijännitystä käytetään tavallisimmin lieriörullalaakereissa, kaksirivisissä viistokuulalaakereissa ja joissain tapauksissa myös urakuulalaakereissa. Kartioreiälliset laakerit sopivat erittäin hyvin esijännitykseen. Niiden esijännitys voidaan pitää tiukoissa rajoissa, koska ne ahdetaan kartiomaiselle sovitepinnalle, kuten kiristysholkille, vetoholkille tai akselitapille. (SKF Laakerikirja 1991, s. 136)

Yksirivisille viistokuulalaakereille, kartiorullalaakereille ja urakuulalaakereille saadaan luotua aksiaalinen esijännitys, kun siirretään toista laakerikehää aksiaalisuunnassa pois päin toisesta kehästä niin, että saavutetaan haluttu esijännitysvoima. Laakeroinnin aksiaalisen esijännityksen säätöön on olemassa monenlaisia menetelmiä. Sitä voidaan

säätää esimerkiksi käyttämällä muttereita, sovitelevyjä tai väliholkkeja. (SKF Laakerikirja 1991, s. 136)

Jos laakereita käytetään suurilla nopeuksilla ja todella pienellä kuormituksella tai ilman minkäänlaista kuormitusta, suositellaan esimerkiksi jousella luotua esijännitystä. Tällöin esijännitys luo laakerille sen moitteettomaan toimintaan tarvittavan vähimmäiskuormituksen, eikä laakeri pääse vahingoittumaan liukumisliikkeen seurauksena. Jousella tai jousipakalla luotu esijännitys on tyypillistä esimerkiksi pienille sähkömoottoreille tai vastaaville sovellutuksille. (SKF Laakerikirja 1991, s. 131, 140)

Kun halutaan käyttää esijännitettyä laakerointia ja valitaan esijännitysvoimaa, täytyy ottaa huomioon se, että jos esijännityksen ohjeellinen arvo ylitetään, jäykkyys kasvaa vain rajallisesti, mutta kitka ja sen aiheuttama lämmönmuodostus puolestaan lisääntyvät jännityksen kasvaessa ja pienentävät laakerin kestoikää merkittävästi. Sopivat esijännitysvoimat saadaan laskettua laakerivalmistajien ohjeilla tai päätelemällä kokemuksen avulla. (SKF Laakerikirja 1991, s. 140)

4.6 Pyörimisnopeusrajat

Laakerien sallitut pyörimisnopeusrajat on annettu laakerikohtaisesti laakerivalmistajien luetteloissa. Pyörimisnopeusrajojen arvot annetaan kunkin laakerin yhteydessä erikseen öljy- ja rasvavoidelluille laakereille. Öljyvoitelulla saavutetaan useimpien laakerien tapauksessa korkeammat pyörimisnopeusrajat. (Blom ym. 1999, s. 132)

Pyörimisnopeuden kasvaessa laakerin lämpötila kohoaa laakerissa syntyvän kitkan ansiosta. Liian suuresta lämpötilasta voi seurata laakerin vaurioituminen, kuten kiinnileikkautuminen. Laakerin pyörimisnopeusraja on siis raja, joka määrittää suurimman mahdollisen pyörimisnopeuden, jossa lämpöä ei pääse syntymään niin paljoa, että se häittäisi laakerin toimintaa. Pyörimisnopeusrajaan vaikuttaa laakerityypin ja voitelun lisäksi myös laakerin mitat, pitimen rakenne, kuormitukset ja se lämpömäärä, joka on mahdollista johtaa laakerista pois. (NTN Corporation, 2019)

Erityisen pienikitkaisia laakerityyppejä ovat esimerkiksi yksiriviset urakuulalaakerit, yksiriviset viistokuulalaakerit ja säteiskuormitetut pitimelliset lieriöruullalaakerit. Näillä laakerityypeillä on siten myös pieni lämmöntuotto ja korkeat pyörimisnopeusrajat.

