

**LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO**

Teknillinen tiedekunta

LUT Metalli

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari



## LIUKULAAKEREIDEN KÄYTTÖ TUULIVOIMAGENERAATTORISSA

Lappeenrannassa

2.12.2009

Matti Heikka

029 4268

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>LIUKULAAKERIT</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Laakerointitavan valinta</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Liukulaakerityypit</b> .....	<b>7</b>
2.2.1	Hydrodynaamiset laakerit.....	7
2.2.2	Hydrostaattiset laakerit.....	9
2.2.3	Voitelemattomat ja itsevoitelevat laakerit.....	10
2.2.4	Kaasulaakerit.....	11
<b>2.3</b>	<b>Liukulaakerin mitoitus</b> .....	<b>12</b>
<b>2.4</b>	<b>Voitelu ja voiteluaineet</b> .....	<b>12</b>
2.4.1	Voiteluöljyt.....	12
2.4.2	Rasvat.....	13
2.4.3	Kiinteät voiteluaineet.....	13
2.4.4	Viskositeetti.....	14
<b>2.5</b>	<b>Liukulaakerimateriaalit</b> .....	<b>14</b>
2.5.1	Materiaalin valintakriteerit.....	15
2.5.2	Öljykalvoiset laakerimateriaalit.....	15
2.5.3	Muut laakerimetallit.....	17
<b>3</b>	<b>TARKASTELTAVA LAAKERIKOKOONPANO</b> .....	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>20</b>
	<b>LÄHTEET</b> .....	<b>22</b>

## 1 JOHDANTO

Tuulivoima on uusiutuvaa energiaa, jossa ilman virtauksen liike-energia muutetaan pyörivien lapojen sekä generaattorin avulla sähköksi. Nykyään maailman sähköntuotannosta tuotetaan n. 1 % tuulivoimalla ja koko Euroopan sähköstä n. 3 % vuoden 2007 lopussa. Tuulivoimamarkkinoiden suuruus oli vuonna 2006 16 miljoonaa euroa ja markkinat kasvoivat 18 % viimeisten kolmen vuoden aikana. Vuosille 2007–2011 on ennustettu vielä n. 17 % lisäkasvua. (Suomen tuulivoimayhdistys ry, The Switch)

Jotta tuulivoiman hyödyntäminen olisi mahdollista, tarvitsee voimala vähintään 3 m/s tuulennopeuden. Tuulivoiman teho on sitä suurempi, mitä voimakkaampi tuuli on. Voimalan mallista riippuen sen nimellisteho saavutetaan tuulennopeuden ollessa noin 13–14 m/s. Tuulen nopeuden kasvaessa voimala tuottaa vakiotehoa aina 25 m/s nopeuteen asti. Optimaalisia paikkoja tuulivoimaloille ovatkin merten rannikot, merialueet, aukeat mereen rajoittuvat pellot tai suurten mäkien ja vuorten rinteet ja laet, joissa tuulen keskinopeus on 5,5–7,5 m/s. Tuulivoiman ollessa kyseessä voimalan tuotto vaihtelee vuorokauden, vuodenaikojen ja säärintamien mukaan. Keskimääräinen tuulen energia on kuitenkin melkein vakio, joten laajalla alueella ja pitkällä aikavälillä tuotannon erot tasoittuvat. Talvisin tuulee enemmän kuin kesällä, mutta myös sähkönkulutus on talvisin suurempaa. (Suomen tuulivoimayhdistys ry)

Viime aikoihin asti tuulivoimassa on pääosin hyödynnetty teollisuuden käyttöön kehitettyjä vaihteita, generaattoreita ja sähkölaitteita. Tuulivoimaloiden tekniikka muuttuu kuitenkin koko ajan huipputehon kasvaessa. Tuuliturbiineissa käytetään vaihdetta, jolla nostetaan generaattorin pyörimisnopeus 1500 kierrokseen minuutissa ja sähköä generoidaan oikosulkumoottorista modifioidulla induktiogeneraattorilla. Kestomagneettien kehityksen myötä suoravetoiset kestopagneettitahtikoneet ovat tulossa markkinoille. Tällöin ei ole enää tarvetta vaihdelaatikolle ja näin ollen voidaan

vähentää laitteiston mekaanisia rasituksia sekä pidentää turbiinin käyttöikää.  
(The Switch)

The Switch suunnittelee sekä valmistaa kestromagneettigeneraattoreita megawatti-luokan tuuliturbiineihin. Tässä kandidaatintyössä aiheena on tarkastella liukulaakeroinnin käyttömahdollisuutta PMR 560 -tuuligeneraattorin roottorin laakeroinnissa. Generaattori on kuvan 1 mukainen 1 – 4,5 MW generaattori, jonka eteen akselille tulee vaihdelaatikko. Generaattorin pyörintänopeus on tyypillisesti 1000 - 2200 kierrosta minuutissa. Tällä nopeusalueella generaattorista saadaan melko pieni ja kevyt. Haittapuolena generaattori tarvitsee suurinopeuksisen vaihdelaatikon, jonka toimintavarmuus on riski toimittaessa suurilla kuormilla. Tässä työssä keskitytään erilaisten liukulaakerointitapojen tarkasteluun sekä pohditaan niihin liittyviä ongelmia ja etuja kyseisessä kokoonpanossa. (The Switch)



**Kuva 1. PMR generaattori (The Switch).**

## 2 LIUKULAAKERIT

Liukulaakerin tehtävänä on ohjata sekä tukea akselia mahdollistaen sen liikkeitä. Normaalisti liukulaakerit ovat lieriömäisiä, mutta myös erilaiset liukukiskot, liukulevyt ja painelaakerit voivat toimia liukulaakereina. Tukivoimien vaikuttaessa akselia vastaan kohtisuoraan puhutaan säteislaakerista. Mikäli laakeriin kohdistuu akselin suuntaisia voimia, puhutaan aksiaalilaakerista. Laippa- tai puolipallomuotoillun liukulaakerin ansiosta myös säteis- ja aksiaalikuormitus on mahdollista samalle laakerille. Kuvassa 2 on esitetty erilaisia liukulaakerityyppejä, vasemmalta lukien monikerros, komposiitti, rullattu pronssi, öljypronssi ja sorvattu pronssi grafiitilla. Liukulaakereissa voimat siirtyvät voitelukalvon kautta akselistä laakeriin. Pinnat voivat koskettaa toisiaan laajalla alueella.



