

Ville Uusimaa

**MODULAARISEN KÄÄNTÖNIVELEN SUUNNITTELU JA  
PROTOTYYPIN VALMISTUS**

# **MODULAARISEN KÄÄNTÖNIVELEN SUUNNITTELU JA PROTOTYYPIN VALMISTUS**

Ville Uusimaa  
Opinnäytetyö  
Kevät 2015  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, tuotantotalous

---

Tekijä: Ville Uusimaa

Opinnäytetyön nimi: Modulaarisen kääntönivelen suunnittelu ja prototyypin valmistus

Työn ohjaaja: Helena Tolonen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2015 Sivumäärä: 41 + 7 liitettä

---

Insinööriä tehtiin Oulussa sijaitsevalle Probot Oy:lle. Työ on osa modulaarista sarjaa, jota Probot Oy on kehittämässä. Sarja tulee koostumaan osista, joista voidaan nopeasti koota asiakkaan tarpeita vastaava laite.

Työssä suunniteltiin osista koostuva, modulaarinen kääntönivel tilaajan tarpeisiin. Suunnitelmien pohjalta valmistettiin myös prototyyppi, jonka avulla Probot Oy voi tehdä jatkossa kehitystä laitteeseensa. Työhön kuului kääntönivelen mekaniikan suunnittelu, 3D-mallien ja valmistuskuvien piirtäminen sekä prototyypin valmistaminen. Laite, johon kääntönivel tulee, on vasta kehitteillä. Tästä syystä työssä on jätetty mainitsematta joitain komponentteja tarkasti ja pidetään salassa suunnittelun tulokset.

Suunnittelussa täytyi ottaa huomioon tilaajan muu laitteisto ja liitännät siihen. Työssä suunniteltu kone oli vasta prototyyppi, ja sen avulla tullaan tekemään jatkokehitystä. Tämän vuoksi kaikkia laitteen tulevia ominaisuuksia ei vielä tiedetty. Jotkin työssä käytetyistä lähtöarvoista ovat siis suuntaa antavia.

Työssä sovellettiin tuotekehityksen eri menetelmiä, muun muassa systemaattista suunnittelua ja valmistusmyönteistä suunnittelua. Systemaattisessa suunnittelussa eri ratkaisuja haetaan ja vertaillaan systemaattisesti. Valmistusmyönteisen ja kokoonpanomyönteisen suunnittelun avulla kääntönivel suunniteltiin helpoksi ja edulliseksi valmistaa.

Työn tuloksena saatiin suunnitelmat kääntönivelestä. Suunnitelmien lisäksi Probot Oy sai toimivan ja vaatimukset täyttävän prototyypin. Suunnitelmien ja prototyypin avulla Probot Oy voi jatkaa testejään ja jatkokehittää kääntöniveltä.

---

Asiasanat: tuotekehitys, modulaarisuus, sähkömoottori, kone-elimet, prototyyppi

## **ALKULAUSE**

Opinnäytetyössä suunniteltiin modulaarinen kääntönivel ja valmistettiin suunnitelmien pohjalta prototyyppi Probot Oy:lle. Työn tekeminen oli mielenkiintoista ja opettavaista.

Haluan kiittää Probot Oy:n toimitusjohtajaa Antti Tikanmäkeä ja Matti Tikanmäkeä työn tarjoamisesta ja avusta sen toteutuksessa. Haluan myös kiittää ohjaavana opettajana toiminutta lehtori Helena Tolosta avusta. Erityiset kiitokset haluan antaa avopuolisolleni pitkästä pinnasta, jota koeteltiin viimeisen puolen vuoden aikana.

Ville Uusimaa

Oulussa 15.2.2015

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
SYMBOLIT JA LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Probot Oy	8
1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset	9
2 TUOTEMÄÄRITTELY JA KONSEPTISUUNNITTELU	11
2.1 Suunnittelun vaiheet	11
2.2 Tuotespesifikaatio	11
2.3 Vaatimuslista	12
2.4 Systemaattinen suunnittelu	12
2.5 Tietokoneavusteinen suunnittelu	13
2.6 DFX:n periaate	14
2.6.1 DFM	14
2.6.2 DFA	16
2.7 Koneturvallisuus ja yleiset määräykset	17
2.7.1 Koneen määritelmä	17
2.7.2 Valmistajan velvollisuudet	18
3 KOMPONENTTIEN JA MATERIAALIN VALINNAT	19
3.1 Moottori	19
3.2 Alennusvaihde	20
3.3 Kytkin	22
3.4 Laakerointi	23
3.5 Valmistusmateriaalit	26
3.5.1 FEM	26
3.5.2 Kestävyysanalyysi	27
3.6 Kokoonpano	31
4 PROTOTYYPIN VALMISTUS	34
4.1 Ongelmat tilojen saatavuudessa	34
4.2 Osien valmistus ja tilattujen osien viimeistely	34

5 YHTEENVETO	36
LÄHTEET	38
LIITTEET	41

# SYMBOLIT JA LYHENTEET

## Lyhenteet

BOM = Bill Of Material, kokoonpanon osalista

CAD = Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu

DFA = Design for assembly, kokoonpanomyönteinen suunnittelu

DFM = Design for manufacturing, valmistusmyönteinen suunnittelu

DFX = Design for X, suunnittelu huomioimalla jokin tietty ominaisuus

FEM = Finite Element Method, elementtimenetelmä

## Symbolit

$C$  = väsymisvoimaluku laakereilla

$d$  = sisähalkaisija

$D$  = ulkohalkaisija

$M_v$  = vääntömomentti

$n$  = kierrosten lukumäärä

$P$  = tehollisvoima laakereilla

$Z_k$  = kiinteän ulkokehän hammasluku

$Z_j$  = joustokehän hammasluku

$W_v$  = vääntövastus

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä suunnitellaan tilaajan tarpeisiin soveltuva laite ja valmistetaan siitä suunnitelmien pohjalta toimiva prototyyppi. Opinnäytetyö tehdään Probot Oy:lle. Laite tulee toimimaan osana modulaarista järjestelmää, ja tämän vuoksi sen täytyy liittyä saumattomasti yrityksen jo valmiiksi suunnittelemiin muihin järjestelmän osiin. Koska Probot Oy on vasta kehittämissä järjestelmää ja tässä työssä suunniteltava laite tulee olemaan prototyyppi, jätetään opinnäytetyön julkaistavasta versiosta joitain komponentteja ja niiden valintaperusteita esittelemättä.

## 1.1 Probot Oy

Probot Oy on Oulussa toimiva huipputeknologian yritys. Yrityksellä on tilat Oulun yliopistolla ja Oulun Metsokankaalla. Yritys on perustettu vuonna 2006. Probot Oy:llä ja sen henkilökunnalla on vahva side yliopistomaailmaan, ja yritys perustettiin toimimaan tiedemaailman ja yritysten välillä. Yrityksen visiona on tuoda tutkimusten tulokset loppukäyttäjien ulottuville ja löytää oikean maailman sovelluksia niille. Probot Oy:n erikoisalaa ovat robotiikan erilaiset tuotteet ja käyttösovellukset. (1.)

Yrityksen tuotteina on eri valmistajien robotteja, joita käytetään eriluontoisissa projekteissa. Probot Oy tarjoaa seuraavan sukupolven ratkaisuja pitkälle kehittyneissä robotiikan järjestelmissä. Yrityksen tavoitteena on tuoda itsenäisesti toimivia robottijärjestelmiä uusiin käyttökohteisiin. Probot Oy myös suunnittelee ja toimittaa teollisuus- ja tuotantoautomaatiojärjestelmiä. (2; 3; 4.)

Probot Oy on kehittämässä uutta modulaarista järjestelmää, jonka avulla asiakkaalle voidaan toimittaa juuri yrityksen tarvitsemaan tarkoitukseen sopiva laite. Järjestelmä tulee koostumaan yhteensopivista osista, joista voidaan koota luke mattomia eri variaatioita erilaisiin asiakkaiden tarpeisiin.



## 1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset

Opinnäytetyössä kehitetään Probot Oy:n suunnittelemaan järjestelmään yhtä osaa. Opinnäytetyön tilanneen yrityksen ja työtä tekevän opiskelijan välillä on sovittu, että opiskelija käyttää omia ja koulun käytettävissä olevia tiloja työn tekemiseen. Työn tilaaja hankkii ja tarjoaa opiskelijan tarvitsemat materiaalit ja komponentit prototyypin valmistusta varten.

Työn tavoitteena on suunnitella tilaajan tarpeisiin soveltuva laite, joka liitetään tilaajan muuhun laitteistoon. Suunnittelun pohjalta valmistetaan myös toimiva prototyyppi. Laitteen tulee olla modulaarinen ja sopia niin kuormituksen kestoltaan kuin liitettävyydeltäänkin tilaajan eri tarpeisiin. Lisäksi laitteen tulee olla kohtuullisen hintainen ja yksinkertaisilla valmistusmenetelmällä valmistettavissa oleva. Laite pyritään suunnittelemaan huoltovapaaksi tai mahdollisimman pientä huoltoa vaativaksi. Teknisten vaatimusten lisäksi laitteen tulee täyttää voimassa olevat turvallisuusmääräykset sekä Suomen lainsäädännön asettamat vaatimukset omalta osaltaan. Työn kuvaus ja tilaajan tavoitteet ovat liitteessä 1.

Työssä suunniteltava laite tulee osaksi suurempaa tuotekokonaisuutta, joten sille ei tehdä tuotesuunnitteluun yleensä kuuluvia analyysyjä, kuten markkinatutkimusta tai tuotestrategiaa. Laite tulee olemaan vasta prototyyppi, ja lopullinen tuote luultavasti muuttuu joiltain osin. Tästä huolimatta suunnitelmissa pidetään mielessä lopullisen laitteen kustannukset. Laite suunnitellaan mahdollisimman helpoksi valmistaa ja kokoonpanna.

Laitteesta tehdään 3D-mallit, valmistuskuvat ja osaluettelo, jotka toimitetaan työn tilaajalle. Tarkkoja lujuuslaskelmia laitteelle ei pystytä vielä tekemään, koska tulevia kuormituksia ei voida tietää ennen prototyypillä tehtäviä kokeita. Laitteen kestävyttä tarkastellaan oletetuista heikoimmista kohdista CADin ja FEM-laskennan avulla.

Opinnäytetyön esipalaveri pidettiin viikolla 37. Ensimmäisessä palaverissa tutustuttiin Probot Oy:hyn yrityksenä, yrityksen tiloihin, tuotteisiin sekä palveluihin. Palaverissa käytiin läpi, minkälainen työn aihe Probot Oy:llä on tarjota ja mitä

yritys haluaa saavuttaa. Varsinainen aloituspalaveri pidettiin 10.9.2014. Aloituspalaverissa sovittiin, mitä yritys odottaa työn tekijältä, mitä haluaa työllä saavutettavan ja miten se liittyy osana lopulliseen tuotteeseen. Työn tavoitteellinen valmistuminen on vuoden 2014 loppuun mennessä.

Työn teko alkoi projektisuunnitelman ja aikataulun laatimisella. Projekti jakaantui kuuteen vaiheeseen: aloitukseen, luonnosteluun, ratkaisujen analysointiin, osien suunnitteluun, komponenttien valintaan ja prototyypin tekoon.

