



Juuso Turunen

SÄHKÖMOOTTORIN KIINNITYS JA TUENTA HILUX-SÄHKÖAUTOPROJEKTISSA

**SÄHKÖMOOTTORIN KIINNITYS JA TUENTA
HILUX-SÄHKÖAUTOPROJEKTISSA**

Juuso Turunen
Opinnäytetyö
Kevät 2013
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka, auto- ja kuljetustekniikka

Tekijä: Juuso Turunen
Opinnäytetyön nimi: Sähkömoottorin kiinnitys ja tuenta Hilux-sähköautoprojektissa
Työn ohjaaja: Mauri Haataja
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2013 Sivumäärä: 63 + 5 liitettä

Opinnäytetyö on tehty osaprojektina Oulun seudun ammattikorkeakoulun tekniikan yksikön Hilux-sähköautoprojektiin. Työssä ideoitiin ja suunniteltiin kiinnitysjärjestelmä sähkömoottorille. Suunnittelutyön lähtökohtina olivat moottori ja ajoneuvo, johon moottori tuli kiinnittää riittävän tukevasti. Sähkömoottorin vääntömomentti tuli kannakkeen kautta siirtää ajoneuvon voimansiirtojärjestelmään.

Suunnittelutyössä edettiin johdonmukaisesti tehtävän määrittelystä lopulliseen ratkaisuun saakka. Suunnittelu aloitettiin muodostamalla kiinnityslaitteelta vaadituista ominaisuuksista vaatimuslista. Laitteelle listattiin esimerkiksi materiaali-, lujuus- ja keveysvaatimuksia, joiden perusteella rakenteesta laadittiin karkea luonnos. Rakenteen luonnoksen pohjalta edettiin materiaalivalintoihin ja toimivan kannakeratkaisun suunnitteluun ja suoritettiin kokonaisuudelle lujuusanalyysi elementtimenetelmää käyttäen. Kannakkeen mekaniikka suunniteltiin kokoonpano- ja osapiirustuksia myöten. Myös kokoonpanoon vaadittavat standardiosat valittiin.

Suunnittelutyössä käytettiin apuna Autodesk Inventor 2011 ja SolidWorks 2011 - 2012 -mallinnusohjelmia. Rakenteiden mitoitus tapahtui käyttäen SolidWorks-ohjelmiston elementtimenetelmäpohjaista lujuuslaskentatyökalua.

Työn tuloksena saatiin alumiini- ja teräsrakenteinen moottorikannake Hilux-sähköautoprojektiin. Tuloksena saatiin myös rakenteen kokoonpanopiirustus, osapiirustukset ja lujuusanalyysitulokset. Tulokset antavat hyvän pohjan kannakkeen jatkokehittämiselle. Kannaketta voidaan esimerkiksi keventää entisestään määrittelemällä kannakkeeseen kohdistuvat kuormitukset tarkemmin käytönaikaisen mittausdatan perusteella.

Asiasanat: sähköautot, työkoneet, autot, sähkömoottorit, suunnittelu, FEM

ALKULAUSE

Opinnäytetyö tehtiin osaprojektina Hilux-sähköautoprojektiin. Haluan kiittää projektin mahdolliseksi tekemisestä Oulun seudun ammattikorkeakoulua, Oulun kaupungin teknistä liikelaitosta ja Randax Oy:tä sekä kaikkia muita projektissa mukana olleita yrityksiä. Haluan osoittaa kiitokseni myös projektin ohjaajina toimineille laboratorioinsinööri Janne Ilomäelle ja laboratorioteknikko Arto Lehtoselle sekä opinnäytetyöni suunnittelutyössä ja piirustusten laatimisessa apuna olleelle lehtori Jari Viitalalle.

Suurimman kiitoksen ansaitsee kuitenkin itse projektiryhmä, jonka jäsenet ovat käyttäneet niin opiskelu- kuin vapaa-aikaansaakin projektin edistämiseen. Osoitettakoon erityiskiitos vielä projektipäällikkönä toimineelle insinööriopiskelija Lassi Varikselle, joka on toiminut koko kolmen vuoden ajan projektin tärkeimpänä eteenpäin viejänä.

Oulussa 16.4.2013

Juuso Turunen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
2 KIINNITYSRATKAISUN IDEOINTI	9
2.1 Lähtötiedot	9
2.1.1 Ajoneuvo	9
2.1.2 Sähkömoottori	12
2.2 Rakenteen vaatimukset	15
2.3 Rakenteen luonnostelu	18
3 RAKENNESUUNNITTELU	22
3.1 Materiaalivalinnat	22
3.1.1 Akselin materiaali	22
3.1.2 Kannakkeen materiaali	23
3.2 Kannakkeen suunnittelu	24
3.3 Akselin suunnittelu	28
3.4 Laakerointi	32
3.4.1 Vapaa laakeri	35
3.4.2 Ohjaava laakeri	36
3.4.3 Voitelu ja tiivistys	38
3.5 Kannakkeen kiinnitys ajoneuvoon	39
3.5.1 Tärinäneristys	40
3.5.2 Kiinnityskorvakkeet	40
3.6 Lujuustarkastelut	41
3.6.1 Laskennan lähtötiedot	41
3.6.2 Laskentatulokset	45
3.6.3 Johtopäätökset	48
4 KANNAKKEEN ASENNUSTYÖ	51
4.1 Kannakkeen kokoaminen	51
4.2 Kokonaisuuden asennus ajoneuvoon	54

5 JÄRJESTELMÄN KOEKÄYTTÖ	57
6 TULOKSET	58
7 YHTEENVETO	60
LÄHTEET	62
LIITTEET	
Liite 1. Lähtötietomuistio	
Liite 2. Piirustukset	
Liite 3. Kokoamisohje	
Liite 4. Voiteluaineiden valintaopas, Teboil	
Liite 5. Tärinäneristimet, Trelleborg	

SANASTO

0,2 % -venymäraja, $R_{p0,2}$	Jännitys, jolla materiaalissa tapahtuu 0,2 %:n pysyvä venyminen.
Kimmomoduuli, E	Kerroin, joka kuvaa kappaleen venymistä venyttävän voiman vaikutuksesta.
Leikkausjännitys, τ	Materiaaliin pinnan suuntaisesti kohdistuva jännitys.
Liukumoduuli, G	Kerroin, joka kuvaa materiaalin kykyä vastustaa leikkausvoimia.
Murtolujuus, R_m	Korkein nimellinen jännitys, jonka aine kestää murtumatta.
Myötölujuus, R_e	Jännitys, jolla materiaalissa alkaa tapahtua merkittävää palautumatonta muodonmuutosta.
Normaalijännitys, σ	Materiaaliin pintaa vastaan kohtisuoraan kohdistuva jännitys.
Pintapaine, p	Kahden kappaleen puristuessa toisiaan vasten syntyvän kosketuspinnan alueella vaikuttava paine.
Poissonin luku, ν	Kuvastaa aineen poikittaissuuntaisen venymän suhdetta pitkittäissuuntaiseen venymään.
Taivutusjännitys, σ_{max}	Taivutusrasituksen materiaaliin aiheuttama jännitys.
Varmuusluku, n	Materiaaliin kohdistuvan jännityksen ja suurimman sallitun jännityksen välinen suhdeluku.
Von Mises -jännitys	Lujuuslaskennassa käytettävä vakiomuodonvääristymisenergiaan perustuva jännityshypoteesi.
Vääntöjännitys	Vääntörasituksen materiaaliin aiheuttama jännitys.

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö liittyy syksyllä 2010 Oulun seudun ammattikorkeakoulussa käynnistyneeseen Hilux-sähköautoprojektiin, jossa suunnitellaan ja toteutetaan Oulun kaupungin tekniselle liikelaitokselle sähkökäyttöinen kunnossapitoajoneuvo. Projektissa on mukana useita auto- ja kuljetustekniikkaan suuntautuneita kone- ja tuotantotekniikan opiskelijoita.

Tämä opinnäytetyö on osaprojekti, jossa tarkoituksena on ideoida ja suunnitella valmistettavissa oleva kiinnitysjärjestelmä sähkömoottorille. Suunniteltavan järjestelmän tulee kyetä kiinnittämään sähkömoottori ajoneuvoon ja siirtämään moottorin tuottama vääntömomentti ajoneuvon voimansiirtojärjestelmään.

Kiinnitysjärjestelmälle suoritetaan elementtimenetelmää käyttäen alustava lujuusanalyysi kestävyuden varmistamiseksi. Työssä laaditaan järjestelmän osista piirustukset ja osat teetetään konepajalla piirustusten mukaisesti. Järjestelmä kootaan kokonaisuudessaan ja valmis rakenne koekäytetään mahdollisuuksien mukaan. Työn tuloksena saadaan järjestelmän kokoonpanopiirustus, osapiirustukset, kokoamisohje sekä lujuusanalyysin tulokset. (Liite 1.)

2 KIINNITYSRATKAISUN IDEOINTI

Ideointivaiheessa pyritään pääsemään karkeaan ratkaisuun kiinnitysjärjestelmän rakenteen peruserätyksistä. Rakenteelle asetetaan vaatimukset, jotka sen on täytettävä kyetäkseen toimimaan asianmukaisesti. Vaatimusten perusteella pyritään valitsemaan rakennemalleista yksi, jonka pohjalta suunnittelua jatketaan. Työssä käytetään apuna Autodesk Inventor 2011 ja SolidWorks 2011 - 2012 -ohjelmia.

2.1 Lähtötiedot

Lähtötietoina suunnittelutyölle ovat ainoastaan ajoneuvo ja sähkömoottori, jotka on tarkoitus yhdistää toisiinsa. Ajoneuvona toimii Oulun kaupungin teknisen liikelaitoksen kunnossapitoajoneuvo. Sähkömoottori on suunniteltu tarkoitukseen sopivaksi projektissa aiemmin tehdyn määrittelyn perusteella. Muilta osin suunnittelutyössä on vapaat kädet.

2.1.1 Ajoneuvo

Ajoneuvo, johon sähkömoottorin kiinnitysjärjestelmää suunnitellaan (kuva 1), on alun perin varustettu 2,4-litraisella dieselmotorilla. Moottorista voima välittyy kytkimen kautta 5-vaihteiseen manuaalivaihteistoon. Vaihteistosta voima siirtyy ura-akselien ja -holkin välityksellä alennusvaihteella varustetulle jakovaihteistolle, joka siirtää voiman joko taka-akselille tai jaetusti etu- ja taka-akseleille, riippuen vaihdevivun asennosta. Akseleilla on vetopyörästöt, joista voima edelleen välittyy pyörille. Taka-akselin vetopyörästö on varustettu kitkalamellilukolla.



KUVA 1. Ajoneuvo, johon rakenne suunnitellaan

Ajoneuvo on varustettu jalkakäytävien talvikunnossapitolaitteistolla, joka kasvat-
taa sekä auton ulkomittoja että omamassaa. Kunnossapitolaitteisto sisältää au-
ran, hiekoittimen ja lavan kippauslaitteen. Laitteisto toimii ajoneuvoon asenne-
tulla hydraulijärjestelmällä, joka saa käyttövoimansa dieselmootorin yhteyteen
sijoitetusta hydraulipumpusta. Hydraulijärjestelmä tullaan sähköautoprojektissa
sähköistämään vähintäänkin hydraulipumpun osalta.

Seuraavassa on lueteltuna ajoneuvon perustiedot. Ajoneuvon ulkomitat ja
omamassa työlaitteistoinen on mitattu asianmukaisilla mittausvälineillä Oulun
seudun ammattikorkeakoulun autolaboratoriossa. Muut tiedot ovat peräisin ajo-
neuvon valmistajan teknisistä tiedoista ja laboratoriossa suoritetuista tarkaste-
luista.

Perustiedot

Ajoneuvon merkki ja malli: Toyota Hilux

Mallitarkennus: 2,4 TD

Vuosimalli: 2001

Rekisterinumero: AYT-698

Mitat

Pituus: 4 970 mm, työlaitteiston kanssa 6 020 mm

Leveys: 1690 mm, työlaitteiston kanssa 2 200 mm

Korkeus: 1 755 mm

Akseliväli: 3 095 mm

Raideväli edessä: 1 440 mm

Raideväli takana: 1 425 mm

Maavara: 225 mm

Massat

Omamassa: 1 620 kg, työlaitteiston kanssa 2 320 kg

Kokonaismassa: 2 515 kg

Painojakauma: 58 % / 42 %, työlaitteiston kanssa 51 % / 49 %

Moottorin perustiedot

Moottorin tyyppikoodi: 2L-T

Moottorin tyyppi: nelisynterinen ahdettu esikammiodiesel rivimoottori

Venttiilikoneisto: kahdeksanventtiilinen OHC hihnakäytöllä

Iskutilavuus: 2 446 cm³

Iskun pituus: 92 mm

Männän halkaisija: 92 mm

Puristussuhde: 21:1

Huipputeho: 66 kW @ 3 500 RPM

Huippuvääntö: 226 Nm @ 2 200 - 2 500 RPM

Akselistorakenteet

Runko: erillinen tikapuupalkkirunko

Etuakselisto: erillisjousitus päällekkäisin kolmiotuin, vääntösauvajousitus

Taka-akselisto: jäykkä taka-akseli, pitkittäiset lehtijouset

Voimansiirtojärjestelmä

Voimansiirto: neliveto jakovaihteistolla ja etuakselin napalukoilla

Voimansiirron tyypit: nopea takaveto, nopea neliveto, hidas neliveto

Vaihteiston tyyppi: 5-vaihteinen manuaalivaihteisto alennusvaihteella

Tasauspyörästäön lukitus: kitkalamellilukitus taka-akselilla

Kytkin: kuiva yksilevykytkin

Voimansiirron välityssuhteet

Vetopyörästäöväälitys: 4,300:1

Alennusvaihteen väälitys: 2,566:1

1.vaihteen väälitys: 3,954:1

2.vaihteen väälitys: 2,141:1

3.vaihteen väälitys: 1,384:1

4.vaihteen väälitys: 1,000:1

5.vaihteen väälitys: 0,850:1

Peruutusvaihteen väälitys: 4,091:1

Vanne- ja rengastyypit

Rengaskoko: 205 R16

Dynaaminen vierintäkehä: 2 245 mm.

2.1.2 Sähkömoottori

Kiinnitysjärjestelmä suunnitellaan Randax Oy:n valmistamalle nestejäähdytteiselle kestopagneettitahtimoottorille (kuva 2), joka koostuu toisistaan erillisistä staattorista ja roottorista. Moottori itsessään ei siis sisällä roottorin akselia eikä laakerointia. Moottori on suunniteltu ja valmistettu Hilux-sähköautoprojektin suunnitteluvaiheen vaatimusmäärittelyn mukaisesti.



KUVA 2. Sähkömoottorin nestejäähdytetty staattoriososa

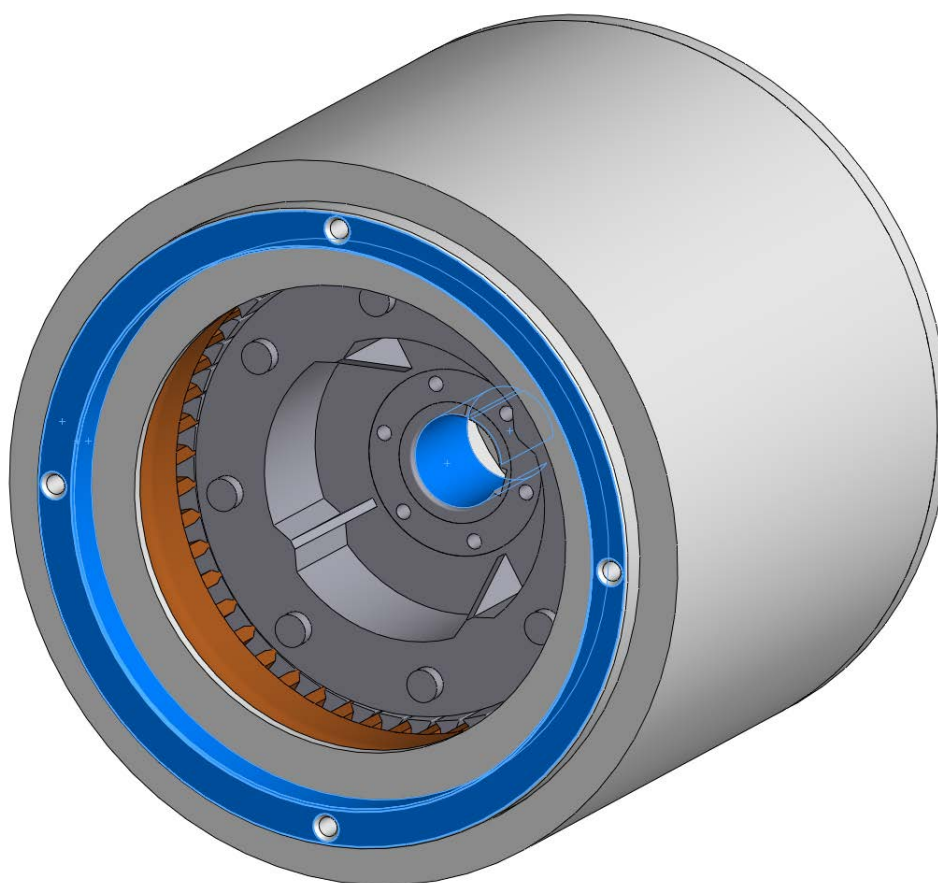
Staattoriosan ulkokuori muodostuu kennorakenteesta, jossa kierrätetään jäähdytysnestettä erillisellä pumpulla. Näin saadaan tehokkaasti siirrettyä moottorin tuottama lämpö pois staattorin käämityksestä. Nestejäähdytys mahdollistaa staattorille täysin umpinaisen rakenteen. Moottorilla on IP66-luokitus, joka kertoo moottorin olevan pölytiivis ja kestävä suurella paineella tulevan vesiruis-kun. Moottoria ei näin ollen tarvitse erikseen suojata ulkoisia pöly- ja kosteusaltistuksia vastaan.

Moottori kykenee tuottamaan jatkuvan 70,4 kW:n tehon. Vääntömomenttia moottorista saadaan noin 200 Nm, hetkellisesti enemmänkin. Moottorin ohjaus toteutetaan ABB:n taajuusmuuttajalla. Moottorin tiedot ovat taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Sähkömoottorin ominaisarvot

Randax - nestejäähdytetty kestopagneettitahtimoottori (T0001)		
Toimintajännite	U	400 V
Nimellisteho	P	70,4 kW
Maksimivääntömomentti	M	n. 200 Nm
Hyötysuhde	η	95,6 %
Maksimipyörintänopeus	n_{max}	5 300 1 / _{min}
Ilmaväli	r	n. 2 mm
Kokonaismassa	m	82 kg
Staattorin massa	m_s	n. 62 kg
Roottorin massa	m_r	n. 20 kg
Moottorin ulkohalkaisija	D_m	n. 320 mm
Moottorin kokonaispituus	L_m	n. 270 mm

Sähkömoottorin kiinnityspeiraate on yksinkertainen. Staattori kiinnittyy rakenteeseen etulaipastaan (kuva 3) neljällä M10-ruuvilla. Keskitys tapahtuu laipassa olevan huulen avulla. Roottori kiinnittyy akselille kiilavarmisteisen sisähalkaisijaltaan 40 mm kartioholkin avulla.



KUVA 3. Staattorin ja roottorin kiinnityskohtat

2.2 Rakenteen vaatimukset

Sähkömoottorin suoritusarvot on määritelty olettaen, että ajoneuvossa käytetään aina jakovaihteiston alennusvaihdetta. Sen vuoksi täytyy ajoneuvon alkuperäinen jakovaihteisto luonnollisesti säilyttää. Jakovaihteistoon tehdyllä muutostyöllä mahdollistetaan myös vetotavan valinta taka- ja nelivedon välillä, vaikka alennusvaihde olisi kytkettynä. Sähkömoottori tuottaa hyvin suuren vääntömomentin jo alhaisella pyörimisnopeudella, joten itse vaihteisto jää tarpeettomaksi.

Vaihteiston poisjättämisen vuoksi tulee moottoria seuraava voimansiirtokomponentti olemaan ajoneuvon jakovaihteisto. Moottori kannattaa sijoittaa jakovaihteiston etupuolelle, jolloin moottorin vääntömomentti saadaan järkevästi siirrettyä jakovaihteistolle käyttäen mahdollisimman vähän hyötysuhdetta huonontavia ratkaisuja. Jakovaihteiston etupuoli on käytännössä myös ainoa paikka, jossa on sähkömoottorin vaatima tila.

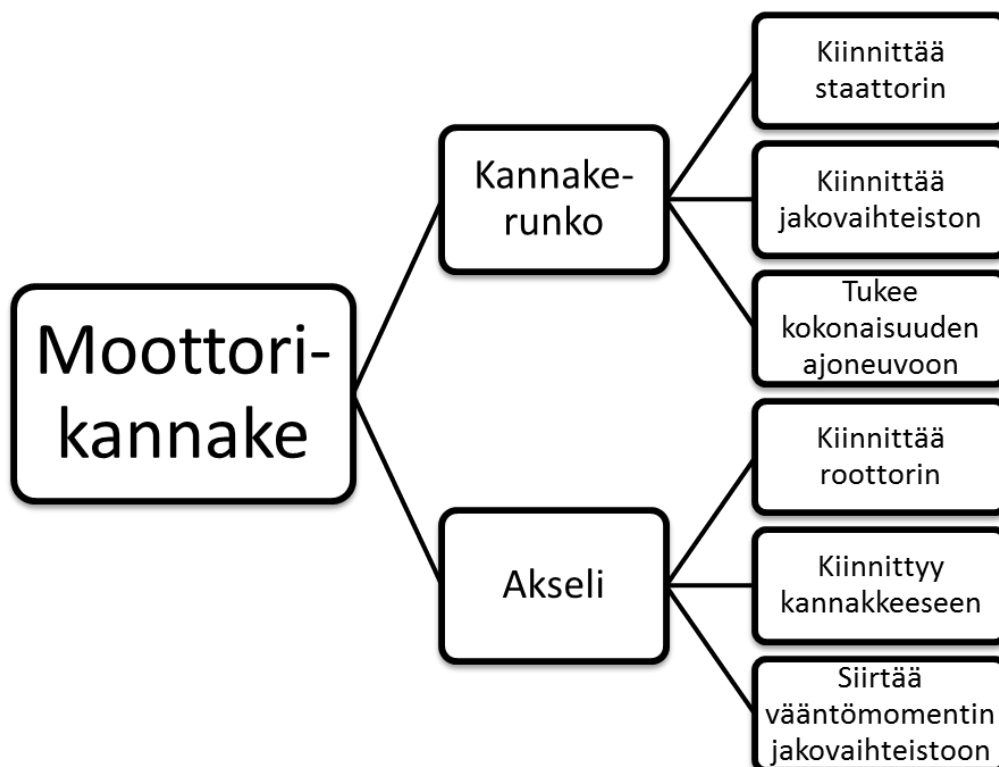
Ajoneuvon moottoritilassa, alkuperäisen polttomoottorin sijoituspaikan ympärillä, on runsaasti tilaa ja mahdollisia kiinnityspisteitä. Mikäli sähkömoottori sijoitetaan moottoritilaan, täytyy voima moottorilta johtaa jakovaihteistolle erillisellä kardaniakselilla. Akseli täytyy nivelöidä ja tukea ajoneuvon tukilaakereihin jakovaihteiston tuloakselin ja sähkömoottorin roottorin välisen pitkän välimatkan, korkeuseron sekä suuntaeron takia. Tämä puolestaan ei ole ihanteellista voimansiirron hyötysuhteen kannalta. Jakovaihteisto on myös tuettava erikseen, koska alun perin tuenta on järjestetty osittain vaihteiston ja moottorin kautta.

Kardaanitunneli ajoneuvon alla jää vaihteiston jäljiltä tyhjäksi. Tunneli on halkaisijaltaan 320 mm moottorille riittävän suuri. Sijoitettaessa moottori kohtisuorasti jakovaihteiston tuloakseliin nähden ei sähkömoottorin vääntömomentin siirtävää akselia tarvitse nivelöidä. Näin saavutetaan paras mahdollinen hyötysuhde ja vältetään nivelöinnin mukanaan mahdollisesti tuomilta vaikeuksilta.

Sähkömoottori on siksi järkevintä sijoittaa alkuperäisen vaihteiston tilalle jakovaihteiston eteen. Sähkömoottorista siirretään voima jakovaihteistoon, josta voima siirtyy alkuperäisiä kardaniakseleita pitkin eteenpäin vetopyörästöille ja

edelleen renkaille. Moottori täytyy tukea ajoneuvon runkorakenteisiin, sillä jakovaihteiston alkuperäinen kiinnitys ei ole kokonaisuudelle riittävä. Samalla saadaan tarvittava tuki jakovaihteistolle. Jäähdytys järjestetään jäähdyttimellä, tuulettimella ja nestekiertopumpulla. Tässä työssä ei kuitenkaan tarkemmin paneuduta moottorin jäähdytykseen.

