

# Dynamometrin suunnittelu ja valmistus

Eetu Pesonen

OPINNÄYTETYÖ  
Toukokuu 2021

Ajoneuvotekniikka  
Korjaamotekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Ajoneuvotekniikka  
Korjaamotekniikka

PESONEN, EETU:  
Dynamometrin suunnittelu ja valmistus

Opinnäytetyö 64 sivua, joista liitteitä 3 sivua  
Toukokuu 2021

---

Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja valmistaa henkilöautojen tehon mittaukseen soveltuva dynamometri. Dynamometrin malliksi valikoitui pyörrevirtajarruilla varustettu napadynamometri. Valmistus pyrittiin suorittamaan mahdollisimman kustannustehokkaasti, joten laitteiston jarruina käytettiin kuorma- tai linja-autoista purettuja pyörrevirtajarruja, jotka hankittiin purkamolta. Käytetyt jarrut olivat Telma merkkisiä ja niiden malli oli CC125. Jarrut olivat huonokuntoisia, joten niihin täytyi suorittaa erilaisia korjaustoimenpiteitä, kuten esimerkiksi kaikkien sähkömagneettien uudelleen käämiminen. Kääminnän yhteydessä myös jarrujen suorituskykyä parannettiin merkittävästi.

Suunnittelussa hyödynnettiin Autodesk Inventor suunnitteluohjelmistoa, jonka avulla tehtiin myös osien lujuuslaskentaa. Dynamometri pyrittiin suunnittelemaan mahdollisimman kompaktiksi ja sellaiseksi, joka on mahdollista valmistaa edullisesti saatavista materiaaleista. Työssä suunniteltiin dynamometrijarrujen rungot, akselistot ja erilaisia kiinnikkeitä, joiden valmistus tapahtui laserleikkaamalla, koneistamalla ja hitsaamalla. Jarruja ohjataan tietokoneeseen kytkettävällä ohjainlaitteella, joka ohjaa jarrujen virtalähteitä anturitietojen perusteella. Valmiista tuotteesta pyrittiin tekemään mahdollisimman hyvin soveltuva tehon mittaukseen ja ajoneuvojen moottorihjaimien säätämiseen.

Työn lopputuloksena on saatu suunniteltua ja valmistettua toimiva napadynamometri. Testeissä dynamometri osoittautuu hyvin toimivaksi ja liiketoimintakäyttöön soveltuvaksi. Testausvaiheessa laitteen toimivuutta testataan auton moottorihjaimen säätämiseen ja todetaan sen olevan huomattava parannus aikaisempiin säätökokemuksiin, jotka ovat tapahtuneet ajamalla autoa ja luottamalla aistipohjaisiin havaintoihin.

Johtopäätöksenä voidaan pitää työtä kannattavana, sillä työssä onnistutaan valmistamaan toimiva laite noin kymmenesosalla uuden kaupallisen laitteen hinnasta. Kuitenkin, jos täytyisi valmistaa toinen vastaava dynamometri, niin olisi paljon edukkaampaa ostaa uudet pyörrevirtajarrut, jotka on tarkoitettu dynamometrikäyttöön. Tässä työssä merkittävän suuri osa ajasta kului vanhojen jarrujen etsimiseen ja kunnostamiseen.

---

Asiasanat: dynamometri, napadynamometri, pyörrevirtajarru

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Vehicle Engineering  
Automotive and Garage Engineering

PESONEN, EETU:  
Design and Manufacture of a Dynamometer

Bachelor's thesis 64 pages, appendices 3 pages  
May 2021

---

The purpose of the thesis was to design and manufacture a dynamometer suitable for measuring the power of passenger cars. The hub dynamometer with eddy current brakes was as the type of a dynamometer. The aim was to carry out the production as cost-effectively as possible, so the eddy current brakes used for braking the dynamometer were recycled from old trucks or buses, which were bought from the wrecking yard. The brakes used were Telma brand and their model were CC125. The brakes were in poor condition, so they had to undergo various repairs, such as rewinding all the electromagnets. In connection with the rewinding, the performance of the brakes was also significantly improved

The designing utilized Autodesk Inventor designing software, which was also used to calculate component strength. The aim was to design the dynamometer to be as compact as possible with use of advantageously available materials. Brake frames, axles and various flanges were designed and also manufactured by laser cutting, machining and welding. The brakes are controlled by a computer connected to a control device that controls the brake power supplies based on sensor data. The goal was to produce the finished product as suitable as possible for measuring engine power and also as help for adjusting engine management systems.

The end result of the work is the functional hub dynamometer. In the test, the dynamometer proves to work as planned and its suitable for commercial use. Also in the testing phase, the functionality of the dynamometer is tested by adjusting a car's engine controller and is found to be a significant improvement over previous controller adjusting experiences that have occurred while actually driving the car and relying on sensory observations. In conclusion, the thesis can be considered profitable, as its been possible to manufacture a working device for about one tenth of the price of a new commercial device.

---

Key words: dynamometer, hub dynamometer, eddy current brake

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	5
2	TEORIA JA KÄSITTEET .....	6
	2.1 Teho, momentti ja hitausmomentti .....	6
	2.2 Pyörrevirrat .....	6
	2.3 Sähkömagnetismi.....	7
	2.4 Tehonmittausstandardit.....	8
	2.4.1 SAE-J1349 .....	9
	2.4.2 DIN 70012 .....	9
	2.5 Koneturvallisuus.....	10
3	DYNAMOMETRIT JA TEHONMITTAUS .....	11
	3.1 Dynamometrityypit .....	11
	3.1.1 Moottoridynamometri.....	12
	3.1.2 Alusta- ja napadynamometri.....	13
	3.1.3 Ulosottodynamometri.....	14
	3.2 Dynamometrijarrutyypit .....	15
	3.2.1 Inertia .....	15
	3.2.2 Kitkajarru .....	16
	3.2.3 Hydraulijarru .....	17
	3.2.4 Pyörrevirtajarru.....	18
4	TYÖN TOTEUTUS.....	22
	4.1 Suunnittelu .....	22
	4.1.1 Runko .....	23
	4.1.2 Akselisto .....	25
	4.1.3 Dynamometrin ohjaus.....	29
	4.2 Pyörrevirtajarrut.....	33
	4.3 Valmistus .....	41
	4.4 Testaus .....	50
5	PÄÄTÄNTÄ.....	58
	LÄHTEET.....	60
	LIITTEET .....	62
	Liite 1. Rungon simulointi.....	62
	Liite 2. Pyörälaipan simulointi .....	63
	Liite 3. Akselin simulointi.....	64

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ja valmistaa dynamometri ajoneuvon tehon mittausta varten. Opinnäytetyössä vertaillaan erilaisia dynamometrin toteutusvaihtoehtoja ja rakenneratkaisuja. Tutkimustyön tuloksena valitaan paras konstruktio käyttötarkoituksen ja työn päämäärän kannalta.

Opinnäytetyön aihe on valittu henkilökohtaisen kiinnostuksen ja tarpeen pohjalta. Työn suunnittelu ja toteuttaminen on tarjonnut mahdollisuuden harjoitella ja kokea projektin hoitoa, johtamista ja ajankäytön hallintaa, sekä kustannusten seuranta. Työn tuloksen pohjalta on mahdollisuus arvioida liiketoiminnan aloittamisen mahdollisuuksia ja valmistettavan laitteen kaupallista hyödyntämistä.

Työn suorittamisen kannalta välttämättömäksi on osoittautunut kyseisen alan tekniikkaan laaja perehtyminen, niin teknisten ratkaisujen, kuin teorian näkökulmasta. Käytännön toteutuksessa myös monipuoliset kädentaidot ja valmistusmenetelmien tunteminen on osoittautunut välttämättömäksi. Osittain tähän on vaikuttanut se, että laitteisto on pyritty valmistamaan mahdollisimman kustannustehokkaasti. Toteutuksessa on pyritty huomioimaan laitteen toiminnallisuuden lisäksi myös sen käyttöturvallisuus.

Tässä opinnäytetyössä käsitellään ensin dynamometrin suunnittelemisen kannalta tärkeää teoriaa ja käsitteitä. Tämän jälkeen sovelletaan teoriaa suunnittelutyön suorittamiseen ja lopulta työn toteutukseen, jossa dynamometri valmistetaan ja testataan. Lopuksi arvioidaan saavutettua lopputulosta ja työn kannattavuutta.

Opinnäytetyöprosessi on aloitettu syksyllä 2020 teorian ja tiedonhankinnan osalta. Käytännön toteutus on suoritettu alkuvuonna 2021. Raportointi on tapahtunut talven 2021 aikana.

## 2 TEORIA JA KÄSITTEET

### 2.1 Teho, momentti ja hitausmomentti

Yleisesti teho lasketaan työn ja siihen kuluneen ajan suhteenä, mutta teho on mahdollista ratkaista myös momentin ja kierrosnopeuden tulona. Momentti  $M$  kertaa kulmanopeus  $\omega$  on teho  $P$ . Kulmanopeus  $\omega$  voidaan ratkaista kertomalla kierrosnopeus  $n$  kaksi kertaa piillä. Tehon  $P$  kaava saadaan ratkaistua muotoon momentti  $M$  kertaa  $2\pi$  kerrottuna kierrosnopeudella sekunnissa  $n$  (Kaava 1). Tehon yksikkö on Watti eli lyhenne W. (Mäkelä, Soininen, Tuomola & Öistämö 2014, 92-93.) Yleisesti tehosta käytetään myös yksikköä hevosvoima, joka vastaa 0,746 kilowattia (Oberg, Jones, Horton, Ryffel & McCauley 2020, 156).

$$P = M\omega, \omega = 2\pi n \rightarrow P = M \cdot 2\pi n \quad (1)$$

Momentti kuvaa voiman vaikutusta akseliin, kun se vaikuttaa siihen voimavarren kautta (Oberg, ym. 2020, 156). Voima  $F$  kertaa voimavarsi  $r$  on momentti  $M$ , on yhtälö, jolla voidaan ratkaista momentin suuruus (Kaava 2). Momentin yksikkö on Newtonmetri eli lyhenne Nm. (Mäkelä, ym. 2014, 92-93.)

$$M = Fr \quad (2)$$

Hitausmomentti tai inertia kuvaa pyörivän kappaleen massavaikutusta. Suuremman inertian omaava kappale vaatii suuremman momentin, jotta se saadaan kiihtymään pyörimisliikkeeseen. Samoin myös kappaleen pysäyttäminen vaatii suurempia voimia, jotta se saadaan pysäytettyä samassa ajassa. (Mäkelä, ym. 2014, 93-94.)

### 2.2 Pyörrevirrat

Sähkömagneettisen induktion seurauksena muuttuvassa magneettikentässä metalliin indusoituvat pyörrevirrat. Pyörrevirtajarrutus ei siis vaadi minkäänlaista kosketusta pyörivän kappaleen ja magneetin välillä, jonka seurauksena se ei kulu

käytössä. Myös hyvä ohjattavuus saavutetaan muuttamalla magneettivuon tiheyttä. (Gay 2005, 9.) Kappaleen resistanssi vaikuttaa pyörrevirtojen suuruuteen kääntäen verrannollisesti eli suuremman resistanssin omaavaan kappaleeseen pyörrevirtojen vaikutus on pienempi (Peltonen, Perkiö & Vierinen 2018, 44).

Liikkeen takia johtimeen kohdistuu muuttuva magneettikenttä, joka Lenzin lain mukaan muuttuu sähkökentäksi. Vaihteleva sähkökenttä aiheuttaa pyörrevirtoja johtimeen Ohmin lain mukaisesti. Pyörrevirtojen  $J$  vuorovaikutus magneettivuon tiheyden  $B$  kanssa aiheuttaa voiman  $F$ , jonka suunta on liikettä vastaan (kaava 3). (Gay 2005, 8.)

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (3)$$

Pyörrevirrat tuottavat sähkömagneettisten voimien lisäksi myös lämpöä, kuten muutkin jarrutyypit (Killedar 2012, 91).

### 2.3 Sähkömagnetismi

Johdinsilmukka muodostaa magneettikentän, jonka magneettivuon tiheys voidaan ratkaista kaavan 5 avulla. Kaavassa  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti, joka on vakio. Muuttuja  $I$  kuvaa johtimessa olevaa jännitettä ja muuttuja  $r$  kuvaa silmukan sädettä. Muuttuja  $x$  on etäisyys pisteestä, jossa magneettivuon tiheys ratkaistaan. Jos silmukassa on useampi kierros, niin tulos kerrotaan kierroksien määrällä  $N$ . (Peltonen, Perkiö & Vierinen 2018, 27.)

$$B = \mu_0 \frac{I r^2}{2(r^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot N \quad (4)$$

Magneettikentän voimakkuus on suoraan verrannollinen magneettivuon tiheyteen. Voimakkuuden suuruuteen vaikuttaa kuitenkin myös väliaineen permeabiliteetti. (Mäkelä, ym. 2014, 122.) Sen suuruuteen voidaan käyttökohteessa harvoin vaikuttaa, joten esimerkiksi tässä opinnäytetyössä riittää magnetismin voimakkuuden tarkastelu ainoastaan magneettivuon tiheyden näkökulmasta

Kun magneettikenttä vaikuttaa puolijohdekerrokseen, joka on virtaa johtava, syntyy Hall-ilmiö. Ilmiötä käytetään hyväksi asentoantureissa, jotka tunnistavat ferromagneettisen kappaleen sen ollessa riittävän lähellä anturia. Ajoneuvokäyttöön tarkoitetussa Hall-anturissa on usein kestopagneetti, vahvistinpiiri sekä puolijohdekerros. Tätä tekniikka voidaan käyttää myös kierrosnopeuden laskemiseen käyttämällä impulssipyörää, josta anturi tuottaa sähköpulssein, kun levyn hammas kulkee sen ohitse. (Schneehage 2012, 24,29.)

## 2.4 Tehonmittausstandardit

Tehonmittauksessa pyritään siihen, että saadut tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään, jotta on mahdollista tehdä johtopäätöksiä mittauksista. Mittaukseen vaikuttaa useat muuttujat, kuten moottorin jäähdytysnesteen ja öljyn lämpötila, sekä imuilman happisisältö. Yhteistä näillä tekijöillä on, että mittaustilan lämpötila, ilmanpaine ja ilmankosteus vaikuttavat niihin. (Killedar 2012, 217.)

Öljyn lämpötilasta johtuvat moottorin kitkahäviöiden muutokset vääristävät mitaustuloksia. Kuitenkin suurimpana tekijänä on moottoriin kulkeutuvan ilman happisisältö, suurempi määrä happea mahdollistaa suuremman polttoainemäärän polttamisen työtahtien aikana, joka johtaa suurempaan saatavaan tehoon. Ilmanpaineen noustessa ilma on tiiviimpää, jolloin sama tilavuus sisältää enemmän happea. Jos ilma lämpenee, niin sen tiheys laskee. Ilman kosteuden vaikutuksesta vesihöyry syrjäyttää osan hapesta, jolloin happimolekyylien määrä vähenee suhteessa tilavuuteen. Näiden syiden takia on kehitetty laskukaavoja, joiden avulla voidaan suhteuttaa saatu mittaustulos vallitsevaan ympäristöön. Kaavat tunnetaan yleisemmin nimellä korjauskertoimet. (Killedar 2012, 217.)

Erilaisia korjauskertoimia on useampia kuten:

- DIN 70012
- SAE-J1349
- EEC 80/1269
- JIS D 1001
- ISO 1585. (Killedar 2012, 224.)



Yleisimpiä dynamometri käytössä olevia standardeja ovat DIN 70012 ja SAE-J1349.

### 2.4.1 SAE-J1349

Yleisin käytössä oleva tehonmittausstandardi on SAE-J1349, joka on kehitetty vuonna 1990 The Society of Automotive Engineers (SAE) toimesta. Sen kehityksen päätarkoituksena on se, että kaikki tämän standardin mukaisesti tehdyt mitaukset olisivat yhtä vertailukelpoisia keskenään kuin samassa tilassa ja vakioolosuhteissa tehdyt kaksi mittausta. Standardissa huomioidaan ilmanpaine, ilmankosteus sekä ilman lämpötila. Lisäksi standardissa on oletus 85% vaihteiston mekaaniselle hyötysuhteelle, jotta voidaan arvioida todellista moottoritehoa. Mutta oletettua hyötysuhdetta tulisi käyttää vain, jos oikeaa kitkahäviötietoa ei ole saatavilla. (Killedar 2012, 224.)

Korjauskertoimen  $CF_{SAE}$  kaavassa  $P_D$  on kuivan ilman ilmanpaine millibaareina ja  $T_C$  on valitseva ilman lämpötila, sekä  $T_{REF}$  on vertailu lämpötila, joka on usein 25 °C. Jotta saadaan selvitettyä kuivan ilman paine, on vallitsevasta ilmanpaineesta vähennettävä vesihöyryn paine. Kaavan 5 avulla tulos saadaan suhteutettua tilaan merenpinnan tasolla, jossa ilmanpaine on 990 mbar.

$$CF_{SAE} = 1.180 \left[ \left( \frac{990}{P_D} \right) \cdot \left( \frac{T_C + 273}{T_{REF} + 273} \right)^{0.5} \right] - 0.180 \quad (5)$$

Korjauskerrointa ei ole kuitenkaan tarkoitettu käytettäväksi äärimmäisen suurella vaihtelualueella. Tarkoituksen mukainen lämpötila vaihtelu on 15-35 °C ja kuivan ilman ilmanpaine vaihtelualue on 900-1050 millibaaria. (Killedar 2012, 225.)

### 2.4.2 DIN 70012

DIN 70012 tehonmittausstandardi ei ota huomioon ilman kosteuden muutoksia. Jos vallitsevan olotilan erot standardoituun olotilaan ovat pieniä, voidaan moottorin kokonaishyötysuhde, polttoaineen lämpöarvo sekä ilman ja polttoaineen

suhde olettaa vakioiksi. Kertomalla moottorin volymetrinen hyötysuhteen muuttuva osa lämpötilan suhteen neliöjuurella saadaan DIN 70012 mukainen korjauskerroin  $CF_{DIN}$  (Kaava 6). (Killedar 2012, 230.)

$$CF_{DIN} = \left(\frac{p_0}{p}\right) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0.5} \quad (6)$$

DIN 70012 standardia käytettäessä saadut mittaustulokset ovat useimmissa olosuhteissa muutamaa prosenttia suurempia kuin SAE-J1349 standardin mukaiset mittaustulokset. Tulokset on suhteutettu 1013 mbar ilmanpaineeseen ja 20°C lämpötilaan.