Isompi kitka on sen sijaan esimerkiksi täysrullaisilla lieriörullalaakereilla ja pallomaisilla aksiaalirullalaakereilla, minkä takia niiden pyörimisnopeusrajat eivät ole yhtä korkeita kuin edellä mainituilla laakerityypeillä. Pienemmillä laakereilla on tyypillisesti suuremmat pyörimisnopeusrajat kuin suurilla laakereilla. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 18-19)

4.7 Laakerien tiivistys

Laakerien tiivistyksen tarkoituksena on estää pölyn, kosteuden ja muiden epäpuhtauksien pääsy laakeriin sekä estää voiteluainetta vuotamasta ulos laakerista. Tiivistimien tehokkuus on siten tärkeä laakerin käyttöikään vaikuttava tekijä. (Björk ym. 2014, s. 298)

Tiivistimien aiheuttaman kitkan ja kulumisen tulisi olla mahdollisimman vähäistä. Laakeroinnin tiivistystä suunniteltaessa on otettava huomioon useita tekijöitä, kuten käytettävissä oleva tila, tiivistyspinnan kehänopeus, akselin asento ja mahdollinen siirtymä tai yhdensuuntaisuusero, työympäristö, kustannukset sekä käytetäänkö rasva- vai öljyvoitelua. (SKF Laakerikirja 1991, s. 142)

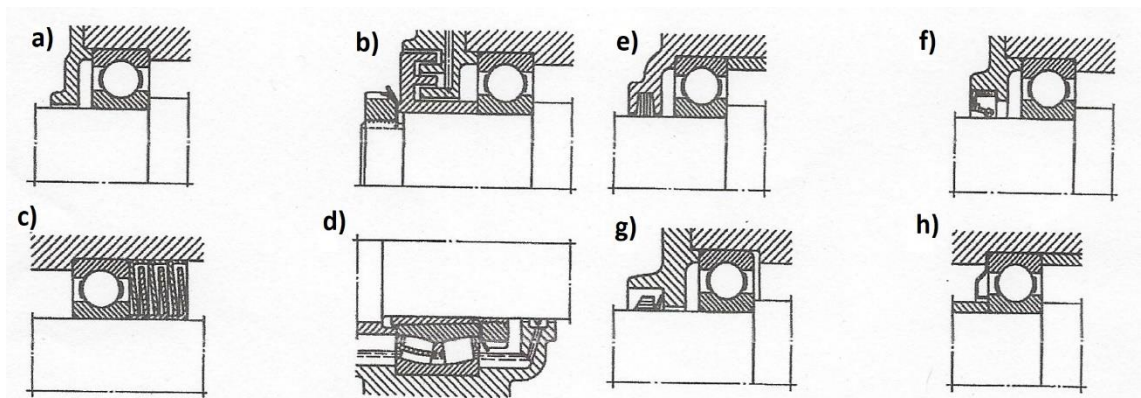
Vierintälaakereissa käytettävät tiivistimet jaetaan kahteen ryhmään: hankaamattomiin ja hankaaviin tiivistimiin. Hankaamattomien tiivistimien toiminta perustuu pyörivän ja paikallaan olevan koneenosan väliseen kapeaan rakoön, ja niiden tiivistysteho riippuu raon pituudesta ja ahtaudesta. Hankaamattomilla tiivistimillä ei ole käytännössä ollenkaan kitkaa, jolloin ne eivät kulu ja pysyvät kauan toimintakuntoisina. Ne soveltuvat hyvin myös korkeisiin lämpötiloihin ja suuriin pyörimisnopeuksiin. Hankaavien tiivistimien toiminta puolestaan perustuu niiden painumiseen tietyllä puristusvoimalla tiivistyspintaa vasten. Hankaavilla tiivistimillä saadaan yleensä aikaiseksi erittäin luotettava tiivistys, mutta tiivistimen kitkasta aiheutuvan lämpötilan nousun takia niitä voidaan käyttää vain kehänopeuden pysyessä tiettyjen rajojen sisäpuolella. (SKF Laakerikirja 1991, s. 142-143)

Yksinkertaisin hankaamaton tiiviste on ahdas rako pesän akselireiän ja akselin välillä (Björk ym. 2014, s. 298). Se on riittävän hyvä tiivistystapa koneille, joiden toimintaympäristö on kuiva ja pölytön (SKF Laakerikirja 1991, s. 144). Kun tarvitaan parempaa tiivistystä, voidaan käyttää esimerkiksi sokkelotiivistimiä. Ne ovat geometrialtaan sokkelomaisia, ja estävät siten voiteluaineen kiipeämisen pois

laakeripesästä. Muita hankaamattomia tiivistimiä ovat tiivistyslamellit ja roiskerengas yhdistettynä öljyuraan. Tiivistyslamellit toimivat sokkelotiivisteiden tapaan, ja ne ovat kustannuksiltaan edullisia sekä niiden tiivistysteho on hyvä. Roiskerengasta puolestaan käytetään tarvittaessa rakotitiivistimien tiivistystehon parantamiseen. Roiskerengas asennetaan akselille, ja siitä voiteluöljy sinkoutuu uraan, mistä se johdetaan takasin laakeripesään. (Björk ym. 2014, s. 298)

