



# Lineaariliikeyksikön toiminnan arviointi

**TasoWheel Systems Oy**

Lasse Pylvänäinen

Opinnäytetyö, AMK

Huhtikuu 2021

Tekniikan ala

Konetekniikka, insinööri (AMK)

**Pylvänäinen Lasse**

## **Lineaariliikkeyksikön toiminnan arviointi**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Huhtikuu 2021, 68 sivua

Tekniikan ala. Konetekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

## **Tiivistelmä**

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli TasoWheel Systems Oy. TasoWheel Systems on tamperelainen laitevalmistaja, joka on keskittynyt tarkkaa liikettä tuottavien lineaaritoimilaitteiden valmistukseen ja kehitykseen. Yritys halusi selvittää uuden lineaaritoiminnan tarkkuuden, jotta tiedettäisiin, onko kehitystyö tähän mennessä ollut riittävää. Työ rajattiin lineaaritoimilaitteiden tekniikkaan tutustumiseen, sekä tarkkuuden mittauksiin.

Opinnäytetyössä selvitettiin mitä eri teknologioita lineaaritoimilaitteissa on käytössä ja miten tehty liike todennetaan. Myös mittaus- ja laatutekniikkaan perehdyttiin, mittausten suorittamista varten. Lopussa lineaaritoimilaitteella suoritettiin mittauksia, joissa mitattiin toimilaitteen paikoitustarkkuutta sekä toistotarkkuutta. Osa mittauksista suoritettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun kalibroitilaboratoriossa.

Toistotarkkuuden mittauksissa mittauksia suoritettiin viisi. Toistotarkkuus mittauksissa toimilaitetta ajettiin edes takaisin noin millimetrin välein. Paikoitustarkkuus mittauksissa toimilaitetta liikutettiin koko liikealueella noin millimetrin välein edes takaisin ja toimilaitteen antureiden mittaustuloksia verrattiin ulkoiseen mittalaitteeseen jokaisen liikkeen jälkeen. Saadut mittaustulokset koostettiin kuvaajiksi, jotta niitä voisi analysoida helpommin.

Tulosten avulla toimeksiantaja sai arvion siitä, millä tarkkuusalueella tällä hetkellä ollaan ja minkälaisia virheitä tämänhetkinen kokoonpano tuottaa. Tuloksista ilmeni, millainen mekaniikasta aiheutuva virhe toimilaitteessa on. Mittaukset osoittivat myös sen, että anturointivalinnat ovat sopivat. Tulosten analysoinnin jälkeen selvisi myös, että toimilaitteessa on vielä kehitettävää.

## **Avainsanat (asiasanat)**

Lineaaritoimilaitte, tarkka liike

## **Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)**

Esim. opinnäytetyön liitteen salassapitoperuste, ks. raportointiohjeen luku 4.1.2

**Pylvänäinen Lasse**

### **Evaluation of the operation of linear actuator**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, April 2021, 68 pages

Engineering and technology. Degree Programme in Mechanical Engineering. Bachelor's thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

### **Abstract**

This bachelor thesis was assigned by TasoWheel Systems Oy, based in Tampere. TasoWheel Systems focuses on designing and production precision linear actuators. Company wanted to find out the accuracy of the operation of their new linear actuator product, so that it would be understood has the product development choices been right so far. This thesis considers getting familiar with different linear actuator technologies and making measurements of accuracy with the linear actuator.

To achieve this goal, it was necessary to first get familiar with what kind of technologies are used in linear actuators and how the movement of the actuator is verified. Also, measurement and quality technique were taken in account in order to analyse the measurement obtained results. In the end measurements were made with the linear actuator, where repeatability and accuracy of the movement were measured. Some of the measurements were made in JAMK calibration laboratory.

In repeatability measurements, total five measurements were made. In those measurements, the linear actuator was driven back and forth about every millimetre. Accuracy measurements the linear actuator was driven back and forth about every millimetre and measurements of the sensors of the linear actuator were compared to an external measuring device. Acquired results was then compiled to a graph, so that they were easier to analyse.

With the results company got an estimation, which level of accuracy their product is and which kind of errors their current assembly produce. Results shows, which kind of error comes from the mechanics of the actuator. Measurements also shows that the current choices of sensors are good. After analysing the results, it came clear that there are still improvements to be made in the design of the actuator.

### **Keywords/tags (subjects)**

Linear actuator, precision movement

### **Miscellaneous (Confidential information)**

For example, the confidentiality marking of the thesis appendix, see Project Reporting Instructions, section 4.1.2

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>4</b>
1.1	Työn taustaa.....	4
1.2	TasoWheel Systems Oy .....	4
1.3	Tavoitteet ja aiheen rajaus.....	5
<b>2</b>	<b>Lineaariyksiköiden toiminta .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Lineaariliikkeen tuottaminen .....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Tarkan lineaariliikkeen tuottaminen .....</b>	<b>9</b>
4.1	Ruuvityypit .....	9
4.1.1	Trapetsikierre.....	10
4.1.2	Kuularuuvi.....	11
4.1.3	Rullaruuvi.....	13
4.2	Pietsotoimilaitteet.....	14
4.3	Menetelmien vertailu.....	16
<b>5</b>	<b>Siirtymän mittaus .....</b>	<b>17</b>
5.1	Analogiset anturit.....	18
5.1.1	Potentiometrit .....	18
5.1.2	Kapasitiiviset anturit .....	19
5.1.3	Pyörrevirta-anturit.....	20
5.1.4	Induktiiviset anturit .....	20
5.2	Digitaaliset anturit.....	21
5.2.1	Pulssianturi .....	21
5.2.2	Magneettinauha-anturit.....	22
5.3	Antureiden vertailu .....	24
<b>6</b>	<b>Mittaus- ja laatutekniikka .....</b>	<b>24</b>
6.1	Mittavirheet .....	25
6.2	Mittausepävarmuus .....	26
<b>7</b>	<b>Työn toteutus .....</b>	<b>27</b>
7.1	Testattava laite.....	27
7.2	Mittaussuunnitelma .....	28
7.3	Testilaitteisto.....	29
7.3.1	Mittavarmuus .....	30
7.4	Mittauksien suoritus .....	30

<b>8 Tulokset ja analysointi .....</b>	<b>32</b>
8.1 Toistotarkkuus.....	32
8.2 Liikkeen tarkkuus.....	36
<b>9 Pohdinta.....</b>	<b>39</b>
<b>Lähteet .....</b>	<b>41</b>
<b>Liitteet .....</b>	<b>46</b>
Liite 1. Kalibrointitodistus .....	46
Liite 2. Toistotarkkuuden mittauspöytäkirja .....	49
Liite 3. Tarkkuuden mittauspöytäkirja .....	54
 <b>Kuviot</b>	
 Kuvio 1. Esimerkki lineaarivaihteesta (Mini Linear Actuator n.d.).....	6
Kuvio 2. Kuvaus tarkkuudesta ja toistettavuudesta (Rosengren. 2014, muokattu).....	7
Kuvio 3. Linearijohde (Linear Guide Guide n.d.) .....	7
Kuvio 4. Hydraulisylinteri (Gannon. 2017, muokattu) .....	8
Kuvio 5. Lineaarivaihteen toimintaperiaate (Linear Actuators n.d. Muokattu) .....	9
Kuvio 6. Esimerkki trapetsikierreruuvista (Selecting the Optimal Screw Technology. n.d.) .....	10
Kuvio 7. Kuularuuvin läpileikkaus (Adams. 2020).....	11
Kuvio 8. Kuularuuvin palautuskanavat (Layosa. 2016, muokattu) .....	12
Kuvio 9. Eri rullaruuviratkaisut. Vasemmalta oikealle: planetaarirullaruuvi, käänteinen rullaruuvi ja kiertävä rullaruuvi. (Ewellix roller screw catalog n.d. Muokattu).....	14
Kuvio 10. Piezopino (Collins. 2015).....	14
Kuvio 11. Leikkausvoimaan perustuva pietso pino (Collins. 2015).....	15
Kuvio 12. Putkimallinen pietsorakenne .....	15
Kuvio 13. Supistuva pietsotoimilaite (Collins. 2015, muokattu).....	16
Kuvio 14. Potentiometrin toimintaperiaate (Potentiometer: Definition, Types, And Working Principle. 2020, muokattu) .....	18
Kuvio 15. Kapasitiivisen anturin toiminta (Kinney, T. 2001, muokattu).....	19
Kuvio 16. Pyörrevirta anturin toiminta (Eddy Current Sensors. 2014, muokattu).....	20
Kuvio 17. Induktiivisen anturin toiminta (Position Sensors n.d. Muokattu) .....	21
Kuvio 18. Pulssianturin toimintaperiaate (Schweber. 2018, muokattu) .....	22
Kuvio 19. Hall anturin toimintaperiaate (Hall Effect Sensor n.d. Muokattu) .....	23
Kuvio 20. Magneettinauhan rakenne sivusta ja päältä (Collins. 2018, muokattu).....	23
Kuvio 21. Testattava toimilaite .....	27
Kuvio 22. Mittaus- ja ohjausohjelmiston käyttöliittymä.....	30