## 2.5 Koneturvallisuus

Koneen osien riittävä lujuus on edellytys käyttöturvallisuudelle. Riittävä lujuus voidaan taata testaamalla ja suorittamalla lujuuslaskelmia. Koneessa on osia, jotka pyörivät suurella nopeudella tai liikkuvat suoraviivaisesti. Näiden osien irtoaminen tai särkyminen voivat aiheuttaa suuria laite- ja henkilövahinkoja. Raskaiden pyörivien osien epätasapainosta aiheutuu rakenteisiin ylimääräistä kuormitusta, joka voi johtaa rakenteiden pettämiseen, jolloin osia voi sinkoutua hallitsemattomasti. Näitä tilanteita varten tulee koneiden rakenteet ja suojukset suunnitella niin, että ne kestävät mahdolliset vaaratilanteet. (Siirilä & Tytykoski 2016, 270-272.)

Sähköllä toimivaa laitetta suunniteltaessa on otettava huomioon sähkön käyttöturvallisuus. Sähköiskun riskiä voidaan merkittävästi pienentää estämällä suoran kosketuksen mahdollisuus osiin, joissa on jännite. Keinoja ovat osien eristäminen, riittävä etäisyys käyttäjään sekä koteloiminen. Lisäksi sähkö voi aiheuttaa tulipalon kipinöinnin tai kuumenemisen vuoksi, joten komponentit tulisi sijoittaa mahdollisimman etäälle syttyvästä materiaalista. Useimmiten tapaturmien syynä on laitteiden vikaantuminen ja käytössä tehdyt virheet. (Siirilä & Tytykoski 2016, 663-666.)

### 3 DYNAMOMETRIT JA TEHONMITTAUS

Dynamometri on laite, jolla voidaan mitata moottorin tuottamaa tehoa ja vääntömomenttia. Dynamometri ei ole ainoastaan nimitys moottoreiden mittaamiseen käytettävää laitteistoa varten, vaan se voi olla mikä tahansa voimaa mittaava laite. Kuitenkin yleensä kyseessä on laite, joka mittaa sähkö- tai polttomoottorin tehoa. (Killedar 2012, 29-30.)

Dynamometri on tärkeä moottorin säätämisen ja testaamisen näkökulmasta, sillä se mahdollistaa muutoksia tehdessä erojen havaitsemisen. Sen avulla moottorista saadaan juuri halutut ominaisuudet, sekä saavutetaan maksimaalinen teho ja vääntömomentti. Usein ihmisen havaintojen perusteella tehtyyn moottorin säätöön saadaan vielä 5-10 % lisää tehoa tekemällä säätö uudelleen dynamometrin avulla. Lisäksi vaikka kaksi moottoria olisivat mekaanisesti mahdollisimman identtisiä, niin silti kumpikin moottoreista on yksilö, joka vaatii yksilöllisen säädön, jotta saavutetaan paras lopputulos. Läheskään kaikilla moottoreiden rakentajilla tai virituspajoilla ei ole käytössään dynamometria. Tämä johtuu niiden kohtuullisen suuresta hankintahinnasta. (Bell 2007, 14.)

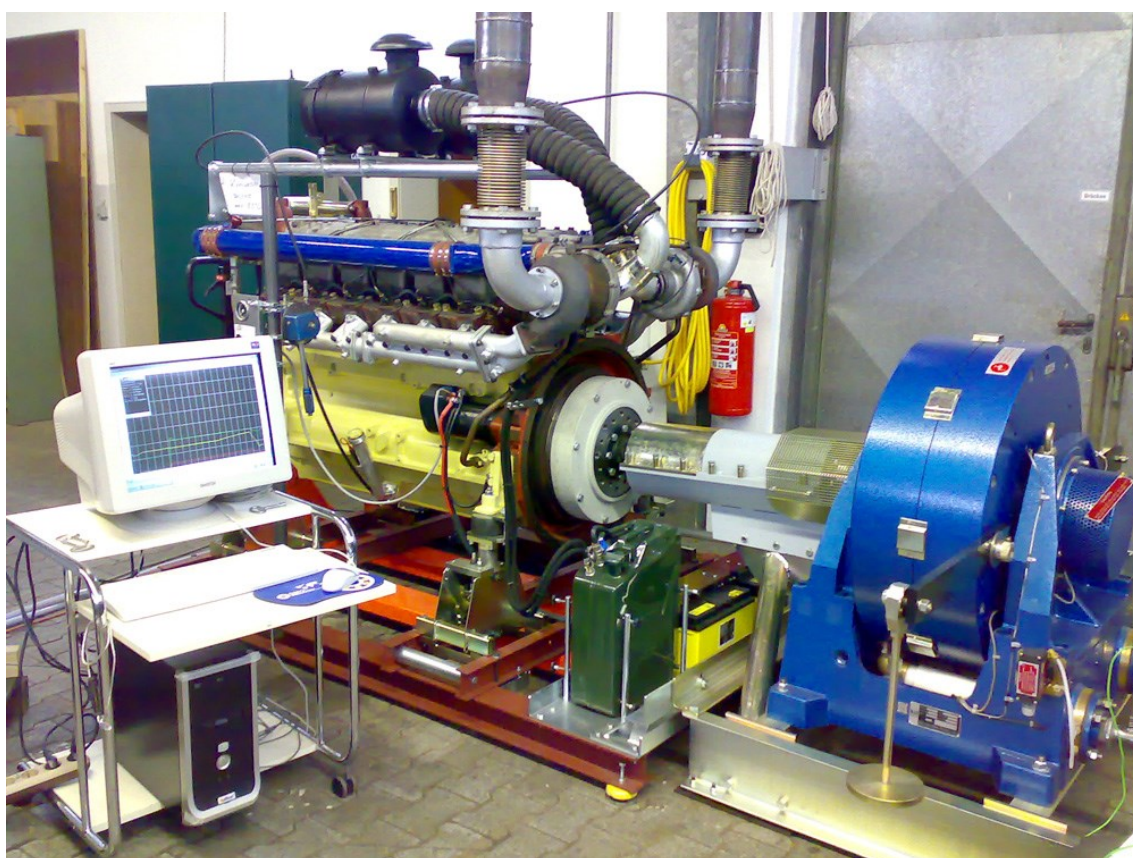
Dynamometri mahdollistaa ajoneuvon testaamisen paikallaan. Paikallaan ollessaan ajoneuvoon tai moottoriin voidaan kytkeä erilaisia ulkopuolisia antureita, joita ei mittauskohteen liikkuessa voitaisi turvallisesti tai vaivatta kytkeä. Ajoneuvon ollessa paikallaan myös työturvallisuus on parempi, koska ajoneuvoa ei tarvitse esimerkiksi ohjata samalla kuin mittauksia suoritetaan.

#### 3.1 Dynamometrityypit

Dynamometrit voidaan jakaa niiden kytkentätavan mukaan, mutta toimintaperiaate on edelleen sama. Ainoastaan voiman välitys dynamometrin jarrulle tapahtuu eri tavalla. Dynamometrejä ei voi juuri vertailla niiden kytkentätavan perusteella, sillä kullekin dynamometrille on oma käyttötarkoituksensa. Vain alusta- ja napadynamometri ovat keskenään vertailukelpoisia.

### 3.1.1 Moottoridynamometri

Moottoridynamometrissä on mitattava moottori kytkettynä suoraan dynamometrin jarruun ilman, että välissä on tyypillisiä voimansiirron komponentteja (Kuva 1). Tämä usein mahdollistaa pienempi tehoisen jarrun käyttämisen, sillä voimansiirrossa välitys lähes aina kasvattaa jarrutettavan momentin suuruutta. Kyseinen dynamometrityyppi mahdollistaa irtomoottoreiden säädön ja tehonmittauksen. Lisäksi moottoriteho saadaan mitattua tarkasti, eikä sitä arvioida pyörätehosta vähentämällä mekaanisia häviöitä vaihteistossa, jotka ovat lähes aina arvioita. (DYNOMite Dynamometer 2020.)



KUVA 1. Moottoridynamometri (SAJ n.d.)

Moottoridynamometri vaatii usein enemmän aikaa esivalmisteluihin, kuten irrottamiseen autosta tai moottorin kiinnittämiseen, sekä asennukseen tarvitaan nosturi. Toisaalta moottoriin ja toimilaitteisiin on hyvä näköyhteys, sekä niiden mekaaninen säätäminen on vaivattomampaa verrattuna alustadynamometriin. Lisäksi moottoridynamometrit mahtuvat pienempään tilaan ja ovat suhteessa edullisempia, kuin muut dynamometrityypit. (DYNOMite Dynamometer 2020.)

### 3.1.2 Alusta- ja napadynamometri

Alustadynamometrissä mittaus tapahtuu rullien välityksellä, jolloin voima välitetään rullille ajoneuvon pyörien kautta (Kuva 2). Alustamittausta voidaan pitää kaikista eniten normaalia ajotilannetta vastaavana. Muissa tyypeissä ei oteta huomioon kaikkia voimansiirrossa ja renkaissa tapahtuvia ilmiöitä. Lisäksi alustadynamometrillä on huomattavasti vaivattomampi tehdä mittaus ja säätötyötä, jos moottori on jo kiinnitetty ajoneuvoon. (Bell 2007, 14.)



KUVA 2. Alustadynamometri (Banks Power 2005.)

Alustadynamometriä pidetään epätarkempana kuin moottoridynamometria, sillä voimansiirron häviöiden tarkka arvioiminen on lähes mahdotonta. Huonona puoleena on myös se, että rullien ja renkaiden välinen kitka voi olla rajoittava tekijä maksimi mittauskapasiteetin kannalta. Napadynamometrissä poistetaan sen sijaan mitattavan ajoneuvon renkaat vetäviltä akseleilta ja korvataan jarruilla (Kuva 3). Suurimpia hyötyjä verrattuna alustadynamometriin on, että laitteisto voidaan varastoida huomattavasti pienempään tilaan ja renkaiden kitkaominaisuudet eivät rajoita tehon mittauskapasiteettia. (DYNOMite Dynamometer 2020.)

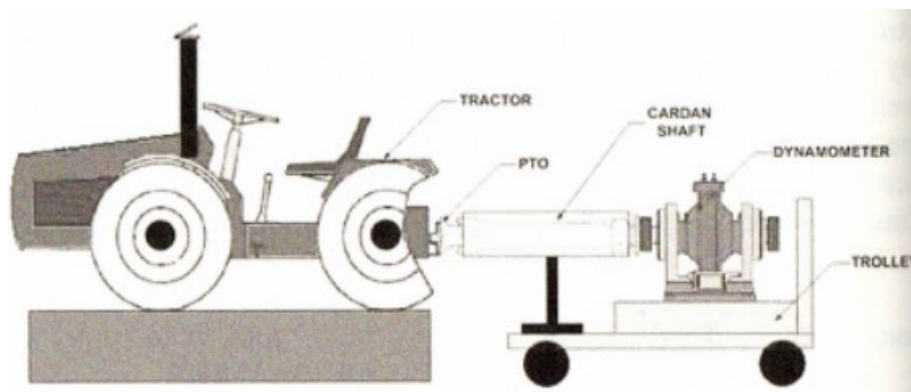


KUVA 3. Napadynamometri (Mainline DynoLog Dynamometers n.d.)

Huonona puolena napadynamometrissä voidaan pitää, että jarruja tulee hankkia jokaiselle vetävälle akselille kaksi, mikä voi lisätä hankintakuluja (Kuvat 2 ja 3). Toisaalta jarrujen on oltava vain puolet niin suuria, kuin jos akselilla olisi vain yksi jarru. Koska jarrut kytketään renkaiden tilalle, on niitä varten oltava adapterit, joita on oltava omat jokaista eri pulttijakoa varten. Se lisää koneistettavien osien määrää, jolloin kokonaishinta myös kasvaa.

### 3.1.3 Ulosottodynamometri

Ulosottodynamometriä käytetään traktoreissa, kun mitataan traktorin tehoa tai etsitään vikaa. Se kytketään suoraan traktorin ulosottoon nivelakselin välityksellä (kuva 4). Moottoria kuormitetaan eri kierrosalueilla, täysistä kierroksista alimpaan testauspisteeseen. Tuloksena saadaan keskiarvo, joka tunnetaan nimellä ulosototeho. Se viittaa siihen, kuinka paljon tehoa traktori voi jatkuvasti tuottaa ulosottoon kytketylle toimilaitteelle. (Killedar 2012, 504.)



KUVA 4. Ulosottodynamometri (Killedar 2012, 124.)

Traktoreiden ulosottoja on pääasiassa kahta eri tyyppiä eli 540- ja 1000- kierroksista ulosottoa. Ilmoitettu ulosoton kierrosluku viittaa välitykseen, joka on moottorin ja ulosottoakselin välillä. Tämä välitys nostaa momentin suuruutta, jolloin mittauslaitteiston jarrun on pystyttävä jarruttamaan suurempi momentti verrattuna esimerkiksi moottoridynamometriin. Toisena mahdollisuutena on valmistaa välille ylennysvaihteisto, jolloin jarrun kierrosnopeus kasvaa ja momentin tarve laskee. (Dyno Tech dynamometer n.d.)

### 3.2 Dynamometrijarrutyypit

Dynamometrit voidaan jakaa jarrutyypin mukaan, jolloin ratkaisevana tekijänä on tekniikka, jolla jarrutus tapahtuu. Lähes kaikki jarrutyypit toimivat muuttamalla moottorin tuottaman tehon lämpöenergiaksi. Hydraulijarrussa lämpöenergia välittyy suoraan voimaavälittävään nesteeseen, kun kitka- ja pyörrevirtajarruja voi olla ilma- ja nestejäähdytteisiä. Jarrutyyppejä on myös muita, mutta edellä mainitut ovat dynamometrikäytössä yleisempiä. Käytössä on lähinnä hydraulijarruja ja pyörrevirtajarruja, koska ne ovat osoittautuneet parhaiten soveltuviksi dynamometreissä käytettäväksi.

#### 3.2.1 Inertia

Dynamometri voidaan toteuttaa myös täysin ilman varsinaista jarrua, jolloin käytetään hyväksi pyörivien kappaleiden hitausmomenttia. Tällaisia laitteita kutsutaan inertiadynamometreiksi, joissa kiihdytetään moottoriteholla suurimassaisia

kappaleita, joilla on myös suuri inertia. Tehon mittaaminen perustuu inertialtaan tunnetun kappaleen kiihdyttämiseen ja siihen kuluvaan ajan mittaamiseen. (Banks Power 2020.)

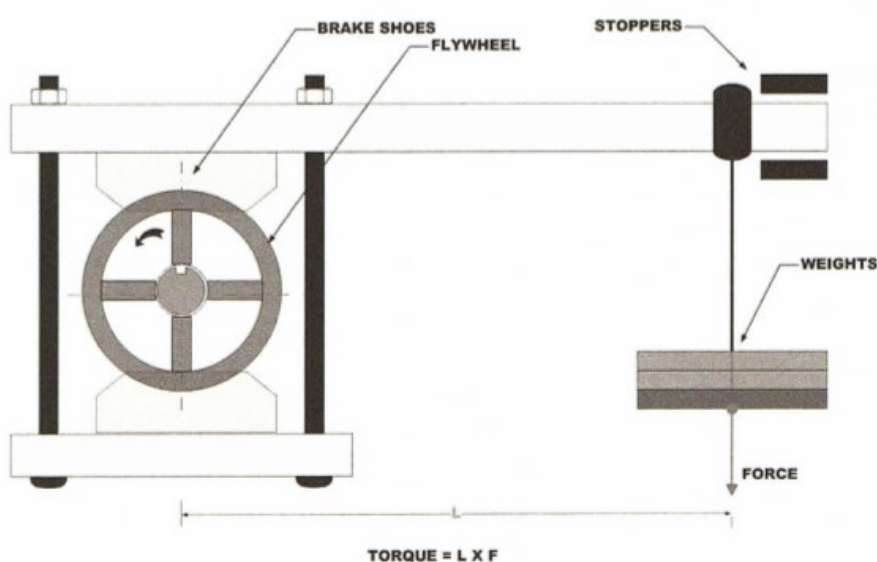
Tehon laskeminen perustuu kineettisen energian muutokseen ja muutokseen kuluvaan ajan suhteeseen. Inertiaan perustuvalla dynamometrillä ei voida kuitenkaan rajoittaa kierrosnopeutta. Koska mittaaminen perustuu kierrosnopeuden muutokseen, moottorin pyöriessä vakionopeudella kuormana on ainoastaan kitka, joka esiintyy esimerkiksi ajoneuvon ja mittauslaitteiston laakereissa. Kuitenkin kitkan aiheuttama kuorma on huomattavasti pienempi kuin kuorma kiihdyttäessä, jolloin sitä ei voida pitää merkittävänä. Joten voidaan todeta, että moottorilla ei ole kuormaa, kun inertiadynamometri pyörii vakionopeudella.

### **3.2.2 Kitkajarru**

Ensimmäiset dynamometrikäytössä olleet jarrut ovat olleet puhtaasti kitkajarruja. Kaikista tunnetuin ensimmäisistä jarruista on Prony-jarru. Siinä on mekaaninen kitkajarru, jossa on käytetty puisia jarrupaloja painamaan vasten moottorin pyörittämää vauhtipyörää. Jarruun on kytketty voimavarsi, jonka päähän on kytketty vaihdettavia painoja. (Killedar 2012, 43.)

Jarrupalojen puristusvoimaa vauhtipyörää kohti muuttamalla voidaan kitkajarrun tehoa säätää. Prony-jarrussa kitkavoimaa ja painoa pyritään lisäämään samassa suhteessa, jotta voimavarsi ei ota kiinni rajoittimiin ja moottorin kierrosnopeus pysyisi vakiona. Ainoastaan tässä tilanteessa tehon laskeminen on mahdollista momentin ja kierrosnopeuden yhtälönä. (Kuva 5)





KUVA 5. Prony-jarru (Killedar 2012, 44.)