Opinnäytetyön teko aloitettiin asiakkaan kanssa palaverilla, jossa määriteltiin, mitä se haluaa laitteen tekevän ja mihin kääntönivel tulee liittymään. Tässä työssä asiakkaalla oli selvillä, mitä se haluaa tuotteen tekevän. Työn tekijälle kuuluu laitteen mekaaninen ja valmistuksen suunnittelu sekä prototyypin valmistus. Kyseessä on vielä prototyyppi, joten asiakaskin on epävarma, mitä laitteen tulee pystyä tekemään

## 2 TUOTEMÄÄRITTELY JA KONSEPTISUUNNITTELU

Kääntönivel tulee osaksi modulaarista sarjaa, josta saadaan loppuasiakkaalle nopeasti ja kustannustehokkaasti juuri hänen tarvitsemansa kokoonpano. Tuotesuunnittelu on osa tuotekehitystä. Tuotesuunnittelu alkaa, kun tuotetta aloitetaan ideoimaan. Aluksi on oltava jonkinlainen näkemys siitä, mitä ominaisuuksia tuotteella halutaan olevan. Tuotesuunnittelun alussa määritellään tuotteelta halettavat ominaisuudet ja toiminnot. Suunnittelun alkuvaiheessa määritellään myös asiakkaan halut ja tarpeet. Asiakkaan tuotteelle asettamat yksilölliset tarpeet on pystyttävä muuttamaan mitattaviksi suureiksi. (5; 6.) Tuotekehitystyön päämääränä voi olla täysin uuden tuotteen valmistus tai jo markkinoilla olevan tuotteen merkittävä parannus (7).

### 2.1 Suunnittelun vaiheet

Tuotekehitysprosessin vaiheet voidaan jakaa viiteen vaiheeseen:

- tuotekonseptin kehittäminen
- systeemitason suunnittelu
- yksityiskohtainen suunnittelu
- testaus ja viimeistely
- tuotannon käynnistäminen. (8).

Koska kääntönivel tulee olemaan yksi osa isompaa laitekokonaisuutta, on tuotekonseptin kehittäminen tehty jo ennen tämän työn aloitusta. Myöskään tuotannon käynnistämiseen asti ei päästä tämän työn aikana.

### 2.2 Tuotespesifikaatio

Tuotespesifikaatiolla tarkoitetaan tuotemäärittelyä tai tuotteen vaatimuksia. Tuotespesifikaatio määrittelee lopputuloksen, johon tuotekehityksessä pyritään.

Tuotespesifikaation tarkoituksena on kuvata yksiselitteisesti asiakkaan ja yrityksen tuotteelle asettamat vaatimukset. Tuotespesifikaatio ei siis ole lista asiakkaan vaatimuksista, koska se jättää liikaa tilaa subjektiiviselle ajattelulle. Tämän vuoksi tarvitaan erityisiä mitattavissa olevia asioita, jotka kertovat, mitä tuotteen tulee saavuttaa. Tuotespesifikaatio ei ota kantaa siihen, miten jokin ominaisuus tai arvo tulee saavuttaa. (5; 7.)

## 2.3 Vaatimuslista

Esisuunnitteluvaiheessa laaditaan alustava vaatimuslista, jossa on lueteltuna asiakkaan vaatimukset ja toiveet. Vaatimuslistan vaatimukset voivat olla toiveita, kiinteitä vaatimuksia tai vähimmäisvaatimuksia. Vaatimusten täytyy olla täsmällisiä määrällisesti ja laadullisesti. (5.) Kääntönivelestä laadittiin alussa taulukon 1 mukainen vaatimuslista, jonka pohjalta suunnittelua lähdettiin tekemään.

TAULUKKO 1. Kääntöniveleen alustava vaatimuslista

Probot Oy	Kääntönivel	
	Suuruus	Merkitys
<b>Geometria</b>		
Putken halkaisija	60 mm	KV
Pituus	>500 mm	VV
Paino	Kevyt	T
<b>Voimat</b>		
Aksiaalikuormitus	100 kg	VV
Momentin kesto	?	VV
<b>Energia</b>		
Sähkömoottori		KV
<b>Materiaali</b>		
Prototyyppi	Teräs	KV
Lopullinen	Ruostumaton teräs	KV
Standardiosia, "hyllytavarasta"		T
<b>Valmistus</b>		
Koneistamalla		KV
Yksinkertainen rakenne		T
<b>Kokoonpano</b>		
Perustyökaluilla		VV
Kesto	< 10 min	VV
<b>Kunnossapito</b>		
Huoltovapaa		T
<b>Kustannukset</b>		
Edullinen		T
<b>Turvallisuus</b>		
Oltava turvallinen käyttää		KV
Konedirektiivi/Suomen lait täytyttävä		KV

## 2.4 Systemaattinen suunnittelu

Tuotesuunnittelun avuksi on olemassa monia erilaisia menetelmiä. Näistä yksi menetelmä on systemaattinen suunnittelu. Systemaattista suunnittelua käytettäessä aluksi muotoillaan ongelma. Tämän lähtökohtina pidetään vaatimuslistaa ja alustavaa tuotespesifikaatiota. Tämän jälkeen esitetään toimintorakenne eli

laitteen tehtävä määritellään tulo- ja lähtösuureiden avulla kokonaistoiminnoksi. Toiminnoille haetaan eri ratkaisumalleja ja arvioidaan näiden toimivuutta. Lopuksi ratkaisut yhdistetään ja valitaan sopiva yhdistelmä. Viimeiseksi eri yhdistelmät pisteytetään ja valitaan toimivin ratkaisu. (5.)

## 2.5 Tietokoneavusteinen suunnittelu

CAD on lyhenne sanoista Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu. Ensimmäiset kolmiulotteiset suunnitteluohjelmat tulivat markkinoille 1980-luvulla, mutta vasta 1990-luvulla näiden ohjelmien käyttö yleistyi suunnittelijoiden käytössä. (9.)

Parametrinen piirremallinnusjärjestelmä tarkoittaa tietokoneavusteista suunnitteluohjelmistoa, jonka avulla suunniteltava kohde mallinnetaan kolmiulotteisen geometrian avulla (9). Kappaleen kolmiulotteinen malli on paljon paremmin hyödynnettävissä kuin kaksiulotteinen malli monestakin syystä. Esimerkiksi kolmiulotteisilla malleilla kappaleiden yhteensopimattomuus huomataan paljon helpommin kokoonpanossa. (9.)

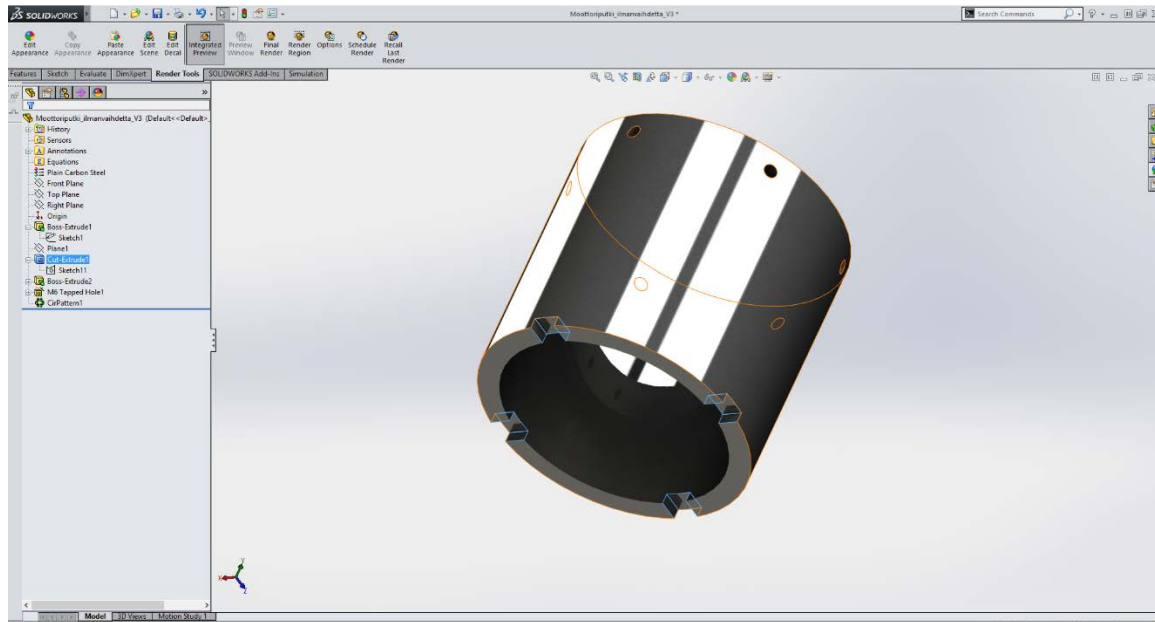
Parametrisuus tarkoittaa sitä, että kappaleeseen kytkettyjä mittoja voidaan myöhemmin muuttaa ja nämä mitat päivittyvät myöhempisiin malleihin ja kokoonpanoihin. Tämä helpottaa muutosten tekemistä. Piirustusten päivittäminen helpottuu, kun kappaleen malliin tehdyt muutokset päivittyvät myös tehtyihin piirustuksiin automaattisesti. (9.)

Piirremallinnus tarkoittaa, että kappaleen malli rakennetaan piirteistä. Aluksi tehdään peruspiirre, johon lisätään tai siitä poistetaan piirteitä. Näin rakentuu kappaleesta tarkka malli. Nämä piirteet kerääntyvät niin sanottuun piirrepuuhun, josta kappaleen mallinnushistoria ja -tapa selviävät myös muille kuin suunnittelijalle. (9.)

CADin avulla voidaan myös tehdä erilaisia analyyseja piirretyille malleille. FEM-analyysi käsitellään tarkemmin luvussa 3.5.1.

Tässä työssä käytettiin apuna Solidworks 2014 -ohjelmistoa. Solidworksilla saadaan tehtyä osien ja kokoonpanon mallinnuksia ja voidaan simuloida näiden

kappaleiden käyttäytymistä. Ohjelmalla voidaan tuottaa eli renderöidä myös aidon näköisiä kuvia valmiista tuotteista. Kuvassa 1 näkyy aikainen versio moottoriputkesta mallinnettuna. Kuvassa vasemmalla näkyy myös Solidworksin piirreppuu.



KUVA 1. Solidworks-ohjelmiston käyttöliittymä

## 2.6 DFX:n periaate

DFX on lyhenne sanoista Design For X, ja joskus puhutaan myös esimerkiksi Design For Everything. Tässä X voi tarkoittaa monia eri asioita. Voidaan puhua esimerkiksi valmistettavuuden suunnittelusta DFM:sta (Design For Manufacturing) tai DFE:sta (Design For Environment), jolloin suunnitellaan tuotteen ympäristöystävällisyyttä. (7.)

### 2.6.1 DFM

Design For Manufacturing -periaate tarkoittaa niitä menetelmiä, joilla yksinkertaistetaan tuotteen valmistusta ja samalla alennetaan tuotteen valmistuskustannuksia. Tuotteen valmistettavuutta voidaan arvioida seitsemällä kriteerillä:

- laatu
- tuotantokustannukset
- joustavuus

- riskit
- läpimenoaika
- tehokkuus
- ympäristövaikutukset. (10.)