Kuvio 23. Toimilaite toistotarkkuus mittauksessa .....	31
Kuvio 24. Toimilaite JAMK kalibrointilaboratoriossa .....	32
Kuvio 25. Kuvaaja kolmannen liikkeen jälkeen saaduista mittaustuloksista.....	33
Kuvio 26. Mittaustuloksen etenemä.....	34
Kuvio 27. Satunnaisvirhe mittaustuloksissa.....	35
Kuvio 28. Mittaus etenee aaltomaisesti .....	35
Kuvio 29. Kaikki mittauskerrat koostettuna yhden mittapisteen osalta .....	36
Kuvio 30. Tarkkuus mittausten keskiarvo eteenpäin tehdyssä liikkeessä .....	37
Kuvio 31. Tarkkuus mittausten keskiarvo palaavassa tehdyssä liikkeessä .....	38
Kuvio 32. Pulssiantuin tulos, josta lineaarinen virhe on korjattu .....	39

## **Taulukot**

Taulukko 1. Menetelmien vertailutaulukko.....	17
Taulukko 2. Antureiden vertailua.....	24

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn taustaa

Lineaaritoimilaitteille kehitetään jatkuvasti uusia käyttökohteita ja yksi nykyinen trendi on korvata perinteisiä hydrauliiikka ja pneumatiikkasyylintereitä sähkömekaanisilla lineaaritoimilaitteilla. Lineaaritoimilaitteissa etuina on liikkeen tarkkuus ja voima, helppo säätöisyys ja hyvä liikkeen hallinta mahdollisuus. Voimakkaan ja tarkan liikkeen saavuttaminen on monen lineaaritoimilaitte valmistajan kilpailuvaltti, mutta siihen vaaditaan anturoinnin tarkkaa toimintaa ja osien tarkkaa valmistusta. (Eitel. 2019)

Käyttökohde vaikuttaa ratkaisevasti lineaaritoimilaitteelta vaadittaviin eri ominaisuuksiin ja toimilaitteessa käytettäviin teknologioihin. Suunnittelijan on siis syytä tietää, mitä ominaisuuksia eri teknologioissa on, jotta toimilaitteesta saadaan käyttökohteessa toimiva ja kestävä. (Lewotsky. 2007)

TasoWheel Systems Oy halusi selvittää uuden tuotteen toiminnan tarkkuutta, jotta tiedettäisiin, onko tuotteessa vielä kehityskohteita tai parannettavaa. Lisäksi toiminnan tarkkuuden ollessa riittävä, tuo tieto siitä lisäarvoa myös tuotteen markkinointiin. Mittaustuloksia voidaan esitellä mahdollisille asiakkaille tuotteen toimintaa todentavana tietona.

Tuote on yritykselle uusi, joten aikaisempaa tietoa toiminnasta tai mahdollisista haasteista ei toiminnan kannalta ole. Toiminta selvitetään tekemällä mittauksia toimeksiantajan tarjoamalla mitauslaitteistolla.

## 1.2 TasoWheel Systems Oy

TasoWheel Systems Oy on Tampereella toimiva yritys, jonka osaamisalueeseen kuuluu lineaaritoimilaitteet. TasoWheel Systems on osa TasoWheel Groupia, johon kuuluu myös TasoWheel Tikka ja TasoWheel Gears. TasoWheel Gears on erikoistunut hammaspyörien ja vaihteistojen valmistukseen, kun taas TasoWheel Tikka on erikoistunut hydrauliiikkakomponentteihin. Tampereen lisäksi yrityksellä on toimipiste myös Tikkakoskella. (Company Profile n.d.)

TasoWheel Systems Oy on erikoistunut tarkan liikkeen tuottamiseen. Yritys toimittaa toimilaitteita pääasiallisesti paperi- sekä terveysteollisuuden asiakkaan tarpeiden mukaisesti. Yrityksen kilpailuvalttina on tarkkojen osien valmistus, sekä tarkkaa liikettä vaativien toimilaitteiden valmistus. (Company Profile n.d.)

### 1.3 Tavoitteet ja aiheen rajaus

Tavoitteena on tutustua ensin lineaariyksiköiden eri toimintaperiaatteisiin, erityisesti tarkan liikkeen toteuttamiseen ja myös siihen, miten tehty liike todennetaan. Myös mittaus- ja laatutekniikkaan perehdytään, jotta mitattuja arvoja voitiin analysoida. Lähteinä käytetään alan kirjallisuutta, sekä myös ajankohtaisia internet lähteitä. Tällä pyritään etsimään uusinta tietoa aiheiden tiimoilta. Tutkimusmenetelmänä sovelletaan kehittämistutkimusta.

Työn käytännön toteutuksessa suoritetaan mittauksia lineaariyksikön eri parametreista kuten toistotarkkuudesta ja paikoitustarkkuudesta. Saaduilla mittatuloksilla pyritään arvioimaan lineaariyksikön mekaanista tarkkuutta.

Opinnäytetyöllä pyritään vastaamaan siis seuraaviin kysymyksiin:

- Miten lineaariyksiköt toimivat ja miten tarkka liike voidaan toteuttaa?
- Onko uuden tuotteen toiminnan tarkkuus riittävä?
- Onko mittaustulokset riittävän tarkkoja?
- Mitkä seikat vaikuttavat tuotteen toimintaan?

Työ rajautuu tuotteeseen tutustumiseen ja mittauksiin, jonka jälkeen tuloksia analysoidaan ja sen pohjalta arvioidaan kyseisen tuotteen toimintaa. Työn ulkopuolelle jää jatkokehityskohteiden toteutus, sekä muu konkreettinen tuotteen kehitystyö.



## 2 Lineaariyksiköiden toiminta

Lineaariyksikkö (ks. kuvio 1.) on mekaaninen laite, joka muuttaa ulkoisen energian suoraviivaiseksi lineaariseksi liikkeeksi. Käyttövoima, jota lineaariyksiköt käyttävät voi olla sähköistä, hydraulista tai pneumaattista. Tuotettua liikettä voidaan käyttää esimerkiksi nostamiseen, työntämiseen, puristamiseen tai vaikkapa liikkeen estämiseen riippuen hieman lineaariyksiköstä. (Linear actuator guide n.d.).