Ajoneuvon palkkirunko, käytettävissä oleva tila sekä sähkömoottorin rakenne määräävät kannakkeen perusrakenteen. Kannakkeen rakenneperiaatetta hahmotellaan jakamalla kannakkeen kokonaistoiminto erillisiin osatoimintoihin (kuva 4). Kannakekokonaisuuden tulee sähkömoottorin rakenteen takia koostua staattorin kiinnittävästä kannakerungosta, johon roottorin akseli laakeroidaan. Kannake kiinnittää staattorin jakovaihteistoon ja ajoneuvon runkorakenteisiin. Akselin välityksellä roottorin tuottama vääntömomentti siirretään ajoneuvon jakovaihteistolle. Akselin laakerointi on järjestettävä vähintään kahdella toisistaan mahdollisimman etäälle sijoitetulla laakerilla. Näin akselille saadaan riittävä tuenta ja rakenteisiin kohdistuvat jännitykset saadaan minimoitua.



KUVA 4. Kannakkeen kokonaistoiminnon jako osatoimintoihin

Kannakkeeseen kohdistuu roottoria pyörittävän voiman vastavoima. Voimia muodostuu myös ajoneuvon nopeuden vaihdella ja epätasaisen tien aiheuttaessa pystysuuntaista kiihtyvyyttä. Kannakkeen tulee siis olla riittävän luja kestääkseen vääntömomentin lisäksi staattorin ja jakovaihteiston ajoneuvon liikehtiessä aiheuttamat inertiaivoimat. Akseli kiinnittyy kannakkeeseen laakerein, joten myös akseliin kohdistuvat voimat siirtyvät kannakerakenteisiin.

Roottorin ja staattorin väliin jäävä ilmaväli on noin 2 mm, eikä suuria ilmavälin vaihteluita saisi ilmetä. Siksi akselin täytyy olla riittävän jäykkä, jotta roottori ei pääse liikkumaan staattoriin nähden radiaalisesti ajoneuvon pystysuuntaisen liikehdinnän aiheuttamien inertiaivoimien vaikutuksesta. Myös roottorin mahdollinen epätasapaino aiheuttaa keskihakuvoiman, joka kohdistuu suoraan akseliin. Mikäli roottori pääsisi jossain tilanteessa osumaan staattorin käämitykseen, olisi tämä moottorille tuhoisaa. Akseli ottaa vastaan myös ajoneuvon kiihdyttäessä tai jarruttaessa roottorin massan aiheuttamat aksiaalivoimat.

Rakenteen suunnittelu aloitetaan listaamalla rakennetta koskevat vaatimukset. Vaatimuslistasta käy ilmi suunniteltavilta komponenteilta vaadittavat ominaisuudet tärkeysjärjestyksessä. Vaatimuslistalla vaatimukset on jaettu kiinteisiin vaatimuksiin (KV), vähimmäisvaatimukseen (VV) ja toiveisiin (T).

Kannakkeelle asetetaan seuraavat vaatimukset:

- koko, KV
 - kannakkeen on mahdollista valittuun sijoituspaikkaansa ilman suuria muokkauksia ajoneuvon rakenteissa
- kestävyys, KV
 - kestettävä moottorin vääntömomentin aiheuttama kuormitus
 - kestettävä rakenteeseen kohdistuva staattinen kuormitus
 - kestettävä ajoneuvon liikkeistä aiheutuvat sysäyskuormitukset
- kiinnitystapa, VV
 - moottorin aiheuttaman värinän tulee vaimentua rakenteessa
 - kiinnityspisteitä on oltava vähintään kolme kolmiotuennan aikaansaamiseksi
 - kiinnityspisteiden on oltava mahdollisimman etäällä toisistaan

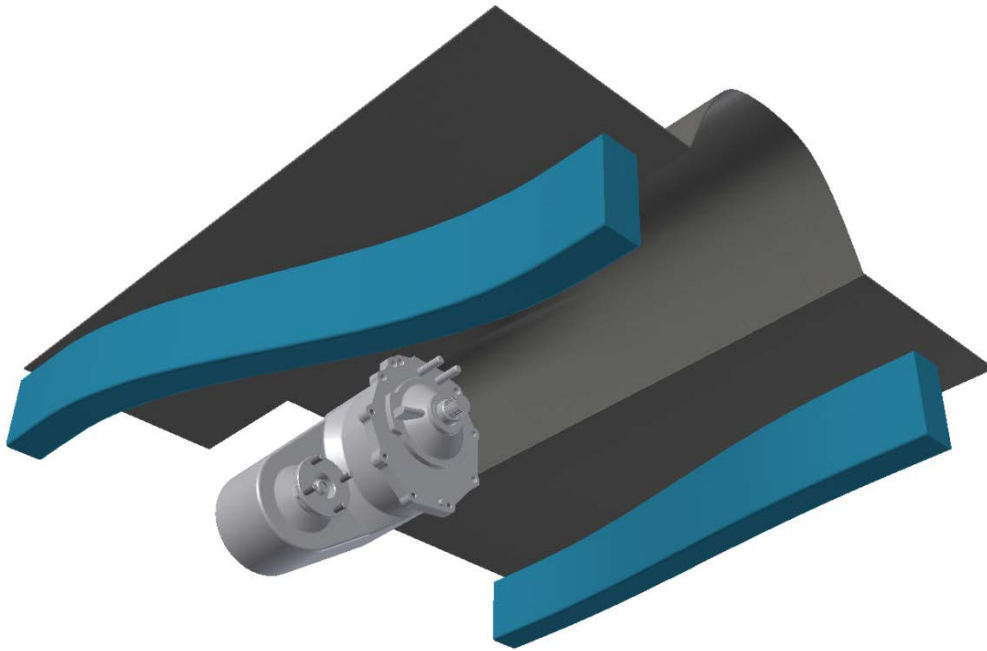
- keveys, VV
 - rakenteen on oltava kohtuullisen kevyt
- materiaali ja pinnoitus, T
 - materiaalin on oltava kohtuudella työstettävissä
 - kestettävä ulkoiset säärasitukset ja maantiesuolan vaikutukset.

Roottorin kiinnittävän akselin vaatimukset määritellään seuraavasti:

- koko, KV
 - akselin koon on oltava sopiva moottoriin, jakovaihteistoon ja kannakkeeseen nähden
- kestävyys, KV
 - kyettävä siirtämään moottorin vääntömomentti jakovaihteistolle
 - kestettävä roottorin mahdollisesta epätasapainosta aiheutuva kuormitus
 - kestettävä ajoneuvon liikkeistä aiheutuvat sysäyskuormitukset
- riittävä jäykkyys, KV
 - pidettävä roottori staattoriin nähden riittävän liikkumattomana; siirtymät radiaalisuunnassa alle 2 mm
- keveys, VV
 - akselin on oltava kohtuullisen kevyt
- materiaali ja pinnoitus, T
 - materiaalin on oltava kohtuudella työstettävissä
 - kestettävä mahdollinen kosteusrasitus.

2.3 Rakenteen luonnostelu

Luonnostelu aloitetaan laatimalla karkea 3D-virtuaalimalli ajoneuvon alustasta rakenteen sijoituskohteen ympäristöstä (kuva 5). Jakovaihteisto sekä ajoneuvon runkopalkit ja pohja jakovaihteiston läheisyydestä mallinnetaan karkeasti kokonaisuudessaan. Mallintamisessa käytetään apuna perinteisiä mittausvälineitä. Kannake kiinnittyy jakovaihteiston kiinnityspintaan, joten tämä osa pyritään mallintamaan mahdollisimman todenmukaisesti. Tarkkuusvaatimuksen takia jakovaihteisto mitataan kiinnityspinnan osalta 3D-mittalaitteella. Saatujen mittaustulosten perusteella voidaan mallintaminen tehdä hyvin tarkasti.



KUVA 5. Runkopalkit, pohjalevy ja jakovaihteisto mallinnettuina

Rakenteen mallia apuna käyttäen hahmotellaan sähkömoottorin sijoituspaikka. Jakovaihteiston akselin sijainti ja suunta määräävät hyvin pitkälti sähkömoottorin tulevan paikan. Suunnittelussa voidaan vaikuttaa periaatteessa vain sähkömoottorin sijoitukseen ajoneuvon pituussuunnassa, koska minkäänlaisen niveleen käyttö akselirakenteessa ei yksinkertaisuuden kannalta ole järkevää.

Sähkömoottori pyritään pitämään poissa ajoneuvon moottoritilasta. Toisaalta sähkömoottori tulee asentaa mahdollisimman kauas jakovaihteistosta, jotta kannakerakenteen laakerit saadaan sijoitettua mahdollisimman etäälle toisistaan. Moottorin sijoituspaikka on järkevintä valita niin, että moottorin takareuna on ajoneuvon moottoritilan rintapellin tasalla.

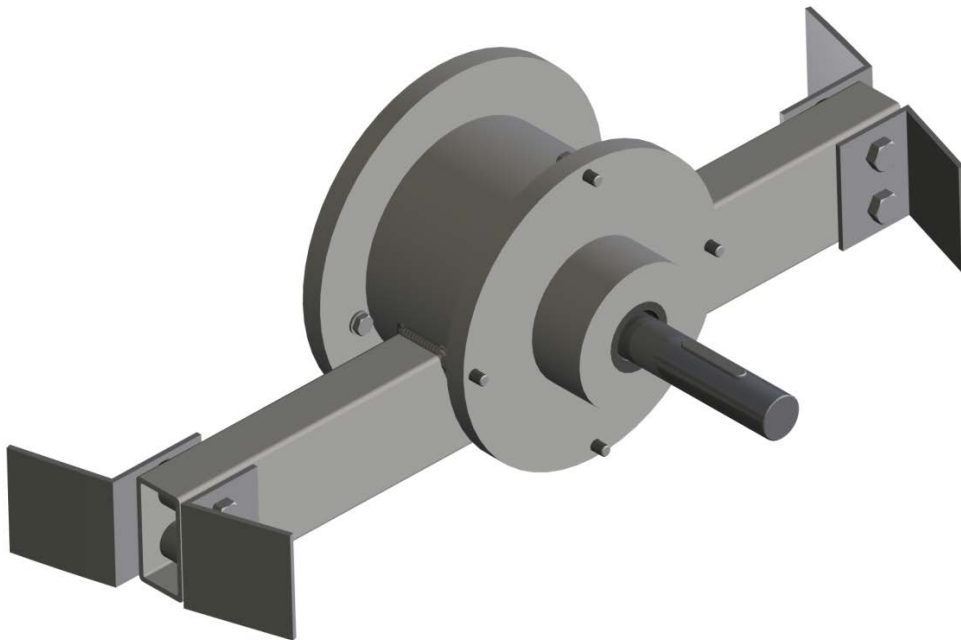
Mallinnettu sähkömoottori asetetaan valitulle paikalleen ajoneuvon alustasta laadittuun 3D-malliin. Seuraavaksi aloitetaan kannakerakenteen hahmottelu moottorin ja jakovaihteiston väliin rakenteelle asetetut vaatimukset huomioon ottaen.

Kannakkeen tulee kyetä kiinnittymään jakovaihteistoon ja staattoriin. Tarvitaan siis laipparakenne, joka täyttää vaatimukset mittojen osalta. Moottorin tuenta tapahtuu akselilla, joka laakeroidaan laipparakenteeseen. Vaatimus moottorin

sijoituspaikasta määrää laipparakenteen pituuden, halkaisijat määräytyvät staattorin ja jakovaihteiston mittojen kiinnitysreikien perusteella.

Kannake tulee vaatimusten mukaisesti tukea ajoneuvon runkoon. Rakenteen tulee siis olla tarpeeksi leveä, jotta voidaan järjestää tuenta käyttäen hyväksi riittävän tuennan tarjoavia ajoneuvon runkopalkkeja. Kannaketta on mielekästä leventää erillisen runkopalkin avulla, joka kiinnittyy ajoneuvon runkopalkkeihin ja kannakkeeseen.

Kannakkeesta luodaan ideoinnin perusteella rakennemalli (kuva 6), jota hyödynnetään myöhemmin suunnitteluvaiheessa. Malli antaa hyvät lähtökohdat varsinaiselle suunnittelutyölle, mutta monia asioita jää myös vielä ratkaistavaksi. Jo tässä vaiheessa nähdään, että laipparakenne on mielekästä koota useammasta osasta materiaalihävikin ja työstömäärän minimoimiseksi. Rakenne on järkevää jakaa erillisiin kiinnityslaippoihin ja laipat yhdistävään runko-osaan.



KUVA 6. Malli kannakkeen rakenteesta

Kannakkeen modulaarisella rakenteella tehdään mahdolliseksi myös erilaisten moottorien käyttö kannakkeessa vaihtamalla vain moottorin kiinnittävä laippa. Jonkin osan mahdollisesti rikkoontuessa voidaan uusia vain kyseinen osa.

Luodun rakennemallin perusteella laaditaan vielä fyysinen pikamalli (kuva 7) ennen varsinaiseen suunnittelutyöhön siirtymistä. Pikamalli toteutetaan käyttäen polystyreenilevyjä, joista käsityökaluin muotoilemalla laaditaan kannakkeen rakennemallia mukaileva tuotos. Näin saadaan edullisesti varmistettua rakenteen sopivuus suunnitellulle paikalle ja vältetään yllätyksiltä myöhemmässä vaiheessa. Fyysinen malli tuo rakenteeseen enemmän kosketuspintaa ja mahdollisia parannusehdotuksia on helpompi miettiä.



KUVA 7. Polystyreenilevystä valmistettu pikamalli kannakkeesta ja sähkömoottorista

3 RAKENNESUUNNITTELU

Rakennesuunnittelu toteutetaan laaditun rakenneluonnoksen ja pikamallin pohjalta. Kannakkeen kokoonpano ja kaikki osat suunnitellaan rakenteelle asetettujen ehtojen mukaisesti. Suunnittelulla pyritään tuottamaan osista työpiirustukset, joiden perusteella osat voidaan valmistuttaa.

Suunnittelutyössä hyödynnetään tietokoneohjelmistojen tarjoamia työkaluja mahdollisimman tehokkaasti tarkoituksena nopeuttaa työtä ja minimoida virheet. Rakennetta hahmotellaan käyttäen pohjana mallinnettua sijoituskohdetta. Suunnittelussa ja erilaisten laskentojen suorituksissa käytetään apuna Autodesk Inventor 2011 ja SolidWorks 2011 - 2012 -ohjelmia.

Rakenteelle suoritetuissa lujuustarkasteluissa ajoneuvon oletetaan olevan hidastuvassa liikkeessä kiihtyvyyden ollessa 2 g. Pystysuuntaisena kiihtyvyytenä käytetään 3 g, jolla kuvastetaan epätasaisen tien vaikutusta. Moottorin vääntömomentiksi asetetaan laskennoissa 300 Nm.

3.1 Materiaalivalinnat

Suunnittelu aloitetaan valitsemalla alustavat materiaalit rakenteen eri komponenteille. Materiaalit valitaan tiedossa olevien, vaatimuslistassa määriteltyjen vaatimusten perusteella. Materiaalien lujuusarvoja käytetään lujuuslaskennasta saatujen tulosten tulkitsemiseen ja johtopäätösten perusteella suoritetaan materiaalivalinta tarvittaessa uudelleen.

3.1.1 Akselin materiaali

Akseliin kohdistuu rakenteessa suurehkoja kuormituksia, jotka ovat väsyttäviä ja iskuluontoisia. Materiaalilta vaaditaan sitkeyttä, suurta lujuutta ja hyvää väsymislujuutta. Akseliin tulee myös uritus ja kiilaura, joiden työstöön materiaalin on sovelluttava.

Vaatimukset täyttävä materiaali on nuorrutusteräs, joka soveltuu erittäin hyvin raskaasti kuormitettujen osien materiaaliksi. Nuorrutusteräkseen saadaan työs-

tettyä suuren taivutusväsymislujuuden omaavia hammastuksia ja materiaalin vierintäväsymislujuus on erittäin suuri. (1, s. 112.)

Valitaan akselin materiaaliksi nuorrutusteräs 25CrMo4. Kyseisen teräslaadun myötölujuus R_e on 450 N/mm² ja murtolujuus R_m 700-850 N/mm². Myös lujempia nuorrutusteräksiä on saatavilla, mutta materiaalin hinta nousee ja työstö vaikeutuu lujuuden kasvaessa. Lujemmat laadut tulevat mahdollisesti kyseen lujuustarkastelujen jälkeen. (1, s. 113 - 114.)

Kaikkien työstötoimenpiteiden jälkeen teräs typetetään. Typetyksellä tarkoitetaan pitkää nitrausprosessia, jossa kappale kuumennetaan ammoniakkikaasussa ja tämän jälkeen jäähdytetään. Menetelmä soveltuu hyvin nuorrutusteräksille. Typetyksellä saavutetaan kova, hyvin kulutusta ja korroosiota kestävä pinta. Prosessi parantaa myös teräksen väsymiskestävyyttä. (2, s. 111; 3, s. 20.)

Saatavuus on nuorrutusteräksillä hyvä. Valittua materiaalilaatua on varastossa esimerkiksi Ovako Imatra Oy Ab:lla tankomuodossa aina 180 mm:iin saakka. (4, s. 12.)

3.1.2 Kannakkeen materiaali

Kannakkeeseen kohdistuu staattisia ja iskuluontoisia kuormituksia. Materiaalilta vaaditaan hyvää keveyden ja lujuuden tasapainoa, koska kannake muodostaa suurimman osan rakenteen kokonaispainosta. Kannake on myös jatkuvasti altis ulkoisille säärasituksille ja maantiesuolan vaikutuksille. Kannakkeen osat vaativat paljon työstöä, joten materiaalin tulee olla helposti työstettävissä.

Vaatimukset täyttäviä materiaaleja ovat alumiiniseokset. Niiden käyttö perustuu materiaalien keveyteen ja hyvään korroosionkestävyyteen sekä erikoisseosten lujuuteen. Alumiinin syöpymiskestävyys on seurausta metallin pintaan muodostuvasta oksidikerroksesta. Seostetuilla alumiineilla syöpymiskestävyys on heikompi. (1, s. 119.)

Kannakeosien materiaaleiksi valitaan magnesiumia ja piitä sisältävä alumiiniseos 6082. Seos on yleisin koneenrakennuksessa käytettävistä alumiiniseoksista. Toimitustilaksi valitaan T6, päästökäsitelty ja lämpövanhennettu. Kysei-

nen toimitustila on yleinen valitulla seoslaadulla. 200 - 250 mm:n pyörötangoille seoksen 0,2 %-venymäraja $R_{p0,2}$ on 200 N/mm². 12,5 - 175 mm:n vahvuisille levyille kyseinen raja on 245 N/mm². Murtolujuus R_m pyörötangoille on 270 N/mm² ja levyille 295 N/mm². (5, linkit Tekninen informaatio -> Mekaaniset ominaisuudet -> Levyt; 5, linkit Tekninen informaatio -> Mekaaniset ominaisuudet -> Tangot; 6, s. 215 - 219.)

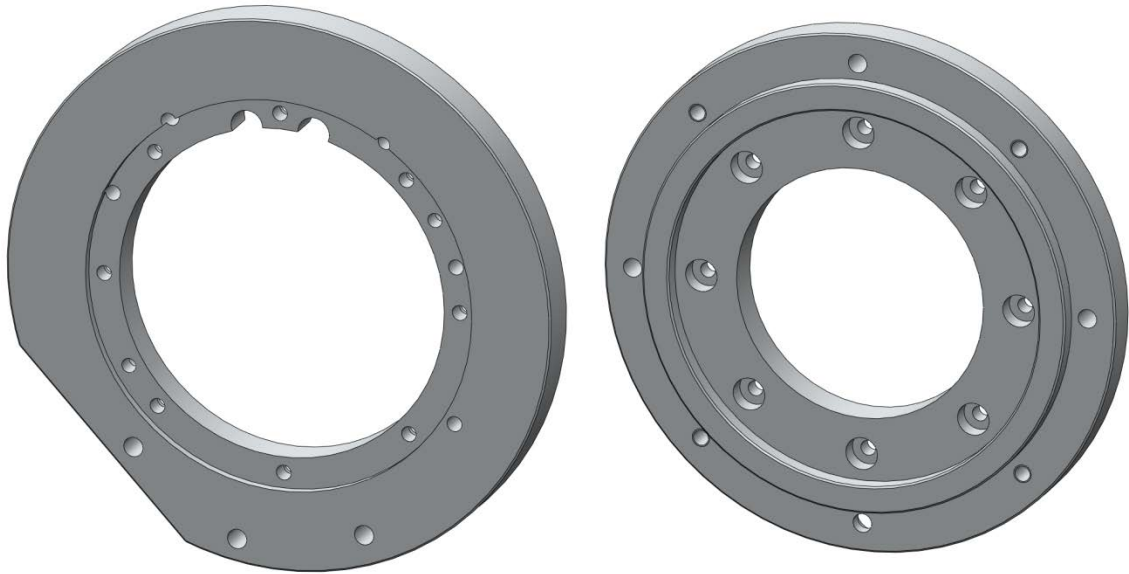
Työstötoimenpiteiden jälkeen alumiiniosat anodisoidaan eli kappaleen pinta hahpetetaan sähkövirtaa käyttäen. Anodisoinnilla saavutetaan hyvä korroosionkestävyys ja kulumiskestävyys. Kannakkeen osien anodisoinnissa käytetään mustaa väriainetta. (2, s. 233.)

Yleisillä alumiiniseoksilla on hyvä saatavuus. Valittua seoslaatua on esimerkiksi Alumeco Finland Oy Ab:lla levynä paksuuksissa 1 - 150 mm ja pyörötankona 500 mm:iin saakka. (5, linkit Tuotteet -> Tangot -> Pyörötangot; 5, linkit Tuotteet -> Paksut levyt -> EN AW-6082.)

3.2 Kannakkeen suunnittelu

Kannake kiinnittyy toisesta päästään ajoneuvon jakovaihteistoon ja toisesta sähkömoottorin staattoriin. Siksi kannakkeen päämitat määräytyvät jakovaihteiston ja staattorin kiinnityspintojen mittojen perusteella ja muu rakenne suunnitellaan niiden asettamien ehtojen pohjalta.

Kannakkeen suunnittelu aloitetaan jakovaihteistoon kiinnittyvästä laipasta (kuva 8). Jakovaihteistoon kiinnittyvän laipan mitat ja kiinnitysreikien paikat määräytyvät 3D-mittalaitteella jakovaihteistosta saatujen mittaustulosten perusteella. Osa kiinnitysrei'istä tulee olemaan kierrereikiä. Laipan paksuudeksi valitaan 25 mm, joka mahdollistaa riittävän pitkän kierteen. Yhtä laipan reunoista on viistettävä lähelle sijoittuvan kardaaniakselin vuoksi.



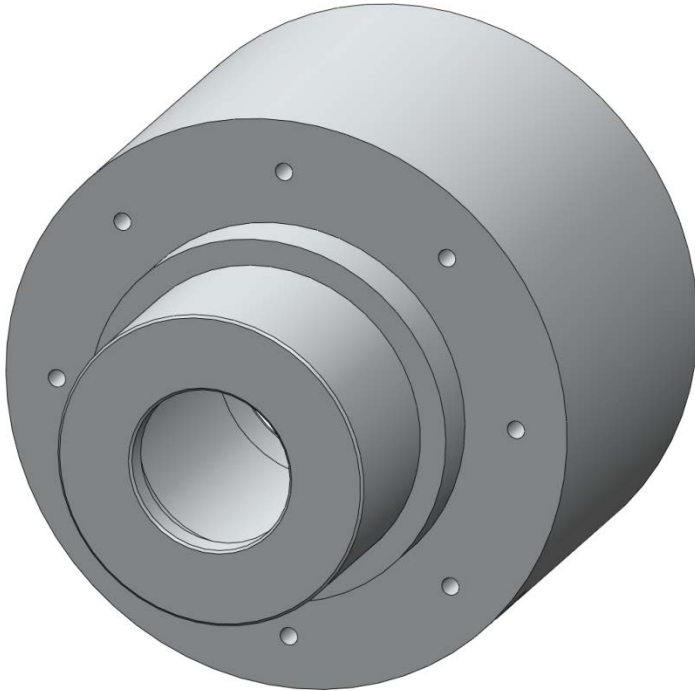
KUVA 8. Jakovaihteistoon kiinnittyvä laippa ja staattoriin kiinnittyvä laippa

Laipan keskittäminen laipparunkoon tapahtuu sisäreunaa kiertävän olakkeen avulla. Olakkeen halkaisija valitaan niin, että laipparunko peittää mahdollisimman vähän jakovaihteistoon kiinnittymistä varten suunniteltuja reikiä. Laipparungon ja laipan välinen kiinnitys toteutetaan laipan reunaa kiertävällä kahdeksanruuvisella ruuviliitoksella.