Tuotetta suunniteltaessa suunnittelijan tulee ottaa huomioon mahdollisuudet sen valmistamiseen. On siis tärkeää, että tuotteen suunnittelija on tietoinen osien valmistusmenetelmistä. Huomioimalla tuotteen valmistettavuus voidaan säästää kustannuksissa vähentämällä koneaikaa, materiaalia ja osien määrää. Halvin osa on aina se, jota ei tarvitse suunnitella tai valmistaa. Jo aikaisemmin valmiiksi suunnitellut tai standardiosat kannattaa käyttää hyödyksi aina, kun mahdollista. (7.)

Kääntönivel koostuu yhteensä yhdestätoista isommasta eri osasta ja näiden lisäksi erilaisista standardiosista kuten ruuveista ja lukkorenkaasta. Osista viisi on tilattavia, valmiita osia. Valmistettavia osia kääntönivelessä on vain kuusi vaihteellisessa mallissa ja viisi ilman vaihdetta olevassa. Osat suunniteltiin siten, että ne voidaan valmistaa tavallisilla koneistusmenetelmillä. Kaikki osat valmistetaan sorvaamalla ja viimeistelyyn tarvitaan tämän lisäksi jyräntä.

Moottori- ja laakeriputkiputket on valittu siten, että ne voidaan valmistaa vähällä sorvauksella valmiista varastoputkista. Eniten tarkkuutta vaativa työvaihe rakenteessa tulee olemaan laakeripesien sorvaus ulkoputkeen sekä laakerien paikat runkoakselille. Nämä sorvaukset saadaan tehtyä kohtuullisen helposti tavallisella manuaalisorvilla. Välikappale, sisäputki ja runkoon tuleva kiinni-tysakseli valmistetaan sorvaamalla akselista. Moottoriputkeen tarvitsee jyräntä pienet kolot vahvistamaan moottorin kiinnitystä. Moottori- ja laakeriputkiin, välikappaleeseen sekä runkoakseliin täytyy lisäksi porata ja kierteyttää reiät nivelen kokoonpanoa varten. Valittujen kierrekokojen määrä on pidetty pienenä työkalujen ja työvaiheiden minimoimiseksi. Kääntöniveleen valitut materiaalit ja komponentit käydään läpi tarkemmin luvussa 3.

## 2.6.2 DFA

Design For Assembly -periaatteen tavoitteena on kokoonpanotyön vähentäminen (10). Tuotteiden kokoonpantavuuden suunnittelu on systemaattinen tuotekehitysmenelmä, jonka tavoitteena on tuotteen rakenteen ja tämän myötä kokoonpanon yksinkertaistaminen (11). Koska käytännössä kaikki tuotteet kokoonpannaan osista ja kokoonpano vaatii aikaa eli rahaa, on järkevää suunnitella tuotteiden kokoonpano mahdollisimman yksinkertaiseksi. Kokoonpantavuutta arvioidessa kokoonpanomenetelmällä on suuri merkitys. Automatisoidun ja manuaalisen kokoonpanon välillä on suuri ero. (7.) Kääntönivelen tuotantomäärät tulevat olemaan sen kokoisia, ettei kokoonpanoa kannata automatisoida. Nivel tullaan siis kokoamaan täysin manuaalisesti.

Kokoonpantavuuden tärkeimpänä periaatteena voidaan pitää osien vähentämistä. Samalla tavalla kuin DFM:ssa, olematonta osaa ei tarvitse kasata. Kokoonpantavuuden suunnitteluperiaatteina voidaan käyttää

- osien vähentämistä
- tuotevariantteja
- osien kokoonpanosuuntia
- osien käsiteltävyyttä
- rakenteen kokoonpantavuutta
- liitosten toteutusta
- kokoonpanotyön laadun valvontaa. (10.)

Kääntönivelen kokoaminen koostuu vain kuudesta eri vaiheesta. Nivel on pyörähdyssymmetrinen, ja jokainen osa sopii vain yhteen paikkaan ja yhdessä asennossa. Tämän vuoksi kokoonpanoa ei voi tehdä vahingossa väärin. Koko kokoonpano voidaan tehdä käyttämällä vain yhtä työkalua, kuusiokoloavainta. Kokoonpanossa käytettävät ruuvikoot on valittu samankokoisiksi, jolloin minimoidaan tarvittavien työkalujen määrä. Sisäkkäin asetettavien osien reunat ovat viistettyjä asennuksen helpottamiseksi.



## 2.7 Koneturvallisuus ja yleiset määräykset

Tuotekehitystä ja koneturvallisuutta ohjaavat eri direktiivit, lait ja asetukset. Euroopan talousalueella EU:n konedirektiivillä 2006/42/EY säädellään koneiden turvallisuuteen ja terveyteen liittyvistä vaatimuksista. Nykyinen konedirektiivi on valmistunut vuonna 2006 ja otettu käyttöön 29.12.2009. Suomessa konedirektiivi on otettu käyttöön valtioneuvoston asetuksella koneiden turvallisuudesta (12.6.2008/400). Asetus vastaa sisällöltään täysin konedirektiiviä. Muita konetta mahdollisesti koskevia säännöksiä ovat esimerkiksi

- kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteiden turvallisuudesta (1694/1993) (pienjännitedirektiivi)
- valtioneuvoston asetus sähkölaitteiden ja -laitteistojen sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta (1466/2007) (EMC-direktiivi)
- valtioneuvoston asetus räjähdyskelpoisten ilmaseosten työntekijöille aiheuttaman vaaran torjunnasta (576/2003) (ATEX-direktiivi)
- painelaitelaki (869/1999) (paineastiadirektiivi)
- kaasulaiteasetus (1434/1993) (kaasulaitedirektiivi)
- ajoneuvoja koskevat säännökset (ajoneuvodirektiivit)
- rakennustuotteita koskevat säännökset (rakennustuotedirektiivi). (12.)

Konedirektiivin tarkoituksena on lisätä koneiden turvallisuutta ja taata loppukäyttäjän turvallisuus. Direktiivissä määritellään kone ja valmistajan velvollisuudet, ennen kuin uusi kone voidaan tuoda markkinoille ja ottaa käyttöön. Euroopan komissio on julkaissut Konedirektiivin 2006/42/EY soveltamisoppaan, jota suunnittelijat ja valmistajat voivat käyttää hyväkseen. (13.)

### 2.7.1 Koneen määritelmä

Konedirektiivin mukaan: ”Koneella tarkoitetaan toisiinsa liitettyjen osien tai komponenttien yhdistelmää, jossa on tai joka on tarkoitettu varustettavaksi muulla, kuin välittömällä ihmis- tai eläinvoimalla toimivalla voimansiirtojärjestelmällä ja, jossa ainakin yksi osa tai komponentti on liikkuva ja joka on kokoonpanttu erityistä toimintoa varten.” (14.)

Saman direktiivin mukaan: ”Osittain valmiilla koneella tarkoitetaan yhdistelmää, joka on melkein kuin kone, mutta joka ei sellaisenaan pysty suorittamaan erityistä toimintoa. Voimansiirtojärjestelmä on osittain valmis kone. Osittain valmis kone on ainoastaan tarkoitettu liitettäväksi toisiin koneisiin tai muihin osittain valmiisiin koneisiin tai laitteisiin tai koottavaksi niiden kanssa siten, että muodostuu sellainen kone, johon sovelletaan tätä asetusta.” (14.)

### **2.7.2 Valmistajan velvollisuudet**

Ennen, kuin kone voidaan saattaa markkinoille, on valmistajan tai tämän valtuutetun edustajan täytettävä seuraavat ehdot:

- varmistettava, että kone täyttää olennaiset terveys- ja turvallisuusvaatimukset
- varmistettava, että tekninen tiedosto on käytettävissä
- varustettava kone tarvittavilla tiedoilla, kuten ohjeilla
- huolehdittava asianmukaisesta vaatimustenmukaisuuden arviointimenetelmästä
- laadittava vaatimustenmukaisuusvakuutus ja varmistettava, että se on koneen mukana sekä
- kiinnitettävä koneeseen CE-merkintä. (14.)

Koneiden vaatimustenmukaisuudesta määrätään lailla 26.11.2004/1016. Tämän lain tarkoituksena on varmistaa, että kone on vaatimusten mukainen eikä se aiheuta käytössä tapaturman vaaraa eikä terveydelle haittaa. Lain tarkoituksena on myös varmistaa, että laite voidaan esteettä luovuttaa markkinoille. (15.)

### 3 KOMPONENTTIEN JA MATERIAALIN VALINNAT

Koska kyseessä on vasta tuotteen prototyyppi, on Probot Oy pyytännyt työn tekijää jättämään joitain komponentteja ja tarkkoja tietoja paljastamatta. Opinnäytetyön julkisesta versiosta jätetään pois kääntöniveleen valittu moottori ja alenusvaihe. Nämä komponenttien toiminta ja mitoitus käydään läpi yleisellä tasolla teoriassa. Moottorin ja vaihteen vaatimat laskelmat, valintaperusteet ja tarvittavat liitetiedostot on käyty läpi ja hyväksytty Probot Oy:n, opinnäytetyön valvojan ja työn tekijän kesken.

Kääntönivel muodostuu kahdesta pääosasta, ylemmästä laakerointiosasta ja alemmasta moottoriosasta. Lisäksi näiden kahden osan välissä on väliholkki, joka mahdollistaa kääntöniveleen kokoamisen ja purkamisen sekä mahdollisesti eri komponenttien yhdistelmän.

#### 3.1 Moottori

Probot Oy on valinnut jo valmiiksi moottorin, jota yritys haluaa käyttää kokoonpanossaan. Koska järjestelmä on vasta kehitteillä, Probot Oy ei halunnut julkistaa moottorin mallia tai yksityiskohtaisia tietoja sen arvoista. Moottori on tyypiltään harjaton ulkopyörjä sähkömoottori. Tässä osiossa käydään läpi moottorin yleinen toimintaperiaate, käyttö ja mitoitus.

Tasavirtamoottoreita on rakenteeltaan kahdenlaisia: harjallisia ja harjattomia. Molemmat moottorityypit ovat yksinkertaisia rakenteeltaan, mutta harjattoman moottorin ohjaus on vaikeampaa toteuttaa. Harjattomassa tasavirtamoottorissa kestopagneetit sijaitsevat roottorissa ja virta ohjataan staattorin käämitykseen. Kommutointi tapahtuu moottorin päädyssä olevien Hall-anturien, roottorilla olevien kommutointimagneettien ja ohjauselektronikan avulla. Tasavirtamoottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää eri kuormituksilla muuttamalla ankkurijännitettä. (7.)

Ulkopyörjätyyppisessä tasavirtamoottorissa osat ovat käänteisesti verrattuna tavalliseen tasavirtamoottoriin. Ulkopyörjässä staattori on kiinteästi asennettu keskelle moottoria. Roottori puolestaan pyörii moottorin ulkokehällä. Akseli on

kiinnitetty moottorin pyörivään ulkokuoreen. Koska pyörivällä ulkokehällä on enemmän massaa, ulkopyöräjä tuottaa paremmin vääntöä kuin tavallinen. Tämän takia moottorityyppi on valittu kääntöniveleen. (16.)