Perinteisten kitkajarrujen käyttö on nykyään harvinaista (Killedar 2012, 41). Kitkajarrun voidaan toteuttaa myös käyttämällä nykyaikaisia mittalaitteita, mutta muut jarrutyypit ovat osoittautuneet paremmin soveltuviksi dynamometri käyttöön. Kuitenkin vielä nykyäänkin lähes kaikki dynamometrit perustuvat jollain tasolla Prony-jarruun.

### 3.2.3 Hydraulijarru

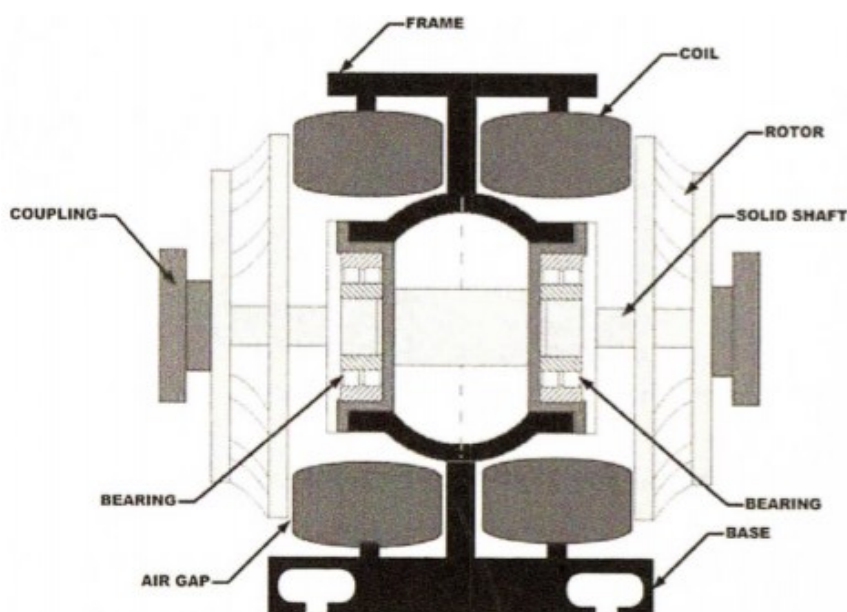
Hydraulijarru pääsääntöisesti koostuu staattorista ja roottorista, joissa on kaarevia kanavia. Kanavien kulma on normaalisti 45 astetta. Jarru voi olla jatkuvasti täytettävä tai säädettävästi täytettävä. Jarrussa virtaava neste pyörteilee kanavissa niin, että se aiheuttaa voimavaikutuksen, joka vastustaa akselin pyörimistä. Jarru toimii niin, että täyttöaste on jatkuvasti täysi ja roottorin pyöriminen aiheuttaa veden virtauksen kanavien läpi. Jarrutustehoa säädetään avaamalla venttiiliä, joka ohjaa veden virtauksen useammalle kanavalle, joka kasvattaa tehoa. Hydraulista jarrua voidaan ohjata myös paineen avulla. (Killedar 2012, 69-70.)

Hydraulisia dynamometrejä käytetään laajasti suurien teollisuus- ja laivamoottoreiden testauksessa. Ne omaavat jarrutyypeistä parhaan tehopainosuhteen. Niitä käytetään moottoreiden mittauksessa, jotka tuottavat yli 3000 kilowatin tehon. (Killedar 2012, 88.)

### 3.2.4 Pyörrevirtajarru

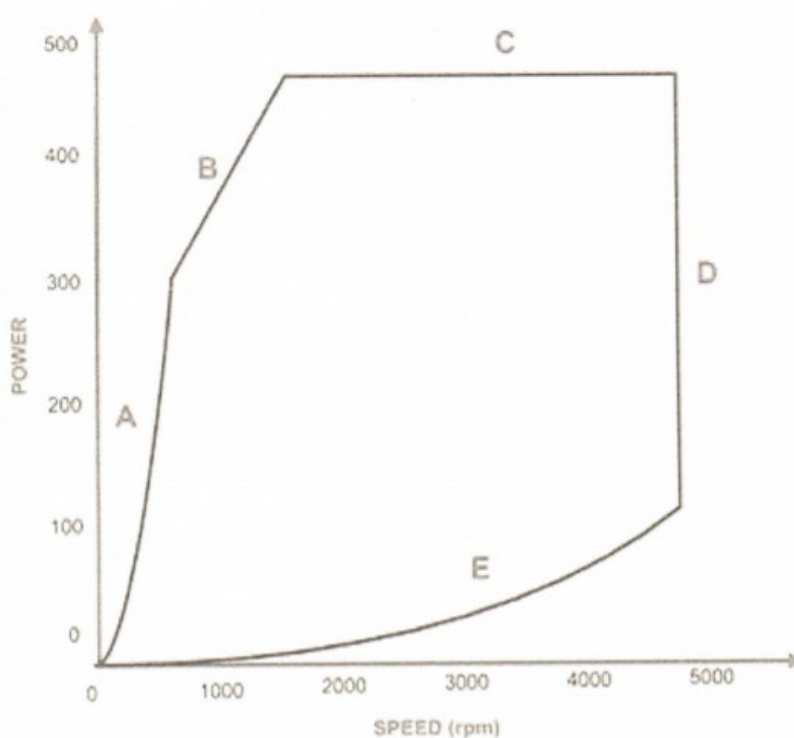
Pyörrevirtajarrun akselilla pyöriviin rottoreihin indusoituu pyörrevirtoja, jotka aiheuttavat pyörimissuunnan vastaisia voimia, joilla kuormitetaan akselia pyörittävää moottoria. Jarrun absorboima teho muuttuu lämpöenergiaksi, joka on poistettava jarrulta ilma- tai vesijäähdytteisesti. Jarrun teho määräytyy sen pyörrevirtojen voimakkuuden mukaan, johon vaikuttaa käämien tuottaman magneettikentän voimakkuus, rottoreiden sähkönjohtavuus ja rottoreiden pyörintänopeus. Virtaa muuttamalla voidaan säätää käämien tuottaman magneettikentän voimakkuutta. Joten jarrun absorboimat voimat ovat suoraan verrannollisia virtaan, joka kulkee jarrun käämien läpi, mitkä ovat kiinnitettynä pyörrevirtajarrun runkoon. (Killedar 2012, 92.)

Ilmajäähdytteinen pyörrevirtajarrun konstruktio on yksinkertainen ja se ei tarvitse muuta huoltoa kuin laakereiden voitelun. Jarrun rungossa on kummallakin puolella käämejä, jotka on kiinnitetty rautasydämiin, jotka ovat osa runkoa. Rungon kummallakin puolella on pyörivät rottorit, jotka on yhdistetty akselilla, joka kulkee rungon keskellä olevan laakeripesän läpi. Ilmajäähdytteisten jarrujen rottorit on suunniteltu niin, että niiden pyöriessä rottorit ja käämit saavat jäähdytysilmaa. Rottoreiden kautta akseliin on kiinnitetty laipat, joiden avulla jarru voidaan liittää haluttuun käyttökohteeseen. (Kuva 6.)



KUVA 6. Pyörrevirtajarrun rakenne (Killedar 2012, 104.)

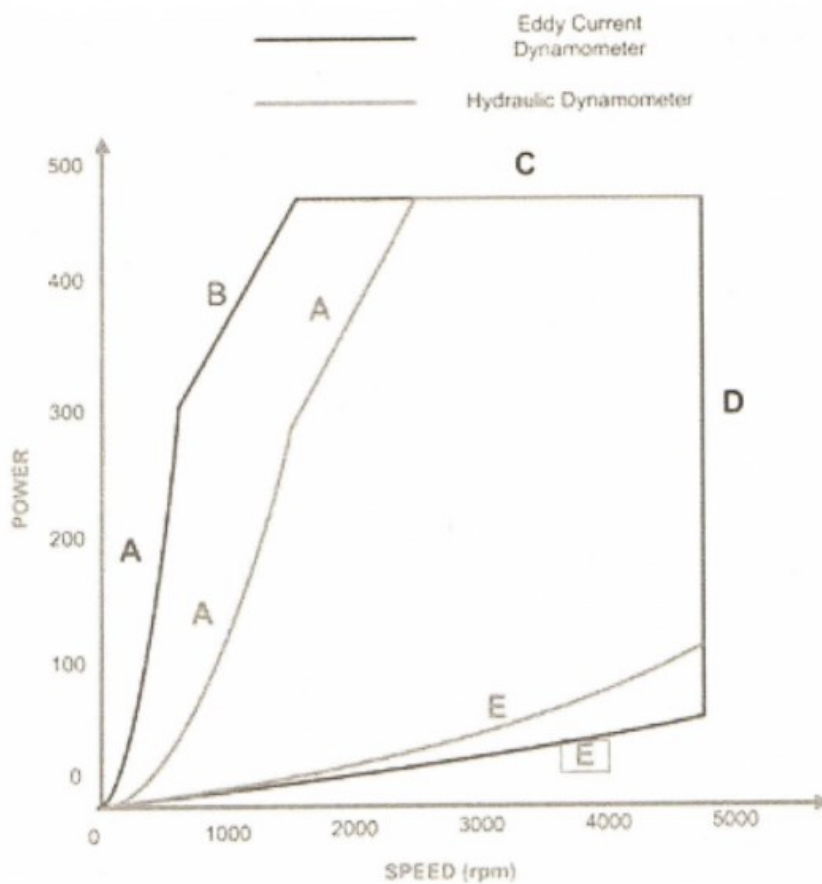
Kuviossa 1 käyrä A kuvaa sitä, kuinka suuren tehon dynamometri pystyy jarruttamaan. Käyrän A muoto riippuu käämien virrasta, roottorien halkaisijasta ja pyörimisnopeudesta. Jana B kuvaa maksimiväännön jarrutuskykyä, johon vaikuttaa akselin kestävyys sekä käämien virta ja roottoreiden kierrosnopeus. Käyrä C kuvaa tilannetta, jossa jarrun tehoa joudutaan rajoittamaan esimerkiksi vaillinaisen jäähdytyksen takia. Suora D kuvaa jarrun maksimipyörimisnopeutta, jonka rajaa laakereiden tyyppi ja voitelu sekä jarrun kiinnitys ja pyörivien osien kriittinen nopeus. Käyrä E sen sijaan kuvaa sitä, mikä on jarrun pienin mahdollinen jarrutus-teho. Sen suuruus on verrannollinen pyörivien osien inertian ja pyörimisnopeuden suhteen (Kuvio 1). Jarrun malli määrää edellä mainitut suoritusarvot, eikä niitä voi muuttaa käytön yhteydessä, vaan jarru on suunniteltu käyttökohteen mukaisesti. (Killedar 2012, 101.)



KUVIO 1. Pyörrevirtajarrun tehokäyrä (Killedar 2012, 100.)

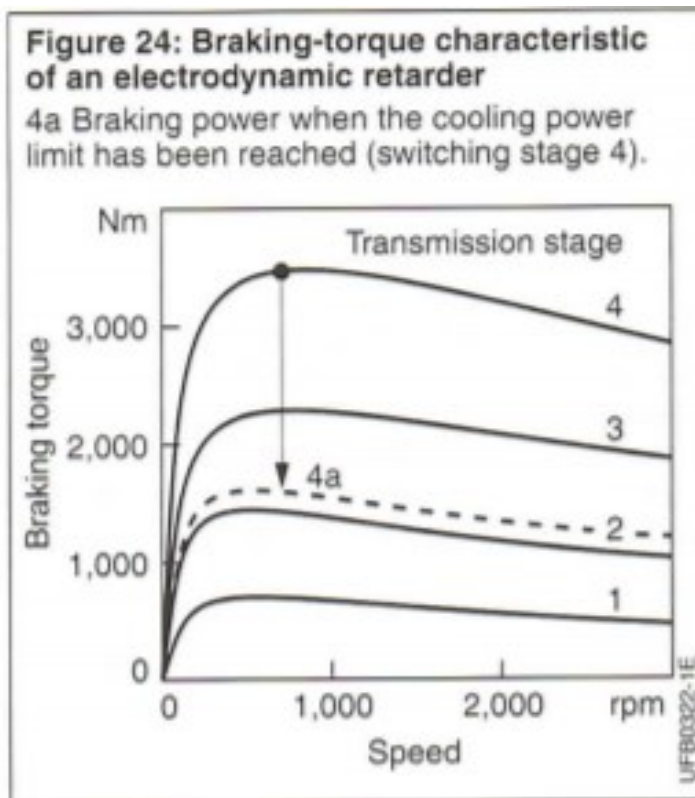
Hydraulisen jarrun ja pyörrevirtajarrun välinen vertailu nähdään kuviossa 2. Kumpikin jarruista on luokiteltu samalle tehokapasiteetille. Kuvaajasta voidaan nähdä, että pyörrevirtajarrulla saavutetaan maksimikapasiteetti aikaisemmin ja laajemmalla alueella. Myös jarrutusteho on parempi pienemmillä kierroksilla,

mutta kuitenkin sen minimi jarrutusteho on myös pienempi kuin hydraulisella jarrulla. (Kuvio 2.)



KUVIO 2. Vertailu (Killedar 2012, 102.)

Pyörrevirtajarruja on käytössä myös kuorma-autojen hidastimina. Niiden käytön perusteena on niiden kulumattomuus, jolla pyritään säästämään ajoneuvon varsinaisia jarruja. Jarruissa on normaalisti 8 tai 16 käämiä ja jarrun tehoa säädetään kytkemällä käämeihin virta vaihteittain. Jarrun tehoa siis ohjataan kytkettyjen käämien määrällä. Jarruissa huonona puolena on tehon pieneneminen lämmetessä, sillä kuumana jarru voi menettää noin puolet jarrutustehosta (Kuvio 3). Jarruissa on usein lämpösuojia, jotka estävät jarrua tuhoutumasta korkeiden lämpötilojen seurauksena. (Bosch 2018, 1122-1125.)



KUVIO 3. Jarrutusteho (Bosch 2018, 1125.)

Pyörrevirtajarrudynamometrejä on laajasti käytössä moottorin testauksessa, esimerkiksi tuotekehityksessä ja laadun valvonnassa. Ne ovat hydraulisia jarruja parempia niiden yksinkertaisen rakenteensa, tarkkuutensa ja hyvän hallittavuutensa takia. Näiden syiden takia ne ovat eniten käytetty jarrutyyppe moottori- ja alustamittausdynamometreissä. Lisäksi ne pystyvät muuttamaan kuormaa suurissa nopeuksissa kaikista jarrutyypeistä tehokkaimmin. (Killedar 2012, 106.)

## 4 TYÖN TOTEUTUS

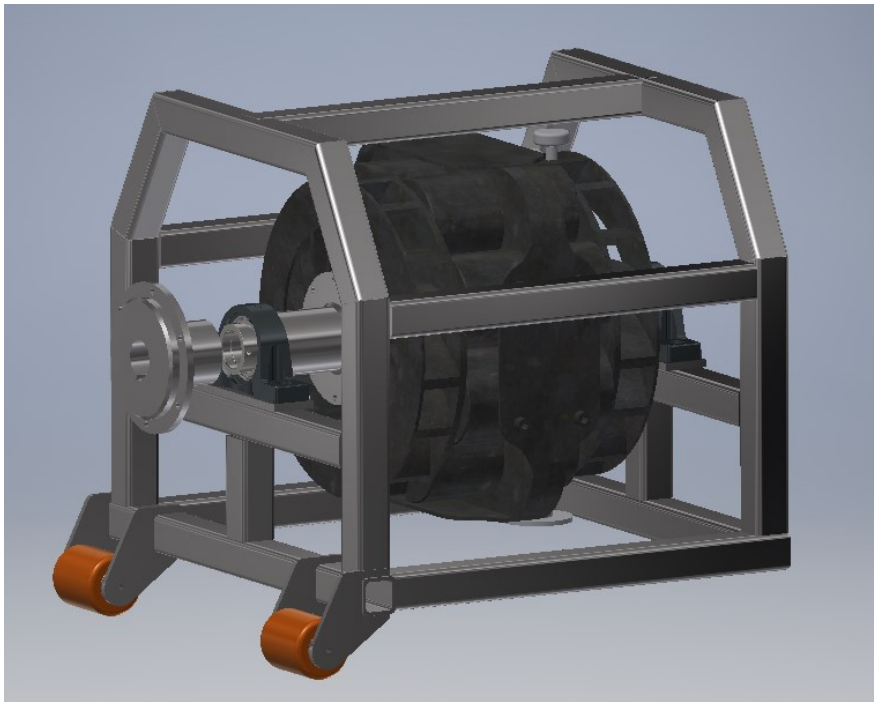
Työn toteutus aloitetaan tutkimalla ja valitsemalla dynamometrin tyyppi ja siinä käytettävä jarrutyyppi. Dynamometrityypiksi valikoituu henkilöautoille tarkoitettu napadynamometri alustadynamometrin sijaan, sillä se on parempi tilankäytön suhteen. Napadynamometrit on mahdollista varastoida helpommin ja pienempään tilaan. Tämä on käytännöllistä, koska niitä ei käytetä päivittäin. Lisäksi niiden kuljettaminen on kokonsa ja painonsa vuoksi vaivattomampaa kuin muiden vaihtoehtojen.

Jarrutyyppiksi valitaan pyörrevirtajarru, sillä sitä on mahdollista ohjata tarkasti ja se mahdollistaa kompaktin laitteen koon. Lisäksi jarrutyyppi on huoltovapaa, ainoastaan akselin laakerointi on kuluva ja vaatii säännöllistä voitelua. Kytettäessä ei myöskään tarvitse kytkeä nestejohtimia, kuten hydraulisessa jarrussa, jonka ansiosta käyttö on siistimpää.

Koska laitteiden valmistus pyritään suorittamaan mahdollisimman kustannustehokkaasti, on päätetty kunnostaa vanhat pyörrevirtajarrut ja muuttaa ne sopimaan uuteen käyttötarkoitukseensa. Lisäksi suunnittelua on muutenkin ohjannut materiaalien saatavuus ja hankintakulut, jotka ovat vaikuttaneet myös laitteen rakenteellisiin ratkaisuihin. Valmistuksessa kaikki suunnittelu, kokoonpano ja koneistus on pyritty suorittamaan itse.