Hankaavista tiivistimistä yksinkertaisin on huoparengas. Huoparenkaat ovat edullisia, ja niitä käytetään usein erityisesti rasvavoitelun yhteydessä. Säteishuulitiivistintä käytetään pääasiassa öljyllä voidelluille laakereille, ja kun hankaavalle tiivistimelle asetetut vaatimukset ovat suuret. V-rengastiivistin puolestaan on hankaava tiivistin, jota käytetään niin rasva- kuin öljyvoidelluissa laakereissa. Sen tiivistysvaikutus perustuu aksiaalisuunnassa tiivistyspintaan tukeutuvaan tiivistysshuuleen. Yksinkertainen tiivistys saadaan aikaiseksi myös joustavalla tiivistyslevyllä, joka kiinnitetään joko laakerin ulkotali sisäkehää vasten. Sitä käytetään erityisesti rasvalla voidelluissa laakereissa. (Björk ym. 2014, s. 298)

Edellä mainitut hankaamattomien ja hankaavien tiivistimien tyypit on esitetty kuvassa 19. Näiden laakerin ulkopuolelle asennettävien tiivistimien lisäksi laakeri voidaan tiivistää myös laakerin sisäänrakennetuilla tiivistinlevyillä. Laakerivalmistajilta saatavat rasvatäytteiset tiivistinlevylliset laakerit eivät normaalisti tarvitse lainkaan huoltoa. (FAG Vierintälaakerit 1996, s. 121-122)



Kuva 19. Hankaamattomia tiivistimiä: a) ahdas rako, b) sokkelotiivistin, c) tiivistyslamellit, d) roiskerengas yhdistettynä öljyuraan. Hankaavia tiivistimiä: e) huoparengas, f) säteishuulitiivistin, g) V-rengas sekä h) joustava tiivistyslevy (Björk ym. 2014, s. 298).

4.8 Laakerien voitelu

Vierintälaakereiden voitelulla vähennetään niiden kitkaa ja kulumista. Yhdessä tiivisteiden kanssa voitelu suojaa laakeria myös korroosiolta sekä laakerin ulkopuolelta tulevilta haitallisilta hankaavilta hiukkasilta. Kitkalta ja kulumiselta suojaava vaikutus perustuu voiteluaineen muodostamaan kalvoon, jolla laakerin liikkuvat osat erotetaan toisistaan. (Airila ym. 1987, s. 189)

Laakeroinnin voitelumenetelmä on valittava jo alkuvaiheessa suunnittelua, sillä käytetty voitelumenetelmä vaikuttaa koko laakeroinnin rakenteeseen. Voiteluaineena käytetään yleensä rasvaa tai öljyä. Rasvavoitelu on huomattavasti yleisempää kuin öljyvoitelu. Rasvavoitelua käytettäessä laakerin tiivistykset ja koko rakenne saadaan pidettyä yksinkertaisena. Öljyvoitelua käytetään erityisesti silloin, kun laakerista halutaan poistaa lämpöä öljyn avulla, tai kun saman koneen muutkin osat voidellaan öljyllä. (Airila ym. 1987, s. 189)

Laakeroinnin voitelutapaa valittaessa on otettava huomioon useita asioita. Näitä ovat esimerkiksi käyntiolosuhteet, laakerin melu-, kitka-, käynti- ja lämpötilaolosuhteille asetetut vaatimukset, voitelumenetelmän käyttöönotosta ja käytön aikaisista huolloista aiheutuvat kustannukset sekä vaadittu käyntivarmuus. Jos pyritään korkeaan käyntivarmuuteen, voiteluainetta on jatkuvasti oltava laakerin kaikilla kosketuspinoilla ja voiteluaineen syötön on oltava häiriötöntä (Schaeffler Group 2019, s. 19)