Myös staattorin kiinnitys kannakkeeseen toteutetaan erillisen laipan avulla (kuva 8). Kiinnityslaipan mitat ja staattorin kiinnitysreiät määräytyvät staattorin kiinnityspinnan mittojen perusteella. Staattorin keskittäminen laippaan nähden tapahtuu kiinnityspuolelta ulkonevan olakkeen avulla. Riittävän jäykkyyden ja lujuuden varmistamiseksi laipan paksuudeksi valitaan 20 mm. Laippa keskitetään sisäkehältään laipparungon kiinnityspinnassa olevan olakkeen avulla. Kiinnitys toteutetaan sisäreunaa kiertävällä kahdeksanruuvisella ruuviliitoksella.

Kannakkeeseen tarvitaan runko, johon muut osat kiinnittyvät. Runko on tärkein ja rakenteellisesti monimutkaisin osa ja sen tulee olla sopiva jakovaihteiston ja staattorin kiinnityslaippojen mittoihin. Akseli laakeroidaan laipparunkoon kahdella laakerilla.

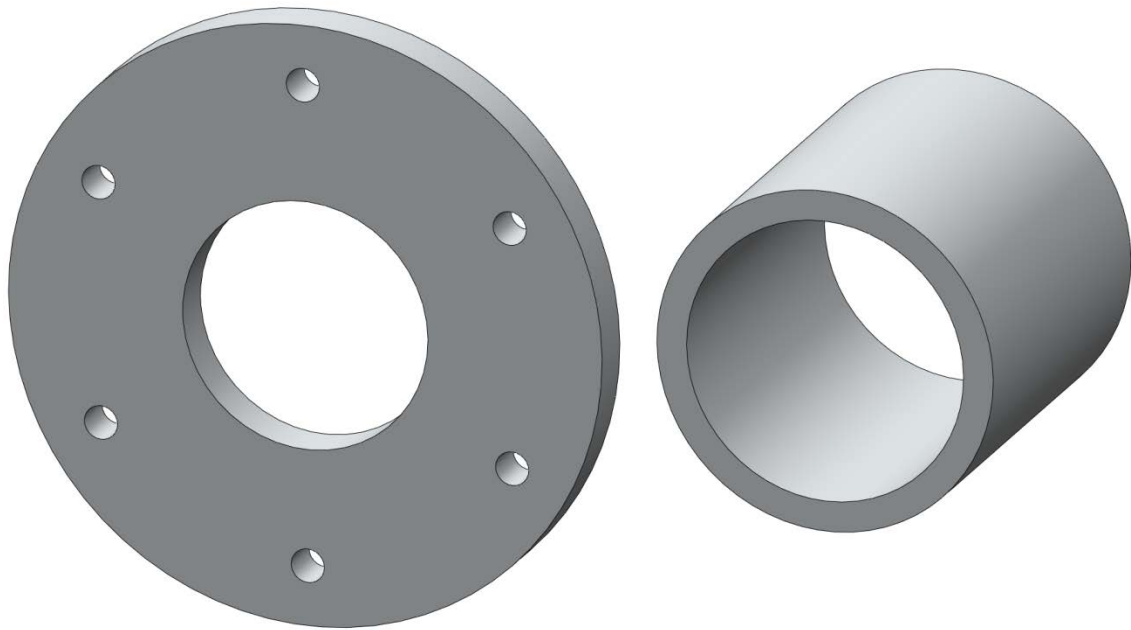
Laipparungon (kuva 9) ulkohalkaisija määräytyy jakolaatikkolaipan olakkeen perusteella. Laipparungosta suunnitellaan mahdollisimman pitkä käytettävissä olevan tilan rajoissa, jotta laakerien väliin saadaan riittävästi etäisyyttä. Pituutta rajoittaa tavoite pitää sähkömoottori poissa ajoneuvon alkuperäisestä moottoritulasta.



KUVA 9. Osat yhdistävä laipparunko

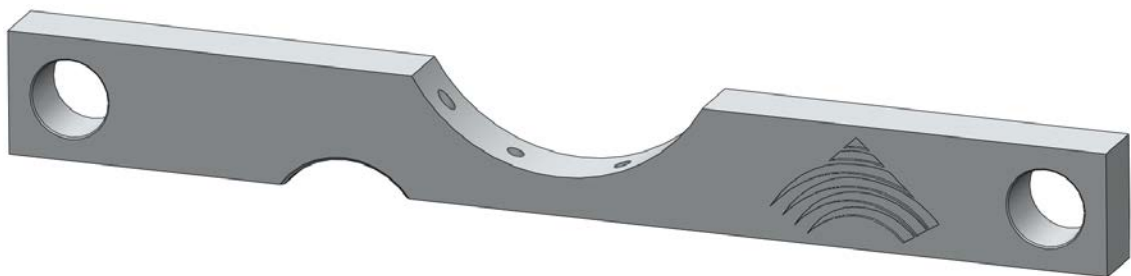
Jakovaihteiston kiinnityspinnan keskeltä ulkonevan muodon takia ensimmäinen laakeri täytyy sijoittaa kauas jakovaihteistosta, mutta toinen laakeri sen sijaan saadaan sijoitettua käytännössä staattorin sisälle. Näin laakerien väliseksi etäisyydeksi saadaan yli 100 mm, joka oletetaan riittäväksi. Laakeripesien mitat määräytyvät tarkasti myöhemmässä vaiheessa valittavien laakerien mittojen perusteella.

Laakerien ulkokehät tulee kiinnittää aksiaalisesti. Pelkkä tiukka sovite kehillä ei riitä aksiaalikiinnitykseksi (7, s. 128). Laakerien aksiaalikiinnitys toteutetaan laipparungon sisälle asetettavalla laakerien ulkokehiä toisiinsa tukevalla väliholkilla ja laipalla (kuva 10), joka painaa laakerit laipparungon olaketta vasten. Kiinnitystapa mahdollistaa rakenteen helpon kokoamisen ja purkamisen.



KUVA 10. Laakerien aksiaali kiinnitysosat

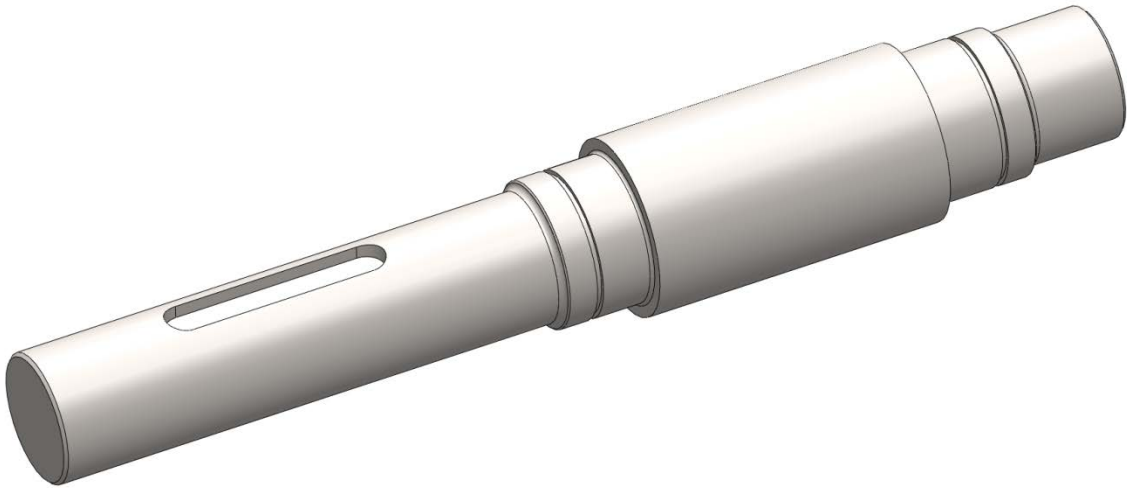
Kannakkeen tukemiseksi ajoneuvon runkoon täytyy rakenteelle suunnitella kannakepalkki (kuva 11). Palkki sijoitetaan kannakerungon alapuolelle mahdollisimman lähelle sähkömoottoria. Näin saadaan kiinnityspisteet mahdollisimman etäälle jakovaihteiston kiinnikkeestä ja tuennasta saadaan tukevampi. Palkki kiinnittyy kannakkeeseen ruuviliitoksella. Kiinnitys ajoneuvon runkoon tapahtuu tärinäneristyspuslien välityksellä. Palkin sopiviksi mitoiksi arvioidaan 40 mm x 80 mm. Mittoja muutetaan tarvittaessa lujuuslaskennoista saatujen tulosten perusteella.



KUVA 11. Kannakkeen kiinnittävä runkopalkki

3.3 Akselin suunnittelu

Akselin (kuva 12) roottorin kiinnittävän pään halkaisijaksi määräytyy roottorin kartioholkin sisähalkaisijan perusteella 40 mm. Samaisen kartioholkin perusteella valitaan akselin kiilauran mitoiksi 12 mm x 70 mm. Kiilauran sijainti akselilla määräytyy akselin sijainnista kannakkeeseen ja staattoriin nähden. Roottorin tulee aksiaalisuunnassa sijaita staattorin käämityksen keskellä.



KUVA 12. Roottorin kiinnittävä akseli

Laakereille suunnitellaan erilliset halkaisijoiltaan akselin päitä suuremmat olakkeet helpottamaan laakerien asennusta akselille. Valitaan laakeriolakkeiden halkaisijaksi 45 mm, joka on seuraava koko vakiolaakereissa 40 mm:stä ylöspäin mentäessä.

Myös laakerien sisäkehät tulee kiinnittää aksiaalisesti. Laakerien sisäkehien kiinnitys akselille toteutetaan kehiä tukevilla olakkeilla ja pidätinrenkailla. Pidätinrenkasurien ja akselin muut mitat määräytyvät pääasiassa jakovaihteiston sekä laakereiden ja standardiosien mittojen perusteella.

Jakovaihteiston tuloakselin päässä on aksiaalisuuntainen evolventtihampainen uritus. Vääntömomentin siirto akselista jakovaihteistoon tapahtuu akselin päähän kalvittavan sisäpuolisen urituksen avulla. Roottorin kiinnittävän akselin ja jakovaihteiston tuloakselin välille muodostuu ura-akseliliitos. Jakovaihteiston akselin urituksen tiedot ovat taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Jakovaihteiston akselin urituksen ominaisarvot

DIN 5480 - W28 x 1 x 26 x 8f		
Päähalkaisija	d_1	28 mm
Tyvihalkaisija	d_2	26 mm
Hampaan tehollinen korkeus	h	1 mm
Keskihalkaisija	d_m	27 mm
Hampaan pituus aksiaalisuunnassa	l	27 mm
Ryntökulma	α	30°
Kantokerroin	q	0,8
Hammasluku	z	26

Ura-akseliliitoksen vääntömomentin siirtokyky voidaan laskea kaavalla 1 (1, s. 386).

$$M_v = p \cdot h \cdot l \cdot z \cdot q \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{2} \cdot d_m \quad \text{KAAVA 1}$$

M_v = vääntömomentin siirtokyky (Nmm)

p = pintapaine (N/mm²)

h = hampaan tehollinen korkeus (mm)

l = hampaan pituus aksiaalisuunnassa (mm)

z = hammasluku

q = kantokerroin

α = ryntökulma (°)

d_m = keskihalkaisija (mm)

Vääntömomentin siirtokyvyn kaavasta voidaan johtaa kaava liitoksessa esiintyvälle pintapaineelle. Pintapaine voidaan laskea kaavalla 2.

$$p = \frac{M_v \cdot 2}{h \cdot l \cdot z \cdot q \cdot \cos \alpha \cdot d_m} \quad \text{KAAVA 2}$$

Sijoitetaan ura-akseliliitoksen tiedot ja 300 Nm:n suuruinen sähkömoottorin muodostama vääntömomentti kaavaan 2:

$$p = \frac{300\,000 \text{ Nmm} \cdot 2}{1,0 \text{ mm} \cdot 25 \text{ mm} \cdot 26 \cdot 0,8 \cdot \cos 30^\circ \cdot 27 \text{ mm}} \approx 49 \text{ N/mm}^2$$

Ura-akseliliitoksen sallittu pintapaine karkaistulla teräksellä vaihtosuuntaisessa kevyitä iskuja sisältävässä kuormituksessa on 90 N/mm^2 (1, s. 378 - 379). Paine liitoksessa jää alhaiseksi, eikä kestävyysongelmia pitäisi esiintyä. Liitokseen saattaa joissain tilanteissa kohdistua iskuluontoista kuormitusta, mutta tämäkään ei todennäköisesti muodostu ongelmaksi. Liitoksen kestävyyttä voidaan arvioida vertaamalla ajoneuvon alkuperäisen dieselmoottorin tuottamaa vääntömomenttia sähkömoottorin vääntömomenttiin. Dieselmoottorin jakovaihteistoon tuottama vääntömomentti ykkösvaihteella ajettaessa on vaihteistossa tapahtuvan välityksen muutoksen vuoksi suurimmillaan noin 894 Nm.

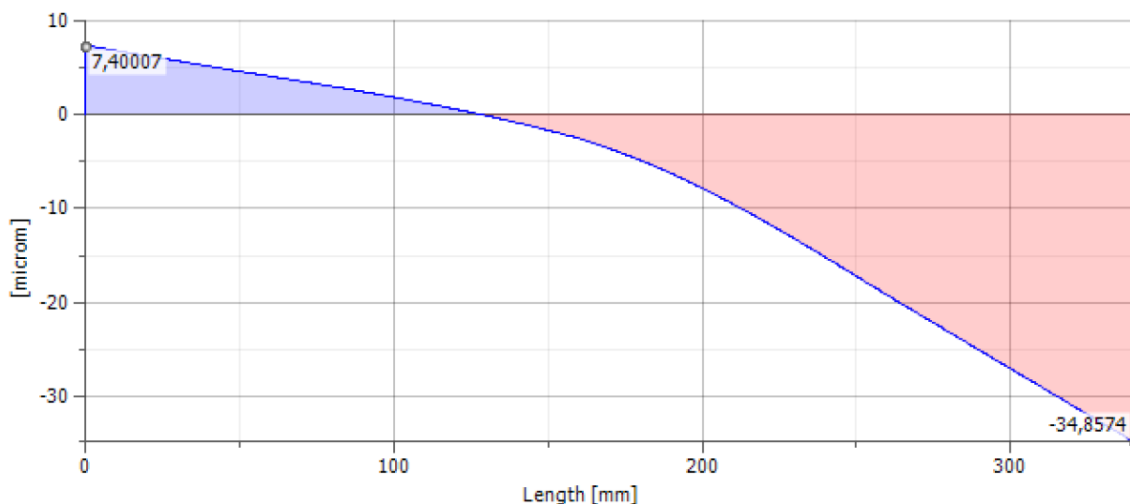
Tavallisesti tarkasteltaessa sähkömoottorin laakerointia voidaan pyörivien osien epätasapainosta, magneettisuudesta sekä ulkoisista sysäyksistä aiheutuvat voimat ottaa huomioon kertomalla roottorin massa (8, s. 8). Tässä tapauksessa voidaan käyttää samaa periaatetta tarkasteltaessa akselissa esiintyviä jännityksiä ja määriteltäessä laakerikuormituksia.

Suunniteltujen mittojen mukaiselle akselille suoritetaan alustava lujuustarkastelu Autodesk Inventor -ohjelman akselinsuunnittelusovelluksella. Roottorin kiinnityskohtaan asetetaan kohdistuvaksi kolminkertaista roottorin massaa vastaava 588,6 N pystysuuntainen voima, hidastuvuutta kuvaava 392,4 N akselin suuntaisesti vaikuttava voima ja 300 Nm vääntömomentti. Toiseen päähän akselia asetetaan kohdistuvaksi vastakkaissuuntainen 300 Nm vääntömomentti. Laskennan tulokset ovat suuntaa antavia, mutta esimerkiksi laakerikuormituksia voidaan käyttää suoraan laskettaessa laakerien kestoikää. Laskennan tulokset ovat taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Akselille suoritetun alustavan lujuustarkastelun tulokset

Akseli - alustava lujuustarkastelu		
Akselin massa	m	4,409 kg
Suurin taivutusjännitys	σ_{max}	7,570 N/mm ²
Suurin leikkausjännitys	τ	0,483 N/mm ²
Suurin vääntöjännitys	τ_{vmax}	31,416 N/mm ²
Suurin normaalijännitys	σ	0,312 N/mm ²
Suurin yhdistetty jännitys	σ_{yhd}	54,415 N/mm ²
Suurin poikkeama	f_{max}	0,0349 mm
Akselin kiertymä	φ	0,14 °
Ohjaavan laakerin radiaalikuormitus	F_r	521,051 N
Ohjaavan laakerin aksiaalikuormitus	F_a	392,4 N
Vapaan laakerin radiaalikuormitus	F_r	1 152,883 N

Laskennassa saatujen tulosten perusteella jännitykset pysyvät alhaisina, eikä tarvetta akselin mittojen muuttamiselle tässä vaiheessa ilmene. Myös akselin suurin poikkeama pysyy alhaisena (kuva 13), eikä tämä näin ollen tuota ongelmia ilmavälin muutosten suhteen. Akseliin kohdistuvista jännityksistä ja akselin taipumasta saadaan vielä tarkempaa tietoa kannakkeelle suoritettavan FEM-lujuuslaskennan avulla.



KUVA 13. Akselin laskennallinen poikkeama, oikealla roottoripää

Osista laaditaan valmistuspiirustukset ja kokoonpanopiirustukset (liite 2) sekä kokoamisohje kannakkeelle (liite 3). Piirustuksiin asetetaan vaadittavat mitta- ja geometriset toleranssit. Mittatoleranssit määräytyvät osittain standardiosien toleranssivaatimusten perusteella ja osittain osien välisten sovitteiden

perusteella. Geometrisillä toleransseilla varmistetaan osien vaatimusten mukainen toiminta. Pinnanlaatuvaatimukset asetetaan osan suunnitellusta valmistustavasta riippuen sovitteiden ja standardiosien vaatimukset huomioon ottaen.

3.4 Laakerointi

Sähkömoottori lämpenee aina käytettäessä. Staattorin jäähdytys hoidetaan nestekierrolla, mutta roottorista lämpö pääsee johtumaan vain akseliin, josta laakerien välityksellä laipparakenteeseen. Tämän takia on akselin lämpölaajenemisesta johtuvat pituuden muutokset otettava huomioon laakerointia suunniteltaessa.

Rakenteen vaatimuksissa määritellyn tuennan aikaansaamiseksi ja akselin mahdollisten pituuden vaihtelujen sallimiseksi tarvitaan kaksi laakeria: ohjaava ja vapaa laakeri. Ohjaava laakeri kantaa akselia säteen suuntaisesti ja ohjaa sitä aksiaalisesti. Vapaa laakeri kantaa akselia vain säteen suuntaisesti sallien lämpölaajenemisen mahdollisesti aiheuttaman aksiaalisen siirtymän. Koska laakeripesät ovat kevytmetallia ja kuormitussuunta joissain tilanteissa epämääräinen, ei aksiaalisuuntaisen liikkeen sallivan väljän sovitteen käyttö vapaassa laakerissa ole mahdollista ilman erillisen karkaistun väliholkin käyttämistä pesän laakerisijan vaurioitumisriskin takia. (7, s. 98 - 101.)

Vapaaksi laakeriksi on järkevintä valita aksiaalisen siirtymän itsessään salliva laipattomalla renkaalla varustettu lieriörullalaakeri. Ohjaavaksi laakeriksi sen sijaan on järkevintä valita urakuulalaakeri sen huoltovapauden, pienen kitkan sekä hyvän yhdistetyn kuormituksen kantokyvyn takia. Epämääräisen kuormitussuunnan takia on kummankin laakerirenkaan sovitteen oltava tiukka. Tämän vuoksi ohjaavaksi laakeriksi valitaan normaalia suuremmalla alkuvälöksellä varustettu laakeri. Lieriörullalaakerille normaalivällys on riittävä. (7, s. 25, 100.)

Laakeroinnin koko määräytyy laakerin kantokyvyn ja kuormituksen välisen suhteen sekä kestoialle ja käyttövarmuudelle asetettujen vaatimusten perusteella. Valittaessa kuormituksen alaisena pyöriviä laakereita käytetään laskennassa laakerin dynaamista kantavuuslukuja. Dynaaminen kantavuusluku ilmaisee laa-

kerikuormituksen, jolla laakeri kestää miljoonan kierroksen kestoian ISO 281/I-1977:n mukaan laskettuna. Dynaamiset kantavuusluvut eri laakereille löytyvät laakeritaulukoista. (7, s. 27.)

Laakereiden kestoiällä tarkoitetaan kierrosmäärää, jonka laakeri voi pyöriä ennen vierintäelimiin tai -ratoihin ilmaantuvia väsymismerkkejä. Täysin yhtäläiset laakerit, jotka toimivat täysin yhtäläisissä olosuhteissa, ovat kuitenkin kestoiältään erilaisia. Dynaamisen kantokyvyn tiedot perustuvat nimelliskestoikään, jonka saavuttaa tai ylittää 90 % yhtäläisistä laakereista. (7, s. 27.)

Laakerin nimelliskestoikä voidaan yksinkertaisimmillaan laskea kaavalla 3 (7, s. 28).

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

KAAVA 3

L_{10} = laakerin nimelliskestoikä (miljoonaa kierrosta)

C = laakerin dynaaminen kantavuusluku (N)

P = laakerin dynaaminen ekvivalenttikuormitus (N)

p = eksponentti: kuulalaakereilla 3, rullalaakereilla 10/3

Mikäli laakeriin kohdistuu samanaikaisesti sekä aksiaali- että radiaalikuormitus, on laskettava ekvivalenttikuormitus. Urakuulalaakereilla ekvivalenttikuormituksen laskentaan tarvittavat kertoimet riippuvat laakerin aksiaalikuormituksen ja staattisen kantavuusluvun välisestä suhteesta ja laakerin säteisvälyksestä. Mikäli laakeriksi on valittu normaalivälystä suuremman välyksen omaava laakeri siksi, että välys pienenee asennuksessa tai käytössä, käytetään normaalin laakerivälyksen arvoja. Laskentakertoimet löytyvät laakerivalmistajan taulukoista. Tavallisten urakuulalaakerien laskentakertoimet ovat taulukossa 4. (7, s. 184.)

