



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

AKI BAUMGARTNER  
OPPILASLABORATORIOSSA KÄYTETTÄVIEN TRIBOLOGISTEN  
KOELAITTEIDEN KEHITTÄMINEN  
Diplomityö

Tarkastajat:  
Professori Arto Lehtovaara  
DI Janne Juoksukangas  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-  
voston kokouksessa 4. maaliskuuta  
2015

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

**BAUMGARTNER, AKI:** Oppilaslaboratoriossa käytettävien tribologisten koelaitteiden kehittäminen

Diplomityö, 70 sivua, 9 liitesivua

Maaliskuu 2016

Pääaine: Koneiden ja järjestelmien suunnittelu

Tarkastajat: Professori Arto Lehtovaara, DI Janne Juoksukangas

Avainsanat: koelaitteen suunnittelu, suunnittelun metodiikka, kitka, kuluminen

Kitka ja kuluminen ovat koneensuunnittelussa sekä yleensä metalliteollisuudessa merkittävän huomion kohteena. Näiden ilmiöiden tunteminen ja tunnistaminen ovat tärkeässä asemassa tuotteiden suunnittelussa ja kehittämisessä. Tämän diplomityön päätavoitteena oli suunnitella opetuskäyttöön hydrodynaaminen liukulaakerikoelaitte sekä tappi-kiekkokoelaitte oppilaslaboratoriossa käytettäväksi. Lisäksi tavoitteena oli rakentaa tappi-kiekkokoelaitte ja tehdä sillä alustavat mittaukset. Koelaitteiden tarkoitus on demonstroida tribologisia ilmiöitä, ei niinkään tuottaa absoluuttisesti tarkkoja mittausrvoja. Molemmista suunniteltavista koelaitteista oli edeltävät versiot laboratoriossa, joskin ne olivat tulleet jo elinkaarensa päähän. Lähtökohtana koelaitteiden suunnittelussa oli tuoda laitteet nykyaikaan ja tehdä niistä kompaktimmat versiot.

Työn teoriaosuudessa selvitetään materiaalien kulumismekanismeja, koneenosiin liittyviä voitelumekanismeja sekä näiden vaikutuksia tribologisten ilmiöiden hallinnassa. Lisäksi kerrotaan työhön liittyvien koelaitetyyppien yleisistä toimintaperiaatteista ja esitellään lyhyesti koelaitteiden suunnitteluprosessin pohjana käytettyjä Pahl & Beitzin systemaattista suunnitteluprosessia sekä Ulrich & Eppingerin tuotekehitysmetodiikkaa. Työn soveltavassa osuudessa selostetaan koelaitteiden suunnittelun keskeiset vaiheet. Hydrodynaamisella liukulaakerikoelaitteella on tarkoitus määrittää liukulaakerissa vallitseva paine, voitelukalvon paksuus, laakerin kitka sekä laakerissa vallitseva lämpötila. Tappi-kiekkokoelaitteella on tarkoitus määrittää halutun materiaalin kulumisnopeus ja kulumiskerroin sekä materiaaliparien kitkakerroin.

Työn tuloksena syntyivät molempien koelaitteiden valmistuspiirustukset, joiden pohjalta toinen koelaitteista, tappi-kiekkokoelaitte valmistettiin ja otettiin käyttöön. Koelaitteella suoritettiin myös alustavia mittauksia kuparista ja nailonista valmistetuille koepaloille. Alustavien mittausten tarkoituksena oli saada yleiskäsitys koelaitteen toiminnasta mittaustapahtuman aikana. Koelaitteen toimivuutta selvitettiin mittaamalla kitkakerroin, kulumiskerroin sekä kulumisnopeus koepalan liukuessa teräksistä pintaa vasten. Alustavat mittaukset osoittivat, että suunniteltu koelaitte soveltuu tribologisten ilmiöiden demonstrointiin ja täyttää sille annetut keskeiset vaatimukset. Lisäksi, havaituille pienille puutteille on esitetty suhteellisen helposti toteutettavat korjaustoimenpiteet.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

**BAUMGARTNER, AKI:** Development of tribological testing equipment for student laboratory

Master of Science Thesis, 70 pages, 9 Appendix pages

March 2016

Major: Design of machines and systems

Examiners: Professor Arto Lehtovaara, M.Sc. Janne Juoksukangas

Keywords: test rig design, design methodology, friction, wear

The friction and wear of materials have a significant impact in machine design and generally in the metal industry. The understanding and identification of these phenomena play a critical role in design- and development processes of products. The goal of this thesis was to design a hydrodynamic journal bearing test device and a pin-on-disk test device. In addition, the goal was to manufacture and carry out preliminary tests with the pin-on-disk test device. These devices are designed for teaching and demonstrating tribological phenomena in a student laboratory, not to conduct precise measurements. There were preceding versions of both devices, although they had come to the end of their lifespan. The basis for the redesign process was to modernize and produce more compact versions of the previous devices.

The theoretical part of the thesis explores the wear mechanisms of materials, lubrication mechanisms and impacts they have on the control of tribological phenomena. The section also presents the operation principles of the designed devices. Furthermore, the literature review includes the systematic design process by Pahl & Beitz and product development methodology by Ulrich & Eppinger. Their methods have been applied to the design processes of the test devices, and they are described in greater detail in the experimental part of this thesis. The hydrodynamic journal bearing test device can be used to measure the pressure, friction and temperature in the journal bearing and also the thickness of the oil film. With the pin-on-disk test device it is possible to define the friction coefficient between two materials and the wear rate of any given material.

As a result, manufacturing drawings were created for both test devices. The pin-on-disk test device was manufactured and assembled based on these drawings. In addition, preliminary measurements with pieces of copper and nylon were carried out. The purpose of these measurements were to understand how the test device behaves during the measuring process. As the test pin was sliding against the steel surface, the friction coefficient and wear rate were determined for both test materials. These tests confirmed that the test device is suitable to demonstrate tribological phenomena and it met all the key requirements. Additionally, relatively easily executable remedies have been presented to the small deficiencies detected.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Materiaaliopin laitokselle. Työn tarkoituksena oli suunnitella kaksi tribologista koelaitetta oppilaslaboratorioon, joista toinen valmistettiin ja otettiin käyttöön.

Työn ohjaajina toimivat professori Arto Lehtovaara sekä jatko-opintojaan suorittava diplomi-insinööri Janne Juoksukangas. Haluan kiittää heitä molempia työn ohjauksesta ja ideoiden antamisesta työn aikana.

Kiitos kuuluu myös ystäväilleni ja perheelleni kannustuksesta sekä työnantajalleni joustamisesta diplomityön tekemisen suhteen.

Tampereella, 22.2.2016

Aki Baumgartner

# SISÄLLYS

Lyhenteet ja merkinnät.....	vi
1 JOHDANTO .....	1
2 KITKA, KULUMINEN JA VOITELU.....	3
2.1 Kitka .....	3
2.2 Kulumismekanismit.....	3
2.2.1 Adhesiivinen kuluminen .....	4
2.2.2 Abrasiivinen kuluminen .....	7
2.2.3 Tribokemiallinen kuluminen .....	9
2.2.4 Väsyminen.....	9
2.3 Voiteluteoria.....	9
2.3.1 Viskositeetti.....	10
2.3.2 Hydrodynaaminen voitelu .....	11
2.3.3 Elastohydrodynaaminen voitelu .....	12
2.3.4 Hydrostaattinen voitelu .....	13
2.3.5 Seka- ja rajavoitelu .....	13
3 KOELAITTEET .....	14
3.1 Hydrodynaamisen liukulaakerikoelaitteen yleiset toimintaperiaatteet.....	14
3.2 Tappi–kiekko koelaitteen toimintaperiaate.....	16
3.3 Mittausjärjestelmä .....	17
3.3.1 Venymäliuska-anturi.....	17
3.3.2 Paineanturi.....	19
3.3.3 LVDT-anturi.....	20
4 SUUNNITTELUN METODIIKKA.....	21
4.1 Systemaattinen suunnitteluprosessi .....	22
4.1.1 Esiselvitys.....	23
4.1.2 Luonnostelu .....	26
4.1.3 Kehittely .....	29
4.1.4 Viimeistely .....	32
5 LIUKULAAKERIKOELAITTEEN SUUNNITTELU.....	33
5.1 Konstruktion suunnittelu .....	34
5.1.1 Moottori ja akseli .....	37
5.1.2 Runko .....	38
5.1.3 Laakerikenkävarsi ja liukupaino.....	39
5.1.4 Öljysäiliö .....	40
5.1.5 Mittausjärjestelmä ja anturivalinnat.....	41
5.2 Lopullinen kokoonpano .....	42
6 TAPPI–KIEKKO-KOELAITTEEN SUUNNITTELU .....	44
6.1 Konstruktion suunnittelu .....	45
6.1.1 Moottori ja akseli .....	48
6.1.2 Runko .....	49

6.1.3	Kuormavarsisysteemi.....	50
6.1.4	Kiekko .....	55
6.1.5	Mittausjärjestelmä ja anturivalinnat.....	56
6.2	Käyttöönotto ja mittaukset.....	57
6.2.1	Kitkakertoimen mittaaminen .....	57
6.2.2	Kulumisen mittaaminen .....	63
6.2.3	Virhelähteet .....	65
7	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	66
	Lähteet.....	68
	LIITE 1: Koelaitteissa käytettävän moottorin tiedot .....	71
	LIITE 2: Venymäliuska-anturin tiedot.....	72
	LIITE 3: Venymäliuskavahvistimen tiedot .....	73
	LIITE 4: Paineanturin tiedot.....	74
	LIITE 5: Hydrodynaamisen liukulaakerikoelaitteen kokoonpanopiirustus .....	75
	LIITE 6: Tappi-kiekko-koelaitteen kokoonpanopiirustus .....	76
	LIITE 7: Tappi-kiekko-koelaitteen puristusjousen mitoitus ja valinta .....	77

**LYHENTEET JA MERKINNÄT**

$\varepsilon$	Suhteellinen venymä
$F$	Voima
$F_{\mu}$	Kitkavoima
$F_N$	Normaalivoima
$F_{N'}$	Kuormankantokyky
$H$	Kovuus
$H_a$	Abrasoivan materiaalin kovuus
$H_m$	Täysin muokkauslujittuneen metallin kovuus
$h$	Voitelukalvon paksuus
$h_0$	Voitelukalvon minimipaksuus
$k$	Liuskavakio
$K$	Kulumiskerroin
$K_v$	Kulumisnopeus
$l$	Liukumatka
$L$	Pituus
$\Delta L$	Pituuden muutos
$N$	Normaalivoima
$m$	Massa
$\Delta m$	Massan muutos
$\rho$	Tiheys
$p$	Paine
$R$	Resistanssi
$r, R$	Säde
$s$	Matka
$\tau$	Leikkausjännitys
$\mu$	Dynaaminen viskositeetti
$\nu$	Kinemaattinen viskositeetti
$U, V$	Liukunopeus
$v, V$	Tilavuus

# 1 JOHDANTO

Visuaalisesti ja havainnoimalla oppiminen on usein mielekkäämpää kuin kuunnella monotonista luentoa. Tribologisia ilmiöitä pystytään havainnollistamaan käyttämällä verrattain yksinkertaisia koelaitteita ja menetelmiä. Opetustarkoitukseen käytettyjen koelaitteiden tarkoitus ei ole päästä absoluuttiseen mittaustarkkuuteen vaan havainnollistaa, millaisista ilmiöistä on kyse. Tampereen teknillisen yliopiston tribologian kurssilla on jo vuosia hyödynnetty oppilaslaboratoriossa tehtäviä harjoitustöitä oppimisen tukena. Oppilaslaboratoriossa käytettävät koelaitteet ovat tärkeä osa kurssin suorituksessa.

Tämän työn tavoitteena on suunnitella hydrodynaaminen liukulaakerikoelaite sekä tappi-kiekkokoelaite oppilaslaboratoriokäyttöön. Koelaitteiden tarkoituksena on demonstroida tribologisten ilmiöiden muodostumista sekä tehdä yksinkertaisia ja havainnollistavia mittaustauksia näistä ilmiöistä. Molemmista koelaitteista on toistaiseksi käytössä olevat laitteet laboratoriossa, joskin ne lähestyvät jo elinkaarensa loppua. Lisäksi laitteissa on havaittu sekä käytännön että mittausteknisiä ongelmia. Tässä työssä toinen suunniteltavista koelaitteista, tappi-kiekkokoelaite, valmistetaan ja otetaan käyttöön Tampereen teknillisen yliopiston Materiaaliopin laitoksen laboratorioon.

Uusien koelaitteiden suunnittelussa pyritään huomioimaan vanhojen laitteen ongelma-kohtia ja suunnittelemaan uudet laitteet niin, että vastaavilta ongelmilta vältytään. Koelaitteiden suunnittelussa on keskitytty ensisijaisesti mekaanisen rakenteen suunnitteluun. Laitteisiin tarvittavien antureiden sekä mittaushjelmistojen valinta ja hankinta suoritettiin yhteistyössä diplomityönohjaajien kanssa. Suunnittelijalle jäi tehtäväksi määrittellä tilavaraukset sekä kiinnitykset mittausinstrumenteille.

Työn teoriaosuudessa esitellään koelaitteissa ilmeneviä tribologisia ilmiöitä, niiden muodostumista ja vaikutusta materiaaleihin. Lisäksi teoriaosuudessa käsitellään voitelua yleensä, erilaisia voitelumenetelmiä sekä millainen vaikutus voitelulla on tribologisten ilmiöiden hallinnassa. Luvussa esitellään myös työssä suunniteltavien koelaitteiden yleiset toimintaperiaatteet sekä kerrotaan laitteista yleisellä tasolla. Ennen koelaitteiden suunnittelua käsittelevää lukua esitellään suunnittelumetodiikan teoriaa ja kerrotaan, miten suunnitteluprosessi viedään läpi hyödyntämällä Pahl & Beitzin systemaattista suunnitteluprosessia ja Ulrich & Eppingerin tuotekehitysmetodiikkaa.

Teoreettisen taustan esittelyn jälkeen työssä selostetaan koelaitteiden suunnittelu. Molempien koelaitteiden suunnittelu on jaettu omiin lukuihinsa, joissa ne ovat edelleen jaettu



tärkeimpien osatoimintojensa mukaisiin kappaleisiin. Suunnittelu on toteutettu hyödyntämällä molempia teoriaosuudessa esiteltyjä suunnittelumetodeja. Molemmista koelaitteista laadittiin 3D-malli SolidWorks® mekaniikkasuunnitteluohjelmalla. Ohjelmalla laadittiin myös koelaitteiden osista valmistuspiirustukset. Tappi–kiekko-koelaitteen suunnitteludokumenttien valmistumisen jälkeen koelaitteen osat hankittiin, ja koelaitteet koottiin sekä käyttöön otettiin.

## 2 KITKA, KULUMINEN JA VOITELU

Voitelulla on merkittävä vaikutus komponenttien kosketuspintojen kitkaan ja kulumiseen. Voiteluaine voi olla nestemäistä, kiinteää tai kaasua. Tavanomaisimmin käytetyt voiteluaineet ovat nestemäisiä mineraaliöljyjä. Nestemäinen voiteluaine voi olla myös voitelurasvaa. Voitelurasva on öljyä, johon on sekoitettu saippuonia paksunnan ja tarttuvamman rakenteen saamiseksi. Kiinteitä voiteluaineita käytetään silloin, kun nestemäisen voitelun käyttö ei ole mahdollista. Lämpötilavaihteluista huolimatta, kiinteiden voiteluaineiden voiteluominaisuudet pysyvät huomattavasti paremmin homogeenisinä verrattuna nestemäisiin voiteluaineisiin. Nestemäisten ja kiinteiden voiteluaineiden etuja ovat hyvä leikkaantumisen sekä korkea puristuskestävyys. Hyvät leikkaantumisominaisuudet aineessa vähentävät merkittävästi kontaktipinnoissa ilmenevää kitkaa. Kaasujen käyttö voiteluaineena on huomattavasti vähäisempää. Kaasuja käytetään voiteluaineena tilanteissa, joissa vaaditaan erityisen matalaa kitkaa, kuten ilmalaakereissa. (Norton 2006)

### 2.1 Kitka

Pinnan tangentin suuntaista liikettä vastustavaa voimaa kutsutaan kitkavoimaksi. Kitkavoima on yhtäsuuri kuin liikkeen aikaansaamiseksi tarvittava voima, mutta vastakkaisuuntainen. Yleisesti kitka jaetaan lepo- ja liikekitkaan. Lepokitkavoima on staattisessa tilassa olevan kappaleen liikkeen aikaansaamiseksi tarvittava voima. Liikkeen ylläpitämiseksi tarvittava liikekitkavoima on pienempi tai yhtäsuuri kuin lepokitkavoima. Kitkakertoimella tarkoitetaan kitkavoiman  $F_{\mu}$  ja pinnan normaalivoiman  $N$  suhdetta:

$$\mu = F_{\mu}/N \quad (2.1)$$

Kitka ei ole materiaalin ominaisuus vaan se riippuu olosuhteista. Kitkaa hyödynnetään teollisuudessa eritavoin. Esimerkiksi autojen liike olisi mahdotonta toteuttaa ilman renkaan ja tien välistä kitkaa. Toinen arkipäiväinen esimerkki on kulkuneuvojen kytkimet ja jarrut, joissa kitka pyritään maksimoimaan. Usein koneensuunnittelussa kitka pyritään kuitenkin minimoimaan energiahäviöiden sekä kulumisen välttämiseksi. Kitkakertoimeen voidaan vaikuttaa materiaaliparin valinnalla, pinnoitteilla tai käyttämällä voiteluaineita. (Kivioja *et al.* 2007 s. 63)

### 2.2 Kulumismekanismit

Taloudellisuus sekä energiatehokkuus ovat nykypäivänä suuressa roolissa myös koneensuunnittelun näkökulmasta. Energiahäviöiden minimoimiseksi laitteita pidetään usein

valmiustilassa, kun niitä ei käytetä, jolloin laitteen elinkaaren aikana käynnistyskertoja tulee useita. Käynnistysvaiheessa, ennen kuin kulumista estävät tribologiset mekanismit tulevat tilanteessa vallitseviksi, kulumista tapahtuu pääsääntöisesti eniten (Momozono *et al.* 2010 s. 1). Kulumismekanismien tuntemus on näin ollen avainasemassa teollisuuden kehittämisessä ja kestävästä kehityksestä tavoiteltaessa.

Kappaleen pinnan kulumisen voi tapahtua neljällä mekanismilla: adhesiivisesti, abrasivisesti, tribokemiallisesti tai väsymällä. Kulumisen tapahtuu tavallisesti useamman kulumismekanismien yhteisvaikutuksesta. Kosketuspintojen pinnankarheuden huippujen väliset kontaktit mahdollistavat materiaalien rakenteelliset muutokset. (Kivioja *et al.* 2007 s. 104)

### **2.2.1 Adhesiivinen kulumisen**

Adhesiivinen kulumisen eli tartuntakulumisen on adhesiivisten liitosten repeytymisen jälkivaikutusten aiheuttamaa kulumista. Kahden pinnan liukuessa toisiaan vasten pinnankarheuksien huippujen kontaktipintoihin syntyy adhesiivisiä liitoksia, jotka kitkavoiman kasvaessa leikkautuu. Kun leikkaantuminen tapahtuu kontaktipintojen alkuperäisestä rajapinnasta, kulumispartikkeleita ei synny. Adhesiivisten liitosten repeytyessä muualta kuin rajapinnasta materiaalia siirtyy pinnalta toiselle ja aiheuttaa vaurioita rajapinnassa. Liitosten repeytyessä pintojen väliin voi muodostua irtonaisia partikkeleita, jotka liikkuaan vaurioittavat molempia pintoja. (Kivioja *et al.* 2007 s. 104; Norton 2006 s. 422)

Adhesiivisen kulumisen äärimäinen muoto on kylmähitsautuminen, josta koneenrakennuksessa usein käytetään termiä kiinnileikkaantuminen. Kiinnileikkaantumisen kaksipintaa tahmautuvat toisiinsa pinnankarheuden ulokkeiden plastisoitumisen seurauksena. Kiinnileikkaantuminen tapahtuu, kun samaan kohtaan syntyy tarpeeksi paljon kitkalämpöä synnyttäviä adhesiivisiä liitoksia. Lämmön nousu laskee materiaalien kovuutta, jonka seurauksena suhteellinen liike pysähtyy ja pinnat tahmautuvat toisiinsa. (Kivioja *et al.* 2007 s. 106; Norton 2006 s. 424)

Adhesiivisen kulumisen syntymään voidaan vaikuttaa oikealla voitelulla sekä materiaalivalinnoilla. Rabinowicz *et al.* (1980) esittävät metallimateriaaleille metallurgisen yhteensopivuustaulukon (taulukko 2.1), jonka avulla materiaaliparit voidaan valita adhesiivisen kulumisen minimoimiseksi.

**Taulukko 2.1.** Metallimateriaaliparien yhteensopivuustaulukko. (Perustuu lähteeseen Rabinowicz *et al.* 1980 s. 491)

	W	Mo	Cr	Co	Ni	Fe	Nb	Pt	Zr	Ti	Cu	Au	Ag	Al	Zn	Mg	Cd	Sn	Pb	In	
In				Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus		Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Osittainen yhteensopivuus	Osittainen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopivuus	Osittainen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Identtinen metalli
Pb	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Identtinen metalli	
Sn	Osittainen yhteensopimattomuus		Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Identtinen metalli		
Cd	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Identtinen metalli			
Mg	Metallurginen yhteensopivuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Identtinen metalli				
Zn	Metallurginen yhteensopivuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Identtinen metalli					
Al	Metallurginen yhteensopivuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Identtinen metalli						
Ag	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Identtinen metalli							
Au	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Identtinen metalli								
Cu	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Identtinen metalli									
Ti	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Identtinen metalli											
Zr	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Osittainen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Identtinen metalli												
Pt	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Identtinen metalli													
Nb	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Identtinen metalli														
Fe	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Identtinen metalli															
Ni	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Metallurginen yhteensopimattomuus	Identtinen metalli																
Co	Metallurginen yhteensopivuus	Metallurginen yhteensopivuus	Identtinen metalli																		
Cr	Metallurginen yhteensopivuus	Identtinen metalli																			
Mo	Metallurginen yhteensopivuus	Identtinen metalli																			
W	Identtinen metalli																				

Taulukossa yleisimmät metallimateriaaliparit ovat jaettu viiteen eri kategoriaan: metallurginen yhteensopimattomuus, osittainen yhteensopimattomuus, osittainen yhteensopivuus, metallurginen yhteensopivuus sekä identtinen materiaali. Tässä asiayhteydessä yhteensopivuus ei tarkoita materiaalien toiminnallista sopivuutta koneenrakennuksessa. Metallurginen yhteensopivuus tarkoittaa materiaalien korkeaa keskinäistä liukoisuutta, jonka seurauksena adheesion mahdollisuus on suuri (Norton 2006 s. 423). Pääsääntöisesti metallurgisesti yhteensopimattomissa materiaalipareissa esiintyy kaikkein vähiten adheesivista kulumista, tehden niistä ihanteellisimman valinnan toisiaan vasten liukuvien kappaleiden materiaaleiksi. (Rabinowicz *et al.* 1980)

Kulunut tilavuus on kääntäen verrannollinen materiaalin kovuuteen, suoraan verrannollinen liukumismatkaan sekä kuormaan. Materiaalista kulunut tilavuus lasketaan kaavan (2.2) mukaan, joka tunnetaan Archardin kulumisyhtälönä. (Norton 2006 s. 425)

$$V = K \frac{F l}{H} \quad (2.2)$$

Kaavassa  $V$  on pehmeämmästä materiaalista kulunut tilavuus,  $K$  on yksikötön materiaalin kulumiskerroin, jota on kuvattu taulukossa 2.2 suhteutettuna eri voiteluasteisiin. Kaavassa normaalivoima on merkitty tunnuksella  $F$ ,  $l$  on liukupituus ja  $H$  on pehmeämmän materiaalin kovuus. Kuluneen materiaalin määrä voidaan ilmoittaa myös massan muutoksena. Tällöin kulumiskertoimelle saadaan yhtälö

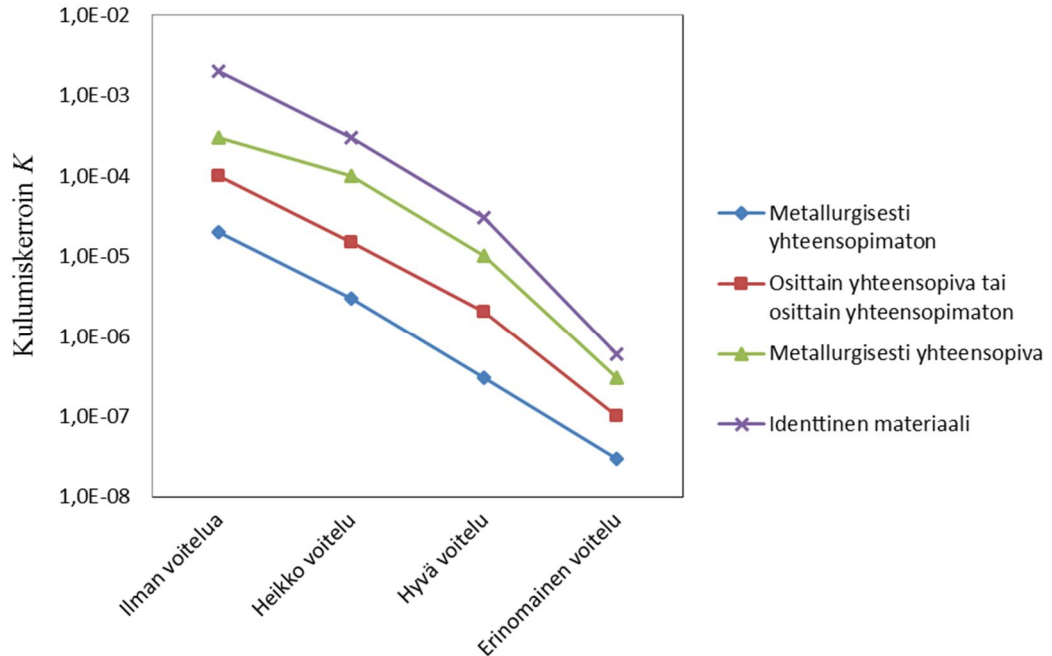
$$K = \frac{\Delta m H}{\rho F l}, \quad (2.3)$$

jossa  $\Delta m$  on pois kulunut massa ja  $\rho$  on materiaalin tiheys. Kaavoissa esiintyvä kovuus  $H$  voidaan ilmoittaa käyttämällä Rockwellin, Brinellin, Vickersin tai muuta absoluuttisen kovuuden mitta. Materiaalin kulumisnopeudelle voidaan johtaa kaavasta 2.3 yhtälö, joka kuvaa kulumisnopeutta liukupituuden funktiona:

$$K_v = \frac{KF\rho}{H}. \quad (2.4)$$

Kulumisnopeus liukupituuden funktiona ilmoitetaan yksikössä  $g/m$ .

**Taulukko 2.2.** Kulumiskerroin  $K$  voiteluasteen funktiona. (Perustuu lähteeseen Rabinowicz et al. 1980 s. 495)

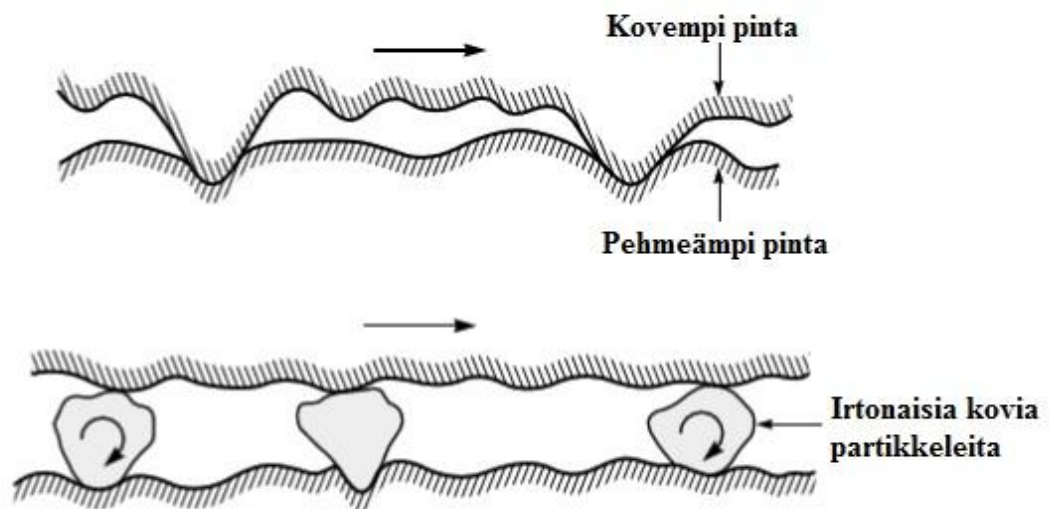


Taulukko 2.2 esittää kulumiskertoimen  $K$  arvoja erilaisen voitelutilanteen funktiona. Lisäksi taulukosta voidaan lukea metallurgisen yhteensopivuuden vaikutus kulumiskertoimen arvoon. Metallurgisesti yhteensopimattomat materiaalit erinomaisessa voitelutilanteessa tarjoavat kaikkein pienimmän kulumiskertoimen arvon. Suurin kulumiskerroin

saadaan päinvastaisessa tilanteessa, eli kun käytetään identtisiä materiaaleja ilman voitelua.

## 2.2.2 Abrasiivinen kuluminen

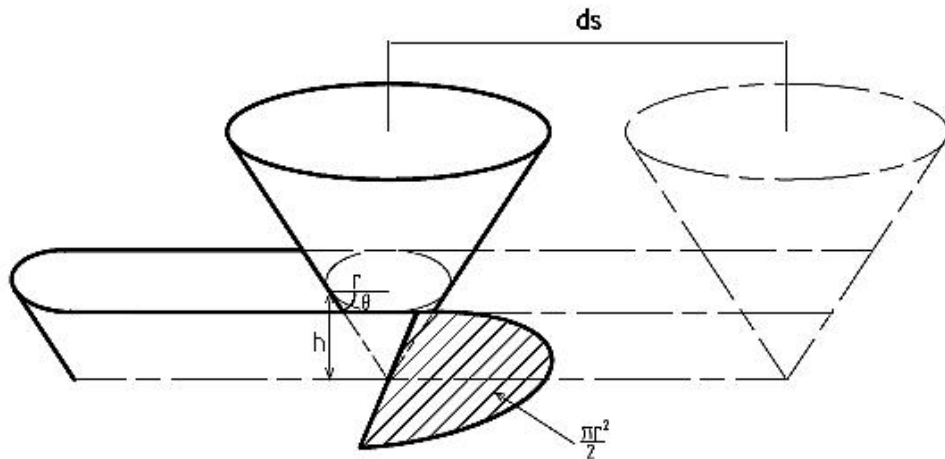
Kulumistilanne, jossa kovempi pinta uurtaa materiaalia irti pehmeämmästä pinnasta pintojen liukuessa toisiaan vasten, kutsutaan abrasiiviseksi kulumiseksi. Kirjallisuudessa (Kivioja *et al.* 2007 s. 109; Bhushan *et al.* 2013 s. 462) esitellään kolme erilaista mekanismia, joilla abrasiivinen kuluminen voi tapahtua: kyntämällä, leikkaantumalla tai hauraasti murtumalla. Abrasiivinen kuluminen alkaa yleensä kahden kappaleen abrasiivisena kulumisena, josta se jatkuu kolmen kappaleen abrasiiviseksi kulumiseksi. Kuva 2.1 esittää abrasiivisen kulumisen syntymekanismia kahden kappaleen sekä kolmen kappaleen tilanteissa.