4.8.1 Rasvavoitelu

Rasvavoitelun osuus kaikkien vierintälaakerointien voitelusta on jopa 90%. Rasvavoitelun etuna on pienen tilantarpeen lisäksi tiivistyksen rasvasta saama tuki, soveltuvuus korkeille kierrosluvuille sekä pitkä käyttöikä ja vähäinen huollon tarve. Rasvavoitelun toteuttamiseen ei yleensä tarvita myöskään minkäänlaista voitelulaitetta, sillä normaaleissa ympäristö- ja käyttöolosuhteissa on usein mahdollista käyttää elinikäistä kestovoitelua. Tietyin määrääjain suoritettavaa jälkivoitelua tarvitaan laakeroinneissa, joissa rasitus on suurta, eli pyörintänopeus, lämpötila tai kuormitus ovat korkeita. Tällöin rasvalle tarvitaan tulo- ja poistokanavat sekä keräystila vanhalle rasvalle. Jos jälkivoiteluväli on lyhyt, saatetaan mahdollisesti tarvita myös rasvapumppu ja rasvamäärän säätäjä. (Schaeffler Group 2019, s. 19)

Rasvavoitelun rasvamäärän pääsääntönä on, että itse laakeri täytyy täyttää kokonaan rasvalla, mutta laakeripesä täytetään vain osittain, ja siellä täytyy olla vapaata tilaa, johon laakerista tuleva ylimääräinen rasva mahtuu. Laakeripesän suositeltu täyttöaste on noin 30-50%. Poikkeuksena on kuitenkin täysitäyttörasvat, joilla voidaan tietyissä tilanteissa täyttää jopa 90% laakeripesästä ilman riskiä lämpötilan noususta. Tällöin saadaan jälkivoiteluväliä pidennettyä ja estetään paremmin epäpuhtauksien pääsy laakeriin. Jos laakeria käytetään korkeilla nopeuksilla ja lämpötila on pidettävä pienenä, on voitelussa käytettävä pientä rasvamäärää. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi työstökoneiden karojen laakeroinnit. (SKF Laakerien kunnossapito 1994, s. 219)

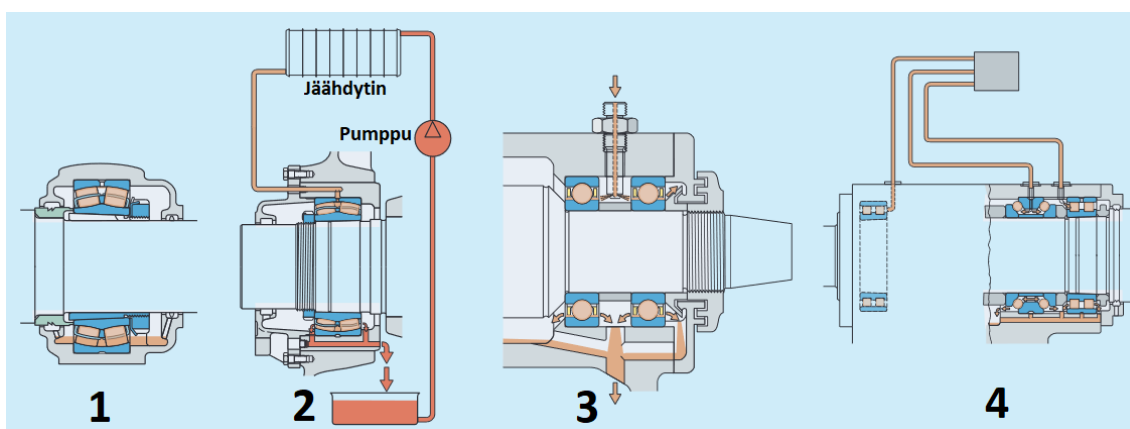
Voitelurasvat ovat nestemäisestä voiteluaineesta eli perusöljystä sekä sakeutusaineesta eli useimmiten metallisaippuusta koostuvia kiinteitä tai puolinnostemäisiä voiteluaineita. Rasvat voivat sisältää myös lisäaineita, joiden avulla voidaan parantaa rasvan ominaisuuksia. Lisäaineiden avulla voidaan esimerkiksi parantaa rasvan ruosteenestokykyä tai saada rasva kestämään paremmin suuria kuormituksia. Kiinteys, eli rasvan jäykkyyden mitta, riippuu pääasiassa sakeutusaineen määrästä ja laadusta. Laakerointiin sopivaa rasvalaatuja valittaessa täytyy laakeroinnille asetettujen vaatimusten perusteella huomioida useita rasvalaatuun liittyviä tekijöitä, joita ovat esimerkiksi rasvan kiinteys, perusöljyn viskositeetti, rasvalle soveltuva käyttölämpötila-alue, ruosteen- ja vedenestokyky sekä riittävä kuormitettavuus. (SKF Laakerikirja 1991, s. 150-152)