TAULUKKO 4. Urakuulalaakerien laskentakertoimet (7, s. 185)

F_a/F_r	e	$F_a/F_r \leq e$		$F_a/F_r > e$	
		X	Y	X	Y
0,025	0,22	1	0	0,56	2
0,04	0,24	1	0	0,56	1,8
0,07	0,27	1	0	0,56	1,6
0,13	0,31	1	0	0,56	1,4
0,25	0,37	1	0	0,56	1,2
0,5	0,44	1	0	0,56	1

Urakuulalaakerin ekvivalenttikuormitus saadaan laskettua kaavalla 4 (7, s. 184).

$$P = XF_r + YF_a$$

KAAVA 4

P = laakerin ekvivalenttikuormitus

X = laakerin säteiskerroin

F_r = kuormituksen radiaalikomponentti (N)

Y = laakerin aksiaalikerroin

F_a = kuormituksen aksiaalikomponentti (N)

Maantieajoneuvojen pyörien laakerointia varten kestoikä ilmoitetaan yleensä ajokilometreinä. Nimelliskestoikä kilometreinä voidaan laskea kaavalla 5 (7, s. 33).

$$L_{10s} = \frac{P_d}{1\,000} \cdot L_{10}$$

KAAVA 5

L_{10s} = laakerin nimelliskestoikä (miljoonaa kilometriä)

P_d = pyörän dynaaminen vierintäkehä (m)

Moottorikannakkeen laakerien tapauksessa voidaan soveltaa samaa periaatetta ottamalla laskennassa huomioon jakovaihteistossa ja vetopyörästäoissä tapahtuva välityssuhteen muutos. Moottorikannakkeen laakereiden nimelliskestoikä ajokilometreinä voidaan laskea kaavalla 6.

$$L_{10s} = \frac{P_d}{1\,000} \cdot L_{10} \cdot \left(\frac{1}{R_j \cdot R_v} \right)$$

KAAVA 6

R_j = jakovaihteiston alennusvaihteen välityssuhde (2,566:1)

R_v = vetopyörästöjen välityssuhde (4,300:1)

3.4.1 Vapaa laakeri

Laakerit valitaan SKF:n vakiolaakereista. Laakerin reiän halkaisija määräytyy akselin laakeripintojen perusteella, jotka ovat halkaisijoiltaan 45 mm. Koska laakereihin kohdistuvat voimat ovat verrattain pieniä, valitaan ensimmäiseen laskentaan yksirivisistä lieriörullalaakereista pienin 45 mm:n sisähalkaisijalla ja laipattomalla sisäkehällä varustettu laakeri NU 1009 EC. Laakerin ominaisarvot ovat taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Lieriörullalaakeri NU 1009 EC:n ominaisarvot (7, s. 344)

Lieriörullalaakeri NU 1009 EC		
Ulkohalkaisija	D	75 mm
Leveys	B	16 mm
Dynaaminen kantavuusluku	C	44 600 N
Staattinen kantavuusluku	C_0	52 000 N
Väsymiskuormitusraja	P_u	6 300 N
Pyörimisnopeusraja, rasvavoitelu		9 000 r/min
Pyörimisnopeusraja, öljyvoitelu		11 000 r/min
Massa		0,26 kg

Akselille suoritetusta alustavasta lujuustarkastelusta (taulukko 3) saadaan vapaalle laakerille laskentatilanteessa kohdistuvat voimat: vapaaseen laakeriin kohdistuu radiaalivoima 1 152,9 N. Koska vapaaseen laakeriin kohdistuu ainoastaan radiaalisuuntainen kuormitus, voidaan nimellistä kestoikää laskettaessa kuormituksen arvoa käyttää sellaisenaan laakerin dynaamisena ekvivalenttikuormituksen arvona. Sijoitetaan laakerin dynaaminen kantavuusluku sekä ekvivalenttikuormitus kaavaan 3:

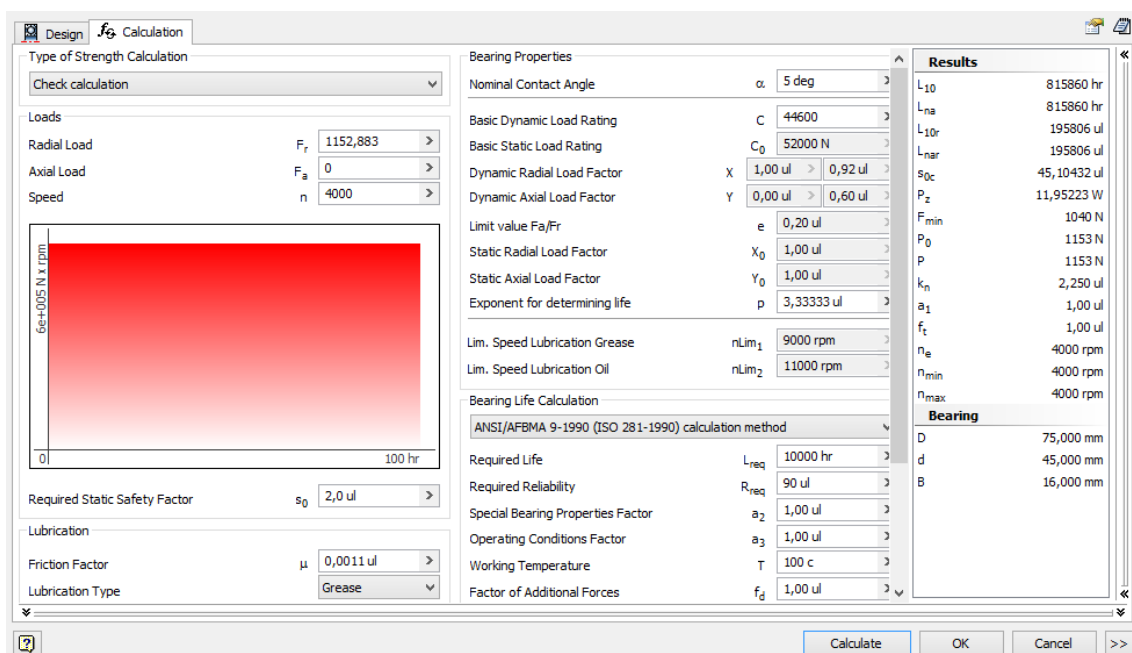
$$L_{10} = \left(\frac{44\,600\,N}{1\,152,9\,N} \right)^{\frac{10}{3}} \approx 195\,799,1183 \text{ miljoonaa kierrosta.}$$

Lasketaan laakerin nimelliskestoikä ajokilometreinä. Sijoitetaan laskettu nimelliskestoikä, pyörän dynaaminen vierintähalkaisija sekä välityssuhteiden arvot kaavaan 6:

$$L_{10s} = \frac{2,245m}{1\,000} \cdot 195\,799,1183 \text{ M kierr.} \cdot \left(\frac{1}{2,566 \cdot 4,300} \right) \approx 39,84 \text{ Mkm.}$$

Laskentojen perusteella laakeri on reilusti ylimitoitettu. Laakeri on kuitenkin pienin kyseisellä sisähalkaisijalla varustettu lieriörullalaakeri ja se täyttää muut laakerille asetetut vaatimukset kaikilta osin. Valitaan siis vapaaksi laakeriksi ehdotettu lieriörullalaakeri NU 1009 EC.

Kestoikälaskenta ajetaan läpi myös Autodesk Inventor -ohjelman laakerilaskentasovelluksella (kuva 14). Tulokset vastaavat aiemmin laskettuja tuloksia ja ohjelma ilmoittaa laakerin soveltuvaksi laskentakohteeseen.



KUVA 14. Vapaalle laakerille suoritettu kestoikälaskenta

3.4.2 Ohjaava laakeri

Koska lieriörullalaakerin ulkokehä asennetaan laippaan samasta päästä kuin ohjaava laakeri, urakuulalaakerin ulkohalkaisijan on oltava vähintään yhtä suuri

kuin vapaan laakerin ulkohalkaisija. Valitsemalla suuremmalla ulkohalkaisijalla oleva laakeri helpotetaan lieriörullalaakerin asennusta huomattavasti ja mahdollistetaan laakerien ulkokehien helppo tukeminen kehien väliin tulevan sovitteen avulla. Laakeriksi ensimmäiseen laskentaan valitaan urakuulalaakeri 6209/C3. Laakerin ominaisarvot ovat taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Urakuulalaakeri 6209/C3:n ominaisarvot (7, s. 190)

Urakuulalaakeri 6209/C3		
Ulkohalkaisija	D	85 mm
Leveys	B	19 mm
Dynaaminen kantavuusluku	C	33 200 N
Staattinen kantavuusluku	C_0	21 600 N
Väsymiskuormitusraja	P_u	915 N
Pyörimisnopeusraja, rasvavoitelu		7 500 r/min
Pyörimisnopeusraja, öljyvoitelu		9 000 r/min
Massa		0,41 kg

Akselille suoritetusta lujuustarkastelusta (taulukko 3) saadaan ohjaavalle laakerille laskentatilanteessa kohdistuvat voimat: ohjaavaan laakeriin kohdistuu radiaalivoima 521,1 N ja aksiaalivoima 392,4 N. Koska laakeriin kohdistuu yhdistetty kuormitus, täytyy ekvivalenttikuormitus laskea. Sijoitetaan kaavaan 4 kuormitusarvot ja taulukosta (taulukko 4) löytyvät kertoimet:

$$P = 0,56 \cdot 521,1 \text{ N} + 2 \cdot 392,4 \text{ N} = 1\,076,616 \text{ N}.$$

Sijoitetaan laakerin dynaaminen kantavuusluku sekä laskettu ekvivalenttikuormitus kaavaan 3:

$$L_{10} = \left(\frac{33\,200 \text{ N}}{1\,076,6 \text{ N}} \right)^{\frac{10}{3}} \approx 29\,324,57738 \text{ miljoonaa kierrosta}.$$

Lasketaan laakerin nimelliskestoikä ajokilometreinä. Sijoitetaan laskettu nimelliskestoikä, pyörän dynaaminen vierintähalkaisija sekä välityssuhteiden arvot kaavaan 6:

$$L_{10s} = \frac{2,245m}{1\ 000} \cdot 29\ 324,57738\ M\ kierr \cdot \left(\frac{1}{2,566 \cdot 4,300} \right) \approx 5,967\ Mkm.$$

Laskentojen perusteella myös ohjaava laakeri on reilusti ylimitoitettu. Laakeri on kuitenkin pienin ulkohalkaisijaltaan riittävän suurista laakereista ja se täyttää muut laakerille asetetut vaatimukset kaikilta osin. Valitaan siis ohjaavaksi laakeriksi ehdotettu urakuulalaakeri 6209/C3.

Myös ohjaavan laakerin kestoikälaskenta ajetaan läpi laakerilaskentasovelluksella (kuva 15). Tulokset vastaavat ohjaavan laakerin osalta aiemmin laskettuja tuloksia ja ohjelma ilmoittaa laakerin soveltuvaksi laskentakohteeseen.

The screenshot shows the 'Design Calculation' window for a bearing. The 'Type of Strength Calculation' is set to 'Check calculation'. The 'Loads' section includes Radial Load (Fr = 521,051), Axial Load (Fa = 392,4), and Speed (n = 4000). The 'Bearing Properties' section includes Nominal Contact Angle (alpha = 5 deg), Basic Dynamic Load Rating (C = 33200), Basic Static Load Rating (Co = 21600 N), Dynamic Radial Load Factor (X = 1,00 ul), Dynamic Axial Load Factor (Y = 0,00 ul), Limit value Fa/Fr (e = 0,40 ul), Static Radial Load Factor (X0 = 0,60 ul), Static Axial Load Factor (Y0 = 0,60 ul), Exponent for determining life (p = 3,00000 ul), Lim. Speed Lubrication Grease (nLim1 = 7500 rpm), and Lim. Speed Lubrication Oil (nLim2 = 9000 rpm). The 'Bearing Life Calculation' section is set to 'ANSI/AFBMA 9-1990 (ISO 281-1990) calculation method'. The 'Required Life' (Lreq) is 10000 hr, 'Required Reliability' (Rreq) is 90 ul, 'Special Bearing Properties Factor' (a2) is 1,00 ul, 'Operating Conditions Factor' (a3) is 1,00 ul, 'Working Temperature' (T) is 100 c, and 'Factor of Additional Forces' (fd) is 1,00 ul. The 'Results' section shows L10 = 122195 hr, Lna = 122195 hr, L10r = 29327 ul, Lnar = 29327 ul, s0c = 39,41098 ul, Pz = 15,21991 W, Fmin = 216 N, P0 = 548 N, P = 1077 N, kn = 1,875 ul, a1 = 1,00 ul, ft = 1,00 ul, ne = 4000 rpm, nmin = 4000 rpm, and nmax = 4000 rpm. The 'Bearing' section shows D = 85,000 mm, d = 45,000 mm, and B = 19,000 mm.

KUVA 15. Ohjaavalle laakerille suoritettu kestoikälaskenta

3.4.3 Voitelu ja tiivistys

Ohjaavana laakerina on huoltovapauden kannalta edullista käyttää molemminpuolisin suojalevyin varustettua laakeria. Tällaisessa laakerissa on teräksiset suojalevyt, jotka muodostavat pitkän tiivistysraon sisärenkaan vaippapinnan kanssa. Suojalevyin varustettu laakeri on kestovoideltu, eikä se tarvitse lisävoitelua elinkaarensa aikana. Koska suojalevyt eivät ole kosketuksissa laakerin sisäkehään, ei niillä ole vaikutusta laakerin pyörintänopeusrajoihin. (7, s. 177.)

Aksiaalisiirtymän sallivia lieriörullalaakereita ei suojalevyin ole saatavilla, joten asentajan tai käyttäjän on voideltava laakeri. Rasvan poistuminen laakerista on myös estettävä jotenkin. Tiivistys on helppoa ja edullista toteuttaa käyttäen säteisakselitiivisteitä akselin ja laipparungon välillä. Säteisakselitiivisteillä voidaan tehokkaasti estää sekä voiteluaineen pääsy pois laakereista että lian ja kosteuden pääseminen laakereihin. Säteisakselitiiviste on järkevää sijoittaa myös ohjaavalle laakerille, koska suojalevyin varustetut laakerit sopivat sellaisenaan lähinnä kohteisiin, joissa likaantuminen ei ole runsasta eikä ole vaaraa veden tai höyryn pääsystä laakeriin. (7, s. 142 - 143.)

Laakerin voitelurasvaa valittaessa tärkeimpiä tekijöitä ovat kiinteys, perusöljyn viskositeetti ja käyttölämpötila-alue. Laakerien käyttönopeus nousee välillä suureksi, joten alhaisen perusöljyn viskositeetin omaavat rasvat ovat sopivia. Käyttölämpötilan alaraja on noin $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, ylärajaa sen sijaan on vaikea arvioida. Kohteeseen kannattaakin valita rasva, jossa käyttölämpötila-alue on laaja ja alaraja on korkeintaan $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Soveltuva rasva on esimerkiksi Teboil Syntec Grease (liite 4), mutta myös muilta valmistajilta löytyy vastaavia rasvoja. (7, s. 150 - 151; 10, s. 163 - 165.)

3.5 Kannakkeen kiinnitys ajoneuvoon

Kannakkeen kiinnityksen ajoneuvoon täytyy olla riittävän tukeva, jotta se kestää siihen kohdistuvat rasitukset. Kiinnitys on helppo tehdä suoraan ajoneuvon alustassa olevaan tikapuupalkkirunkoon. Kannakkeen kiinnitys toteutetaan poikittaisella alumiinipalkilla, joka kiinnittyy kiinnityskorvakkein ajoneuvon runkoon. Ajoneuvon runkopalkkien sisäpuolella kulkevat myös etuakselin jousitukseen kuuluvat vääntösauvajouset, jotka rajoittavat osaltaan kiinnityskorvakkeiden ja kiinnityspalkin käyttöön jäävää tilaa. Alumiinipalkin profiilin ulkomitoiksi valitaan $40 \times 80\text{ mm}$, koska tämänkokoinen palkki mahtuu järkevästi vääntösauvajousien alapuolelle.

Alumiinipalkki täytyy kiinnittää tukevasti myös itse kannakkeeseen. Alumiinipalkin ja kannakkeen välinen kiinnitys on järkevää toteuttaa ruuviliitoksella sillä saavutettavan kasaus- ja purkuoperaation helppouden takia.

3.5.1 Tärinäneristys

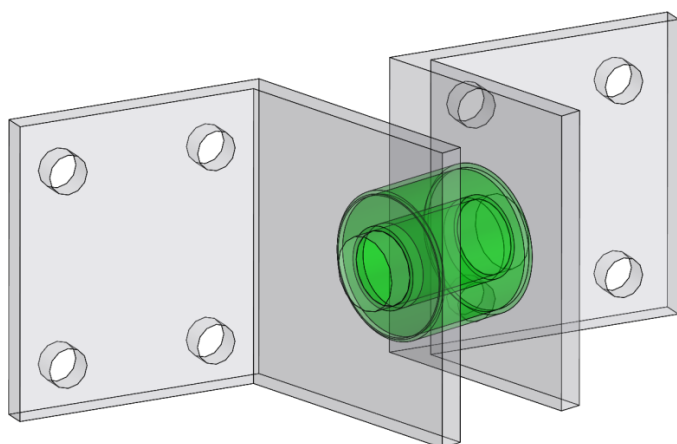
Roottorissa ja akselissa oleva mahdollinen epätasapaino aiheuttaa väistämättä jonkinasteista tärinää. Tärinä johtuu laakereiden kautta suoraan vaimentumattomana kannakkeeseen. Tärinän johtumista ajoneuvon runkoon on kuitenkin pyrittävä vähentämään, koska tärinä tuo ajoneuvon kyydissä olijoille epämiellyttävän tunteen.

Tärinän eristäminen ajoneuvon rungosta on helpointa toteuttaa alumiinipalkin ja kiinnityskorvakkeiden välisessä kiinnityksessä käytettävillä erillisillä kumipuslilla. Tällaisia puslia on saatavilla lukuisilla eri ulkomitoilla ja jäykkyyksillä. Trelleborgin valikoimasta löytyvät VP- ja UD-puslat on suunniteltu nimenomaan ajoneuvokäyttöön, esimerkiksi jousituksiin, tukivarsiin ja muihin mekaanisiin liitoksiin, joissa tarvitaan iskun-, tärinän- ja äänenvaimennusta. (Liite 5.)

Puslan koon valinta tehdään alumiinipalkin paksuuden perusteella. Valikoimasta (liite 5) löytyvällä puslalla VP 25/5045 on juuri palkkiin sopivat ulkomitat. Puslan ulkohalkaisija on 50 mm, sisähalkaisija 25 mm ja leveys 40/45 mm. Myös aksiaalinen 3 800 N ja radiaalinen 9 000 N kantavuus riittävät erinomaisesti.

3.5.2 Kiinnityskorvakkeet

Kannakkeen kiinnittävän alumiinipalkin kiinnitys ajoneuvoon toteutetaan runkopalkkeihin kiinnitettävien kiinnityskorvakkeiden avulla (kuva 16). Korvakkeet kiinnitetään runkopalkkeihin ruuviliitoksin.



KUVA 16. Kiinnityskorvakkeet ja tärinäneristyspusla

Korvakkeiden ja tärinäneristyspuslien välinen kiinnitys tapahtuu DIN 610-standardin mukaisilla M24 soviteruuveilla. Ruuvien päässä olevasta lyhyestä kierreosasta eteenpäin ruuvien paksuus on 25 mm, joka on juuri sopiva valittujen puslien sisäreikään.

3.6 Lujuustarkastelut

Rakenteisiin käytetyille materiaaleille on olemassa useita eri rajajännitysarvoja. Erityyppisissä rakenteissa ja kuormitustilanteissa käytetään sallitun jännityksen määrittämisessä eri rajajännityksiä. Useimmiten käytetään myötörajaa R_e tai murtorajaa R_m . (12, s. 2.1.2.)

Laskennan kohteena olevan kappaleen tai rakenteen muoto ja mitat ovat usein toimintakelpoisuuden kannalta tärkeitä, joten pysyviä muodonmuutoksia ei saa ilmetä. Tällöin sallitun jännityksen määrittämisessä käytetään myötörajaa tai vaihtoehtoisesti 0,2-rajaa $R_{p0,2}$. Mikäli tärkein mitoituksen lähtökohta on kappaleen kestäminen sille asetetun kuorman murtumatta, käytetään laskennassa murtorajaa. Murtorajan käyttäminen saattaa olla myös välttämätöntä, mikäli materiaalilla ei ole selvää myötörajaa. Näin saattaa käydä hauraiden ja todella kovien materiaalien kyseessä ollessa. (12, s. 2.1.2.)

Rakenteelle suoritetaan lujuustarkastelu käyttäen SolidWorks Simulation-työkalua, jonka laskentatapa perustuu FEM-elementtiverkkomenetelmään. Ohjelma tarjoaa hyvin kattavat työkalut rakenteen kuormituksenalaisen käyttäytymisen analysoimiseen. Laskennassa saatuja jännitysarvoja verrataan akselissa myötörajaan ja alumiiniosissa venymärajaan.

3.6.1 Laskennan lähtötiedot

Kaikkiin laskennassa mukana oleviin komponentteihin on kohdistettu pystysuunnassa (y-akseli) kolminkertainen maan vetovoima 3 g. Normaalia suuremmalla vetovoimalla kuvastetaan ajoneuvoon kohdistuvaa pystysuuntaista kiihtyvyyttä, joka saattaa syntyä ajoneuvon liikkuessa epätasaisella alustalla. Komponentteihin on kohdistettu myös ajoneuvon vauhdin hidastumista kuvastava pitkittäissuuntainen (z-akseli) kaksinkertainen maan vetovoima 2 g. Näin voima-

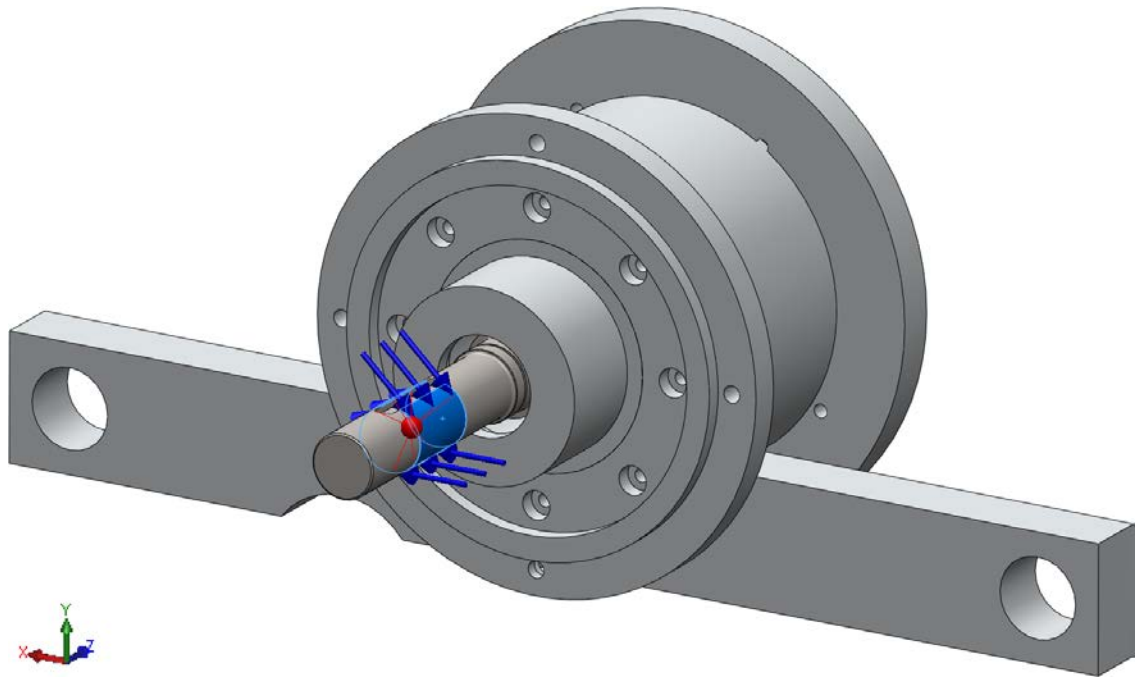
kas hidastuvuus on mahdollista saavuttaa ainoastaan ulkoisten voimien vaikutuksesta. Tällainen hidastuvuus saattaa esiintyä esimerkiksi lumiauran törmätyksessä johonkin kiinteään esteeseen lunta aurattaessa.

Laskennassa on huomioitava myös materiaalien ominaisuudet. SolidWorks -ohjelmasta löytyy valmiina kattava kirjasto erilaisista rakennemateriaaleista. Kirjastoa voidaan hyödyntää asetettaessa materiaaliominaisuuksia osille. Laskennassa käytetyt materiaalien ominaisarvot ovat taulukossa 7.