**Kuva 2.1.** Kuvassa ylhäällä kahden kappaleen abrasiivisen kulumisen syntymekanismi. Kuvassa alhaalla syntymekanismi kolmella kappaleella. (Perustuu lähteeseen Bhushan *et al.* 2013 s. 461)

Kun kovempi pinta uurtaa materiaalia irti pehmeämmän materiaalin pinnasta, kontaktipintojen väliin alkaa muodostua irtonaisia partikkeleita. Pintojen väliin jääneet irronneet partikkelit kovettuvat muokkauslujittumisen seurauksena ja lisäävät abrasiivisen kulumisen muodostumista. Irronneet partikkelit uurtavat materiaalia irti molemmista pinnoista. Kolmen kappaleen abrasiivista kulumista voi tapahtua myös molempia materiaaleja kovemman, systeemin ulkopuolisen, partikkelin päästyä rajapintaan. (Bhushan *et al.* 2013 s. 460; Kivioja *et al.* 2007 s. 108; Norton 2006 s. 426)

Abrasiivisen kulumisen suuruutta voidaan laskea kulumaauran tilavuuden avulla. Kuvan 2.2 tilanteessa kartiomainen uloke uurtaa pehmeämmän materiaalin pintaa.



**Kuva 2.2.** Kova kartiomainen uloke uurtaa pehmeämpää pintaa. (Perustuu lähteeseen Kivoja et al. 2007 s. 108)

Kuvan tunnuksia käyttämällä abrasiivisesti kulunut tilavuus  $dv$  matkalla  $ds$ , kun kartiomaisen uloke uurtaa materiaali irti vastinpinnasta, lasketaan kaavalla

$$dv = r^2 \tan \theta ds, \quad (2.5)$$

jossa  $r$  on uurretun osuuden säde. Yhtälössä tilavuus  $v$  on uran tilavuus eikä varsinainen uurretun materiaalin tilavuus. Uurrettavan materiaalin pinnan kovuus  $H$  saadaan yhtälöstä

$$H = \frac{F_N}{\pi r^2 / 2} \quad (2.6)$$

Kaavassa normaalivoima on merkitty tunnuksella  $F_N$ . Yhdistämällä kaavat (2.5) ja (2.6) saadaan kuluneen tilavuuden yhtälöksi

$$\frac{dv}{ds} = \frac{2}{\pi} \tan \theta \frac{F_N}{H} \quad (2.7)$$

Kulunut tilavuus on suoraan verrannollinen pinnan geometriaan, normaalivoimaan sekä kääntäen verrannollinen uurrettavan materiaalin kovuuteen. Materiaaliparien kulumiskestävyys riippuu abrasiivan pinnan kovuuden  $H_m$  ja täysin muokkauslujittuneen metallin  $H_a$  suhteesta kaavan 2.8 mukaan

$$H_m / H_a. \quad (2.8)$$

Kun suhdeluku  $H_m / H_a < 0,8$  kyseessä on voimakas abraasiokuluminen ja kulumisnopeus on suuri. Metallimateriaaleilla suhdeluvun ylittäessä arvon 0,8 siirrytään lievän abraasiokulumisen alueelle. (Kivoja et al. 2007 s. 108-109)

### 2.2.3 Tribokemiallinen kuluminen

Kivioja *et al.* (2007) mukaan yleisin tribokemiallisen kulumisen muoto on hapettuminen, joka saa alkunsa metallin reagoiessa hapen tai veden kanssa muodostaen oksideja. Tribokemiallista kulumista esiintyy kaikilla metallimateriaaleilla lukuun ottamatta jaloja metalleja. Kulumista havaitaan, kun kappaleiden välillä tapahtuu liukumista tai vierimistä olosuhteissa, jossa materiaalit ovat samanaikaisesti kosketuksissa ilman kanssa. Tämä yhdistelmä rikkoo oksideja tai likapartikkeleita liukupintojen väliin ja tehostaa kulumista. Partikkeleiden ollessa kovia ja hauraita ne voivat lisätä kulumista rajapinnassa myös muilla edellä mainituista kulumismekanismeista.

### 2.2.4 Väsyminen

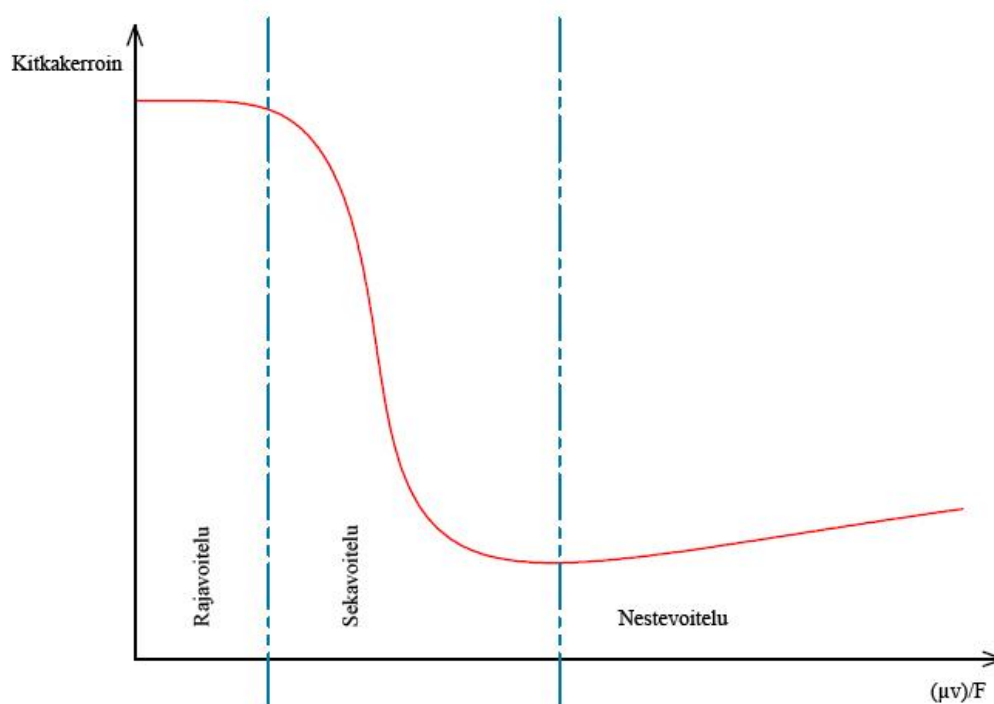
Edellä selostetut kulumismekanismit aktualisoituvat pääsääntöisesti tilanteissa, joissa pinnat liukuvat toisiaan vasten. Norton (2006) esittää, että pyörivässä tai vierivässä liikkeessä olevien kappaleiden kuluminen havaitaan yleensä väsymisenä. Tällaisia kohteita ovat muun muassa kuula- ja rullalaakerit. Vierivä liike väsyttää pintoja toistuvien syklien aikana aiheuttaen lopulta väsymisvaurioita. Materiaalin pinnassa alkaa muodostua piste-mäistä kulumista (*engl. pitting*). Pieniä partikkeleita murtuu tai irtoaa rajapintaan, minkä seurauksena materiaali väsyä ja kuluu. Käytännön tilanteissa puhdasta vierintää ei kuitenkaan tapahdu, vaan systeemissä tapahtuu aina hieman liukumista. Laakereissa tapahtuva liukuminen on Nortonin (2006) mukaan noin 1 % kokonaisliikkeestä. Teoreettisen mallin mukaan pyöreän tai sylinterin muotoisen kappaleen vieressä tasoa vasten sen kontaktipinta on pistemäinen ja sylinterin tapauksessa viiva. Todellisuudessa materiaali myötää tarjoten tarpeellisen tuen siihen kohdistuvalle voimalle. Myötämisen seurauksena pallomaisen kappaleen kontaktipinta muodostuu pyöreäksi ja sylinterin kontaktipinta suunnikkaan/ellipsin muotoiseksi.

## 2.3 Voiteluteoria

Voitelumenetelmät jaetaan kirjallisuudessa (Kivioja *et al.* 2007; Norton 2006) yleensä nestevoiteluun, sekavoiteluun ja rajavoiteluun. Nestevoitelumenetelmiä on kolme: hydrodynaaminen voitelu, elastohydrodynaaminen voitelu sekä hydrostaattinen voitelu. Nestevoitelussa voiteluaine erottaa rajapinnat täysin toisistaan eliminoiden pintojen kosketuksen. Rajavoitelussa kontaktipinnat ovat hyvin lähellä toisiaan, jolloin suuri osa kuormasta tulee pinnankarheuden huippujen kannettavaksi. Kontaktipintoihin on muodostunut hyvin ohut ja helposti leikkautuva voiteluainekerros esimerkiksi voiteluaineiden EP-lisäaineiden reagoiessa metallipinnan kanssa. Ohut voiteluainekerros estää pintoja koskettamasta toisiinsa. Sekavoitelu on nestevoitelun ja rajavoitelun yhdistelmä, jossa havaitaan molempien menetelmien piirteitä.



Stribeckin käyrä (kuva 2.3) havainnollistaa kitkakertoimen muutosta eri voitelun osa-alueilla. Voitelualueelta toiselle siirrytään viskositeetin  $\mu$  tai suhteellisen nopeuden  $v$  kasvaessa tai vaihtoehtoisesti kuormituksen  $F$  pienentyessä.



**Kuva 2.3.** Stribeckin käyrä. Kuvassa  $\mu$  on viskositeetti,  $v$  on nopeus ja  $F$  on kuormitus. (Perustuu lähteeseen Norton 2006 s. 583)

Käyrästä huomataan kitkakertoimen jyrkkä lasku siirryttäessä rajavoitelusta sekavoitelu-alueelle. Sekavoitelualueella pintoja erottavan voiteluainekalvon muodostuminen alkaa ja kalvon erottaessa pinnat täydellisesti toisistaan ollaan nestevoitelualueella (Norton 2006 s. 582). Siirtymävaiheet ovat merkittynä kuvaan sinisin katkoviivoin. Käyrästä havaitaan kitkakertoimen hienoista kasvua nestevoitelualueella. Kitkakertoimen kasvu on seurausta suhteellisen nopeuden kasvun aiheuttaman voiteluaineen sisäisen kitkan noususta (Norton 2006).

### 2.3.1 Viskositeetti

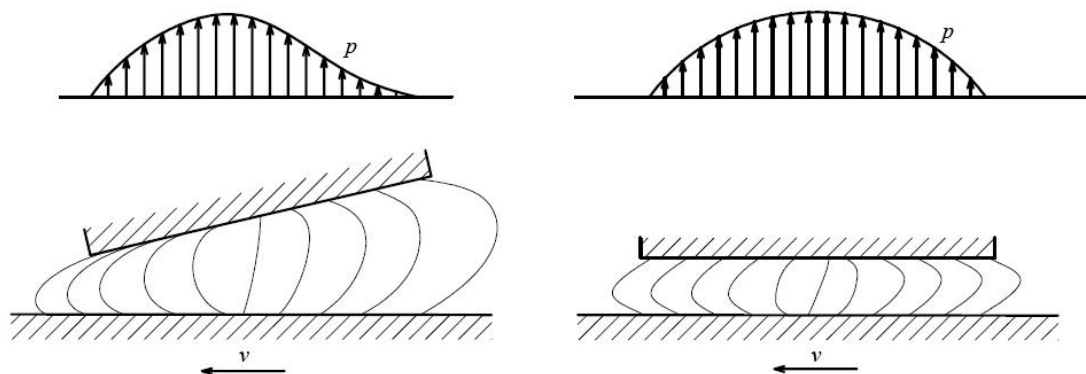
Viskositeetti on nesteiden ja kaasujen sisäistä kitkaa, joka aiheutuu molekyylien välisistä koheesivoimista (Young 2004 s. 473). Viskositeetti kuvaa fluidien kykyä vastustaa virtausta. Viskositeetti jaetaan dynaamiseen viskositeettiin, tunnus  $\mu$  ja kinemaattiseen viskositeettiin, tunnus  $\nu$ . Dynaaminen viskositeetti määritellään yhtälön 2.9 mukaisesti

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy}, \quad (2.9)$$

jossa  $\tau$  on leikkausjännitys ja  $du/dy$  on leikkausnopeus. Dynaaminen viskositeetti on tiheyden ja kinemaattisen viskositeetin tulo:  $\mu = \nu\rho$ . SI-järjestelmän mukainen yksikkö dynaamiselle viskositeetille on  $Pa\cdot s$  ja kinemaattiselle viskositeetille  $m^2/s$ . Voiteluaineiden viskositeetit ovat tavallisesti voimakkaasti riippuvaisia vallitsevasta lämpötilasta sekä paineesta. (Young 2004 s. 473; Norton 2006 s. 581; Kivioja *et al.* 2007 s. 172)

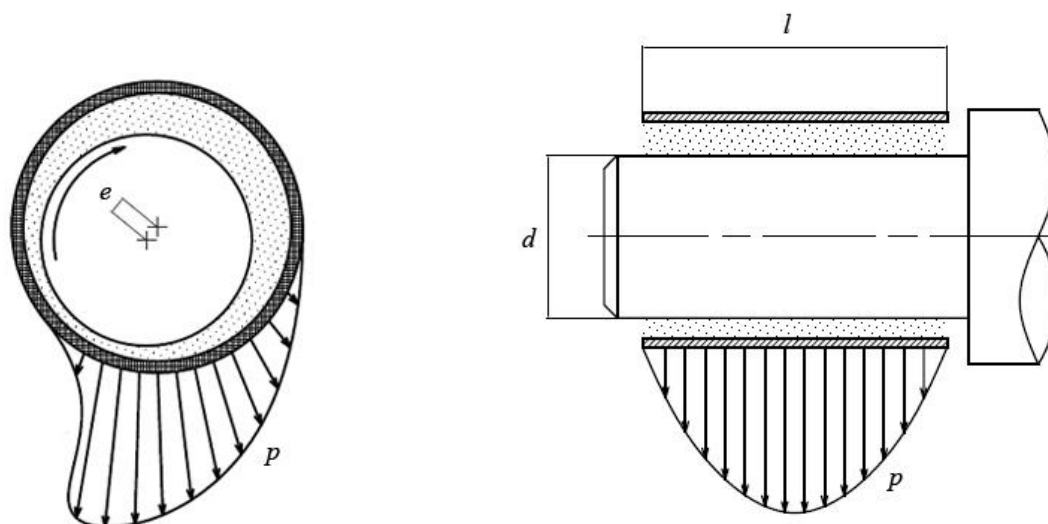
### 2.3.2 Hydrodynaaminen voitelu

Hydrodynaamisessa voitelutilanteessa rajapinnassa oleva voiteluaine muodostaa hydrodynaamisen paineen erottaen liukupinnat toisistaan. Hydrodynaaminen paine muodostuu nesteen joutuessa kapenevaan rakoon (kuva 2.4), jonka rajapinnat liikkuvat toisiinsa nähden tangentiaalisesti. Paine muodostuu myös, kun pinnat lähestyvät toisiaan ja neste puertuu ulos pintojen välisestä kapeasta raosta. (Kivioja *et al.* 2007 s. 131)



**Kuva 2.4.** Hydrodynaamisen painejakauman muodostuminen pintojen väliin. (Perustuu lähteeseen Kivioja *et al.* 2007 s. 131)

Hydrodynaaminen voitelu on paljon käytetty voitelumenetelmä liukulaakereissa. Liukulaakerissa pyörivässä liikkeessä oleva epäkeskinen akseli pumppaa nestettä kiilamaiseen, kapenevaan rakoon, jolloin nesteeseen muodostuu kuormaa kantava paine (Kivioja *et al.* 2007 s. 131) Hydrodynaamisen voitelukalvon muodostuminen säteisliukulaakeriin on havainnollistettu kuvassa 2.5.

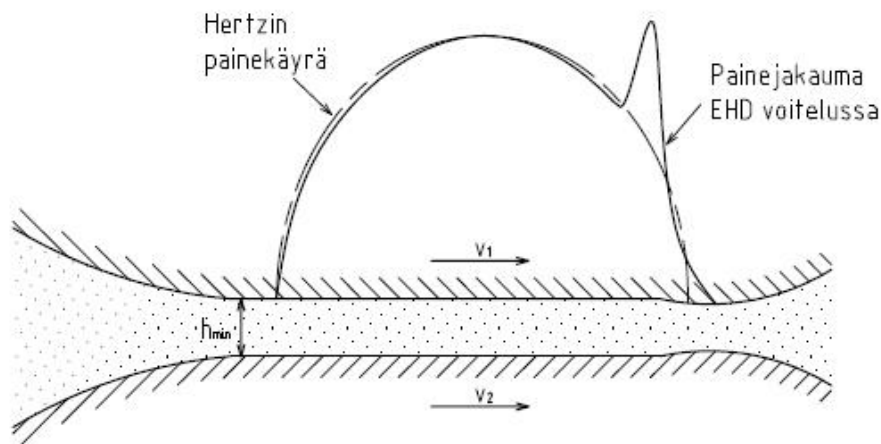


**Kuva 2.5.** Painejakauma säteisliukulaakerissa esitettyinä etu- ja sivuprofiilista. (Perustuu lähteisiin Kivioja et al. 2007 s. 131; Norton 2006 s. 593)

Pinnat koskettavat toisiaan ainoastaan suhteellisen liikkeen ollessa alle tietyn rajanopeuden (engl. *aquaplane speed*) (Norton 2006 s. 585). Toisin sanoen, hydrodynaamisessa voitelutilanteessa kulumista voidaan todeta ainoastaan suhteellisen liikkeen alkaessa ja loppuessa. Sopivan voiteluaineen ja riittävän nopeuden läsnä ollessa kulumiselta voidaan välttyä lähes kokonaan.

### 2.3.3 Elastohydrodynaaminen voitelu

Norton (2006) ja Kivioja et al. (2007) esittävät teoksissaan, että pintojen ollessa suuren kuormituksen vaikutuksen alaisena kappaleita voidaan pitää jäykkinä. Paineen kasvu kosketuskohdassa nostaa voiteluaineen viskositeettiä sekä aiheuttaa kosketuskohtaan elastisen muodonmuutoksen, ja täten pinta-alan lisäyksen, mahdollistaen hydrodynaamisen voitelukalvon muodostumisen pintojen väliin. Tällaista voitelutilannetta kutsutaan elastohydrodynaamiseksi voiteluksi. Voitelutilanteen painejakauman muodostuminen on havainnollistettu kuvan 2.6 avulla.



**Kuva 2.6.** Painejakauma ja voitelukalvon muoto elastohydrodynaamisessa voitelussa. (Perustuu lähteeseen Kivioja et al. 2007 s. 147)

Pintojen suhteellinen nopeus tulee olla riittävän suuri, jotta voitelukalvo voi erottaa liukupinnat toisistaan. Lisäksi voiteluaineen korkea viskositeetti sekä kosketuskohdan suuri kaarevuus edesauttavat elastohydrodynaamisen voitelukalvon muodostumista. (Norton 2006 s. 585)

### 2.3.4 Hydrostaattinen voitelu

Voiteluaine voidaan tuoda liukupintojen väliseen voiteluainetaskuun ulkoisesta lähteestä pumppaamalla, jolloin kyseessä on hydrostaattinen voitelu. Pinnat erotetaan toisistaan pumppaamalla rajapintaan korkeapaineista voiteluöljyä. Ulkopuolisen painelähteen avulla hydrostaattinen voitelukalvo erottaa pinnat toisistaan, vaikka pintojen suhteellista liikettä ei olisi. Menetelmällä kitka sekä kulumisen saadaan erittäin pieneksi. (Kivioja et al. 2007 s. 157; Norton 2006 s. 583)

### 2.3.5 Seka- ja rajavoitelu

Nortonin (2006) mukaan rajavoitelutilanteessa havaitaan aina vähäistä metalli-metalli kosketusta. Matala liukunopeus, suuri kuorma tai epäedullinen voiteluaine voivat johtaa raja- tai sekavoitelutilanteeseen. Kappaleiden pinnankarheuden huiput koskettavat toisiinsa kantaen osan kuormasta, jolloin hyvin tarttuva voiteluaine muodostaa ohuen rajavoitelukalvon näihin kosketuskohtiin. Seka- ja rajavoitelutilanteissa havaitaan usein erilaisia kulumismekanismeja.

## 3 KOELAITTEET

### 3.1 Hydrodynaamisen liukulaakerikoelaitteen yleiset toimintaperiaatteet

Hydrodynaamisen liukulaakerikoelaitteen perusajatuksena on mitata ja demonstroida liukulaakerissa vallitsevia tribologisia tilanteita. Koelaitetestauksia tehdään usein ennen varsinaisen konekokonaisuuden valmistusta tarvittavien suunnitteluparametrien selvittämiseksi. Koelaitteen etuja ovat muun muassa testien hallittu toistaminen, säätömahdollisuudet vastaamaan erilaisia tilanteita sekä mahdollisuus analysoida eri muuttujien vaikutusta omina kokonaisuuksinaan. Koelaitte voidaan suunnitella mittaamaan haluttuja parametreja tarkemmin kuin toisia, esimerkiksi koelaitte voidaan olla suunniteltu voiteluaineiden analysointiin tai vaihtoehtoisesti laakerin konstruktion analysointiin.

Liukulaakerikoelaitteella voidaan tutkia radiaalisesti, aksiaalisesti tai molemmilla tavoilla kuormitettujen liukulaakerien ominaisuuksia. Kuvassa 3.1 esitetään radiaalisesti kuormitettu liukulaakeri sylinterin ja tason välisessä kosketuksessa. Liukulaakerikoelaitteessa laakerikengä painetaan ennalta määrättyllä voimalla voitelemattoman tai voidellun pyörivän akselin pinnalle. Laakerin kuormitus toteutetaan yleensä hydraulisilla tai pneumaattisilla sylintereillä tai punnuksilla. Akselin pyörimisliike toteutetaan tyypillisesti sähkömoottorilla, mutta polttomoottori on myös toteuttamiskelpoinen vaihtoehto. Koelaitteen laakerin voitelu voidaan toteuttaa roiskevoitelulla tai pumppaamalla voiteluainetta laakerille. Hydrodynaamisella liukulaakerikoelaitteella voidaan mitata muun muassa laakerissa vallitseva painejakauma, voitelukalvon paksuus, laakerikengän ja akselin välisen kitkavoiman suuruus sekä kitkan aiheuttamaa öljyn lämpötilan muutosta. Koelaitteen tarjoama mittausdata siirretään mitta-antureiden välittämänä tietokoneelle mittausdatan analysointiin tarkoitettulle ohjelmalle. (Kivioja *et al.* 2007 s. 344)

Osborne Reynolds johti vuonna 1886 osittaisdifferentiaaliyhtälön, joka kuvaa toisiaan vasten liukuvien pintoja erottavan ohuen voitelukalvon painejakaumaa. Yleisessä muodossa Reynoldsin yhtälö esitetään seuraavasti:

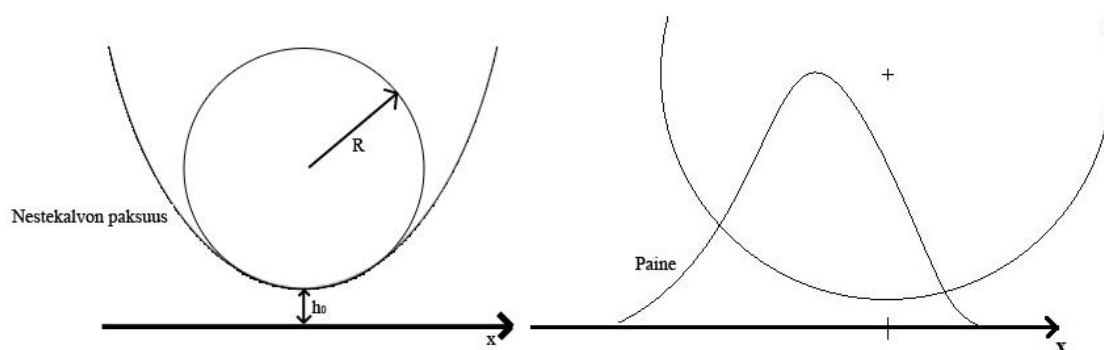
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta \left[ (U_1 - U_2) \frac{\partial h}{\partial x} + 2V_2 \right]. \quad (3.1)$$

Kaavassa  $h$  on voiteluaineen kalvonpaksuus,  $p$  on voiteluaineen paine,  $\mu$  on dynaaminen viskositeetti,  $U_1$  ja  $U_2$  ovat pintojen nopeudet ja  $V_2$  on pintojen nopeus pois päin toisistaan. Reynoldsin yhtälö sisältää tekijänsä asettamat seuraavat oletukset:

- Virtaus on laminaarista
- Voiteluaineen massahitusvoimia ei huomioida
- Voiteluaine on kokoonpuristumatonta
- Viskositeetti pysyy vakiona
- Voiteluaine on newtonilainen neste
- Voiteluaineen paine pysyy vakiona voitelukalvon paksuussuunnassa
- Nopeuden muutokset  $x$  ja  $z$  suunnassa ovat olemattomat  $y$  suuntaan verrattuna
- Voiteluaineen ja pinnan välissä ei tapahdu liukumista

(Kivioja *et al.* 2007 s. 134)

Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan radiaalisesti kuormitettua liukulaakeria, jossa toinen pinnoista on sylinteri ja toinen taso. Kuvassa 3.1 on esitetty sylinterin ja tason välisen kosketuksen nestekalvon paksuus sekä painejakauman muoto.



**Kuva 3.1.** Sylinterin ja tason välisen kosketuksen nestekalvon paksuus sekä painejakauman muoto. (Perustuu lähteeseen Kivioja *et al.* 2007 s. 138)

Laakerin kuormankantokyky  $F_{N'}$  sylinterin ja tason välisessä kosketuksessa saadaan kaavalla 3.2.

$$F_{N'} = 2,44748 \frac{\mu UR}{h_0}. \quad (3.2)$$

Yhtälössä  $h_0$  on kalvon minimipaksuus,  $R$  on säde ja  $U$  on nopeus (Kivioja *et al.* 2007 s. 138). Nestekalvon paksuus paikan  $x$  funktiona lasketaan kaavalla

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2R}. \quad (3.3)$$

Säteisliukulaakeri, kuten epäkeskinen akseli holkin sisällä, on yleisin liukulaakerikonstruktio (Hori 2006 s. 23). Horin (2006) mukaan säteisliukulaakerin etuja verrattuna vierintälaakereihin ovat hyvä vaimennus, hyvä iskunkestävyys, vähäinen melu, korkea käyttöikä sekä sen pieni halkaisija. Säteisliukulaakerin toimintaedellytys on hydrodynaamisen

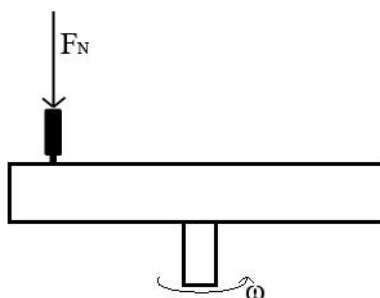
voitelukalvon muodostuminen pintojen väliin. Hydrodynaaminen voitelukalvo voi muodostua, jos laakerivälitys on riittävän pieni. Kirjallisuudessa esiintyy muutamia eri ohjearvoja kyseiselle luvulle. Norton (2006) antaa laakerivälityksille arvovälin 1/1000-3/1000 halkaisijasta, toisaalta Hori (2006) esittää, että välitys on  $< 1/500$  halkaisijasta.

### 3.2 Tappi–kiekko-koelaitteen toimintaperiaate

Tappi–kiekko-koelaitteella määritetään halutun materiaalin kulumiskerroin ja materiaali-paringin välinen kitkakerroin. Tappi–kiekko kulumistestissä kohtisuoraan tasaista kiekko vasten painettu koetappi liikuu ympyräradalla kiekon pinnassa (kuva 3.2). Koetappi on tyypillisesti sylinterimäinen tai pallomainen. Koelaitteen moottori pyörittää joko kiekkoa tai koepalaa kiekon keskikohdan ympäri. Osat voivat olla horisontaalisesti tai vertikaalisesti asetettu toisiinsa nähden. Koepala painetaan ennalta määritetyllä voimalla kiekon pintaan. Koepala on tyypillisesti kiinnitetty kuormitusvarteen, johon tuotetaan voima punnuksilla, hydraulisesti tai pneumaattisesti. Koepalan kuluminen ilmoitetaan yleensä tilavuuden muutoksen avulla. Ennen ja jälkeen mittausta koepala punnitaan vähintään 0,1 milligramman tarkkuudella. Koetapista kulunut tilavuus lasketaan kaavan 3.4 avulla.

$$V = \frac{\Delta m \times 1000}{\rho}, \quad (3.4)$$

jossa  $\Delta m$  on massan muutos alku- ja lopputilanteen välillä ja  $\rho$  on materiaalin tiheys. Vaihtoehtoisesti koetapista pois kulunut materiaali voidaan määrittää mittaamalla koetappin pituus 2,5  $\mu\text{m}$  tarkkuudella. Koetapista mitattujen dimensioiden avulla määritetään matematiikan kaavoja hyödyntäen materiaalista pois kulunut tilavuus. Ennen mittausta selvitetään koetappin etäisyys kiekon keskiakselista. Mittauksen aikana kiekkoa tai koetappia pyörittävän moottorin pyörimisnopeus mitataan. Näiden tietojen avulla lasketaan matka, jonka koetappi liikuu kiekon pinnassa. (ASTM G99-95a 2000)



**Kuva 3.2.** Periaatekuva tappi–kiekko-koelaitteen toiminnasta, jossa kohtisuorasti kiekkoon nähden oleva koetappi painetaan pyörivän kiekon pintaan.

Tappi-kiekko koelaitteen mittaustarkkuus ja koejärjestelyn toistettavuus riippuvat testattavien materiaalien homogeenisyydestä sekä mittauksen suorittajan huolellisuudesta.

Huolellisesti suoritettujen mittausten hajonta massan muutoksessa on tappi-kiekko-koelaitteella mahdollista pitää alle 20 %:ssa. Vaikka eri laboratorioissa suoritettut kulumiskoeket ovat sallitun hajonnan sisällä, mittaustulokset voivat poiketa merkittävästi toisistaan. Koepalan koon valinta, koelaitteen konstruktio sekä laboratorion yleiset järjestelyt vaikuttavat lopputulokseen. (ASTM G99-95a 2000)

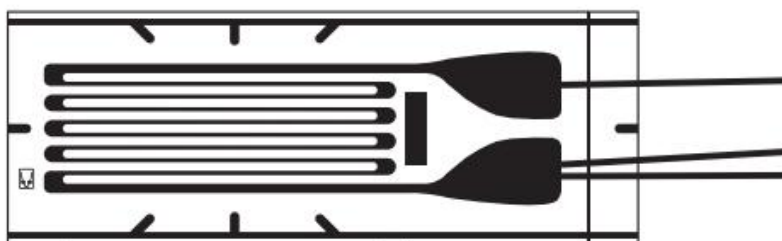
### 3.3 Mittausjärjestelmä

Koelaitteet vaativat toimiakseen mittausjärjestelmän. Mittausjärjestelmä koostuu antureista, vahvistimista, mittakortista ja anturiviestejä käsittelevästä tietokoneohjelmasta. Mitta-antureiden tehtävä on kerätä tietoa koneen tai prosessin tilasta. Antureissa on tuntoelin, johon mitattava ilmiö vaikuttaa. Tuntoelimestä saatu suure muutetaan mittausviestiksi, yleensä sähköjännitteeksi tai -virraksi. Mittausviesti kulkee mittakorttiin, joka muuntaa sen mittaustulokseksi. Mittaustulokset käsitellään ohjausjärjestelmässä, jonka avulla konetta tai prosessia säädetään.