Koska valittu moottori ei varsinaisesti ole tarkoitettu suunnitellun laitteen tyyppiin käyttöön, joudutaan tekemään joitain kompromisseja. Moottorin akseli on täysin pyöreä, joten siinä ei ole konekäytössä yleistä kiilauraa valmiina. Akselin päässä on pienellä kierteellä oleva reikä. Tämä mahdollistaa akselin kiinnittämisen, mutta rajoittaa pyörimisen vain toiseen suuntaan.

Moottorin akseli sopii käytettäväksi sellaisenaan kytkimen kanssa ilman vaihdetta olevaan kääntöniveleen malliin. Moottorin akseli on muutettava tai akseli vaihdettava, jos halutaan käyttää alennusvaihdetta. Akseliin voidaan jyrsiä kiilaura, jolloin se voidaan kiinnittää vaihteeseen. Toinen vaihtoehto on vaihtaa akseli sopivaksi. Tämä lisää valinnan mahdollisuuksia vaihteissa, koska akseli voidaan valita suuremmaksi halkaisijaltaan.

### **3.2 Alennusvaihde**

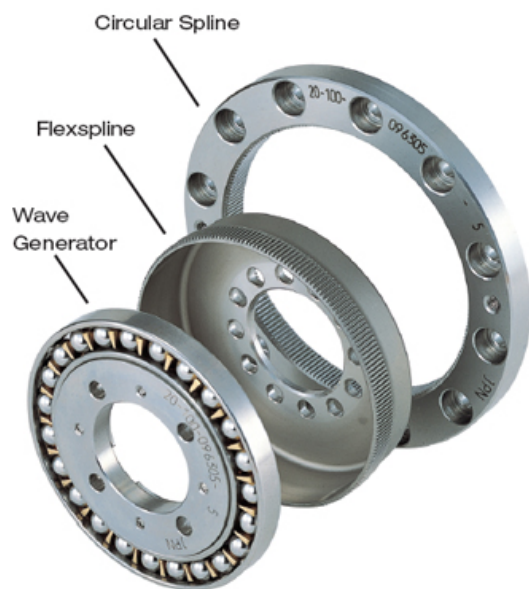
Samoin kuin valittua moottoria, Probot Oy ei halua myöskään julkistaa kääntöniveleen valittua vaihdetta. Valittu vaihde käydään läpi teorian osalta ja laskelmat sekä valittu vaihde jäävät Probot Oy:n tietoon.

Kääntöniveleen valittiin alustavasti työn alussa bearing reducer -tyyppinen vaihde, jonka mitoilla moottoriputki suunniteltiin. Vaihde kuitenkin paljastui liian kalliiksi vaihtoehdoksi prototyypin, ja siksi jouduttiin etsimään nopealla aikataululla uusi, sopiva vaihde. Vaihde tyypiksi vaihdettiin harmoninen vaihde.

Harmoninen vaihde (harmonic drive) eli joustokehävaihde on suosittu vaihdetyyppi muun muassa pienissä ja keskisuurissa roboteissa. Harmoninen vaihde soveltuu alennusvaihteeksi mutta myös tietyn rajoituksen ylennysvaihteeksi. Sitä käytetään differentiaalivaihteena pienten nopeuserojen aikaansaamiseen muun muassa painokoneiden säädössä. (17, kappale 7, s. 31 - 36.) Harmonista vaihdetta käytetään yleisesti kiertyvissä nivelissä. Näissä laitteissa on rinnakkaiset akselit, hyvin suuri välityssuhde, kompakti pakkaus, suuri mekaaninen lujuus sekä sopivalla osien sovittamisella lähes nollavälitys. Harmonisen vaihteen

heikkouksia ovat suuri staattinen kitka ja syklinen kitkamomentin vaihtelu (cogging). (18.) Harmonista vaihdetta valmistetaan laippamallina (tyypit HDUR ja HDUF) ja kuppimallina (tyypit HDUC, HDUS ja HIUC). HIUC-mallissa toisiopuolen laakerointi on integroitu vaihteeseen. Sen tavoitteena on saada tarkka alenusvaihte mekatroniikkasovelluksiin. (17, kappale 7, s. 31 - 36.)

Planeettapyöränä toimiva joustokehä on valmistettu ohuesta teräksestä (kuva 2). Siinä on yleensä kaksi hammasta vähemmän kuin ulommaisella hammaskehällä.



KUVA 2. Harmonisen vaihteen osat (19)

Ohutrenngaskuulalaakeri on sovitettu joustokehän sisälle hammastuksen sisälle. Ohutrenngaskuulalaakerin sisärenngas on tiiviisti soikeuttimen päällä. Soikeutin mankeloi joustokehän hammastusta ulkokehää pitkin. Soikeuttimen pyöriessä myötäpäivään yhden kierroksen joustokehä vaeltaa kahden hampaan verran vastapäivään. Vaihteen välityssuhde  $i$  ilmoitettu tuoteluetteloissa, ja sen saa laskettua kaavalla 1. (18.)

$$i = \frac{Z_k}{Z_k - Z_j}$$

KAAVA 1

$Z_k$  = kiinteän ulkokehän hammasluku

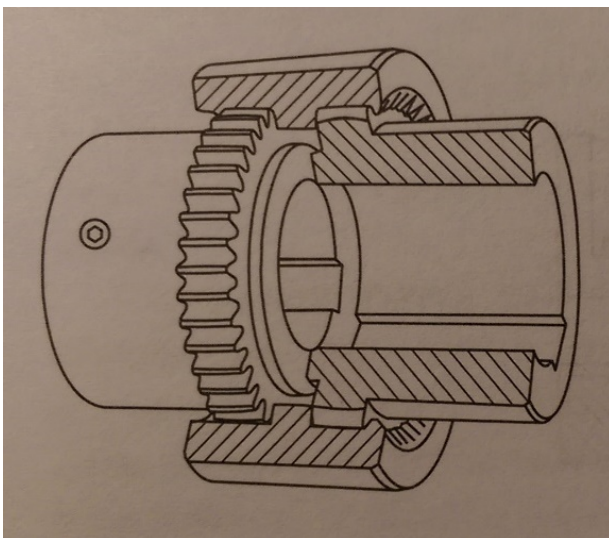
$Z_j$  = joustokehän hammasluku

Vaihteen kolmesta osasta mikä tahansa voidaan lukita koneen runkoon. Vaihte toimii differentiaalivaihteena, jos kaikki kolme vaihteen osaa pääsevät liikkumaan koneen runkoon nähden. Harmoninen vaihde soveltuu jopa 2 500 - 4 000 rpm ensiöpyörimisnopeuksille. Toisiomomentilla sallitaan myös jopa 5 000 Nm, välityssuhde voi olla välillä 50 - 320. (17, kappale 7, s. 31 - 36.) Kääntöniveleen esivalittua vaihdetta saa tilattua erikokoisina ja eri välityksillä valmistajalta, mikä mahdollistaa eri voimien kestoja tarvitsevien nivelten nopean valmistamisen vain vaihdetta vaihtamalla.

### 3.3 Kytkin

Kääntönivel rakentuu kahdesta eri kokoonpanosta, moottoriputkesta ja laakerointiputkesta. Moottori ja alennusvaihde täytyy pystyä kytkemään pyörivään akseliin jotenkin. Tämä kytkentä täytyy kuitenkin olla myös helposti purettavissa.

Kytkimien tarkoituksena on yhdistää kaksi pyörivää akselia toisiinsa. Hammaskytkin on jäykkä kytkin, ja se sallii vain pieniä kulma-, aksiaali- ja radiaalipoikkeamia. Hammaskytkin koostuu kolmesta osasta: kumpaankin akseliin asennettavasta hammaskehällä varustetusta navasta ja sisäpuolisella hammastuksella olevasta holkista. Kuvassa 3 on esitetty hammaskytkimen rakenne. (7, s. 227 - 228.)



KUVA 3. Hammaskytkimen rakenne (17, s. 228)

Hammaskytkimet ovat yleensä standardituotteita, ja niiden mitoitukset voidaan lukea suoraan valmistajien tarjoamista esitteistä ja taulukoista. Koska kääntönivelen kaikkia voimia ei vielä tässä vaiheessa tiedetä, on hammaskytkimen valinta vasta alustava. Tärkeimmät kytkimen valintaan vaikuttavat seikat ovat pieni koko, huoltovapaus ja yksinkertaisuus.

Niveleen valittu kytkin on Mekanexin valikoimasta malli Coupling – 224 – M14 – 10 – S – 10 – S – Mekanex (liite 2). Mekanexin hammaskytkin on pienikokoinen ja kevyt, ja se kestää suurta vääntömomenttia. Kytkin on huolto- ja voiteluvapaa, jolloin kääntöniveltä ei jouduta purkamaan säännöllisesti huollon vuoksi. Esivalittu kytkin kestää jatkuvassa käytössä 23 Nm ja hetkellisesti 46 Nm vääntön. Hammaskytkin on helppo koota ja purkaa. Kytkimen navat asetetaan valmiiksi moottorin ja laakerointiputken akseleille, jolloin kääntönivel saadaan kootua yksinkertaisesti työntämällä osat yhteen.

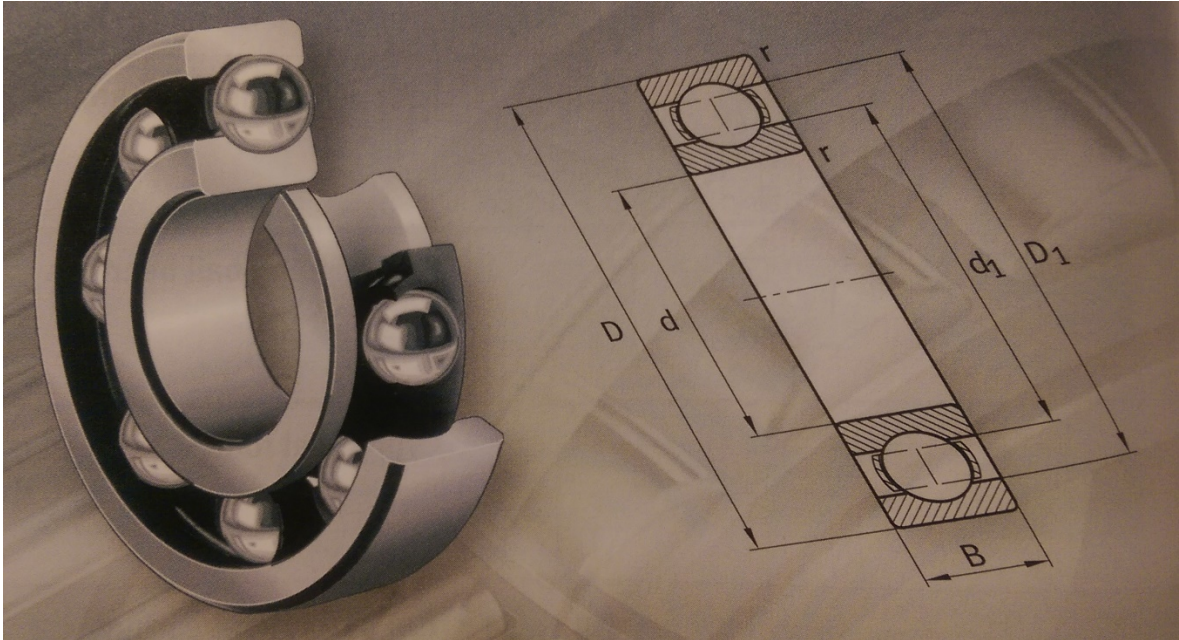
### **3.4 Laakerointi**

Laakereiden valintaan vaikuttavat monet tekijät. Laakereiden tehtävänä koneen osina on tukea ja ohjata pyöriviä tai edestakaisin kiertyviä koneenosia. Laakerit ovat standardisoituja osia, ja niille on useita valmistajia.