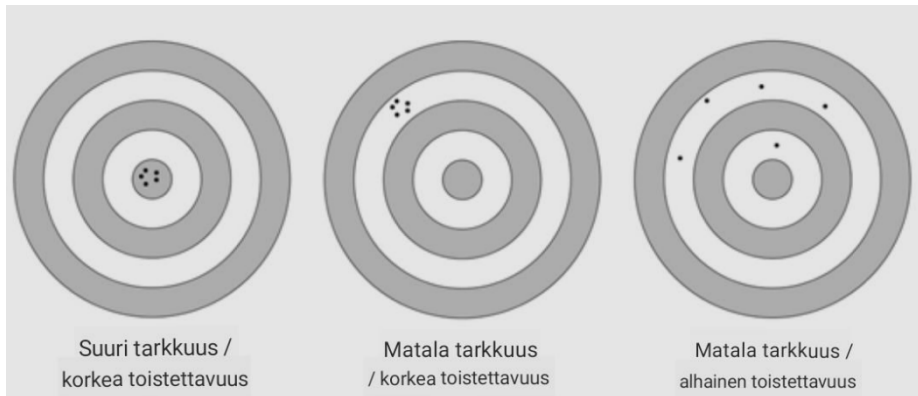


Kuvio 1. Esimerkki lineaarivaihteesta (Mini Linear Actuator n.d.)

Käyttökohteita lineaariyksiköillä on paljon, jonka takia myös lineaariyksiköltä tarvittavat ominaisuudet vaihtelevat laajasti. Vaikuttavat ominaisuudet lineaariyksiköissä ovat voima, nopeus, kiihtyvyys, liikkeen pituus, toisto- ja paikoitustarkkuus. Myös sylinterin sijainti on yksi ominaisuus, jota voidaan seurata takaisinkytketyissä lineaariyksiköissä. Paikan seuranta on tärkeää tarkkaa liikettä vaativissa kohteissa. (Linear actuator guide n.d.)

Takaisinkytkennällä tarkoitetaan sitä, kun annettu ohjaussignaali ohjaa toimilaitetta. Tämän jälkeen esimerkiksi anturointi tarkastaa toimilaitteen tilaa ja ohjaa signaalin takaisin ohjaus signaaliksi. Tämä määrittää myös lineaariyksikön tarkkuuden, eli miten tarkasti annettu asema voidaan saavuttaa. (McNier & Johnson. 2011.)

Takaisinkytketyssä lineaariyksiköissä asemointitarkkuus ja liikkeen toistettavuus vaikuttaa tuotteen toimintaan. Näitä tarkkuusominaisuuksia on havainnollistettu kuviossa 2. Asemointitarkkuudella tarkoitetaan sitä, miten tarkasti toimilaitte pääsee haluttuun asemaan. Toistotarkkuudella tarkoitetaan sitä, miten hyvin toimilaitte toistaa saman liikeradan. Se kumpi ominaisuus näistä on tarkempi, riippuu täysin toimilaitteen käyttökohteesta. (Rosengren. 2014)



Kuvio 2. Kuvaus tarkkuudesta ja toistettavuudesta (Rosengren. 2014, muokattu)

Lineaariyksiköihin lukeutuu myös lineaarijohteet (ks. kuvio 3.), joissa tavanomaisen sylinterin sijaan, lineaariliike toteutuu johteen päällä olevassa kelkassa. Näitä kyseisiä toimilaitteita käytetään useasti kohteissa, joissa siirrettävä kohde on todella painava tai kohteessa vaaditaan tarkkaa suoraa liikettä. Esimerkkinä CNC-koneiden pöydät on useasti lineaarijohteilla ohjattuja. (Linear Guide Guide n.d.)

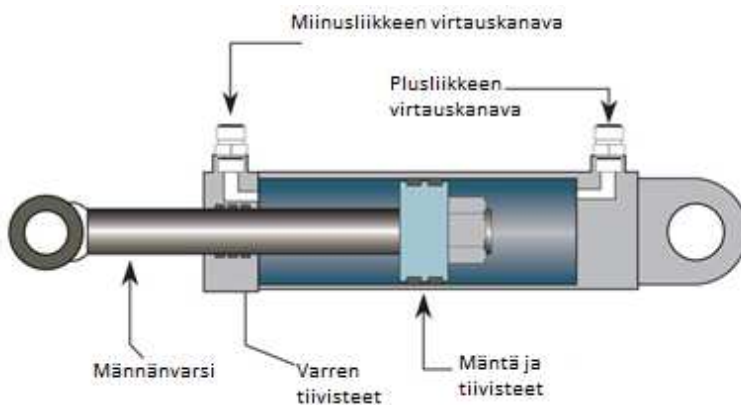


Kuvio 3. Lineaarijohde (Linear Guide Guide n.d.)

### 3 Lineaariliikkeen tuottaminen

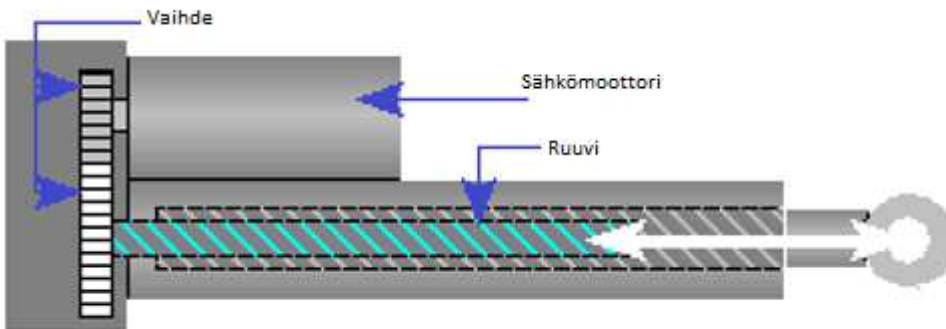
Monille tutuin lineaariliikettä tuottava yksikkö on täysin mekaaninen auton tunkki, jossa ruuvia käsin pyörittämällä saadaan aikaan autoa nostattava lineaarinen liike. Tämänkaltaiset laitteet ovat täysin mekaanisia lineaariyksiköitä. (Linear actuator guide n.d.)

Hydrauliset tai paineilma sylinterit ovat yleisimpiä toimilaitteita, joita käytetään lineaariliikettä vaativissa kohteissa. On arvioitu, että noin 85 %:ssa hydraulii- tai paineilma linjoista on käytössä jonkinlainen sylinteri (BOOK 2, CHAPTER 6: Fluid power cylinders 2008). Kuviossa 4. on kuvattu yksinkertaista sylinteriä. Kun sylinterin jompaankumpaan kammioon luodaan paine nesteellä tai ilmalla, alkaa mäntä liikkua. Sylintereitä on monia erilaisia, moniin eri käyttötarkoituksiin. (Engineering Essentials: Cylinders 2012)



Kuvio 4. Hydraulisyylinteri (Gannon. 2017, muokattu)

Tässä työssä tutustutaan kuitenkin tarkemmin niin kutsuttuihin lineaarivaihteisiin (ks. kuvio 5.), joissa pyörivä liike muutetaan lineaariseksi liikkeeksi. Yksikössä pyörivä moottori pyörittää kierretankoa, joka on kiinni mutterissa. Pyörivä kierretanko saa mutteri osaan aikaiseksi lineaarisen liikkeen. Ratkaisun mukaan pyöritettävä osa voi olla joko ruuvi tai mutteri. (Linear actuator guide n.d.)



Kuvio 5. Lineaarivaihteen toimintaperiaate (Linear Actuators n.d. Muokattu)

Sähkömoottoriohjatuissa lineaariyksiköissä on useita eri moottori ja ruuvi variaatioita, joita voidaan käyttää ja myös näihin tässä työssä tullaan tutustumaan. (Linear actuator guide n.d.)

Lähes kaikki ruuvilliset lineaariyksiköt voidaan pysäyttää kuormallisena, ilman että sylinteri liikkuu. Kierteen tyyppin ja esimerkiksi mahdollisen värinän takia, välystä voi silti esiintyä. (What is a linear actuator n.d.)