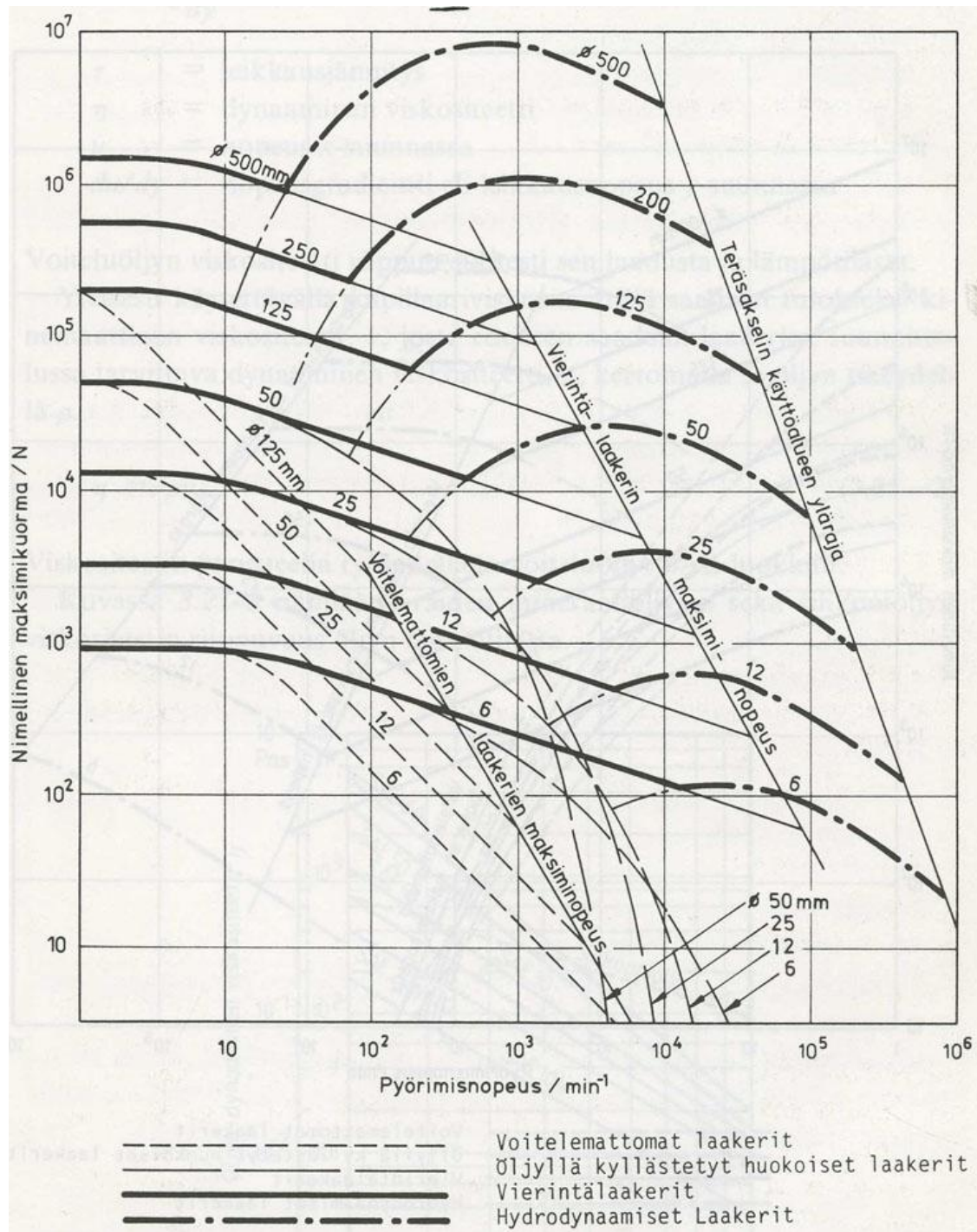
**Kuva 2. Erilaisia liukulaakereita (D&E trading Oy).**

Yleisesti liukulaakereiden sovelluksia ovat kohteet joissa liikkeitä ovat suhteellisen hitaita, sekä kuormitukset kohtuullisen suuria. Myös suurille nopeuksille on olemassa liukulaakerityyppejä. Liukulaakerin liike voi olla joko lineaarista, pyörivää tai näiden yhdistelmä. Pyörivä liike voi olla jatkuvaa tai edestakaista liikettä. Edestakaiset liikkeitä ovat kaikkein vaativimmat laakeroinneille jatkuvien käynnistysten ja pysähdysten vuoksi. Voitelukalvon rikkoutuessa laakerimateriaalin väsyminen ja kuluminen lisääntyy, mikä puolestaan lisää irtonaisten metallipartikkelien määrää laakeripinnalla. (D&E trading Oy 2009, s. 63)

Laakerin toimintalämpötila on oltava tarkasti tiedossa, jotta kaikki sen komponentit toimisivat suunnitellulla tavalla. Erityisesti tämä koskee voiteluöljyä, koska öljyn viskositeetin muutos on suoraan suhteessa sen lämpötilaan. Mikäli lämpötila nousee liiallisesti saattaa viskositeetti alentua huomattavasti ja aiheuttaa laakerin vakavaa kulumista sekä kiinnileikkautumisriskin. Akselin kovuuden on syytä olla suurempi kuin laakerimateriaalin, jotta välttyttäisiin akselin kulumiselta käynnistysten ja pysäytysten yhteydessä. Jotta laakerin käyntilämpötila voidaan pitää halutulla tasolla, on laakerin kuormitusta pienennettävä, voiteluaineen leikkausnopeutta suurennettava tai lämpöä johdettava pois laakerista. Rasvalla voideltujen laakereiden kuormitusta rajoittaa rasvan huono lämmönjohtamiskyky. (Airila 1985 s. 61)