TAULUKKO 7. Laskennassa käytetyt materiaalien ominaisarvot

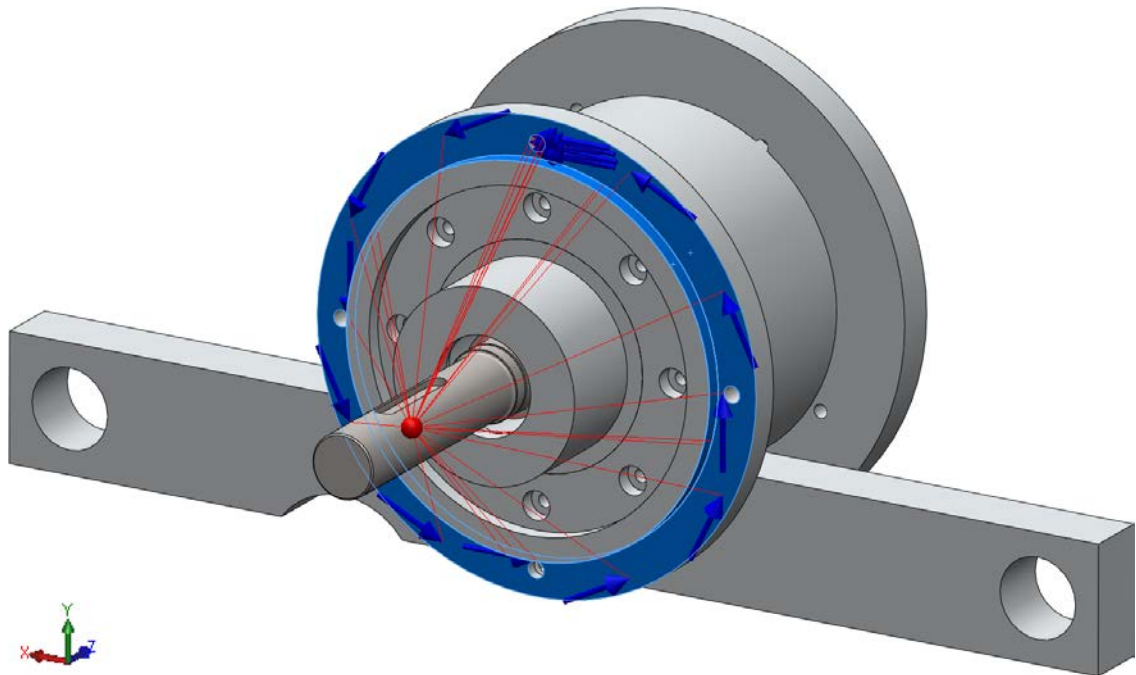
MATERIAALIEN OMINAISUUDET		
	Teräs	Alumiini
Kimmomoduuli, E	210 kN/mm ²	69 kN/mm ²
Poissonin luku, ν	0,28	0,33
Liukumoduuli, G	79 kN/mm ²	25,8 kN/mm ²
Tiheys, ρ	7 800 kg/m ³	2 700 kg/m ³
Murtolujuus, R_m	700 N/mm ²	240 N/mm ²
Myötölujuus, R_e	450 N/mm ²	215 N/mm ²

Akseliin, roottorin kiinnityskohtaan (kuva 17), asetetaan kohdistuvaksi 300 Nm:n vääntömomentti edestäpäin katsottuna myötöpäivään. Tällä kuvastetaan roottorin muodostamaa vääntömomenttia. Samaan kohtaan asetetaan kohdistuvaksi 20 kg:n massa, joka kuvastaa roottorin kiinnittymistä akseliin. Laskennassa massa otetaan huomioon kiihtyvyyden aiheuttamien voimien laskennassa. Roottorin mahdollinen epätasapaino tulee huomioiduksi laskennassa käytettävän normaalia suuremman vetovoiman seurauksena.



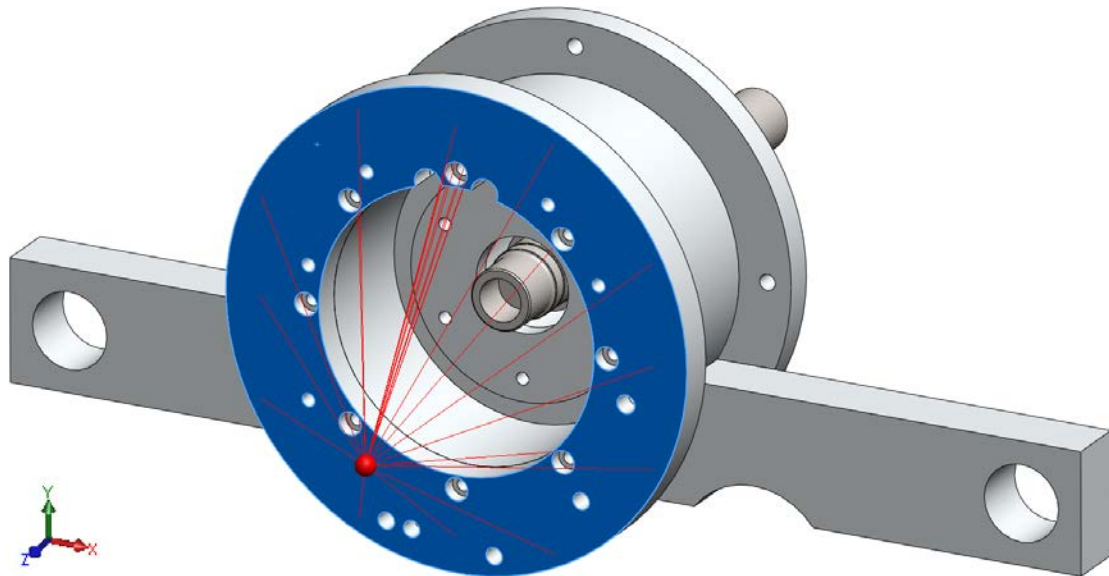
KUVA 17. Akseliin, roottorin kiinnityspintaan, kohdistuvat voimat

Moottorilaippaan (kuva 18) asetetaan kohdistuvaksi 300 Nm:n vääntömomentti edestäpäin katsottuna vastapäivään. Tällä kuvastetaan roottorin vääntömomentin vastavoimaa. Laippaan kohdistetaan myös staattoria kuvastava 62 kg:n massa, jonka sijainti määritellään staattorin massakeskipisteen mukaan.



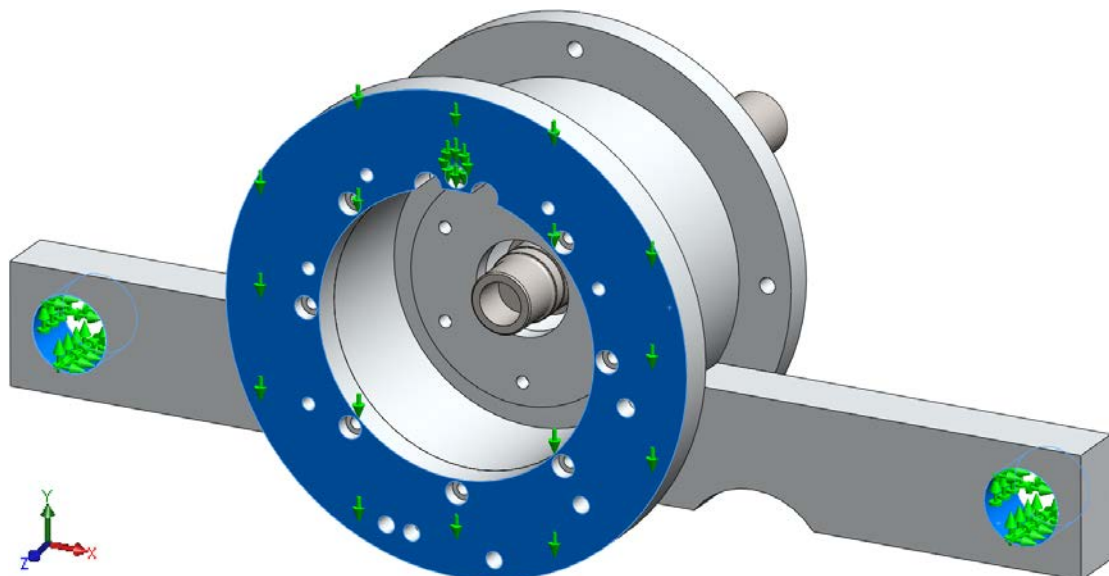
KUVA 18. Moottorilaippaan kohdistuvat voimat

Jakolaatikkolaippaan (kuva 19) asetetaan kohdistuvaksi jakovaihteistoa kuvaava 30 kg massa. Massan sijainti määrittää jakovaihteiston arvioitun massakeskipisteen mukaan.



KUVA 19. Jakovaihteiston kiinnityspintaan kohdistuvat voimat

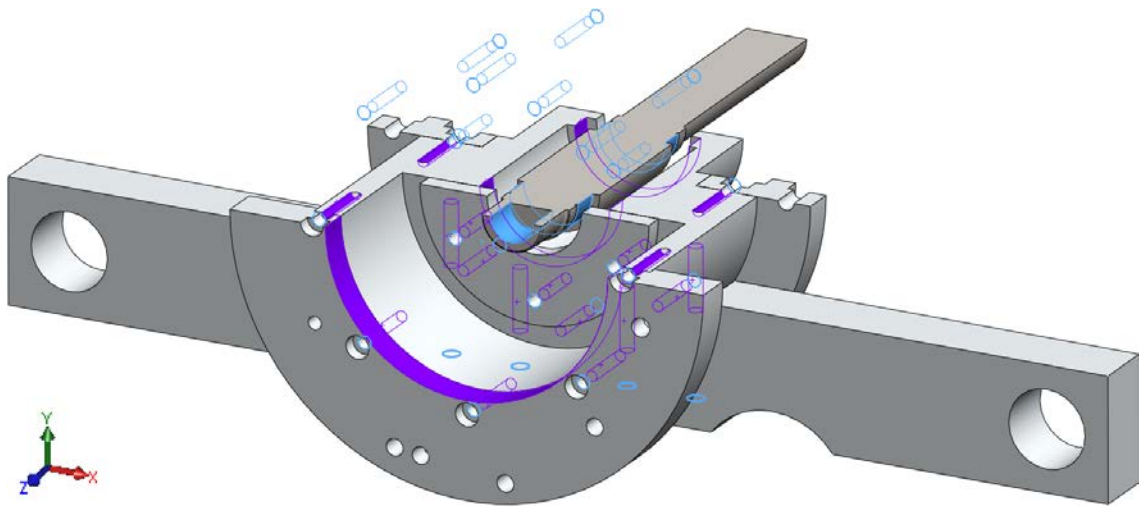
Tukipalkin kiinnitysreikiin (kuva 20) asetetaan kiinteät rajoitteet, joilla mallinetaan palkin kiinnittymistä ajoneuvon runkoon puslien kautta. Jakolaatikkolaippaan asetetaan rajoite, joka estää liikkeet pystysuunnassa, mutta sallii muut liikkeet. Tällä mallinetaan jakovaihteiston olemassa olevaa kiinnityspistettä.



KUVA 20. Rakenteen tuentapisteet ja -tyypit

Osien väliset kontaktit asetetaan laskentaa varten mahdollisimman totuudenmukaisesti. Kaikkien toisistaan erillisten osien välille asetetaan läpäisemättömyysehto, joka estää osien pintoja läpäisemästä toisiaan, mutta sallii osien irrota toisistaan. Läpäisemättömyysehdossa huomioidaan myös osien välinen kitka. Kitkakertoimen arvona käytetään anodisoiduille alumiinipinnoille ominaista arvoa 0,20.

Kaikki rakenteen ruuvit korvataan simulointia varten ruuviliitoksilla (kuva 21). Ruuviliitoksia määriteltäessä asetetaan ruuvin kannan halkaisija, kierteen nousu, ruuvin lujuus, esikivistysmomentti sekä kierteen ja perusaineen välinen kitkakerroin. Akselin ja laipparungon välille, akselin ja rungon laakeripintoihin (kuva 21), asetetaan laakeriliitokset. Laakeriliitokset sallivat akselin kiertymisen, mutta estävät aksiaali- ja radiaalisuuntaiset liikkeet. Laakerienpintojen itseasettuvedet asetetaan laakerityyppien vuoksi estetyiksi. Akselin kiertyminen estetään akselin pään ja jakolaatikolaipan välille asetettavalla kiertymisliikkeen estävällä karaliitoksella. Tämä kuvastaa vääntömomentin siirtymistä akselista jakovaihteistoon.



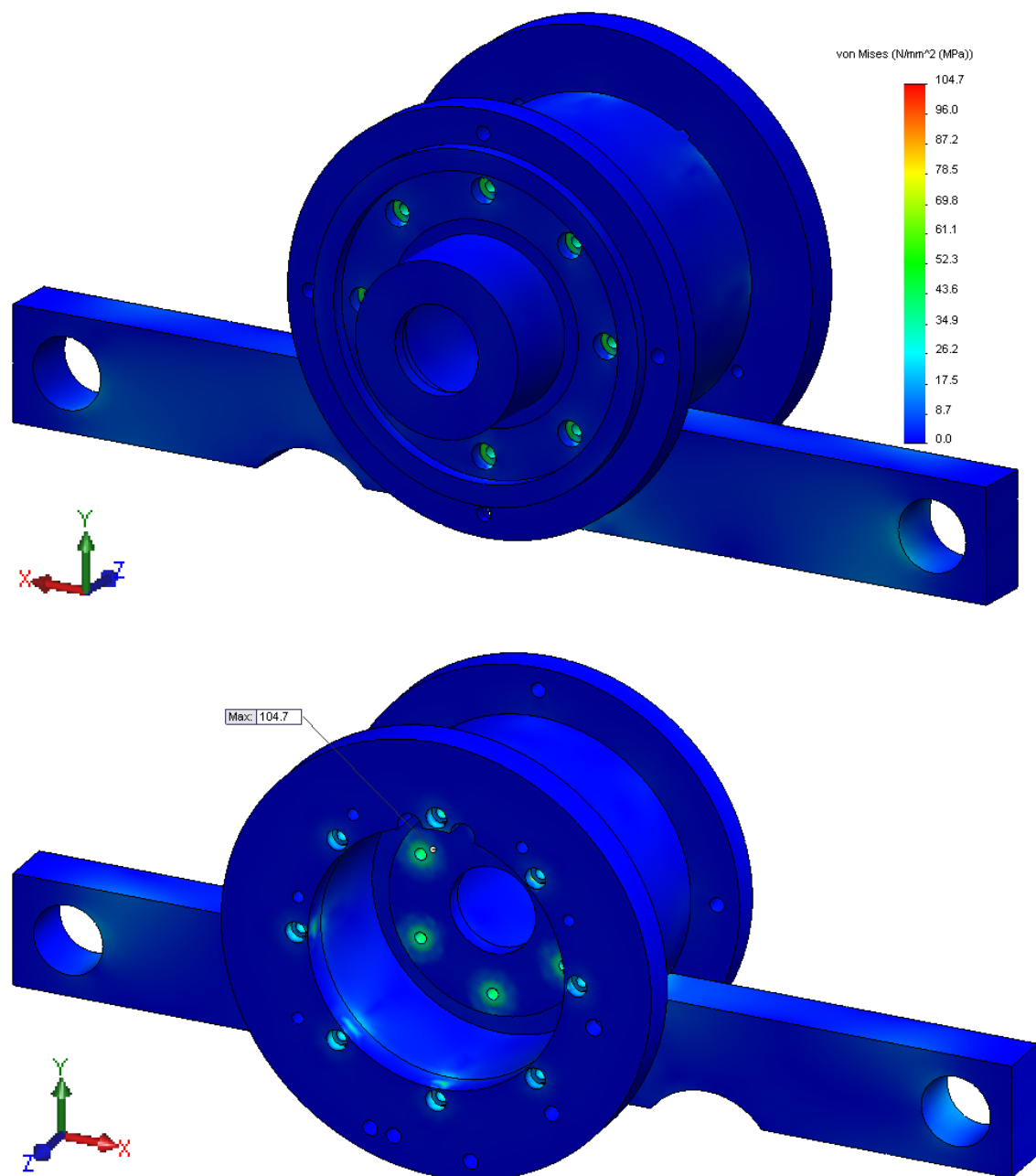
KUVA 21. Osien väliset liitokset

3.6.2 Laskentatulokset

Tuloksissa tarkastellaan kappaleisiin vaikuttavien voimien aiheuttamia Von Mises -jännityksiä sekä kappaleiden muodonmuutoksia. SolidWorks-ohjelmalla saadaan halutuista kokoonpanoista ja osista muodostettua kolmiulotteiset mal-

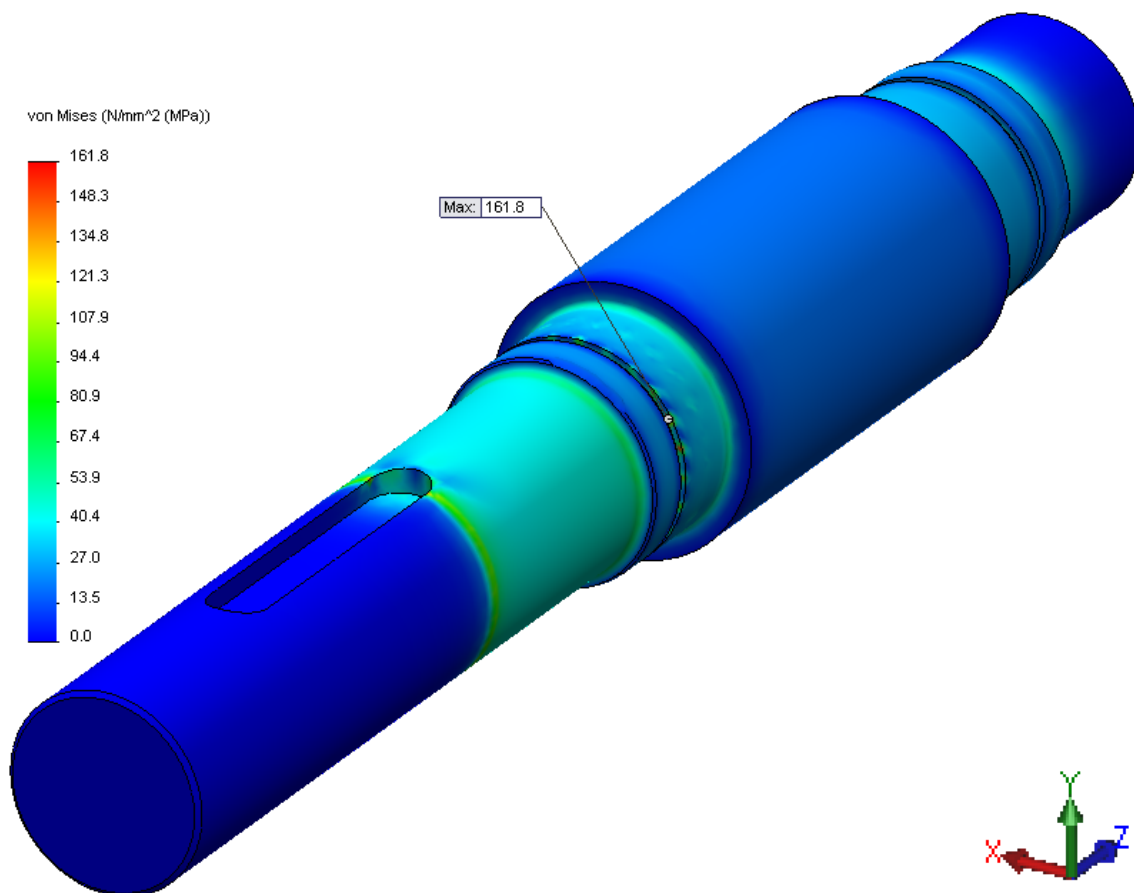
lit, joissa jännitykset näkyvät eri väreissä. Ohjelma kertoo myös rakenteen maksimijännityksen ja sen vaikutuspaikan.

Alumiiniseen runkorakenteeseen (kuva 22) vaikuttava maksimijännitys on suuruudeltaan $104,7 \text{ N/mm}^2$ ja se vaikuttaa ruuvireikien kierteiden juuressa. Laajemmalla alueella ruuvireikien ympäristössä vaikuttaa noin 50 N/mm^2 jännitys. Muualle laipparungon rakenteeseen vaikuttavat voimat ovat hyvin pieniä, suuruudeltaan 10 N/mm^2 .



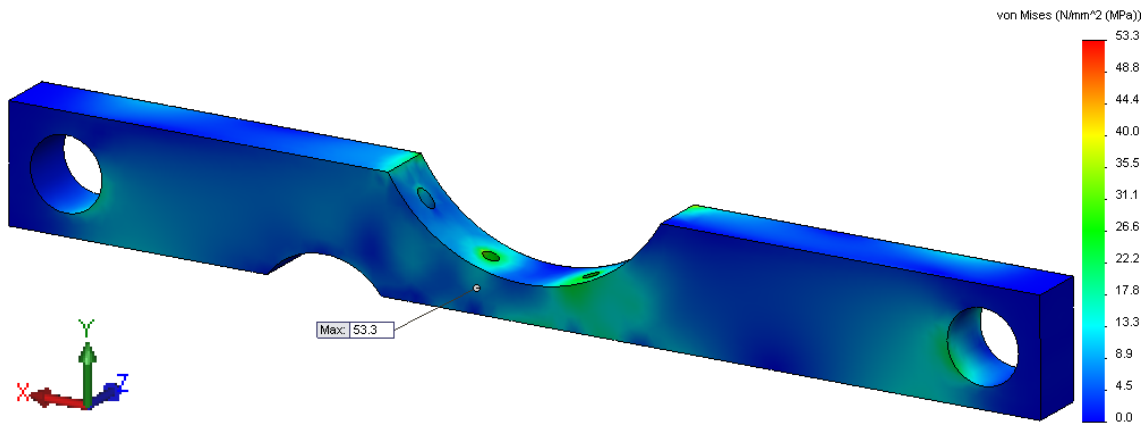
KUVA 22. Runkorakenteeseen kohdistuvat Von Mises -jännitykset

Akseliin (kuva 23) vaikuttava maksimijännitys on suuruudeltaan $161,8 \text{ N/mm}^2$, joka vaikuttaa roottoripäästä katsottuna ensimmäisen pidätinrengasuran kohdalla. Maksimijännitys vaikuttaa kuitenkin vain yhdessä pienessä pisteessä, joten kyseessä on todennäköisesti laskentavirhe. Yleisesti ottaen pidätinrengasuras-
sa vaikuttaa noin 100 N/mm^2 jännitys. Roottorin kiinnityskohdan reunassa vaikuttaa noin 100 N/mm^2 , ja ensimmäisessä halkaisijanmuutoskohdassa noin 90 N/mm^2 jännitys. Muualla akselissa jännitys jää alle 60 N/mm^2 .



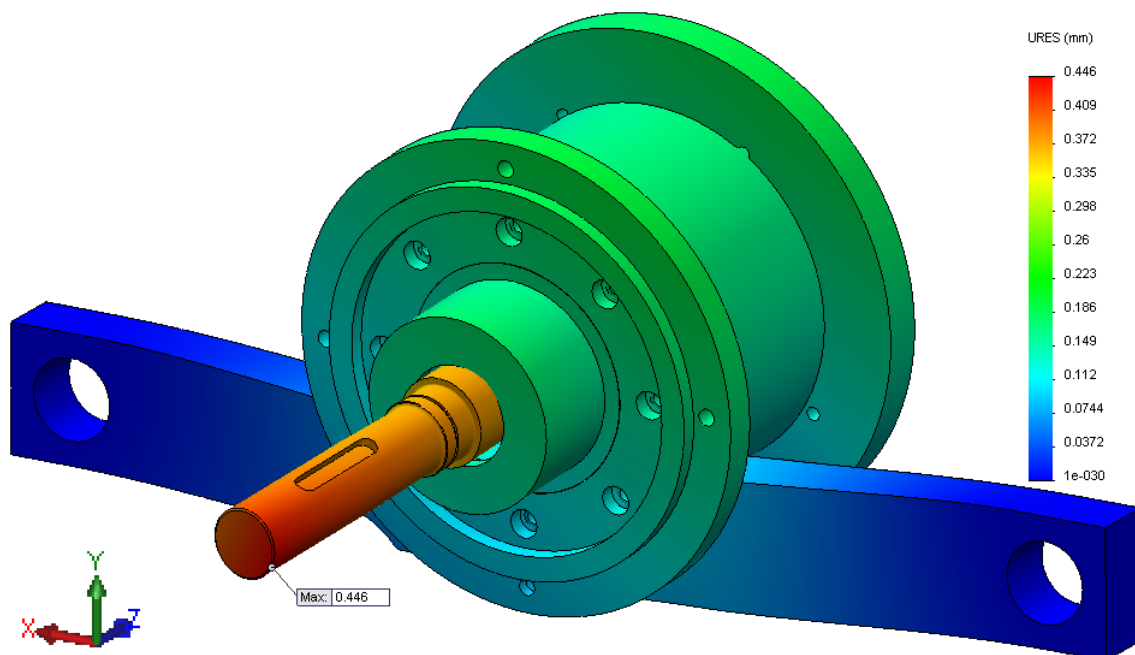
KUVA 23. Akseliin kohdistuvat Von Mises -jännitykset

Alumiiniseen runkopalkkiin (kuva 24) vaikuttaa maksimijännitys $53,3 \text{ N/mm}^2$, joka esiintyy ruuvireikien juurissa. Laipparungon kiinnittymiskohdan ympäristös-
sä vallitsee $15 - 30 \text{ N/mm}^2$ jännitys. Muualla palkissa jännitys jää alle 20 N/mm^2 .



KUVA 24. Runkopalkkiin kohdistuvat Von Mises -jännitykset

Rakenteen suurimmat siirtymät tapahtuvat akselissa (kuva 25). Erityisesti akselin pää kiertyy ympäri ja taipuu edestäpäin katsottuna alas vasemmalle. Maksimi siirtymä akselilla on 0,446 mm. Muualla rakenteessa siirtymät jäävät alle 0,25 mm.