4.8.2 Öljyvoitelu

Öljyvoitelun etuna rasvavoiteluun nähden on se, että öljyvoitelun avulla on mahdollista kuljettaa lämpöä pois laakereista. Lämmönpoisto voi tulla tarpeeseen korkeissa pyörimisnopeuksissa, lämpötiloissa tai kuormituksissa, sekä tilanteissa, joissa laakeroinnin ulkopuolelta tulee lämpöä laakerointiin. Öljyvoidelluilla laakereilla myös pyörimisnopeusrajat ovat suurempia kuin rasvavoidelluilla. (Schaeffler Group 2019, s. 19-20) Öljyvoitelu on kuitenkin yleensä rasvavoitelua kalliimpaa, öljyllä ei saada tiivistyshyötyä eikä sitä tavallisesti voida käyttää pystyasennossa olevien akselien säteislaakereiden voitelussa. Myös asennus ja kunnossapito ovat yleensä rasvavoiteluun verrattuna kallista sekä aikaa vievää. (SKF Yhtymä 2016, s. 182)

Öljyvoitelu voidaan toteuttaa useilla erilaisilla tavoilla, joita ovat esimerkiksi kuvassa 20 esitetyt öljykylpyvoitelu, kiertoöljyvoitelu, ruiskuvoitelu ja öljy-paineilmavoitelu.

Öljykylpyvoitelu on näistä menetelmistä ainoa, jossa ei tarvita laitteistoa öljynsyöttöä varten. Öljykylpyvoitelussa laakeri on osittain öljyssä siten, että koneen ollessa pysähdyksissä öljypinta yltää peittämään laakerin alimmat vierintäelimet puolittain tai kokonaan. Kun laakeri pyörii, vierintäelimet ja pidin ottavat öljyä laakerin pohjalta mukaansa ja levittävät sitä laakerin koko kehälle. Kiertoöljyvoitelussa öljy syötetään pumpun avulla kiertämään laakerin läpi, josta se kulkee öljysäiliön kautta uudelleen laakeriin. Öljystä myös suodatetaan epäpuhtaudet, ja tarvittaessa se voidaan jäähdyttää ennen takaisin laakeriin pumppausta. Kiertoöljyvoitelu soveltuu suurille pyörimisnopeuksille paremmin kuin öljykylpyvoitelu. (Schaeffler Group 2019, s. 20, 42-45) Jos pyörimisnopeudet ovat erittäin suuria, on suositeltavaa käyttää ruiskuvoitelua tai öljy-paineilmavoitelua. Näissä menetelmissä pyritään välttämään liiallinen voiteluaine ja sen aiheuttama ylimääräinen kitka sekä kitkalämpö. Ruiskuvoitelu on tehokas voitelumenetelmä, jossa laakeriin ruiskutetaan korkeapaineinen öljysuihku vähintään 15 m/s nopeudella. Öljy-paineilmavoitelussa puolestaan laakeriin syötetään paineilmalla pieniä tarkasti mitattuja öljymääriä. Paineilma auttaa myös estämään epäpuhtauksien tunkeutumista laakerointiin. (SKF Yhtymä 2016, s. 208)



Kuva 20. Öljyvoitelujärjestelmiä: Öljykylpyvoitelu (1), kiertoöljyvoitelu (2), ruiskuvoitelu (3) ja öljy-paineilmavoitelu (4) (Mukaiillen SKF Yhtymä 2016, s. 208).