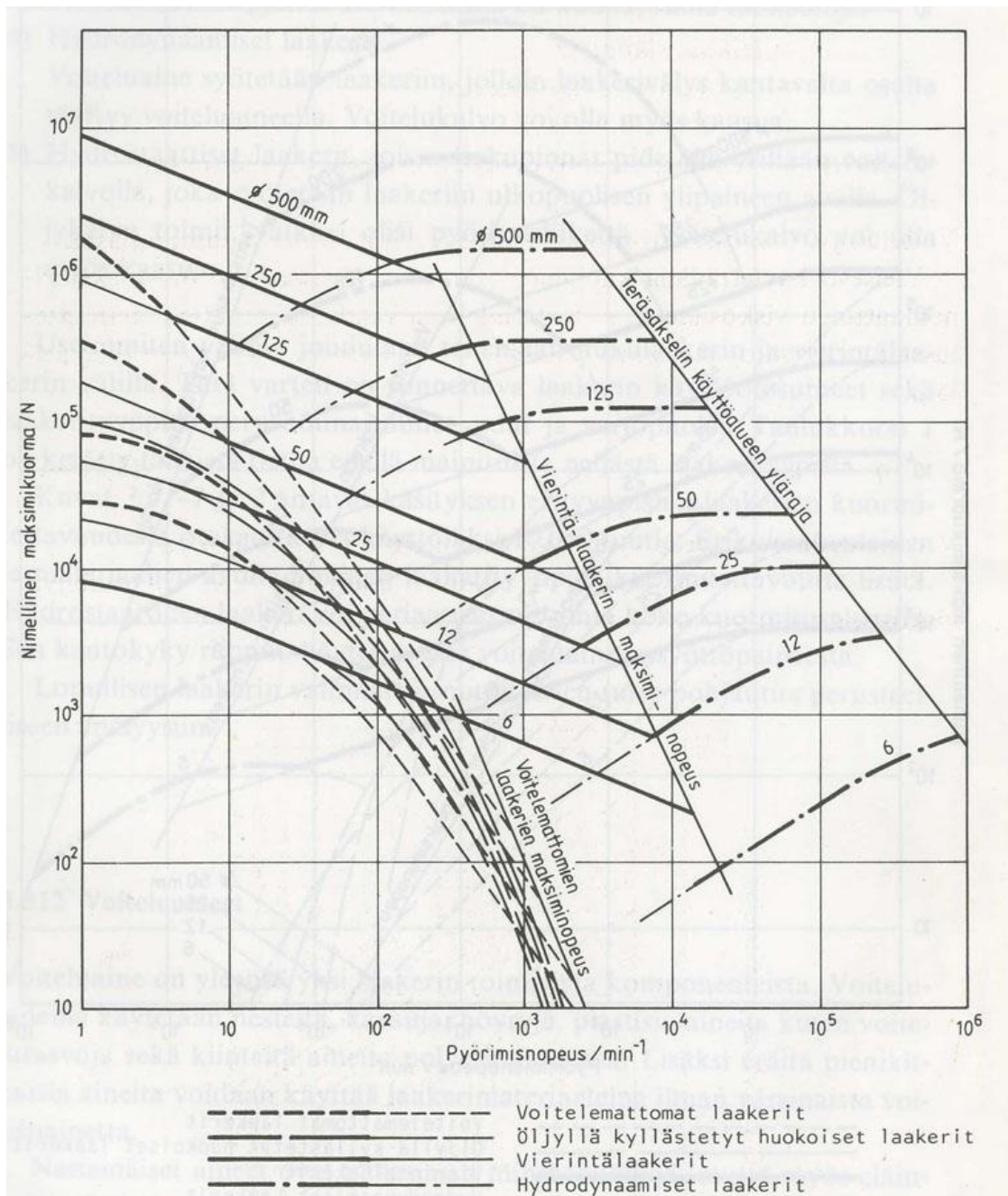
## **2.1 Laakerointitavan valinta**

Liitteissä 1, 2 ja 3 on vertailtu eri laakerointitapojen ominaisuuksia. Tärkeimpiä laakerinvalintaan vaikuttavia parametreja ovat akselin kuormitustilanne, tilantarve, lämpötila, voitelu, värähtely, ympäristöolosuhteet, säteily, tarkkuusvaatimukset, huolto, melunäkökohdat sekä kustannukset. Kuvissa 3 ja 4 on kuvattu erityyppisten laakereiden kuormitettavuutta käyttöiän ollessa 10.000 tuntia. Hydrostaattisen laakerin kuormankantokyky riippuu käytettävästä voiteluaineen paineesta ja näin ollen laakeri voi periaatteessa toimia koko kuormitusalueella. (Airila 1995, s. 417–422)



Kuva 3. Säteislaakerin yleinen valintaohje. (Airila 1985, s. 49)





Kuva 4. Aksiaalilaakerin yleinen valintaohje. (Airila 1985, s. 50)



## 2.2 Liukulaakerityypit

Rakenteen konseptisuunnittelussa joudutaan valitsemaan liukulaakerityypit, jotka parhaiten vastaavat tulevaa käyttötilannetta. Tässä mielessä liukulaakerityypit voidaan jakaa neljään ryhmään, jotka ovat seuraavat:

- hydrodynaamiset laakerit
- hydrostaattiset laakerit
- voitelemattomat ja itsevoitelevat laakerit
- kaasulaakerit.

Lisäksi on olemassa magneettilaakereita, joita voidaan käyttää sovelluksissa joissa vaaditaan erityisen tarkkaa ohjausta, pientä kitkaa, luotettavuutta tai suurta kuormankantokykyä. Haittapuolena magneettilaakereilla on hinta sekä tarve ulkoiselle säätöpiirille. Yleisimmät laakerityypit ovat liukulaakeri ja vierintälaakeri. Valitessa laakerointia on tärkeää tuntea laakerin käyttöolosuhteet sekä laakerityyppien perusominaisuudet. (Airila 1985, s. 47–48)

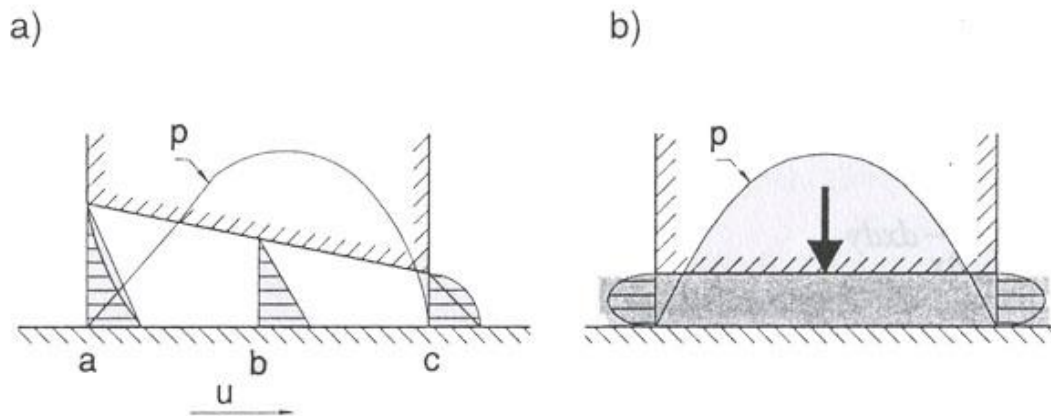
### 2.2.1 Hydrodynaamiset laakerit

Kiviojan mukaan (Kivioja 1998, s. 133) hydrodynaamisissa laakereissa syntyy pintojen välissä olevaan nesteeseen kantava hydrodynaaminen paine kahdella tavalla:

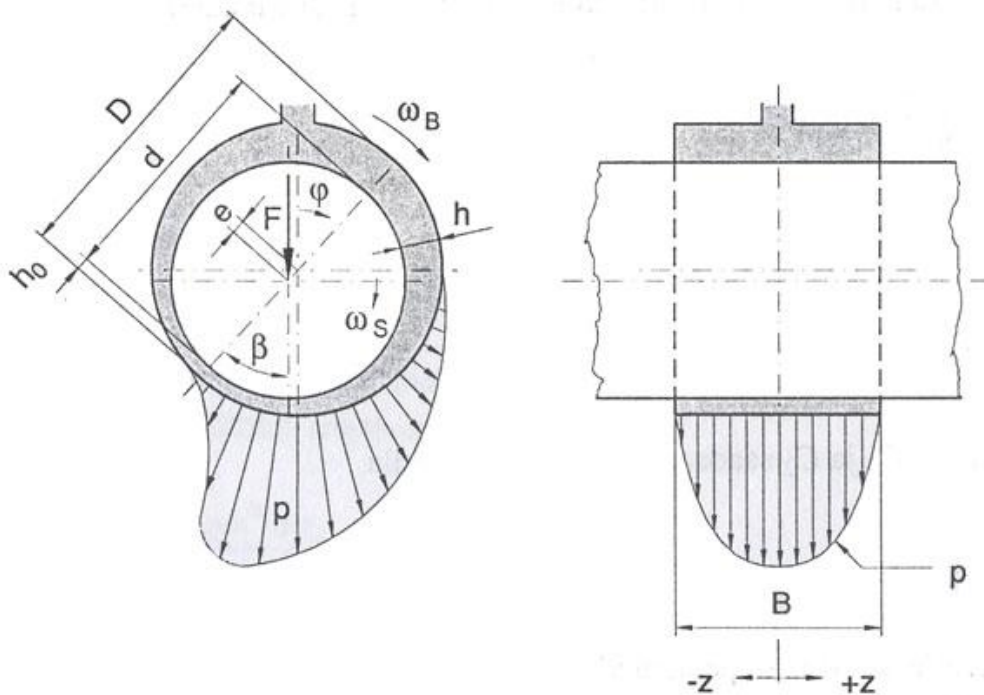
- Neste joutuu kapenevaan, kiilamaiseen rakoon, jonka rajapinnat liikkuvat toisiinsa nähden tangentialisesti.
- Pinnat lähestyvät toisiaan, jolloin neste pusertuu ulos pintojen välisestä raosta (puserrusvaikutus).