KUVA 25. Rakenteen laskennalliset siirtymät

3.6.3 Johtopäätökset

Runkorakenteeseen vaikuttaa laskentatapauksessa suurimmillaan noin 105 N/mm² jännitys. Kyseinen jännitys sijaitsee ruuvikierteissä ja sen aiheuttaa

pääasiassa ruuvien esikivistys, eikä se näin ollen ole kannakkeen kuormituksesta riippuvainen. Esikivistys aiheuttaa jännitystä myös ruuvien ympärille. Muualla laipparakenteessa jännitykset ovat todella pieniä. Alumiiniosien murtolujuuden ollessa vähintään 270 N/mm² ja venymärajan vähintään 200 N/mm² jäävät jännitykset huomattavasti näiden alapuolelle ja osien voidaan todeta kestävän kuormitukset kaikissa normaalitilanteissa.

Runkopalkkiin vaikuttava 53,3 N/mm² jännitys on suoraan riippuvainen kuormituksesta. Varmuusluku kestävyydelle voidaan laskea kaavalla 7 (12, s. 2.3).

$$n = \frac{R}{\sigma} \quad \text{KAAVA 7}$$

R = jännitys, johon verrataan

σ = kuormituksen aiheuttama jännitys

Lasketaan runkopalkin kestävyuden varmuusluku materiaalin venymärajaan nähden. Sijoitetaan laskennassa saatu jännitys ja alumiinilevylle ilmoitettu venymäraja kaavaan 7:

$$n = \frac{245 \text{ N/mm}^2}{53,3 \text{ N/mm}^2} \approx 4,60.$$

Varmuusluku on melko suuri, mutta koska kaikki rakenteeseen kohdistuvat kuormitukset eivät tarkkaan ole tiedossa, ei varmuuslukua kannata palkin mittoja tai materiaalia muuttamalla lähteä alentamaan. Palkin osuus kannakkeen kokonaismassasta on pieni, joten suurehko varmuusluku ei sinällään haittaa.

Akseliin vaikuttaa pistemäistä jännityshuippua pidätinrengasurassa huomioon ottamatta suurimmillaan noin 100 N/mm² jännitys. Jännitys vaikuttaa kartioholkin kiinnittymiskohdan reunassa. Lasketaan akselin staattisen kestävyuden varmuusluku sijoittamalla laskennassa saatu jännitys ja nuorrutusteräkselle ilmoitettu myötölujuus kaavaan 7:

$$n = \frac{450 \text{ N/mm}^2}{100 \text{ N/mm}^2} \approx 4,50.$$

Akseli kestää staattiset kuormitukset noin 4,5-kertaisella varmuudella, mutta akseliin kohdistuva kuormitus on luonteeltaan väsyttävää. Sähkömoottori kuitenkin pyörii harvoin suurilla nopeuksilla, eikä maksimivääntömomenttia käytetä kuin harvoissa tilanteissa. Tien epätasaisuudesta johtuvat pystysuuntaiset kiihtyvyydet ovat myös käytännössä aina pienempiä kuin laskennassa käytetyt arvot, joten akselin oletetaan kestävänsä nämä harvoin toistuvat jännityshuiput ongelmitta. Mikäli akselin elinkaari halutaan määrittää tarkasti, tulee akselille suorittaa kattavat väsymislukuuslaskennat. Tämä on kuitenkin niin suuritöinen prosessi, että sitä ei tähän työhön sisällytetä.

Rakenteen siirtymät pysyvät kuormitettaessa pieninä. Suurin 0,446 mm siirtymä tapahtuu akselin roottoripäässä. Vaikka siirtymässä on mukana myös kannakerungon jousto, pysyy akselin pään siirtymä moottorin ilmavälin asettamissa rajoissa. Akselin taipumaa ei näin ollen ole tarpeen tarkastella tarkemmin.

4 KANNAKKEEN ASENNUSTYÖ

Suunnittelussa laadittujen mallien ja piirustusten perusteella osat valmistutettiin Teollisuuden Monipalvelu TMP Oy:ssä Limingassa. Osien valmistuksessa kului tilauksesta toimitukseen aikaa noin kuukausi. Osien valmistuttua kannake koottiin.

Ajoneuvoon asennettiin aluksi ilmajäähdysteinen moottori, koska nestejäähdytteinen tarkoitukseemme suunniteltu moottori ei ollut tuolloin vielä valmis. Ilmajäähdysteinen moottori oli kuitenkin mitoiltaan vastaava, joten sopivuus ajoneuvoon päästiin varmistamaan jo tässä vaiheessa. Ilmajäähdysteisellä moottorilla suoritettiin myös pienimuotoisia koeajoja ja kannakkeen todettiin toimivan ongelmitta. Nestejäähdytetyn moottorin valmistuttua se asennettiin ajoneuvoon. Väliaikaiseen ilmajäähdytettyyn moottoriin ei tässä työssä paneuduta tarkemmin.

4.1 Kannakkeen kokoaminen

Ennen kannakkeen kokoamisen aloittamista osat (kuva 25) tarkastettiin silmämääräisesti. Osien pinnanlaatu todettiin hyväksi ja kaikki suunnitellut piirteet löytyivät osista. Mittoja ei mittavälinein todennettu. Sovittein toisiinsa asetettujen osien keskinäinen sopivuus varmistettiin ja todennettiin jakolaatikkolaipan reikien sopivuus jakovaihteistoon. Tarvittavat standardiosat hankittiin Tullin Pultista, ETRAlta ja Pametolta Oulun Limingantullista. Akseli tasapainotutettiin vielä moottorivalmistaja Randaxilla yhdessä sähkömoottorin roottorin kanssa. Näin pyrittiin minimoimaan mahdolliset epätasapainon aiheuttamat värähtelyt.



KUVA 26. Osat valmiina rakenteen kokoonpanoa varten

Kannake koottiin aiemmin laaditun kokoamisohjeen perusteella (liite 3). Kokoaminen sujui pääosin ongelmitta. Staattorilaipan olakkeen reunaan jouduttiin viilaamaan viiste istuvuuden parantamiseksi.

Laakerien asennukset tehtiin jäähdyttämällä ja lämmittämällä osia tarpeen mukaan vaadittavan laajentumisen tai supistumisen aikaansaamiseksi. Vapaan laakerin voiteluun käytettiin Würth Voiteluvaseeliini III:a, joka vastaa ominaisuuksiltaan aiemmin ehdotettua Teboil Syntec Greasea.

Tärinäneristyspuslat asennettiin kiinnityspalkkiin prässillä. Kaikkiin ruuvikierteisiin lisättiin ruuvilukitetta auki kiertymisen estämiseksi ja kiristys tehtiin annettujen ohjemomenttien mukaisesti. Koottu kannake (kuva 27) tarkastettiin vielä silmämääräisesti ja todettiin akselin pyörivän vapaasti ja tasaisesti.



KUVA 27. Rakenne koottuna

Kannakkeen kokoamisen jälkeen kiinnitettiin sähkömoottori kannakkeeseen. Aluksi käytössä oli ilmajäähdytteinen moottori, joka vaihtui myöhemmin nestejäähdytteiseen moottoriin.

Moottorin asennusvaiheessa roottori oli staattorin sisällä metallisauvoilla tuettuna. Roottori oli asennusvaiheessa ilman roottorin kiinnittävää kartioholkkia. Staattori asennettiin kannakkeeseen, jolloin roottori siirtyi akselille. Kartioholkki asennettiin roottoriin staattorin takapäessä olevasta luukusta. Luukku suljettiin ja tulpattiin roottorin tukemiseen käytettyjen sauvojen reiät.

Moottorin asennuksen jälkeen kiinnitettiin kannakkeeseen jakovaihteisto. Tämä tapahtui liu'uttamalla akselien uritukset sisäkkäin ja kiinnittämällä jakovaihteiston ja kannakkeen väliset ruuvit, minkä jälkeen moottorikokonaisuus oli koossa (kuva 28).



KUVA 28. Moottorikokonaisuus koottuna

4.2 Kokonaisuuden asennus ajoneuvoon

Sähkömoottorin, kannakkeen ja jakolaatikon asennus ajoneuvoon aloitettiin nostamalla kokonaisuus jalalla pumpattavan vaihteistonosturin päälle. Kokonaisuus siirrettiin ajoneuvonosturilla olevan ajoneuvon alapuolelle, ja nostettiin paikalleen runkopalkkien väliin. Jakovaihteiston kiinnityspalkki kiinnitettiin ajoneuvoon, jotta rakenne saatiin oikealle paikalleen.

Kiinnityskorvakkeet (kuva 29) valmistettiin hyödyntäen kannakkeesta ja runkopalkkeista mitattuja kulmia ja mittoja. Materiaalina käytettiin S355 teräslattaa, paksuudeltaan 8 mm. Korvakkeita muokattiin ja kulmaa hienosäädettiin, kunnes istuvuus kannakkeeseen ja runkopalkkeihin oli riittävän hyvä. Jakovaihteiston kiinnityspalkki irrotettiin ja laskettiin kokonaisuus alas. Korvakkeisiin porattiin reiät puslaan ja runkopalkkiin kiinnittämistä varten ja maalattiin valmiit korvakkeet. Korvakkeet kiinnitettiin maalaamisen jälkeen ajoneuvon runkopalkkeihin pitkillä M12 ruuveilla.



KUVA 29. Kiinnityskorvakkeet asennettuina

Vaihteistonosturilla nostettiin moottorikokonaisuus takaisin runkopalkkien väliin ja kiinnitettiin palkki korvakkeisiin soviteruuveilla. Jakovaihteiston kiinnityspalkki kiinnitettiin myös paikoilleen. Moottori saatiin asettumaan hyvin ajoneuvon rakenteisiin nähden (kuva 30). Lopuksi asennettiin vielä kardana akselit jakovaihteiston ja tasauspyörästöjen välille sekä tehtiin tarvittavat sähkökytkennät ja yhdistettiin ajoneuvossa jo olemassa olleet jäähdytysnestelinjat sähkömoottorin liitäntöihin.



KUVA 30. Moottorikonaisuus asennettuna ajoneuvoon

5 JÄRJESTELMÄN KOEKÄYTTÖ

Kaikkien projektin osa-alueiden valmistuttua ajoneuvolla suoritettiin kattavat koeajot, joissa tarkasteltiin eri osa-alueiden toimintaa. Sähkömoottorin kiinnitys-järjestelmässä ei ilmennyt ongelmia ja kaikki toimi kuten pitikin. Kannakkeen ja moottorin umpinaisten rakenteiden vuoksi toiminnan tarkastelu on kuitenkin hyvin vaikeaa ja tuloksia rakenteen kestästä ja esimerkiksi laakerien kulumisesta on mahdollista saada vasta pitkällä aikavälillä.

Raportin kirjoittamishetkellä ajoneuvo on päivittäisessä käytössä tarkoituksenmukaisessa tehtävässään Oulun teknisellä liikelaitoksella. Ajoneuvo on varustettu tiedonkeruulaittein, jotka tallentavat jatkuvasti tietoa erilaisista suureista myöhempää tarkastelua varten. Moottorista tiedonkeruuseen tallentuvat muun muassa vääntömomentti, kierrosnopeus ja lämpötilatiedot.

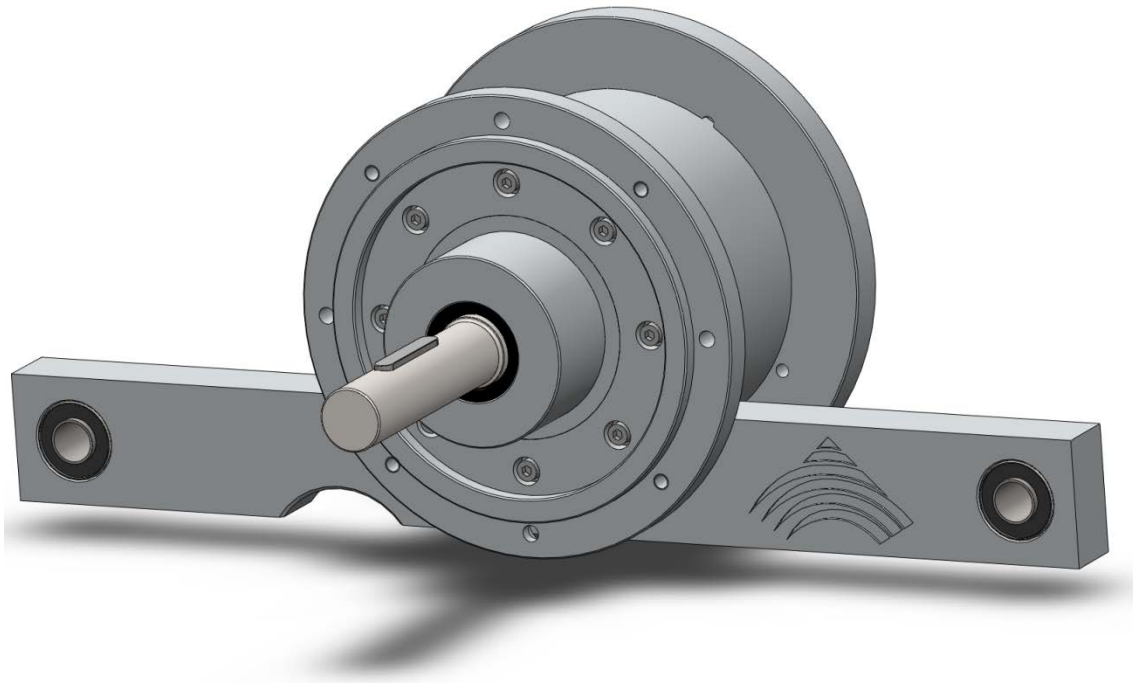
Tiedonkeruulaitteistolla ajoneuvosta saadaan jatkokehityksen kannalta tärkeää mittausdataa. Itse kannakkeen toimintaa ei suoranaisesti päästä tarkastelemaan, mutta moottorista tallentuvien tietojen perusteella voidaan joitain päätelmiä kannakkeen kunnosta tehdä. Vasta purkamalla kannake osiin päästään tarkastelemaan rakenteissa mahdollisesti tapahtuneita muutoksia ja esimerkiksi laakerien kuluneisuutta.

6 TULOKSET

Opinnäytetyössä tehdyn suunnittelutyön tuloksena saatiin sähkömoottorin kiinnitys- ja tuentaratkaisu Hilux-sähköautoprojektiin. Perustana suunnittelutyölle toimivat sähkömoottorin ja sijoituskohteen asettamat ehdot ja näistä laadittu vaatimuslista. Rakenteeseen käytössä kohdistuvien voimien perusteella mitoitettiin rakenne elementtimenetelmäpohjaista lujuuslaskentaa käyttäen. Erilaisia peruseriaatteiltaan yhteneväisiä rakennevaihtoehtoja pohdittiin työn edetessä. Parhaaksi katsotun vaihtoehdon pohjalta suunnittelutyötä jatkettiin aina valmiiseen tuotteeseen saakka.

Rakenteen ideointi aloitettiin mallintamalla sähkömoottori sekä ajoneuvon jakovaihteisto ja alustarakenne moottorin tulevan sijoituskohteen ympäriltä. Mallinnettuja rakenteita apuna käyttäen hahmoteltiin kannakkeen peruseriaate. Kannakkeen valmistusmateriaalit valittiin vaatimuslistalla esitettyjen ehtojen perusteella.

Työn edetessä mallinnettiin kannake kokonaisuudessaan sekä tarkennettiin ajoneuvon ja moottorin mallinnuksia. Kannakkeeseen tehtiin mallinnetun rakenteen ja lujuusanalyysien perusteella lukuisia muutoksia ja lopulliseen rakenteeseen päädyttiin pitkän ja huolellisen suunnitteluprosessin kautta. Lopullinen rakenne (kuva 31) on kokonaisuudessaan onnistunut ja täyttää vaatimukset kaikilta osin. Rakenteen keveys on vaatimuksena luonteeltaan suhteellinen ja näin ollen vaatimusta ei voi varsinaisesti täyttää. Rakenteen keveyden ja jäykkyyden välinen tasapaino on kuitenkin riittävä.



KUVA 31. Suunnitellun kannakkeen lopullinen versio

Osista ja kokoonpanosta laadittiin työ- ja kokoonpanopiirustukset (liite 2) sekä rakenteen kokoamisohje (liite 3). Osat valmistutettiin piirustusten pohjalta ja rakenne saatiin koottua ja kiinnitettyä kohdeajoneuvoon. Koeajojen perusteella kannake suoriutui tehtävästään hyvin. Kannake saatiin koekäyttöön varsinaiseen tehtäväänsä, mutta tuloksia kannakkeen koekäytöstä ei kuitenkaan saatu raporttiin mukaan.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli ideoida ja suunnitella kiinnitysjärjestelmä sähkömoottorille. Kiinnityslaitteelle määritelty tehtävä oli kiinnittää sähkömoottorin erilliset staattori ja roottori riittävän tukevasti ajoneuvoon ja siirtää sähkömoottorin tuottama vääntömomentti ajoneuvon voimansiirtojärjestelmään. Sähkömoottorilla korvattiin ajoneuvon alkuperäinen dieselmoottori.

Suunnittelutyössä edettiin johdonmukaisesti tehtävän määrittelystä aina lopulliseen ratkaisuun saakka. Kiinnityslaitteelta vaadituista ominaisuuksista muodostettiin vaatimuslista, jonka perusteella kannakkeen kehittäminen aloitettiin. Kannakkeesta muodostettiin aluksi karkea rakennemalli, jota apuna käyttäen suunniteltiin toimiva kannakeratkaisu Hilux-sähköautoprojektiin.

Suunnittelutyö sujui kokonaisuudessaan hyvin. Lujuuslaskennat saatiin suoritettua onnistuneesti ja tulokset vaikuttivat uskottavilta. Teoreettisilla laskelmilla ei kuitenkaan koskaan päästä absoluuttiseen totuuteen, mutta varmuuskerrointen valossa voidaan uskoa rakenteen kestävän siihen kohdistuvat kuormitukset. Piirustukset (liite 2) saatiin laadittua valmiiksi ajallaan ja kannake saatiin nopeasti valmistettavaksi. Kannakkeelle laadittiin myös kokoamisohje (liite 3).

Yhtenä työn alkuperäisen suunnitelman osa-alueena oli värähtelytarkastelun suorittaminen rakenteelle. Värähtelymittauksia ei kuitenkaan ehditty työn aikarajoissa tekemään. Työn lopullinen laajuus kuitenkin yllätti, vaikka värähtelytarkastelut jäivätkin työstä kokonaan pois.

Työn tulokset antavat hyvän pohjan kannakkeen jatkokehittämiselle. Kannaketta voidaan esimerkiksi keventää entisestään määrittelemällä tarkemmin kannakkeeseen kohdistuvat kuormitukset tiedonkeruulaitteistosta saatavan datan perusteella ja suorittamalla lujuustarkastelut käyttäen todellisia kuormitusarvoja. Myös akselia voidaan kehittää ja akselin elinkaarta arvioida tarkemmin väsymislujuuslaskennan avulla.

Tiedonkeruulaitteistoon voidaan tulevaisuudessa sisällyttää kiihtyvyyssanturit, jotta saadaan tieto impulsiivisista liike- ja voimaherätteistä. Kiinnityspalkissa

käytön aikana tapahtuvia muodonmuutoksia voidaan puolestaan analysoida palkkiin asennettavien venymäliuskojen avulla.

Työprosessi on ollut kokonaisuudessaan erittäin opettavainen ja antoisa. Suunnittelutyön ja dokumentoinnin saattaminen lopulliseen muotoonsa on sisältänyt paljon työtä. Ongelmanratkaisukykyä ja ideointitaitoja on työssä päässyt hyvin hyödyntämään ja kehittämään. Myös teknillisen piirustuksen taito on kehittynyt huomattavasti.

LÄHTEET

1. Airila, Mauri – Ekman, Kalevi – Hautala, Pekka – Kivioja, Seppo – Kleimola, Matti – Martikka, Heikki – Miettinen, Juha – Niemi, Erkki – Ranta, Aarno – Rinkinen, Jari – Salonen, Pekka – Verho, Arto – Vilenius, Matti – Välimaa, Veikko 1997. Koneenosien suunnittelu. 2. tarkistettu painos. Porvoo: WSOY.
2. Koivisto, Kaarlo – Laitinen, Esko – Niinimäki, Matti – Tiainen, Tuomo – Tiilikka, Pentti – Tuomikoski, Juho 2004. Konetekniikan materiaalioppi. 10. painos. Helsinki: Edita Prima Oy.
3. Jälkikäsittelytekniikka. 2010. ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN_jalkikasittely_I.pdf. Hakupäivä 20.3.2013.
4. Ovako Imatra Oy Ab. 2013. Turenjin teräspalvelukeskus, varastoluettelo. Saatavissa: http://www.ovako.com/Global/Downloads/Product_information/Bar_products/FI/Turenki%20Steel%20Service%20Center%20Varastoluettelo%202013.pdf. Hakupäivä 20.3.2013.
5. Alumeco Finland Oy. Saatavissa: <http://www.alumeco.fi>. Hakupäivä 21.3.2013.
6. Valtanen, Esko 2002. Tekniikan taulukkokirja. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
7. SKF laakerikirja. 1991. Torino: Stamperia Artistica Nazionale.
8. The design of rolling bearing mountings (WL 00 200/5 EA). 2000. Schweinfurt: FAG OEM und Handel AG.
9. Teboil. Oikea rasva kaikkiin käyttökohteisiin. Saatavissa: <http://www.teboil.fi/attachment.asp?path=1;1510;1503;7437;7507;7567>. Hakupäivä 16.2.2013.

10. Blom, Seppo – Lahtinen, Pekka – Nuutio, Erkki – Pekkola, Kari – Pyy, Seppo – Rautiainen, Hannu – Sampo, Arto – Seppänen, Pekka - Suosara, Eero 2006. Koneenelimet ja mekanismit. 5. - 6. painos. Helsinki: Edita Prima Oy.
11. Industrial product catalogue. 2010. Trelleborg. Saatavissa:
<http://www.trelleborg.com/upload/IndAVS/Files/Full%20catalogs/Industrial%20Catalogue%202009.pdf>. Hakupäivä 16.2.2013.
12. Saarineva, Jarmo 1995. Lujuusoppi, peruskurssi. Tampere: Pressus Oy.

LÄHTÖTIETOMUISTIO

Tekijä¹ Juuso Turunen

Tilaaaja² Randax Oy

Tilaaajan yhdyshenkilö ja yhteystiedot³ Timo Schäfer, Konetie 33, 90620 OULU

Työn nimi⁴ Sähkömoottorin kiinnitys ja tuenta Hilux-sähköautoprojektissa

Työn kuvaus⁵ Työssä suunnitellaan sähkömoottorikokonaisuudelle kiinnitys-/tuentajärjestelmä. Valmiille rakenteelle suoritetaan käytönaikaisia värähtelymittauksia.

Työn tavoitteet⁶ Tavoitteena on suunnittelun kautta tuottaa kiinnitys-/tuentajärjestelmä sähkömoottorikokonaisuudelle. Tavoitteena on suorittaa kokoonpanolle (suunniteltu kiinnitysjärjestelmä + moottori) värähtelyanalyysi teoreettisten laskelmien sekä värähtelymittausten avulla.

Tavoiteaikataulu⁷ Opinnäytetyö aloitetaan tammikuussa 2012.

Suunnittelutyö on tarkoitus saada valmiiksi huhtikuun 2012 puoleenväliin mennessä.

Värähtelymittaukset on tarkoitus aloittaa heti tarvittavien komponenttien valmistuttua.

Lopullinen dokumentaatio on tarkoitus saada valmiiksi joulukuun 2012 mennessä.

Päiväys ja allekirjoitukset⁸ _____

¹ Tekijän nimi, puhelinnumero ja sähköpostiosoite.

² Työn teettävän yrityksen virallinen nimi.

³ Sen henkilön nimi ja yhteystiedot, joka yrityksessä valvoo työn suoritusta.

⁴ Työn nimi voi olla tässä vaiheessa työnimi, jota myöhemmin tarkennetaan.

⁵ Työ kuvataan lyhyesti. Siinä esitetään muun muassa työn tausta, lähtötilanne ja työssä ratkaistavat ongelmat.