Laakerit jaotellaan kuormitustapansa mukaan säteis- ja aksiaalilaakereihin. Voiman vaikuttaessa kohtisuorassa akselia vastaan on kyseessä säteislaakeri ja voiman vaikuttaessa aksiaalisesti on kyseessä aksiaalilaakeri. Laakerit jaotellaan rakenteensa perusteella liuku- ja vierintälaakereihin. Liukulaakereissa kuormaa kantavina eliminä toimii vain voiteluainekalvo akselin ja laakerin välissä. Liukulaakerit voidaan jaotella neljään tyyppiin toimintansa perusteella: voitelemattomiin, hydrodynaamisiin, hydrostaattisiin ja itsevoiteleviin laakereihin. (7, s. 274 - 307.)

Kääntöniveleen kokoonpanoon valittiin vierintälaakeri ominaisuuksiensa takia. Vierintälaakereissa kuormaa kantavina eliminä ovat kuulat, rullat tai neulat. Vierintälaakeri voi kantaa vain säteistä kuormitusta tai sekä säteis- että aksiaalikuormitusta. Vierintälaakereiden etuna liukulaakereihin on vierinnän pienempi kitka verrattuna liukumiseen.

Vierintälaakerit (kuva 4) koostuvat neljästä osasta: ulko- ja sisäkehästä, vierintäelimistä ja pitimestä. Vierintäeliminä voi toimia kuulat tai rullat. Näiden lisäksi laakerissa on yleensä joko rasva tai öljy sisällä.



*KUVA 4. Urakuulalaakerin rakenne (20)*

Kääntönivelessä laakeriin kohdistuvat voimat ja muut rasitukset tulevat olemaan pieniä laakerin kantokykyyn nähden. Suurin yksittäinen laakerin valintaa rajoittava mitta tässä tapauksessa on olemassa oleva tila. Laakeri täytyy saada sopimaan ulkoputken sisäpuolelle ja samalla laakerin sisämitan täytyy olla sopiva akselille. Laakerien valinnan lähtökohtana oli saada laakerointi toteutettua mahdollisimman halvalla, mutta kuitenkin tarpeeksi luotettavasti, jottei laakereita tarvitse vaihtaa nivelen odotetun eliniän aikana. Laakerien tulee olla myös huoltovapaat. Yksiriviset urakuulalaakerit ovat halpuutensa ja helppo- ja monikäyttöisyytensä vuoksi eniten käytetty laakerityyppi (21). Tämän vuoksi laakerin etsintä aloitettiin niistä.

Akseli ja siten myös laakerointi tulee kääntönivelessä pystyasentoon. Tämä aiheuttaa laakereilla tulevan kuormituksen olevan aksiaalista eli akselin suuntaista. Säteisvoimat tulevat olemaan käytössä niin pienet, ettei niitä oteta tässä



huomioon. Aksiaalikuormitus laakereille puoltaisi viistokuulalaakerin tai nelipistelaakerin valintaa, koska näillä laakerityypeillä on parempi aksiaalikantavuus. Laakereille tuleva aksiaalivoima on kuitenkin niin pieni, että sen pystyy kantaamaan myös tavallinen urakuulalaakeri. Nivelen pyörimisnopeus tulee olemaan niin pieni, ettei se aseta laakerin valinnalle rajoituksia. Myöskään nivelen käyttöolosuhteet eivät aseta rajoituksia laakereille. Sopivaa laakeria haettiin seuraavilla lähtöarvoilla:

- aksiaalikuormitus maksimissaan = 1000 N
- $d \approx 30 - 35$  mm
- $D \approx 55$  mm.

Mitoiltaan sopivan kokoinen laakeri löytyi Schaefflerin valikoimista. Laakerin tilauskoodi on 6006 - 2RSR. Laakerin mitat ja muut tiedot löytyvät liitteestä 3. Koska laakerit ovat standardoituja kone-elimisiä, vastaava laakeri löytyy myös muiden valmistajien valikoimista.

Laakereiden kestoikä tunteina saadaan laskettua kaavalla 2 (22).

$$L_{10h} = \frac{16\,666}{n} \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad \text{KAAVA 2}$$

Tehollisvoima P saadaan laskettua kaavalla 3 (22) ja  $p = 3$  urakuulalaakerille (21).

$$P = X \times F_r + Y \times F_a \quad \text{KAAVA 3}$$

Kääntönivelen pyörimisnopeudet tulevat olemaan pieniä, jolloin käytetään staattista tehollisvoimaa  $P_0$ . Kertoimet X ja Y saadaan laakerivalmistajien taulukoista.

$$P = 0,46 \times 0 \text{ N} + 1,14 \times 1\,000 \text{ N} = 1\,140 \text{ N}$$

Lopulliset pyörimisnopeudet ja laakereihin kohdistuvat voimat selviävät vasta prototyypillä tehtävien testien jälkeen, joten lasketaan esimerkin vuoksi arvolla  $n = 100$ .

$$L_{10h} = \frac{16\,666}{100} \left(\frac{8\,000 \text{ N}}{1\,140 \text{ N}}\right)^3 = 57\,595.$$

Vaikka laskennassa käytetyt arvot ovat arvioitu yläkanttiin, saadaan laakerien kestoiksi silti noin 6,5 vuotta jatkuvalla käytöllä. Voidaan siis turvallisesti sanoa laakerien kestävän laitteen vaatimukset. Valitaan laakeriin vielä normaalia suurempi sisäinen säteisvälitys C3, jolla saadaan suurempi aksiaalivoiman kantokyky (21, s. 132).

Laakerivalmistajan mukaan laakeria kuormittavan säteisvoiman tulee olla minimissään  $P/C_r > 0,01$ . Tämä koskee erityisesti suuria kierroksia ja nopeita kiihdytyksiä. Koska kääntönivelen laakereihin ei tule juurikaan säteiskuormaa, haluttiin laakereiden sopivuus rakenteeseen tarkistaa. Porin Laakeri Nomo Groupilla on Oulussa toimipiste, jossa myydään laakereita ja suunnitellaan laakerointeja asiakkaille. Nomo Groupin mukaan valitut laakerit ovat sopivat ja kestävät vaaditut voimat (23).

### **3.5 Valmistusmateriaalit**

Materiaalien valinta on yksi tärkeimpiä vaiheita tuotteen suunnittelussa. Materiaalien valintaa ei voi erottaa laitteen rakenteen muotoilusta. Toisaalta laitteen tai sen osan toiminto määrää käytettävän materiaalin. Valittu materiaali puolestaan vaikuttaa käytettävään valmistusmenetelmään. Valmistustapa on kytköksissä kappaleen muotoon, rakenteeseen, kokoon ja painoon. (7.)

Prototyyppi valmistetaan tavallisesta S235-teräksestä. Lopullinen tuote tullaan luultavasti valmistamaan ruostumattomasta teräksestä sen paremman korroosiokestävyyden vuoksi.

#### **3.5.1 FEM**

Rakenteen mekaanista käyttäytymistä tietyn kuormitustilan vaikuttaessa pyritään ennakoimaan lujuusopillisilla laskelmilla. On tärkeää ymmärtää, etteivät laskelmat kohdistu todelliseen rakenteeseen, vaan rakennetta kuvaavaan abstraktiseen malliin. Lujuusopin avulla suunnittelija pyrkii mallintamaan rakenteen tulevaa mekaanista käyttäytymistä mallilaskelmien avulla. Täytyy kuitenkin muistaa, että oikeista ja tarkoista laskelmista huolimatta oikea rakennelma saattaa sittenkin pettää. Laskennassa käytetyt mallit ja lähtötiedot ovat yleensä

enemmän tai vähemmän idealisoituja, esimerkiksi palkit ovat täysin suoria, kuormat pienempiä ja materiaalit kestävämpiä kuin oikeasti. (7.)

Lujuuslaskennalla ja muilla matemaattisilla malleilla voidaan tuotteen suunnitteluvaiheessa tehdä erilaisia analyysejä. Kuitenkaan paraskaan analyysi ei tee päätöksiä suunnittelijan puolesta. (7.)

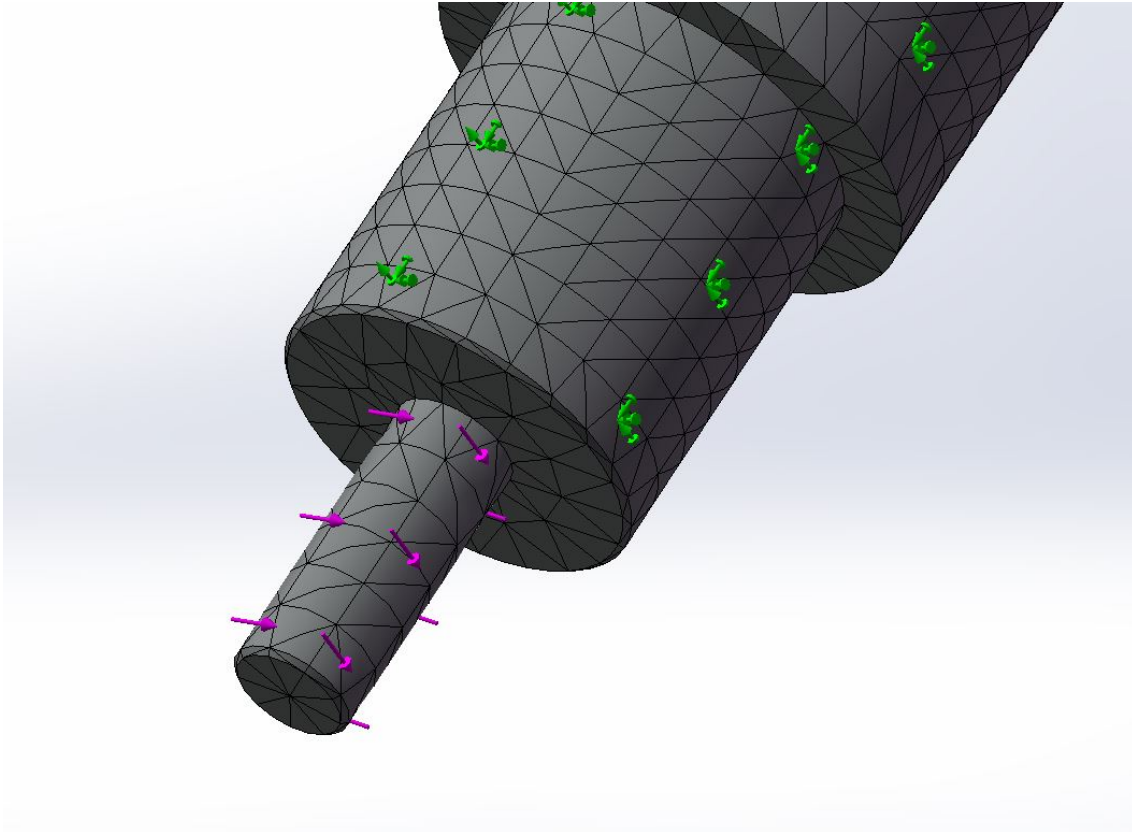
Elementtimenetelmällä voidaan analysoida geometrialtaan monimutkaisia rakenteita. Geometrialtaan monimutkaisen, materiaaliominaisuuksiltaan tai muulla tavoin epälineaarisen rakenteen tapauksessa tarkan ratkaisun löytäminen on usein mahdotonta, ja likiratkaisun löytäminen muilla menetelmillä hankalaa (24). Nykypäivän tietokoneiden laskentateho mahdollistaa monimutkaisten laskelmien suuren määrän käsittelyn nopeassa ajassa. FEM (Finite Element Method) eli elementtimenetelmä onkin johtava laskentamenetelmä CAD-ohjelmistoissa ja rakennesuunnittelun työkaluissa. (24.)