Hydrodynaamisen voitelutilanteen edellytyksinä ovat vastakkain liukuvien pintojen nopeusero sekä kiilamaisen rakenteen tuottama suppeneva voiteluainekalvo. Suppenevaan voiteluainekalvoon muodostuu ylipaine. Ylipaine tasaa kantaa laakeriin kohdistuvan kuormituksen sekä tasaa virtaavan voiteluaineen määrän. Nesteen virtaus ja painejakauman muoto kahden tason muodostamassa kiilamaisessa raossa on esitetty kuvassa 5 (a)

sekä nesteen pusertuessa pois toisiaan lähestyvien pintojen välisestä raosta kuvassa 5 (b). Akselin epäkeskeisyys aiheuttaa suppenevan öljykalvon säteislaakerissa, jolloin akselin pyöriessä muodostuu kuormaa kantava paine, joka on esitetty kuvassa 6. Pyöriessään akseli pumppaa öljyä oikealta kiilanmuotoiseen rengastilaan, jossa kehittyy kuvan mukainen paine. Puserrusvaikutus syntyy, kun vastakkaiset pinnat liikkuvat kohtisuoraan toisiaan vasten. Liike aiheuttaa liukukosketukseen painejakautuman, joka lisää hydrodynaamisen kalvon kuormankantokykyä. Pusertuvan öljykalvon vaikutuksella on merkitystä edestakaisin liikkuvien mekanismien laakeroinnissa sekä iskumaisten kuormitusten kohdistuessa laakeriin. (Kivioja 1998, s. 133, Wirzenius 1974, s. 164)



**Kuva 5. Hydrodynaamisen paineen kehittyminen kahden tasopinnan välissä, a) kiilamainen rako, b) puserrusvaikutus (Kivioja 1998, s. 133).**



Kuva 6. Paineen jakautuminen säteislaakerin öljykalvossa (Kivioja 1998, s. 133).

Käynnistyessään hydrodynaamiset laakerit toimivat ainoastaan osittain voideltuna ja pintojen pinnankarheudet koskettavat toisiaan. Kitkakerroin on tällöin suurempi kuin nestevoitelualueella.

### 2.2.2 Hydrostaattiset laakerit

Hydrostaattisissa laakereissa, toisin kuin hydrodynaamisissa laakereissa, liukupintoja pidetään erillään voiteluainekalvolla, joka tuotetaan ulkoisen painelähteen avulla. Isojen akselien käynnistysvaiheessa käytetään usein ulkopuolista paineöljyä nostamaan akseli irti laakerin pinnasta, vaikka itse laakeri toimisikin hydrodynaamisesti. Hydrostaattisen laakerin valmistus on kallista ja vaativaa, osien pienien välysten vuoksi. Laakeroitaessa hydrostaattisesti suuria sylintereitä tai teloja vaippapintansa varaan, käytetään usein taipuneen akselin pintaan mukautuvia laakerikenkiä. Laakerimateriaalista ja rakenteesta riippuen hydrostaattinen laakeri voi lyhytaikaisesti kantaa jopa 5-kertaisen staattisen kuormituksen.

Kuormankantokyky riippuu paineesta eikä niinkään välyksestä ja nestevirrasta. Paineen ollessa virrasta riippumaton, koskettavat pinnat toisiaan kuorman vähänkin kasvaessa ja kääntäen. (Airila 1985, s. 84–87)

### *2.2.3 Voitelemattomat ja itsevoitelevat laakerit*

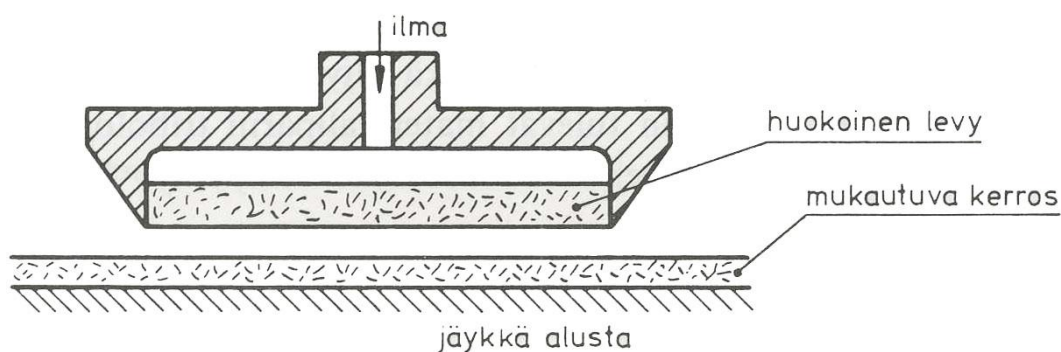
Etsittäessä huoltovapaita, halpoja, kevyitä sekä rakenteellisesti yksinkertaisia laakereita päädytään yleensä voitelemattomiin laakereihin. Materiaalina käytetään tällöin yleensä jotain muovilaatua, kuten polyamidia (PA), polytetrafluoroeteenia (PTFE) tai grafiittia. Laakereiden heikkoutena on kuitenkin pieni kuormankantokyky ja soveltumattomuus suurille liukunopeuksille. Airilan (1985, s. 109) mukaan voitelemattomien laakereiden käyttöä puoltavat tapaukset, joissa

- vaaditaan korkean tai matalan käyttölämpötilan sietoa
- tuotteen tai ympäristön saastuminen voiteluaineesta ei ole sallittua
- huollon järjestäminen on epävarmaa tai erityisen hankalaa
- on pieni tilantarve ja keveys on ensiarvoisen tärkeitä

Itsevoitelevat laakerit voivat olla myös (öljyllä) kyllästettyjä huokoisia metallilaakereita (sintrattuja pronssi-, rauta-, tai alumiinilaakereita). Huokosia on normaalisti 15–30 % koko laakerin tilavuudesta. Ne täytetään öljyllä, grafiitilla, molybdeenisulfidilla tai muoveilla. Sintrattujen, huokoisten laakereiden tärkein etu on vähäinen tai olematon huollontarve. Lisäksi niillä on erinomaiset kitkaominaisuudet ilman ulkopuolista voitelua. Sintrattu kerros voidaan kiinnittää myös teräsrungon päälle. Öljyllä kyllästetyt liukulaakerit toimivat hydrodynaamisten laakerien tapaan siten, että öljykalvo erottaa käynnin aikana pinnat toisistaan. Sintrattujen laakereiden käyttöä rajoittaa kuitenkin huono työstettävyys, koska lastuaminen tukkii kyllästetyt huokokset. Tavallisia öljyjä käytettäessä laakeri ei sovellu yli 70 asteen lämpötiloihin. Synteettisillä öljyillä käyttölämpötilaa voidaan nostaa jopa 150 asteeseen. (D&E trading Oy, Airila 1985, s. 100)

#### 2.2.4 Kaasulaakerit

Hydrostaattisen laakerin kuormankantokyky riippuu vain paineesta, kun taas nesteen tai kaasun virtaus ja pumppausteho kaasulaakerissa riippuvat tarvittavan voiteluainekalvon paksuudesta ja viskositeetista. Näin ollen pieni laakerivälitys ja suuri voiteluaineen viskositeetti ovat eduksi. Valmistustarkkuuden ja kuormankantokyvyn takia välystä ei kuitenkaan voida pienentää rajattomasti. Kitkateho laakerissa riippuu viskositeetin ja nopeuden tulosta jaettuna kalvonpaksuudella. Nopeakäyntisissä koneissa on siten edullista käyttää alhaisen viskositeetin omaavia kaasuja kuten ilmaa. (Airila 1985, s. 88–90)