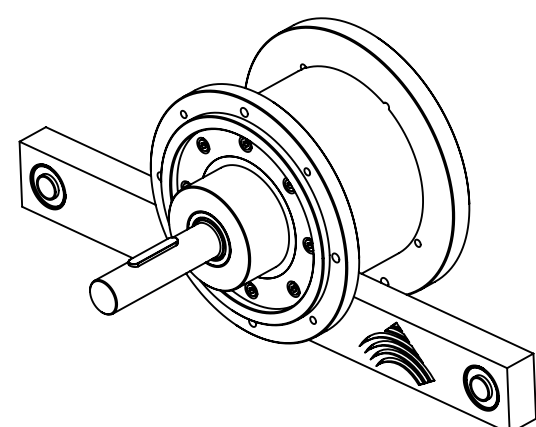
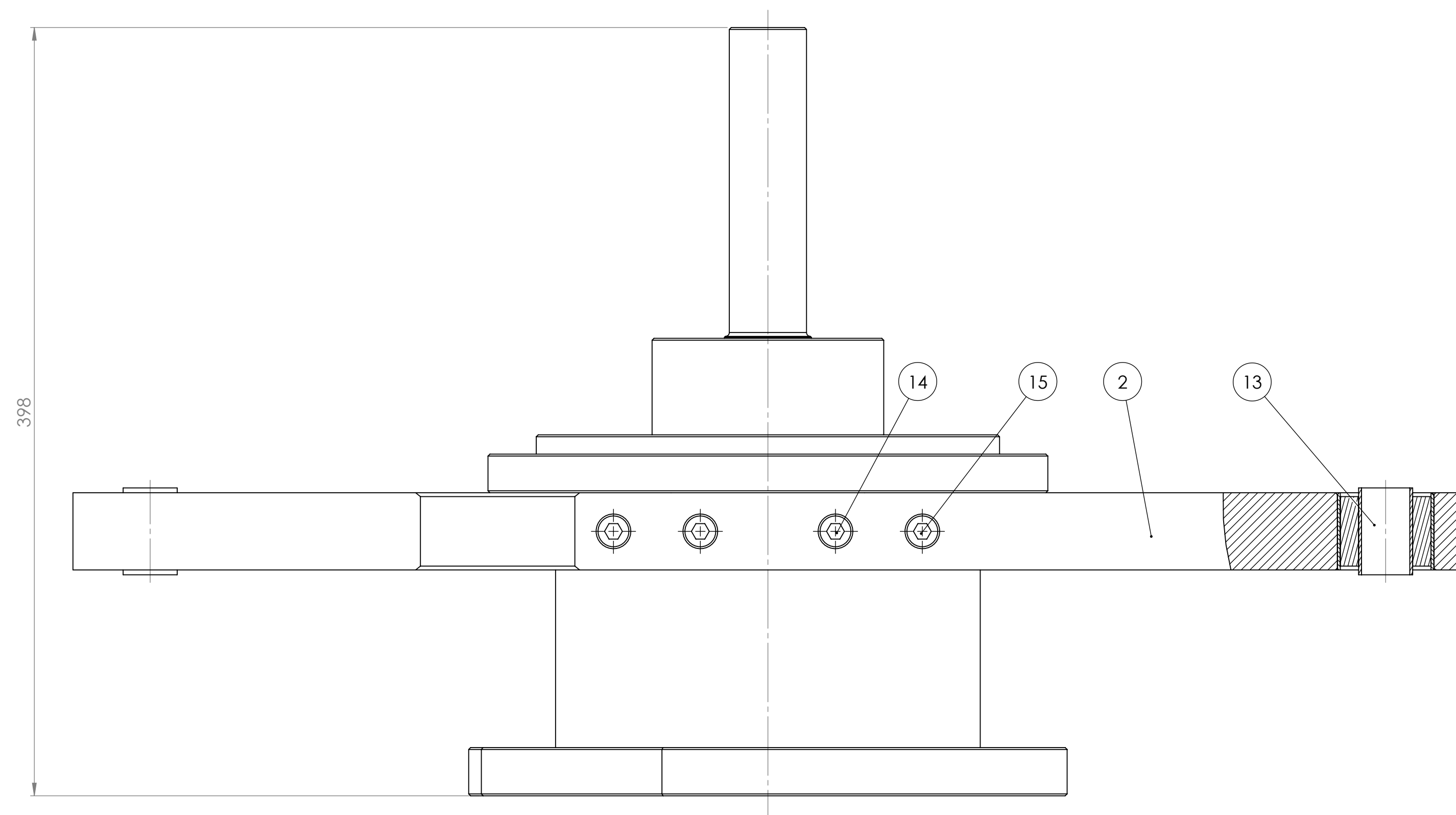
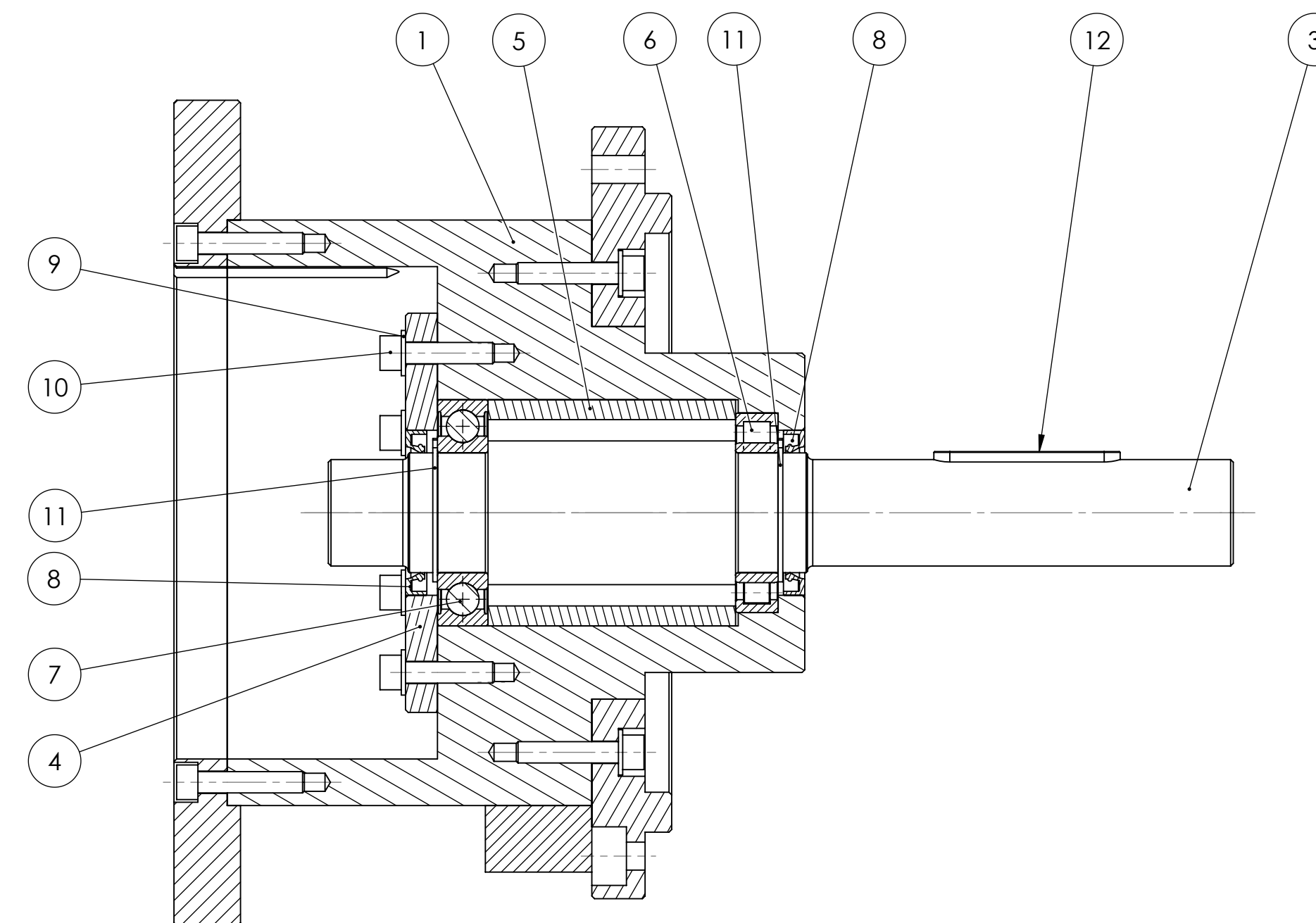
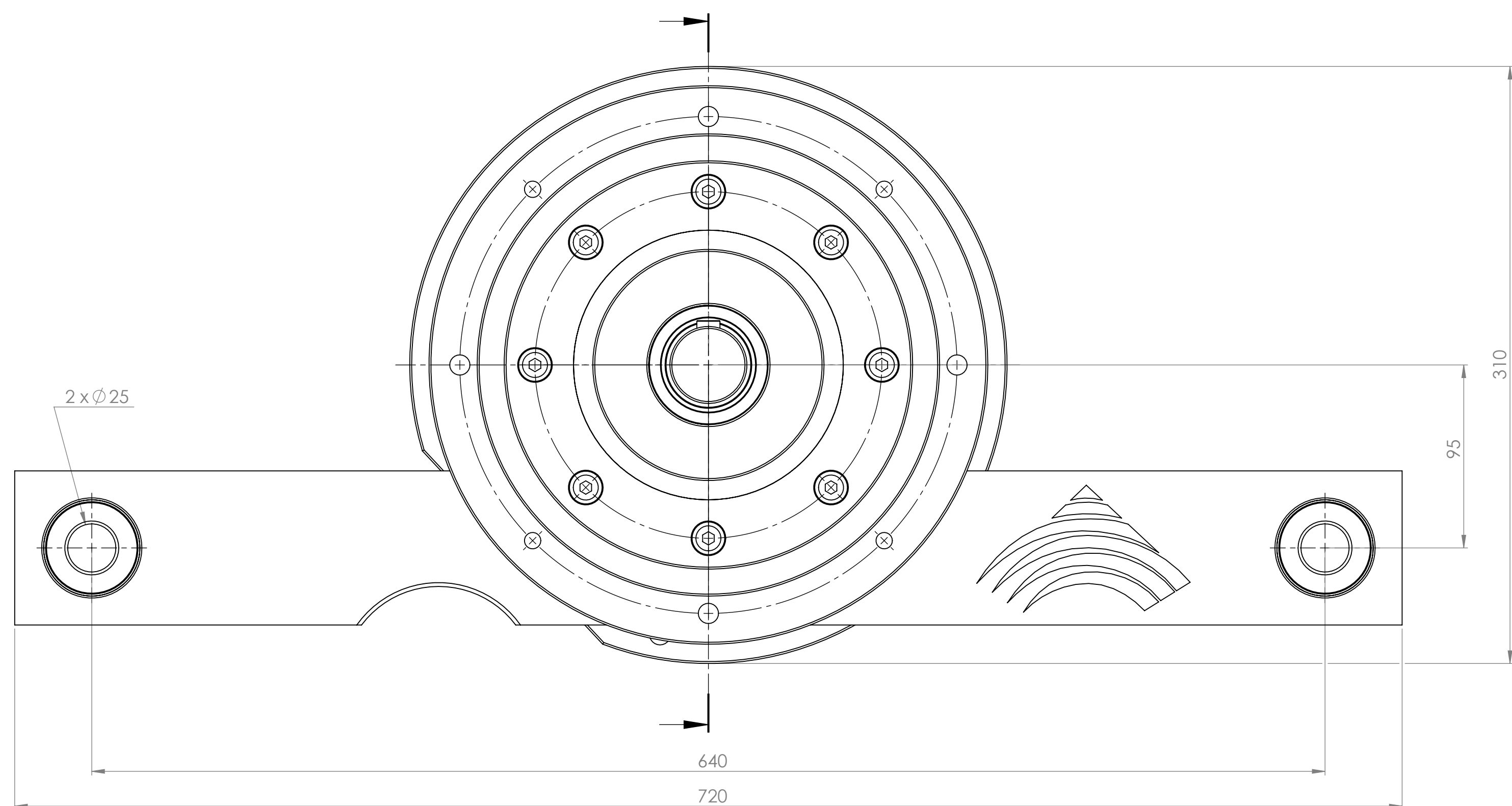
⁶ Esitetään lyhyesti ja selvästi työn tavoitteet.

⁷ Esitetään projektin tavoiteaikataulu. Silloin, kun työllä on välitavoitteita, myös ne merkitään aikatauluun. Tavoiteaikataulun ja oppilaitoksen yleisaikataulun perusteella tekijä laatii oman aikataulunsa.

⁸ Lähtötietomuiستio päivätään ja sen allekirjoittavat tekijä ja tilaaajan yhdyshenkilö.

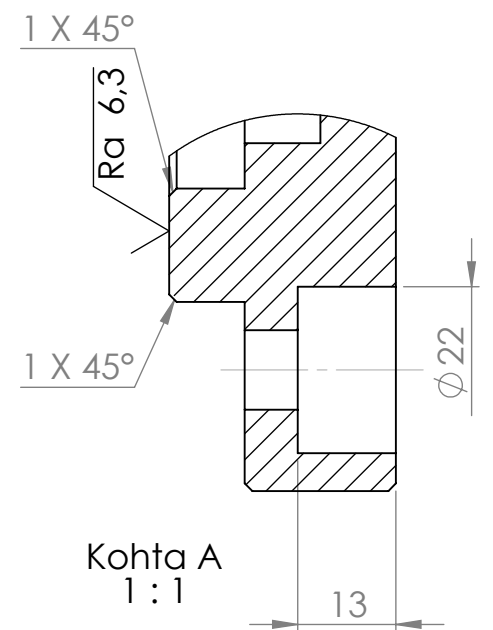
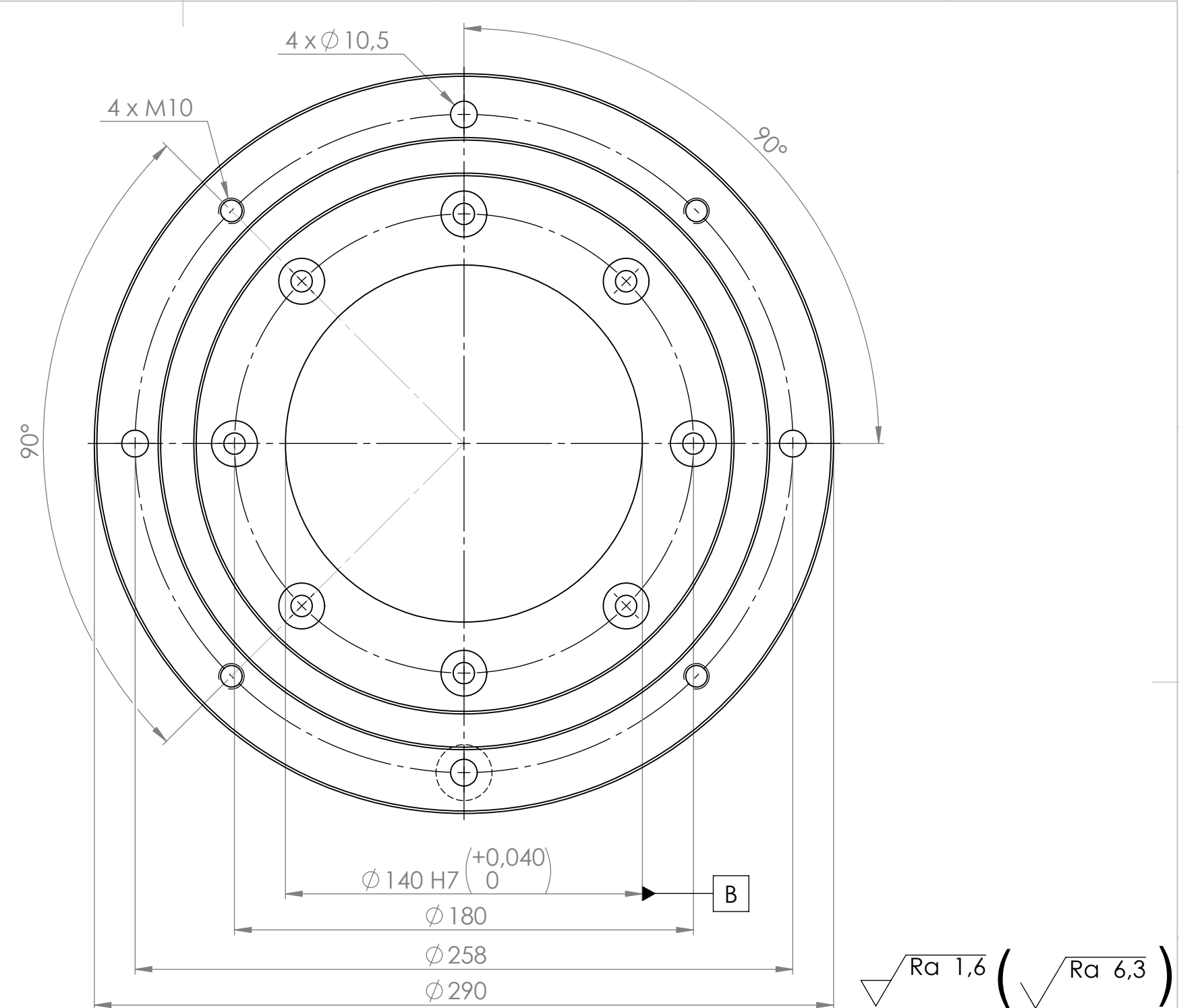
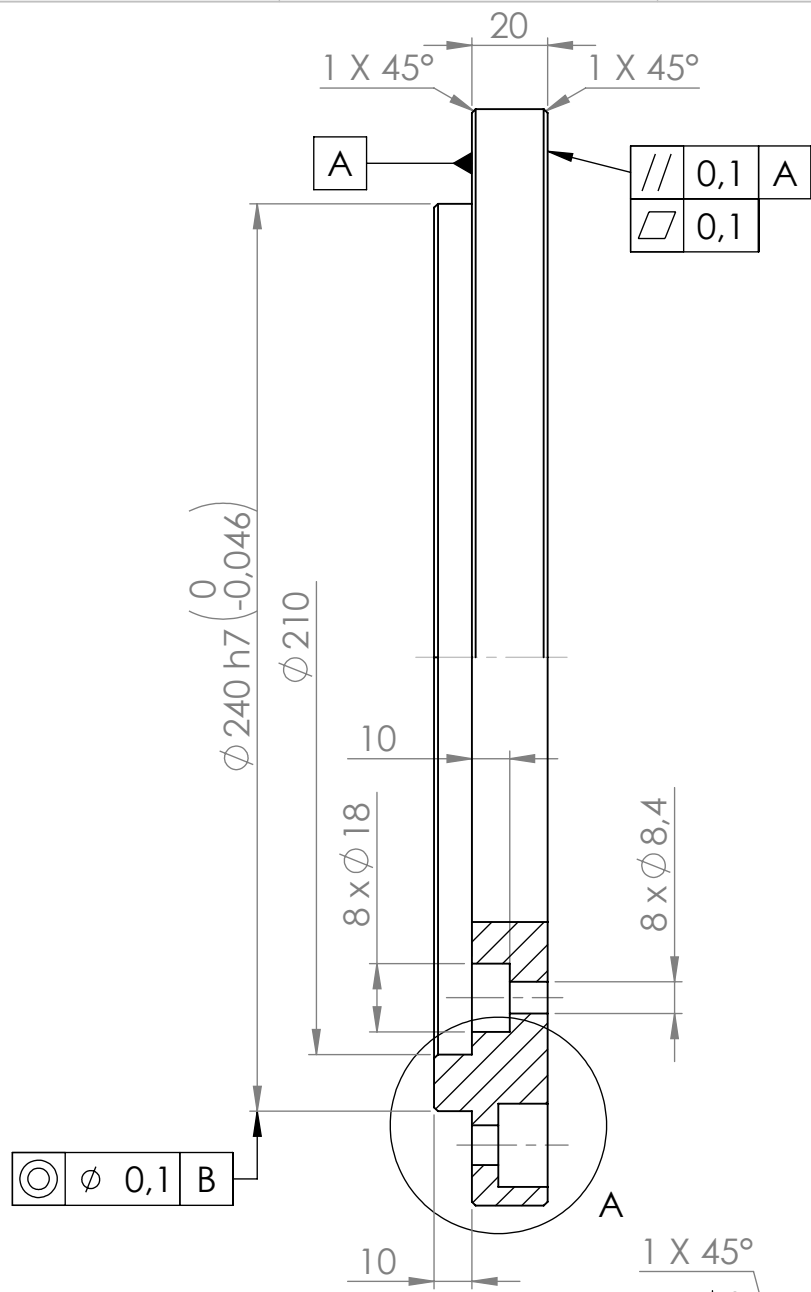
PIIRUSTUKSET

100000	Moottorikannake, kokoonpano.....	(A1)
100010	Laippakokoonpano.....	(A2)
100011	Laipparunko.....	(A2)
100012	Moottorilaippa.....	(A3)
100013	Jakolaatikkolaippa	(A3)
100020	Kiinnityspalkki.....	(A3)
100030	Akseli.....	(A3)
100040	Laakerilaippa	(A3)
100050	Laakeriväliholkki.....	(A3)

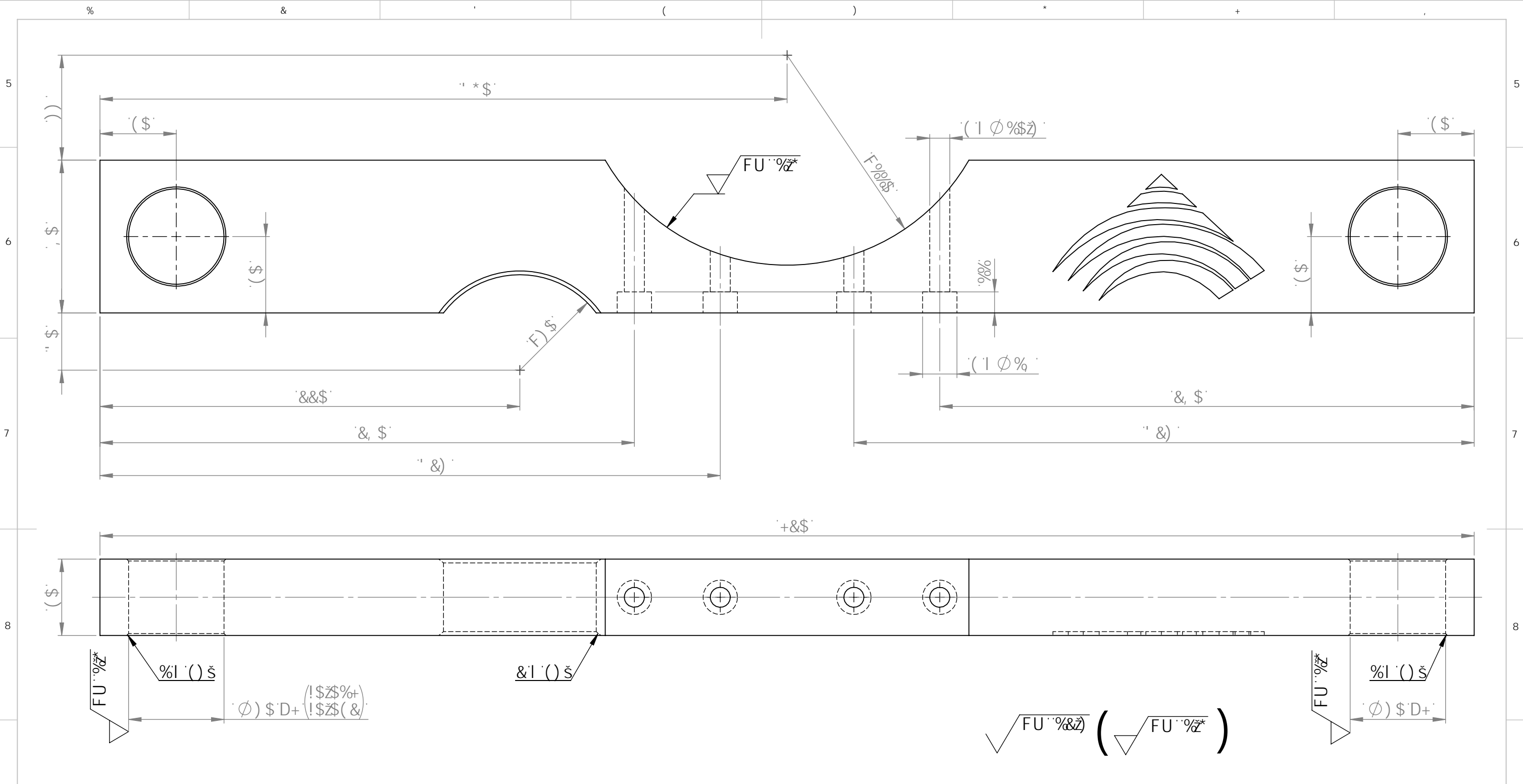


15	Kuusiokoloruuvi	DIN EN ISO 4762	M10x80	2
14	Kuusiokoloruuvi	DIN EN ISO 4762	M10x55	2
13	Kumpusla	Novibra VP	25/5045	2
12	Tasakila	ISO/R 773:1969	A 12x8x70	1
11	Pidätinrennas	DIN 471	45	2
10	Kuusiokoloruuvi	DIN EN ISO 4762	M8x35	6
9	Aluslaatta	DIN EN ISO 7089	A8	6
8	Säteisaksellitivistä	DIN 3760-A45x62x7		2
7	Urakuulalaakeri	6209-ZZ		1
6	Lieriöruulalaakeri	NU 1009 EC		1
5	Laakerivälholkki	10050		1
4	Laakerilaippa	10040		1
3	Akseli	10030		1
2	Kiinnityspaikki	10020		1
1	Laippakokoonpano	10010		1