## 4 Tarkan lineaariliikkeen tuottaminen

### 4.1 Ruuvityypit

Kuten aikaisemmassa kappaleessa todettiin, yleisin tapa tuottaa liikettä lineaarivaihteissa on pyörittää ruuvia tai mutteria. Kuitenkin se, millaista ruuvi – mutteri yhdistelmää käytetään vaikuttaa ratkaisevasti moniin lineaariyksikön ominaisuuksiin. Yleisimmät käytössä olevat ruuvit voidaan luokitella kolmeen osaan: trapetsikierreruuvit, palloruuvit sekä rullaruuvi. (High-Force Linear Actuators: Screw Types Explained 2018)

Kaikissa näissä ruuvityypeissä nopeus on rajoitettu ruuviosan ominaistajuuteen. Tätä nopeutta kutsutaan kriittiseksi nopeudeksi ja siihen vaikuttaa ruuvin pituus, halkaisija sekä ruuvin tuentatapa. Kriittisen nopeuden ylittyessä ruuvi alkaa taipumaan värinän ja keskipakovoiman takia. Myös siirrettävän kuorman suuruus rajoittuu nurjahdus rajaon, johon vaikuttaa materiaali, ruuvin pituus, ruuvin halkaisija sekä tuenta. (HIWIN Ballscrews n.d.)

#### 4.1.1 Trapetsikierre

Trapetsikierre (ks. kuvio 6.) on profiililtaan puolisuunnikkaan (eng. trapezoid) muotoinen, josta sen nimikin tulee. Kierre on suoraan kosketuksessa metallia vasten, joten kitkavoima kasvaa kuorman kasvaessa. Tämä tarkoittaa myös sitä, että moottorin tehontarve kasvaa samalla. Tämän takia trapetsikierreruuvien hyötysuhde on 30–50 % luokkaa. (Electromechanical Actuator Products n.d.)



Kuvio 6. Esimerkki trapetsikierreruuvista (Selecting the Optimal Screw Technology. n.d.)

Kitka luo myös lämpöä ja kulumaa, joka vaikuttaa trapetsikierteen elinikään ja sen toimintanopeuksiin sekä käyttöaikoihin. Trapetsikierteet soveltuvatkin enemmän kohteisiin, jossa nopeudet ovat pieniä (Electromechanical Actuator Products n.d.).

Mutteriosan materiaalivalinnoilla voidaan kuitenkin vähentää kitkaa ja näin ollen parantaa hyötysuhdetta. Yleiset materiaalit tavallisen metallin sijaan ovat itsevoitelevat muovit sekä metalliseokset kuten pronssi tai messinki. Käyttämällä näitä saadaan hyötysuhdetta pienemmäksi, mutta mutterin kestävyys vaikuttaa liikutettavan kuorman suuruuteen. (Selecting the Optimal Screw Technology. n.d.)

Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, kierteiset ruuvit toimilaitteissa on itse lukittuvia eli ne voidaan pysäyttää kuormallisena. Tähän vaikuttavat kuitenkin kierteen tyyppi ja nousu. Samat ominaisuudet vaikuttavat myös ruuvien tarkkuuteen ja nopeuteen sekä siihen, paljon välystä ruuvien ja mutterin välille tulee (Linear actuator guide n.d.).

Trapetsikierreruuvit sopivatkin siis erinomaisesti käyttökohteisiin, jossa käyttönopeudet ovat pieniä ja kuormat suuria. Lisäksi koska ruuvityyppi on itselukittautuva ja edullinen valmistaa, tuo se kustannus säästöjä lopputuotteeseen.

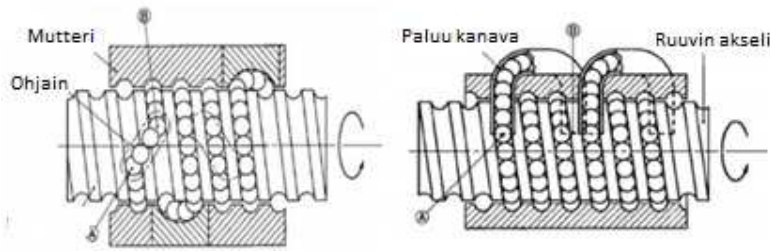
#### 4.1.2 Kuularuuvi

Kuularuuvikierteessä (ks. kuvio 7.) kierteen ja mutterin välissä on kuulia, jotka kuulalaakerin tapaisesti kiertävät kehää silmukkana. Kuulalaakeroinnin omainen ratkaisu vähentää kitkaa ja näin ollen lisää kuularuuvikierteen hyötysuhdetta, joka kuularuuveissa on noin 90 % luokkaa. (Adams. 2020)



Kuvio 7. Kuularuuvin läpileikkaus (Adams. 2020)

Kuularuuvien mutteriosassa on käytössä kaksi erilaista kuulien palautus menetelmää (ks. kuvio 8.). Ensimmäisenä on ulkopuolinen palautuskanava, jossa kuulat kiertävät muiden kuulien ylitse takaisin kierteen alkuun. Sisäpuolisessa palautuskanavassa mutterin sisällä on kanava, jonka kautta kuulat palautuvat takaisin kierteen alkuun. Yleisesti tarkkaliikettä vaativissa kohteissa käytetään sisäpuolista palautuskanavaa. (Airila. 1993. 56–57).



Kuvio 8. Kuularuuvien palautuskanavat (Layosa. 2016, muokattu)

Toisin kuin trapetsikierre, kuularuuvia käyttävä lineaariyksikkö tarvitsee jonkun jarrutkaisun, sillä siinä vaikuttava pieni kitka ei riitä pitämään sylinteriä paikallaan kuormitettuna. Kuitenkin pallo-ruuvien geometrian takia vaikuttava välys saadaan todella pieneksi ja näin ollen tarkan liikkeen tuottaminen on mahdollista, vaikka liikkeen suunta vaihtuisikin. (Adams. 2020)

Myös mutterin esikiristys vaikuttaa ruuvien tarkkuuteen ja välykseen. Esikiristys voidaan luoda valmistusteknisesti, niin että mutterin kuulat pakotetaan toisiaan kohti tai toisistaan pois päin. Tämä onnistuu tekemällä mutteriosaan hieman poikkeava nousu. Toinen mahdollisuus on käyttää kahta mutteria puristamaan tai vetämään kuulia toisiaan kohti tai irti toisistaan. (HIWIN ballscrew n.d.)

Kuularuuvilla voidaan liikuttaa myös raskaita kappaleita korkealla nopeudella. Pienen kitkan takia kuularuuvit ovat myös kestäviä, eivätkä kulu niin nopeasti käytössä. Pienen kitkan ja yleisesti toimintaan vaikuttaa myös kuularuuvien osien materiaali, pinnanlaatu sekä valmistustarkkuus. (Adams. 2020)

Kuularuuvien tarkkuuksia on yleisesti saatavilla viisi erilaista ja ne on määritelty ISO-3408 standardissa. Luokan yksi kuularuuvit ovat kaikista tarkimpia, niiden paikoitustarkkuus on  $6 \mu\text{m}$  per 300 mm. Luokan 10 ruuveilla tarkkuus on  $210 \mu\text{m}$  per 300 mm. Tämä tarkoittaa siis sitä, että 300 mm nimellismatkalla saa olla vain määrätty määrä eroa mitattuun matkaan. (Selecting the Optimal Screw Technolog n.d.)