Koelaitteissa käytettävien mitta-antureiden mitta-alueen tulee olla vähintään yhtä suuri kuin järjestelmässä esiintyvä suurin mitta-arvo. Mittaustulos sisältää käytännössä aina systemaattisia ja satunnaisia virheitä. Mittaustulosten yhteydessä ilmoitetaan yleensä mitta-epävarmuus prosentteina mittaustuloksesta. Mitta-epävarmuus kertoo kuinka kaukana mitta-arvo on mahdollisesti oikeasta arvosta. (Airila 2004)

#### 3.3.1 Venymäliuska-anturi

Venymäliuska on materiaalin venymisen mittaamiseen käytetty erittäin herkkä anturi. Venymäliuskan toiminta perustuu ohuen johdinlangan poikkipinta-alan muutoksen aiheuttaman johtimen resistanssin muutokseen. Venymäliuskan rakentuu tyypillisesti useasta mutkittelevasta johtimesta (kuva 3.3). Usean johtimen pituuden muutos aiheuttaa liuskaan kerrannaisvaikutuksen, jolloin liuska reagoi erittäin pieniin muutoksiin. (Airila 2004; Hoffmann 1989 s. 12)



**Kuva 3.3.** Venymäliuskan periaatekuva. (Kyowa 2011)

Tyypillisesti venymäliuskan johdin on kuparilankaa tai muuta metallia. Johtimet kiinnitetään tiukasti taipuisan ja sähköä johtamattoman muovisen tai keraamisen alustan päälle,

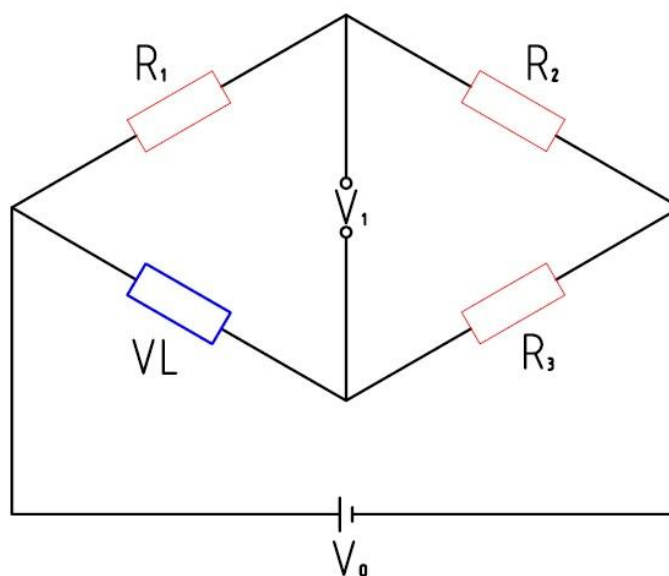


jolloin sen käsittely ja kiinnittäminen rakenteisiin on helpompaa. Venymäliuskan herkkyyden ilmaiseva liuskavakio  $k$  ilmoittaa liuskan resistanssin suhteellisen muutoksen verrattuna liuskan pituuden suhteelliseen muutokseen, yhtälön 3.5 mukaan.

$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}, \quad (3.5)$$

jossa  $\Delta R$  on resistanssin muutos,  $R$  on resistanssi ennen pituuden muutosta,  $\Delta L$  on pituuden muutos,  $L$  on pituus ennen muutosta ja  $\varepsilon$  on suhteellinen venymä. Ihanteellisessa tilanteessa venymäliuskan resistanssin muutos tapahtuu ainoastaan mitattavan kappaleen muodonmuutoksen seurauksena. Todellisuudessa lämpötila, materiaalin ominaisuudet sekä liuskan kiinnittävä liima vaikuttavat venymäliuskan resistanssiin. (Hoffmann 1989 s. 67; Airila 2004)

Koska pieni venymä aiheuttaa vain pienen muutoksen resistanssissa, muutosta pitää vahvistaa (Hoffmann 1989 s. 126). Yleinen käytetty tapa on kuvassa 3.4 esitetty wheatstonen siltakytkentä.



**Kuva 3.4.** Wheatstonen siltakytkentä.

Kuva esittää wheatstonen siltakytkentää, jossa  $R_1$ ,  $R_2$  ja  $R_3$  ovat vastuksia ja  $VL$  on venymäliuska. Siltakytkennässä yksi tai useampi vastuksista voidaan korvata venymäliuskalla. Ulos tulevan jännitteen arvon muutosten perusteella voidaan laskea liuskan vastusarvon muutos. Siltakytkennästä ulos tuleva jännite on usein edelleen hyvin pieni. Ulos tulevaa jännitettä on usein tarpeen edelleen vahvistaa ulkoisella venymäliuska vahvistimella.

### 3.3.2 Paineanturi

Markkinoilla on useita erilaisia paineanturityyppejä ja toimintaperiaatteita johtuen erilaisista mittausolosuhteista, mittausväleistä ja käytetyistä materiaaleista. Painetta voidaan mitata kolmella eri metodilla: absoluuttisena paineena, suhteellisena paineena tai paine-erona (Heeley 2005 s. 1). Heeley (2005) esittää, että absoluuttisen paineen mittari ilmoittaa paineen arvon suhteessa nollaan Pascaliin, eli tyhjiön paineeseen. Absoluuttisen paineen mittari ei ota huomioon vallitsevan ilmanpaineen vaikutusta. Kuvassa 3.5 esitelty suhteellista painetta mittaavan anturin nollakohta on vallitseva ilmakehän paine. Anturi ilmoittaa paineen ylipaineena verrattuna ilmakehän paineeseen. Paine-ero anturi mittaa kahden tai useamman paineen välistä erotusta.

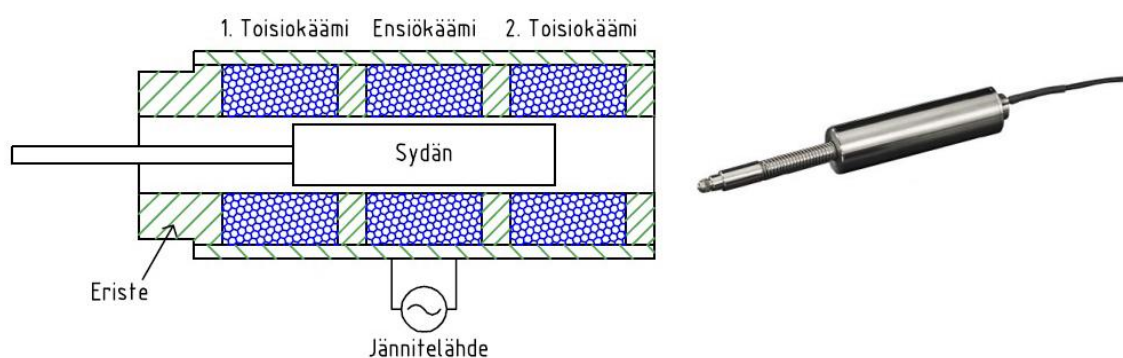


**Kuva 3.5.** Suhteellista painetta mittaava paineanturi. Vastaava anturi on valittu tässä diplomityössä suunniteltuun hydrodynaamiseen liukulaakerikoelaitteeseen. (Variohm EuroSensor 2011)

Airilan (2004) mukaan tavallisimmat paineanturin toimintaperiaatteet ovat venymäliuskaan perustuva mittaus ja pietsoresistiivinen anturi. Venymäliuskaan perustuvassa paineanturissa paine aiheuttaa liuskan venymistä, jonka resistanssin muutoksesta saadaan määritettyä paineen arvo. Venymäliuskan toimintaperiaate on kuvattu tarkemmin edellisessä kappaleessa. Pietsoresistiivisyyteen perustuvan anturin toiminta on hyvin samankaltainen kuin venymäliuskaan perustuva anturi. Pietsoresistiivisen anturin toiminta perustuu eräiden materiaalien kuten kvartsin ominaisuuteen synnyttää sähkövaraus, kun sitä kuormitetaan mekaanisesti. Anturi rakentuu pietsosähköisestä kiteestä, massasta ja jousesta. Voiman vaikuttaessa anturiin kide puristuu massan alla, jolloin kiteeseen muodostuu sähkövaraus. Anturin lähettämä signaali vaatii usein vahvistamista ennen ohjausjärjestelmälle menoa. Vahvistin on integroitu anturiin tai se on erillinen moduuli anturin rinnalla. Pietsoresistiiviset anturit ovat erittäin herkkiä iskuille ja värähtelylle, siksi niitä tulisi käyttää ainoastaan staattisissa mittausolosuhteissa.

### 3.3.3 LVDT-anturi

Differentiaalimuuntaja eli LVDT-anturi (kuva 3.6) on sähkömekaaninen lineeariliikkettä mittaava laite, joka tuottaa käämien sisällä liikkuvan ferromagneettisen sydämen siirtymään verrannollisen sähköisen signaalin. Anturi koostuu keskelle sijoitetusta ensiökäämistä ja sen molemmille puolille, anturin päihin, sijoitetuista toisiokäämeistä. Käämit ovat eristetty toisistaan sähköä johtamattomalla eristeellä. Rungon sisällä on aksiaalisesti liikkuva rauta- tai ferriittisydän. Ensiökäämiin tuodaan jännite, joka indusoi jännitteen toisiokäämeihin. Sydämen ollessa anturin keskiasennossa toisiokäämien jännitteet ovat yhtä suuret, mutta vastakkaisessa vaiheessa toisiinsa nähden. Sydämen liikkuaessa käämien sisällä toisiokäämeihin indusoitunut jännite muuttuu. Jännite kasvaa käämissä, jota lähemmäksi sydän liikkuu ja vastaavasti jännite laskee käämissä josta liikutaan pois päin. (Airila 2004)



**Kuva 3.6.** Kuvassa vasemmalla on esitetty LVDT-anturin toimintaperiaatetta havainnollistava poikkileikkauskuva. Kuvassa oikealla on Solartron metrologyn valmistama LVDT anturi. (Solartron metrology 2015)

LVDT-antureiden mittaustarkkuus on mikrometrien luokkaa. Toisiokäämeistä mitattava jännite on muutaman millivoltin suuruusluokkaa, joka vahvistetaan usein alueelle 10–24 VDC. LVDT-anturin sydän pääsee liikkumaan kitkattomasti käämirakenteen sisällä, minkä vuoksi anturi on erittäin toimintavarma ja lähes kulumaton. LVDT-anturin epäedullisiksi ominaisuuksiksi voidaan lukea sen alttius värinälle, iskuille sekä ulkoisille magneettikentille. (Airila 2004)

## 4 SUUNNITTELUN METODIIKKA

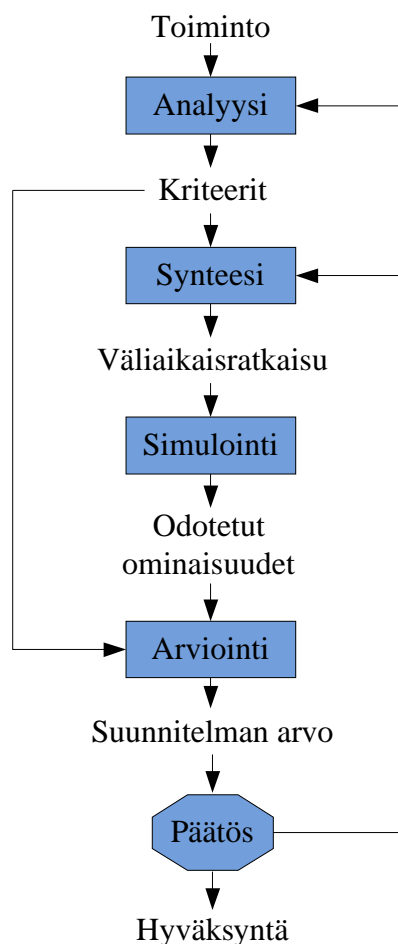
*”The core of designing is reasoning from function to form”*

- N. F. M. Roozenburg

Suunnittelun metodiikka tai metodologia ovat menetelmiä, joita sovelletaan suunnittelussa tavoitellun päämäärän saavuttamiseksi. Metodiikka tähtää käsitteellisten ratkaisujen luontiin, jotka auttavat suunnittelijoita organisoimaan ja tehostamaan suunnitteluprosessia. Suunnittelun metodiikka pyrkii vastaamaan seuraaviin kysymyksiin; Mikä on suunnittelun olennainen rakenne? Miten suunnitteluprosessia tulee lähestyä, jotta prosessista saadaan mahdollisimman tehokas? Ensimmäiseen kysymykseen saadaan vastaus kuvailemalla ja hahmottelemalla suunnittelun vaiheita loogisen päättelyn avulla, analyyseillä sekä rakenteilla. Toiseen pääkysymykseen haetaan vastausta tekemällä selkeitä ratkaisuja, vaatimuksia ja linjanvetoja ensimmäisen kysymyksen vastausten pohjalta. (Roozenburg *et al.* 1995 s. 83)

Kirjallisuudessa esiintyy useita erilaisia malleja suunnitteluprosessin läpivientiin. Yhdistävänä tekijänä näistä kaikista löytyy loogisuus ja prosessin seurannan tehokkuus. Metodeita yhdistää myös suunnitteluprosessin vaiheiden määrittelyn tarpeellisuus. Suurimmat eroavaisuudet eri mallien välillä esiintyvät metodien määritelmien terminologiassa.

Suunnittelun peruslähtökohtana voidaan pitää kuvassa 4.1 esitettyä Arthur David Hallin (1968) kehittämää perussuunnittelujaksotusta (*engl. basic design cycle*).



**Kuva 4.1.** Perussuunnittelujaksotus Hallin (1968) mukaan.

Hallin perussuunnittelujakso on yleismalli, joka kiteyttää suunnitteluprosessin perusluonneen. Roozenburg *et al.* (1995) esittää, että mallia on sovellettu kaikkiin muihin suunnittelumalleihin. Hallin jaksotus pohjautuu viiteen vaiheeseen: analyysi, synteesi, simulointi, arviointi ja päätös. Jokaisen tuotteen suunnittelun ja kehityksen aikana suunnittelija käy läpi kyseiset vaiheet vähintään kertaalleen. Yksi Hallin perussuunnittelujakson sovelluksista on Gerhard Pahlin ja Wolfgang Beitzin kehittämä systemaattinen suunnitteluprosessi. Hallin mallia sovelletaan myös Ulrich K. T. ja Eppinger S. D. vuonna 2012 julkaistussa tuotekehitysprosessia esittelevässä teoksessa. Pahlin *et al.* ja Ulrichin *et al.* suunnittelumallit omaavat siis paljon samoja piirteitä, molempia malleja esitellään seuraavaksi tarkemmin systemaattisen suunnitteluprosessin esittelyn yhteydessä.

## 4.1 Systemaattinen suunnitteluprosessi

Monimutkaisten tuotteiden suunnittelu vaatii suunnitteluorganisaatioilta kokonaisvaltaista ymmärrystä tuotteen teknisistä sekä taloudellisista osatekijöistä. Gerhard Pahl ja Wolfgang Beitz (1990) ovat kehittäneet systemaattisen lähestymistavan suunnitteluprojektin läpivientiin. Systemaattisuuden tavoitteena on helpottaa projektin läpivientiä sekä

vähentää ja ennustaa mahdollisia virheitä. Systemaattisuus lisää tuotesuunnittelun onnistumisen mahdollisuuksia jaksottaen työvaiheita selkeiksi kokonaisuuksiksi. Hyvin määritelty suunnitteluprosessi takaa laadukkaan lopputuotteen. Pahlin *et al.* (1990) mukaan systemaattinen lähestymistapa suunnitteluun ei kuitenkaan ole automaattisesti kattavin metodi. Suunnittelutyön tulee aina sisältää myös innovointia sekä intuitiota projektin luonteen mukaisesti. Huomioitavaa on myös jokaisen suunnittelijan erilainen kokemustausta, taidot sekä mieltymykset suunnittelussa, joilla on suuri vaikutus suunnitteluprojektin aikatauluihin ja työnjakoon.

Pahl *et al.* (1990) jakaa varsinaisen suunnitteluprosessin neljään päävaiheeseen:

- Esiselvitys
- Luonnostelu
- Kehittely
- Viimeistely

Jokainen vaihe sisältää useita yksittäisiä työ- ja päätöksentekoaikavaiheita, jotka toteutessaan vievät prosessia eteenpäin.

#### 4.1.1 Esiselvitys

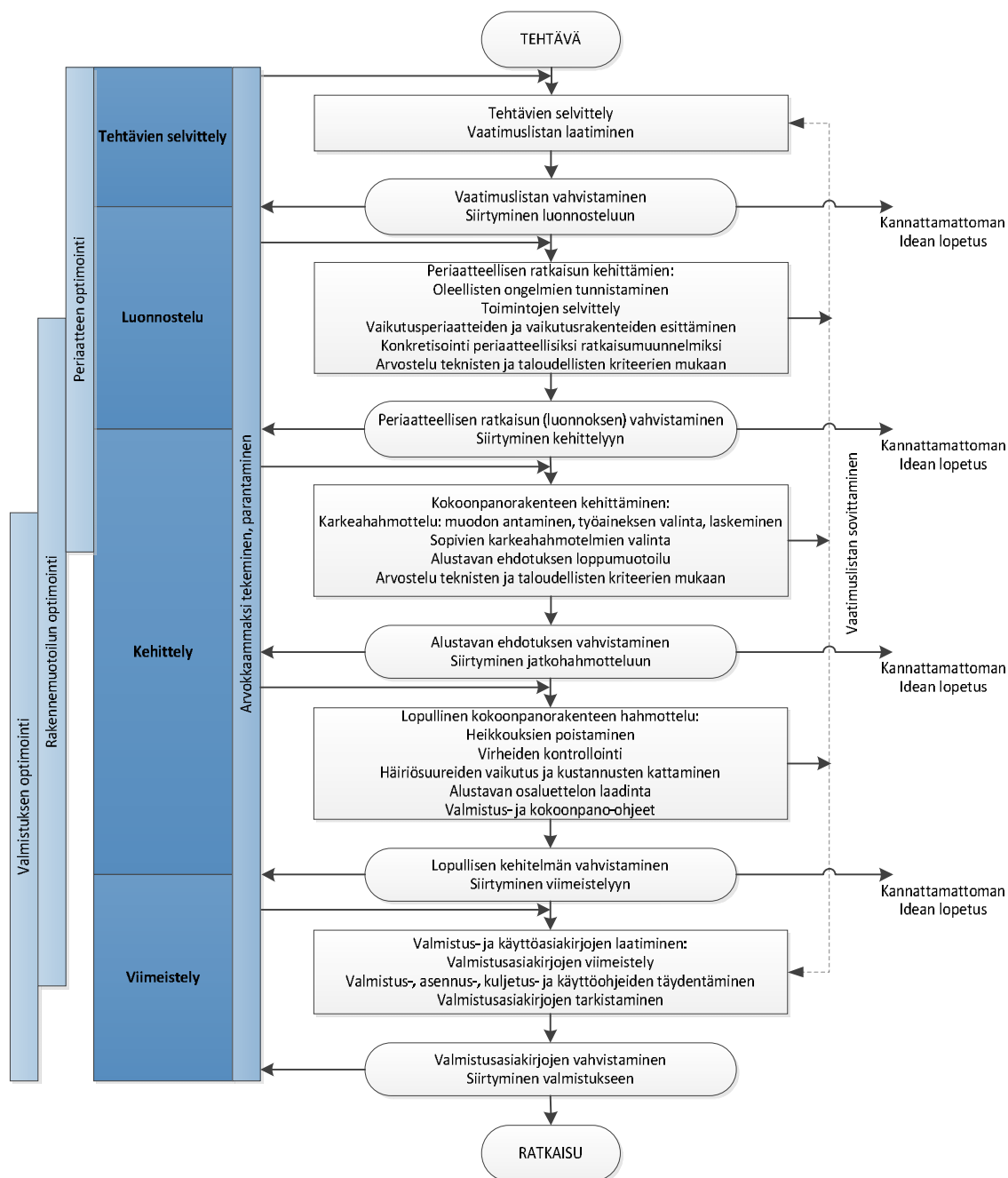
Ennen varsinaisen konstruktiosuunnittelun aloittamista pitää olla olemassa idea, johon voidaan lähteä kehittämään teknisesti ja taloudellisesti järkevää ratkaisua. Idea saadaan toimeksiantaja ulkopuoliselta yritykseltä tai kehitysprosessin laukaisijana voi olla omassa yrityksessä saatu idea tai parannusehdotus. Uusien tuotemahdollisuuksien tunnistaminen tapahtuu Ulrichin *et al.* (2012) mukaan seuraavan kuusivaiheisen prosessin kautta:

- Suunnittelutyön perusajatuksen luonti
- Useiden mahdollisuuksien luonti ja havainnointi
- Mahdollisuuksien seulonta
- Lupaavien mahdollisuuksien kehitys
- Poikkeuksellisten mahdollisuuksien valinta
- Tuloksiin ja prosessiin reflektointi

Pahl *et al.* (1990) mukaan yrityksillä on omien tavoitteidensa mukaan määritellyt tuoteohjelmat, joiden avulla pyritään kehittämään lupaavia ideoita. Yrityksen toimiala ja markkinoiden suhdanteet vaikuttavat merkittävästi siihen, mikä idean tai tuotekehitystarpeen laukaisee. Idean syntymiseen vaaditaan yleensä jokin idean laukaiseva impulssi. Impulssi voi olla markkinalähtöinen, toimintaympäristön aikaansaama tai impulssina voi toimia yrityksen omat kehitysideat. Markkinalähtöinen impulssi on kilpailukykyyn ylläpitämiseksi välttämätön kehitysideoiden laukaisija, joka voidaan saada esimerkiksi omien

tuotteiden teknis-taloudellisen vanhenemisen vuoksi. Muuttuvien markkinoiden tai asiakastarpeiden tyydyttäminen voi myös luoda kehitystarpeen. Talouspoliittiset tapahtumat, lainsäädäntö sekä uudet tutkimustulokset ovat suurimpia toimintaympäristön aikaansäämiä impulsseja. Omasta yrityksestä saadut impulssit tulevat usein omien tutkimusten ja analyysien kautta. Yrityksen strategialla on erityisen suuri merkitys kehitystarpeen luomisessa. Tavoitteena voi esimerkiksi olla laajentuminen, uudet markkinasegmentit tai paremmat valmistusmenetelmät.

Kuvassa 4.2 on esitetty kulkukaavio konstruktiosprosessin työaskeleista Pahl *et al.* (1990) systemaattisen mallin mukaisesti. Jokaista päätösaskelta seuraa joko kaavion mukainen eteneminen, palaaminen aikaisempaan silmukkaan mikäli kyseisen vaiheen lopputulos on epätydyttävä tai vaihtoehtoisesti kannattamattoman idean lopetus. Kaavioin tehtävänä on varmistaa, ettei radikaaleja virheitä kohdattaisi enää prosessin lopussa.



**Kuva 4.2.** Konstruktion työaskeleet. (Perustuu lähteeseen Pahl et. al. 1990 s. 51)

Pahlin *et al.* (1990) systemaattisen suunnitteluprosessin tehtävänasettelun selvitys alkaa informaation hankinnalla ja vahvistamisella. Tehtävälle on usein annettu reunaehdoja, jotka tässä vaiheessa tulee vahvistaa saatavilla olevan informaation pohjalta. Saatu tehtävä tulee selvittää mahdollisimman täydellisesti, jotta jatkossa ilmenevät korjaustarpeet ja täydennykset rajoittuisivat vain välttämättömiin osa-alueisiin, ja lopputulokseksi saadaan mahdollisimman optimaalinen ratkaisu. Suunnittelun tässä vaiheessa annetuista reunaehdoista päätetään lopullisen konstruktion kannalta oleellimmat. Rajoituksia määrittäessä suunnitteluosaston tulee vastata seuraaviin kysymyksiin:



- Mistä ongelmasta on kyse?
- Ovatko tehtävänasettelussa annetut reunaehdot oikeita?
- Mitkä tiedot ovat kehittelylle avoimia?
- Mihin tarkoitukseen ratkaisun pitää olla sopiva?
- Mitä ominaisuuksia ratkaisulla pitää olla ja mitä sillä ei saa olla?

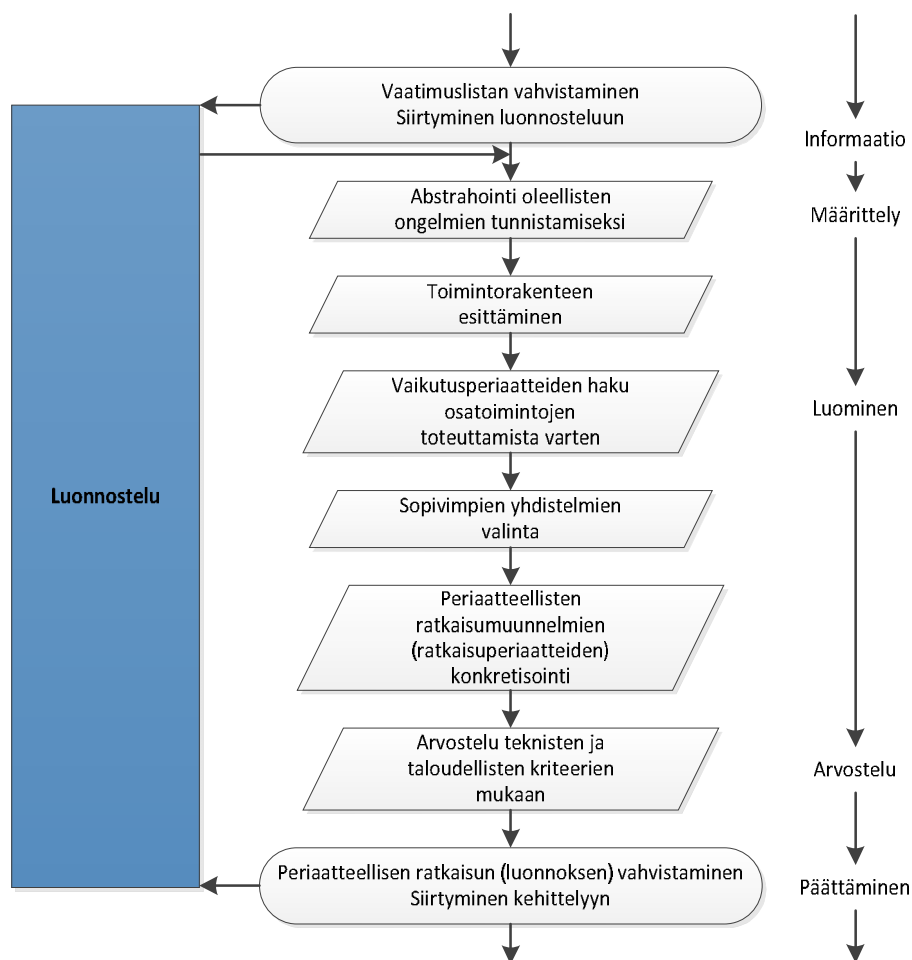
Esiselvitys vaiheessa määritetään lisäksi ideoidun tuotteen kohdemarkkinat, hahmotetaan tuotteen taloudellisuutta ja kannattavuutta liiketoiminnan näkökulmasta (Ulrich *et al.* 2012 s. 16). Esiselvityksen aikana hankittu informaatio tulee konkretisoida yhtenäiseksi kokonaisuudeksi. Pahlin *et al.* (1990) teorian mukaan informaatio kootaan vaatimuslistaan, joka toimii jatkossa suunnitteluprosessin ohjenuorana koko projektin ajan. Vaatimuslistan periaatemalli on esitetty taulukossa 4.1. Vaatimuslista mukautuu tarvittaessa projektin edetessä. Vaatimuslistaan kirjataan myös tilaajan taholta saadut toiveet, jotka toteutetaan kohtuullisuuden rajoissa. Toiveet voidaan määrittellä vielä erittäin, keskinkertaisen tai vähemmän tärkeiksi. Tyypillisesti suurin rajoittava tekijä toiveiden pois sulke-  
miseksi ovat taloudelliset syyt.

**Taulukko 4.1.** Vaatimuslistan periaatemalli. (Perustuu lähteeseen Pahl *et al.* 1990 s. 65)

				Painos:
Käyttäjät		VAATIMUSLISTA		Identifiointi Lehti; Sivu
		Projekti, Tuote		
MUUTOS	V/T	VAATIMUKSET		VASTAAVA
Muutos pvm.	Vaatus vai Toivomus	Esine tai ominaisuus määrä- ja laatuaineineen. Tarvittaessa jäsennehtynä osasysteemeiksi (toiminto- tai rakenneryhmiksi) tai ohjelistan tunnusten mukaan.		Vastuullinen konstruktoryhmä

#### 4.1.2 Luonnostelu

Ennen luonnostelun aloittamista tarkistetaan onko tehtävänasettelu selvitetty niin pitkälle, että konstruktivisen ratkaisun kehittäminen voidaan aloittaa. Tässä vaiheessa on tarpeen myös selvittää onko hankittua informaatiota tarkennettava tai tarvitaanko sitä lisää. Luonnostelun alussa on selvitettävä myös miten ja missä laajuudessa kyseinen vaihe on käytävä läpi. Kuvan 4.2 kulkukaavio täydentyy luonnosteluvaiheen osalta yksittäisistä työaskeleista kuvan 4.3 muotoon.



**Kuva 4.3.** Luonnostelun työaskeleet. (Perustuu lähteeseen Pahl et al. 1990 s. 72)

Systemaattisen suunnitteluprosessin luonnosteluvaihe koostuu kuudesta askeleesta. Suunnittelunprojektin laajuudesta ja tarkoitusperästä riippuen jokaista askelta ei kuitenkaan ole aina tarpeen käydä läpi.

Projektiorganisaatio vahvistaa vaatimuslistan, jonka jälkeen siirrytään ongelmien tunnistamiseen abstrahoimalla. Ongelmien abstrahoinnilla pyritään pelkistämään ongelmia mahdollisimman yleispätevälle tasolle kuitenkin tehtävän ydinolemus säilyttäen (Pahl et al. 1990 s. 73). Tämä vaihe nähdään tyypillisesti tärkeimpänä vaiheena uusien tuotteiden suunnitteluprosessissa, koska tämän vaiheen ratkaisut ja päätöksen vaikuttavat merkittävästi prosessin seuraaviin vaiheisiin. Roozenburg et al. (1995) kiteyttää luonnostelun tärkeyden yhdellä lauseella: ”Huono luonnos ei voi kehittyä optimaaliseksi tuotteeksi.”

Pahlin et al. (1990) prosessin mukaan tuotteesta laaditaan toimintorakenne, joka esittää järjestelmän kokonaistoiminnon osatoiminnoista koostuvana loogisena kaaviona. Osatoimintoihin jakaminen on perusteltua, koska se helpottaa kokonaisuuden hallintaa, toimintojen erottelua sekä osatoimintojen kehittäminen omina kokonaisuuksinaan tulee mahdolliseksi. Osatoimintoja voidaan edelleen jakaa pienempiin rakenneryhmiin niin

kauan kunnes toiminnot saadaan yksinkertaistettua halutulle tasolle ja jatkokehitys on mahdollista. Toimintorakenteen tulee olla mahdollisimman yksinkertainen, koska tällöin toimintojen jakaminen osatoimintoihin tekee työskentelystä aikaa ja kustannuksia säästävää. Osatoimintoihin jakaminen ei pitäisi olla itsetarkoitus vaan se laaditaan ainoastaan helpottamaan ratkaisun löytymistä. Vaatimuslistaa tarkastelemalla toiminnollisia yhteyksiä voidaan havaita tehtävälle asetetuista vaatimuksista ja toiveista. Toimintorakennetta laatiessa tulee huomioida osatoimintojen looginen yhteys toisiinsa nähden, jotta kokonaistehtävän johdonmukaisuus säilyy läpi toimintorakenteen.