### 4.1 Suunnittelu

Varsinainen työn toteuttaminen aloitetaan suunnittelusta, joka toteutetaan Autodesk Inventor -ohjelmalla. Samalla ohjelmalla tehdään myös simulaatioita, joilla kartoitetaan osien lujuutta ja tehdään saatujen tulosten pohjalta muutoksia suunniteltuihin osiin. Työn ollessa valmis tulisi laitteen olla juuri 3D-mallin näköinen (Kuva 7).



KUVA 7. Valmis 3D-malli

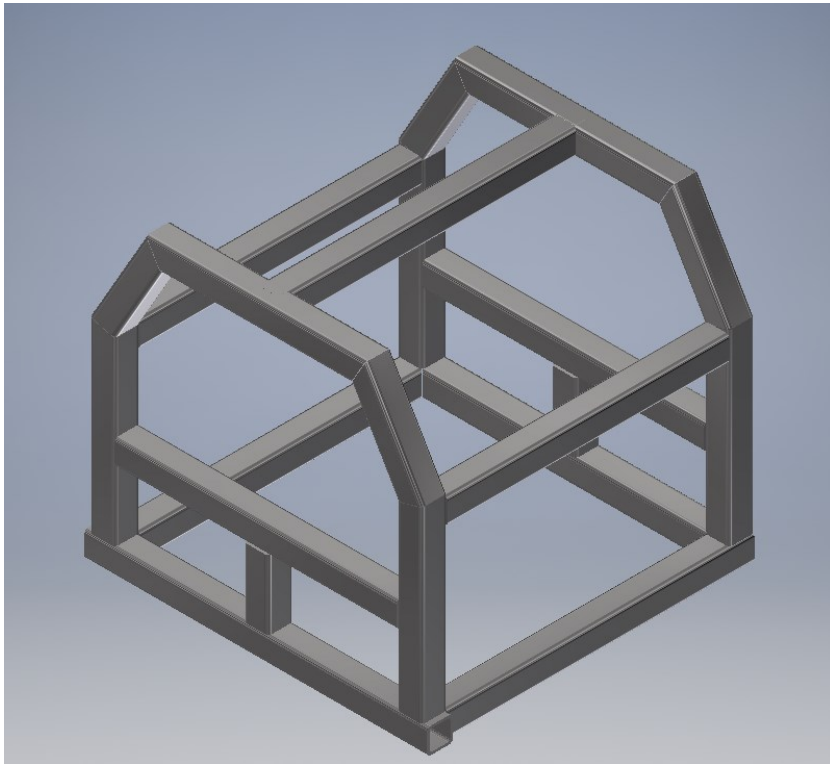
Jokainen osa 3D-mallinnetaan ja suunnittelua ohjaa kappaleiden fyysinen koko, joka määrittää niiden sijoittelun ja laitteen kokonaisuuden. Jarruista kuitenkin pyritään suunnittelemaan mahdollisimman pienikokoiset, jolloin juurikaan ylimääräistä tilaa ei jää. Tästä seuraa se, että valmistusvaiheessa on saavutettava riittävä valmistustarkkuus, jotta laite on mahdollista kokoonpanna.

#### 4.1.1 Runko

Rungon materiaaliksi valikoituu 50x50x5 RHS-putki rakenteellisten ominaisuuksien, hyvän paikallisen saatavuuden ja hinnan vuoksi. Tavoitteena on saada rungosta kestävä ja vääntöjäykkä kyseisellä materiaalilla, kuitenkin säilyttäen mahdollisimman pieni koko ja keveys. Erillisiä putkia sijoitettaessa otetaan huomioon myös käyttöturvallisuus pitämällä rungon aukot pienempinä kuin jarrun roottorin halkaisija, jolloin mahdollisessa vaaratilanteessa roottori pysyy rungon sisäpuolella. Runko suunnitellaan kokoonpantavaksi hitsaamalla. Rungolle suoritetaan suunnitteluohjelmassa lujuussimulointia (Liite 1).

Rungosta tehdään useita versioita suunnittelussa, joista ensimmäiset versiot ovat kolmella tai neljällä laakerilla ja eräänlaisen joustokytkimen käyttöä harkitaan.

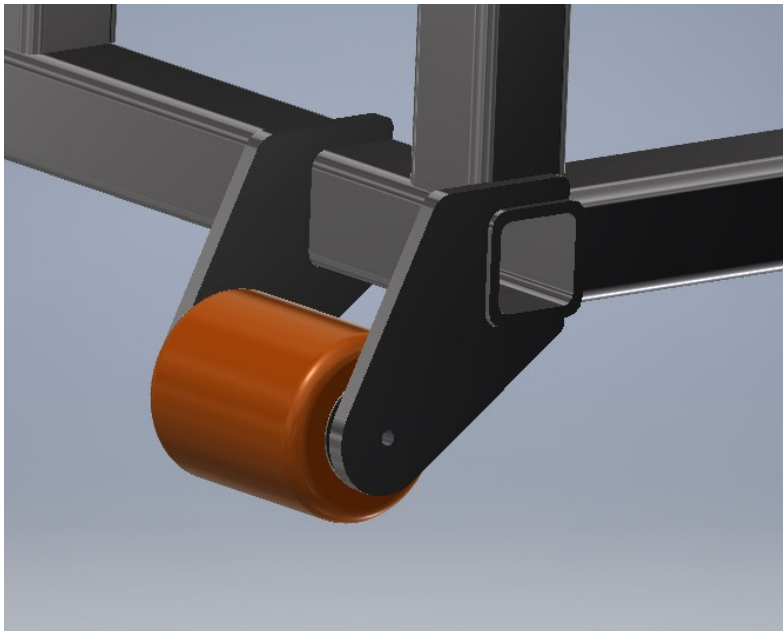
Kuitenkin päädytään vain kahteen laakeripukkiin, koska niiden linjaus on huomattavasti vaivattomampaa. Lisäksi kytkimestä luovutaan, sillä todetaan että auton nivelet ajavat saman asian ja epäillään, että liian löysä kytkin aiheuttaisi oskillointia mittaustuloksiin ja jarrun toimintaan. (Kuva 8.)



KUVA 8. Rungon 3D-malli

Dynamometrin renkaiksi valikoituvat 100 mm leveät ja 82 mm korkeat haarukka-vaunun renkaat, jotka kestävät 700 kilogramman kuorman. Leveisiin ja kohtuullisen korkeisiin renkaisiin päädytään, jotta dynamometriä liikuttaminen tapahtuu helposti epätasaisella lattialla. Renkaiden laipat suunnitellaan laserleikattavaksi, koska niitä tulee valmistaa yhteensä kahdeksan (Kuva 9). Niiden lujuutta arvioidaan suunnittelua varten FEM-simulaatiolla, jossa todetaan niiden riittävä mitoitukseltaan (liite 2).





KUVA 9. Rungon pyörät

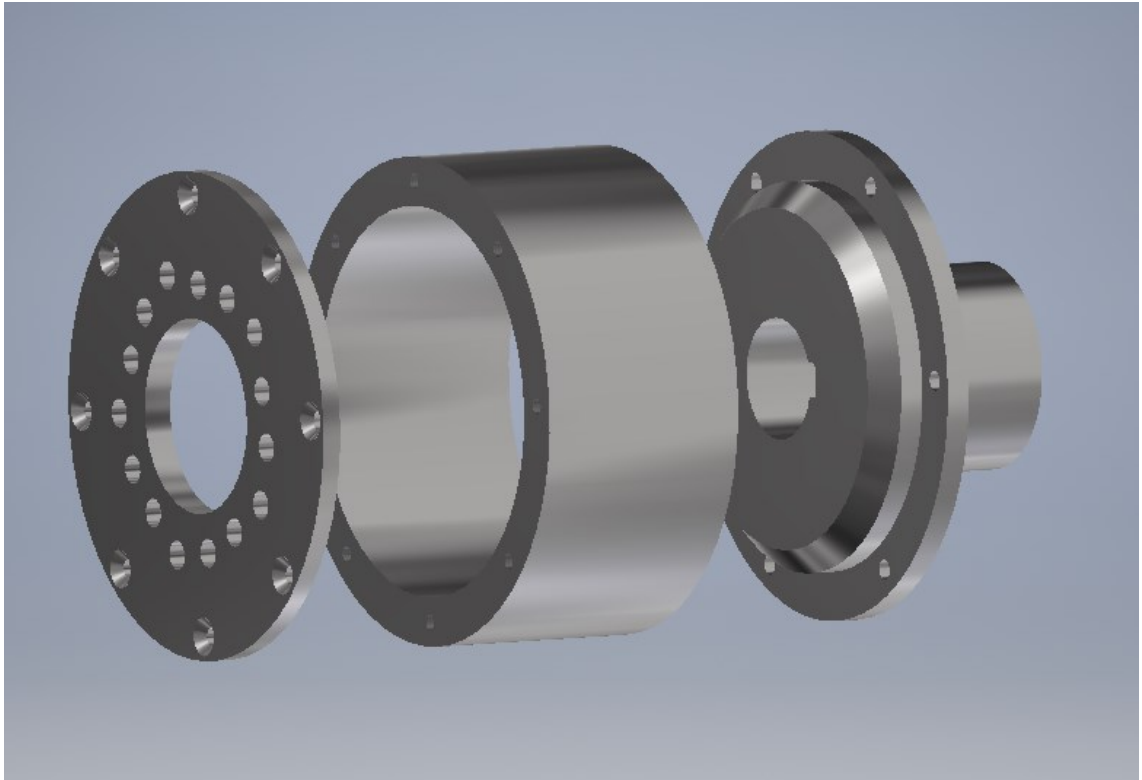
Suurimmassa osassa nykyaikaisista autoista on vetävällä akselilla erillisjousitus, joten suunnittelussa on huomioitava aeraus ja pystykallistuma. Niitä varten on päätetty tehdä runkoon takapyörä, jossa on korkeuden säätö. Säätö on tarkoitus toteuttaa hyödyntämällä valmista mekanismia, jota käytetään perävaunujen tukijaloissa. Joten tätä varten hankitaan korkeussäädettävät tukijalat, joihin suunnitellaan kääntyvät pyörät.

#### 4.1.2 Akselisto

Napadynamometrin suunnittelussa oleellisena osana esittäytyy jarrujen kytkeminen mitattavaan ajoneuvoon, sillä ajoneuvojen pulttijaot vaihtelevat automerkeittäin ja -malleittain. Kaupallisesti hankittavissa dynamometreissa eri pulttijaot on huomioitu vaihdettavilla adaptereilla. Yleensä käytössä on kuppityyliset adapterit, joita vaihdetaan kokonaisuudessaan ja tyypillisesti yhteen adapteriin on koneistettu useampi eri pulttijako. Yhteen adapteriin on mahdollista koneistaa joko 4 eri 4 pulttista jakoa tai 3 erilaista 5 pulttijaokoa.

Tässä opinnäytetyössä on myös päädytty käyttämään kuppityylistä adapteria, mutta on päätetty, että koko adapterin vaihtamisen sijaan päädytään vaihtamaan ainoastaan kytkentälevyä, jolloin materiaalikustannukset ja koneistusajat pysyvät alhaisempina (Kuva 10). Materiaaliksi valikoituu teräs, sillä se kestää alumiinia

paremmin kulutusta ja iskuja, sekä kierteet kestävät paremmin käyttökertoja. Lisäksi helpompi ja edullisempi hankinta vaikuttavat päätökseen. Ainoana huonona puolena on suurempi paino, mutta toisaalta pyörivien osien suurempi massa johdattaa suurempaan inertiaan, jolloin pyörrevirtajarrujen kuormitus pienenee. Kuitenkin saatu hyöty on merkityksellinen.

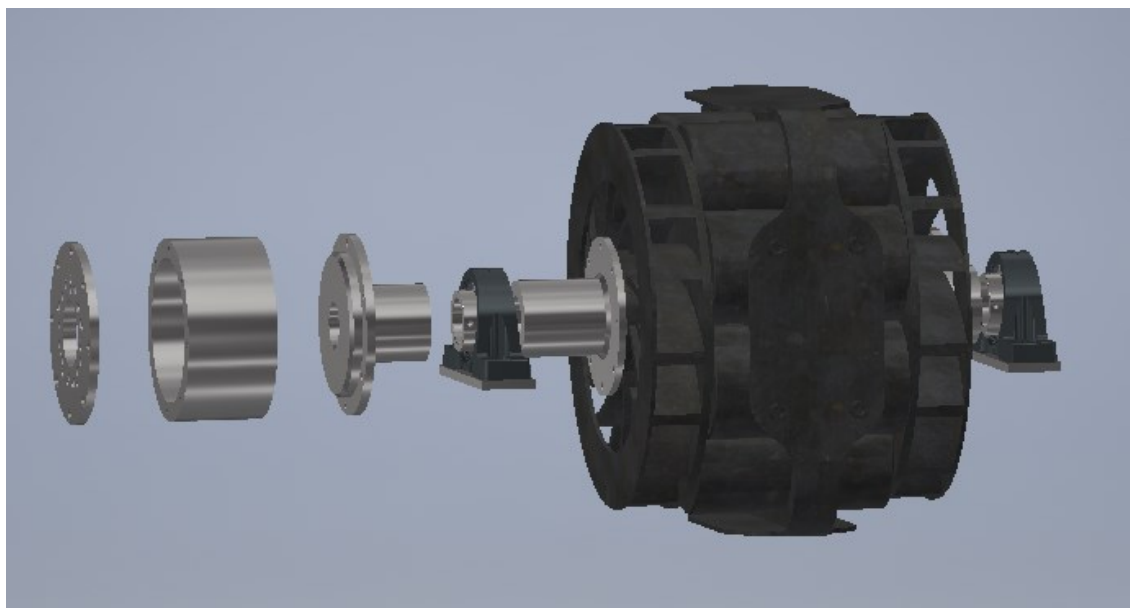


KUVA 10. Napa-adaptteri

Akselimateriaaliksi valitaan kromipinnoitettu 50 mm paksu akseli, joka on valmistettu 20MnV6 materiaalista. Kyseisestä materiaalista valmistettuja akseleita käytetään esimerkiksi hydraulisyliinterien varsissa. Kyseiseen akseliin päädytään, koska vedetyn akselin suoruus ei ole riittävä. Akselille on ilmoitettu suoruus 0,2 mm / 1000 mm. Lisäksi akselimateriaali on helppo koneistaa ja kromipinnoite takaa hyvän korroosion kestävyuden. (IKH n.d.) Halkaisija valitaan käyttämällä mallinnohjelmaa simulointia, jossa akselille asetetaan auton painon kuorma sekä jarrujen maksimi jarrutusmomentti (Liite 3). Kyseisellä akselikoolla on myös mahdollista saavuttaa riittävän suuri momentin välityskyky tasakiilaliitoksella.

Työssä käytettävät pyörrevirtajarrut aiheuttavat lisätyötä akseliliitoksiin, sillä dynamometrikäyttöön suunnitellussa jarrussa on suorat akselit, joissa on kiilaurat. Käytettävissä jarruissa on kuitenkin kuorma-auton kardaanin laipat, jotka ovat

malliltaan SAE 1550/1600. Tämä aiheuttaa sen, että akseleiden liittämiseksi tulee kyseisiin laippoihin tehdä vastalaipat, joista pidemmän akselin laipassa on 100 mm pitkä ja 14 mm leveä kiilaura ja lyhyt akseli voi olla kiinteästi laipassa kiinni. Pidemmän akselin kumpaankin päähän tehdään kiilaliitos, sillä akseliin suoraan hitsaaminen voi vääristää akselin suoruutta ja lyhyempien kappaleiden koneistaminen on helpompaa. Kuvassa 11 nähdään kaikki työssä käytettävät akseliston osat.



KUVA 11. Dynamometrin akselisto

Sallittujen pintapaineiden huomioon ottaminen on muotosulkeisten liitosten mitoittamiselle tärkeää. Korkeista pintapaineista voi aiheutua ongelmia, kuten pintaväsymistä, mankeloitumista, pinnan muokkautumista ja kuoppautumista. Sallittu pintapaine voidaan laskea kaavan 7 avulla, jossa  $C$  on varmuuskerroin ja  $p_0$  on materiaalista riippuva peruspaine. Tässä työssä akselirakenteet on valmistettu teräksestä, jonka peruspaine  $p_0$  on 150 Mpa ja karkaistulle pinnalle 200 Mpa. (Björk, Hautala, Huhtala, Kivioja, Kleimola, Lavi, Martikka & Miettinen 2014, 242-243.)

$$p_{sall} = Cp_0 \quad (7)$$

Työssä on käytetty akseleiden ja napojen välillä tasakiilaliitosta, koska se ei tarvitse yhtä suurta koneistustarkkuutta kuin esimerkiksi ahdistus- tai kutistusliitos.

Lisäksi näiden liitoksien momentin välityskyky ei ole riittävä käytettävällä akseli-koolla. Tasakiilaliitos on yksi muotosulkeisista kiilaliitoksista, jossa kiila on muodoltaan suorakaiteen muotoinen kappale (Björk, ym. 2014, 242).

Tasakiilaliitoksille on määritelty varmuuskertoimet, joihin vaikuttaa kuormituksen laatu. Tässä tapauksessa kuormitus on yksisuuntaista, eikä se ole iskevää vaan yhtäjaksoista. Yksisuuntaiselle lepokuormitukselle on määritetty 0,8:n varmuuskerroin  $C$ . (Björk, ym. 2014, 243.)