### 4.1.3 Rullaruuvi

Rullaruuvien toiminta perustuu kierretangon ympärillä oleviin, ratkaisun mukaan uritettuihin tai kierteitettyihin rulliin, jotka välittävät liikkeen ulkokehälle eli mutteri osalle. Tällä tekniikalla saadaan enemmän kontaktpisteitä ruuvin ja mutterin välille ja täten siirrettyä suuria kuormia, jotka ovat verrattavissa hydraulisylinterien siirtokykyyn. Rullaruuvien tarkkuus ja nopeus ovat silti palloruuvien tasoa. (Collins. 2020.)

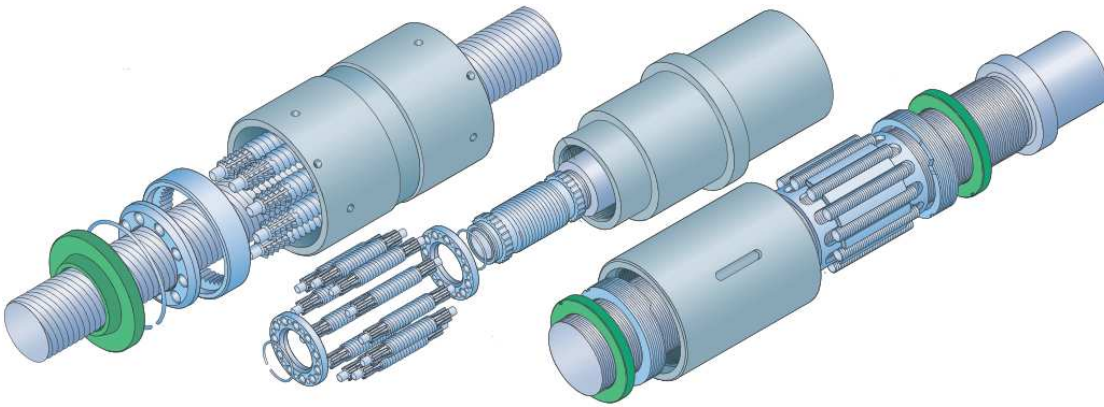
Koska kontaktpisteitä on enemmän kuin palloruuvissa, myös kitkaa ilmenee enemmän ja siksi myös hyötysuhde on hieman pienempi kuin kuularuuveilla. Hyötysuhde on noin 80 % riippuen ruuvin halkaisijasta ja noususta. (Selecting the Optimal Screw Technology n.d.)

Kuten palloruuveissa, myös rullaruuveissa on käytössä standardi, joka määrittää kierteen nousun tarkkuuden. Standardi on sama ISO 3408-3 ja siinä rullaruuille määritetyt yleiset tarkkuudet ovat G1, G2 ja G5. G1 on tarkin ja siinä 300 mm matkalla heittoa saa olla vain 6 µm. G5 tarkkuudessa heittoa 300 mm matkalla saa olla 119 µm. (Ewellix roller screw catalog n.d.)

Yleisesti käytössä olevia rullaruuviratkaisuja on kolme (ks. kuvio 9). Näitä ovat planetaarirullaruuvi, käänteinen rullaruuvi ja kiertävä rullaruuvi. Jokaisessa näissä toimintaperiaate on sama, eli kierteitetty rulla kiertää mutteriosan ja kierretangon välissä. Kiertävässä rullaruuvissa kierteiden sijaan käytetään pelkkiä uria liikkeen saavuttamiseksi. Planetaarisen ja käänteisen rullaruuvien erona on se, että planetaarisessa rullaruuvissa kierteet on tehty kierretangolle, kun taas käänteisessä rullaruuvissa ne ovat mutteriosassa. Rullien päässä olevat hammastukset varmistavat sen, että rullat pyörivät samaan tahtiin. (Ewellix roller screw catalog n.d.)

Kiertävässä rullaruuvissa erona muihin on se, että siinä kierteitten sijaan rullissa on nousuttomat urat. Tässä ratkaisussa ei myöskään tarvita päissä olevia hammastuksia, vaan päätymutterissa on lovi, joka ohjaa rullan uudelle kierteelle liikeradan päätyttyä. (Airila. 1993. 60)



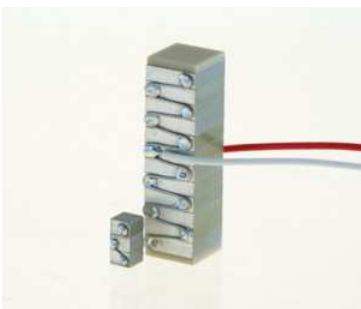


Kuvio 9. Eri rullaruuviratkaisut. Vasemmalta oikealle: planetaarirullaruuvi, käänteinen rullaruuvi ja kiertävä rullaruuvi. (Ewellix roller screw catalog n.d. Muokattu)

## 4.2 Pietsotoimilaitteet

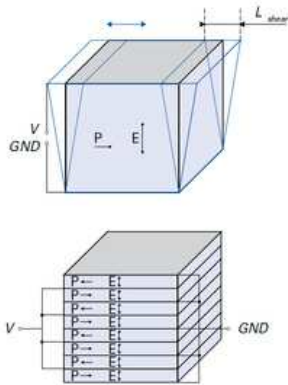
Johtamalla sähköä pietsosähköisiin materiaaleihin ne laajenevat ja muodostavat liikettä ja voimaa. Tähän ilmiöön liittyen on kehitetty neljä erityyppistä lineaariliike ratkaisua. (Collins. 2015)

Ensimmäinen näistä on niin kutsuttu pietstopino (ks. kuvio 10), jossa pietsosähköisiä materiaaleja on kasattu useampi päällekkäin. Tällä tavoin saadaan hyödyllisempi liike ja voima aikaseksi. Pituus kasvaa yleisesti 0,1–0,15 % pinon pituudesta ja voiman tiheys on tyyppillisesti noin 30 N/mm<sup>2</sup>. (Collins. 2015)



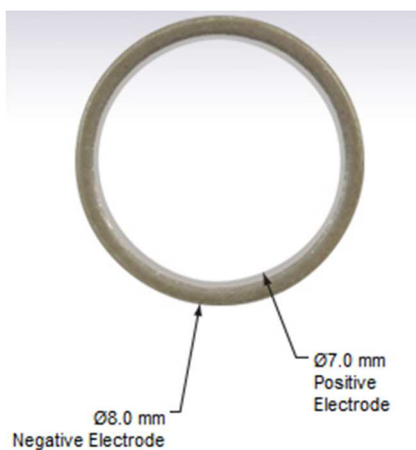
Kuvio 10. Piezopino (Collins. 2015)

Toinen on leikkausvoimaan (ks. kuvio 11.) perustuva ratkaisu, joka on pietsopinon tyyppisesti kasa pietso elementtejä, mutta ohjausjännite johdetaan erikseen jokaiselle elementille. Tämä saa aikaan liikkeen horisontaalissa suunnassa, joka kuvastaa leikkausjännityksessä tapahtuvaa sivuttaista liikettä. (Collins. 2015)



Kuvio 11. Leikkausvoimaan perustuva pietso pino (Collins. 2015)

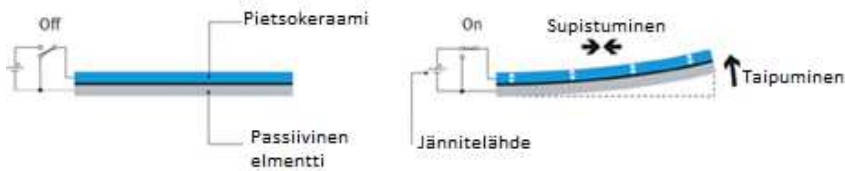
Kolmas näistä ratkaisuista on putkimallinen pietso rakenne, jonka poikkileikkausta on ympyrä (ks. kuvio 12). Riippuen miten jännite johdetaan elektrodeille, voidaan putkella saada aksiaalista, radiaalista tai taivuttavaa liikettä. Pietsoputket eivät ole hyviä tuottamaan voimaa. (Collins. 2015)



Kuvio 12. Putkimallinen pietsorakenne

Viimeisimpänä ratkaisuna on supistuva pietsosähköinen toimilaite (ks. kuvio 13.), jossa on päällekkäin pietsosähköinen elementti sekä passiivinen elementti. Johtamalla sähköä pietso elementtiin,

aiheuttaa se taipuman pakassa. Tämän tyyppinen ratkaisu luo erittäin pienen liikkeen, mutta luo samalla suuren voiman. (Collins. 2015)



Kuvio 13. Supistuva pietsotoimilaite (Collins. 2015, muokattu)

Tyypillisesti pietsosähköisillä toimilaitteilla saadaan todella tarkkaa liikettä, ja niiden voimatkin ovat kohtalaisia. Vaikka toimilaitteet ovatkin pienikokoisia on edellä mainittujen ratkaisujen liikeradat varsin pieniä ja monissa käyttökohteissa riittämättömiä. Markkinoilla on tätä varten pietsosähköisiä sovelluksia, jotka hyödyntävät useampaa toimilaitetta saaden näin aikaan pidempiä liikeratoja.