**Kuva 7. Mukautuva pinta vähentää tarkkuusvaatimusta (Airila 1985, s. 89).**

Kaasurako on tärkeätä pitää mahdollisimman pienenä, jottei kaasun kulutus kasvaisi voimakkaasti. Laakerin sekä alustan ollessa jäykkiä kappaleita, edellytetään ilmaraolta suurta valmistustarkkuutta ja deformaatioiden huomiointia suunnittelussa. Mikäli laakerin toinen osapuoli voidaan valmistaa mukautuvista materiaaleista, riittää pienempikin tarkkuus. Käyttämällä väliaineena vettä, öljyä tai rasvaa voidaan kannatella ja siirtää hyvin suuria kuormia, mikäli käytetään mukautuvia laakerikomponentteja. Käytettäessä ilmaa väliaineena, tarvitaan suuren ulkoisen paineen aikaansaamiseksi tehokas kompressori. Mukautuvana pintana voi toimia myös kalvo. (Airila 1995, s. 487)

### **2.3 Liukulaakerin mitoitus**

Lopullisen laakerivalinnan ja mitoituksen tulee pohjautua perusteelliseen analyysiin. Liukulaakereiden laskentaan on olemassa standardi ISO 7902 säteislaakereiden laskennalle sekä ISO 12131 standardi aksiaalilaakerin laskennalle.

### **2.4 Voitelu ja voiteluaineet**

Voiteluaine on yksi laakerin toimivista komponenteista. Voiteluaineena käytetään nesteitä, kaasuja, höyryjä, plastisia aineita kuten voitelurasvoja sekä kiinteitä aineita pulverimuodossa. Myös eräitä pienikittäisiä aineita voidaan käyttää laakerimateriaaleina ilman varsinaista voiteluainetta. Nestemäiset voiteluaineet ovat pääasiassa mineraaliöljyjä, mutta myös eläin- ja kasvisöljyjä. Käytettäessä laakerimateriaalina esimerkiksi kumia, muoveja, puuta tai keraameja, voidaan käyttää myös vettä voiteluaineena. Kiinteät voiteluaineet ovat usein grafiittia, molybdeenisulfaattia tai talkkia.

Tribologisessa systeemissä on sekä voitelu että ympäröivä miljöö (ilma, kaasu, vesi pöly jne.) yhtä tärkeä kuin laakeri- ja akselimateriaali. Ympäröivää miljööä ei aina pystytä kontrolloimaan, mutta voitelun järjestämiseen voidaan oleellisesti vaikuttaa. Voitelu parantaa liukuominaisuuksia, pidentää elinikää, suojaa akselitappia korroosiolta, suojaa laakerointia lialta ja epäpuhtauksilta sekä pienentää kitkaa. Voiteluaineilla saattaa olla myös negatiivinen vaikutus laakerointiin väärin käytettyinä. (D&E trading Oy, s. 67)

#### **2.4.1 Voiteluöljyt**

Mineraaliöljyt valmistetaan raakaöljystä tyhjiötislaamalla ja puhdistamalla. Raakaöljyjen koostumukset voivat vaihdella jopa lähdekohtaisesti. Voiteluaineiden jalostukseen kemiallisesti sopivimpien raakaöljyjen ominaisuuksia ovat pieni aromaatti- sekä rikki- ja happipitoisuus sekä stabiilisuus. Hiilivetykoostumus vaikuttaa voiteluaineen ominaisuuksiin mm.

viskositeetilämpötilariippuvuuteen, jähme- ja leimahduspisteeseen ja tiheyteen. Hiilivetytyypit jaetaan parafiinisiin, nafteenisiin ja aromaattisiin.

Synteettisiä voiteluaineita on kehitetty ja kehitetään käyttöalueille, joissa mineraaliöljypohjaiset voiteluaineet eivät enää selviydy toivotulla tavalla voitelukohteen niille asettamista vaatimuksista. Sellaisia olosuhteita ovat mm. erittäin korkeat/matalat lämpötilat, raskaat kuormitukset, palamattomuus ja ympäristövaatimukset. Synteettisten voiteluaineiden ominaisuudet juontuvat perusöljyn fysikaalisista ja kemiallisista ominaisuuksista sekä niissä käytetyistä lisäaineista. Perusöljyn ominaisuudet määräävät suurelta osin valmiin tuotteen ominaisuudet. Synteettisiä voitelunesteitä käytetään mm. jäähdytyskompressoreissa, maaleissa, tietyissä vaihteistoissa ja laakeroinneissa, työstökoneissa, hydraulijärjestelmissä sekä kaivosteollisuuden koneissa. (Teollisuusvoitelu, s. 20–22 )

#### *2.4.2 Rasvat*

Voitelurasva koostuu öljystä ja saentimesta. Perusöljyn määrä (70–95%) vaihtelee rasvatyypistä riippuen. Perusöljynä voi olla joko mineraali- tai synteettinen öljy. Lisäksi rasvoihin lisätään öljyjen tapaan erilaisia lisäaineita mm. vanhenemisen- sekä korroosionestoaineita. Rasvat kuuluvat ei newtonilaisiin voiteluaineisiin, eli niillä leikkausjännityksen riippuvuus leikkausnopeudesta ei ole lineaarinen kuten öljyillä. Lämpötilan vaikutus rasvan viskositeettiin ei ole yhtä voimakasta mitä voiteluöljyillä. Kuitenkin, kun saavutetaan rasvan tippumispistelämpötila, rasvan rakenne hajoaa ja se muuttuu juoksevaksi. (Teollisuusvoitelu, s. 18–19)

#### *2.4.3 Kiinteät voiteluaineet*

Mikäli voiteluaineena ei voida käyttää öljyä tai rasvoja, käyttöolosuhteiden vuoksi, ratkaisu voiteluun saattaa löytyä kiinteistä voiteluaineista. Mm. eräissä lääke-, tekstiili- ja elintarviketeollisuuden koneissa, alhaisissa lämpötiloissa sekä syövyttävien tai säteilyttävien olosuhteiden vallitessa on öljyjen tai



rasvojen käyttö mahdotonta. Käytetyimpiä kiinteitä voiteluaineita ovat molybdeenisulfiitti, grafiitti ja polytetrafluorietyleni (teflon). Usein näitä voiteluaineita lisätään myös tavallisiin voiteluöljyihin ja rasvoihin parantamaan voitelua. (Airila 1995, s. 440)

#### *2.4.4 Viskositeetti*

Viskositeetillä tarkoitetaan voiteluaineen ominaisuutta vastustaa liikettä aineen sisäisten kitkojen ansiosta. Viskositeetin kasvaessa aine virtaa hitaammin, kun taas viskositeetin alentuessa aine virtaa nopeammin sekä kiinnileikkaantumisen vaara kasvaa. Voiteluainekalvon muodostumista toisiaan vastaan liikkuvien pintojen välissä säätelevät voiteluaineen reologiset (paineen ja viskositeetin vaikutus voiteluaineen koostumukseen) ominaisuudet. Voiteluaineen virtausnopeuden suhdetta sen leikkautumiseen tarvittavaan jännitykseen kuvataan viskositeetilla, joka on keskeinen ominaisuus kalvon muodostumisessa. (Kivioja 1998, s. 174)