Sopivien ratkaisuperiaatteiden hakemisella halutaan löytää osatoimintojen ominaispiirteiden toteuttamiseen parhaat työkalut ja ratkaisut. Etusijalle on pantava ne päätoiminnot, joilla on suurin vaikutus lopputulokseen, mutta niiltä puuttuu vielä ratkaisuperiaate. Pahl *et al.* (1990) esittävät kolme toisistaan eriävää hakumenetelmää:

- Tavanomaiset menetelmät
- Intuitiivisesti painotetut menetelmät
- Diskursiivisesti painotetut menetelmät

Tavanomaisia menetelmiä ovat kirjallisuustutkimukset, luonnon järjestelmien analysointi, tunnettujen teknisten systeemien analysointi, analogiatarkastelut sekä mittaukset ja mallikokeet. Analysoimalla ja soveltamalla luonnon omia mekanismeja suunnittelija voi saada toimivia ratkaisuja omiin ongelmakohtiinsa. Luonto on tarjonnut teknisiin konstruktioihin soveltuvia ratkaisuja muiden muassa kenno- ja sandwich rakenteiden muodossa. Kyseisten muotojen keveys yhdistettynä hyviin lujuusominaisuuksiin on tehnyt niistä käyttökelpoisia mekanismeja konstruktiosuunnitteluun. Tunnettujen teknisten systeemien analysointi on tärkeimpiä vaikutusperiaatteen hakumetodeja. Kilpailijoiden tuotteita analysoimalla voidaan saada muun muassa parannettuja ratkaisuja omiin tuotteisiin. (Pahl *et al.* 1990 s. 100)

Intuitiivisesti painotetut menetelmät perustuvat kokemustaustaltaan erilaisten ihmisten luomiin ideoihin ja näistä kehitettyihin assosiaatioihin. Intuitiivisia ideoita ei voida pakottaa. Ryhmäkeskustelut ja kriittiset väittelyt kirvoittavat uusia ratkaisuteitä ajatusassosiaatioilla. Tunnetuin intuitiivisista menetelmistä on aivoriihi, jossa tehtävää suorittava ryhmä esittää ennakkoluulottomasti ajatuksia ja näkökulmia ongelman ratkaisemiseksi. Aivoriihi on toimiva menetelmä jos ryhmällä ei ole vielä toteuttamiskelpoisia ratkaisuja tai nykyisiä ratkaisuja ei kannata viedä jatkokehitykseen. (Pahl *et al.* 1990 s. 103-105)

Parhaiten yksittäisten ongelmien ratkaisuun sopivat menettelytavat ovat tietoisten askelten kautta etenevät toimintaperiaatteet. Nämä diskursiivisesti painotetut menetelmät ovat johdonmukaisia ja ovat käyttökelpoisia toimintaperiaatteita intuitiivisten menetelmien

rinnalle. Vallitsevien fysikaalisten ilmiöiden analysointi ja systemaattinen ongelmien jäsentely ovat esimerkkejä diskursiivisesti painotetuista metodeista. (Pahl *et al.* 1990 s. 109)

Ratkaisuperiaatteista valitaan tavoitteiden ja vaatimuslistan kannalta sopivimmat luonnokset, joita konkretisoidaan niin pitkälle, että niiden arviointi on mahdollista ja selkeää. Ratkaisujen konkretisoinnissa arviointikriteerit tulee ottaa huomioon. Luonnosten arviointiin käytetään taulukossa 4.2 esitettyä pisteytysmatriisiä. Pisteyttämällä luonnokset saadaan objektiivinen peruste päätöksenteolle. (Pahl *et al.* 1990 s. 172)

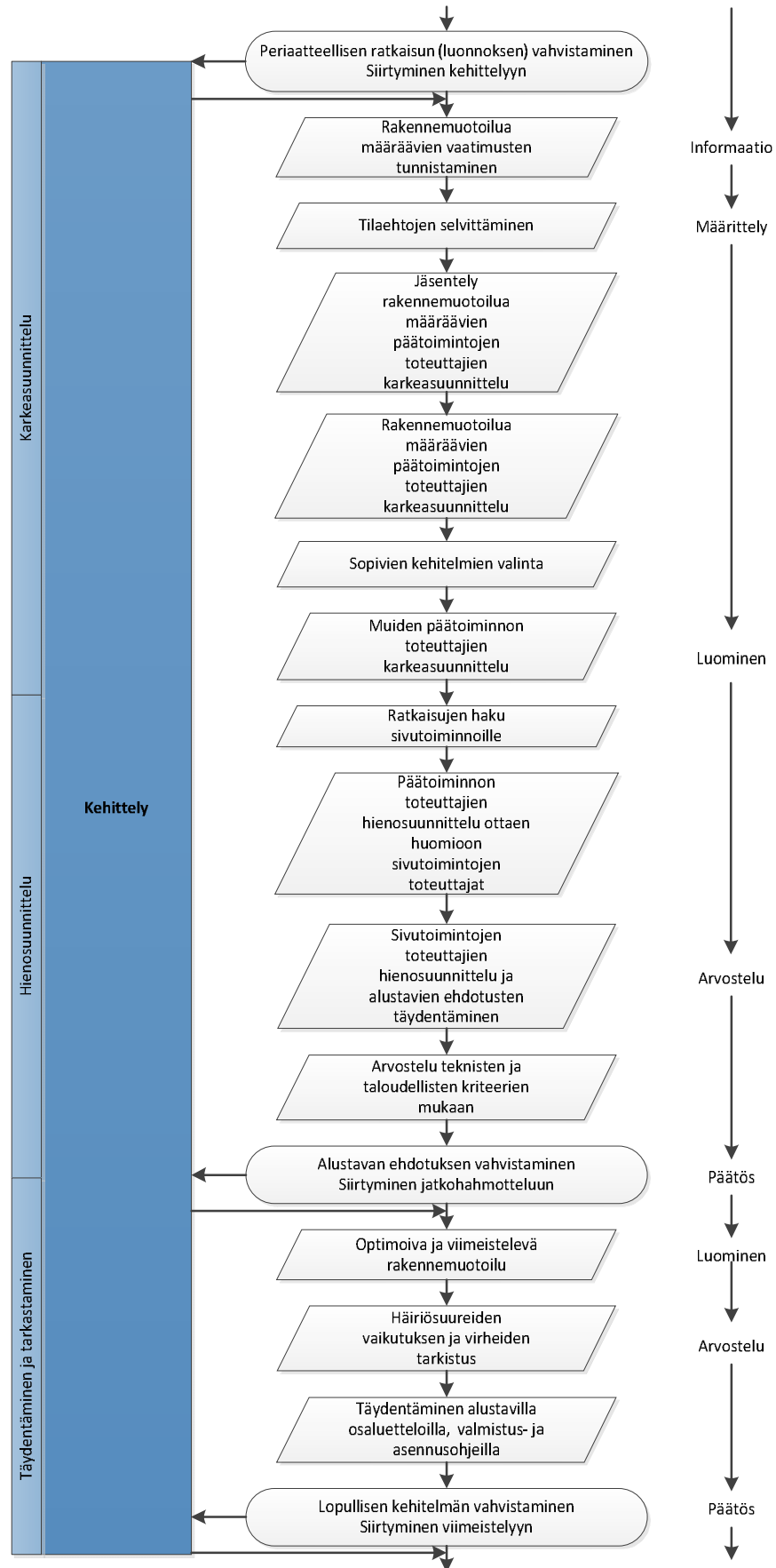
**Taulukko 4.2.** Luonnosten pisteytysmatriisi. (Perustuu lähteeseen Ulrich *et al.* 2012 s. 117)

Ominaisuus	Painoarvo %	Vaihtoehto A		Vaihtoehto B	
		Pisteet	Painotetut pisteet	Pisteet	Painotetut pisteet
1. kriteeri	x %	1-5	Painoarvo · Pisteet	1-5	Painoarvo · Pisteet
2. kriteeri	:	:	:	:	:
3. kriteeri	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:
Kokonaispisteet		Σ Painotetut pisteet		Σ Painotetut pisteet	
Järjestys					
Jatkokehitykseen?		Kyllä / Ei		Kyllä / Ei	

Luonnosteluvaiheessa eri ratkaisuvaihtoehtoja kannattaa Ulrichin *et al.* (2012) mukaan luoda riittävän monta. Ennen pisteytysmatriisin hyödyntämistä ratkaisuja ei ole järkevää poissulkea jatkokehitykseltä. Mahdollisimman kattava ratkaisuvaihtoehtojen joukko varmistaa, että optimaaliset ratkaisut tulevat hyödynnettyä lopputuotteessa. Valintakriteerit voidaan valita matriisiin vaatimuslistan pohjalta, mutta niitä on tarpeen määrittää myös lisää. Kriteereinä käytetään lopputuotteen toiminnan kannalta merkittävimpiä ominaisuuksia. Kriteerit voivat pohjautua myös esimerkiksi geometriaan tai materiaalivalintoihin. Painoarvot kriteereille valitaan suunnitteluorganisaation kanssa sekä niistä keskustellaan tuotteen tilaajan kanssa, mikäli se nähdään tarpeelliseksi. Luonnosten arvojärjestys saadaan painotettujen pisteiden mukaan. Luonnos, joka saa eniten kokonaispisteitä on arvojärjestyksessä ensimmäisenä, eli sitä voidaan pitää parhaana vaihtoehtona jatkokehitykselle.

#### 4.1.3 Kehittely

Pahl *et al.* (1990) määrittelevät kehittelyn vaiheeksi, jossa teknisen tuotteen rakenne kehitetään periaatteellisesta ratkaisusta lähtien teknis-taloudellisten näkökohtien mukaan täydelliseksi. Kehittelyvaiheen pääpaino on luonnosteluvaiheessa valitun konseptin rakenteen konkretisoinnissa. Kehittelyvaiheen konstruktion työaskeleet ovat esitelty kuvassa 4.4.



**Kuva 4.4.** Kehittelyn työaskeleet. (Perustuu lähteeseen Pahl et al. 1990 s. 178)

Pahlin *et al.* (1990) mukaan tehtävien selvityksen jälkeen voidaan siirtyä suoraan kehity- ja viimeistelyvaiheisiin mikäli havaitaan, että tunnettuja ja aikaisemmin kehitettyjä ratkaisuja voidaan soveltaa suoraan jatkokehitykseen. Kehittelyvaihe on suunnitteluprosessin osa-alueista monimutkaisin, tämän vuoksi kulkukaavioita sovelletaan vain rajoitusti ja tarpeellisilta osilta. Monimutkaisuutta alleviivaa useiden työvaiheiden samanaikaisuus. Prosessin tässä vaiheessa konstruktio on jo edennyt siihen vaiheeseen, että lisäykset ja muutokset vaikuttavat rakenteellisesti valmiisiin osa-alueisiin.

Vaikutusrakenteen ja luonnoksen tunnistamisen jälkeen vaatimuslistalta otetaan käsiteltäväksi ne vaatimukset, jotka merkittävästi määrittävät rakennemuotoa. Pahl *et al.* (1990) esittää, että tällaisia vaatimuksia voivat olla esimerkiksi teho, nopeus, liikesuunnat, korroosiokestävyys, kulumiskestävyys jne. Turvallisuuteen, ergonomiaan, valmistukseen ja asennukseen pohjautuvat vaatimukset asettavat osaltaan erityisiä ehtoja rakennemuotolulle, joilla voi olla merkittäviä vaikutuksia rakennemuodon muihin vaatimuksiin. Kolmiulotteiset reunaehdot kuten vaaditut etäisyydet ja rakennetilarajoitukset tulevat määrättyksi tilaehdoja selvitettyä. Kokoonpanorakenteesta tehdään karkealuonnos, jossa on ensisijaisesti otettu huomioon kokonaisuutoilun päätoimintoihin vaikuttavat rakenneosat ja kokonaisuuteen olennaisesti vaikuttavat materiaalit ja työainekset. Karkeasuunnittelussa päätetään konstruktion päätoiminnot, joiden mukaan valitaan tilaehdot toteuttavat karkeat päämitat.

Alustavia kehitelmiä on tarkoituksenmukaista tehdä useampia, jotta eri vaihtoehtojen haitat ja hyödyt voidaan allokoita ja niitä voidaan soveltaa jatkokehitykseen sekä lopulliseen tuotteeseen. Alustavia vaihtoehtoja arvioidaan teknis-taloudellisten kriteerien sekä jokaiselle projektille modifioitujen valintaperusteiden mukaan. (Pahl *et al.* 1990 s. 179)

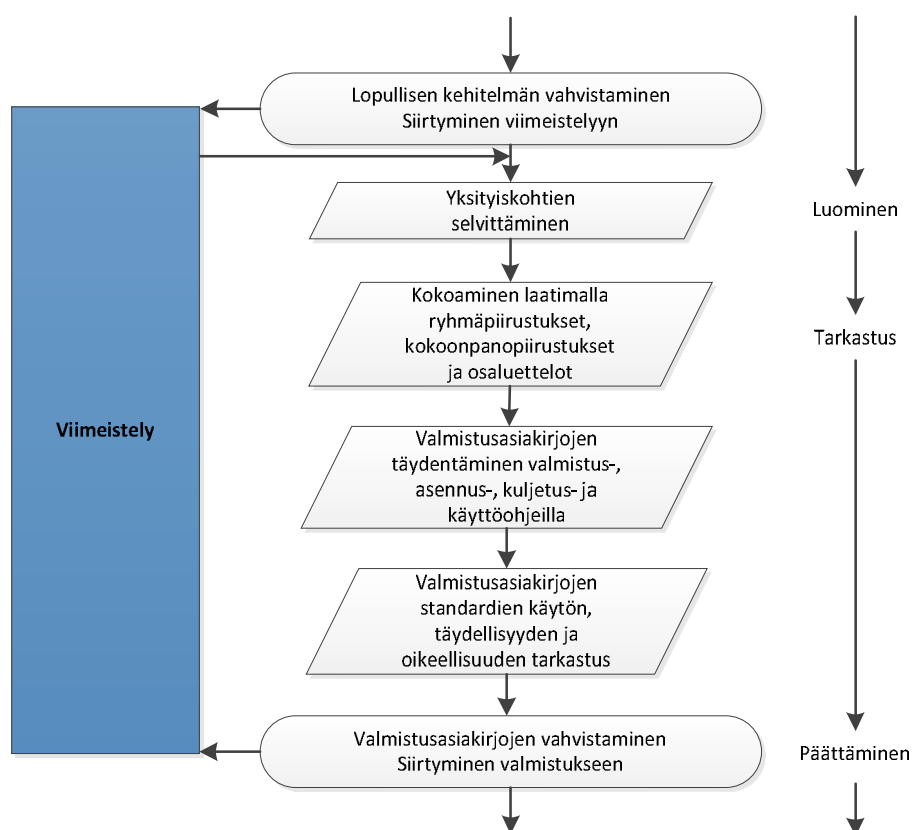
Kehittely jatkuu hienosuunnittelulla, jossa kokonaisuuden kannalta myönteisimmät vaihtoehdot on valittu jatkokehitykseen. Osa alustavista kehitelmistä voi karsiutua jo aikaisessa vaiheessa esimerkiksi jo käytettävissä olevien esitutkimusten tai muotoiluun liittyvien vaatimusten vuoksi. Hienosuunnittelu etenee määrittelemällä konstruktion sivutoiminnot. Esimerkkinä sivutoiminnosta voidaan antaa vanhan ajan polkupyöriin usein integroitu dynamo. Päätoimintojen toteuttajat muotoillaan rakenteelle annetut reunaehdot, standardit, tunnetut ratkaisut, ohjeet sekä saadut mittaus- ja tarkistuslaskelmat huomioiden. Päätoimintojen hienosuunnittelun jälkeen samat toimenpiteet tehdään sivutoiminnoille alustavat ehdotukset huomioiden. (Pahl *et al.* 1990 s. 179)

Kaikkien toimintojen toteuttajat kootaan yhtenäiseksi kokonaisuudeksi arviointia ja tarkastusta varten. Eri vaihtoehtojen tulee olla yhtä pitkälle jalostettuja tasapuolisen arvostelun takaamiseksi. Vaihtoehtoista valitaan sopivin kehitelmä, jota täydennetään soveltuvalta osin muiden vaihtoehtojen osaratkaisuilla. Tarvittaessa kulkukaaviossa palataan korkeammalle informaatiotasolle ja tasot käydään läpi uudestaan optimoiden valittua ke-

hitelmää. Lopullinen kokonaiskehitemä täydennetään alustavilla osaluetteloilla sekä valmistus- ja asennusohjeilla, jonka jälkeen kehitelmä vahvistetaan ja luovutetaan viimeistelyyn. (Pahl *et al.* 1990 s. 180)

#### 4.1.4 Viimeistely

Tuotteen tarpeeksi pitkälle edenneen kehittelyn jälkeen voidaan aloittaa tuotteen viimeistely. Viimeistelyssä laaditaan valmistuksen kannalta tarpeelliset asiakirjat. Viimeistelyvaihe voidaan jakaa neljään vaiheeseen, jotka ovat esitetty alla olevassa kuvassa. (Pahl *et al.* 1990 s. 458)



**Kuva 4.5.** Viimeistelyn työaskeleet. (Perustuu lähteeseen Pahl *et al.* 1990 s. 459)

Viimeistelyvaiheen tärkein tehtävä on lopullisten valmistusasiakirjojen laadinta sekä valmistustekniikan vahvistaminen. Tässä vaiheessa optimoidaan tuotteen lopullinen muoto, pinnanlaatu ja toleranssit. Tuote tulee optimoida myös taloudellisesti kannattavaksi aines- ja valmistusteknisillä valinnoilla sekä varmistettava valittujen osto-osien saatavuus. Tämän lisäksi viimeistely sisältää tarvittaessa tuotteen asennus- sekä käyttöohjeet. Viimeistelyn jälkeen alkaa tuotteen valmistus, jota varten kaikki asiakirjat ja ohjeet tulee tarkistaa, että ne noudattavat vallitsevia standardeja. (Pahl *et al.* 1990 s. 458)

## 5 LIUKULAAKERIKOELAITTEEN SUUNNITTELU

Oppilaslaboratorion nykyinen hydrodynaaminen liukulaakerikoelaite halutaan tuoda nykypäivän tasolle. Koelaite suoriutuu edelleen siltä vaadituista mittauksista, mutta laitetta halutaan kuitenkin modernisoida ja suunnitella laitteesta kompaktimpi ja helpommin liikuteltava kokonaisuus. Koelaitetta ei käytetä jatkuvasti, joten se on mielekästä siirtää kaapistoon laboratoriotilan vapauttamiseksi ja ottaa käyttöön tarvittaessa. Koelaitteen suunnittelulle asetettiin alustavia vaatimuksia diplomityön aloituspalaverissa. Vaatimukset pohjautuvat aikaisemmasta laitteesta saatuihin käyttökokemuksiin sekä tulevaisuuden tarpeisiin. Vaatimukset tarkentuivat kuitenkin suunnittelun edetessä, kun huomattiin mihin osa-alueisiin täytyi kiinnittää eniten huomioita. Lopullinen vaatimuslista on esitetty taulukossa 5.1.

*Taulukko 5.1. Liukulaarikoelaitteen vaatimuslista.*

VAATIMUSLISTA	
Hydrodynaaminen liukulaakerikoelaite	
V/T	VAATIMUKSET
	<b>Rakenne:</b>
V	Kompakti
V	Helposti liikuteltava
V	Suljettava öljysäiliö
T	Roiskevoitelu
T	Instrumentit laitteeseen integroituja
	<b>Toiminta-alue:</b>
V	Kuormitus: 0-1 kg
V	Liikunopeus 0-0,5 m/s
V	Lämpötilan tarkkuus: +/- 1°C
	<b>Mitattavat suureet:</b>
V	Paine
V	Voitelukalvon paksuus
V	Kitka
V	Lämpötila
V	Pyörimisnopeus
	<b>Muuta:</b>
V	Turvallinen
V	Halpa
V	Helppokäyttöinen



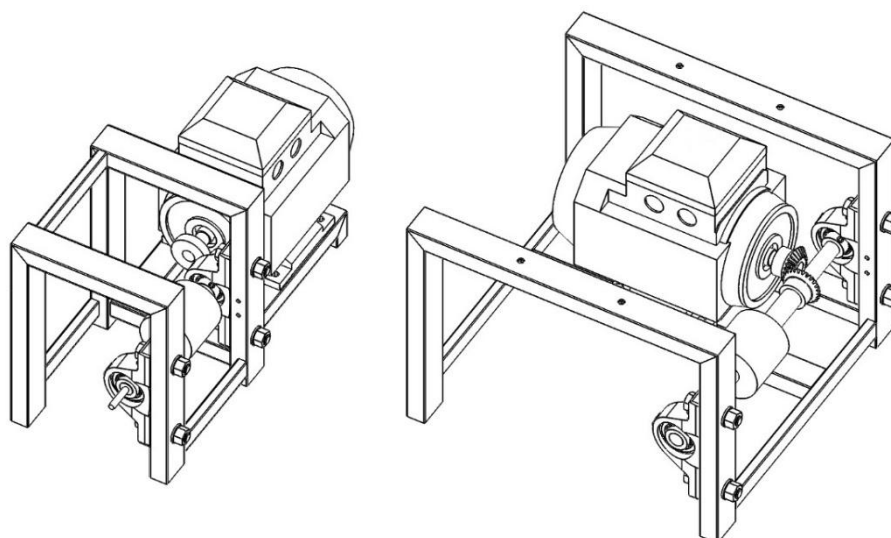
Vaatimusten merkittävimmät osa-alueet suunnittelun näkökulmasta ovat rakenteelle asetetut vaatimukset. Vaatimukset linkittyvät toisiinsa monilta osin. Komponenttivalinnat, komponenttien sijoittaminen, anturivalinnat sekä anturien kiinnityspaikat vaikuttavat kaikki merkittävästi kokonaisuuteen. Seuraavissa kappaleissa esitellään koelaitteen suunnittelua ja perusteluja eri osa-alueilla tehtyihin valintoihin. Kappale on jaettu suunnitteluvaiheiden osakokonaisuuksien mukaisesti.

## 5.1 Konstruktion suunnittelu

Aloituspalaverissa diplomityö rajattiin mekaanisen rakenteen suunnitteluun. Koelaitteen vaatimat mittausinstrumentit valitsivat diplomityönohjaajat. Suunnittelijalle jäi tehtäväksi valita instrumenttien kiinnityspaikat ja kiinnitystapa sekä huomioida instrumenttien vaatimat tilat konstruktiosta. Suunnitteluprosessissa on pyritty etenemään soveltaen sekä Pahl & Beitzin että Ulrich & Eppingerin kehittämää suunnittelumetodeja. Teorioiden mukaisesti suunnittelu aloitettiin esiselvityksellä ja konseptien luonnilla. Konsepteja ja konseptien osatoimintoja verrattiin toisiinsa sekä tehtiin rationaalisia ja vaatimuslistan tukemia ratkaisuja eri vaihtoehtoista. Parhaita vaihtoehtoja lähdettiin jatkokehittämään hienosuunnitteluvaiheessa.

Diplomityön aloituspalaverissa määritellyn alustavan vaatimuslistan pohjalta voitiin aloittaa laitteen oleellisten toimintojen hahmottelu ja valita osatoiminnot, jotka ovat eniten merkitseviä. Koelaitteella halutaan demonstroida liukulaakerin toimintaa ja siinä tapahtuvia tribologisia ilmiöitä. Laitteella täytyy pystyä mittaamaan liukulaakerissa vallitseva paine, voitelukalvon paksuus, laakerin kitka sekä laakerissa vallitseva lämpötila. Vaatimuslistan mukaan pyörimisnopeus tulee myös pystyä määrittämään. Rakenteelta vaaditaan, että se on kompakti ja helposti liikuteltava. Öljysäiliö täytyy pystyä sulkemaan kuljetuksen ajaksi. Vaatimuslistassa on lisäksi määrätty laakerin voitelutavaksi roiskevoitelu.

Suunnittelu aloitettiin hahmottelemalla laitteen rakennetta ja toimilaitteiden sijoittelua hyvin yksinkertaisella tasolla. Koelaitteella suunnitellaan oppilaskäyttöön, joten oli perusteltua tehdä päätös siitä, että koelaitteesta tehdään mahdollisimman avoin rakenne. Tällöin opiskelijalle jää mahdollisuus visuaalisesti havaita, mitä liukulaakerissa tapahtuu mittaus-suorituksen aikana. Keskeisimmät komponentit koelaitteessa ovat liukulaakerin toimintaa esittävät osat: akseli sekä laakerikenkä. Moottori pyörittää akselia, jota vasten laakerikenkä painetaan ennalta määritetyllä voimalla. Akseli vaatii myös laakerit, jotka täytyy valita koelaitteen rasiusten mukaisesti. Koelaitteen komponenttien sijoittelusta runkorakenteeseen tehtiin kaksi vaihtoehtoista ratkaisutapaa, jotka ovat esitetty kuvassa 5.1



**Kuva 5.1.** Hydrodynaamisen liukulaakerikoelaitteen rakenneluonnokset. Kuvassa vasemmallalla moottori asetettu akselin perään. Kuvassa oikealla moottori 90° kulmassa akseliin nähden.

Moottorin fyysinen koko sekä kiinnitystapa vaikuttavat merkittävästi koko konstruktion rakenteeseen ja komponenttien sijoitteluun. Moottorin mitoittaminen ja valinta oli siis perusteltua suorittaa ennen muiden komponenttien tarkempaa suunnittelua. Kuvassa esitetyissä konsepteissa voimansiirto akselille on toteutettu hammaspyörien välityksellä. Konseptisuunnittelua vietiin aluksi eteenpäin tällaisella ratkaisulla. Erilaisia moottorityyppejä hakiessa markkinoilta löydettiin kuitenkin moottori, jossa akseli kiinnitetään suoraan moottorin sisään. Lisäksi kyseinen moottori sisältää alennusvaihteen sekä pyörimisnopeuden säätimen. Näiden ominaisuuksien valossa valinta kohdistettiin kyseiseen moottoriin. Kun akseli kiinnitetään suoraan alennusvaihteen omaavan moottorin sisään, erillisiä hammaspyöriä ei tarvita. Ratkaisu on kustannusnäkökulmasta ja yksinkertaisuutensa vuoksi sopiva valinta koelaitteeseen.

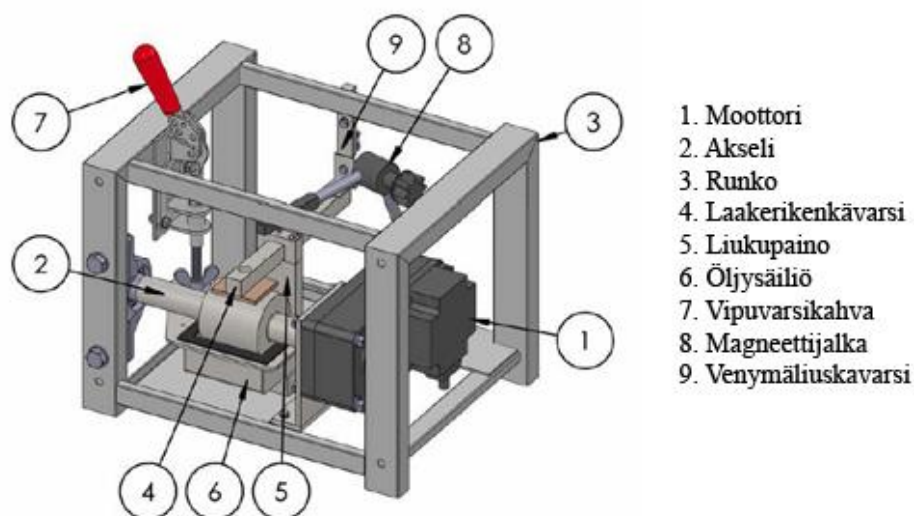
Akselin esisuunnitteluvaiheessa tiedettiin jo aloituspalaverissa tehdyn päätöksen perusteella, että akselin halkaisija tulee olla 60 mm laakerin kohdalta. Lisäksi valittu moottori määrää akselin halkaisijan moottoriin kiinnittyvältä osuudelta. Akselin suunnittelussa huomiota tuli ennen muuta kiinnittää akselin laakerikohdan pyöreyyteen. Akselin pitää olla mahdollisimman tasainen ja keskeisesti pyörivä tältä osuudelta, sillä tämä osuus demonstroi laakerikengän kanssa liukulaakeria.

Runko päätettiin valmistaa palkkirakenteena sen yksinkertaisen valmistuksen ja jäykän rakenteen vuoksi. Palkkien oikealla sijoittelulla rakenteesta saadaan riittävän jäykkä ja avoin. Rungolta vaaditaan riittävää jäykkyyttä, ettei muuan muassa moottori aiheuta mitaussuorituksen epäsuotuisaa värinää. Lisäksi koelaitteen vaatimien instrumenttien sijoittelu ja kiinnittäminen runkoon on mahdollista toteuttaa mutkattomasti.

Laakerille halutaan maksimissaan 1 kg:n kuormitus. Kuormituksen mahdollisia toteuttamistapoja hydrodynaamisessa koelaitteessa on useita. Maailmalla olevissa koelaitteissa kuormitusta luodaan muun muassa punnuksilla, hydraulisesti tai pneumaattisesti. Kuormitustapa voidaan kuitenkin valita mielivaltaisesti, pääasia on riittävä kuormitus laakerilla. Kuormituksen toteuttamisesta hydraulisesti tai pneumaattisesti luovuttiin jo esisuunnitteluvaiheessa. Toteutustavat vaativat oman oheislaitekokonaisuuden koelaitteen rinnalle sisältäen muun muassa pumpun ja kompressorin. Koelaitteen käyttötarkoitus, kustannustekijät sekä vaatimuslista eivät tue tällaista valintaa. Laakerin kuormitustavaksi valittiin punnus sen yksinkertaisen valmistuksen, kustannusten sekä helpon käytön vuoksi.

Moottorivalinnan ja kuormitustavan valitsemisen jälkeen suunnittelua jatkettiin laakerikenkävärren suunnittelulla. Laakerilla vaikuttavan voiman suuruus tulee olla säädettävissä. Suunniteltavan koelaitteen edeltäjässä punnukset riiputetaan kuormitusvarresta ja punnusten valinnalla voidaan säätää haluttu kuormitus laakerille. Uuden laitteen suunnittelussa lähtökohtana pidettiin, ettei laitteessa olisi mitään irrallisia osia. Kaikki osat halutaan olevan jollakin tapaa fyysisesti kiinni koelaitteessa. Kuvassa 5.2 on esitetty suunnitellun koelaitteen lopullinen kokoonpano, johon on numeroitu koelaitteen keskeisimmät komponentit.

Kuormituksen säätötavaksi suunniteltiin laakerikenkävarressa liikuteltava liukupaino. Kuormitusta säädetään siirtämällä liukupainon asemaa laakerikenkävarressa. Kitkavoiman mittaaminen tapahtuu laakerikenkävarren toiseen päähän kiinnitetyn ohuen tangon taipumasta venymäliuskan avulla. Liukulaakeria voitelevan öljyn kalvonpaksuuden mittausta suoritetaan LVDT lineaariliikkeen anturilla. Anturi on kiinnitetty runkoon, anturin asemäsäädön mahdollistavalla, magneettisella jalalla. Seuraavissa kappaleissa koelaitteen osatoimintojen toteuttajien suunnittelut ovat esitelty yksityiskohtaisemmin. Osien suunnittelua esiteltäessä keskitytään pääasiassa lopullisten ratkaisujen esittelyyn.



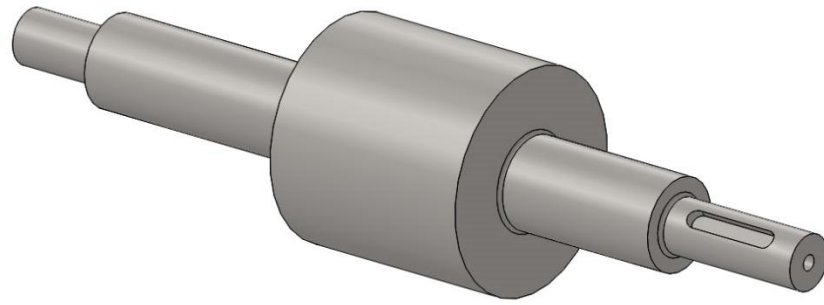
**Kuva 5.2.** Hydrodynaamisen liukulaakerikoelaitteen pääkomponentit. Kuvassa lopullinen kokoonpano.

### 5.1.1 Moottori ja akseli

Moottorin mitoittaminen ja valinta suoritettiin ennen kuin varsinaista komponenttien suunnittelua lähdettiin toteuttamaan. Tämä oli aiheellista sen vuoksi, että moottorin dimensiot sekä kiinnitystapa määrittelevät hyvin paljon, miten eri komponentit laitteeseen voidaan sijoittaa. Moottorin mitoituksessa käytettiin hyväksi vaatimuslistaan määriteltyjä toiminta-alue tietoja. Mitoituksen lähtöarvoina käytettiin tietoa siitä, että kuormitus liukulaakerilla on maksimissaan yhden kilogramman suuruinen. Lisäksi tiedettiin, että akselin halkaisija on tästä kohtaa 60 mm. Näillä tiedoilla pystyttiin laskemaan moottorilta vaadittava momentti, teho sekä pyörimisnopeus.