### 4.3 Menetelmien vertailu

Käytettävän teknologian valinta riippuu paljolti siitä, millaisia tarpeita käyttökohde luo toimilaitteelle. Toimeksiantaja on suunnitellut uutta tuotetta nopeuden, koon sekä tarkkuuden ja toistettavuuden kannalta. Nämä ovat siis tärkeimmät ominaisuudet, joiden kannalta teknologioita vertaillaan.

Lähtötietoina vertailussa on käytetty mahdollisimman nopeaa liikettä, ruuvin pituutena 185 mm, ruuvin halkaisijana 20 mm ja siirrettävänä kuormana 36 kN. Vertailussa on käytetty muutamien ruuvivalmistajien katalogien tietoja (Ewellix screw catalog n.d.; HIWIN ballscrew n.d.), sekä myös aikaisemmin mainittuja tietoja. Tiedot ovat koostettu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Menetelmien vertailutaulukko

Ominaisuus \ Tyyppi	Trapetsikierreruuvi	Kuularuuvi	Rullaruuvi	Pietso
Hyötysuhde	30-50%	~90%	~80%	~60%
Ääni	Äänekäs	Äänekäs	Hiljainen	Hiljainen
Kestävyys	Kuluu nopeasti	Kuluu hitaasti	Keskiverto kuluminen	Kuluu hitaasti
Kuormankesto	n. 40kN	n. 62kN	n. 102 kN	40 N
Käyttönopeudet	n. 345 rpm	n. 2000 rpm	n. 4900 rpm	Hidas (n. 0,02 m/s)
Tarkkuus	50 – 300 µm/300 mm	3,5 - 210 µm/300 mm	6 - 119 µm/300 mm	1 nm
Hinta	noin 100 - 200€	noin 200 - 300€	500 - 1000€	1810€
Jarrun tarve	Ei tarvitse	Tarvitsee	Tarvitsee	Ei tarvitse
Vällys	0,25 - 0,02 mm	0 - 0,005 mm	0,1 - 0,02 mm	-
Kitkan vaikutus	Suuri	Vähäinen	Keskisuuri	-
Dynaamisen kuromankesto	n. 14 kN	n. 38 kN	n. 55 kN	
Liikeradat	Pitkät	Pitkät	Pitkät	Lyhyet

## 5 Siirtymän mittaus

Mikäli ohjattua lineaariyksikköä käytetään niin, että sen sylinterin asema ei ole joka käyttökerralla vakio, tarvitaan sen aseman seurantaan asematietoa tarkasteleva anturi. Tilanteissa, jossa sylinteri ajetaan päytyyn ja takaisin, eikä välissä tapahtuvalla liikkeellä ole väliä voidaan käyttää esimerkiksi päätyrajakytkimiä. (Fonelius, Rinkinen & Vilenius 1999, 123)

Lineaarivaihteissa paikkatietoa voidaan mitata suoraan lineaarisesta liikkeestä tai moottorin pyörimisestä. Anturointiratkaisuja on käytössä useita ja ne rajautuvat pääsääntöisesti analogisiin sekä digitaalisiin antureihin. Analogisissa antureissa saadaan muuttuvaa virta- tai jännite tietoa, kun taas digitaalisissa antureissa tieto on pulsseja tai pulssijonoja. (Fonelius ym. 1999, 123)

Anturit vaikuttavat ratkaisevasti siihen, kuinka tarkka liike lineaariyksiköllä saadaan toteutettua. Tähän vaikuttaa myös se, miten ja millä saatu signaali käsitellään, mutta tässä työssä ei keskitytä siihen osa-alueeseen.

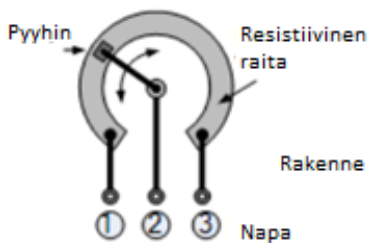
## 5.1 Analogiset anturit

Tässä luvussa käsitellään yleisimpiä analogisia anturityyppejä, joita on käytössä lineaaritoimilaiteratkaisuissa.

Analogisia antureita käyttäessä tulee olla analogidigitaalinen (A/D) -muunnin, jotta mitattu tieto voidaan ohjata toimintaa ohjaavalle prosessorille. Mitattu tieto voi olla virta- tai jännitetietoa, joka vaihtelee portaattomasti jännitealueen sisällä. Kun signaali muutetaan digitaaliseksi, tieto ei kuitenkaan ole enää täysin portaattonta. (Analog Signals vs. Digital Signals. n.d.)

### 5.1.1 Potentiometrit

Potentiometrinen eli säätövastusten toiminta perustuu muuttuvaan resistanssiin (ks. kuvio 14). Potentiometrissä kaksi sähköä johtavaa pintaa hankaavat toisiaan vasten. Liikkeen edetessä johtimien etäisyys kasvaa ja samalla kasvaa myös potentiometrissä vaikuttava vastus. Napojen numero yksi ja kolme välille syötetään syöttöjännite ja navasta numero kaksi saadaan asennosta riippuva ulostulojännite. (Mraz, 2004)



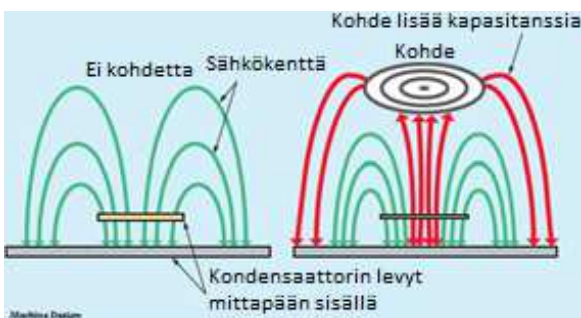
Kuvio 14. Potentiometrin toimintaperiaate (Potentiometer: Definition, Types, And Working Principle. 2020, muokattu)

Potentiometrit ovat yleispäteviä ratkaisuja siirtymän seurantaan. Niitä voidaan käyttää noin 2500 mm pituuteen asti ja niiden tarkkuus mitta-alueella on  $\pm 0,05\%$  -  $\pm 0,5\%$ . Huonona puolena voidaan pitää potentiometrin tarvitsemaa mekaanista kosketusta osien kanssa. (Fonelius ym. 1999, 124)

Potentiometriä voidaan pitää perustarpeisiin riittävänä komponenttina, kun toimilaitteen käyttö on vähäistä ja vaadittu tarkkuus on kohtalaista.

### 5.1.2 Kapasitiiviset anturit

Kapasitiivisten antureiden toiminta perustuu kahden pinnan välillä muuttuvaan kapasitanssiin (ks. kuvio 15.). Kapasitanssin määrittelee kahden johtavan pinnan pinta-ala, niiden välinen etäisyys ja materiaalien dielektrisyys. (Capacitive Sensor Operation and Optimization n.d.).