Navalle vääntömomentin siirtokyky pintapaineen mukaan voidaan ratkaista kaavan 8 avulla. Kaavassa  $p_n$  on navan pintapaine, joka on ratkaistava kaavan 7 avulla. Kiilaliitoksen kestävyys vaikuttaa suuresti kiilan koko, eli sen pituus  $l$  ja sen navan uran syvyys  $t_2$ . Kiilan koko on määritetty standardissa SFS 2636, jonka määrää akselin koko  $d$ . (Björk, ym. 2014, 246.)

$$M_{v,n} = p_n l t_2 \frac{1}{2} (d + t_2) \quad (8)$$

Akselille vääntömomentin siirtokyky pintapaineen mukaan ratkaistaan kaavalla 9, joka vastaa suurimmaksi osaksi kaavaa 8, mutta erona on akselin pintapaine  $p_a$  ja akselin uran syvyys  $t_1$  (Björk, ym. 2014, 246).

$$M_{v,a} = p_a l t_1 \frac{1}{2} (d - t_1) \quad (9)$$

Navalle vääntömomentin siirtokyky pintapaineen mukaan voidaan selvittää käyttämällä kaavaa 8. Kaavaan on sijoitettu kaavan 7 pintapaineen laskeminen, jossa käytetään teräsnavalle 150 Mpa pintapainetta ja 0,8 varmuuskerrointa. Kiilan kokona 14x9 mm, joka on 100 mm pitkä, sekä akselin paksuutena on 50 mm. Tulokseksi saadaan 1470 Newtonmetria, joka on enemmän kuin käytettävän vakio pyörrevirtajarrun momentti.

$$M_{v,n} = p_n l t_2 \frac{1}{2} (d + t_2) = 150 \cdot 10^6 \text{ MPa} \cdot 0,8 \cdot 0,100\text{m} \cdot 0,0045\text{m} \cdot \frac{1}{2} \cdot (0,050\text{m} + 0,0045\text{m}) = 1471,5\text{Nm} \approx 1470\text{Nm} \quad (8)$$

Akselille vääntömomentin siirtokyky pintapaineen mukaan lasketaan kaavan 9 avulla. Akselille ei ole valmistaja ilmoittanut pintapainetta, joten oletetaan sille karkaistun teräksen pintapaine, joka on 200 Mpa. Akselin kiilauran momentin välityskyvyksi saadaan ratkaistua 1630 Newtonmetria.

$$M_{v,a} = p_a l t_1 \frac{1}{2} (d - t_1) = 200 \cdot 10^6 \text{ MPa} \cdot 0,8 \cdot 0,100 \text{ m} \cdot 0,0045 \text{ m} \cdot \frac{1}{2} \cdot (0,050 \text{ m} - 0,0045 \text{ m}) = 1638 \text{ Nm} \approx 1630 \text{ Nm} \quad (9)$$

Ruuviliitokset pyritään suunnittelemaan niin, että niissä käytetään useampia ruuveja, sillä silloin liitoksen voimat jakaantuvat useammalle kohdalle tasaisemmin, jolloin liitoksesta tulee jäykempi ja luotettavampi. Usein rakenne on mahdollista valmistaa kevyemmäksi pienemmillä ruuveilla. Valmistustekniikat mahdollistavat pienten ruuvien valmistamisen lujemmiksi kuin yli M24 mitalla olevat ruuvit. Ruuvien kiristämiseen käytettävät työkalut ovat pienempiä, jolloin suunnittelussa tilantarve ei rajoita kappaleen rakenteellista kestävyyttä. Lisäksi liitoksesta saadaan helpommin tiivis. (Björk, ym. 2014, 156.)

Dynamometrissä käytetään laippojen toisiinsa kiinnittämiseen moniruuviliitoksia, sillä ne mahdollistavat varman liitoksen tekemisen toistuvasti. Liitoksien ruuvi määrät ja koot määritetään käsin laskien huomioimalla ainoastaan liitoksen välinen kitkavoima. Vaihdeadapterilaipan puolelle valikoituu kahdeksan M8 uppokanta ruuvia, joiden koon määrää ruuvin kannan halkaisija. Jarrun puoleinen liitos tehdään kuudella M10 ruuvilla. Liitoksissa on suuret varmuuskertoimet, mutta ruuvien määrällä varmistetaan, että liitokset asettuvat varmasti pohjaan ja omalle kohdalleen.

### 4.1.3 Dynamometrin ohjaus

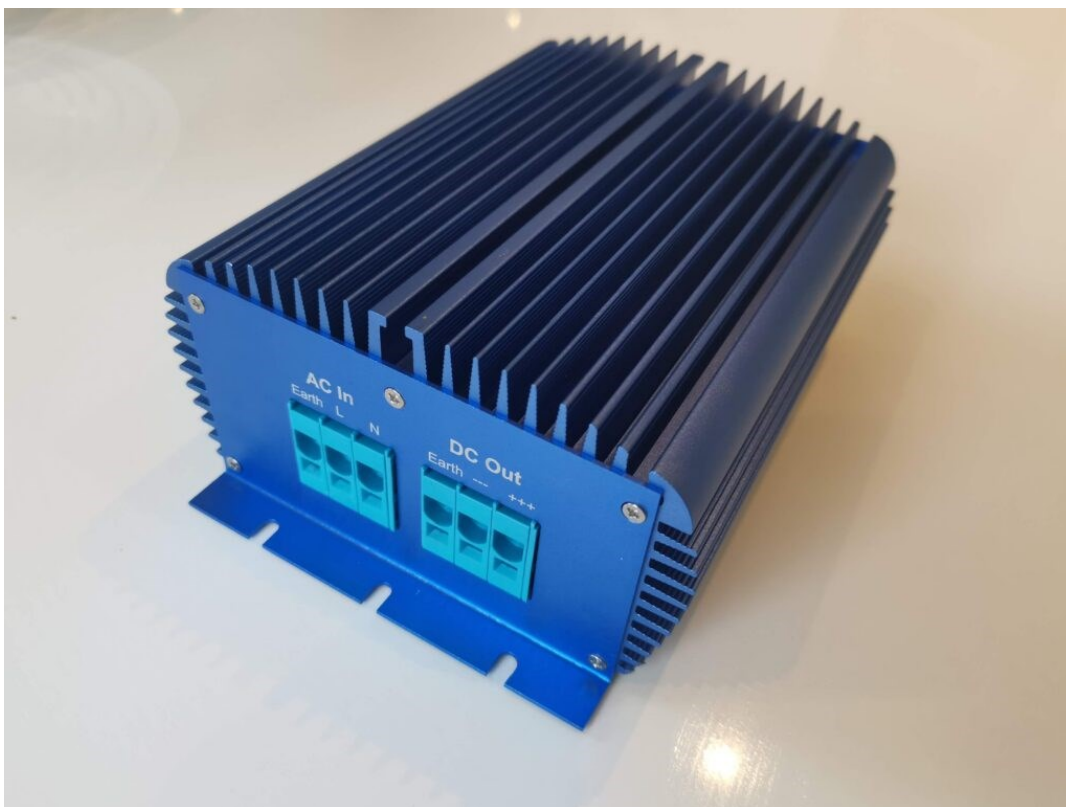
Tehon laskeminen tapahtuu kierrosnopeuden ja momentin tulona kaavan 1 mukaisesti, joten laitteiston on saatava tieto jarrujen kierrosnopeudesta ja jarrutusmomentista. Kierrosnopeutta mitataan impulssipyörältä Hall-anturilla ja jarrun momentti mitataan s-tyyppin voima-anturilla. Lisäksi jarrun tehoa on pystyttävä säätämään nopeasti ja tarkasti.

Selvitetään ohjainlaitteiden soveltuvuutta, saatavuutta sekä hankintahintaa. Selvitystyön tuloksena valitaan ohjainlaitteeksi Fonneland Engineering:n Your-Dyno-ohjainlaite, jollainen myös tilataan Norjasta (Kuva 12). Valinnan perusteena on muiden ominaisuuksien lisäksi myös erinomainen, asiakaslähtöinen ja nopea asiakaspalvelu sekä yrityksen hyvä asiakaspalaute.



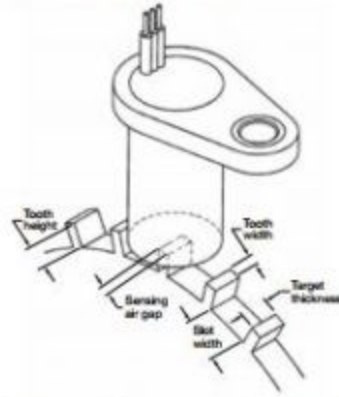
KUVA 12. YourDyno-ohjainlaite (Fonneland Engineering n.d)

Pyörrevirtajarrujen virtalähteiksi valikoituu myös Fonneland Engineering:n tuotteet johtuen jo edellä mainituista syistä sekä tuotteiden erinomaisesta yhteensopivuudesta (Kuva 13). Virtalähde muuttaa verkkovirran 230 V tasavirraksi 192 V ja yksittäisen virtalähteen maksimivirta on 30 A. Korkea jarrun ohjausjännite mahdollistaa saman tehon pienemmällä virralla, jolloin pienemmästä virrasta johtuen sitä voidaan ohjata paremmin. Jännite 192 V vaatii, että kuorma-auto-käytössä olleet pyörrevirtajarrut konfiguroidaan uudelleen 24 voltista korkeampaan käyttöjännitteeseen. Koska käytetään kahta erillistä jarrua, niin myös virtalähteitä täytyy olla kaksi.



KUVA 13. YourDyno-virtalähde (Fonneland Engineering n.d)

Ohjainlaite ei yksistään hoida jarrun säätämistä, vaan siihen vaaditaan antureita, joita ovat pyörimisnopeusanturi ja voima-anturi. Pyörimisnopeusanturina toimii Hall-tyyppin anturi, joka hankittiin samaan aikaan ohjainlaitteen kanssa. Ohjainlaitteen valmistajan ohjeiden mukaan suunniteltiin impulssipyörät (Kuva 14). Valmistajan mukaan pulssien määrä on oltava noin 200 pulssia per sekunti, sillä pyörimisnopeudella, jolta halutaan tarkkoja mittatuloksia (Fonneland Engineering n.d). Levyn hammasmääräksi valitaan 36, koska silloin levyn halkaisija on noin 170 mm ja 200 pulssin raja saavutetaan suurimmalla osalla autoista, kun moottorin kierrokset ovat 1000 kierrosta minuutissa.

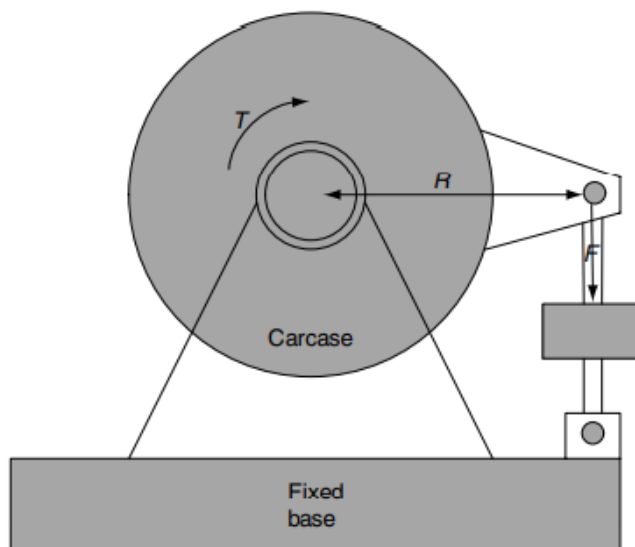
Table 5. Reference Target Dimensions<sup>1</sup>

Characteristic	Parameter
Tooth height	5,06 mm [0.200 in] min.
Slot width	10,16 mm [0.400 in] min.
Tooth width	2,54 mm [0.100 in] min.
Target thickness	6,35 mm [0.250 in] min..

<sup>1</sup>Based on a target diameter of 101,6 mm [4 in] at a rotation of 10 RPM to 3600 RPM.

KUVA 14. Impulssipyörän mitat (Fonneland Engineering, n.d)

Dynamometrin jarruttama vääntömomentti mitataan kuvan 15 mukaisesti anturilla, joka on sijoitettu voimavarren päähän. Itse jarru on asennettu akseliltaan laakereiden varaan, jolloin itse jarruttava keskiö pääsee liikkumaan vapaasti. Kuitenkin keskiön pyörintä estetään kiinnittämällä voimavarsi ja anturi siihen. (Martyr & Plint 2007, 144-146.)



KUVA 15. Voima-anturin sijoitus (Martyr &amp; Plint 2007, 146.)



Tehon laskenta muistuttaa Prony-jarrun toimintaa, mutta keskeisimpänä erona on, että jarrun säätäminen tapahtuu nopeammin ja näytteenottotaajuus on huomattavasti korkeampi. Joten kun jarrua ei käytetä, niin voima-anturin mittaama voima on nolla ja mittauksen aikana jarruvoimaa nostetaan, että kierrokset saadaan pidettyä vakiona. Tällöin kierrosnopeuden ja voima-anturin mittaustuloksen perusteella lasketusta momentista voidaan laskea teho.

Voima-anturi mitoitetaan kaavan 2 avulla, jossa momentiksi on valittu jarrujen valmistajan antama maksimimomentti ja voimavarsi tulee olemaan noin 25-30 senttimetriä pitkä. Anturiksi valikoitui 750 kilogramman s-tyypin anturi, sillä saatu tulos 5000 N on aivan edellisen anturikoon rajoilla, sekä lisäksi on tarkoitus nostaa jarrujen tehoa.

$$M = Fr \rightarrow F = \frac{M}{r} = \frac{1250 \text{ Nm}}{0,25 \text{ m}} = 5000 \text{ N} \quad (2)$$

Korjauskerrointa varten ohjainlaitteessa on sisäänrakennettuna ilmanpaine, -kosteus, ja -lämpötila anturit.

Korjauskertoimena ohjainlaitteessa on mahdollista käyttää seuraavia:

- DIN 70012
- SAE-J1349
- JIS D 1001
- ISO 1585

Käyttöön kuitenkin valitaan SAE-J1349, sillä se on henkilökohtaisen kokemuksen mukaan yleisin Suomessa käytössä oleva tehonmittausstandardi. Ohjelmassa on mahdollista myös itse määrittää oma korjauskerroin.

## 4.2 Pyörrevirtajarrut

Jarruja etsiessä huomataan, että ne eivät ole kovinkaan yleisiä purkamoilla ja toimivien yksilöiden löytäminen on lähes mahdotonta, joten päädytään kunnostamaan vioittuneet (Kuva 16). Yleisyyteen varmasti vaikuttaa se, että hydrauliset

hidastimet ovat syrjäyttäneet pyörrevirtajarrut, sillä ne ovat toiminnaltaan huomattavasti varmatoimisempia niiden umpinaisen rakenteen vuoksi. Työssä käytetyt jarrut ovat rakenteesta ja valmistajan katalogeista päätellen valmistettu ennen vuotta 1994 ja yhden paino on noin 200 kilogrammaa.



KUVA 16. Pyörrevirtajarrut purkamolla

Työtä varten purkamolta hankitut pyörrevirtajarrut ovat peräisin linja- tai kuorma-autoista ja niissä on alkuperäisen käyttötarkoituksen sekä purkamolla varastoinnin seurauksena mekaanisia vaurioita sekä korroosiota. Tarkemman tutkimuksen perusteella jarrut päätetään kunnostaa toimintakuntoisiksi. Toinen kohdejarruista on selvästi huonokuntoisempi, sillä osa sen rungosta on korroosion seurauksena syöpynyt olemattomiin. Lisäksi sen laakerointi on pettänyt, jonka seurauksena akseliston osia on vaurioitunut. (Kuva 17)



KUVA 17. Jarrun kunto lähtötilanteessa

Hankitut pyörrevirtajarrut ovat selvityksen perusteella yhdysvaltalaisen Telman valmistamia ja ovat malliltaan CC125, joiden maksimaalinen jarrutusteho on 1250 Nm. Lisäksi jarrutustehoa pyritään nostamaan uudelleenkääminnän yhteydessä muuttamalla käämilangan paksuutta, jolloin käämien tuottama magnetismi kasvaa, jonka seurauksena myös jarrutusteho kasvaa. Tehon nostamisella tavoitellaan suurempaa mittauskapasiteettia dynamometrille.

Kummassakin jarrussa on vioittuneita käämejä, tästä syystä päädytään käämimään kaikki 32 käämiä uudelleen. Käämien kuntoa selvitetään mittaamalla yleismittarilla vastusta. Käämimistä varten hankitaan käyttöön vanha manuaalinen käämintäkone, joka osoittautuu kuitenkin pyörimisnopeudeltaan liian nopeaksi. Tilanne ratkaistaan asentamalla käämintäkoneeseen taajuusmuuttaja. Sen avulla on mahdollista muuttaa nopeutta portaattomasti, muuttamalla moottorille menevän virran taajuutta (Valtanen 2002, 613-614). Käämimistä varten suunnitellaan ja valmistetaan 3D-tulostusta hyväksikäyttäen käämintämuotti, jonka ympärille käämintä tapahtuu (Kuva 18).



KUVA 18. Käämintäkone

Jarrujen alkuperäiset käämit omaavat  $0,97 \Omega$  vastuksen ja niissä on käytetty noin 2,05 mm paksua käämilankaa. Uudet käämit on valmistettu käyttämällä 2,24 mm paksuja johtimia, jolloin yksittäisen käämin vastukseksi saadaan noin  $0,7 \Omega$ . Tämän seurauksena yksittäisen käämin ottoteho kasvaa, josta seuraa niiden voimakkaampi lämpeneminen. Lisäksi suurempi lanka aiheuttaa sen, että käämin kierroksia on vähennetty 360:sta 340:een. On myös mahdollista kasvattaa tehoa pienentämällä magneettien etäisyyttä pyöriviin roottoreihin, mutta saatava hyöty on huomattavasti pienempi ja jarrujen herkkyys epäpuhtauksille ja mahdolliselle korroosiolle kasvaa, sillä rautaosien ilmarako pienenee. Alkuperäinen ilmarako on noin yksi millimetri ja molemmat jarrut ovat purkamolta tullessaan olleet jumittuneet pyörimättömiksi.