Moottorin tyyppi oli valittu jo esisuunnitteluvaiheessa, jolloin tehtiin päätös, että moottoriksi valitaan Oriental Motorin valmistama DC-moottori. DC-moottorin eduksi luetaan suuri vääntö alhaisilla pyörimisnopeuksilla. Lisäksi moottorin valintapäätökseen vaikutti se, että akseli on mahdollista kiinnittää suoraan moottorin sisään. Moottorin valintaa tarkennettiin mitoituslaskujen avulla, jolloin pystyttiin valitsemaan ominaisuuksiltaan soveltuvimman moottorin koelaitteeseen. Moottorin tehovaatimuksia määritettäessä kitkakertoimelle käytettiin arvoa 1. Moottorivalinta kohdistui tyyppimerkinnältään BLH450KC-20FR moottoriin. Moottori on teholtaan 50 W, vääntömomentti on 3,4 Nm ja maksimi-pyörimisnopeus 150 rpm. Hydrodynaamisessa liukulaakerikoelaitteessa on tärkeää, että moottorin pyörimisnopeus voidaan säätää mahdollisimman pieneksi. Valittu moottori sisältää pyörimisnopeuden säätimen sekä alennusvaihteen välityssuhteella 1:20. Valmistaja ilmoittaa minimipyörimisnopeudeksi moottorille 5 rpm. Moottorin tekniset tiedot ovat nähtävillä kokonaisuudessaan liitteessä 1.

Alkupalaverissa tehdyn päätöksen perusteella tiedettiin, että akselin (kuva 5.3) halkaisija on 60mm siltä osuudelta, josta se on kontaktissa laakerikenkään. Moottorivalinnan myötä tiedettiin myös, että akselin halkaisija moottoriin kiinnittyvältä osuudelta tulee olla 15 mm toleranssilla h7. Valittu moottori edellyttää myös, että akselin halkaisija moottorista ulos tulevalla osuudelle on 25 mm. Akseli on laakeroitu toisesta päästä kuulalaakerilla runkorakenteeseen. Laakeriksi on valittu SKF:n kuulalaakeri, joka vaatii, että akselin halkaisija laakeriin kiinnittyvällä osuudelle on 15 mm toleranssilla h9. Toiminnan kannalta akselin merkittävin osuus on laakerikengän kanssa kontaktissa oleva kohta. Akselin valmistuspiirustuksessa siihen on määrätty geometrinen toleranssi niin, että moottorin pyörittäessä akselia, se pyörii tasaisesti keskiakselinsa ympäri.

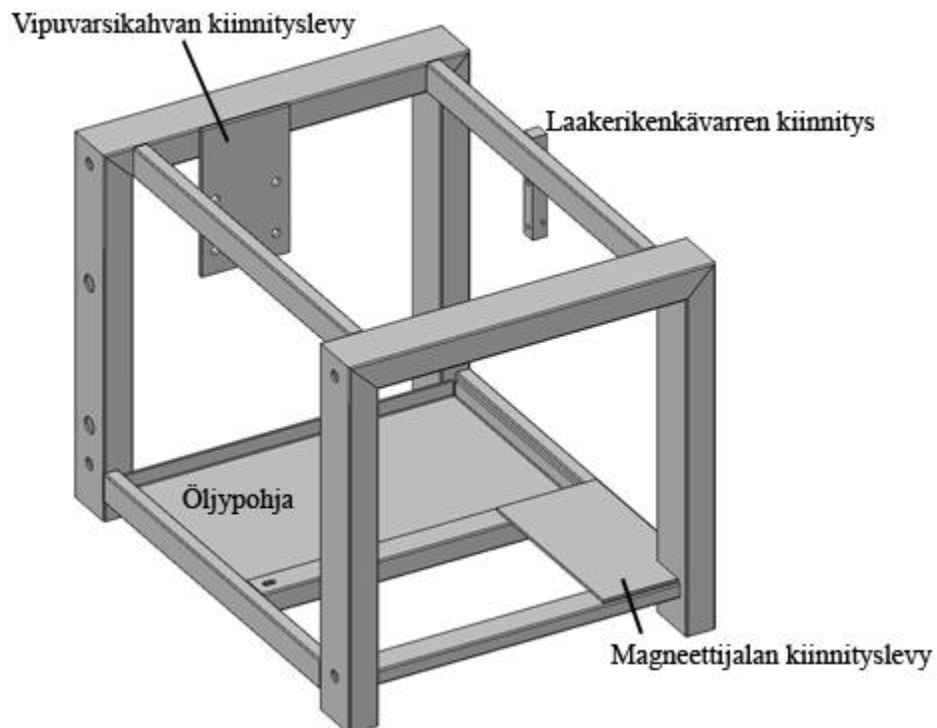


*Kuva 5.3. Hydrodynaamisen liukulaakerikoelaitteen akseli.*

Moottorin akselia pyörittävä voima välittyy akseliin kiilauraan asetetun kiilan välityksellä. Kiila toimitetaan moottorin mukana, jolloin toteutettavaksi jäi kiilauran mitoitus. Kiilauran dimensiot saatiin moottorivalmistajan katalogista ja toleranssit standardista SFS 2636.

### 5.1.2 Runko

Koelaitteen runko (kuva 5.4) valmistettiin hitsaamalla RHS-palkeista. Rakenne on jäykkä, helposti valmistettava sekä valmistuskustannuksiltaan edullinen. Runkorakenne sisältää keuhikon lisäksi öljysäiliön korkeussäädön mahdollistavan vipuvarsi-kiinnityksen, laakerikenkävaren kiinnityksen, LVDT anturin magneettijalan kiinnityslevyn sekä öljypohjan

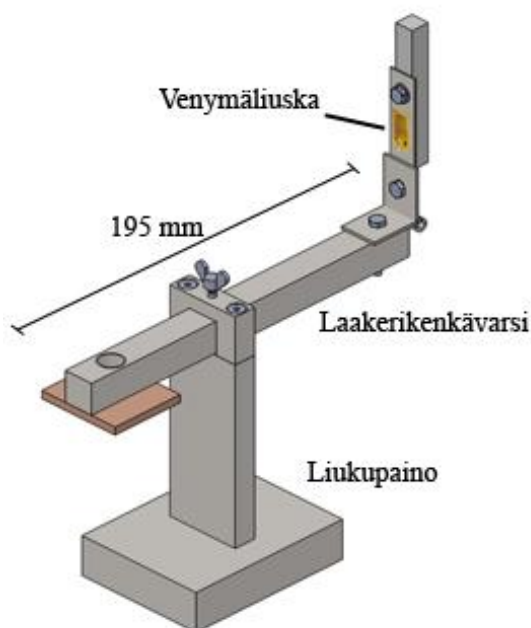


*Kuva 5.4. Hydrodynaamisen liukulaakerikoelaitteen runkorakenne.*

Öljypohjan tarkoitus on estää mahdollisten öljyvuotojen valuminen koelaitteen ulkopuolelle. Öljypohja kattaa rakenteesta koko öljysäiliön puoleisen osuuden. Rungon keskimäiseen vaakapalkkiin on tehty vapaareiät moottorin kannakkeen kiinnittämistä varten. Reiät ovat ovaalireikiä, jotta moottori ja akseli saadaan kiinnitettyä oikeaan kohtaan. Lisäksi yhteen rungon pystypalkeista on tehty reiät laakerin kiinnittämistä varten.

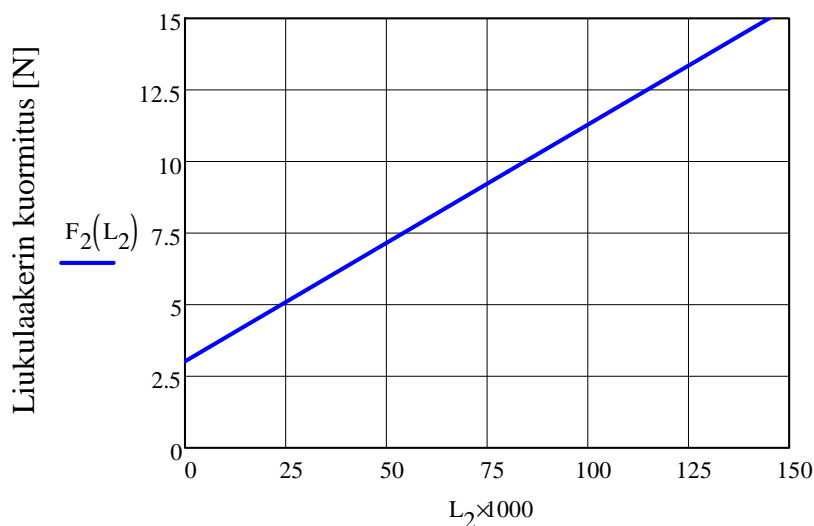
### 5.1.3 Laakerikenkävarsi ja liukupaino

Laakerikenkävarsi (kuva 5.5) välittää kuormituksen akselille. Laakerikenkävarrella on lisäksi kaksi muuta tehtävää. Öljynpaineen mittausta tapahtuu laakerikenkävarren päähän sijoitetun pronssisen laakerikengän läpi. Paineanturi kiinnitetään varren päässä oleviin kierteisiin. Laakerikenkävarsi on nivelöity saranalla kiinni runkoon, mikä mahdollistaa laakerikengän vertikaalisen liikkeen. Öljykalvon paksuuden mittaamiseen käytettävän LVDT-anturin tuntoelin asetetaan laakerikengän päälle, josta se mittaa laakerikengän vertikaalisen aseman muutosta öljykalvon paksuuden vaihdella.



**Kuva 5.5.** Laakerikenkävarsi, liukupaino sekä venymäliuska kiinnitettynä ohueen taipuisaan tankoon.

Kuormituksen säätö tapahtuu liikuttamalla liukupainoa laakerikenkävarren vaakasuoralla osuudella. Liukupaino kiristetään haluttuun asemaan siipimutterilla. Kuvassa 5.6 on esitetty liukupainon teoreettinen paikka varrella, kun laakerille halutaan tietty kuormitus. Kuvan tarjoamaa informaatioita ei tule kuitenkaan noudattaa orjallisesti. Ennen mittaus-suoritusten toteuttamista liukupainon asema ja laakerin kuormitus tulee kalibroida, jotta koelaitteella saadaan luotettavia mittaustuloksia.



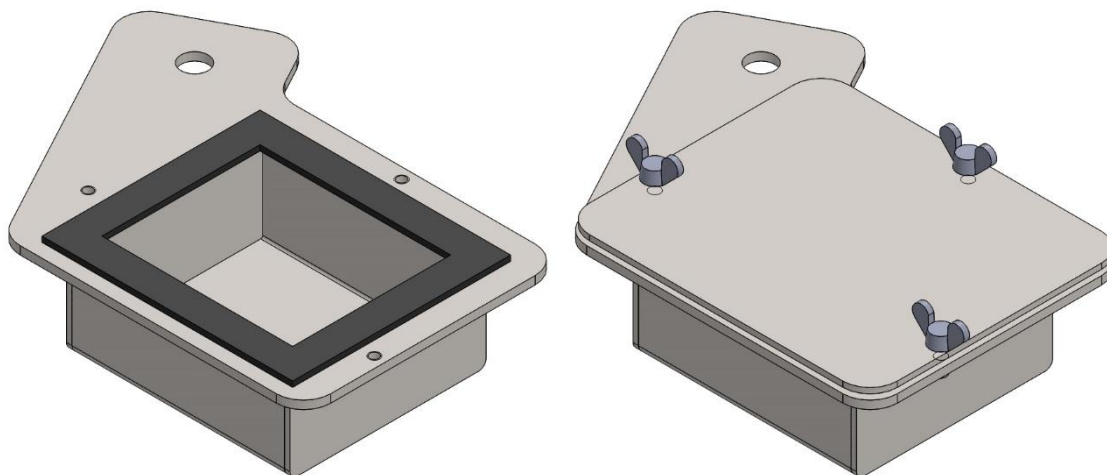
Liukupainon etäisyys kontaktikohdasta [mm]

**Kuva 5.6.** Liukulaakerin kuormitus liukupainon paikan funktiona.

Laakerikenkävarsi on kiinnitetty saranalla metallista valmistettuun taipuisaan tankoon. Kitkavoiman vaikutuksesta laakerikenkä pyrkii liikkumaan akselin pyörimisliikkeen tangentin suuntaan. Kitkavoiman aiheuttama laakerikengän siirtyminen akselilla taivuttaa laakerikenkävarren runkoon kiinnittävää tankoa. Tankoon on kiinnitetty venymäliuskat kitkavoiman mittaamista varten.

#### 5.1.4 Öljysäiliö

Öljysäiliön (kuva 5.7) tehtävä on varastoida laakerin voiteluun tarvittava öljy. Laakerin voitelu on toteutettu roiskevoitelulla. Öljysäiliöön laitetaan öljyä sen verran, että osa akselista on kosketuksissa öljyyn. Öljysäiliön tiivistäminen laitteen käytön sekä kuljetuksen aikana olivat osan keskeisimpiä suunnittelulähtökohta. Kun akseli pyörii öljysäiliössä, se aiheuttaa ikäviä roiskeita koelaitteen ympäristöön. Öljyn kestävä tiivistenauha on liimattu öljysäiliön reunoille estämään öljyn roiskumista. Sama tiivistenauha tiivistää öljysäiliön kuljetuksen aikana, jolloin säiliön kansi on puristettu kiinni siipiruuveilla.



**Kuva 5.7.** Öljysäiliö. Kuljetuksen ajaksi öljysäiliö suljetaan siipiruuveilla kiinnitettävän kannen avulla.

Koelaitteen kuljetuskuntoon laittaminen edellyttää, että öljysäiliö suljetaan kannella. Kuljetuksen ajaksi öljysäiliö lasketaan akselin alapuolelle. Säiliön laskeminen mahdollistaa sen sulkemisen riittävän tiiviisti. Laskemin tapahtuu öljysäiliön kulmaan kiinnittävän vipuvarsikahvan avulla. Vipuvarsikahva lukittuu sekä ylä- että ala-asentoon. Öljysäiliö on kiinnitetty kahvasta tulevaan kierretankoon siipimuttereilla. Siipimutterikiinnitys mahdollistaa öljysäiliön korkeuden hienosäädön niin, että käytön aikana akselin ja öljysäiliön tiivistenauhan väli on mahdollisimman pieni roiskeiden estämiseksi.

### 5.1.5 Mittausjärjestelmä ja anturivalinnat

Hydrodynaamisen liukulaakerikoelaitteen mittausjärjestelmä koostuu öljynpainetta mittaavasta paineanturista, öljykalvon paksuutta mittaavasta LVDT lineaariliikkeen anturista, kitkavoimaa mittaavasta venymäliuska-anturista, venymäliuskavahvistimesta, mittakortista sekä mittausohjelmasta. Työn vaatimuslistan mukaan laakerissa vallitsevaa lämpötilaa halutaan myös mitata. Lämpötilan mittaaminen tapahtuu koelaitteesta erillisellä mittalaitteella, joten laitteen suunnittelussa lämpötilamittaukseen ei ole otettu kantaa. Mittakortina käytetään samaa korttia, kuin laitteen edeltäjässä. Mittakortti (kuva 5.8) on malli merkinnältään National Instruments USB-6008, joka sisältää kahdeksan analogista sisääntuloa.



**Kuva 5.8.** Mittakortti NI USB-6008. (National Instruments 2015)



Käytettävä mittausohjelmisto on LabView kampuslisenssillä. LabView on samalta valmistajalta, kuin mittakortti. Venymäliuskaksi koelaitteeseen on valittu Kyowan anturi mallia KKG-2-120-D16-11L3M2S. Anturin tekniset tiedot ovat nähtävillä työn liitteessä 2. Venymäliuskavahvistimeksi laitteeseen on valittu Scaime CPJ / CPJ2S, jonka tarkat tekniset tiedot ovat työn liitteessä 3. Paineen mittaamiseen käytetään suhteellista painetta mittaavaa paineanturia mallimerkinnältään EPT3100-A-0100-B-2-F. Paineanturin tiedot ovat työn liitteessä 4. Öljykalvon paksuutta mitataan LDVT anturilla laakerikengän asennon muutoksesta. Anturi kiinnitetään kuvassa 5.9 esitettyyn nivelöityyn magneettijalkaan.



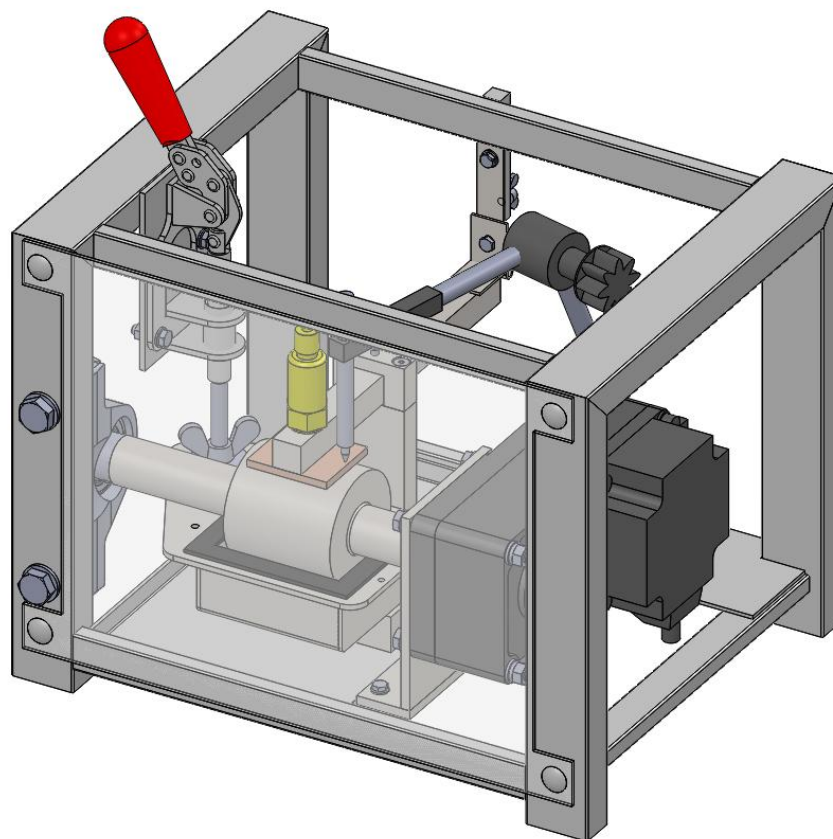
*Kuva 5.9. Magneettijalka LVDT-anturin kiinnittämistä varten. (Teräskonttori 2015)*

Tukijalan pohjassa on magneetti, jonka ansoista jalka pystyy tukevasti paikallaan mittauksen sekä kuljetuksen aikana. Mittausjärjestelmä on kokonaisuudessaan hyvin samankaltainen kuin aikaisemmin oppilaslaboratoriossa käytössä olleessa koelaitteessa.

## 5.2 Lopullinen kokoonpano

Koelaitteen lopullinen kokoonpano muodostuu kiinnittämällä edellä suunnitellut osakokoonpanot toisiinsa. Moottorin kannake, moottori, akseli sekä akselin laakeri ovat kokoonpanon ensimmäiseksi kiinnitettävät osat. Akseli kiinnitetään moottoriin niin, että se asettuu vaakatasoon. Akseli kiinnitetään toisesta päästään koelaitteen runkorakenteeseen kiinnitettävään laakeriin. Seuraavaksi runkorakenteeseen kiinnitetään De-sta-co:n vipuvarsikahva sille varattuun levyyn. Kiinnitys tapahtuu pulteilla ja muttereilla. Kahva käännetään yläasentoon, eli asentoon, jossa se tulee olemaan koelaitetta käytettäessä. Kahvan kiinnittämisen jälkeen öljysäiliö asennetaan sopivalle korolle askeliin nähden. Öljysäiliön korkeuden hienosäätö on mahdollista suorittaa vielä myöhemmin. Öljysäiliö kiristetään paikoilleen vipuvarsikahvasta tulevaan kierretankoon siipimuttereiden avulla. Ennen kuin laakerikenkävarsi voidaan kiinnittää saranaan, liukupaino tulee asettaa paikoilleen.

Hydrodynaamisen liukulaakerikoelaitteen lopullinen kokoonpano on esitetty kuvassa 5.10, jossa koelaitteen komponentit ovat asetettu mitta-asentoon. Käyttökunnossa öljysäiliön kansi on irrotettu ja säiliö on nostettu ylös, jotta akseli on kosketuksissa öljyyn. Koelaitteen kokoonpanopiirustus on esitetty työn liitteessä 5.



**Kuva 5.10.** Hydrodynaamisen liukulaakerikoelaitteen lopullinen kokoonpano, johon on myös käyttäjää suojaava pleksi kiinnitetty.

Koelaitteen turvallisuusnäkökulma tuli suunnittelussa ottaa myös huomioon. Koelaitteessa pyörivä akseli tai akselia vasten painautunut laakerikenkä voivat aiheuttaa arvaamattomia tilanteita, jos niiden kanssa joutuu kosketuksiin jotain sinne kuulumatonta. Koelaitteen käyttäjän suojaksi laitteeseen on asennettu muovista valmistettu suojapelleiksi. Lisäksi pleksi estää mahdollista öljyn roiskumista käyttäjän päälle, vaikka öljysäiliön tiivistysnauhan ansioista roiskeet ovat epätodennäköisiä.

## 6 TAPPI-KIEKKO-KOELAITTEEN SUUNNITTELU

Tarve uudelle tappi-kiekkokoelaitteelle oli perusteltua. Nykyinen oppilaslaboratoriossa käytettävä tappi-kiekkokoelaitte on kymmeniä vuosia vanha. Koelaitte suoriutuu tehtävästään, mutta se alkaa olemaan elinkaarensa päässä. Modernimmalle, nykyaikaiselle, koelaitteella oli tarvetta. Nykyisen laitteen suurimpia ongelmakohtia ovat sen fyysinen koko sekä mittauspään merkittävä värähtely. Ison kokonsa vuoksi mittauslaitetta on hankala liikutella laboratoriossa. Oppilaskäyttöön tarkoitettua koelaitetta ei käytetä jatkuvasti. Laboratoriotilan vapauttamiseksi muuhun käyttöön, koelaitte voidaan siirtää kaapistoon, josta se tarvittaessa otetaan käyttöön. Uuden laitteen tulee siis olla kompakti ja helposti liikuteltava. Koelaitteen vaatimuslista määriteltiin karkealla tasolla diplomityön aloituspalaverissa. Vaatimuslista muokkautui ja tarkentui projektin edetessä, kun tieto aiheesta kasvoi ja rakenteen ongelmakohdat hahmottuivat selkeämmin. Taulukossa 6.1 on esitetty vaatimuslista lopullisessa muodossaan.

*Taulukko 6.1. Tappi-kiekkokoelaitteen vaatimuslista.*

VAATIMUSLISTA	
Tappi-kiekkokoelaitte	
V/T	VAATIMUKSET
	<b>Rakenne:</b>
V	Kompakti
V	Helposti liikuteltava
V	Koepalat helposti vaihdettavia (kiekko ja tappi)
	<b>Toiminta-alue:</b>
V	Kuormitus: 0-2 kg
V	Kehänopeus 0-0,5 m/s
V	Lämpötilan tarkkuus: +/- 1°C
V	Normaalivoiman tarkkuus: 1 N
	<b>Mitattavat suureet:</b>
V	Kitka
V	Lämpötila
V	Pyörimisnopeus
V	Normaalivoima
	<b>Muuta:</b>
V	Turvallinen
V	Halpa
V	Helppokäyttöinen
T	Ohjelmistosovellus

Koelaitteen keskeisimpiä suunnitteluongelmia esitellään tarkemmin tässä kappaleessa kunkin osakokonaisuuden esittelyn yhteydessä. Suunnitteluvaiheiden selostamisessa keskitytään pääasiassa lopullisten ratkaisujen esittämiseen.

## 6.1 Konstruktion suunnittelu

Ennen varsinaisen konstruktiivisen suunnittelun aloittamista tiedostettiin koelaitteen toimintaperiaate ja laitteen vaatimat instrumentit. Laitteella mitattavat suureet ovat koetapin ja kiekon välinen kitkavoima sekä liukupinnoissa vallitseva lämpötila. Tappi–kiekko-koelaitteella on tarkoitus määrittää halutun materiaalin kulumisnopeus ja kulumiskerroin sekä materiaaliparin kitkakerroin. Moottorin pyörimisnopeus täytyy myös olla mitattavissa. Mittausjärjestelmän vaatimien instrumenttien valinnan suorittivat diplomityön ohjaajat, jolloin diplomityö rajautui mekaanisen rakenteen suunnitteluun. Mittausjärjestelmästä huomioitavaksi suunnittelijalle jäi instrumenttien tilavaraukset sekä kiinnitykset. Suunnitteluprosessissa on pyritty etenemään soveltaen sekä Pahl & Beitzin, että Ulrichin kehittämiä suunnittelumetodeja. Teorioiden mukaisesti suunnittelu aloitettiin esiselvityksellä ja konseptien luonnilla. Konsepteja ja konseptien osatoimintoja verrattiin toisiinsa sekä tehtiin rationaalisia ja vaatimuslistan tukemia ratkaisuja eri vaihtoehdoista, joita lähdettiin jatkokehittämään hienosuunnitteluvaiheessa.

Suunnittelu aloitettiin runkorakenteen hahmottelulla. Hahmotelmassa luotiin pohjaa, miten komponentit kannattaa sijoittaa laitteeseen optimaalisen toiminnan kannalta. Rakenteen muotoa ja komponenttien sijoittamista määrittivät vaatimuslistan rakenteelle asettamat ehdot: kompakti, helposti liikuteltava ja koetapin sekä kiekon helppo vaihtaminen. Koelaitteen runkorakenteen tulee olla mahdollisimman jäykkä, ettei mittauksen aikana rakenteen värähtely aiheita mittausvirheitä. Parhaana vaihtoehtona rungon valmistukseen pidettiin alusta asti palkkirakennetta. Palkkirakenteena toteutettu runko on yksinkertainen valmistaa ja siitä saadaan oikeanlaisella palkkien sijoittelulla tarpeeksi jäykkä.

Tappi–kiekko-koelaitteessa koepala asetetaan kohtisuoraan asentoon kiekkoon nähden ja koepala liukuu kiekon pinnalla ympyräradalla. Pyörivässä liikkeessä voi olla joko kiekko tai koepala. Suunnittelun hyvin aikaisessa vaiheessa päädyttiin ratkaisuun, jossa pyörivä komponentti on kiekko. Tällainen ratkaisu tuntui yksinkertaisemmalta toteuttaa. Koetappi ja kiekko voidaan sijoittaa joko vertikaalisesti tai horisontaalisesti. Konseptisuunnitteluvaiheessa molemmista ratkaisuvaihtoehdoista tehtiin luonnos.

Yksi keskeisimmistä suunnitteluongelmista oli, miten voima tuotetaan koepalalle. Voiman tuottaminen tulee toteuttaa kustannustehokkaasti, helppokäyttöisesti ja kokonaisuutena mahdollisimman yksinkertaisesti. Suunnittelupöydällä oli muutamia vaihtoehtoisia toteuttamistapoja. Kuormitus voidaan toteuttaa punnuksilla, hydraulisesti, pneumaattisesti tai puristusjousen avulla. Hydraulisella tai pneumaattisella toimilaitteella toteute-

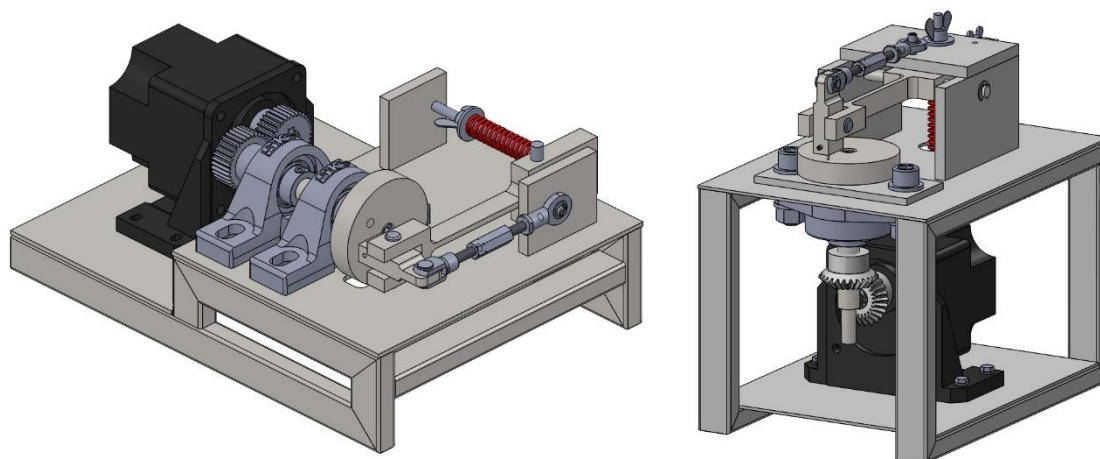
tusta ratkaisusta luovuttiin jo esisuunnitteluvaiheessa. Tällaiset järjestelmät vaativat toimiakseen oman oheislaitekokonaisuuden sisältäen muun muassa kompressorin ja pumppun. Lisäksi valmistuskustannukset sekä laitteen koko olisivat kasvaneet merkittävästi, jos valinta olisi kohdistunut näihin vaihtoehtoihin. Esisuunnittelua jatkettiin punnuksen ja jousen osalta. Vaihtoehdot pisteytettiin taulukon 6.2 mukaan.

**Taulukko 6.2.** Vertailutaulukko voiman tuottamiseen punnuksella tai jousella.

Ominaisuus	Painoarvo %	Punnus		Jousi	
		Pisteet	Painotetut pisteet	Pisteet	Painotetut pisteet
Kompaktius	25	2	0,5	4	1
Liikuteltavuus	25	3	0,75	4	1
Säätötarkkuus	15	4	0,6	3	0,45
Edullisuus	15	4	0,6	4	0,6
Helppokäyttöisyys	20	4	0,8	4	0,8
Kokonaispisteet		3,25		3,85	
Järjestys		2		1	
Jatkokehitykseen?		Ei		Kyllä	

Vertailukriteereinä käytetyt ominaisuudet valittiin vaatimuslistan pohjalta. Painoarvoltaan tärkeimmät ominaisuudet ovat kompaktius, liikuteltavuus sekä helppokäyttöisyys. Jos vaadittu kuormitus olisi haluttu toteuttaa punnuksilla, niiden fyysinen koko olisi kasvanut huomattavan isoksi. Isojen punnusten käsittelyä ja kiinnittämistä laitteeseen ei nähty perusteltuna ratkaisuna, kun vaihtoehtoa heijastettiin vaatimuslistaan. Säätötarkkuudessa punnuksilla voidaan päästä hieman parempaan lopputulokseen, mutta oppilaboratorioon tarkoitettussa koelaitteessa säätötarkkuus ei ole yhtä merkittävässä roolissa kuin muut ominaisuudet. Ratkaisuksi valittiin voiman tuottaminen puristusjousen avulla.