Käytettäessä jotain CAD-ohjelmistoa elementtimenetelmällä analysointiin tehdään ensin kappaleesta tai kappaleista geometrinen malli. Näille malleille annetaan tarvittavat ominaisuudet, esimerkiksi materiaali ja tehdään kappaleista oikeanlainen kokoonpano. Tämän jälkeen rakenteelle määrätään reunaehdot kuten kiinnityspisteet ja kuormitukset. Kuormituksia voi olla esimerkiksi vääntö tai lämpötilan muutos. Ohjelmisto jakaa mallin elementteihin eli muodostaa elementtiverkon (mesh), jonka avulla saadaan monimutkainenkin rakenne ratkaistua. Näiden tietojen perusteella ohjelmisto saa laskettua ja pystyy esittämään tulokset, joiden avulla voidaan analysoida esimerkiksi rakenteen jännitysja-kaumia. (24.)

### **3.5.2 Kestävyysanalyysi**

Kääntönivelestä tehtiin 3D-malli käyttäen Solidworks-ohjelmistoa. Ohjelman avulla saatiin analysoitua oletettua heikointa kohtaa eri materiaaleilla, kuormilla ja materiaalivahvuuksilla. Kokoonpanon heikoimmaksi kohdaksi oletetaan laakeriputken ohut pää, johon moottori tulee kytkimen välityksellä kiinni. Tämä

kohta on ohuin ja ottaa vastaan kaiken moottorin kehittämän väännön. Kuvassa 5 nähdään kappaleelle generoitu elementtiverkko. Kuvassa vihreillä nuolilla on merkitty kappaleen tuenta ja violeteilla nuolilla vääntö.



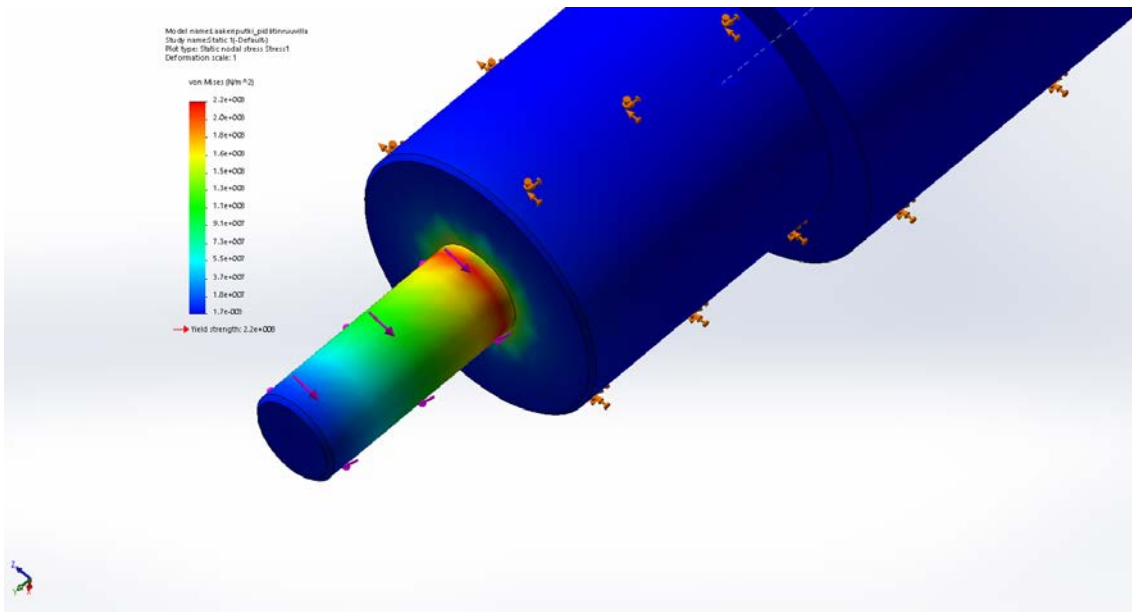
*KUVA 5 Elementtiverkko, kiinnitykset ja kuormitus*

Materiaalina simuloinnissa käytettiin Solidworks-ohjelmasta löytyvää "Plain carbon steel" -materiaalia, jonka ominaisuudet ovat taulukosta 2. Tämä materiaali vastaa hyvin ominaisuuksiltaan prototyypissä käytettävää materiaalia. Vääntökuormituksena käytettiin kytkimen hetkellistä maksimi väännön kestoä eli 46 Nm:ä.

## TAULUKKO 2. Simuloidun materiaalin ominaisuudet

Property	Value	Units
Elastic Modulus	210000	N/mm <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.28	N/A
Shear Modulus	79000	N/mm <sup>2</sup>
Mass Density	7800	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	399.83	N/mm <sup>2</sup>
Compressive Strength		N/mm <sup>2</sup>
Yield Strength	220.59	N/mm <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient	1.3e-005	/K
Thermal Conductivity	43	W/(m·K)
Specific Heat	440	J/(kg·K)
Material Damping Ratio		N/A

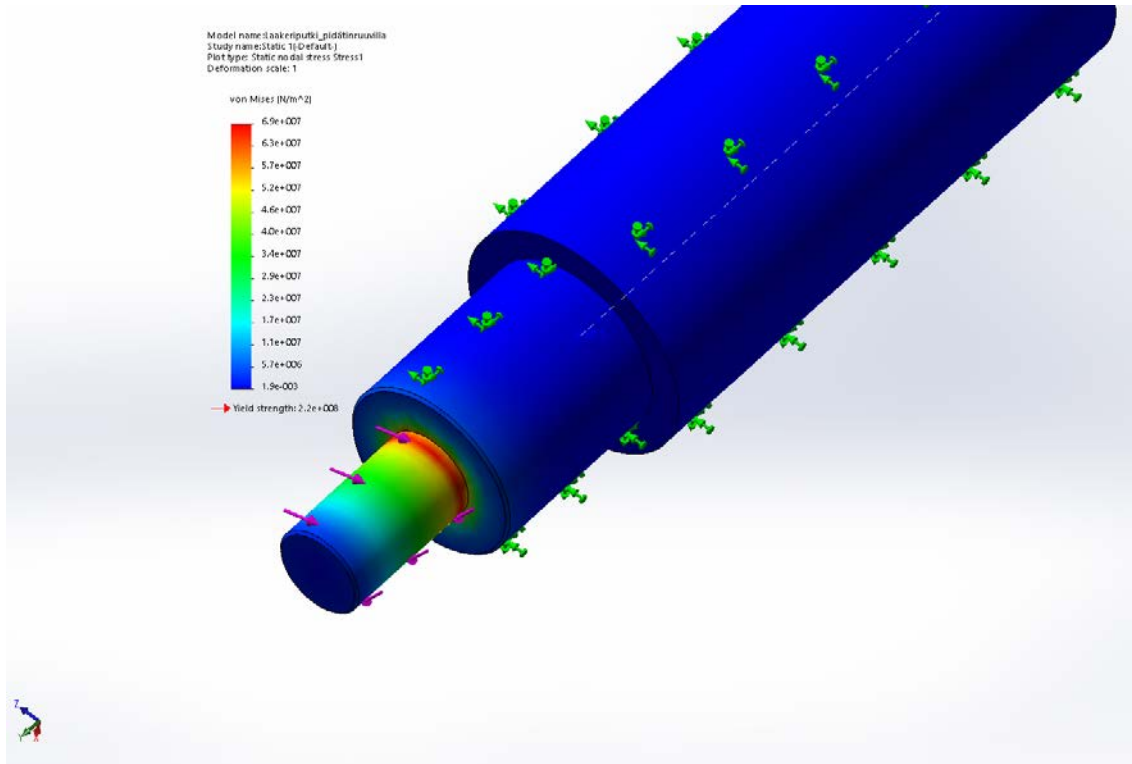
Aluksi analyysi tehtiin halkaisijaltaan 10 millimetrinen akselin päällä. Kuvasta 6 nähdään maksimivääntöjännitys noin 220 MPa joka on suunnilleen yhtä suuri kuin materiaalin kesto. Kuvassa on merkitty punaisella värillä alueet, jotka ovat pahiten kuormittuneita.



KUVA 6. 10 Halkaisijaltaan 10 mm:n akseli

Koneenrakennuksessa ja teräsrakenteissa käytetään yleensä varmuuskertoimenä 1,5 - 3 (25). Alle 1,5:n varmuuskerrointa ei voida siis hyväksyä, rakenteen turvallisuuden vuoksi. Koska materiaalia ei haluttu muuttaa, täytyy akselin pään halkaisijaa kasvattaa, jotta se saavuttaa vaaditun keston. Akselin halkaisijaa kasvatettiin 15 mm:iin ja simuloitiin kuormitus uudelleen. Kuvassa 7 nähdään, kuinka maksimivääntöjännitys on pudonnut noin 69 MPa:iin. Tällöin saadaan

varmuudeksi jo 3,2. Varmuutta 15 mm:n akselilla saadaan jo liikaakin, mutta koska on kyse vain lyhyestä ja ohuesta osuudesta, ei se kasvata osan hintaa tai painoa merkittävästi.



KUVA 7. Halkaisijaltaan 15 mm:n akseli

Tulosten varmistamiseksi lasketaan käsin akseliin kohdistuva kuormitus. Maksimivääntöjännitys saadaan laskettua kaavalla 4 (25).

$$\tau_{max} = \frac{M_v}{W_v} \quad \text{KAAVA 4}$$

Vääntömomentti  $M_v = 46 \text{ Nm}$ . Vääntövastus  $W_v$  saadaan laskettua kaavalla 5 (25).

$$W_v = \frac{\pi \times D^3}{16} \quad \text{KAAVA 5}$$

$$W_v = \frac{\pi \times (15 \text{ mm})^3}{16} = 662,68 \text{ mm}^3$$

Sijoittamalla nämä arvot kaavaan 4 voidaan laskea maksimivääntöjännitys.

$$\tau_{max} = \frac{46 \times 10^3 \text{ Nmm}}{662,68 \text{ mm}^3} = 69,42 \text{ MPa}$$

Käsin laskettu tulos on lähellä simuloinnin avulla saatua tulosta, joten valitaan akselin pään lopulliseksi halkaisijaksi 15 mm.