Kääminnän seurauksena käämissä kulkeva virta kasvaa noin 12,4 ampeerista 17,1 ampeeriin. Lisäksi roottoreiden etäisyyttä päätetään vähentää yhdestä millimetristä 0,8:aan millimetriin, sillä jarrut eivät enää altistu samanlaiselle korroosi-

olle ja lialle kuin aikaisemmassa käyttöympäristössään. Käämin tuottama magnetismi lasketaan kaavan 4 avulla, jolloin huomataan, että näin saadaan kasvatettua magnetismia noin 31 %. Tästä seuraa myös jarrutuskapasiteetin kasvu suoraan verrannollisesti (Kaava 3).

$$\begin{aligned}
 B_1 \cdot x &= B_2 \rightarrow \mu_0 \frac{I_1 r^2}{2(r^2 + x_1^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot N_1 \cdot x = \mu_0 \frac{I_2 r^2}{2(r^2 + x_2^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot N_2 \rightarrow x \\
 &= \frac{I_2 \cdot N_2 \cdot (r^2 + x_1^2)^{\frac{3}{2}}}{I_1 \cdot N_1 \cdot (r^2 + x_2^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{17,14A \cdot 340 \cdot ((0,040m)^2 + (0,001m)^2)^{\frac{3}{2}}}{12,37A \cdot 360 \cdot ((0,040m)^2 + (0,0008m)^2)^{\frac{3}{2}}} \\
 &= 1,30917 \approx 31 \%
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Jarrujen rungot hiekkapuhalletaan ja maalataan, huonokuntoisemman jarrun runko vaatii korjausta. Korjaus suoritetaan irrottamalla varalla olleesta erimallisesta CC135 jarrusta tarvittava rungon pala ja se kiinnitetään hitsaamalla. Lisäksi runkojen laakerointi uusitaan ja toisen jarrun akselitiivisteen laippaan joudutaan valmistamaan sorvaamalla uusi korjausholkki laakeririkon yhteydessä vaurioituneen laipan korjaamiseksi. Myös jarrun akseli on vaurioitunut pahasti laakerin kiinnileikatessa, joten myös akseli vaihdetaan vanhemmasta valurunkoisesta CC125 jarrusta. (Kuva 19.)



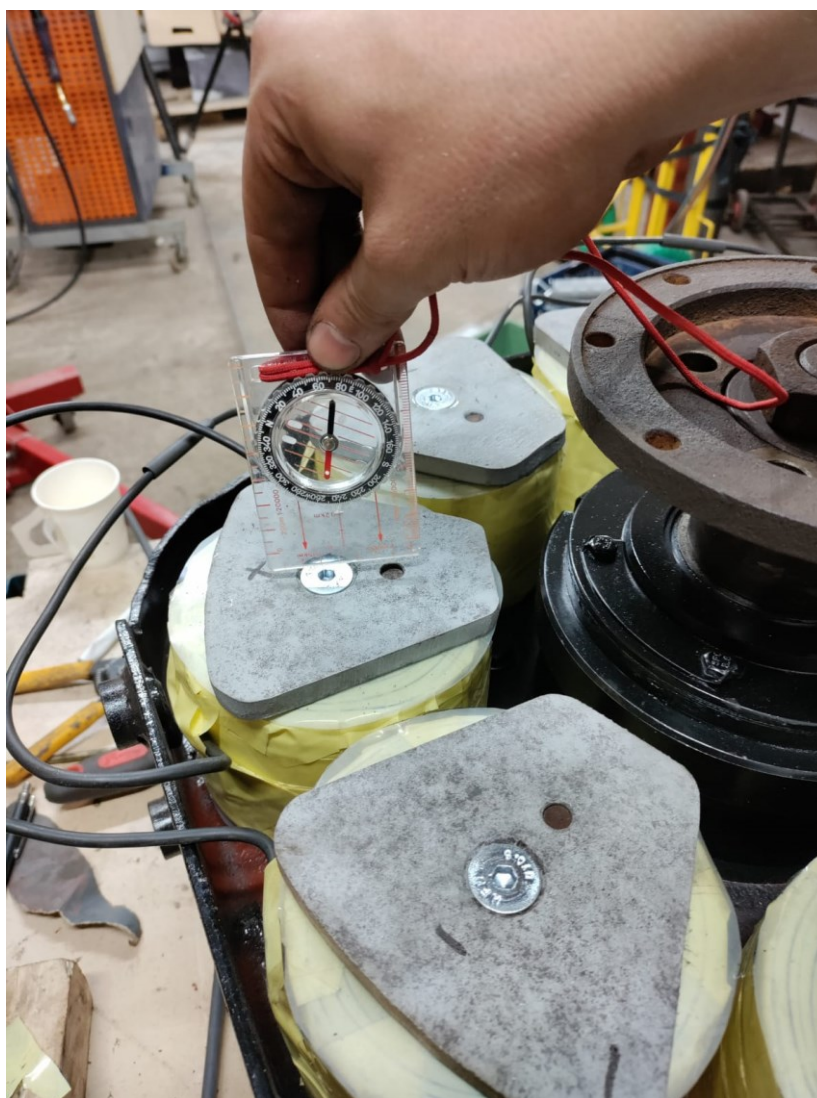
KUVA 19. Jarrun runko kunnostettuna

Ennen käämien paikalleen asentamista akselit ja laakerit asennetaan, sekä rungon osat, joihin käämi on kosketuksissa, maalataan vielä eristemaalilla, jotta läpilyöntiä ei tapahdu. Käämit asennetaan ilman niiden liimaamista paikalleen, sillä vikatilanteessa niitä ei voida liimattuna poistaa ilman käämin tuhoamista (Kuva 20). Lisäksi käämit ovat sisäreiältään tiukkoja runkoon, joten ne pysyvät paikallaan hyvin ilman liimaakin. Riskinä on, että käämit liikkuessaan pääsevät täriseämään, jonka seurauksena käämi tai eriste vaurioituu ja aiheutuu oikosulkuja tai avonainen piiri. Nyt kun käämit on kytketty kaikki sarjaan, niin riittää, että yksi käämi vaurioituu, jotta laite lakkaa kokonaan toimimasta.



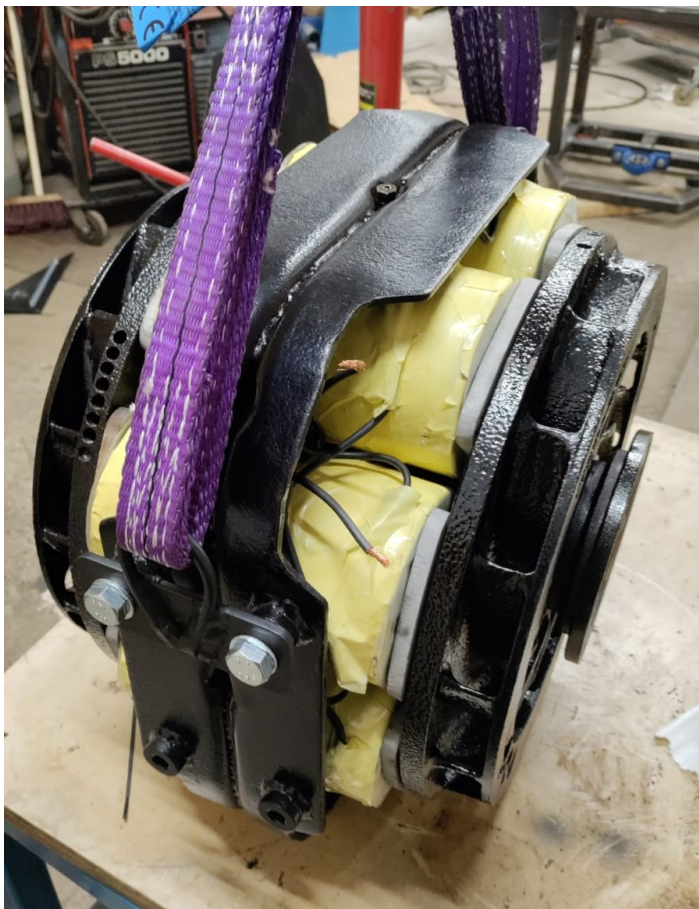
KUVA 20. Käämit asennettuna jarrun runkoon

Jarrut ovat alun perin suunniteltu toimimaan 24 voltin jännitteellä, mutta kytke-  
mällä kaikki käämit sarjaan voidaan käyttöjännite nostaa 192 volttiin. Tämän seu-  
rauksena käytettävä virta pienenee merkittävästi, jonka ansiosta voidaan käyttää  
huomattavasti nopeampaa ja tarkempaa ohjausta. Lisäksi kaapelit ja virtalähteet  
ovat paljon pienempiä. Käämit tulee kytkeä myös niin, että vierekkäisten käämien  
magnetismi on toisiinsa nähden käänteinen. Haluttu kytkentä saavutettiin kytke-  
mällä käämit vuorotellen suoraan ja ristiin, sillä kaikki käämit on käämitty samaan  
suuntaan ja ovat muutenkin keskenään identtiset. Kytkentä pystyttiin tarkasta-  
maan virtalähteellä syöttämällä virtaa käämeille ja tarkistamalla kompassia hy-  
väksi käyttäen magneettien napaisuus (Kuva 21). Jos napaisuus ei ole haluttu,  
niin silloin tulee kytkeä käämin positiivinen ja negatiivinen johdin ristiin.



KUVA 21. Käämien kytkentä

Kun kytkennät ja uudelleen laakerointi on saatu suoritettua, niin voidaan asentaa valurautaiset roottorit. Niiden etäisyys magneetteihin säädetään ohuilla säätölevyillä, joita asennetaan roottorin kytkentäpinnan ja laakeroinnin väliin. Väli mitataan rakotulkilla, ja säätö tapahtuu testaamalla eri paksuisilla levyillä, jotta saadaan asetettua haluttu 0,8 millimetrin etäisyys. Niiden kappalepaino on noin 30 kilogrammaa, joten niiden suuri epätasapaino voisi aiheuttaa suuria ongelmia. Tästä syystä ne hiekkapuhalletaan, jotta saadaan epätasapainoa aiheuttavat epäpuhtaudet poistettua. Ne myös maalataan, jotta korrosio ei pääse vaikuttamaan niihin uudelleen. (Kuva 22.)



KUVA 22. Kunnostettu pyörrevirtajarru

Pyörrevirtajarruja hankitaan yhteensä neljä, joista yksi on sellaisessa kunnossa, että se ei tarvitse korjausosia muista jarruista. Kuitenkin myös kyseisessä jarrussa on vioittunut noin puolet käämeistä. Toinen kunnostetuista jarruista vaatii erilaisia korjaustoimenpiteitä ja osia kahdesta muusta hankitusta jarrusta. Hankintaa tehdessä on ollut jo tiedossa, että toimivat pyörrevirtajarrut purkamoilla ovat todella harvinaisia.



### 4.3 Valmistus

Valmistus aloitetaan valmistamalla dynamometriien rungot ensimmäisenä. Niiden valmistus aloitetaan sahaamalla rhs-putket suunniteltuihin mittoihin ja muotoilemalla päät hitsausta varten, jotta saavutetaan riittävä tunkeutuma. Runkoa hitsattaessa tulee huomioida hitsauksen aiheuttama kutistuminen, joka voi aiheuttaa suuriakin vääristymiä runkorakenteeseen. Tätä pyritään huomioimaan hitsaamalla saumoja osissa, jolloin saumat vaikuttavat eri puolilla rakennetta. Rungot onnistutaan kokoonpanemaan ilman merkittäviä runkolinjan muutoksia (Kuva 23).



KUVA 23. Hitsatut rungot

Runkoon valmistetaan pyörien kiinnikkeet laserleikkaamalla, sillä kappaleita on monta ja niiden muotoilu on monimutkainen valmistaa muilla tavoilla. Samalla valmistetaan voima-anturien kiinnikkeet. Kiinnikkeet kiinnitetään runkoon hitsaamalla. (Kuva 24.)



KUVA 24. Pyörät kiinnitettyinä runkoon

Dynamometrin akseliston laipat ja muut osat valmistetaan manuaalisesti koneistamalla. Laipat valmistetaan hitsaamalla levystä leikatut laipat akseliin. Sitten laipat ensin sorvataan haluttuun muotoon, jonka jälkeen reiät porataan jyrsimen ja kopöydän avulla. Laippoihin kiilaurat valmistetaan prässissä aventimen avulla ja akseleihin urat jyrsitään. Kiilat valmistetaan katkaisemalla ne sahalla haluttuun mittaan ja pyöristämällä päät nauhahiomakoneella. (Kuva 25.)



KUVA 25. Koneistetut osat

Kunnostetut pyörrevirtajarrut asennetaan runkoihin omille paikoilleen moottorinostimen avulla johtuen niiden kohtuullisen suuresta painosta. Ensin asennetaan akselit, jotta jarru voidaan laskea nostimella alas rungon varaan (Kuva 26). Kun osat on saatu asettumaan paikoilleen, voidaan kiristää ruuviliitokset haluttuihin kiristysmomenteihin momenttiavaimella, jotka määräytyvät ruuvityypin mukaan. Kriittisiin liitoksiin on hankittu kovia 10.9 luokan ruuveja.



KUVA 26. Jarru asennettuna runkoon

Kierrosnopeuden mittaamista varten on valmistettava impulssipyörä, joka on tarkoitettu kiinnitettäväksi jarrun taempan laippaan. Itse laippa on valmistettu ylimääräisen CC125 jarrun akselilaipasta sorvaamalla se sopimaan vasta kappaleeseen, samalla on tehty laserleikkaamalla impulssipyörä, joka on kiinnitetty laippaan ruuviliitoksella. Kierrosnopeusanturille valmistetaan teline, joka mahdollistaa anturin etäisyyden säätämisen impulssipyörään nähden (Kuva 27). Teline valmistetaan levystä leikkaamalla ja hitsaamalla. Se pyritään saamaan mahdollisimman tukevaksi, ilman että se on liioitellun painava. Tukevuutta tavoitellaan siksi, että suurilla pyörimisnopeuksilla voi muodostua tärinää, joka liikuttaa anturia lähemmäksi impulssipyörää. Anturin etäisyys pyörään nähden on pieni ja yhteen törmäys voi rikkoa anturin.



KUVA 27. Pyörimisnopeusanturin kiinnike

Voima-anturin kiinnikkeet kiinnitetään runkoon hitsaamalla. Ne pyritään asentamaan mahdollisimman keskelle runkoputkea, sekä mahdollisimman yhden suuntaiseksi sen kanssa. Anturin yläpää kiinnitetään pyörrevirtajarrun kiinnitysruuvien avulla ja pyritään asentamaan anturi pystysuoraan asentoon. (Kuva 28.) Kuitenkaan anturin asennolla ei ole tosin kovin suurta merkitystä, sillä kalibroinnilla voidaan korjata mahdolliset asentovirheet.



KUVA 28. Voima-anturin kiinnike

Koska suurimmassa osassa autoista on erillisjousitus, niin sivukallistuman huomioimiseksi myös kytkettävän dynamometrin on pystyttävä kallistumaan saman suuntaiseksi. Tästä syystä kumpaankin jarruun rakennetaan tukijalka, joka kantattelee jarrun painoa, kun laitetta siirretään, mutta myös mahdollistaa laitteen kallistumisen (Kuva 29). Tukijalka valmistetaan hyväksikäyttämällä korkeussäädettävää perävaunun tukijalkaa, jonka kantoluokitus on 300 kilogrammaa, joten se kestää vaikka koko paino on jalan varassa. Jalan pohjaan valmistetaan pyörälle teline, johon asennetaan pyörä, joka on valmistettu sorvaamalla yhdestä 100 millimetriä leveästä haarukkavaunun renkaasta kaksi noin 50 millimetriä leveää rengasta. Lisäksi tukijalkaan hitsaamalla asennetaan kiinnikkeet, jotka on valmistettu polttoleikkaamalla levystä.



KUVA 29. Dynamometrin säätöjalka

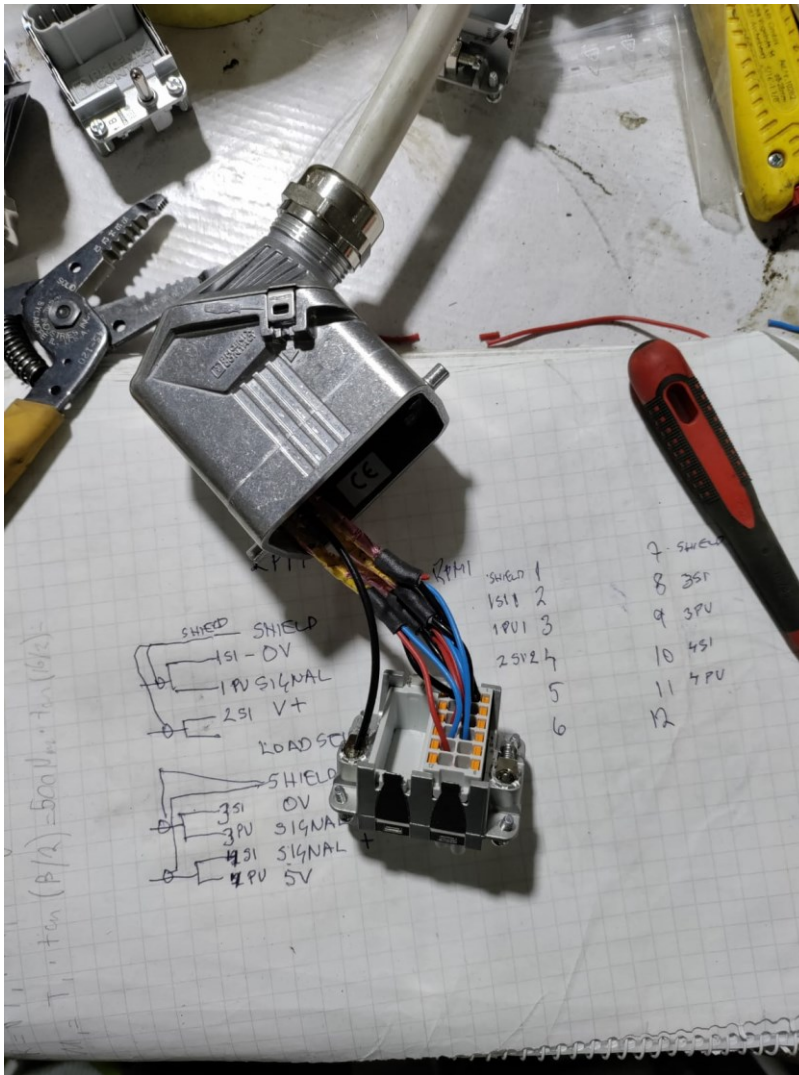
Dynamometrin ohjausta varten hankitaan toimistokäytöstä poistettu pieni tietokone, jolle tehdään pelistä teline, jonka avulla se voidaan kiinnittää näytön taakse kiinni. Myös näyttö on vanha ylimääräiseksi jäänyt. Tehonmittausohjelman teho-vaatimukset ovat pienet, joten koettiin uudemman kaluston hankinta tarpeelliseksi. Laitteisto on rakennettu työkaluvaunun sisälle, jotta se on hyvin liikutettavissa, mutta myös suojassa iskuilta ja laitteisto saadaan tukevasti kiinnitettyä (Kuva 30). Vaunuun tulee voimavirtapistokkeella sähkö, kolme vaihetta on jaettu niin, että kummallekin virtalähteelle on oma vaihe, jolloin 3x16A sulakkeet ovat riittävät. Kolmasvaihe on käytetty laitetta ohjaavaa tietokonetta, sekä vaunun kyljessä olevaa pistorasiaa varten, josta voidaan ottaa sähkö kannettavalle tietokoneelle, jolla voidaan säätää moottorihjainta.