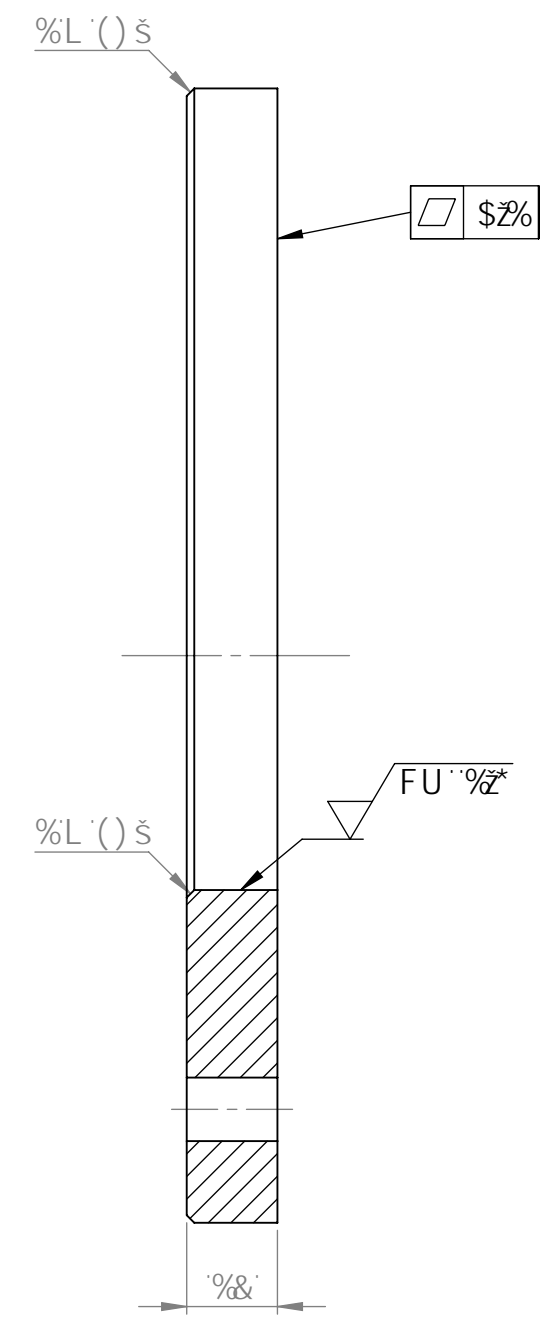
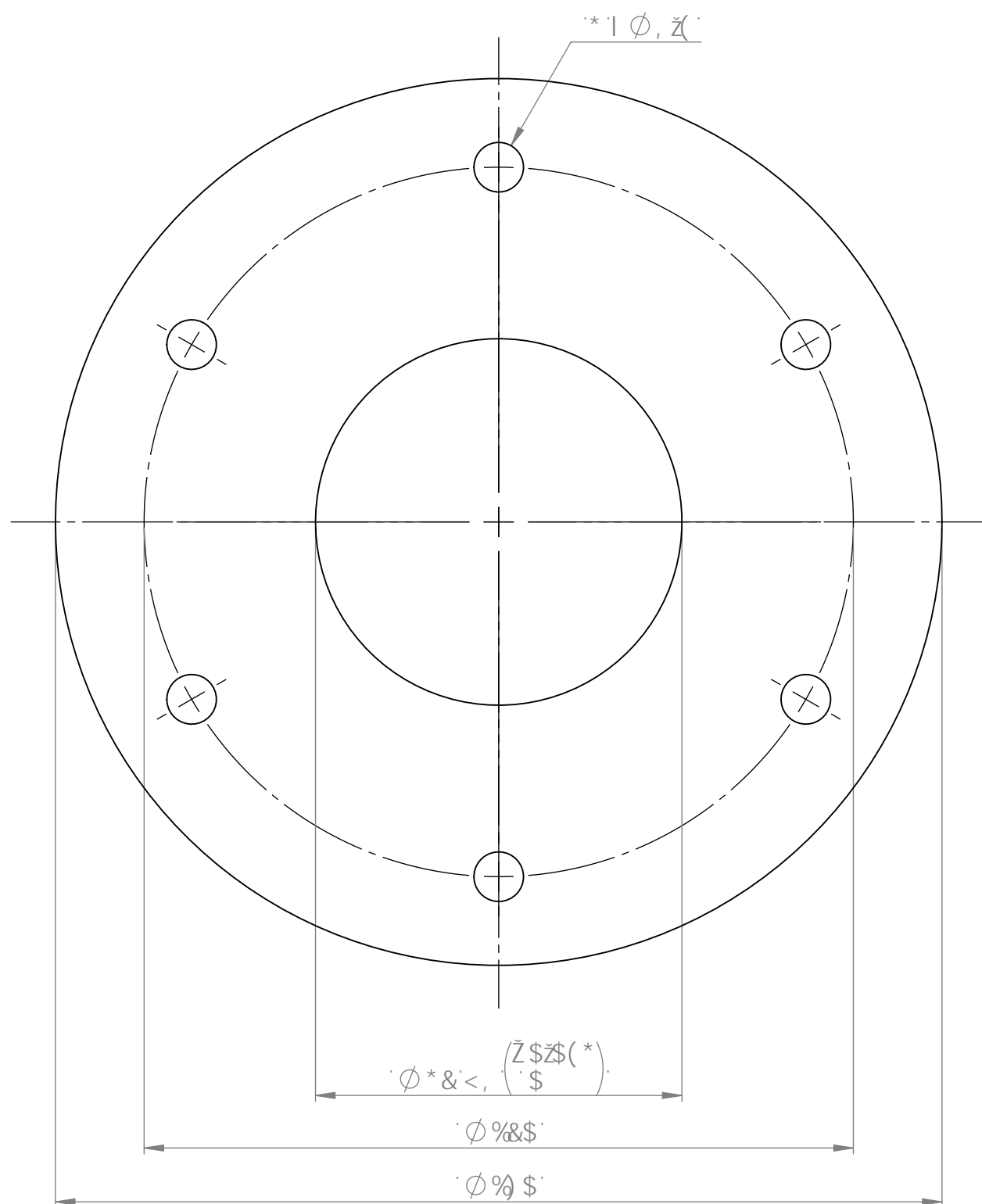
OSA	NIMITYS	PIIR.NO	STANDARDI	MATERIAALI	MITAT	KPL
Yleistoleranssi SFS-EN 22768-1 SFS-EN ISO 13920		Asiakas Hilux-sähköautoprojekti		Suunnittelija Juuso Turunen	Pvm 13.02.2012	
Massa 25,6 kg		Projektin nimi Moottorikannake		Tarkastaja	Pvm	
Mittakaava A1 1:2		Työnumero		Hyväksyjä	Pvm	
Nimitys OAMK Tekniikan yksikkö		Nimitys Moottorikannake		Piirustusnumero	Revisio	
				100000		



Levy	SFS-EN 573-3	EN AW-6082 T6	PL 30 - 300 x 300	1
AIHIO	STANDARDI	MATERIAALI	MITAT	Osa
Yleistoleranssi	SFS-EN 22768-1 SFS-EN ISO 13920	Asiakas Hilux-sähköautoprojekti	Suunnittelija Juuso Turunen	Pvm 13.02.2012
	Massa 2,906 kg	Projekti Moottorikannake	Tarkastaja	Pvm
	Mittakaava A3 1:2	Työnumero	Hyväksyjä	Pvm
Nimitys Moottorilaippa			Piirustusnumero	Revisio
OAMK Tekniikan yksikkö			100012	

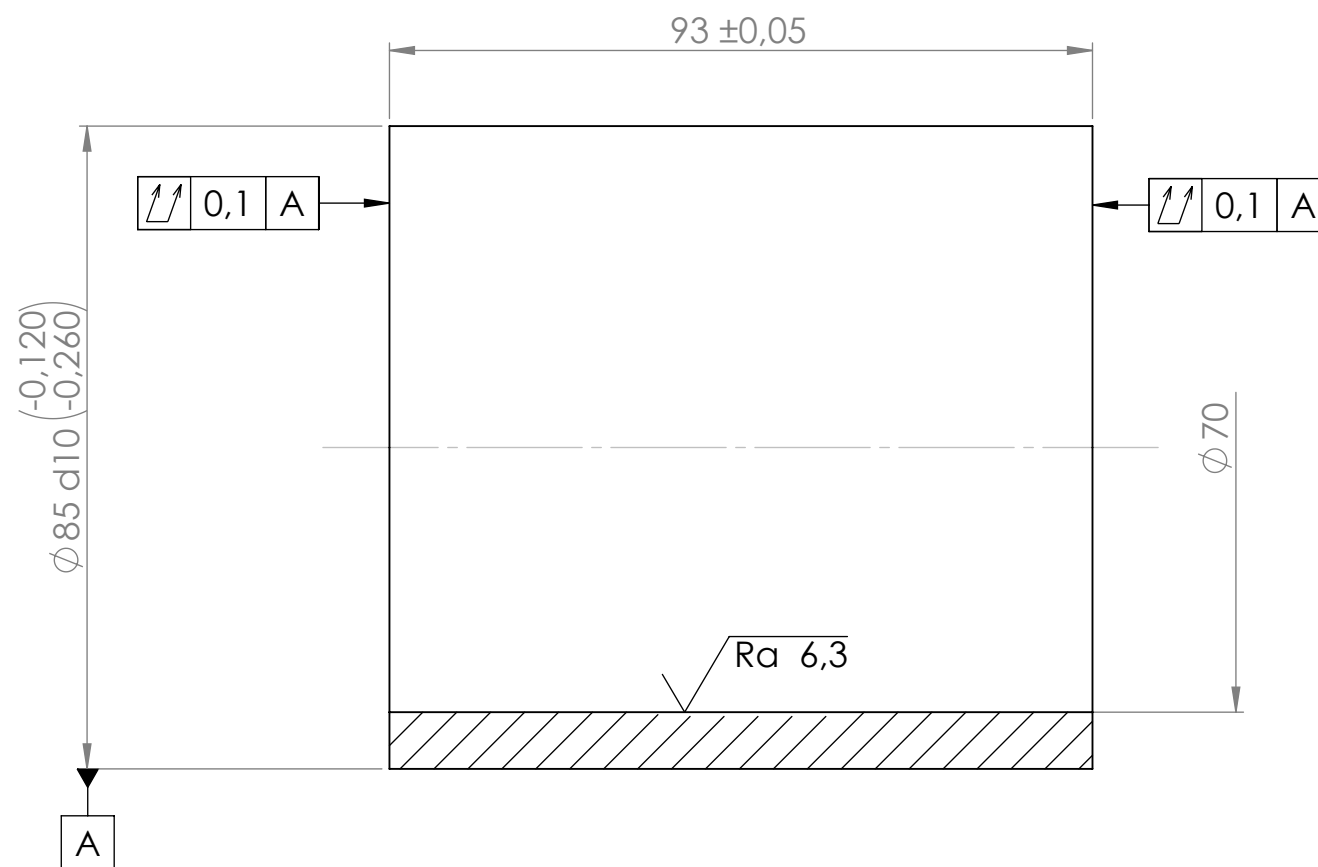


Šarazė	ÚDŪDPAI HĖH	OPÁBY ĖĖI GÁVĪ	i ĖÁĖĖĖĖ	F
5<€	G5B85F8=	A 5HĖF-55@	A +5H	cgu
ŸĤāđ ĤĤā•ā	ÚDŪDPAI ĖĖĖĖ ÚDŪDPAI ÚUÁHUGĖ	ŪĖ āāāā Pā ĉĖĖ@4æđ] [ĵ\ā	Ū" }) āĤ āā R" •[Á" Ĥ" ^}	Ūç{ FĖĖĖĖFG
	T ā•āā I ĖĖĖ Á*	Ū [ĵ\ā T [[ĉ āā} ā^	Vā\ āāāā P^çĖ\•ĤĖ	Ūç{ Ūç{
	T āāāāāā ŪĖĖ ĖĖĖ	V^4) ^ Ĥ [
C5A?		pā ā•	Ūā"•ĉ•) ^ [Ūāçāā
HY_b]]_Ub`m_g]_Ū		Sā } ā•] ā\ \ ā		
			FĖĖĖĖĖĖ	



$$\sqrt{FU \cdot \% \checkmark} \left(\sqrt{FU \cdot \% \checkmark} \right)$$

Šč	ÚØÈÐÁÍÈ	ÒÐÁÝ È È GÁÍ F	ÚŠFGÁÍ ÁÍ	F
5<€	G5B85F8=	A 5H8-55@	A +5H	cgu
Ÿ^ā q ^ā ••ā	ÚØÈÐÁÍÈ ÚØÈÐÁÍÈ	Ÿ^ā q ^ā ••ā	ÚØÈÐÁÍÈ	ÚØÈÐÁÍÈ
	Á*	T [[Ÿ ā q] ā ^	R ^ • [Á ^] ^	FHGGGFG
	FK	V^4) ^ ^	P^çè\^tè	ÚØÈÐÁÍÈ
C 5A ?	Šāā ^ āā] ā	Úāā • c •) ^ ^	Úāā q	
HY_b]L Ub'm_g]_Ø		F€€€€ €		



$\sqrt{Ra 1,6} \left(\sqrt{Ra 6,3} \right)$

Putki	SFS-EN 573-3	EN AW-6082 T6	$\phi 90 \times 10 - 95$	1
AIHIO	STANDARDI	MATERIAALI	MITAT	Osa
Yleistoleranssi	SFS-EN 22768-1 SFS-EN ISO 13920	Asiakas Hilux-sähköautoprojekti	Suunnittelija Juuso Turunen	Pvm 13.02.2012
	Massa 0,459 kg	Projekti Moottorikannake	Tarkastaja	Pvm
	Mittakaava A3 1:1	Työnumero	Hyväksyjä	Pvm
OAMK Tekniikan yksikkö		Nimitys Laakeriväliholkki	Piirustusnumero 100050	Revisio

KOKOAMISOHJE

Seuraavassa on vaiheittain kuvattuna kannakkeen kokoaminen. Suluissa olevat numerot tarkoittavat osanumeroita, jotka löytyvät kannakkeen kokoonpanopiirustuksesta (liite 2/2) tai vaihtoehtoisesti laippakokoonpanon kokoonpanopiirustuksesta (liite 2/3). Mikäli numerolla viitataan laippakokoonpanoon, on numeron eteen merkittynä kirjain L.

1. Asennetaan akselille (3) ohjaava laakeri (7) ja laakerin sisäkehän kiinnittävä pidätinrenkas (11)
2. Asennetaan vapaan laakerin (6) ulkokehä kannakerunkoon (L1)
3. Asennetaan akselille (3) vapaan laakerin (6) sisäkehä
4. Asetetaan laakeriväliholkki (5) kannakerunkoon (L1)
5. Sovitetaan akseli laipparunkoon (L1), voidellaan vapaa laakeri
6. Asennetaan akselille (3) vapaan laakerin (6) sisäkehän kiinnittävä pidätinrenkas (11) ja tasakiila (12)
7. Asennetaan säteisakselitiivistimet (8) laipparunkoon (L1) ja laakerilaippaan (4)
8. Kiinnitetään laipparunkoon (L1) laakerien ulkokehät paikalleen lukitseva laakerilaippa (4) M8x35 kuusiokoloruuvein (10) aluslaattoja (9) käyttäen
9. Kiinnitetään jakolaatikkolaippa (L3) laipparunkoon (L1) M8x40 kuusiokoloruuvein (L4), jakolaatikkolaipan asento laipparunkoon nähden määräytyy sisäkehällä olevien urien perusteella
10. Kiinnitetään staattorilaippa (L2) laipparunkoon (L1) M8x40 kuusiokoloruuvein (L4) aluslaattoja (L5) käyttäen
11. Asennetaan kumipuslat (13) kiinnityspalkkiin (2)
12. Kiinnitetään kiinnityspalkki (2) laippakokoonpanoon (1) M10x50 ja M10x75 kuusiokoloruuvein (14 & 15).

Ruuvit kiristetään momenttiavaimella. M8: 17 Nm, M10: 34 Nm. Moottorin asennus kannakkeeseen tapahtuu moottorivalmistajan ohjeiden mukaisesti.

Oikea rasva kaikkiin käyttökohteisiin

Voitelurasva	Syntec Grease	Multi-Purpose HT	Multi-Purpose EP	Multi-Purpose Extra	Multi-Purpose Grease	Universal CLS	Universal CLS-1	Solid 2	Solid 0	Universal M	Gear Grease XHP	Gear Grease MDS	O-Grease	FM -Grease	DKW -Grease
Kuumat olosuhteet	4	4	3	2	2	1	3	2	0	1	4	4	0	1	0
Kylmäpumpattavuus	3	1	1	2	1	4	2	1	3	1	1	1	4	2	0
Kosteat olosuhteet	3	3	2	3	2	2	3	4	4	2	4	3	2	4	0
Kuorranantokikyky	3	3	3	2	1	1	2	4	3	3	4	4	0	2	0
Värihtelevä kuormitus	4	4	2	2	1	2	2	2	2	3	4	4	0	2	0
Hitaat liukuakkerit (puslat, tapit)	2	2	2	1	2	1	1	4	4	3	4	4	0	1	0
Normaalit liukuakkerit	3	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	0	0	2	0
Nopeat liukuakkerit	3	1	1	2	1	2	2	0	0	0	0	0	3	2	0
Hitaat vierintälaakerit	2	2	2	1	1	1	2	4	4	1	4	0	0	2	0
Normaalit vierintälaakerit	4	3	3	3	3	3	3	0	0	0	1	0	0	3	0
Nopeat vierintälaakerit	3	1	1	4	2	2	1	0	0	0	0	0	4	2	0
Kiinnartuvuus	2	2	2	1	2	2	2	4	4	3	4	4	1	3	0
Korroosionkesto	4	4	3	3	2	2	2	4	4	2	4	4	2	3	0
Alustavoitelu	2	4	3	1	2	2	3	4	3	4	1	0	0	0	0
Hammassavutheet	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Avohammasspyörät	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	0	0
Kääninökehen laakerit	2	2	2	0	1	0	1	0	0	0	4	3	0	0	0
Hydrauliivasarat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	0	0	0
Elintarviketeeollisuus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
Murskaimien huipputlaakerit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Saemnin	Litium-kompleksi	Litium-kompleksi	Litium	Litium	Litium	Litium-kompleksi	Litium-kompleksi	Vesivapaa kalsium	Vesivapaa kalsium	Litium	Kalsium/litium-kompleksi	Epä-organinen	Litium	Epä-organinen	Natrium (varo sektousta)
NLGI -luokka	2	2	2	2	2	00	0,5	2	0	2	0,5	0,5	2	2	00
Tippumispiste °C	>260	>260	185	180	180	170	230	145	>120	180	>220	Ei ole	180	Ei ole	>150
Perussöilyn viskositeetti cSt@ 40 °C	160	200	200	55	110	125	150	800	800	110	700	2100	9,0	65	650
Käyttölämpötila alue °C	-40...+150	-30...+150	-30...+120	-30...+110	-30...+120	-35...+100	-30...+120	-20...+120	-30...+90	-30...+120	-30...+140	-10...+150	-50...+90	-30...+100	-10...+100
Soveltuvuus:	Soveltuu erinomaisesti														
	4	3	2	1	0	Ei sovellu									



TRELLEBORG

VP™ & UD™ Bushes



Features

Novibra® type VP™ and Metalastik® type UD™ consist of two concentric sleeves with rubber securely bonded between them. Designed to accommodate torsional movements and axial and radial loads. The rubber is prestressed to give maximum dynamic strength and durability.

The bonded rubber takes up the full movement.

Lubrication or other bearing maintenance is not required. The bush has excellent sound and vibration isolation characteristics.

Metalastik® type UD™ Bushes

Novibra® type VP™ Bushes

For vehicle suspension, pivot arms and all types of mechanical linkage, permits oscillating movement through the deflection of rubber in shear. Suitable to replace roller bearings where small motions are required (up to 20 degrees). Reduces shock loads and noise transmission in structures.

Applications:

- ▼ Pivot bearings
- ▼ Conveyor tracks
- ▼ Vibratory feeders
- ▼ Mechanical linkages
- ▼ Vehicle suspension arms

Drawing no.	Part no.	Dimensions in mm				Torsion		Axial		Radial		Weight (Kg)
		d	D	I	L	Stiffness Nm/rad	±β degrees	Stiffness N/mm	Max defl. mm	Stiffness N/mm	Max Load kN	
13-1232	10-00520	8	20	15	17	10	13	205	1,3	2000	0,7	0,02
13-1230	10-00249	10	24	15	18	14	13	180	1,7	1300	0,5	0,02
13-1782	10-00277	12,7	38,2	25,4	31,8	30	22	220	3,3	1200	1,1	0,08
13-1657	10-00271	12,7	38,2	44,5	50,8	42	22	330	3,3	2100	2,2	0,14
13-0785	10-00215	14,3	30,2	44,5	50,8	86	13	640	1,9	11000	6	0,11
13-0797	10-00218	15,9	33,4	60,3	65	140	13	960	2,1	18800	9,5	0,16
13-1004	10-00235	15,9	47,7	44,5	50,8	74	20	330	4,2	2500	2,5	0,20
13-1698	10-00276	35	71,2	41,1	45	395	14	550	5,1	3800	4,5	0,39

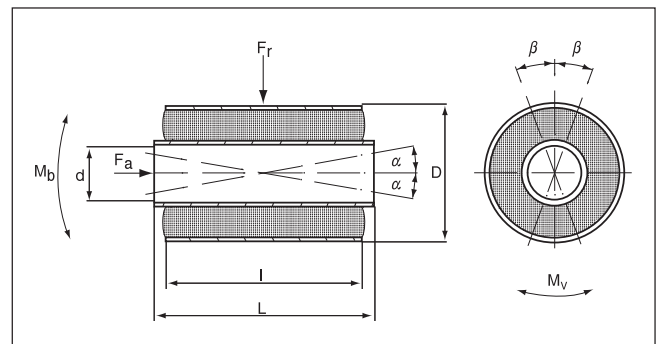
VP™ & UD™ Bushes

Features

Novibra® type VP™ and Metalastik® type UD™ consist of two concentric sleeves with rubber securely bonded between them. Designed to accommodate torsional movements and axial and radial loads. The rubber is prestressed to give maximum dynamic strength and durability.

The bonded rubber takes up the full movement.

Lubrication or other bearing maintenance is not required. The bush has excellent sound and vibration isolation characteristics.



Designation Drawing no.	Part no.	Dimensions in mm				Max Mv Nm/deg.	Torsion			Conical		Axial Load		Radial Load		Weight (Kg)
		d	D	L	l		Max β deg.	Stiffness Nm/deg.	Max Mb Nm	Max α deg.	Stiffness Nm/deg.	Max Fa N	Stiffness N/mm	Max Fr N	Stiffness N/mm	
10-2525	10-00021	10	25	25	20	5,0	15	0,3	6,0	8	0,7	750	170	2300	2000	0,04
10-2540	10-00022	10	25	40	35	6,0	15	0,4	38,0	8	4,8	1500	380	3800	2350	0,06
15-3530	10-00023	15	35	30	25	9,0	15	0,6	12,0	8	1,5	1500	220	3500	3000	0,08
15-3550	10-00024	15	35	50	45	15,0	15	1,0	120,0	8	15,0	2500	520	6000	6500	0,12
20-4540	10-00025	20	45	40	35	24,0	15	0,6	45,0	8	5,6	2600	330	6800	4000	0,16
20-4575	10-00026	20	45	75	70	48,0	15	3,2	365,0	8	46,0	5500	820	13500	8000	0,32
25-5045	10-00027	25	50	45	40	46,0	14	3,3	96,0	8	12,0	3800	450	9000	4500	0,21
25-5085	10-00028	25	50	85	80	49,0	14	4,9	730,0	8	92,0	7500	960	18000	10500	0,42
30-6055	10-00029	30	60	55	45	78,0	14	5,6	135,0	8	17,0	5100	530	12000	5000	0,34
35-6560	10-00031	35	65	60	50	93,0	12	7,7	180,0	6	23,0	6600	720	16000	8500	0,43
40-7065	10-00033	40	70	65	55	138,0	12	11,5	290,0	7	41,0	8300	870	20500	17000	0,56
45-7570	10-00035	45	75	70	60	240,0	12	20,0	320,0	7	45,0	10000	1100	24000	20000	0,67
50-8075	10-00037	50	80	75	65	275,0	11	25,0	700,0	7	100,0	12000	1350	28500	30000	0,77