### **2.5 Liukulaakerimateriaalit**

Materiaalin merkitys rajoittuu vain hydrodynaamisen paineen kestokykyyn sekä öljyn voiteluominaisuuksiin, mikäli laakeri on jatkuvasti voitelukalvon varassa. Laakerin kuorman pysyessä samana ei laakerin lievä kulumisen vähennä laakerin kantokykyä. Mikäli laakerin kuorman suunta vaihtuu, on tämä otettava huomioon laakerin kantokykyä mitoitettaessa. Kuorman suunnan muutos vaikuttaa merkittävästi materiaalin kulumisnopeuteen joka voi olla kymmenkertaisesti suurempi kuin suuntaa muuttamattomalla kuormalla. Mikäli laakerimateriaalista halutaan kovaa, on akselin syytä olla karkaistu tai pintakäsitelty akselin kulumisen vähentämiseksi. (Airila 1995, s. 461)

### 2.5.1 Materiaalin valintakriteerit

Airilan (1995, s. 462) mukaan laakerimateriaalille voidaan asettaa seuraavia yleisiä vaatimuksia:

- valmistaminen mahdollista (pinnanlaatuvaatimukset)
- pinnankarheuksien tasoittuminen sisäänajovaiheessa
- leikkaantumattomuus akselin pintaan voiteluaineen hetkellisesti puuttuessa
- pieni kulumisnopeus
- pieni lämpölaajenemiskerroin
- reunapaineen kestävyys (muovautumiskyky)
- hyvä lämmönjohtavuus
- staattisen ja dynaamisen lujuuden riittävyys lämpötilan noustessa
- korroosionkestävyys
- alusmateriaaliin tarttuvuus

Tavallisesti metalliset laakerimateriaalit ryhmitellään sen mukaan, mitä ainetta materiaalissa on eniten, koska tällä aineella on suurin vaikutus liukuominaisuuksiin. (Airila 1995, s. 462)

### 2.5.2 Öljykalvoiset laakerimateriaalit

Valkometallit, eli tina- ja lyijyvaltaiset metallit ovat yleisiä laakerimateriaaleja, vaikka pronssilaakereiden käyttö onkin jatkuvasti vähentänyt valkometallilaakereiden osuutta. Valkometallilaakereiden etuihin luetaan niiden pehmeys, joten ne kestävät laakerin reunapuristusta sekä pystyvät hautaamaan kovia kulumispartikkeleita. Voitelukalvon pettäessä laakereilla on hyvät kitkaominaisuudet. Laakereiden valmistaminen on suhteellisen helppoa ja siten myös edullista. Pehmeytensä vuoksi, valkometallilaakerit eivät kuitenkaan kestä suuria paineita ja niiden väsymiskestävyys on huonompi kuin kupariseosten. Laakereiden lujuus myös pienenee nopeasti lämpötilan noustessa. Mikäli haittoja halutaan vähentää, voidaan valkometallia käyttää pinnoitteena lujemman ja väsymistä kestäväen laakerimateriaalin pinnalla. (Kivioja 1998, s. 223, Airila 1995, s. 462)

Valkometalleihin verrattuna kupariseokset ovat lujempia ja kestävät korkeampia käyttölämpötiloja, mutta toisaalta kitkaominaisuudet sekä kyky haudata kovia partikkeleita on huonompi. Verrattuna tinavaltaisiin valkometalleihin niiden kulumiskestävyys on parempi ja hinta on alhaisempi. Tinapronssilaakerit kestävät suuria kuormituksia ja niiden väsymiskestävyys on hyvä myös kuluttavissa sekä syövyttävissä olosuhteissa. Lyijyseostus parantaa kuivakitkaominaisuuksia ja lastuttavuutta kuitenkin huonontaa samalla väsymis- ja korroosionkesto-ominaisuuksia. Alumiinipronssien alumiinipitoisuus on noin 10% ja ne kestävät kupariseoslaakereista parhaiten suuria kuormituksia ja korkeita lämpötiloja. Haittapuolena mukautuminen reunapuristukseen on huono. Messingiksi kutsutaan kupariseoksia, joissa on sinkkiä, jopa 40%. (Kivioja 1998, s. 224, Airila 1985, s. 95)

Alumiiniseoksista valmistettuja liukulaakereita käytetään autojen moottoreissa, mäntäkompressoreissa sekä lentokoneissa. Pääasiallisesti niitä käytetään laakerikuoriin ja kolmikerroslaakerien välikerroksiin. Ne kestävät hyvin syövyttäviä olosuhteita, mutta reunapuristusta vain rajoitetusti. Alumiiniseokset ovat taloudellisia, mutta vaativat kunnollisen voitelun ja aiheuttavat ongelmia oikean välyksen määrittämiseksi korkean lämpölaajenemiskertoimen ansiosta. (Airila 1995, s. 463, Khronsar 2001, s. 95)

Sintrattujen laakereiden ominaisuudet perustuvat huokoiseen rakenteeseen. Huokokset täytetään voiteluaineella (öljy, grafiitti, molybdeenisulfidi, muovi jne.). Seosten lujuus ja kuormitettavuus paranee huokoisuuden vähetessä, mutta tällöin voiteluainemäärä kuitenkin pienenee. Öljytäytteisten laakereiden käyttöä rajoittaa huono työstettävyys, koska lastuaminen tukkii huokokset. Laakerit eivät myös sovellu yli 70 asteen lämpötiloihin, mutta synteettisiä öljyjä käytettäessä voidaan saavuttaa jopa 160 asteen toimintalämpötila. (Airila 1985, s. 100, Kivioja 1998, s. 224)

### 2.5.3 Muut laakerimetallit

Haluttaessa liukulaakerille jotain tiettyjä ominaisuuksia voidaan käyttää perinteisistä materiaaleista poiketen sinkkiseoksia, valurautaa, terästä, kovametalleja, hopeata, grafiitteja, kumia, puuta ja muoveja. Näillä materiaaleilla haetaan laakerille jotain ylivoimaista ominaisuutta joka voi olla sähkönjohtavuus/eriste, hinta, magneettisuus, hiilipitoisuus, säteilynkestävyys, tyhjiönkestävyys, keveys, kovuus jne. (Airila 1995, s. 462)

### 3 TARKASTELTAVA LAAKERIKOKOONPANO

Laakeroinnin asettelusta johtuen urakuulalaakeri ottaa vastaan vaihdelaatikolta tulevat aksiaali- sekä radiaalivoimat ja lieriörullalaakeri ainoastaan radiaalikuormaa. Liukulaakerien käyttö kyseisessä konstruktiossa tulee halvemmaksi mitä vastaavien vierintälaakereiden. Akselihalkaisijan ollessa 120 – 170 mm, monelta valmistajalta löytyy liukulaakereita hyllytavarana. Mikäli laakeri halutaan valmistaa erikoisemmasta materiaalista tai valikoimasta poikkeavilla mitoilla, se useimmiten onnistuu, mutta valmistajasta riippuen kasvattaa hintaa.