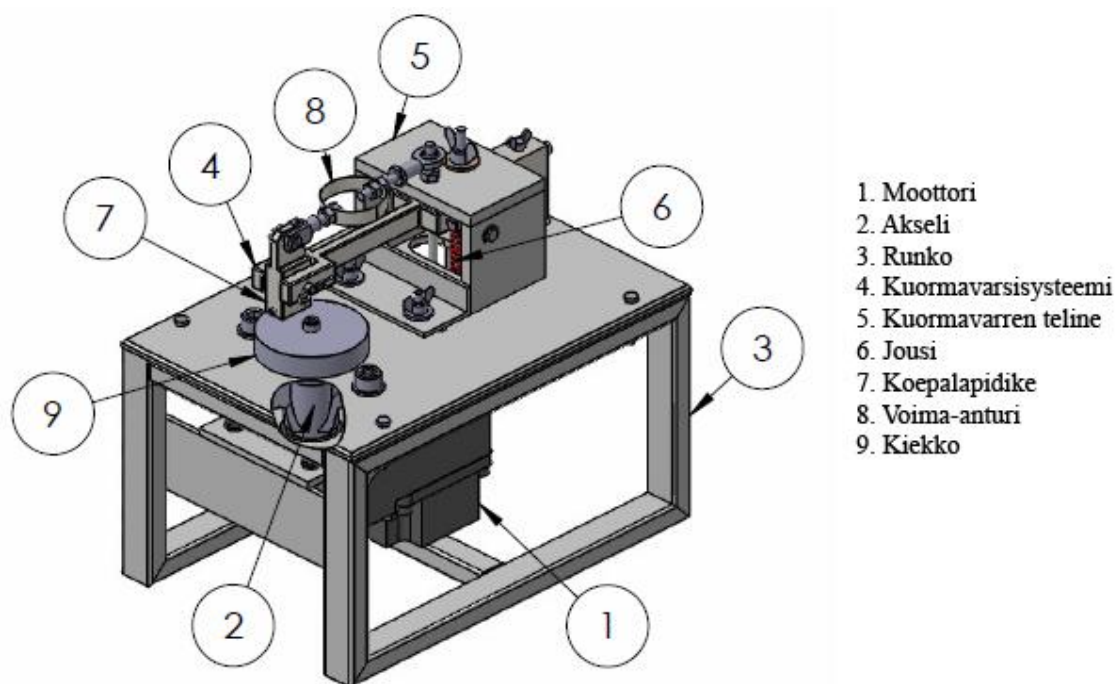
Kiekkoa pyöritetään moottoriin kiinnitetyn akselin avulla. Moottorin mitoitusparametrit täyttäviä moottoreita on markkinoilla useita. Konseptivaiheessa luonnoksena oli aluksi hammaspyörillä toteutettu voimansiirto. Tällainen ratkaisu vaatii hammaspyörrien mitoittamisen moottorin akseliin sekä käytettävään akseliin. Rakenteen eri konseptit ovat esitelty kuvassa 6.1. Kuvasta nähdään myös tässä kappaleessa aikaisemmin mainitut vaihtoehdot akselin asennosta.



**Kuva 6.1.** Rakenneluonnokset. Kuvassa vasemmalla konsepti, jossa akseli on asetettu vaakatasoon. Kuvassa oikealla konsepti, jossa akseli on asetettu pystyasentoon.

Koelaitteeseen sopivaa moottoria etsiessä markkinoilta löytyi moottori, jossa akseli sijaitaan suoraan moottorin sisään. Kyseinen moottorityyppi sisältää myös alennusvaihteen. Nämä ominaisuudet poistavat tarpeen hammaspyörien mitoittamiseen ja hankkimiseen. Moottorivalinta kohdistettiin siis vaihtoehtoon, jota ei ensimmäisissä luonnoksissa vielä ollut mukana. Moottorin mitat ja muoto ratkaisivat myös akselin asettamisen pystysuoraan asentoon.

Luonnostelun jälkeen aloitettiin komponenttien ja rakenteen hienosuunnittelu. Suunnittelu jaettiin osatoimintoihin, jolloin laitteen kehittäminen on suunnittelun edetessä helpompaa. Koelaitteen osatoiminnot ovat moottori, akseli, runko, kuormavarsisysteemi sekä kiekko. Näistä keskeisimmät kokonaisuudet laitteen toiminnan näkökulmasta ovat kiekko ja kuormituksen koetapille välittävä kuormavarsisysteemi, jonka suunnittelussa tuli kiinnittää ennen kaikkea huomioita varren jäykkyyteen. Kuormavarsi ei saa taipua eikä vääntyä koelaitetta käytettäessä, ettei mittaustapahtuma häiriinny. Koetapin etäisyyden säätäminen kiekon keskipisteestä pitää olla myös mahdollista. Kuvassa 6.2 on koelaitteen lopullinen kokoonpano, johon on numeroitu koelaitteen keskeisimmät komponentit. Tappi-kiekko-koelaitteen kokoonpanopiirustus on esitetty työn liitteessä 6.



1. Moottori
2. Akseli
3. Runko
4. Kuormavarsisysteemi
5. Kuormavarren teline
6. Jousi
7. Koepalapidike
8. Voima-anturi
9. Kiekko

*Kuva 6.2. Tappi-kiekko-koelaitteen pääkomponentit. Kuvassa on koelaitteen lopullinen kokoonpano.*

### 6.1.1 Moottori ja akseli

Moottorin mitoitusvaatimukset saatiin vaatimuslistaan määritellyistä toiminta-alue rajoista. Koepalan kiekkoon kohdistama kuormitus tulee olla maksimissaan kaksi kilogrammaa. Kehänopeus kiekon mittauskohdassa tulee olla maksimissaan 0,5 m/s. Kitkakertoimenä laskuissa käytettiin arvoa 1. Näistä lähtötiedoista laskettiin moottorilta vaadittava momentti, teho sekä pyörimisnopeus. Laskennan tuloksena saatiin vaadituksi momentiksi 0,6 Nm, tehoksi 10 W ja pyörimisnopeudeksi 159 kierrosta minuutissa. Moottoriksi valittiin Oriental motor BLH450KC-20FR DC-moottori, jonka tekniset tiedot ovat nähtävillä liitteessä 1. Valittu moottori soveltuu käyttötarkoitukseensa hyvin. Valintaa perustelevat moottoriin integroitu vaihteisto ja akselin kiinnitys suoraan moottorin sisään. Näiden ominaisuuksien vuoksi voimansiirtoa ei tarvitse erikseen mitoittaa, jolloin säästetään myös kustannuksissa. Lisäksi Orientalmotorin valmistama moottori sisältää pyörimisnopeuden säätimen, jolla nopeutta voidaan säätää portaattomasti alueella 5-150 kierrosta minuutissa. Tämä ominaisuus säästää kustannuksia, sillä erillistä potentiometriä ei tarvitse hankkia. Moottorivalmistaja toimittaa moottorin yhteydessä myös akselin kiilan, joka edelleen vähentää suunnittelutarvetta.

Moottori määrää osittain akselin mitat. Akselin tulee olla moottoriin kiinnittyvältä osuudelta halkaisijaltaan 15 mm. Valittu moottori määrää myös moottoriin kiinnittyvälle akselin osuudelle toleranssiksi h7. Moottorin teknisissä tiedoissa moottorirungosta ulostulevalle akselin osuudelle on määrätty halkaisijaksi 25 mm. Toleranssia moottorivalmistaja ei tälle osuudelle vaadi, mutta akseli on tästä kohdasta laakerin sisällä ja laakerival-

mistaja SKF vaatii halkaisijatoleranssiksi h9. Akselissa on tämän lisäksi vielä yksi halkaisijaltaan suurempi osuus, josta akseli kiinnitetään kuusioruuvilla kiekon pohjassa olevaan syvennykseen. Halkaisijan arvo tässä kohtaa on 30 mm toleranssilla h9. Niin kuin edellä mainittiin, moottorivalmistaja toimittaa moottorin yhteydessä akselin kiilan. Dimensiot akselin kiilauralle saatiin siis moottorivalmistajan katalogista. Kiilauran valmistoleranssit suunniteltiin standardin SFS 2636 mukaan. Isometrinen kuva akselistä on esitetty kuvassa 6.3.

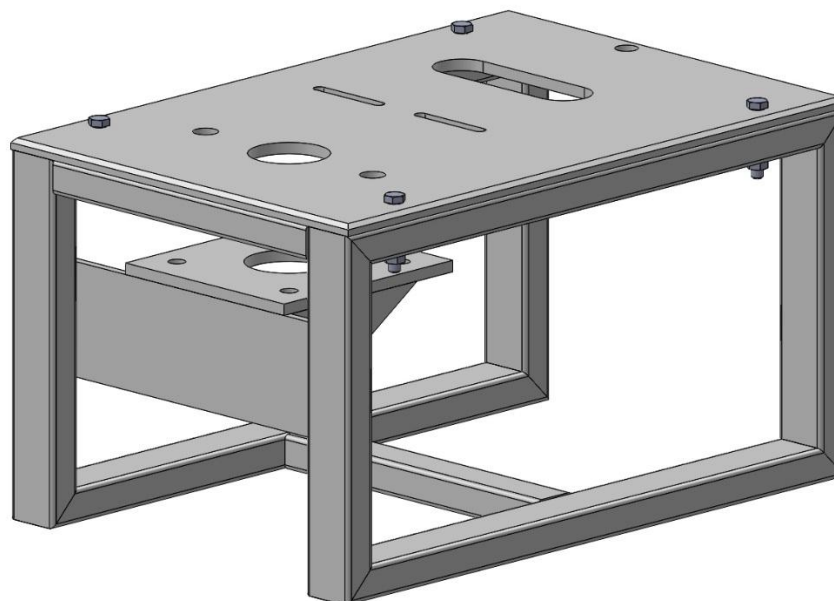


*Kuva 6.3. Tappi-kiekko-koelaitteen akseli.*

### **6.1.2 Runko**

Koelaitteen runko toteutettiin palkkirakenteena (kuva 6.4). Palkkirakenne on jäykkä ja yksinkertainen valmistaa. Runko on sivuiltaan avoin, joten mittausjärjestelmän vaatimat instrumentit ovat helppo kiinnittää rakenteeseen. Rungon mittoja määrittivät pääosin edellä valitun moottorin ulkomitat sekä kiinnitystapa, jotka saatiin moottorivalmistajan katalogista. Moottori tulee kiinnittää runkoon tukevasti, ettei moottorin käyttö aiheuta mittaustapahtumaa häiritsevää värähtelyä.



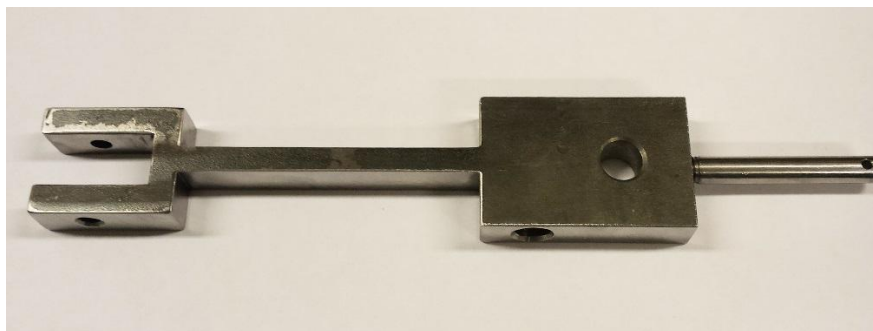


*Kuva 6.4. Tappi-kiekkokoelaitteen runko.*

### 6.1.3 Kuormavarsisysteemi

Kuormavarsi siirtää jousen tuottaman voiman koepalalle, joten näiden komponenttien mitoitus ja suunnittelu oli aiheellista suorittaa samanaikaisesti. Vaatimus on, että koepalalle saadaan tuotettua 0 – 2 kilogramman kuormitus sen painautuessa pyörivää kiekkoa vasten. Kuormitusta tulee pystyä säätämään yhden Newtonin suuruisen voiman tarkkuudella. Lisäksi koetapin etäisyyttä kiekon keskiakselista täytyy pystyä säätämään. Kuormitusjärjestelmää suunniteltaessa tähän vaatimukseen pureuduttiin ensimmäisenä. Vaatimus täytettiin koelaitteen käyttötasolla liikuteltavan telineen avulla. Kuormavarrentelineessä on poikittaisakseli, johon kuormavarsi on laakeroitu liukulaakereilla. Teline kiinnitetään rungon käyttötasoon siipimuttereilla. Siipimuttereita avaamalla telineen paikkaa voidaan säätää niin, että koetappi asettuu halutulle etäisyydelle kiekon keskiakselista.

Kuormitusvarren (kuva 6.5) geometriaan ja jousivalintaan haettiin ratkaisua iteroimalla kolmea muuttujaa: jousivoima, jousivakio ja koepalalle siirretyn voiman välityssuhde. Välityssuhde on jousen tuottaman voiman etäisyys kuormitusvarren akselista suhteessa akselin etäisyyteen koetapista. Sopiva ratkaisu löydettiin jousella, jonka jousivakio on 5 N/mm, jousivoima 133,4 N ja välityssuhde 1:5.



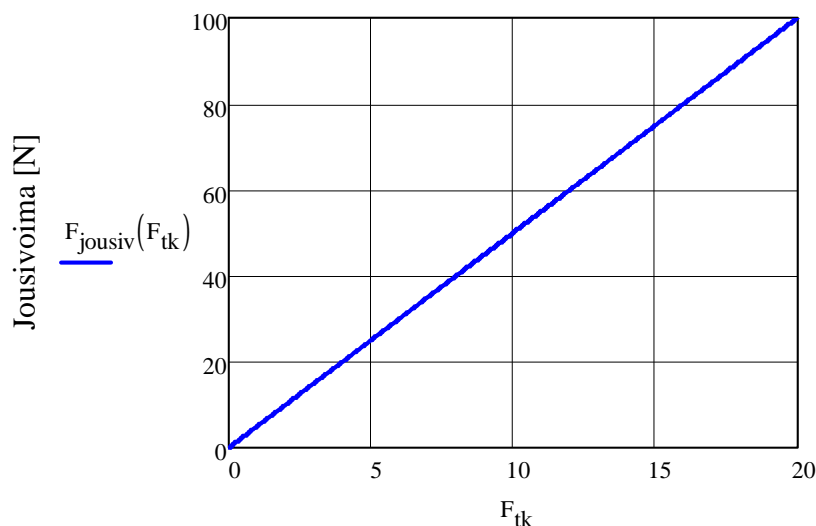
**Kuva 6.5.** Tappi-kiekkokoelaitteessa käytetty jousen tuottaman voiman koetapille välittävä kuormavarsi.

Taulukossa 6.3 on listattu valitun jousen tekniset tiedot. Jousen mitoituslaskelmat löytyvät kokonaisuudessaan liitteestä 7.

**Taulukko 6.3.** Valitun puristusjousen tekniset tiedot. (Lesjöfors 2015)

<b>LESJÖFORS 1542/SF-TF-SS1774-04</b>	
Jousivakio	5 N/mm
Jousivoima	133,4 N
Jousen lepopituus	75 mm
Pituus maksimipuristuksessa	48,2 mm
Kokoonpuristuvuus	26,8 mm
Jousilangan halkaisija	2 mm
Sisähalkaisija	10 mm
Kierteiden määrä	19,7

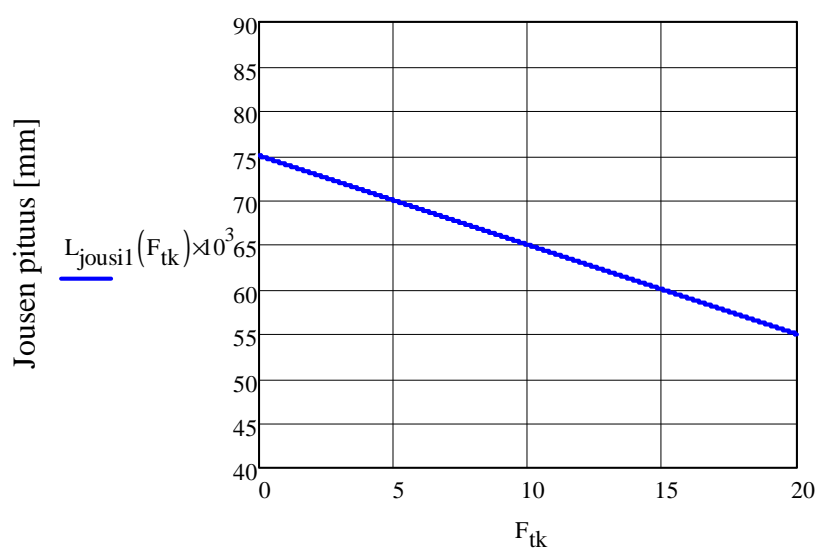
Kyseinen jousi on sopiva valinta laitteeseen, koska siinä on riittävä jousivoima sekä riittävästi kokoonpuristuvuutta, joka mahdollistaa tarkan kuormituksen säädön. Merkittävin jousen valintaan vaikuttava ominaisuus oli jousivakio. Tasalukuinen jousivakio tekee kuormituksen säädöstä koelaitteen käyttäjän näkökulmasta helpompaa. Jousen lävitse kulkee kierretanko, joka on hitsattu toisesta päästä josta tukevaan teräslevyyn. Kierretangon yläpäässä on siipimutteri, jota kiertämällä jousen tuottamaa voimaa voidaan säätää. Kuvasta 6.6 nähdään jousivoiman ja koetapin kuormituksen suhde.



Koetapin kuormitus [N]

**Kuva 6.6.** Jousivoima koetapin kuormituksen funktiona.

Kuvaa 6.6 lukemalla huomataan, että jousivoiman kasvaessa 5 N koetapin kuormitus kasvaa siitä viidesosan, 1 N. Kuva 6.7 esittää jousen pituuden muutoksen vaikutusta koetapin kuormitukseen.

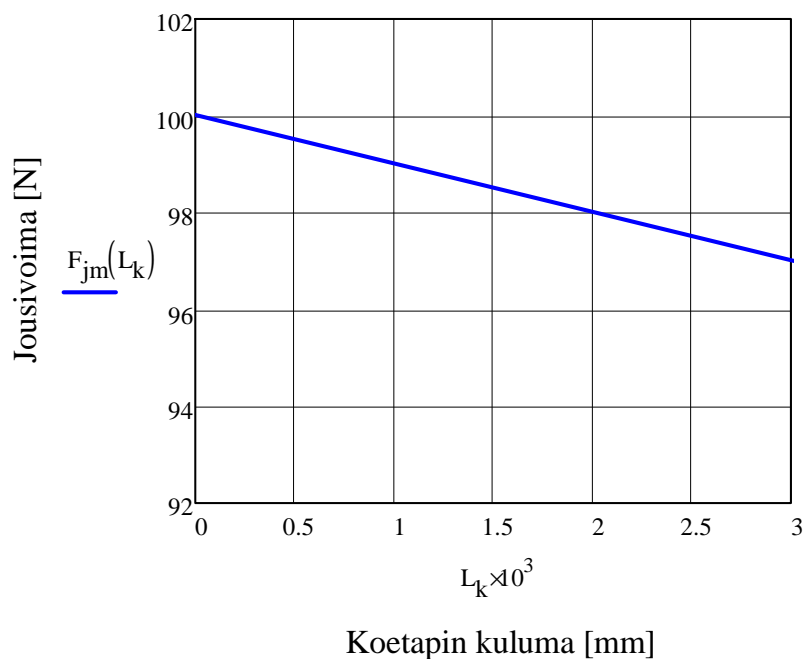


Koetapin kuormitus [N]

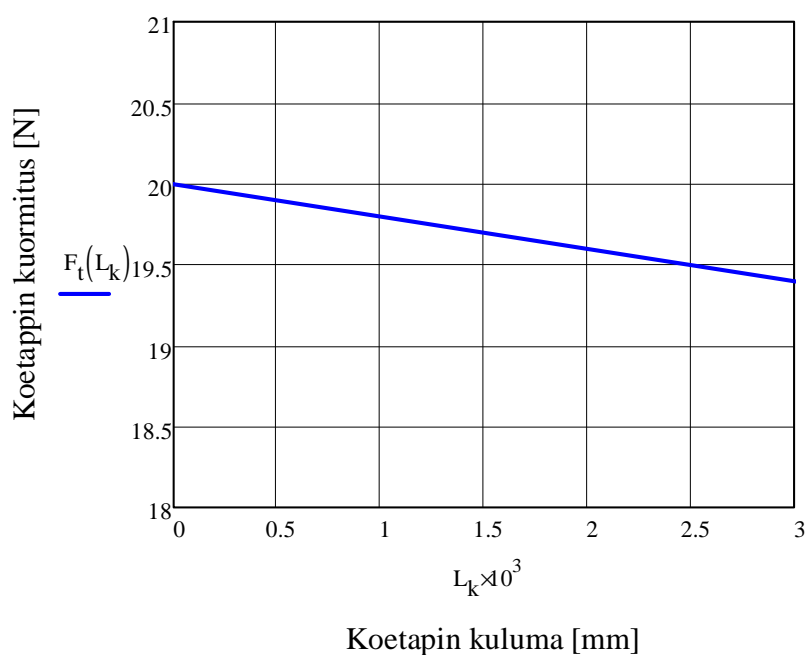
**Kuva 6.7.** Jousen pituus koetapin kuormituksen funktiona.

Jousen tuottama voima on lineaarinen, eli kuormituksen säätäminen halutulle asteelle on mahdollista suorittaa täsmällisesti. Lepoasennossa jousen pituus on 75 mm. Kun jousen säätöön tarkoitettua siipimutteria kiertää yhden kierroksen jousen pituus muuttuu yhden millimetrin. Yhden millimetrin pituuden muutos jousessa vastaa yhden Newtonin muu-

tosta koetapille tuotetussa voimassa. Kuvia 6.6 ja 6.7 lukemalla kuormitus koetapilla saadaan asetettua halutun suuruiseksi. Jousen pituus kasvaa, kun koelaitetta ajetaan ja koetappi kuluu liukuessaan kiekon pintaa vasten. Jousen pituuden muutos on suoraan verrannollinen jousen tuottamaan voimaan ja tätä kautta myös koetapilla vaikuttavaan voimaan. Kuvaa 6.8 lukemalla nähdään koetapin kulumisen vaikutus jousivoimaan. Kuvasta 6.9 puolestaan voidaan lukea kulumisen vaikutus koetapin kuormitukseen.



**Kuva 6.8.** Jousivoima koetapin kuluman funktiona.



**Kuva 6.9.** Koetapin kuormitus koetapin kuluman funktiona.

Kuten kuvaajista nähdään, koetapin kulumisen vaikutus voimaan nähden on pieni. Kun koetappi on kulunut 2 mm, koetapin kuormitus on 19,6 N. Prosentuaalisesti tämä on 2 %:n muutos koetapilla vaikuttavassa voimassa. Vaikutusta voidaan pitää merkityksettömänä, sillä niin kuin aiemmin tässä työssä on mainittu, mittaustarkkuus ei ole oppilaslaboratorioon suunniteltavan koelaitteen prioriteettilistan kärjessä.

Koepalanpidike (kuva 6.10) on oma komponenttinsa kuormavarsisysteemissä. Ratkaisuun päädyttiin, jotta koepala on mahdollista pitää koko mittauksen ajan kohtisuorassa asennossa kieksoon nähden. Suunnittelussa kiinnitettiin myös huomiota siihen, että koetapin vaihtaminen täytyy onnistua yksinkertaisin toimenpitein. Koetappi kuluu mittauksen aikana, jolloin sen vaihtamistarve ilmenee lähes jokaisen mittaustapahtuman jälkeen. Koepalan pidike on haarukkanivelen, kierretangon, metallista valmistetun sormuksen ja pallonivelen avulla kiinnitetty kuormavarren telineeseen. Sormus kiinnitetään kierretankoon muttereilla, joita säätämällä koepala ja kiekko saadaan asetettua kohtisuoraan asentoon jokaisella mittauskerralla. Pidike kiinnitetään haarukkaniveleen sokkatapilla, jonka kiinnitysreikä toleroitiin sopivalle asteelle välyksen minimoimiseksi. Koepalapidikkeen merkittävimmät toiminalliset ongelmat ovat nivelten kitka ja vällys, jotka osaltaan vaikuttavat mittaustarkkuuteen. Tämä ongelma ratkaistiin asettamalla neulalaakeri koepalapidikkeen ja kuormitusvarren nivelkohtaan.

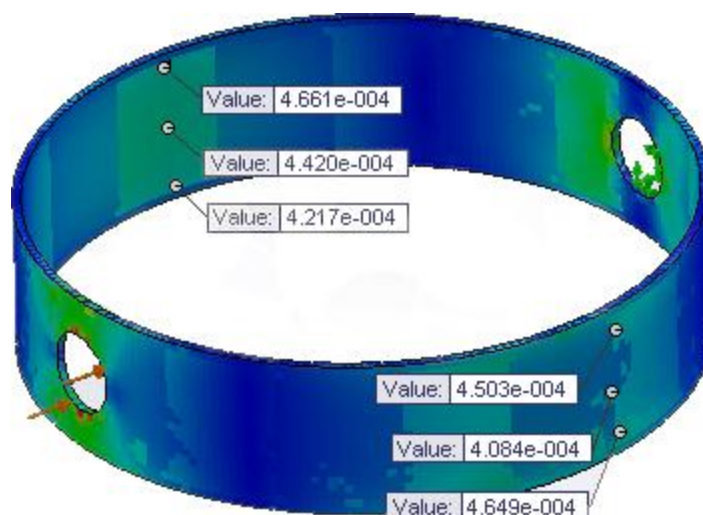


*Kuva 6.10. Koepalapidike.*

Koepalapidikkeen pohjaan on tehty reikä koetapin kiinnitystä varten. Koetappi asetetaan pohjassa olevaan reikään ja kiristetään paikalleen pidikkeen sivussa olevalla pidätinruuvilla.

Kalibrointia varten kuormitusvarren toiseen päähän on asetettu vastapaino. Vastapainoa voidaan liikuttaa akselilla, johon se kiristetään siipimutterilla kun tasapainoasema on saavutettu.

Kitkavoiman mittaaminen tapahtuu kuormavarsisysteemin metallisen sormuksen venymästä. Kiekon pyöriessä koepalan ja kiekon välinen kitkavoima välittyy koepalan pidikkeen kautta metalliseen sormukseen ja puristaa sormusta kasaan. Sormuksen ulkoreunoille, 90° voiman vaikutuskohdasta, on asetettu venymäliuskat. Sormuksen puristuessa venymäliuskan resistanssi muuttuu. Venymäliuskan resistanssin muutoksesta voidaan määrittää kitkavoiman suuruus. Venymäliuskasta tieto siirtyy mittakortin ja venymäliuskahvistimen kautta tietokoneelle. Laskennallisesti suhteellisen venymän arvoksi sormuksen kehällä saadaan noin 410 - 470  $\mu\epsilon$  (kuva 6.11), kun vaikuttavaksi voimaksi määrätään laskennallisesti saatu suurin järjestelmän aiheuttama kitkavoima; 20 N. Kitkavoiman suurin arvo on laskettu käyttämällä kitkakertoimelle arvoa 1. Sormuksen sisähalkaisija on 40 mm, korkeus 10 mm ja seinämän vahvuus 0,5 mm.



**Kuva 6.11.** Sormuksen suhteellisen venymän teoreettinen analysointi FEM laskennalla.

FEM laskennan tuloksesta voidaan päätellä, että sormus kestää koelaitteen sille aiheuttaman rasituksen ilman liian suurta muodonmuutosta. Laskennan avulla todennettiin myös, että voima-anturiin tulee riittävän suuri venymä jo yhden Newtonin suuruisella normaalivoimalla.

#### 6.1.4 Kiekko

Tappi-kiekko-koelaitteen toinen mittaustapahtumaan liittyvä komponentti on pyörivä kiekko (kuva 6.12). Kiekko on kiinnitetty moottorista tulevaan akseliin kuusioruuvilla. Kiekkon suunnittelun lähtökohtana oli yksinkertainen valmistus, sillä kiekko on koetapin kanssa käytössä kuluva osa ja näiden osien vaihto tulee olla mahdollista. Kiekkon kulu-

mispinnan täytyy pysyä tasossa, kun kiekko pyörii koelaitteella tehtävien mittausten aikana. Tämä reunaehto toteutettiin asettamalla kiekon ja akselin kiinnityskohtaan sekä kulumispintaan geometriset toleranssit. Kiekon kulumispinnalle määrättiin lisäksi pinnan- karheus Ra 0,4 tasaisuuden varmistamiseksi. Laitteen optimaalisen toiminnan kannalta kiekon kiinnitys akseliin täytyi tehdä mahdollisimman keskeisesti. Kiekon akselin puoleiselle pinnalle on tehty toleroitu syvennys akselin linjaamista ja keskeisyysvaatimusta varten.



*Kuva 6.12. Tappi-kiekko-koelaitteen pyörivä kiekko, jonka pintaa vasten koetappi liukuu.*

### 6.1.5 Mittausjärjestelmä ja anturivalinnat

Tappi-kiekko-koelaitteen mittausjärjestelmä koostuu venymäliuska-anturista, venymäliuska vahvistimesta, mittakortista sekä mittausohjelmasta. Työn vaatimuslistan mukaan kiekon ja koetapin rajapinnassa vallitsevaa lämpötilaa halutaan myös mitata. Lämpötilan mittaaminen tapahtuu koelaitteesta erillisellä mittauslaitteella, joten laitteen suunnittelussa lämpötilamittaukseen ei ole otettu kantaa. Mittakorttina (kuva 6.13) käytetään jo edeltävässä koelaitteessa käytettyä National Instrumentsin USB-6008 korttia, joka sisältää kahdeksan analogista sisääntuloa.



*Kuva 6.13. Mittakortti NI USB-6008. (National Instruments 2015)*

Käytettävä ohjelmistosovellus on LabView kampuslisenssillä. LabView on samalta valmistajalta, kuin mittakortti. Venymäliuskaksi valittiin Kyowan anturi mallia KKG-2-120-

D16-11L3M2S. Anturin tekniset tiedot ovat nähtävillä työn liitteessä 2. Venymäliuska- vahvistimeksi valittiin Scaime CPJ / CPJ2S, jonka tekniset tiedot ovat työn liitteessä 3.

## 6.2 Käyttöönotto ja mittaukset

Koelaitte hankittiin Tampereen teknillisen yliopiston tribologian laboratorioon. Valmistus toteutettiin diplomityöntekijän laatimien valmistuspiirustusten mukaan kolmannen osapuolen valmistamana. Laitteeseen tarvittavat valmiit komponentit kuten moottori, jousi, laakerit ja kiinnitystarvikkeet tilattiin suoraan osien jälleenmyyjiltä.

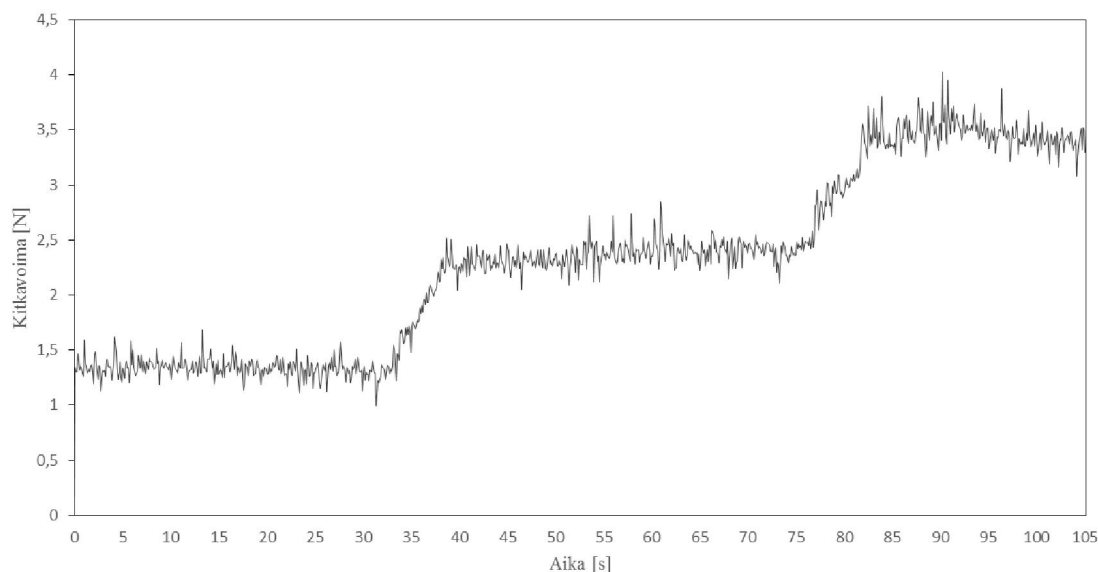
Laitteen kokoaminen, käyttöönotto sekä mittaukset toteutettiin yhteistyössä DI Janne Juoksukankaan kanssa. Ensimmäiseksi runkoon kiinnitettiin moottori ja siihen akseli. Moottoria koekäytettiin aluksi pyörimisnopeussäädön ja oikean pyörimissuunnan varmistamiseksi. Laitteen metallirunko kokoonpantiin ja sen jälkeen valmistettiin voima-anturina käytettävä sormus. Sormuksen ulkoreunoille liimattiin kaksi kappaletta venymäliuskoja FEM -laskennassa saadun suurimman venymän kohdalle. Voima-anturin kalibrointi toteutettiin käyttämällä massaltaan ennalta tunnettuja punnuksia. Tämän jälkeen voimaanturi kiinnitettiin laitteeseen ja johdotettiin venymäliuskavahvistimeen ja edelleen mit-takortin kautta tietokoneeseen tiedonkeruuta varten. Koetappi asetettiin koepalapidikkeeseen ja koelaitetta koekäytettiin mittauksissa vaaditulla tavalla, jolloin pyrittiin saamaan yleiskäsitys koelaitteen toiminnasta mittaustapahtuman aikana. Tässä vaiheessa ei vielä kerätty mittaustietoa. Toiminnan varmistamisen jälkeen suoritettiin ensimmäiset mittaukset kitkakertoimen sekä kulumisnopeuden määrittämistä varten.