Vierintälaakerien voiteluöljyiksi suositellaan yleensä puhtaita mineraaliöljyjä, joissa ei ole lisäaineita. Lisäaineistettuja öljyjä voidaan käyttää tilanteissa, joissa öljyn ominaisuuksia, esimerkiksi vanhenemiskestävyyttä, täytyy parantaa. Laakerien voitelussa käytetään synteettisiä öljyjä vain ääritilanteissa, kuten todella alhaisissa tai korkeissa lämpötiloissa. Voiteluöljyn valinta tehdään ensisijaisesti öljyltä vaadittavan viskositeetin perusteella. Viskositeetin täytyy olla sellainen, että laakeri saa

käyttölämpötilassaan riittävän voitelun. Vierintälaakereiden voiteluun suositellaan öljyjä, joilla on korkea viskositeetti-indeksi, eli sellaisia öljyjä, joiden viskositeetti ei muutu paljoa lämpötilan muuttuessa. (SKF Laakerikirja 1991, s. 159)

5 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli perehtyä vierintälaakereihin ja niiden käyttöön koneenrakenteissa. Vierintälaakerit ovat koneenosia, joiden tehtävänä on ohjata ja tukea pyöriviä koneenosia, kuten akseleita. Vierintälaakerit koostuvat kahdesta rengasmaisesta kehästä ja vierintäelimistä, jotka liikkuvat kehien välissä. Niihin voi kuulua myös vierintäelimiä ympäröivä pidin sekä tiivistimiä.

Vierintälaakereita on useita erityyppisiä. Vierintälaakerit voidaan jakaa säteis- ja painelaakereihin sen perusteella, minkä suuntaisia kuormituksia ne pääasiallisesti kantavat. Niin säteis- kuin painelaakereihinkin kuuluu useita geometrialtaan erilaisia laakerityyppejä, joista kullakin tyypillä on omat erikoisominaisuutensa. Näiden ominaisuuksien tunteminen on tärkeää, ja ne on otettava huomioon, kun suunnitteluvaiheessa valitaan laakereita koneeseen.

Laakeroinnin suunnittelussa pelkkä sopivan laakerimallin valitseminen ei riitä, vaan on huomioitava myös muut laakerointiin välittömästi vaikuttavat asiat. Näitä ovat esimerkiksi laakerin kiinnitys, voitelu ja tiivistys sekä akseli ja laakeripesä. Laakeroinnin suunnittelija joutuu siis tekemään useita päätöksiä, jotka vaikuttavat koneen toimintaan, luotettavuuteen ja taloudellisuuteen.

Tässä kandidaatintyössä käsiteltiin lähinnä perinteisiä vierintälaakereita ja laakerointiratkaisuja. Aiheen käsittelyä olisi mielenkiintoista jatkaa vaikkapa perehtymällä laakeritekniikan uusimpiin innovaatioihin.

LÄHDELUETTELO

Airila M., Jantunen E., Kivioja S., Laihotie E., Nurmi L., Pora M. & Ranta A., 1987. Koneenosat. Porvoo: WSOY, 341 s. ISBN 951-0-14338-3

BC Precision, 2015. Advantages And Disadvantages Of Ceramic Bearings [verkkodokumentti]. Chattanooga: BC Precision. Saatavissa: <https://www.bcprecision.com/blogs/news/71278725-advantages-and-disadvantages-of-ceramic-bearings> [viitattu 10.4.2019].

Björk T., Hautala P., Huhtala K., Kivioja S., Kleimola M., Lavi M., Martikka H., Miettinen J., Ranta A., Rinkinen J. & Salonen P., 2014. Koneenosien suunnittelu. 6. painos. Helsinki: Sanoma Pro, 517 s. ISBN 978-952-63-0798-5

Blom S., Lahtinen P., Nuutio E., Pekkola K., Pyy S., Rautiainen H., Sampo A., Seppänen P. & Suosara E., 1999. Koneenelimet ja mekanismit. 5. painos. Helsinki: Edita Oyj, 328 s. ISBN 951-37-2903-6

Cummins, K., 2010. Needle roller bearings: 60 years and still evolving. The Engineer [verkkolehti]. Lontoo: Mark Allen Group. Saatavissa: <https://www.theengineer.co.uk/needle-roller-bearings-60-years-and-still-evolving/> [viitattu 10.5.2019].

FAG Finland Oy, 1996. FAG vierintälaakerit – kuulalaakerit, rullalaakerit, laakeripesät, tarvikkeet. Espoo: FAG Finland Oy, 624 s.

Gonzalez, G., 2015. What's the Difference Between Bearings?. Machine Design [verkkolehti]. New York: Endeavor Business Media. Saatavissa: <https://www.machinedesign.com/whats-difference-between/what-s-difference-between-bearings-1> [viitattu 18.5.2019]

IEEE GlobalSpec, 2019. Ball Bearings Information [verkkodokumentti]. Albany: Engineering360. Saatavissa: https://www.globalspec.com/learnmore/mechanical_components/bearings_bushings/ball_bearings_all_types [viitattu 4.4.2019].