### 3.6 Kokoonpano

Lopullisesta nivelestä suunniteltiin kaksi mallia. Toinen on alennusvaihteella ja toinen ilman vaihdetta. Suunnitelmat eroavat vain moottoriputken osassa, joka on lyhempi ilman vaihdetta. Välikappale ja laakeriputki voidaan kiinnittää molempiin moottoriputkivaihtoehtoihin ilman muokkauksen tarvetta. Tämä mahdollistaa nivelen käytön eri kokoonpanoissa ja tarpeissa.

Vaihte lisää kääntönivelen pituutta noin 10 senttimetriä. Kuvassa 8 nähdään molemmat mallit vierekkäin. Kokoonpantuna ilman ylhäällä näkyviä kiinnitysruuveja nivelien mitat ovat noin 340 mm ja 445 mm. Molempien vaihteiden kokoonpanokuvat ovat liitteissä 4 - 6.



*KUVA 8. Kääntönivel vaihteella ja ilman*

Nivelen kokoonpano on suunniteltu mahdollisimman yksinkertaiseksi. Työhön tarvitaan vain kaksi erikokoista kuusiokoloavainta. Kokoonpano koostuu kolmesta työvaiheesta: laakerointipään kokoamisesta, moottoripää kokoamisesta sekä lopuksi näiden kahden yhdistämisestä.

Kokoonpano alkaa asentamalla laakerit ja kytkin laakeriputkeen. Tämän jälkeen laakeriputki työnnetään paikalleen ulkoputkeen ja lukitaan lukitusrenkaalla paikalleen. Sisäputki työnnetään paikalleen laakeriputkeen ja lukitaan lukitusruuvilla ulkoputken kyljessä olevan reiän kautta.

Moottoripään kokoaminen alkaa kiinnittämällä kytkimen napa sähkömoottorin akselille. Moottori ja kytkin asetetaan yhtenä kokonaisuutena moottoriputkeen ja



lukitaan päädystä kiinni neljällä ruuvilla. Viimeisenä vaiheena molemmat päät yhdistetään välikappaleen avulla toisiinsa vain työntämällä osat yhteen. Keskellä oleva hammaskytin kytkee toisiinsa moottorin akselin ja laakeriputken pään. Välikappale varmistetaan molempien päiden putkiin lukitusruuveilla.

## **4 PROTOTYYPIN VALMISTUS**

Työhön kuului nivelen suunnittelun lisäksi myös prototyypin osien valmistus ja prototyypin kokoonpano. Tilattavien osien lisäksi itse valmistettavia osia on viisi.

### **4.1 Ongelmat tilojen saatavuudessa**

Alkuperäisen aikataulun mukaan prototyypin piti valmistua joulukuun 2014 mennessä. Prototyyppi oli tarkoitus valmistaa itse Oulun ammattikorkeakoulun kone-tekniikan laboratoriotiloissa. Koulun laboratoriotilat olivat kuitenkin syksyllä remontoitavina, eikä prototyypin valmistusta päästy aloittamaan aikataulun mukaan. Marraskuun alussa sovittiin työn tilaajan ja tekijän kesken, että jäädään odottamaan ja katsomaan, kuinka tilanne kehittyy.

Joulukuun puolivälissä laboratoriotilat eivät olleet vielä kukaan käytössä eikä tulevasta ollut tietoa koulussakaan kenelläkään. Osa prototyypin osista päätettiin valmistuttaa alihankintana Oulun seudun ammattiopiston Kaukovainion yksikössä. Koska ammattiopistossa alkoi kuitenkin joululoma, saatiin tilatut osat vasta tammi - helmikuun vaihteessa.

### **4.2 Osien valmistus ja tilattujen osien viimeistely**

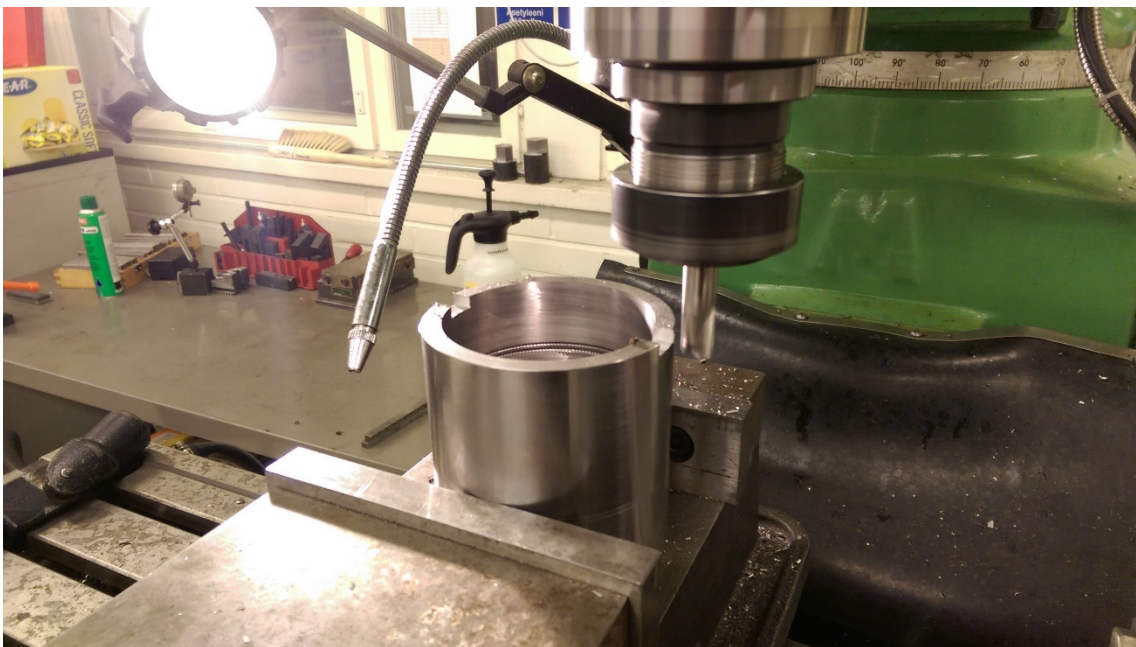
Ammattiopistolta saatujen osien lisäksi prototyyppiä varten valmistettiin loput puuttuvat osat itse. Kaikki rakenteessa olevat osat valmistettiin sorvaamalla ja viimeistely tehtiin jyrsimellä.

Kuvassa 9 nähdään aihio, josta sorvaamalla valmistettiin moottoriputki. Putki jouduttiin sorvaamaan umpinaisesta akselistä, koska tarpeeksi suurella seinämän paksuudella olevaa putkea ei ollut materiaalin toimittajalla varastossa. Kustannusten kannalta tämä on kaukana ideaalista, mutta koska kyseessä on yksittäinen prototyyppi, joka valmistetaan itse, ei sillä ole merkitystä.



*KUVA 9. Moottoriputken aihio*

Moottoriputken päähän jysittiin hahlot, jotka ottavat vastaan moottorin aiheuttaman väännön. Kuvassa 10 näkyy jysittynä kaksi neljästä hahlostä putken päässä. Lopullisesti prototyypin osat olivat valmiita helmikuun alussa.



*KUVA 10. Moottorin kiinnityshahlot*

## 5 YHTEENVETO

Työssä suunniteltiin kääntönivel Probot Oy:lle osaksi yrityksen tulevaa modulaarista sarjaan. Työ kuuluu osana tilaajan muuhun tuotekehitykseen, joten sen täytyi osaltaan liittyä saumattomasti laitteistoon. Työn tuloksena saatiin valmiit suunnitelmat nivelestä ja vaatimusten mukainen prototyyppi, jonka avulla Probot Oy voi tehdä jatkokehitystä. Liitteessä 7 on kuva valmiista prototyypin osista.

Työn tavoitteista suunnittelussa onnistuttiin hyvin. Tarvittavat 3D-mallit ja valmistuskuvat valmistuivat aikataulun mukaan. Ainoastaan prototyypin valmistuksessa viivästyttiin aikataulusta. Tämä viivästyminen johtui Oulun ammattikorkeakoulun laboratoriotilojen muutoksista, minkä vuoksi prototyypin valmistus aloitettiin myöhässä. Tämän lisäksi osa valmistettaviksi suunnitelluista osista jouduttiin tilaamaan alihankintana.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa perehdyttiin tuotekehityksen menetelmiin, tietokoneavusteiseen suunnitteluun ja erilaisiin kone-elimisiin. Teoriaosan lähteinä on käytetty laajasti alan kirjallisuutta ja muita lähteitä, kuten luentomateriaaleja eri korkeakouluista.

Jatkokehityksenä kääntöniveleen materiaalivahvuuksia kannattaa optimoida. Myös materiaalin valintaa kannattaa tarkastella ja miettiä eri vaihtoehtoja. Tämä vaatii kuitenkin ensin testien tekemistä prototyypillä, jotta saadaan oikeaa tietoa niveleen kuormituksista. Kääntöniveleen on myös järkevää asentaa erilaisia antureita, kuten pyörimisnopeusasentoanturi. Tätä vaihtoehtoa pohdittiin jo työn alussa, mutta se jätettiin kuitenkin prototyypistä pois tässä vaiheessa.

Työn tekeminen oli haastavaa ja opettavaista. Suurin haaste työssä oli tarvittavien lähtöarvojen puute. Osa kääntöniveleen tulevista kuormituksista jouduttiin päättelämään ja arvaamaan. Nämä selviävät lopullisesti vasta sitten, kun valmistetulla prototyypillä päästään tekemään testejä.

Kokonaisuutena työssä onnistuttiin hyvin. Työn tavoitteet ja alussa asetetut vaatimukset saatiin täytettyä. Lopputuloksena saatiin suunnitelmat valmistuskuviin ja 3D-malleineen sekä prototyyppi, jonka pohjalta on hyvä tehdä jatkokehitystä.

## LÄHTEET

1. Probot, Modular robotic solutions. 2014. Esite. Oulu: Probot Oy.
2. Probot. 2014. Saatavissa: <http://probot.fi/>. Hakupäivä 20.11.2014.
3. Services. 2014. Probot. Saatavissa: <http://probot.fi/services.html>. Hakupäivä 20.11.2014.
4. Products. 2014. Probot. Saatavissa: <http://probot.fi/products.html>. Hakupäivä 20.11.2014.
5. Väyrynen, Timo 2013. T318104 Tuotekehitys 4 op. Opintojakson luennot syksyllä 2013. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
6. Hietikko, Esa 2008. Tuotekehitystoiminta. Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisusarja B 2/2008. Kuopio: Kopijyvä.
7. Björk, Timo – Hautala, Pekka – Huhtala, Kalevi – Kivioja, Seppo – Kleimola, Matti – Lavi, Markku – Martikka, Heikki – Miettinen, Juha – Ranta, Aarno – Rinkinen, Jari – Salonen, Pekka 2014. Koneenosien suunnittelu. 6., uudistettu painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
8. Kontio, Esa 2012. T090703 Tuotekehitystoiminnan perusteet 3 op. Opintojakson luennot syksyllä 2012. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
9. Hietikko, Esa 2013. Solidworks 2104. 6. uudistettu painos. Helsinki: BoD - Books on Demand.
10. Väyrynen, Timo 2012. T318003 Laatu tekniikka 3 op. Opintojakson luennot syksyllä 2012. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
11. Lempiäinen, Juhani – Savolainen, Jari 2003. Hyvin suunniteltu - puoliksi valmistettu. Helsinki: Hakapaino Oy.