Liukulaakerin hinta on monen tekijän summa, tärkeimpänä määräävänä tekijänä on usein valmistettava määrä. Johtuen akselin suuresta pyörimisnopeudesta (2200 rpm) sekä halkaisijasta (120 - 170 mm), liukulaakerin liukunopeudeksi tulee tällöin n. 14 - 20 m/s. Tällöin kyseeseen soveltuu parhaiten hydrodynaamiset laakerit. Itsevoiteleville liukulaakereille liukunopeus on liian suuri riittävän voitelun aikaansaamiseksi. Itsevoitelevilla laakereilla liukunopeudet rajoittuvat usein alle 5 m/s, riittävän voitelun varmistamiseksi. Poikkeuksena öljypronssi jolla voidaan saavuttaa jopa 10 m/s liukunopeus.

Koska generaattori ei pyöri yhtäjaksoisesti kokoajan, kuluttavat käynnistyksiset ja pysähdykset hydrodynaamista laakeria rajavoitelun aikana. Liukulaakerointi on toki mahdollista toteuttaa myös hydrostaattisella liukulaakerilla, mutta tällöin konstruktio monimutkaistuu tarvittavan öljynpaine lähteen vuoksi. Koska roottorin akseli on myös aksiaalikuormituksen alaisena, tarvitaan säteisliukulaakereiden lisäksi aksiaalilaakeri tai painelaakeri ottamaan vastaan aksiaalikuormitusta. Laipallinen- tai nivel-liukulaakeri voisi olla tähän tarkoitukseen yksi ratkaisu. Nivel-liukulaakeri antaisi paremmin anteeksi akselin kulma poikkeamaa, mutta nopeuden kestävyys muodostuu rajoitteeksi.

Hydrodynaamisesta liukulaakerista tulee myös pieni välys akseliin, johtuen voiteluainekalvon paksuudesta ja öljykalvon joustosta. Välystä voidaan parantaa pidentämällä liukulaakerin pituutta, mutta tällöin akselin taipuma aiheuttaa rajavoitelutapauksen liukulaakerin reunakalvossa. Mitä pidempi laakeri sitä herkempi laakeri on akselin taipumalle. Toinen vaihtoehto välyksen pienentämiseksi on parantaa akselin sekä laakerin pinnanlaatua, jolloin voiteluaineen minimikalvonpaksuus pienenee. Kokonaan akselin välyksestä ei liukulaakereilla päästä eroon, koska hydrodynaaminen voitelu perustuu epäkeskeiseen akseliin ja sen tuottamiin paine-eroihin voiteluaineessa.

Lämpötilan vaikutukset on myös syytä huomioida kyseisessä konstruktiossa. Liukulaakereiden suunnittelussa on erittäin tärkeää tietää laakereiden käyntilämpötila, joka vaikuttaa suuresti voiteluaineen viskositeettiin ja voiteluominaisuuksiin. Mikäli lämpötila nousee yli suunnitellun rajan, voiteluöljyn viskositeetti voi alentua huomattavasti mikä johtaa akselin ja laakerin vaurioitumiseen. Mikäli rakenteellisia muutoksia sallitaan, voisi jäähdytysilma tulla akselin molemmista päistä sisään ja poistua käämien kohdalta ulos. Näin molemmissa laakereissa saataisiin lämpötila pysymään alhaisemmalla tasolla. Nykyratkaisussa ilmavirran suunta lämmittää puhaltimen puoleista laakeria turhaan.

Liukulaakeri voi myös toimia eristimenä, mikäli halutaan eristää akseli sähköisesti rungosta. Nykyaikaiset liukulaakerit voidaan pinnoittaa monilla eri materiaaleilla, mahdollistaen näin myös sen eristeenä toimimisen. Liukulaakereiden mitoitus on varsin monimutkaista johtuen lukemattomista vaikuttavista tekijöistä. Mitoitukseen on olemassa omat standardinsa. Mikäli liukulaakereiden käyttöön päädytään, on varsinaisten laskelmien paikkaansa pitävyys vielä varmistettava liukulaakerin valmistajalta.

## 4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mikäli nykyiseen akseliin ei tehtäisi muutoksia ja vierintälaakerit korvattaisiin suoraan liukulaakereilla, tulisi liukulaakereiden olla hydrodynaamisesti tai hydrostaattisesti voideltuja. Akselin korkea liukunopeus ei mahdollista itsevoitelevia laakerointimahdollisuuksia vaan puhdas nestevoitelu on ainoa vaihtoehto. Tällöin akseli pyörisi kokonaan voiteluainekalvon varassa jolloin voidaan saavuttaa hyvinkin korkeita nopeuksia ja ainoaksi rajoitteeksi muodostuu vain laakerimateriaalin hydrodynaaminen paineensietokyky sekä öljyn voiteluominaisuudet.

Mikäli akselia ohennettaisiin tai kierrosnopeutta vähennettäisiin siten, että liukunopeudeksi saataisiin 10 m/s, kyseeseen kävisi öljypronssinen liukulaakeri tai pinnoitettu materiaali jossa liukupintana olisi pronssimateriaali. Se olisi käytettävyydeltään huoltovapaampi laakeri, koska se ei tarvitsisi lisävoitelua toimiakseen, tosin kuin puhtaasti nestevoidellut laakerit. Liukulaakereita käytettäessä muodostuu akselille epäkeskeisyyttä johtuen hydrodynaamisesta voitelutavasta, tähän voi kuitenkin vaikuttaa mm. parantamalla pinnanlaatua ja ohentamalla voiteluainekalvoa tai pidentämällä laakeria.

Tuuliturbiineiden ollessa tuulesta riippuvaisia, pitäisi käynnistyksen aikainen rajavoitelu hoitaa hydrodynaamisessa laakeroinnissa erillisen pinnoitteen avulla. Muovi- tai teflonpintainen laakeri ei kuitenkaan enää kestä kyseessä olevia nopeuksia, joten pronssiseostettu pinnoite jää milteipä parhaaksi vaihtoehdoksi. Hydrostaattisessa laakeroinnissa öljy pitäisi liukupinnat erillään ulkoisen painelähteen avulla myös käynnistysten ja pysäytysten yhteydessä, mutta tuo lisäpainoa sekä monimutkaisuutta vaatimalla ulkoisen painelähteen.

Liukulaakerit kyseisessä konstruktiossa tulevat pääsääntöisesti huomattavasti nykyisiä vierintälaakereita halvemmaksi. Tarkkaa vertailuhintaa on kuitenkin mahdotonta sanoa, koska liukulaakerin rinta riippuu monesta eri tekijästä. Tärkeimpänä tekijänä valmistajan mukaan kuitenkin on valmistusmäärä. Aihe



on kuitenkin lisätutkimuksen arvoinen, sillä liukulaakereissa olisi potentiaalia kyseisen konstruktion laakeroinniksi. Liukulaakerin suunnittelu on kuitenkin vaativa tehtävä joka olisi syytä tehdä liukulaakeri valmistajan kanssa.

## LÄHTEET

Airila, M. et al. 1995. Koneenosien suunnittelu. Porvoo: WSOY. 796 sivua. ISBN 951-0-20172-3

Airila, M. et al. 1985. Koneenosien suunnittelu 3, tehonsiirto. Porvoo: WSOY. 512 sivua. ISBN 951-0-13143-1

D&E trading Oy. 2009. Liukulaakeri tuote-esite.

Freeman, P. 1962. Lubrication and Friction. Lontoo: Whitefriars press Ltd. 182 sivua.