IndiaMART InterMESH Ltd., 2019a. ZKL Stainless Steel Needle Roller Bearing [verkkodokumentti]. Intia: IndiaMART InterMESH Ltd. Saatavissa: <https://www.indiamart.com/proddetail/stainless-steel-needle-roller-bearing-16603214873.html> [viitattu 11.5.2019].

IndiaMART InterMESH Ltd., 2019b. Spherical Roller Thrust Bearing [verkkodokumentti]. Intia: IndiaMART InterMESH Ltd. Saatavissa: <https://www.indiamart.com/proddetail/spherical-roller-thrust-bearing-16470898712.html> [viitattu 19.5.2019].

ISO 15:2017, 2017. Rolling bearings – Radial bearings- Boundary dimensions, general plan. 4. Painos. International Organization for Standardization: 24 s.

Isojoen Konehalli Oy, 2019. Kartiorullalaakeri 19,05X45,24X16,64 [verkkodokumentti]. Kauhajoki: Isojoen Konehalli Oy. Saatavissa: <https://www.ikh.fi/fi/kartiorullalaakeri-19-05x45-24x16-64-lm11949-910> [viitattu 13.5.2019]

Laakerinetti, 2019. Painerullalaakerit [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.laakerinetti.com/painelaakerit-painerullalaakerit-c-50_79.html [viitattu 18.5.2019]

NKE Bearings, 2019. Cylindrical roller bearings [verkkodokumentti]. Itävalta: NKE Bearings. Saatavissa: <https://www.nke.at/en/bearings-applications/standard-bearings/cylindrical-roller-bearings/> [viitattu 5.5.2019].

NTN Corporation, 2019. Allowable speed [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.ntnglobal.com/en/products/catalog/pdf/2202E_a09.pdf [viitattu 24.11.2019].

Santora, M., 2016. What is a self-aligning bearing? [verkkodokumentti]. WTWH Media LLC. Saatavissa: <https://www.bearingtips.com/what-are-self-aligning-ball-bearings/> [viitattu 21.4.2019].

Schaeffler Group, 2019. Vierintälaakereiden voitelu [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_

publications/schaeffler_2/publication/downloads_18/wl_81115_4_fi_fi.pdf [viitattu 21.12.2019]. 67 s.

Schaeffler Technologies AG & Co. KG, 2019. Machined needle roller bearings [verkkodokumentti] Saatavissa: https://www.schaeffler.de/content.schaeffler.de/en/products-and-solutions/industrial/product-portfolio/rolling_and_plain_bearings/machined_needle_roller_bearings/index.jsp [viitattu 11.5.2019]

SKF, 1991. SKF Laakerikirja. SKF-Yhtymä, 976 s.

SKF, 1994. SKF Laakerien kunnossapito. SKF-Yhtymä, 335 s.

SKF, 2019. Bearings, units and housings [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/index.html> [viitattu 20.4.2019].

SKF Yhtymä, 2016. SKF-laakerien kunnossapito [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.skf.com/binary/123-290853/SKF-laakerien-kunnossapito---SKF-bearing-maintenance-handbook---10001_1-FI.pdf [viitattu 13.10.2019]. 447 s.

Timken Company, 2019. Spherical Roller Thrust Bearings – TSR [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.timken.com/products/timken-engineered-bearings/thrust/spherical-roller-thrust-bearings-tsr/> [viitattu 19.5.2019]

Wikipedia, 2018. Bearing (mechanical) [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bearing_\(mechanical\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Bearing_(mechanical)) [viitattu 14.4.2019].

Wikipedia, 2019. Spherical roller bearing [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_roller_bearing [viitattu 11.5.2019].

Wuolijoki, J., 1972. Koneenelinoppi 1. Helsinki: Otava, 403 s.

Würth Oy, 2019. Pallomainen rullalaakeri, FAG [verkkodokumentti]. Riihimäki: Würth Oy. Saatavissa: <https://eshop.wurth.fi/Pallomainen-rullalaakeri-FAG-PALLOM-RULLAL-22205-E1-C3/1780004960.sku/fi/FI/EUR/> [viitattu 12.5.2019]