12. Koneturvallisuus. Koneiden tekniset vaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. Työsuojeluhallinto. Saatavilla: [http://www.tyosuojelu.fi/upload/tso\\_16-2009.pdf](http://www.tyosuojelu.fi/upload/tso_16-2009.pdf). Hakupäivä 7.2.2015.
13. Konedirektiivin 2006/42/EY soveltamisopas. Toinen painos, kesäkuu 2010. Euroopan komissio, Yritys- ja teollisuustoiminta. Saatavilla: [http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/mechanical/files/machinery/guide-appl-2006-42-ec-2nd-201006\\_fi.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/mechanical/files/machinery/guide-appl-2006-42-ec-2nd-201006_fi.pdf). Hakupäivä 7.2.2015.
14. L 12.6.2008/400. Valtioneuvoston asetus koneiden turvallisuudesta.
15. L 26.11.2004/1016. Laki eräiden teknisten laitteiden vaatimustenmukaisuudesta.
16. Sigler, Dean 2009. Motor and Controller Technology. CAFÉ Foundationin sähköisten lentokoneiden konferenssi, luento sähkömoottoreista ja ohjaimista huhtikuussa 2009. San Carlos, California. Saatavissa: [http://cafefoundation.org/v2/pdf\\_eas/2009/DeanSigler\\_2009.pdf](http://cafefoundation.org/v2/pdf_eas/2009/DeanSigler_2009.pdf). Hakupäivä 6.1.2015.
17. Airila, Mauri 1999. Mekatroniikka. 5. korjattu painos. Helsinki: Hakapaino Oy.
18. Huhtanen, Pentti 2014. T316203 Mekanisointiyksiköt 3 op. Opintojakson luennot keväällä 2014. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
19. Harmonic drive. 2006. Saatavissa: [http://www.powertransmission.com/issues0706harmonic\\_fig1.jpg](http://www.powertransmission.com/issues0706harmonic_fig1.jpg). Hakupäivä 14.1.2015.
20. Rolling bearings 2014. Schaeffler Technologiesin laakeriopas, huhtikuu 2014. Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG.
21. Blom, Seppo Lahtinen, Pekka – Nuutio, Erkki – Pekkola, Kari – Pyy, Seppo – Rautiainen, Hannu – Sampo, Arto – Seppänen, Pekka – Suosara, Eero 1999. Koneenelimet ja mekanismit. 5. - 6. painos. Helsinki: Edita PrimaOy.
22. Lahtinen, Pekka 2013. T316103 Kone-elimet 2 3 op. Opintojakson luennot syksyllä 2013. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.

23. Tasanto Nomo Groupin edustaja 2014. Haastattelu Tasanto Nomo Groupin myymälätiloissa 5.11.2014.
24. Lumijärvi, Jouko 2014. 461033A Elementtimenetelmät I 3,5 op. Opintojakson luennot syksyllä 2014. Oulu: Oulun yliopisto, teknillisen mekaniikan laboratorio.
25. Lahtinen, Pekka 2012. T314108 Lujuusoppi 8 op. Opintojakson luennot syksyllä 2012. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.



## **LIITTEET**

Liite 1 Lähtötietomuistio

Liite 2 Coupling-224-M14-10-S-10-S-Mekanex

Liite 3 Laakeri 6006-2RSR

Liite 4 Molemmat nivelet

Liite 5 Nivel vaihteella

Liite 6 Nivel ilman vaihdetta

## LÄHTÖTIETOMUISTIO

Tekijä Ville Uusimaa

Tilaaaja Probot Oy

Tilaaajan yhdyshenkilö ja yhteystiedot

Matti Tikanmäki

Työn nimi Kääntönivel

Työn kuvaus Suunnitella tilaaajan tarpeisiin soveltuva kääntönivel ja valmistaa prototyyppi suunnitelmien pohjalta.

Työn tavoitteet 1. Suunnitelmat/valmistuskuvat kääntönivelestä.

2. Prototyypin valmistaminen.

Tavoiteaikataulu

Työn tavoitteellinen valmistuminen vuoden 2014 loppuun mennessä.

Päiväys ja allekirjoitukset

10.9.20104

Akselikytkimet. 2014. Hammaskytkin. Mekanex Oy. Saatavissa: [http://www.mekanex.se/pdf/fi/kk\\_d1/kap\\_2/hammaskytkin-tandkoppling.pdf](http://www.mekanex.se/pdf/fi/kk_d1/kap_2/hammaskytkin-tandkoppling.pdf). Hakupäivä 30.11.2014.

## AKSELIKYTKIMET

### Hammaskytkin, tyyppi M

#### Materiaali

Hammasnapa = nitreerattu teräs  
Holkki = polyamidi (nailon)



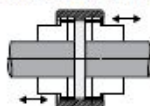
#### Rakenne

Kaksoisrakenteinen hammasmuoto takaa aksiaalisuuntaisen liikkuvuuden, pienen kitkan, minimaalisen rasituksen sekä vähäisen oikaisuvirheen. Nailonholkit kestävät likaa ja kosteutta. Holkit kestävät  $-20...+80$  °C:n lämpötilaa ja hetkellisesti  $120$  °C:n maksimilämpötilaa. Tämän ansiosta kytkintä voidaan käyttää vaativissa oloissa.

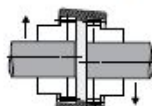
Kytkin ei tarvitse voitelua eikä huoltoa, ja se on myös helppo puhdistaa ja tarkastaa. Pienikokoinen kytkin on kevyt, ja se kestää suurta vääntömomenttia ja pientä hitausmomenttia. Kytkimessä on tarkkojen mittojen mukaisesti valetut holkit sekä suuria pyörimisnopeuksia kestävä napa. Ei pultteja, sokkia ja laippoja.

#### AKSIAALIPOIKKEAMA

Suositeltu akselivälä = 4 mm.

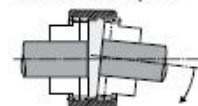


#### SÄTEISPOIKKEAMA



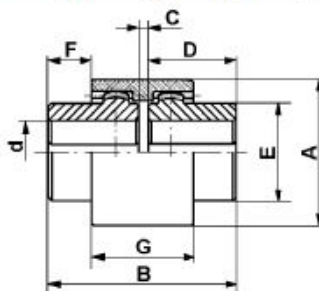
#### KULMAPOIKKEAMA

\*Arvot koskevat napaa.



Tuotenro	Vääntömomentti Nm		Teho kW						Poikkeamat			RPM min <sup>-1</sup> Maks.
	Nim.	Suurin	1000 min <sup>-1</sup>		1500 min <sup>-1</sup>		3000 min <sup>-1</sup>		Aksiaalinen	Säteittäinen	Kulma*	
			Nim.	Suurin	Nim.	Suurin	Nim.	Suurin				
224-M14	11,5	23,0	1,1	2,0	1,6	3,3	3,3	6,0	±1	0,7	±2°	14000
224-M19	18,5	36,5	1,8	3,7	2,7	5,5	5,4	11,1	±1	0,8	±2°	12000
224-M24	23,0	46,0	2,3	4,7	3,4	7,0	6,9	14,1	±1	0,8	±2°	10000
224-M28	51,5	103,5	5,2	10,6	7,8	15,9	15,8	31,8	±1	1,0	±2°	8000
224-M32	69,0	138,0	7,0	14,1	10,5	21,1	21,0	42,3	±1	1,0	±2°	7100
224-M38	88,0	176,0	9,0	18,0	13,5	27,0	27,0	54,0	±1	0,9	±2°	6300
224-M42	110,0	220,0	11,2	22,5	16,8	33,7	33,6	67,5	±1	0,9	±2°	6000
224-M48	154,0	308,0	15,8	31,6	23,7	47,4	47,7	94,8	±1	0,9	±2°	5600
224-M55	285,0	570,0	29,0	58,0	43,5	87,0	87,0	174,0	±1	1,2	±2°	4800
224-M65	420,0	840,0	42,9	85,8	64,3	128,7	128,7	257,4	±1	1,3	±2°	4000

Tuotenro	A	B	C	D	E	F	G	d min	d maks.	Paino
										kg
224-M14	41	51	4	23,5	25	6,5	38	6	14	0,166
224-M19	48	55	4	25,5	32	8,5	38	8	19	0,276
224-M24	52	57	4	28,5	36	7,5	42	10	24	0,312
224-M28	68	86	4	41,0	45	19,0	48	10	28	0,779
224-M32	75	84	4	40,0	50	18,0	48	12	32	0,918
224-M38	85	84	4	40,0	58	17,0	50	14	38	1,278
224-M42	95	88	4	42,0	63	19,0	50	20	42	1,473
224-M48	100	104	4	50,0	68	27,0	50	20	48	1,777
224-M55	120	124	4	60,0	82	29,5	65	25	55	3,380
224-M65	140	144	4	70,0	95	38,0	72	25	65	4,988



Deep groove ball bearings 6006-2RSR. 2014. Schaeffler Technologies. Saatavissa: [http://medias.schaeffler.de/medias/en!hp.ec.br.pr/60..-2RSR\\*6006-2RSR](http://medias.schaeffler.de/medias/en!hp.ec.br.pr/60..-2RSR*6006-2RSR). Hakupäivä 20.10.2014.



## Deep groove ball bearings 6006-2RSR (Series 60..-2RSR) main dimensions to DIN 625-1, lip seals on both sides

The datasheet is only an overview of dimensions and basic load ratings of the selected product. Please always observe all the guidelines in these overview pages. Further information is given on many products under the menu item "Description". You can also order comprehensive information via the Catalogue selection system (<http://www.fag.de/content.fag.de/en/m ediathek/library/library.jsp>) or by telephone on +49 (91 32) 82 - 28 97.

d	30 mm
D	55 mm
B	13 mm
d <sub>1</sub>	38,3 mm
D <sub>2</sub>	49,2 mm
D <sub>s</sub> max	50,4 mm
d <sub>b</sub> min	34,6 mm
r <sub>a</sub> max	1 mm
r <sub>min</sub>	1 mm
m	0,126 kg Mass
C <sub>r</sub>	13500 N Basic dynamic load rating, radial
C <sub>0r</sub>	8000 N Basic static load rating, radial
n <sub>G</sub>	8500 1/min Limiting speed
n <sub>B</sub>	0 1/min Reference speed
C <sub>ur</sub>	405 N Fatigue limit load, radial

Deep groove ball bearings 6006-2RSR. 2014. Schaeffler Technologies. Saatavissa: [http://medias.schaeffler.de/medias/en!hp.ec.br.pr/60..-2RSR\\*6006-2RSR](http://medias.schaeffler.de/medias/en!hp.ec.br.pr/60..-2RSR*6006-2RSR). Hakupäivä 20.10.2014.