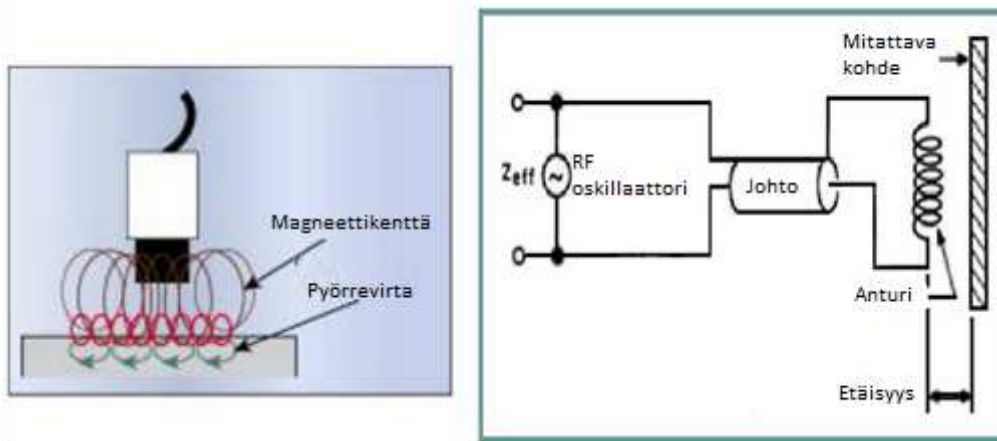
Kuvio 15. Kapasitiivisen anturin toiminta (Kinney, T. 2001, muokattu)

Anturityypissä ei ole kuluvia osia, sillä se ei tarvitse toimiakseen kahden pinnan välistä mekaanista kosketusta. Anturityypissä on kuitenkin huomioitava, että sen mittaus alue on noin 40 % mittapään halkaisijasta. Käytännössä mittausalue voi vaihdella 5–40 mm riippuen anturista. (Mraz, S. 2004.).

Kapasitiivisilla antureilla saadaan tarkkoja mittaustuloksia, mutta ne ovat kuitenkin herkkiä kosteudelle, lialle ja kylmälle ilmalle. Tarkkuuteen vaikuttaa myös mitattavan pinnan geometria, jonka tulisi olla mahdollisimman tasainen. (Capacitive Sensor Operation and Optimization. 2012).

### 5.1.3 Pyörrevirta-anturit

Pyörrevirta-anturit (eng. eddy current) toimivat induktiivisten antureiden tapaan eli mittaus perustuu muutokseen magneettikentässä. Anturin päässä olevaan käämiin syötetään vaihtojännitettä, joka saa aikaan sähkömagneettisen kentän. Kun tämä kenttä tuodaan sähköä johtavan materiaalin lähelle, saa sähkömagneettinen kenttä aikaan pyörrevirran mitattavassa materiaalissa. Tämä pyörrevirta pyrkii vastustamaan käämin aiheuttamaa magneettikenttää. Käämi pyrkii pitämään magneettikentän tehon vakiona. Mitä lähemmäksi mitattava kappale tuodaan anturin päätä, sitä enemmän virtaa käämi tarvitsee ylläpitääkseen magneettikenttää. Toimintaperiaatetta sekä anturin osia on kuvattu kuviossa 16. (Eddy current sensor: Operating principle and applications. 2018)



Kuvio 16. Pyörrevirta anturin toiminta (Eddy Current Sensors. 2014, muokattu)

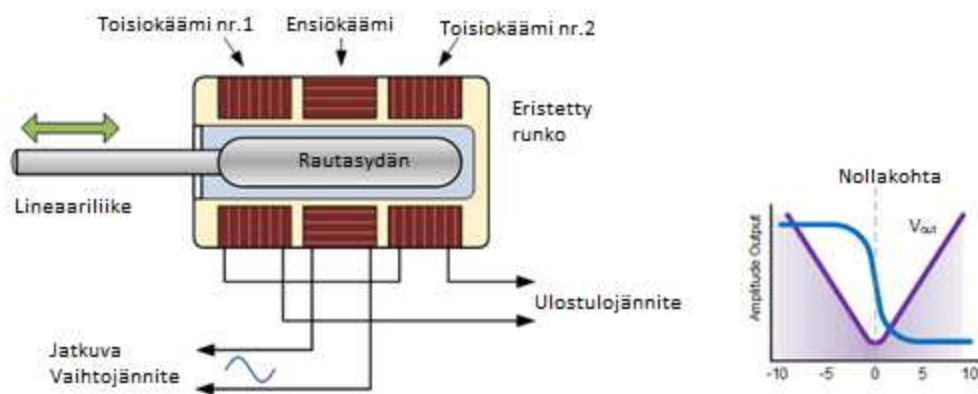
Pyörrevirta antureilla saadaan myös tarkkoja mittatuloja ja ne toimivat likaisissakin olosuhteissa. Mitattavan materiaalin on oltava sähkömagneettinen, koska toiminta perustuu induktioon. Yhtenä rajoittavana tekijänä on myös materiaalin paksuus, joka täytyy olla vähintään kolme kertaa suurempi kuin pyörrevirran vaikutus syvyys. (Eddy Current Sensors. 2014; Eddy current sensor: Operating principle and applications. 2018)

### 5.1.4 Induktiiviset anturit

Induktiivisten antureiden toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Anturit mittaavat indusoivaa jännitettä tai sen eroa. Perustuessaan sähkömagnetismiin, toimivat nämä anturi tyypit

ilman mekaanista kosketusta. Yleisimpänä anturityyppinä on differentiaalimuuntaja, joka tunnetaan myös lyhenteellä LVDT (Linear Variable Differential Transformer) (Position Sensors n.d.).

Induktiivisessa differentiaalimuuntajassa (ks. kuvio 17.) kolme kuparikäämiä on rautasydämen ympärillä niin, että kaksi reunimmaista (toisiokäämiä) ovat keskimmäistä (ensiökäämiä) vasten. Syötämällä vaihtojännitettä ensiökäämiin ja rautasydämen ollessa keskellä, toisiokäämeiltä ulostuleva summa jännite on nolla. Kun rautasydäntä liikutetaan, muuttuu toisiokäämeiltä tuleva jännite. Tästä voidaan päätellä lineaarinen siirtymä. (Fonelius ym. 1999, 124–125)



Kuvio 17. Induktiivisen anturin toiminta (Position Sensors n.d. Muokattu)

## 5.2 Digitaaliset anturit

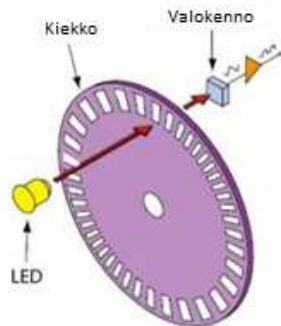
Digitaaliset anturit jakautuvat pääosin inkrementaali- sekä absoluuttiantureihin. Inkrementaali-anturit kertovat pelkästään tiedon liikkeestä, eikä anturin tarkkaa paikka tietoa voida suoraan tietää. Näissä tapauksissa anturi on ajettava ”kotiasemaan” ja määritettävä nollapiste. Absoluuttiantureilla tätä ongelmaa ei ole, vaan anturi osaa kertoa myös virtakatkon jälkeen tarkan sijaintinsa.

### 5.2.1 Pulssianturi

Pulssianturit perustuvat optiseen mittaukseen, jossa mitataan valon pulssin taajuutta. Pulssianturissa (ks. kuvio 18.) on siis valoa lähettävä diodi, joka lähettää valoa pulssikiekon läpi valokennolle. Pulssin nopeudesta voidaan päätellä pyörimisnopeus. Absoluuttianturien pulssikiekossa on lisäksi



paikkatietoa ilmaiseva kehä. Pulssianturin tarkkuus ja resoluutio riippuu pulssikiekon tarkkuudesta ja siihen merkattujen reikien tiheydestä. (Pulssianturien teoriaa. n.d.)