### 6.2.1 Kitkakertoimen mittaaminen

Mittauksia varten kupari- ja nailontangosta sorvattiin halkaisijaltaan 10 mm koetappeja. Koetappin päässä on halkaisijaltaan noin 3 mm nystyrä, joka painetaan kiekkoa vasten ennalta tunnetulla voimalla. Mittaukset aloitettiin 5 N normaalivoimalla. Normaalivoiman arvoa säädetään kiertämällä jousen läpi asetetun kierretangon siipimutteria. Mutterin kiristäminen kasvattaa normaalivoimaa ja avaaminen pienentää. Normaalivoiman nol-lakohta määritettiin pyörittämällä kiekkoa ja kiristämällä joustaa kunnes voima-anturin lukema alkoi kasvamaan. Voimaa kasvatettiin 5 N kerrallaan noin 30 sekunnin välein tai kunnes kitkavoiman suuruus oli tasaantunut. Kitkamittauksen aikana moottorin pyörimisnopeus pidettiin vakiona.

Ensimmäinen mittaus suoritettiin käyttämällä kuparista koetappia. Ennen mittauksen aloittamista koetappi ja kiekko puhdistettiin etanolilla. Mittaustapahtumasta kerätty kitkavoiman suuruus ajan funktiona on esitetty kuvassa 6.14. Aikavälillä 0–30 sekuntia normaalivoima oli 5 N, aikavälillä 40–75 sekuntia 10 N ja aikavälillä 85–105 sekuntia 15 N.





**Kuva 6.14.** Kuparisen koetapin kitkakertoimen määrittämistä varten suoritettu mittaus.

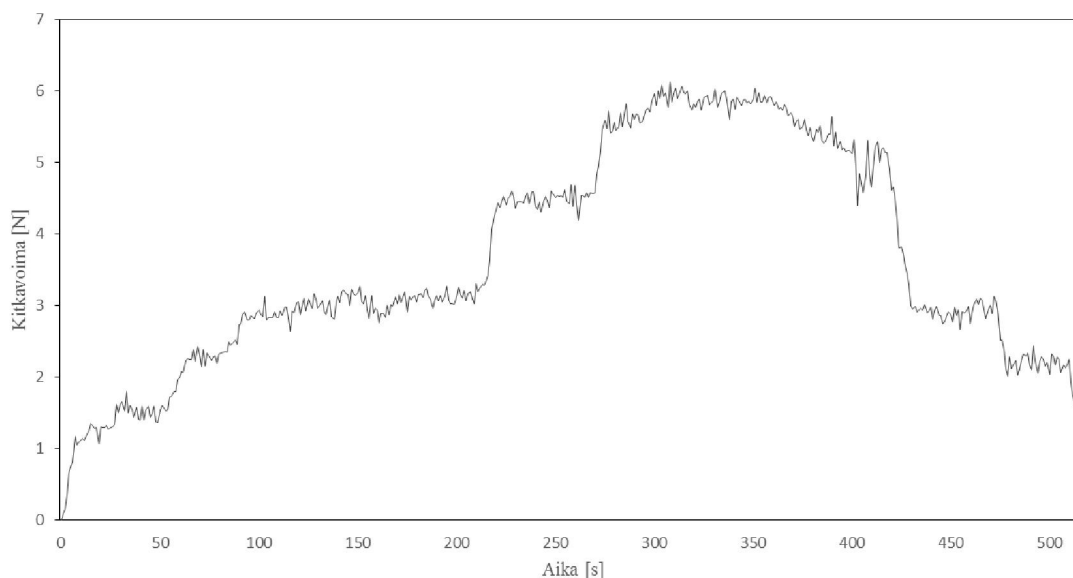
Kuvasta nähdään, että kitkavoima suuruus pysyy varsin tasaisena ja vakiintuu nopeasti arvoonsa normaalivoiman suuruudesta riippumatta. Normaalivoimaa ei tästä huolimatta kasvatettu heti, jotta pystyttiin varmistamaan kitkavoiman vakiintuminen. Lisäksi kuvasta havaitaan, että kitkavoima kasvaa tasavälein, kun normaalivoimaa kasvatetaan. Kuvaajasta voidaan kuitenkin havaita, että kitkavoiman arvojen vaihtelu kasvaa hieman normaalivoiman kasvaessa, tällä ei kuitenkaan ole vaikutusta mittauksen onnistumiseen. Taulukossa 6.4 on laskettu kitkakertoimen suuruus eri normaalivoiman arvoilla. Kitkakerroin on laskettu kappaleen 2.1 yhtälön 2.1 avulla. Normaalivoimaa vastaava kitkavoima on laskettu mittaustiedosta saatujen kitkavoimien keskiarvona kyseisellä aikavälillä.

**Taulukko 6.4.** Kuparisen koetapin ensimmäisestä mittauksesta kerätty mittaustieto. Mittauksesta saadun tiedon avulla on laskettu kitkakerroin eri normaalivoimille.

Aikaväli [s]	Normaalivoima [N]	Kitkavoima [N]	Kitkakerroin
0-30	5	1,34	0,27
40-75	10	2,37	0,24
85-105	15	3,47	0,23

Tuloksista havaitaan, että kitkakerroin pienentyy hieman normaalivoiman kasvaessa. Kaikkien mittausvälien yhteinen kitkakerroin saadaan laskettua kitkakertoimien aritmeettisena keskiarvona. Tulokseksi saadaan 0,25. Kirjallisuudessa materiaaliparin kitkakerroimeksi annetaan 0,36 (Engineering handbook). Kitkakertoimen määrittämistä varten suoritettiin vielä toinen mittaussarja. Mittauksesta saatu kuvaaja on esitetty kuvassa 6.15. Ensimmäisen ja toisen mittauksen välissä kiekon pinta oli koneistettu uudestaan pinnan

tasomaisuuden parantamiseksi. Ennen mittauksen aloittamista koetappi ja kiekko puhdistettiin asetonilla, kun ensimmäisessä mittauksessa puhdistamiseen käytettiin etanolia. Mittaus aloitettiin 5 N normaalivoimalla, jota kasvatettiin 5 N välein aina 20 N asti. Tämän jälkeen normaalivoima vähennettiin arvoon 10 N ja kitkavoiman tasaannuttua normaalivoima vähennettiin vielä arvoon 5 N.



**Kuva 6.15.** Kuparisen koepalan kitkakertoimen määrittämistä varten suoritettu toinen mittaus.

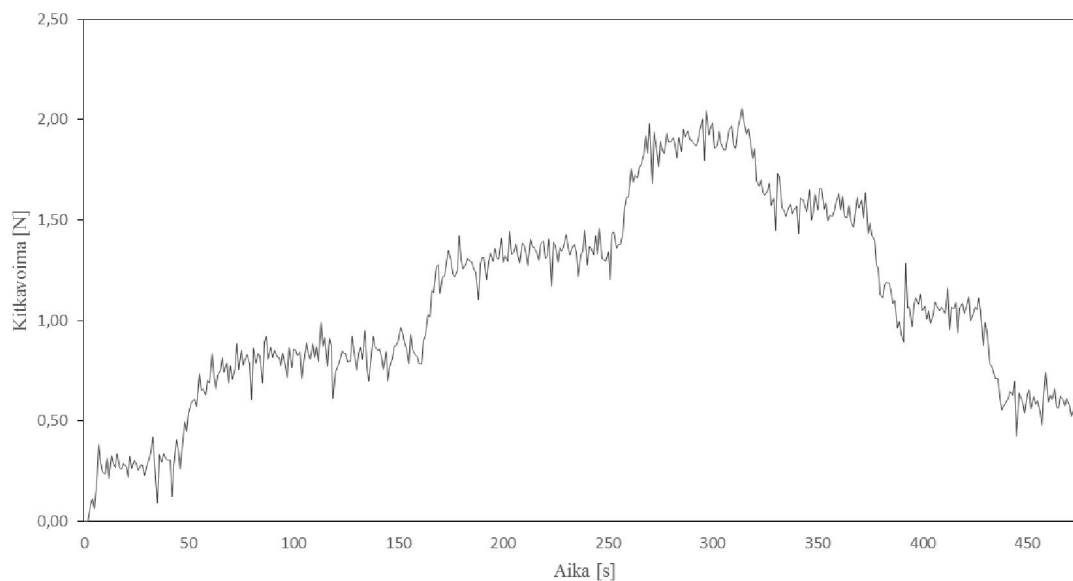
Kuvasta nähdään huomattavaa epätasaisuutta kitkavoiman arvossa lähes poikkeuksetta riippumatta normaalivoiman arvosta. Tästä huolimatta kitkakerroin pystytään määrittämään halutuille väleille käyttämällä kitkavoiman keskiarvoa. Huomionarvoista on myös, että kitkavoima ei palaudu täysin samaan arvoon, kun normaalivoimaa vähennetään 20 N:sta alaspäin. Aikaväleillä 0–50 ja 475–510 sekuntia normaalivoiman arvo on 5 N, mutta kitkavoima on suurempi jälkimmäisessä tilanteessa. Tätä voidaan selittää kahdella ilmiöllä. Kiekon ja koetapin rajapintaan alkaa muodostua kulumistuotteita, jotka näyttäisivät kasvattavan kitkaa. Toiseksi, konstruktion nivelten välinen kitka mahdollisesti estää niveliä täysin palautumasta edelliseen asentoonsa normaalivoimaa vähennettäessä. Taulukoon 6.5 on kerätty mittauksesta saadut tiedot eri aikaväleillä ja laskettu kitkakertoimen suuruus eri normaalivoiman arvoilla. Normaalivoimaa vastaava kitkavoima on laskettu mittaustiedosta saadun, kyseisellä aikavälillä vaikuttavan, kitkavoiman keskiarvona.

**Taulukko 6.5.** Kuparisen koetapin toisesta mittauksesta kerätty mittaustieto. Mittauksesta saadun tiedon avulla on laskettu kitkakerroin eri normaalivoimille.

Aikaväli [s]	Normaalivoima [N]	Kitkavoima [N]	Kitkakerroin
0-50	5	1,40	0,28
55-210	10	2,90	0,29
220-275	15	4,46	0,30
280-390	20	5,75	0,29
430-470	10	2,94	0,29
475-510	5	2,20	0,44

Taulukosta huomataan, että kitkakertoimen arvot pysyvät tasaisena pois lukien viimeinen 5 N normaalivoimalla saatu arvo. Koko mittauksen yhteinen kitkakerroin saadaan lasketua kitkakertoimien aritmeettisen keskiarvon avulla. Tulokseksi saadaan 0,32. Kitkakerroin on huomattavasti suurempi, kuin ensimmäisestä mittauksesta saatu arvo. Tätä selittää osaltaan, se että ensimmäisessä mittauksessa kiekon ja koetapin puhdistamiseen ei kiinnitetty tarpeeksi huomioita. Toinen merkittävä eroavaisuutta selittävä tekijä on kiekon pinnan uudelleen koneistus ensimmäisen mittauksen jälkeen. Ilman viimeistä 5 N normaalivoimalla saatua, muista poikkeavaa, tulosta ei oteta huomioon, keskiarvoksi saadaan 0,29. Myös nyt saatu tulos poikkeaa kirjallisuusarvosta. Todennäköisin selitys tälle on normaalivoimaa tuottavan jousen ominaisuudet ja toiminta mittauksessa. Puristusjousta kalibroitiin voima-anturin avulla, mutta kalibroinnista ei saatu tarkkoja, johdonmukaisia tuloksia, jolloin jousen tuottaman voiman oletettiin olevan se arvo, jonka jousen valmistaja ilmoittaa. Alustavat mittaukset suoritettiin loppuun tällä olettamuksella, sillä päätavoitteena oli todentaa koelaitteen oikeanlainen toiminta, jolloin saadut tribologiset absoluuttiset mittausarvot olivat toisarvoisessa asemassa. Voidaan kuitenkin todeta, että jousen tuottama voima on pienempi kuin mitä valmistaja ilmoittaa, joten jousen kalibrointi tulisi suorittaa tarkemmin todellisen jousivoiman varmistamiseksi. Jousen toiminnasta tehtiin myös huomio, että joususta puristettaessa kasaan se ei pysy keskitettynä jousen läpi menevän kierretangon suhteen. Jousi pääsee myös taipumaan sivusuunnassa, jolla on jousivoimaa pienentävä vaikutus. Lisäksi jousen taipuminen voi muuttaa jousen asemaa ja näin ollen myös jousivoiman vipuvartta.

Nailonille tehtiin kaksi toistensa kanssa samanlaista mittausta. Mittaukset suoritettiin noudattamalla samoja sääntöjä kuin kuparille tehdyissä mittauksissa. Mittaus aloitettiin normaalivoiman ollessa 5 N, josta sitä nostettiin 5 N välein. Kun normaalivoimaa oli kasvatettu arvoon 20 N, sitä alettiin vähentämään 5 N välein. Ennen mittauksen aloittamista kiekon pinnasta poistettiin kuparista siihen siirtyneet kulumistuotteet hiomalla sitä hiomapaperilla sekä puhdistamalla pinta asetonilla. Kuvassa 6.16 on esitetty ensimmäisen nailon mittauksen kitkavoiman kuvaaja ajan funktiona.



**Kuva 6.16.** Nailonista valmistetun koepalan kitkakertoimen määrittämistä varten suoritettu ensimmäinen mittaus.

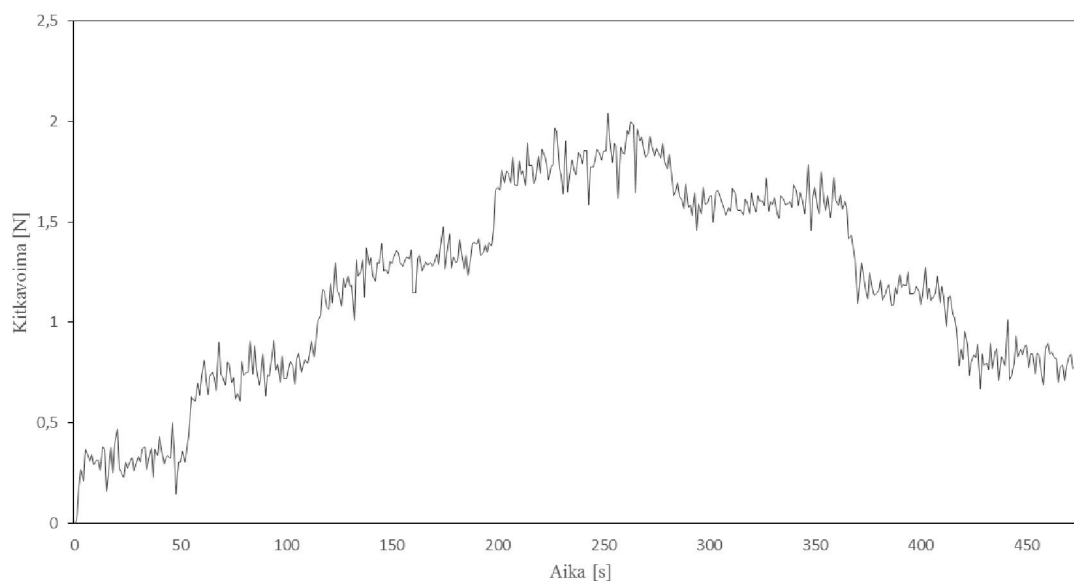
Kuvasta nähdään, että kitkavoima kasvaa tasaisin välein normaalivoimaa kasvattaessa. Mittauksesta havaitaan sama epäkohta kuin jälkimmäisessä kuparille suoritettussa mittauksessa: kun normaalivoimaa vähennetään arvosta 20 N alaspäin, kitkavoiman suuruus ei palaudu täysin samalle tasolle kuin mitä se oli mittauksen alussa, jolloin normaalivoimaa kasvatettiin kohti 20 N arvoa. Koelaitteen rakenteen puolesta tätä voi selittää järjestelmän nivelten kitkan aikaansaama nivelten epätäydellinen palautuminen edelliseen asentoonsa. Taulukkoon 6.6 on koottu mittausinformaatio sekä mittaustiedoista laskettu kitkakerroin.

**Taulukko 6.6.** Nailonista valmistetun koetapin mittauksesta kerätty mittaustieto. Mittauksesta saadun tiedon avulla on laskettu kitkakerroin eri normaalivoimille.

Aikaväli [s]	Normaalivoima [N]	Kitkavoima [N]	Kitkakerroin
0-45	5	0,26	0,05
60-155	10	0,81	0,08
170-255	15	1,32	0,09
270-310	20	1,89	0,09
325-370	15	1,56	0,10
385-425	10	1,05	0,10
440-470	5	0,60	0,12

Tuloksista huomataan kitkakertoimen lievää kasvua normaalivoiman kasvaessa. Merkittävin kitkakertoimen kasvu havaitaan, kun normaalivoima kasvaa viidestä kymmeneen Newtoniin. Kitkakertoimelle laskettu aritmeettinen keskiarvo taulukosta saaduilla arvoilla on 0,09. Toinen nailon ja teräs kosketukselle suoritettu mittaus toteutettiin täysin

samoilla parametreilla kuin ensimmäinen mittaus. Ennen mittauksia kiekko puhdistettiin asetonilla. Mittauksesta kerätty tieto on esitetty kuvassa 6.17.



**Kuva 6.17.** Nailonista valmistetun koepalan kitkakertoimen määrittämistä varten suoritettu toinen mittaus.

Toisesta nailonmittauksesta saatu mittaustieto noudattaa ensimmäisen mittauksen tuloksia. Huomattavin eroavaisuus mittausten välillä havaitaan, kun normaalivoimaa vähennetään arvosta 20 N, kohti arvoa 5 N. Tilanteessa kitkavoima ei vähene samassa suhteessa kuin ensimmäisen mittauksen aikana. Taulukossa 6.7 on esitetty mittauksesta lasketut tiedot.

**Taulukko 6.7.** Nailonista valmistetun koetapin toisesta mittauksesta kerätty mittaustieto. Mittauksesta saadun tiedon avulla on laskettu kitkakerroin eri normaalivoimille.

Aikaväli [s]	Normaalivoima [N]	Kitkavoima [N]	Kitkakerroin
0-50	5	0,31	0,06
60-110	10	0,75	0,08
120-190	15	1,27	0,08
210-280	20	1,81	0,09
290-355	15	1,60	0,11
370-405	10	1,17	0,12
420-470	5	0,75	0,15

Suurin harppaus kitkakertoimessa havaitaan samassa vaiheessa kuin ensimmäisessä nailonille tehdyssä mittauksessa. Kun normaalivoima vähennetään arvosta 10 N arvoon 5 N kitkakerroin kasvaa arvosta 0,12 arvoon 0,15. Selityksenä voidaan antaa jo edellä mainittu voima-anturin palautumattomuus nivelten kitkan takia. Toisaalta selityksenä voi olla

myös kosketuksessa tapahtuvat tribologiset ilmiöt pintojen sisäänajautumisen johdosta. Tuloksista havaitaan myös, että kitkakertoimen arvo kasvaa normaalivoiman kasvaessa. Kitkakertoimelle laskettu aritmeettinen keskiarvo mittauksessa on 0,10. Kirjallisuudessa nailon ja teräs kosketuksella annetaan suurempi arvo: 0,15 (Crown Plastics). Nailonin, kuten myös muidenkin muovien, kitkakerrointa mitattaessa on huomioitava materiaalin voimakas verrannollisuus liukupinnan pinnankarheuteen (Kivioja *et al.* 2007; Booser 1983). Mitä suurempi pinnankarheus on, sitä suurempi on kitkakerroin.

## 6.2.2 Kulumisen mittaaminen

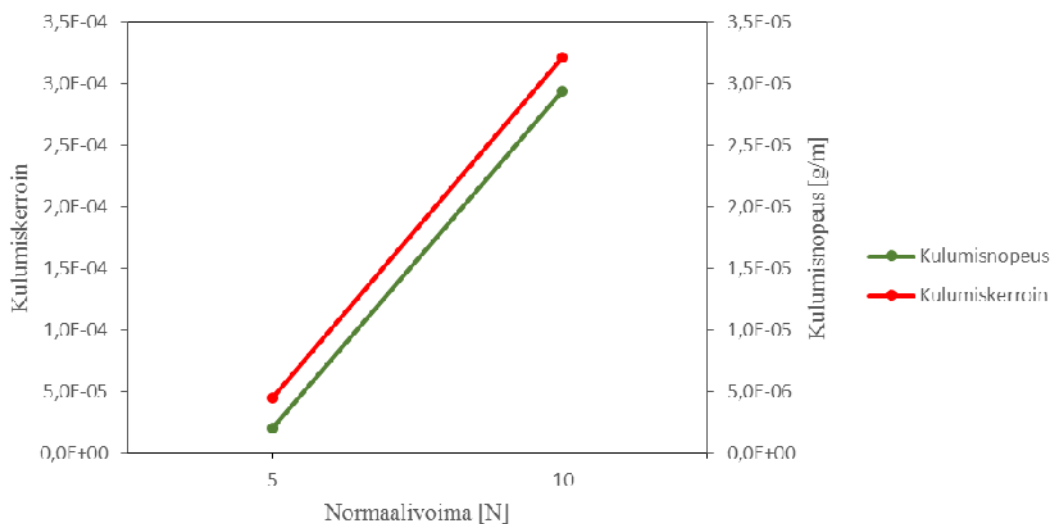
Alustavat mittaukset materiaalin kulumisesta suoritettiin kahdelle nailonista valmistetulle koetapille sekä kahdelle kuparista valmistetulle koetapille. Koetapit puhdistettiin alkoholilla ja punnittiin tarkkuusvaa'alla ennen mittausta sekä mittaustapahtuman jälkeen. Kulumisnopeuden laskemista varten tulee tietää koetapin liukumatka kiekon pinnassa. Liukumatka voidaan laskea, kun tiedetään koetapin etäisyys kiekon keskiakselista sekä moottorin pyörimisnopeus. Koetapin etäisyys kiekon keskiakselista mitattiin työntömitalla. Mittausten aikana moottorin pyörimisnopeus määritettiin erillisen käsitakometrin avulla kiekon akseliin kiinnittävän pultin päältä. Mittauksissa käytettiin eri etäisyyttä molemmissa nailonille sekä kuparille suoritetuissa mittauksissa. Myös normaalivoiman arvoa muutettiin mittausten välillä. Mittauksen kesto pidettiin samana molemmissa nailonin mittauksissa sekä molemmissa kuparille tehdyissä mittauksissa. Ajan mittaamiseen käytettiin sekuntikelloa. Taulukossa 6.8 on esitetty mittausinformaatio tehdyistä mittauksista.

**Taulukko 6.8.** Kulumismittauksen mittausinformaatio.

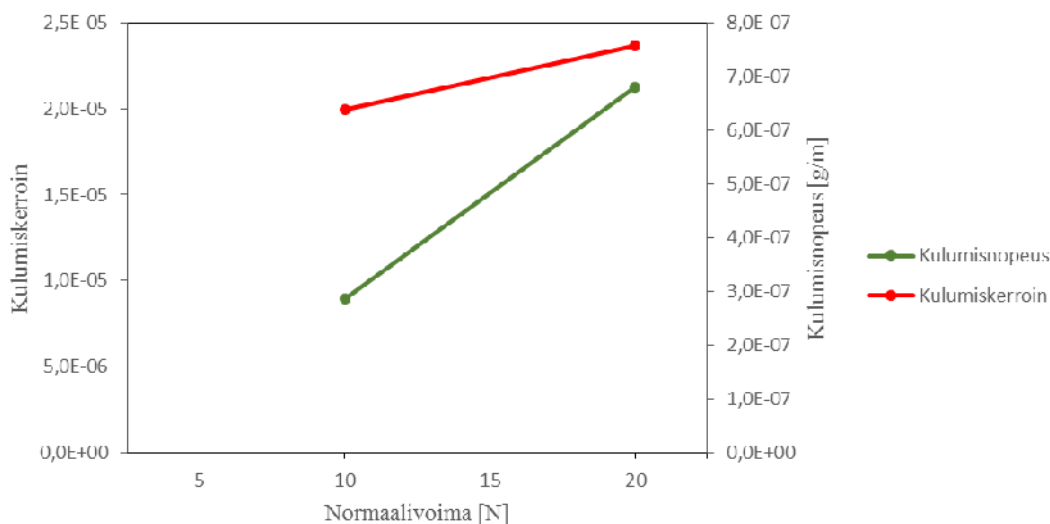
Materiaali	Massa alussa [g]	Massa lopussa [g]	Etäisyys keskiakselista [mm]	Normaalivoima [N]	Moottorin pyörimisnopeus [rpm]	Mittauksen kesto [min]
Nailon 1	0,9391	0,9390	17,60	10	158	20
Nailon 2	0,9448	0,9444	29,62	20	158	20
Kupari 1	7,3631	7,3625	29,62	5	158	10
Kupari 2	7,8949	7,8880	23,60	10	158	10

Ensimmäisessä nailonille suoritetussa mittauksessa koetapin etäisyys kiekon keskiakselista oli 17,60 mm. Normaalivoiman arvoksi asetettiin 10 N ja mittauksen kestoksi valittiin 20 minuuttia. Toisen mittauksen kesto pidettiin yhtä pitkänä, mutta normaalivoimaksi asetettiin 20 N ja koetapin etäisyys kiekon keskiakselista oli 29,62 mm. Kuparille suoritettussa mittauksessa normaalivoima oli ensimmäisellä mittauksella 5 N ja koetapin etäisyys keskiakselista 29,62 mm. Toisella mittauksella normaalivoimaksi asetettiin 10 N ja etäisyys keskiakselista oli 23,60 mm. Kuparille tehdyissä mittauksissa mittauksen kesto oli 10 minuuttia. Moottorin pyörimisnopeus oli kaikissa mittauksissa 158 kierrosta minuutissa.

Koetapin massan muutoksen ja lähtötietojen avulla voidaan laskea kulumiskerroin kaavalla 2.2.1 kaavalla 2.3 sekä kulumisnopeus kaavalla 2.4. Kaikissa mittauksissa koetapista kuluneen massan suuruus oli vähäinen punnitustarkkuutta ajatellen. Mittauksen kestoa pidentämällä kulumista voidaan kasvattaa ja saatuja tuloksia tarkentaa. Mittausajat pidettiin kuitenkin verrattain pieninä, sillä päätavoite oli ainoastaan selvittää koelaitteen toimivuus mittaustapahtuman aikana. Kuvaan 6.18 on piirretty nailonin kulumiskerroin ja kulumisnopeus normaalivoiman funktiona. Kuva 6.19 esittää kulumiskertoimen ja kulumisnopeuden kuparille normaalivoiman funktiona.



**Kuva 6.18.** Kuparin kulumiskerroin ja kulumisnopeus normaalivoiman funktiona.



**Kuva 6.19.** Nailonin kulumiskerroin ja kulumisnopeus normaalivoiman funktiona.

Kuparin kulumiskerroin 5 N normaalivoimalla on  $4,5 \times 10^{-6}$  ja kulumisnopeus on  $2,0 \times 10^{-6}$  g/m. Kuparille toinen mittaus suoritettiin 10 N normaalivoimalla, jolloin kulumiskerroin

kasvaa arvoon  $3,2 \times 10^{-4}$  ja kulumisnopeus arvoon  $2,9 \times 10^{-5}$  g/m. Nailonin kulumiskertoimen arvoksi 10 N normaalivoimalla mittauksesta saadaan  $2,0 \times 10^{-5}$  ja kulumisnopeuden arvoksi  $2,9 \times 10^{-7}$  g/m. Kun normaalivoima on 20 N, kulumiskerroin kasvaa arvoon  $2,4 \times 10^{-5}$  ja kulumisnopeus arvoon  $6,8 \times 10^{-7}$  g/m. Molemmilla materiaaleilla havaitaan kulumiskertoimen ja kulumisnopeuden kasvavan normaalivoimaa lisättäessä. Tämä selittyy osittain sillä, että koetapin ja kiekon efektiivinen kosketuspinta-ala kasvaa, kun normaalivoimaa kasvatetaan. Kosketuspinta-alan kasvaessa kuluneen materiaalin määrä luonnollisesti kasvaa. Suuruusluokaltaan ja normaalivoiman vaikutukseltaan mittauksesta saadut arvot ovat oikeansuuntaisia. Tehtävänä ei ollut määrittää tarkkoja kulumisarvoja.

### 6.2.3 Virhelähteet

Kitkakertoimen arvoa määritettäessä merkittävin mittaustapahtumaan vaikuttava asia oli kiekon epätasaisuus. Kiekon pinta ei pysy tasossa pyörimisliikkeen aikana. Pinnan epätasaisuutta mitattiin heittokellon avulla, jolloin huomattiin noin millin kymmenyksen heitto kiekon pyörähdysliikkeen aikana. Ongelma pyrittiin ratkaisemaan ensimmäisten mittausten jälkeen tehdyllä kiekon pinnan uudelleen koneistuksella. Koneistuksella oli selvästi positiivinen vaikutus kiekon pintaan, kuitenkin se ei poistanut ongelmaa täydellisesti. Myös kiekon pinnan hiominen mittauskertojen välillä edesauttoi mittausten onnistumista. Lisäksi, mittaukseen tuo omat lisäpiirteensä kiekon pintaan koetapista siirtyvät kulumistuotteet. Eniten virhettä mittauksessa aiheuttaa normaalivoiman tuottamiseen käytetty jousi. Koelaitteen konstruktiosta johtuen jousi pääsee hieman taipumaan sivusuunnassa kun jousta puristetaan kasaan, jolloin sen tuottama voima pienenee.

Materiaalin kulumisnopeutta mitattaessa edellä mainittujen virhelähteiden lisäksi todettiin, että mittauksen kestäessä huomattavasti pidemmän aikaa kuin kitkakerrointa määritettäessä koetapista kiekon pintaan siirtynyt materiaali vaikuttaa koetapin kulumisnopeuteen. Kiekon pintaan siirtynyt materiaali muuttaa mittaustilannetta niin, että tapahtuman edetessä kosketuspinnassa havaitaan koetappimateriaalin liukumista samaa materiaalia vasten. Kulumistapahtuma ei ole enää pelkästään kupari ja teräs tai nailon ja teräs vaan tilanteessa havaitaan myös kupari ja kupari tai nailon ja nailon välistä liukumista. Lisäksi, koetapin etäisyyden mittaaminen kiekon keskiakselista käyttämällä työntömittaa koettiin ongelmalliseksi, sillä käsin tehdyssä mittauksessa virheen mahdollisuus on olemassa.



## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli kehittää hydrodynaaminen liukulaakerikoelaitte sekä tappi–kiekko-koelaitte oppilaslaboratorion käyttöön. Koelaitteiden tarkoituksena on demonstroida opiskelijoille tribologisten ilmiöiden muodostumista sekä mahdollistaa yksinkertaisten ja havainnollistavien mittausten tekeminen näistä ilmiöistä, joten absoluuttista mittaustarkkuutta ei pidetty ensisijaisen tärkeänä. Laboratoriossa on vastaavat koelaitteet toistaiseksi käytössä, joskin ne ovat jo lähestymässä elinikänsä loppua. Peruslähtökohta molempien koelaitteiden suunnittelussa oli tehdä laitteista rakenteeltaan kompaktit sekä helposti liikuteltavat. Toinen koelaitte, tappi–kiekko-koelaitte, toteutettiin ja otettiin käyttöön oppilaslaboratorioon. Valmistetulla koelaitteella suoritettiin lisäksi ensimmäiset mittaukset kitkakertoimen sekä kulumisnopeuden määrittämiseksi. Alustavien mittausten tarkoituksena oli todentaa koelaitteen oikeanlainen toiminta.

Suunnittelutyö aloitettiin tutustumalla koelaitteissa havaittaviin tribologisiin ilmiöihin ja niissä huomioon otettaviin asioihin. Suunnittelussa on noudatettu Pahl & Beitzin systemaattista suunnitteluprosessia sekä Ulrich & Eppingerin tuotekehitysmetodiikkaa. Koelaitteiden rakenteista luotiin alustavia hahmotelmia, jonka jälkeen parhaimpien konseptien suunnittelua jatkettiin hienosuunnitteluun, ja tappi–kiekko-koelaitteen osalta valmistukseen asti.

Hydrodynaamisella liukulaakerikoelaitteella voidaan mitata laakerissa vallitseva paine, voitelukalvon paksuus, laakerikengän ja akselin välisen kitkavoiman suuruus sekä kitkan aikaansaama voiteluöljyn lämpötilan muutos. Suunnitellun koelaitteen merkittävin uudistus on kompakti rakenne sekä instrumentoinnin integrointi suoraan koelaitteen rakenteisiin. Tämä mahdollistaa laitteen helpon siirtämisen ja kuljettamisen yhtenä kokonaisuutena. Hydrodynaamisesta liukulaakerikoelaitetta ei tämän työn aikana valmistettu, joten laitteen konkreettista toimintaa ei pystytty arvioimaan. Kokonaisuutena koelaitteen suunnitteluprosessin lopputulos täyttää kuitenkin sille annetut vaatimukset.

Tappi–kiekko-koelaitteella pystytään määrittämään koetapin ja kiekon välinen kitkakerroin sekä koetappimateriaalin kulumisnopeus. Koelaitteella mitattava suure on koetapin ja kiekon välisen kitkavoiman suuruus, josta tunnetun normaalivoiman avulla voidaan laskea materiaaliparin välinen kitkakerroin. Materiaalin kulumisnopeus määritetään punnitsemalla koetapin massan muutos ja mittaamalla sen liukumatka mittaajakäytön aikana. Mittauksen aikana kuluvia osia ovat koetappi sekä kiekko. Konstruktiio on suunniteltu niin, että näiden osien vaihtaminen onnistuu yksinkertaisilla toimenpiteillä. Laboratoriossa aikaisempi koelaitte oli kooltaan huomattavan suuri, jonka liikuttaminen oli erittäin työlästä. Tässä työssä suunniteltu koelaitte on kooltaan merkittävästi pienempi sekä ra-

kenteeltään kompaktimpi. Tappi–kiekko-koelaitteen kokoonpanon jälkeen, sillä suoritettiin alustavat mittaukset kuparista ja nailonista valmisteluille koepaloille kitkakertoimen sekä kulumisnopeuden määrittämistä varten.

Koelaitteella ajettiin kaksi testisarjaa molemmille materiaaleille sekä kitkakerrointa että kulumisnopeutta määrittäessä. Kaksi ensimmäistä mittausta suoritettiin kupari ja teräs liukukosketuksen kitkakertoimen selvittämiseksi. Ensimmäisen mittauksen aikana havaittiin, että kiekon pinta ei ollut riittävän tasomainen pyörimisliikkeen aikana. Ennen toista mittausta kiekon pinta koneistettiin uudestaan. Koneistuksella oli selvästi positiivinen vaikutus mittaustapahtumaan ja se vähensi ongelmia seuraavissa mittauksissa. Mittauksissa havaittiin, että voima-anturina toimiva sormus ei palaudu mittauksen aikana täydellisesti, vaikka normaalivoimaa pienennetään. Voima-anturin palautumattomuus voi johtua koepalapidikkeen ja voima-anturiin kiinnittävän haarukkanivelen välisestä kitkasta, joka estää nivelen liikettä voiman pienentyessä. Ratkaisua ongelmaan voidaan hakea laakeroimalla koepalapidikkeen ja haarukkanivelen nivelkohta. Molemmille materiaaleille mitatut kitkakertoimen arvot ovat hieman kirjallisuusarvoja pienemmät. Koelaitteen rakenteen vuoksi normaalivoiman tuottamiseen käytetty jousi pääsee hieman taipumaan sivusuunnassa jousen puristuessa. Jousen taipuminen pienentää jousen tuottamaa voimaa sekä jousen asema voi muuttua, jolloin se vaikuttaa myös mittauksilla saatuihin kitkakertoimen arvoihin. Jousen toimintaa voidaan parantaa tekemällä jousen ympärille kohdistusholkki, jolloin jousi ei pääse taipumaan sivusuunnassa. Kulumismittauksia tehdessä huomattiin ongelmalliseksi koetapin etäisyyden tarkka mittaaminen kiekon keskiakselista. Ongelma voidaan poistaa koelaitteen päälilevyyn, kuormavarren telineen reunan kohdalle, merkityillä koetapin ja kiekon keskiakselin välisillä etäisyyksillä. Jotta kaikki koelaitteen osat saadaan integroitua runkorakenteeseen, laitteeseen tulee kiinnittää kotelo moottorinohjaukselle.

Mittauksissa havaituista haasteista huolimatta, saadut mittaustulokset ovat oikeansuuntaiset ja koelaitte soveltuu tribologisten ilmiöiden demonstrointiin. Havaituille pienille puutteille on myös esitetty suhteellisen helposti toteutettavat korjaustoimenpiteet.

Alustavien mittausten yhteydessä tuli esille myös kiekon pinnankarheuden vaikutus mittaustapahtumaan, kosketuksen muokkautuminen sisäänajon aikana sekä pintojen puhdistuksen tarpeellisuus ennen mittausta, mutta näillä tekijöillä ei ole suoranaista vaikutusta koelaitteen toimintaan.

## LÄHTEET

Airila M. Mekatroniikka. 7. painos. Helsinki, Oy Yliopistokustannus/Otatieto. 2004.

ASTM G99-95a. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. West Conshohocken, PA, USA. ASTM International. 2000.

Booser E. R. Handbook of Lubrication, Theory and Practice of Tribology, Volume II, Theory & Design. Boca Raton, Florida, USA. CRC Press LLC. 1983.

Bhushan B., Petralia P. Tribology in Practice Series: Principles and Applications to Tribology. 2<sup>nd</sup> Edition. Somerset, NJ, USA, John Wiley & Sons. 2013.

Crown Plastics Co., Inc. Polyethylene Properties. Saatavilla (viitattu 17.1.2016): <http://www.crownplastics.com/wp-content/uploads/2010/08/CompDynamCoeffic.pdf>.

De-sta-co. Tuotekatalogi. Saatavilla (viitattu 3.11.2015): <http://www.destaco.com/assets/docs/en/ds/605.pdf>

Engineering's Handbook. Coefficient of friction. Saatavilla (viitattu 17.1.2016): <http://www.engineershandbook.com/Tables/frictioncoefficients.htm>

Hall A. D. A Methodology for System Engineering. 6<sup>th</sup> Edition. Princeton, NJ, USA. Van Nostrand. 1968.

Heeley D. Understanding Pressure and Pressure Measurement. Freescale Semiconductor Application Note. Rev 1, 05/2005. AN1573.

Hoffmann K. An Introduction to Measurements using Strain Gages. Alsbach, Germany. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. 1989.

Hori Y. Hydrodynamic Lubrication. Tokio, Japani. Springer-Verlag. 2006.

Kivioja S., Kivivuori S., Salonen P. Tribologia – Kitka, kuluminen ja voitelu. 5. painos. Helsinki, Otatieto. 2007.

Kyowa. Strain gages -tuotekatalogi. Cat. No. 1011-U1. Saatavilla (viitattu 4.11.2015): [http://www.straintech.fi/pdf/2012Kyowastraingage\\_cat\\_e.pdf](http://www.straintech.fi/pdf/2012Kyowastraingage_cat_e.pdf)

Lesjöfors. Tuotekatalogi. Saatavilla (viitattu 31.5.2015): [http://catalog.lesjoforsab.com/pdf/en/chapters/12-27\\_EN.pdf](http://catalog.lesjoforsab.com/pdf/en/chapters/12-27_EN.pdf)

Momozono S., Nakamura K., Kyogoku K. Theoretical model for adhesive friction between elastomers and rough solid surfaces. *The Journal of Chemical Physics*. Vol. 132, 114015. 2010.

National Instruments. *Pressure Measurement Basics*. National Instrument Corporation, Publish date: 31.12.2014. Saatavilla (viitattu 14.10.2015): <http://www.ni.com/white-paper/13034/en/>

National Instruments. NI USB-6008 Data Sheet. National Instrument Corporation, Nov 2014. Saatavilla (viitattu 1.11.2015): <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-218>

Norton R. L. *Machine Design – An Integrated Approach*. 3<sup>rd</sup> edition. Upper Saddle River, NJ, USA, Pearson Education, Inc. 2006.

Nuruzzaman D. M., Chowdhury M. A. Friction Coefficient and Wear Rate of Copper and Aluminum Sliding against Mild Steel. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*. Vol. 4 No. 1. 2013. Saatavilla (viitattu 2.2.2016): <http://tuengr.com/V04/029-040.pdf>

Ocvirk F. W. *Short-bearing Approximation for Full Journal Bearings*. Washington, USA. NACA, TN 2080, 1952. Saatavilla (viitattu 10.10.2015): <http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc56460/m1/1/>

Pahl G., Beitz W. *Koneensuunnitteluoppi*. 2. painos. Porvoo, Metalliteollisuuden kustannus Oy. 1990.

Pope J. E. *Rules of thumb for mechanical engineering: a manual of quick, accurate solution to everyday mechanical engineering problems*. Houston, Texas, USA, Gulf Publishing Company. 1997.

Rabinowicz E. *Wear Coefficients-Metals, Wear Control Handbook*. New York, NY, USA, M.B. Peterson and W.O. Winer, eds., McGraw-Hill. 1980.

Roozenburg N. F. M., Eekels J. *Product Design: Fundamentals and Methods*. Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd. 1995.

Solartron metrology. S-Series displacement transducers. Tuotetietoluettelo 502686, julkaisu 2.1. Saatavilla (viitattu 8.11.2015): [https://www.aseko.fi/\\_globalimg/ngj\\_liite/3355/Solartron%20S%20Series%20LVDT%20Anturit%20Esite.pdf](https://www.aseko.fi/_globalimg/ngj_liite/3355/Solartron%20S%20Series%20LVDT%20Anturit%20Esite.pdf)

Teräskonttori. Tuoteluettelo. Saatavilla (viitattu 3.11.2015): [http://www.teraskonttori.fi/easydata/customers/teraskonttori/files/mittausvalineet/Mitu\\_luettelo\\_260-291.pdf](http://www.teraskonttori.fi/easydata/customers/teraskonttori/files/mittausvalineet/Mitu_luettelo_260-291.pdf)

Ulrich K. T., Eppinger S. D. Product design and development. 5<sup>th</sup> edition. New York, NY, USA, McGraw-Hill. 2012.

Variohm EuroSensor. Pressure Sensor – EPT3100 –data sheet. 14/11. UK. Saatavissa (viitattu 2.11.2015): [https://www.elfadistrelec.fi/Web/Downloads/\\_t/ds/EPT3100\\_eng\\_tds.pdf?mime=application%2Fpdf](https://www.elfadistrelec.fi/Web/Downloads/_t/ds/EPT3100_eng_tds.pdf?mime=application%2Fpdf)

Young H. D., Freedman R. A. University Physics. 11<sup>th</sup> edition. San Francisco, CA, USA, Addison Wesley, Pearson Education, Inc. 2004.

# LIITE 1: KOELAITTEISSA KÄYTETTÄVÄN MOOTTORIN TIEDOT

## Specifications

### 15 W, 30 W, 50 W, 100 W (RoHS)



Package Model	Geared Type/Combination Type-Parallel Shaft Gearhead		BLH015K-□	BLH230KC-□	BLH450KC-□	BLH5100KC-□	
	Combination Type-Hollow Shaft Flat Gearhead		—	BLH230KC-□FR	BLH450KC-□FR	BLH5100KC-□FR	
Round Shaft Type			BLH015K-A	BLH230KC-A	BLH450KC-A	BLH5100KC-A	
Rated Output Power (Continuous)		W	15	30	50	100	
Power Source	Rated Voltage		24 VDC ± 10%				
	Rated Input Current		A	1.0	2.1	3.1	6.0
	Maximum Input Current		A	2.4	3.7	5.4	9.8
Rated Torque		N-m	0.05	0.12	0.2	0.4	
Starting Torque*		N-m	0.075	0.15	0.24	0.5	
Rated Speed		r/min	3000		2500		
Variable Speed Range		r/min	100~3000				
Round Shaft Type Permissible Load Inertia J		×10 <sup>-4</sup> kg·m <sup>2</sup>	0.5	1.8	3.3	5.6	
Rotor Inertia J		×10 <sup>-4</sup> kg·m <sup>2</sup>	0.032	0.086	0.234	0.611	
Speed Regulation	Load		±0.5% max. (0~Rated torque, at rated speed, at rated voltage, at normal ambient temperature)				
	Voltage		±0.5% max. (Rated voltage ±10%, at rated speed, with no load, at normal ambient temperature)				
	Temperature		±0.5% max. (0°C~+50°C, at rated speed, with no load, at rated voltage)				

\*The time during which the starting torque is effective is no more than 5 seconds and at 2000 r/min or below.

□ Enter the gear ratio in the box (□) within the model name.

● The values in the specifications are for the motor only.

## Gearmotor-Torque Table for Geared Type/Combination Type

### Combination Type-Hollow Shaft Flat Gearhead

Unit = N-m

Package Model	Gear Ratio		5	10	15	20	30	50	100	200
	Speed Range		100~2500 r/min	20~500	10~250	6.7~167	5~125	3.3~83	2~50	1~25
BLH230KC-□FR	3000 r/min		600	300	200	150	100	60	30	15
	100~2500 r/min		0.48	1	1.5	2	3.1	5.1	10.2	17
BLH450KC-□FR	3000 r/min		0.24	0.51	0.77	1	1.5	2.6	5.1	10.2
	100~2500 r/min		0.85	1.7	2.6	3.4	5.1	8.5	17	34
BLH5100KC-□FR	3000 r/min		0.43	0.85	1.3	1.7	2.6	4.3	8.5	17
	100~2500 r/min		1.7	3.4	5.1	6.8	10.2	17	34	68
3000 r/min		0.85	1.7	2.6	3.4	5.1	8.5	17	34	

□ Enter the gear ratio in the box (□) within the model name.

● The flat gearhead rotates in the opposite direction to the motor when viewed from the front of the gearhead. It rotates in the same direction as the motor when viewed from the rear (motor mounting surface) of the gearhead. Rotation Direction of Hollow Shaft Flat Gearhead → Page 19

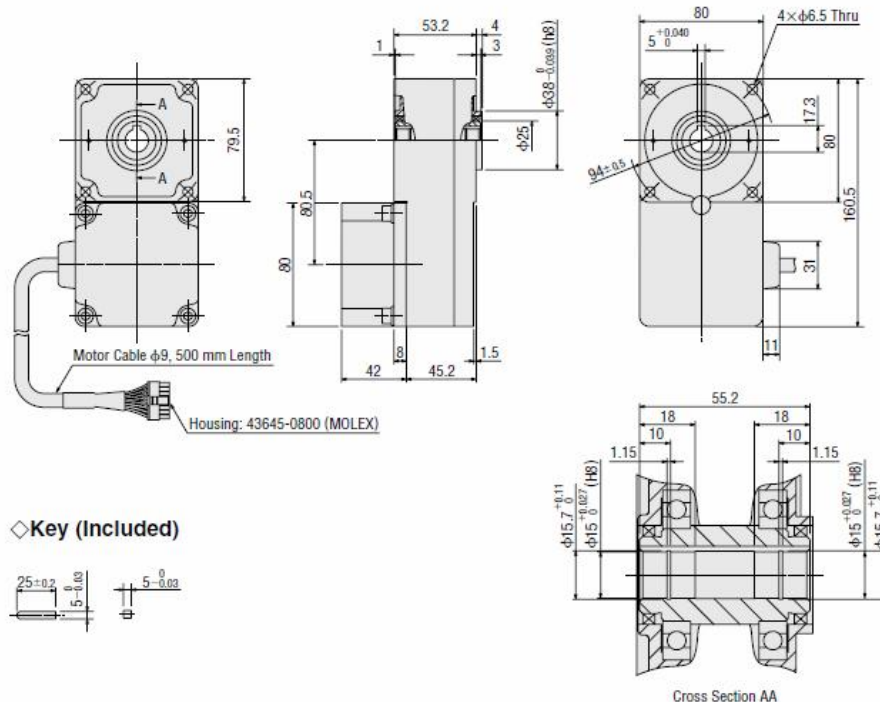
### Motor/Hollow Shaft Flat Gearhead

#### BLH450KC-□FR

Motor: BLHM450KC-GFS

Gearhead: GFS4G□FR

Mass: 2.4 kg (Including Gearhead)



Cross Section AA

## LIITE 2: VENYMÄLIUSKA-ANTURIN TIEDOT


**KYOWA**

MADE IN JAPAN

# STRAIN GAGES

TYPE	KHG-2-120-D16-11L3M2S	GAGE FACTOR(24°C,50%/RH)	2.06	±1.0	%
TEMPERATURE COMPENSATION FOR	STEEL	ADOPTABLE THERMAL EXPANSION	11.7		PPM/°C
GAGE LENGTH	2	TRANSVERSE SENSITIVITY(24°C,50%/RH)	0.70		%
GAGE RESISTANCE(24°C,50%/RH)	119.6 ± 0.4	APPLICABLE GAGE CEMENT	CC-33A,FP-34B		QUANTITY
LOT No.	Y3977S	BATCH	157A	M03	10





## LIITE 4: PAINEANTURIN TIEDOT

### Pressure sensor, EPT3100-A-01000-B-2-F, Variohm EuroSensor

<input type="checkbox"/> Measurand	Gauge pressure
<input type="checkbox"/> Pressure measurement range	0...10 bar
<input type="checkbox"/> Pressure type	Relativdruck
<input type="checkbox"/> Output	4...20 mA
<input type="checkbox"/> No. of analogue outputs	1
<input type="checkbox"/> No. of digital outputs	0
<input type="checkbox"/> Operating voltage	10...30 VDC

Electrical connection	Plug M12
Material, parts in contact with medium	Stainless steel 304 / 1.4301 / V2A
Sensor type	Pressure sensor
Pressure connection	G1/4"
Response time	<lt/>1 ms
Accuracy	0.5 %
Repeat accuracy	0.1 %
Linearity error	0.15 %
Operating temperature	-40...+105 °C
Medium temperature	-40...+125 °C
Protection rating	IP 67
Overpressure resistance	20 bar
Burst pressure	30 bar
Dimensions ø x H	22 x 60 mm

# LIITE 5: HYDRODYNAAMISEN LIUKULAAKERIKOELAITTEEN KOONPANOPIIRUSTUS

Osa nro	Osan nimi	Piirustumero	Huom.	kpl
1	Runko kokoonpano	201		1
2	Moottorin kannake	204		1
3	Akseli	205		1
4	Venymlukujan vartti	207		1
5	Laakerienkyläkköpannosa	218		1
6	Oljyväliä kokoonpano	224		1
7	Puoraus	221		1
8	Suojapöydä	222		1
9	SKF SY 15 TF			1
10	Clemp DESTACO 605			1
11	Sarano 20x40x1,5			1
12	Pohjapöytä			1
13	Orientaattori B1445KC-20FR			1
14	Tasausla C		Tonnitehoon moottorin mukana	2
15	Kuusiokuvut M4x8 DIN 933			1
16	Kuusiokuvut M4x25 DIN 933			1
17	Kuusiokuvut M4x30 DIN 933			2
18	Kuusiokuvut M5x16 DIN 933			4
19	Kuusiokuvut M6x70 DIN 931			4
20	Kuusiokuvut M10x50 DIN 931			2
21	Kuusiokuvut M5x30 DIN 912		Akseli-moottori	1
22	Slipmuovi M4x15 DIN 316			1
23	Slipmutter M8 DIN 315			2
24	Akseli M4 DIN 125			7
25	Akseli M5 DIN 125			9
26	Akseli M5 DIN 7349		Akseli-moottori	2
27	Akseli M6 DIN 125			8
28	Akseli M8 DIN 440			2
29	Akseli M10 DIN 125			4
30	Jousilukijevy M5 DIN 127		Akseli-moottori	1
31	Jousilukijevy M6 DIN 127			4
32	Mutteri M4 DIN 934			4
33	Mutteri M5 DIN 934			4
34	Mutteri M6 DIN 934			4
35	Mutteri M10 DIN 934			2
36	Kiemelratko M8x90 DIN 975			1
37	Piiriteinas 1x1 DIN 472		Akseli-moottori	1
38	Lukkonitti 19mm			4

Yleistiedot:  
 Korkeus ISO 2748 M  
 Paino ISO 13920-8  
 SFS-EN ISO 13920-8

**Tampereen Teknillinen Yliopisto**  
 Materiaalipolitiikka

**Hydrodynaaminen liukulaakerikoelaitte**

Nimike: Hydrodynaaminen liukulaakerikoelaitte  
 Suhdte: 1:4  
 Piir.no.: 201

AKKI  
 Lehti: Lehti5  
 A3

Tiedosto: Hakemisto

Kokonaismassa: 10kg

Perf.  
 Pm.  
 Tok.  
 Pm.  
 Versio

# LIITE 6: TAPPI-KIEKKO-KOELAITTEEN KOKOONPANOPIIRUSTUS

**SECTION A-A**  
295  
235  
165

**SECTION B**  
295  
105  
100

**DETAIL B**  
SCALE 1 : 2

Osa nro	Osan nimi	Piirustusnumero	Huom.	kpl
1	Runko-osat	103		1
2	Runko	104		1
3	Kuormavarsi	105		1
4	Kuormavarren akseli	106		1
5	Kuormavarren heliine	107		1
6	Jousiyhteisim	108		1
7	Akseli	109		1
8	Kiekk	110		1
9	Aluslevy	111		1
10	Koepöytä	112		1
11	Välipöytä	114		1
12	Koepöytäliikkeen akseli	115		1
13	Sormus			4
14	Jousilaukku M6 DIN 127			1
15	Jousilaukku M5 DIN 127			1
16	Aluslevy M6 DIN 7349			2
17	Aluslevy M5 DIN 440			4
18	Aluslevy M5 DIN 125			5
19	Aluslevy M6 DIN 125			8
20	Aluslevy M10 DIN 125			4
21	Kumilaukku Ø7 - Ø17			1
22	Mutteri M6 DIN 934			4
23	Mutteri M10 DIN 934			9
24	Sipälmutteri M5 DIN 315			2
25	Sipälmutteri M6 DIN 3122			2
26	Kuusiokantavu M6x25 DIN 912			1
27	Kuusiokantavu M10x40 DIN 912			1
28	Kuusiokantavu M5x25 DIN 931			2
29	Kuusiokantavu M6x70 DIN 931			2
30	Kuusiokantavu M6x70 DIN 931			4
31	Kuusiokantavu M6x70 DIN 931			4
32	Sipälmutteri M4x10 DIN 316			1
33	Pidikinsäiliö M4x10 DIN 913			1
34	Kierretankko M6x20 DIN 975			1
35	Kierretankko M6x40 DIN 975			1
36	Lukituslangan akselinn DIN 705			2
37	Lukituslangan akselinn DIN 705			2
38	Padinnäppäin M6x12 DIN 913			1
39	Padinnäppäin M6x12 DIN 913			1
40	Neulasputa d1 15mm DIN 11024			2
41	Torilla C			1
42	Orientalmotor BUH450C-20FR			1
43	SIF FTBK 25 TF			1
44	SIF Neulasputa M6 6/12 DN			1
45	SIF Neulasputa M6 6/12 DN			2
46	Leijonien painopöytä SF-FS3177404 Art.no 1542			1
47	Pronssi aluslevy M6			1
48	Haarukanivel M6x12 DIN 71751			1
49	Vaarnanruuvi M6x25 DIN 939			1

**Nimike**  
Tappi-kiekkokoelaitte

**Yleistiedot:**  
Koneistus  
SO 2748 M  
Hiljaus  
SP-EN ISO 13920-B

**Tampereen Teknillinen Yliopisto**  
Materiaalipalvelus

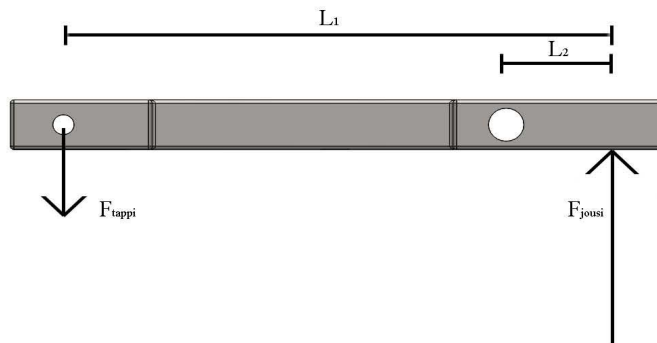
**Kokonaismassa:** 8kg

**Lehti** / **Lehliä** / **A-kieli** / **Tiedosto** / **Hakemisto**

**Suhde** / **1:4** / **Pvm.** / **Tark.** / **Pvm.**

**Plr. no.** / **102** / **Versio**

## LIITE 7: TAPPI-KIEKKO-KOELAITTEEN PURISTUSJOUSEN MITOITUS JA VALINTA



**Kuva 1.** Kuormitusvarren vapaakappalekuva jousivoiman vaikuttaessa varteen.

Jousen etäisyys tapista  $L_1 := 150\text{mm}$   
 Jousen etäisyys nivelestä  $L_2 := 25\text{mm}$

**Mitoitetaan jousi suurimman halutun kuormituksen mukaan. Suurin haluttu kuormitus koetapille on 20 Newtonia.**

$$F_{\text{tappi}} := 20\text{N}$$

**Jouselta vaadittu voima**

$$F_{\text{jousi}} := \frac{F_{\text{tappi}} \cdot (L_1 - L_2)}{L_2} \quad F_{\text{jousi}} = 100\text{N}$$

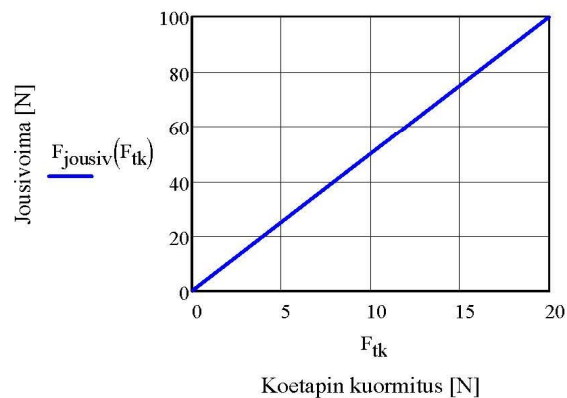
**Valitaan jousivoimaltaan vähintään 100 Newtonin jousi jousikatalogista.**

Valmistaja: LESJÖFORS Tuotenimi: Puristusjousi SF-TF-SS1774-04 Art.nro:1542

Maksimi jousivoima  $F_{\text{jousi.max}} := 133.4\text{N}$   
 Jousivakio  $k := 5 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$   
 Jousen vapaa pituus  $L_{\text{vapaa}} := 75\text{mm}$

**Muodostetaan jousivoiman yhtälö koetapin kuormituksen funktiona ja piirettään siitä kuvaaja.**

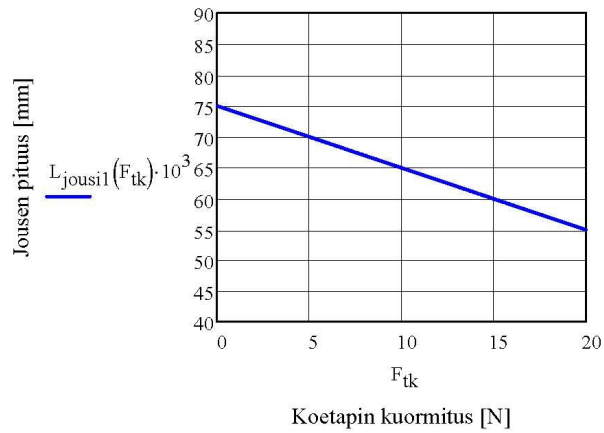
$$F_{\text{jousiv}}(F_{\text{tk}}) := \frac{F_{\text{tk}} \cdot (L_1 - L_2)}{L_2}$$



**Kuva 2.** Jousivoima koetapin kuormituksen funktiona.

**Muodostetaan jousen pituuden yhtälö koetapin kuormituksen funktiona ja piirretään siitä kuvaaja.**

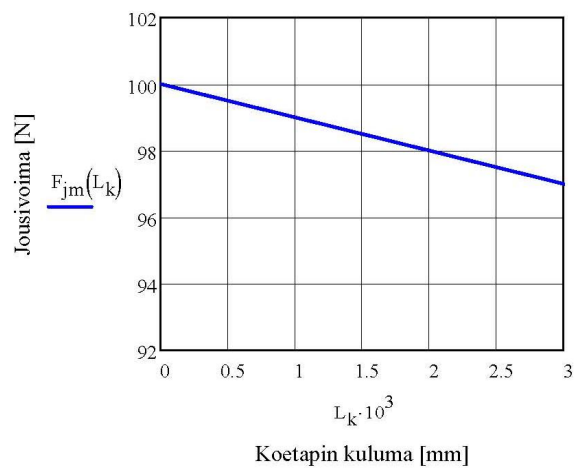
$$L_{\text{jousi1}}(F_{\text{tk}}) := L_{\text{vapaa}} - \frac{F_{\text{jousiv}}(F_{\text{tk}})}{k}$$



**Kuva 3.** Jousen pituus koetapin kuormituksen funktiona.

**Muodostetaan jousivoiman muutoksen yhtälö koetapin kuluman funktiona ja piirretään siitä kuvaaja.**

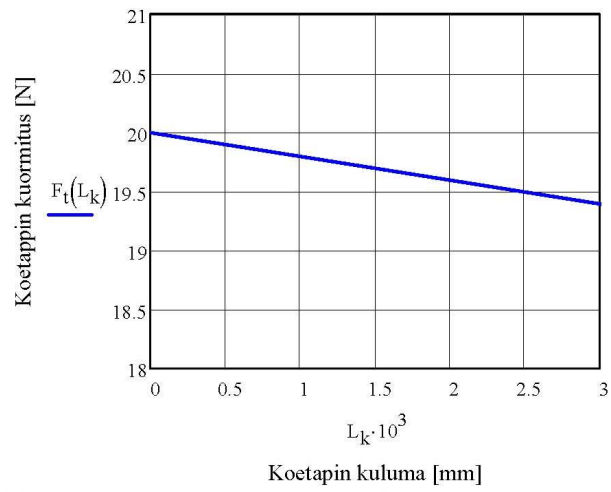
$$F_{\text{jm}}(L_{\text{k}}) := k \cdot [L_{\text{vapaa}} - (L_{100\text{N}} + L_{\text{jm}}(L_{\text{k}}))]$$



**Kuva 4.** Jousivoiman muutos koetapin kuluman funktiona.

Muodostetaan koetappiin kohdistuvan voiman yhtälö koetapin kuluman funktiona ja piirretään siitä kuvaaja.

$$F_t(L_k) := \frac{F_{jm}(L_k) \cdot L_2}{L_1 - L_2}$$



**Kuva 5.** Koetapin kuormitus koetapin kuluman funktiona.