Goodwin, M. J. 1989. Dynamics of rotor-bearing systems. Lontoo: Unwin Hyman Ltd. 281 sivua.

ISO 7902. 1998. Hydrodynamic plain journal bearings under steady-state conditions - Circular cylindrical bearings. Geneva: International organization for standardization. 29 sivua.

ISO 12131. 2001. Plain bearings – Hydrodynamic plain thrust pad bearings under steady state conditions. Geneva: International organization for standardization. 25 sivua.

Khonsari, M. M. et al. 2001. Applied tribology: Bearing design and lubrication. New York: John Wiley & Sons, inc. 496 sivua. ISBN 0-471-28302-9

Kivioja, S. et al. 1998. Tribologia – kitka, kuluminen ja voitelu. Helsinki: Otatieto. 351 sivua. ISBN 951-672-240-7

Niinikangas, S. 2003. Diplomityö, Inspection criteria for hydrodynamic sliding bearings of medium speed engine. 94 sivua.

Smith, D. 1969. M. Journal Bearings in Turbomachinery. Lontoo: Chapman and Hall Ltd. 176 sivua.

Suomen tuulivoimayhdistys ry [www-dokumentti],  
[saatavissa <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/>], [viitattu 24.10.2009]

Tarhonen, K. 2008. Diplomityö, Designing a new type of support for rotary kilns. 112 sivua.

Teollisuusvoitelu. 2006. Kunnossapidon julkaisusarja, n:o 8. Hamina: KP-Media Oy. 254 sivua. ISBN 952-99458-1-7

Wirzenius, A. 1974. Kone-elimet teknillisiä oppilaitoksia varten, II osa. Tampere: Kustannusyhtymä. 331 sivua.

## LIITE 1

Käyttötilanne	Huomiota kiinnitettävä	Voitelemattomat laakerit	Öljyllä kyllästetyt ja huokoiset laakerit	Vierintä-laakerit	Hydrodynaamiset laakerit	Hydrostaattiset laakerit	Dynaamiset kaasulaakerit	Staattiset kaasulaakerit
<b>Korkea lämpötila</b>	Lämpölaajenemisen, välysten muutoksiin, sekä käynnistysmomenttiin.	Toimivat tyydyttävästi, riippuen materiaalista	Voiteluaineen hapettumisen kestävyys?	.	Voiteluaineen hapettumisen kestävyys otettava huomioon		Erinomainen	Erinomainen
<b>Matala lämpötila</b>			Voiteluaine saattaa aiheuttaa rajoituksia, käynnistys-momentin huomioonottaminen välttämätöntä.	Alle -30 °C lämpötiloissa tarvitaan erikois-voiteluaineita, käynnistys-momentin huomioonotto välttämätöntä	Voiteluaine saattaa rajoittaa, käynnistysmomentin huomioonotto välttämätöntä	Voiteluaine saattaa rajoittaa	Erinomainen, kaasun kuivaaminen välttämätöntä.	
<b>Ulkopuolinen täristys</b>	Fretting ilmiön vaara olemassa muissa paitsi hydrostaattisissa laakereissa	Yleensä tyydyttävä, elleivät huippukuormitukset ylitä laakerin kantokykyä		Saattaa tulla vaikeuksia. Asiaa kysyttävä laakerinvalmistajalta	Tyydyttävä	Erinomainen	Normaalisti tyydyttävä	Erinomainen
<b>Tilavaatimus</b>		Pieni radiaalinen tilantarve		Valinnanvaraa, pieni aksiaalinen tilantarve	Pieni radiaalinen tilantarve, mutta kokonaistilantarve riippuu järjestelmästä		Pieni radiaalinen tilantarve	Pieni radiaalinen tilantarve, mutta kokonaistilantarve riippuu järjestelmästä

## LIITE 2

Käyttötilanne	Huomiota kiinnitettävä	Voitelemattomat laakerit	Öljyllä kyllästetyt ja huokoiset laakerit	Vierintä-laakerit	Hydrodynaamiset laakerit	Hydrostaattiset laakerit	Dynaamiset kaasulaakerit	Staattiset kaasulaakerit
Likaiset ja pölyiset olosuhteet		Normaalisti tyydyttävä. Tiivistys eduksi	Tiivistys välttämätöntä		Tyydyttävä, voiteluaineen suodatus on välttämätöntä		Tiivistys välttämätöntä	Tyydyttävä
Tyhjä		Erinomainen	Voiteluaine voi tuottaa vaikeuksia				Ei yleensä käyttökelpoinen	Ei käyttökelpoinen
Märät tai kosteat olosuhteet	Metallien korroosiovaaraan	Yleensä tyydyttävä, riippuen materiaalista	Normaalisti tyydyttävä; tiivistys toivottava	Normaalisti tyydyttävä; tiivistys yleensä välttämätön	Tyydyttävä		Tyydyttävä	
Säteily		Tyydyttävä	Voitelu saattaa tuottaa rajoituksia				Erinomainen	
Pieni käynnistys momentti		Ei yleensä suositella	Tyydyttävä	Hyvä	Tyydyttävä	Erinomainen	Tyydyttävä	Erinomainen
Pieni käyntivastus					Tyydyttävä		Erinomainen	
Radiaalisen sijainnin tarkkuus		Huono	Hyvä			Erinomainen	Hyvä	Erinomainen
Kestävyys		Rajallinen mutta laskettavissa oleva			Teoreettisesti rajaton, mutta suodatus sekä käynnistysten määrä rajoittaa	Teoreettisesti rajaton	Teoreettisesti rajaton, mutta käynnistysten ja pysäytysten määrä rajoittaa	Teoreettisesti rajaton

### LIITE 3

Käyttötilanne	Huomiota kiinnitettävä	Voitelemattomat laakerit	Öljyllä kyllästetyt ja huokoiset laakerit	Vierintä-laakerit	Hydrodynaamiset laakerit	Hydrostaattiset laakerit	Dynaamiset kaasulaakerit	Staattiset kaasulaakerit
Äänetön käynti		Hyvä, jos kuormitus vakinainen	Erinomainen	Tavallisesti tyydyttävä	Erinomainen	Erinomainen ellei pumppu pidä melua	Erinomainen	Erinomainen ellei kompressori pidä melua
Voitelun yksinkertaisuus		Erinomainen		Erinomainen tavanomaisissa sovellutuksissa	Yksinkertainen ellei tarvita runsasta öljyn kiertoa	Korkeapainepumppu välttämätön	Erinomainen	Tarvitaan puhdasta ja kuivaa painekaasua
Saatavissa standardiosia		Hyvästä erinomaiseen riippuen mallista	Erinomainen		Hyvä	Ei saatavissa		
Ympäristöä saastuttava vaikutus		Kulumishiukkaset ehkä vaivana. Prosessineste saattaa toimia voiteluaineena	Normaalisti tyydyttävä, tiivistys tärkeä ellei prosessinestettä käytetä voiteluun				Erinomainen	
Käynnistyksen ja pysäytyksen sietokyky		Erinomainen	Hyvä	Erinomainen	Hyvä	Erinomainen	Huono	Erinomainen
Käyntisuunnan muuttamisen sietokyky			Yleensä hyvä		Yleensä hyvä			
Käyttökustannukset		Hyvin alhaiset			Riippuu voitelujärjestelmästä	Voiteluaineen syöttöjärjestelmä saattaa maksaa	Ei mitään	Kaasunsyöttölaitteisto saattaa maksaa