KUVA 30. Ohjauskaappi ilman ovia

Ohjauskaapilta tuleviin johtimiin valitaan liittimet. Jarruja käyttävä tasavirta johdetaan jarruille caravan-tyylisten pistokkeiden kautta, jotka on suunniteltu  $3 \times 2,5 \text{ mm}^2$  kerratulle kumikaapelille. Tällaisiin liittimiin päädytään niiden helpon kytkettävyyden ja saatavuuden takia. Johtimen paksuutta pohditaan jännitehäviön näkökulmasta, mutta todetaan, että käytettävällä lyhyellä matkalla jännitehäviö on kokoluokaltaan noin 2 voltia. Ohjausjohtimia varten saadaan Phoenix Contactilta liittimet, jotka ovat kestävä ja pölytiivit, mutta niiden kokoamiseen ei tarvitse erikoiliitäntäpihtejä (Kuva 31). Liittimet kasataan, niin että ei ole mahdollista asentaa niitä väärään jarruun. Kaapeliksi valikoituu JAMAK häiriösuojattu kaapeli, jossa jokaisella johdin parilla on oma suojaus.





KUVA 31. Ohjausliitin

Suurimmaksi ongelmaksi osoittautuu riittävän osien kohtisuoruuden ja aksiaalisen heittämättömyyden saavuttaminen toisiinsa nähden. Siihen pyritään keskittämällä koneistettavat kappaleet tarkasti heittokellon avulla, sekä osat koneistetaan mahdollisimman vähillä kiinnityskerroilla, jotta siitä aiheutuvalta virheeltä vältytään. Osien tasapainotusta pohditaan, mutta todetaan, että teräksestä tehdyt osien sisäinen tiheys ei vaihtelee juurikaan, joten teräksestä valmistetut pyöreät osat ovat riittävässä tasapainossa käyttötarkoitukseensa. Osista kuitenkin koneistetaan kaikki pinnat ja akseleihin lisätään keskitysreiät tasapainotusta varten, jos testit osoittavat sen olevan tarpeen. Suuremman huolenaiheen aiheuttaa pyörrevirtajarrujen tasapaino, sillä niissä pyörivät osat ovat suuria halkaisijoiltaan, ja tasapaino on todennäköisesti vuosien varrella kärsinyt käytössä ja varastoinnissa. Siitä aiheutunut värinä voi aiheuttaa rakenteiden väsymistä tai pettämistä, joka voi johtaa raskaiden pyörivien osien sinkoutumisen hallitsemattomasti. Tästä

syystä on päätetty myös valmistaa rungon ympärille levystä rakenne, joka estää sirpaleiden leviämisen ilmaan.

#### 4.4 Testaus

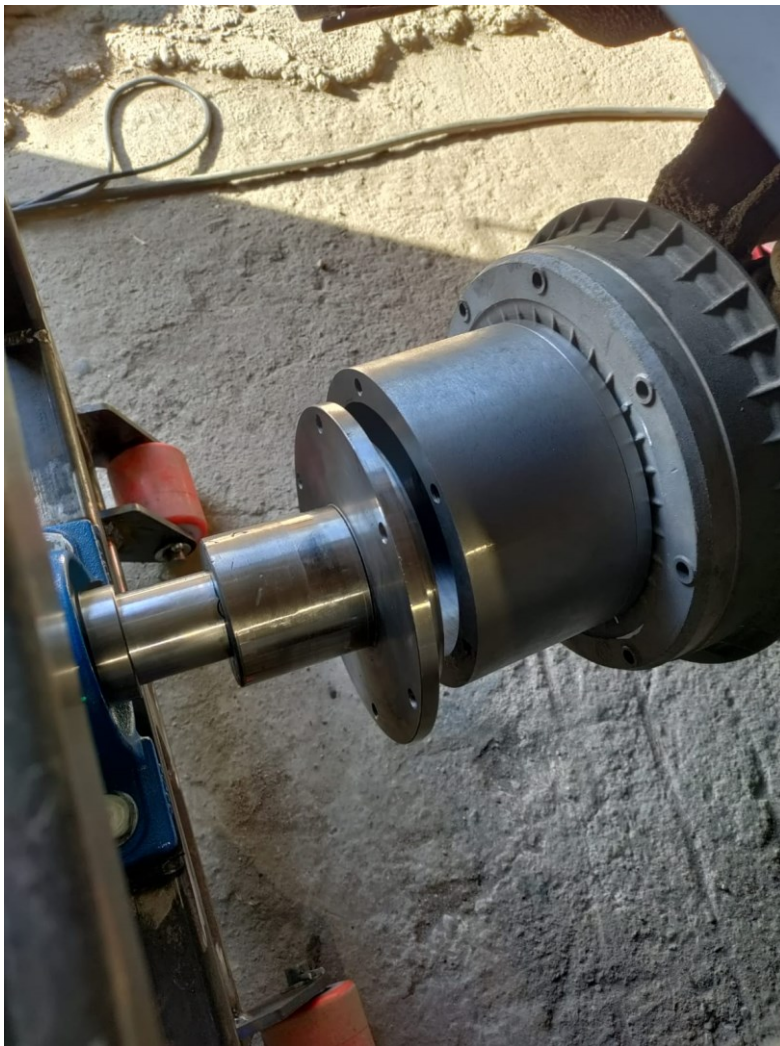
Kun dynamometri on saatu toimintakuntoon, sille suoritetaan testaus. Testien perusteella tehdään havaintoja, kuinka sitä on mahdollista parantaa. Ne tehdään niin, että ne vastaavat oikeaa käyttötilannetta, jotta niiden pohjalta voidaan arvioida laitteiston toimintaa.

Testausta varten on tehty valmiiksi jakoadapterit pulttijaoille, joissa on neljä pulttia. Tästä syystä ensimmäiseksi testiajoneuvoksi valikoitui jälkiahdettu Lada 2105, jonka pulttijako on 4x98. Testaus aloitetaan nostamalla kohdeajoneuvon takapää ilmaan ja irrottamalla renkaat, jotta voidaan asentaa dynamometrin adapterit (Kuva 32). Ajoneuvoon on asennettu pitkät pinnapultit normaalien pyörän pulttien tilalle, joka vaikeutti adapterin asentamista. Tästä syystä todettiin, että pultin reiät voisivat olla isompia, sillä se helpottaisi adapterin asennusta. Kuitenkin rei'issä olevat 60 asteen kartiot takaavat pulttien keskittymisen.



KUVA 32. Jakoadapteri kiinnitettynä

Seuraavaksi adapteriin asennetaan itse dynamometri, joka on linjattava kohtisuorasti adapteriin, jotta sen asennus on mahdollista (Kuva 33). Dynamometrin navan on oltava siis kohtisuorassa vaaka- ja pystysuunnassa. Sääto tapahtuu autoa nostavan tunkin ja dynamometrin säätöpyörän avulla. Kohdeajoneuvossa on jäykkä taka-akseli, joten pystykallistuman säätö on oltava vaaka suorassa. Kohdistusta tehtäessä kuitenkin huomataan, että säätöpyörä kääntyy huonosti epätasaisella betonilattialla, joka johtuu osittain pyörän ja lattian välisestä kitkasta, mutta myös säätöjalan putken sisäisestä kitkasta.



KUVA 33. Adapterin linjaus

Kun molemmat dynamometrijarrut saadaan kiinnitettyä, voidaan laskea tunkki, jolloin auto asettuu dynamometriä akseleiden varaan (Kuva 34) Testaaminen aloitetaan pyörittämällä jarruja ilman, että ne ovat kytkettynä ohjainlaitteisiin. Jarruja pyöritetään aluksi hitaasti ensimmäisellä ja toisella vaihteella. Tällöin on havaittavissa pientä heilumista, joka rauhoittuu kierroksia nostamalla. Tarkemmalla

tarkastelulla huomataan, että kyseinen heitto johtuu auton navoista. Dynamometreja päätetään pyörittää neljännellä vaihteella tyhjäkäynnillä, jolloin heilunta lakkaa kokonaan.



KUVA 34. Napadynamometri kiinnitettynä

Jarruihin kytkettiin seuraavaksi virta- ja ohjausjohdot. Ennen kuin virta kytketään jarrujen virtalähteille, suoritetaan voima-antureiden kalibrointi käyttämällä jatkettua 60 cm voimavartta ja 5 kg painoa. Jotta kalibrointi on mahdollisimman tarkka, tulisi kuorman olla yli 20 % voima-anturin kapasiteettia (Fonneland Engineering, n.d). Tässä tapauksessa se tarkoittaisi 40 kilogrammaa ja metrin vartta tai 20 kilogrammaa ja 2 metrin vartta. Kuitenkaan tällaisia painoja ei sillä hetkellä ole saatavilla, joten kalibrointi on tehtävä vielä uudelleen. Lisäksi testataan kierrosnopeusantureiden toiminta.

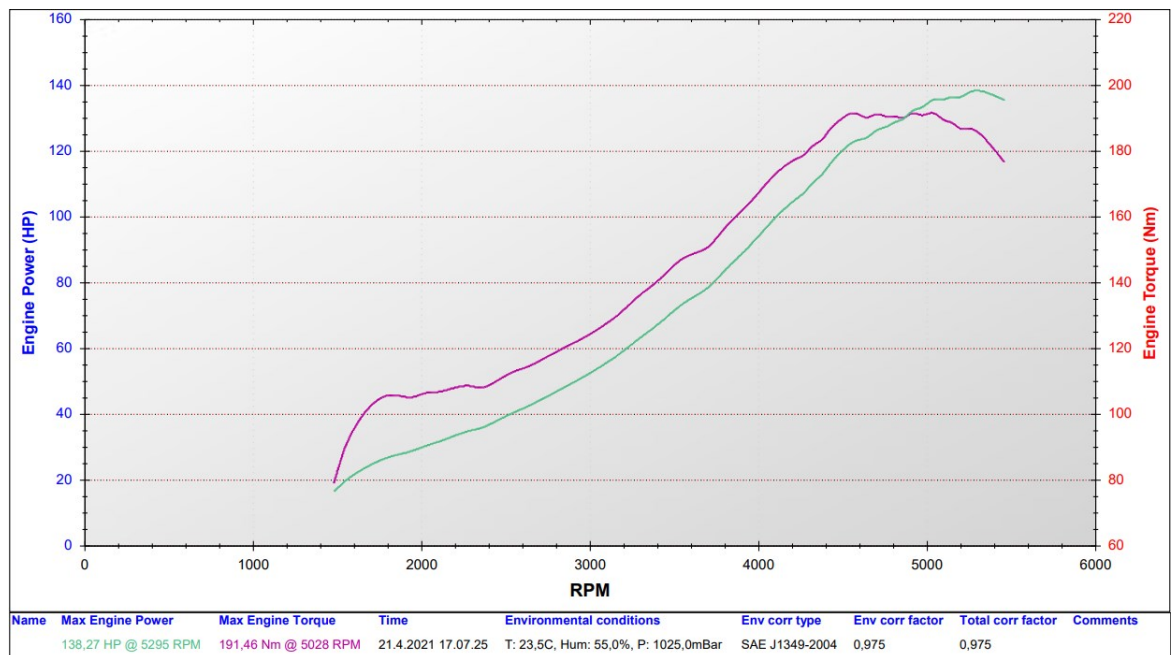
Seuraavaksi kytketään 4.vaihde, joka autossa on suora ja perävälitys on 3,9, jolloin kokonaisvälitykseksi tulee 3,9. Välitys syötetään ohjauslaitteelle, jotta se pysyy laskemaan sen avulla moottorin kierrokset. Sitten kytketään virtalähteet päälle ja käytetään "Manual Brake" tilaa, jossa syötetään kierrosluku, jota dynamometri pitää, kun kierroksia yritetään nostaa. Kierrosnopeudeksi syötetään 2000 kierrosta minuutissa ja painetaan kaasua pohjaan. Kierrokset pysyvät tavoite nopeuden tuntumassa, mutta on havaittavissa merkittävää noin 500 kierroksen oskillointia. Tästä syystä aletaan säätämään ohjainlaitteen PID-ohjaus valikkoa. Säätöjä tehdään kokeilemalla, sillä kyseiset jarrut ovat osittain omavalmisteiset, joten valmiita säätöjä ei ole olemassa. Ensin tehdään säätö ja sen jälkeen kokeillaan vaikutusta ja tätä jatketaan niin kauan, että haluttu tulos saadaan aikaiseksi. (Kuva 35)



KUVA 35. Jarrujen säätö

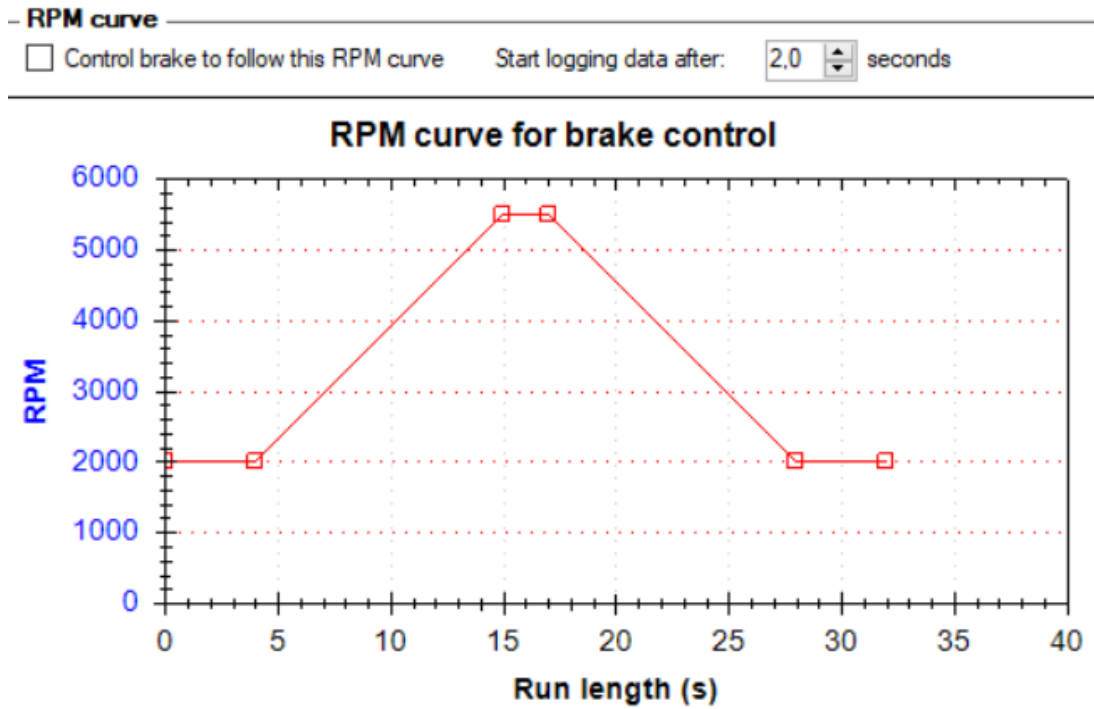
Kun halutunlainen toiminta on saavutettu, suoritetaan ensimmäinen tehomittaus. Mittauksessa käytetään "Power Sweep" tilaa, jossa määritellään aloitus kierrosnopeus, kierrosten nousu per sekunti ja lopetus kierrosnopeus. Aloituskierrosnopeudeksi valitaan 1500 kierrosta minuutissa, kierrosten nousuksi 500 kierrosta ja lopetus kierroksiksi 6500 kierrosta. Mittaus aloitetaan laittamalla kaasua pohjaan, jolloin dynamometri rajoittaa kierrokset aloituskierrosnopeudelle, jota se pitää

asetetun viiveen ajan, tässä tapauksessa 5 sekuntia, jonka jälkeen kierrokset nousevat 500 kierrosta per sekunti, kunnes saavutetaan lopetuskierrosnopeus. Mittausta tehdessä todetaan kuitenkin, että ahdettu moottori ei ehdi muodostaa kunnolla ahtopainetta, vaan kierrokset nousevat liian nopeasti. Seuraava mittaus suoritetaan 250 kierroksen per sekunti kiihtyvyydellä, jolloin mittaus kestää kaksinkertaisen ajan, mutta tulos kuvaa paremmin moottorin toimintaa. Mittauksen jälkeen näytölle tulee näkymään mittaustuloksista muodostettu kuvaaja (Kuva 36).



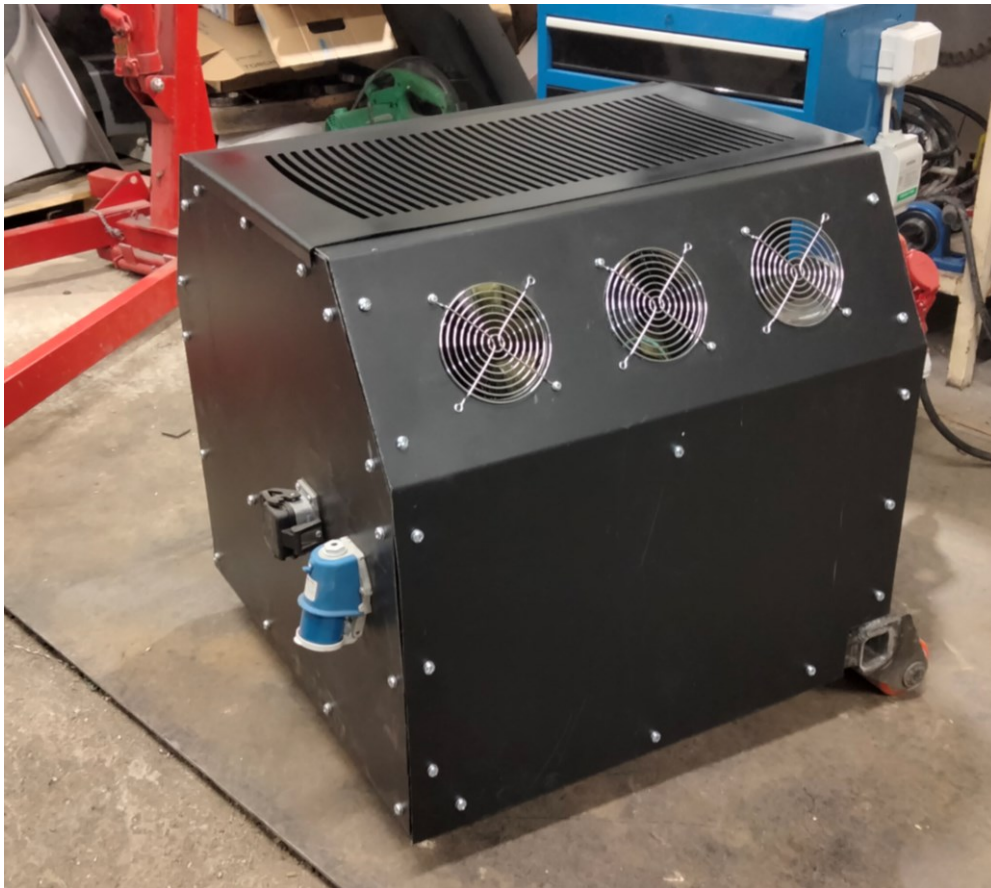
KUVA 36. Mittaustulos

Kun laite oli todettu toimivaksi, niin päätettiin suorittaa inertian kompensaaation säätö. Säätöä varten tulee suorittaa mittaus käyttäen ”RPM Curve” tilaa, jossa määritetään kuvaaja, jonka mukaisesti jarrut säätävät moottorin kierrosnopeutta. Säätöä varten kuvaajan on oltava sellainen, jossa kierrokset ensin nousevat tasaisesti, jonka jälkeen ne laskevat samalla tavalla (Kuva 37). Tuloksen perusteella säädetään inertian määrää niin, että kierrosten noustessa ja laskiessa mitattu teho on mahdollisimman lähellä toisiaan.



KUVA 37. Kierroskäyrän säätö

Kun mittaus suoritetaan, niin kierrokset nousevat tasaisesti, mutta kierrosten las-  
 kiessa esiintyy vakavaa oskillointia, jonka seurauksena ajoneuvon moottorista al-  
 kaa kuulua ei toivottuja ääniä ja moottorin huohotus lisääntyy merkittävästi. Epäil-  
 lyn kohteeksi kohdistuu venttiilikoneisto, josta epäillään venttiilivällyksen säädön  
 päässeen aukeamaan. Sen seurauksena venttiili ei pääse aukeamaan riittävästi,  
 jolloin kampikammion paine kasvaa. Tästä aiheutuu venttiilinostimesta kova ääni  
 ja merkittävä huohotus. Myöhemmät tutkimukset osoittavat, että tilanteesta on  
 seurannut venttiilivällyksien säätöjen aukeamisen lisäksi myös nokkaketjun löys-  
 tynen ja laturin hihnan löystyminen. Joten laitteistoa vielä säädetään ja oskil-  
 lointi saadaan poistettua. Testien suorittamisen jälkeen jarrujen rungot viimeistel-  
 lään ja niihin asennetaan suoja Pellit, jotka estävät pääsyn korkeajännitteisiin ja  
 pyöriviin osiin (Kuva 38).



KUVA 38. Valmis dynamometrijarru

Ensimmäiset testit suoritetaan ilman ylimääräistä jäähdytystä, mutta mittauksien välillä tulee odottaa, että ajoneuvon moottori jäähtyy. Normaalitylanteessa auto on liikkeessä, joten ilmavirta kulkee jäähdyttimen läpi, mutta auton ollessa paikallaan ei jäähdyttimen läpi kulje käytännössä lainkaan ilmaa. Tästä johtuen moottori kuumenee nopeasti aiheuttaen ylikuumentamisen riskin. Tätä varten hankitaan vanha käytöstä poistettu ilmanvaihtopuhallin, jota pyörittää 7,5 kilowatin sähkömoottori. Moottorin suuren tehon takia sille on rakennettava tähtikolmiokäynnistin, joka on huomattavasti edullisempi vaihtoehto taajuusmuuttajalle. Lisäksi puhaltimesta puuttuvat kaikki suojat akselikytkimen ja puhaltimen siivikon edestä, jotka valmistetaan verkosta ja levystä (Kuva 39).





KUVA 39. Jäähdytyspuhallin

Kun järjestelmän kaikki osat on saatu valmiiksi ja säädettyä, testataan ajoneuvon säätämistä dynamometrin avulla. Hyväksikäytetään ominaisuutta, jolla kierrokset voidaan pitää vakiona, jolloin kaasupolkimen asennolla voidaan säätää moottorin kuormaa. Näin saadaan säädettyä ala- ja keskikierrosalueella moottoriohjaimen asetukset. Korkeiden kierroksien säätö tapahtuu Power Sweep:n avulla, jonka aikana moottorista tallennetaan anturitietoja, jonka mukaan tehdään säätöjä. Säädön aikana tehdään muutoksia ainoastaan sytytysennakko- ja polttoainekarttoihin. Huippuvääntö pysyy samana, kun taas huipputeho kasvaa 6 hevosvoimaa ja ahtimen ahtopaineen nostokyky paranee alakierroksilla, jonka seurauksena myös teho ja vääntö keskikierrosalueella nousee. Kuitenkaan maksimi ahtopaineen määrää ei muuteta.

## 5 PÄÄTÄNTÄ

Tavoitteena on ollut valmistaa edullisesti dynamometri ajoneuvokäyttöön ja tavoitteeseen on päästy, sillä laitteisto on hyvin toimiva ja sen valmistuskustannukset ovat vain noin kymmenesosa valmiin laitteiston ostohinnasta. Materiaaleja ja osia pyrittiin hankkimaan mahdollisuuksien mukaan mahdollisimman edullisesti. Tästä johtuen esimerkiksi suojaopellit on valmistettu puretun UPS-kaapin pintapelleistä ja ainesputki, josta adapterit on valmistettu, on toiminut aikaisemmin hydraulisylinterinä.

Varsinkin otettaessa huomioon aikaisempi kokemus koneistuksesta ja dynamometreista, voidaan projektia pitää jopa erittäin onnistuneena. Työ on opettanut todella paljon sähkötekniikkaa ja mekaniikkaa, sekä koneen suunnittelua, sillä korjaamotekniikan opiskelijana näiden aiheiden opiskelu on ollut erittäin rajallista. Myöskin koneistuskokemus on ennestään vähäistä, joten siihen on kulunut huomattavan paljon aikaa, jotta on saavutettu riittävä mittatarkkuus.

Testeissä laitteistolla mitattiin 191 newtonmetrin vääntö kokonaisvälityksen ollessa 3,9 ja jarrujen kierroksien ollessa 1200. Tällöin jarruilla jarrutettava momentti on 745 Nm ja ohjelmiston mukaan jarrujen käyttöaste on 25 %, joten voidaan olettaa, että maksimi jarrutusmomentti on noin 3000 Nm. Tämä tulos on suuntaa antava, sillä jarrujen toiminta ei ole välttämättä lineaarista. Kuitenkin voidaan todeta, että uudelleen käämiminen on ollut onnistunut, sillä vakio-kääminnällä olisi ollut saavutettavissa vain korkeintaan 2500 newtonmetrin jarrutusvoima.

Testit myös osoittavat, että laitteisto soveltuisi myös liiketoiminnan harjoittamiseen. Kuitenkin laite on valmistettu pääasiassa henkilökohtaiseen käyttöön, joten tyypin valintana napadynamometri on erittäin hyvä tilan käytön suhteen. Myös tehon mittaus kapasiteetti on riittävä, sillä suurin osa viritetyistä autoista asettuu noin 300 hevosvoiman teholuokkaan, joka ei kuitenkaan ole edes laitteen maksimikapasiteetti. Ainoana ongelmana voi esiintyä jarrujen nopea lämpeneminen ja tehon lasku, sillä teho muutetaan lähes suoraan lämmöksi.

Säädettävät moottorinohjainlaitteistot ovat yleistyneet virittäjien käytössä, jonka seurauksena niiden säätötarve on kasvanut. Usein esimerkiksi edullisissa jälkiahtamisprojekteissa dynamometriaikaa pidetään kalliina, sillä tuntiveloitus on normaalisti 100 euroa tunnilta. Tyypillisesti säätö tapahtuu kadulla tai radalla, jos dynamometria ei ole käytössä. Ajaessa säätö tapahtuu normaalisti kytke-mällä isoin käytössä oleva vaihde, jolla kierroksien nousu saadaan mahdollisimman hitaaksi maksimi kuormalla. Tällä tavalla moottoria käytetään useita kertoja läpi koko kierrosalueen. Tästä seuraa se, että ajoneuvolla on ajettava usein yli 200 km/h, joka aiheuttaa vaaratilanteita varsinkin yleisillä teillä. Nyt dynamometri mahdollistaa säätämisen tekemisen turvallisemmin paikallaan ja säätäjä voi itse ajaa autoa, jolloin säätökarttoja on mahdollista säätää tarkemmin. Lisäksi muutoksien havainnointi ei ole enää ainoastaan aistien varaista, vaan muutoksen voi todeta dynamometrin avulla.

Seuraavassa rakennettavassa dynamometrissa käytetään uusia valmiiksi dynamometrikäyttöön soveltuvia pyörrevirtajarruja, sillä työssä valtaosa käytetystä ajasta kului pyörrevirtajarrujen kunnostukseen. Aikaa on esimerkiksi kulunut reilusti yli tunti kahdelta henkilöltä jokaista käämittävää käämiä kohden. Lisäksi uudessa jarrussa on myös valmiiksi akselissa kiilaura laipan sijasta.

## LÄHTEET

Banks Power. 2005. Dynamometers: Facts or Fantasy. Luettu 15.3.2021  
<https://official.bankspower.com/magazine/dynamometers-fact-or-fantasy/>

Bell, A.G. 2007. Nelitahtimoottorin virittäminen. Helsinki: Alfamer Oy.

Björk, T., Hautala, P., Huhtala, K., Kivioja, S., Kleimola, M., Lavi, M., Martikka, H. & Miettinen, J. 2014. Koneenosien suunnittelu. 6. painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy.

DYNOMite Dynamometer. 2020. About Dynamometers: Options and Differences. Luettu 25.4.2021  
<https://dynamitedyno.com/tech-corner/about-dynamometers/>

Dyno Tech dynamometer. N.d. PTO Dynamometer history – article 2. Luettu 23.12.2020  
<https://dynotechdynamometer.com/aarons-power-corner/agricultural-pto-dynamometers-1945-present/agricultural-pto-history-page-2/>

Fonneland Engineering. N.d. YourDyno. Luettu 20.9.2020  
<https://yourdyno.com>

Gay, S. 2005. Contactless magnetic brake for automotive applications. Luettu 25.11.2020.  
<https://core.ac.uk/download/pdf/147133091.pdf>

IKH. N.d. Kromioitu tanko 50x1000mm. Luettu 13.3.2021  
<https://www.ikh.fi/fi/kromioitu-tanko-50x1000mm-tekr501000>

Killedar, J. 2012. Dynamometer. Bloomington. Xlibris Corporation.

Mainline DynoLog Dynamometers. N.d. ProHub – 4 AWD Chassis Dynamometers. Luettu 10.2.2021  
<https://mainlinedyno.com.au/index.php/dynamometers/pro-hub-axle-shaft/portable-prohub-dynamometers-2>

Martyr, A.J. & Plint, M.A. 2007. Engine Testing Theory and Practice. 3.painos. UK: Elsevier Ltd.

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2014. Tekniikan kaavasto 13. painos. Tampere: Tammertekniikka.

Oberg, E., Jones, F., Horton, H., Ryffel, H. & McCauley, C. 2020. Machinery's Handbook 31st Edition. 31. painos. USA: Industrial press, Inc.

Peltonen, H., Perkiö, J. & Vierinen, K. 2018. Insinöörin (AMK) fysiikka osa 2.9. painos. Porvoo: Lahden teho-opetus Oy.

Robert Bosch GmbH. 2018. Automotive Handbook. 10. painos. USA. SAE INTERNATIONAL.

SAJ. N.d. Eddy Current Dynamometers. Luettu 20.4.2021  
<https://www.sajdyno.com/products/eddy-current-dynamometers/>

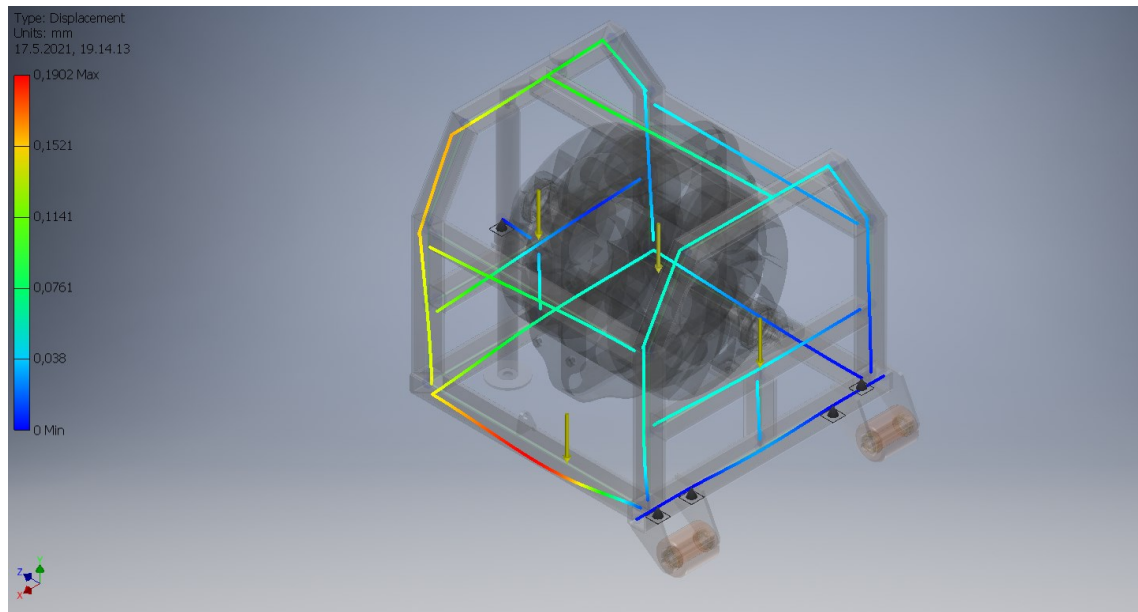
Schneehage, G. 2012. Mootorinohjaus: Tunnistimet. Suomi: Krafthans Verlag  
Walter Schulz GmbH.

Siirilä, T. & Tytykoski, K. 2016, Koneturvallisuuden käsikirja. Keuruu: Inspecta

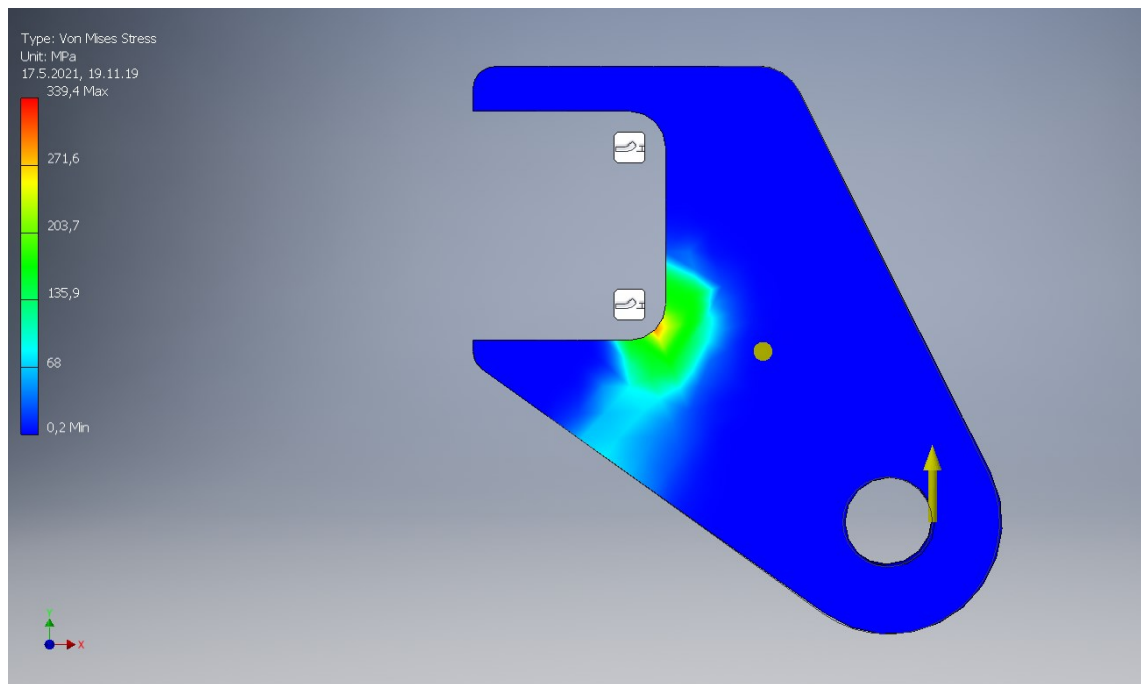
Valtanen, E. 2002. Tekniikan Taulukkokirja. Jyväskylä: Genesis-Kirjat Oy

# LIITTEET

## Liite 1. Rungon simulointi



## Liite 2. Pyörälaipan simulointi



## Liite 3. Akselin simulointi