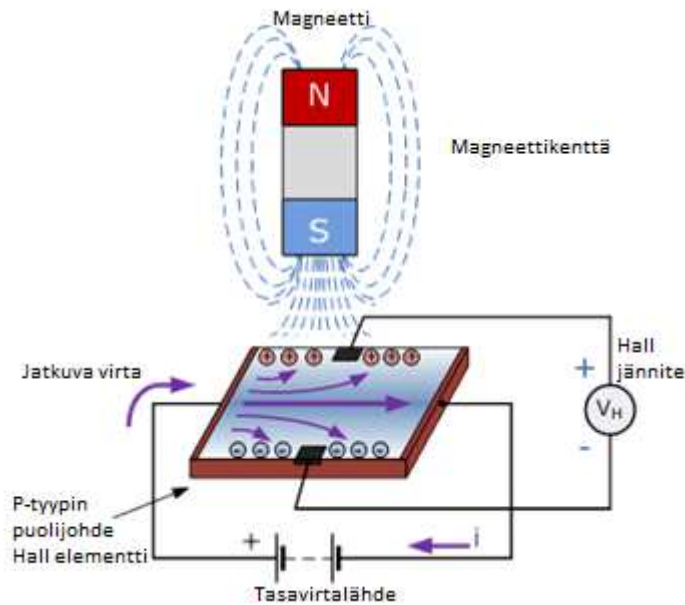
Kuvio 18. Pulssianturin toimintaperiaate (Schweber. 2018, muokattu)

Koska pulssianturit perustuvat optiseen mittaukseen, ovat ne herkkiä liialle, valolle ja värinälle. Mutta niillä saadaan kumminkin tarkkoja mittauksia kustannustehokkaasti. (The advantages and disadvantages of an encoder. 2016)

### 5.2.2 Magneettinauha-anturit

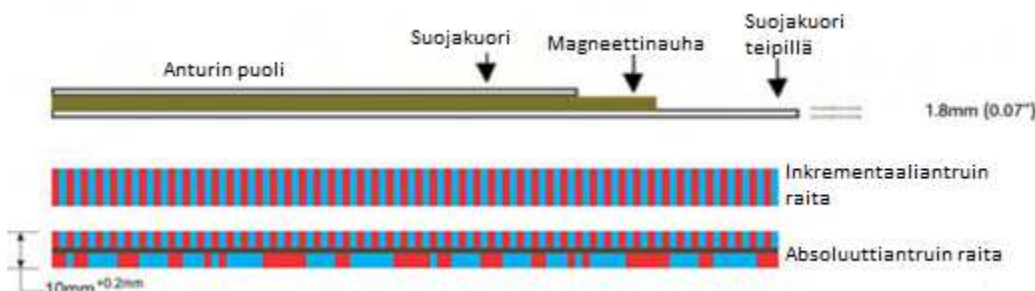
Magneettinauha-anturit perustuvat monia magneetteja sisältävään nauhaan, jota luetaan mittapäällä. Sen toiminta perustuu magnetoresistiivisuuteen tai Hall-ilmiöön. Magnetoresistiivisuudella tarkoitetaan sitä, kun ferromagneettisen kappaleen lähelle tuodaan magneetti, sen resistanssi muuttuu. (Collins. 2018)

Hall-ilmiö (ks. kuvio 19.) ilmenee, kun virtaa johtavan johtimen lähelle tuodaan kohtisuoraan magneetti. Tässä johtimessa kulkevien elektronien kulkusuunta muuttuu johtimen reunoille saaden sinne aikaan potentiaali eron. Tämä potentiaaliero ilmenee Hall-jännitteenä. Mitä lähempänä magneettikenttä on johdinta, sitä suurempi Hall-jännite on. (Hall Effect Sensor n.d.)



Kuvio 19. Hall anturin toimintaperiaate (Hall Effect Sensor n.d. Muokattu)

Magneettinauha (ks. kuvio 20.) on nimensä veroisesti nauhamainen rivi magneetteja, joiden napaisuus vaihtelee. Nauhassa olevien magneettien navat ovat asetettu erilleen toisista tarkoin välein, joiden perusteella voidaan tulkita anturin etenemä matka. Kuten pulssiantureissa, myös magneettinauha antureissa on olemassa inkrementaali- ja absoluutti anturityyppejä. Toimintaperiaate on molemmissa sama kuin pulssiantureissa, eli inkrementaaliantureissa nauhassa on tieto vain tehdystä liikkeestä. Absoluuttianturin nauhassa on ilmaistu myös paikkatieto. (Collins. 2018)



Kuvio 20. Magneettinauhan rakenne sivusta ja päältä (Collins. 2018, muokattu)

Magneettinauha-anturit ovat kestäviä, eivätkä ne ole niin herkkiä lialle tai esimerkiksi tärinälle. Ulkopuoliset magneetit voivat kuitenkin vaikuttaa anturin toimintaan. Tällä anturityypillä saadaan myös tarkkoja mittauksia. (How do magnetic linear encoders differ from optical versions? 2018)

### 5.3 Antureiden vertailu

Antureiden vertailussa päätekijänä ovat tarkkuus, luotettavuus sekä kestävyys. Mitta-alueen tulisi olla 25 mm. Toimilaitteen fyysiset mitat ja käyttökohde vaikuttavat myös anturointivalintaan. Taulukkoon 2 koostettu eri anturivalmistajien antamista tiedoista lista ja verrattu edellä mainittuja tekijöitä. Hintaa tai tarkkoja mittoja ei jokaiselta anturivalmistajalta saatu.

Taulukko 2. Antureiden vertailua

Anturiyyppi Ominaisuus	Potentieometrit	Kapasitiiviset anturit	Pyörrevirta anturit	Induktiiviset anturit	Pulssianturit	Magneettinauha-anturit
Mekaaninen kosketus	Kyllä	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei
Tilantarve	n. $\varnothing 30 \times 30$ mm	n. $\varnothing 60 \times 27$ mm	-	n. $\varnothing 30 \times 60$ mm	n. $\varnothing 37 \times 30$ mm	20 x 30 mm
Tarkkuus	n. 0,1mm	n. 7,5 nm	2.5 $\mu$ m	< 0,005 mm	0.18°	1 $\mu$ m
Epäpuhtauksien vaikutus	Ei vaikutusta, mikäli kotelointi hyvä	Vaatii puhtaan välin anturin ja mitattavan pinnan välillä	Ei vaikutusta	Ei vaikutusta	Ei vaikutusta	Ei vaikutusta
Muut ulkopuoliset tekijät	Herkkä tärinälle	Vaatii hyvän maadoituksen	-	-	Herkkä tärinälle	Herkkä ulkopuolisille magneeteille
Hinta	50 - 200€	-	-	150 - 260€	100 - 250€	90 - 150€
Käyttölämpötila	-25 - +85	-20 - +70	-60 - 180	-25 + 75	-20 - +105	-40 - +85

## 6 Mittaus- ja laatutekniikka

Kuten Bell (1999) kirjoittaa, mittauksella tarkoitetaan jonkin fyysisen suureen selvittämistä. Sillä saadaan numeerinen vastaus kysymyksiin, kuten miten pitkä tai kuuma jokin asia on. Mittaukseen liittyy myös se, että se suoritetaan aina jollakin ulkoisella instrumentilla kuten mittanauhalla. (A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement 1999)

Mittatuloksella pyritään selvittämään, onko jokin asia halutun mukainen tai paljonko korjausta asia vaati, jotta se olisi halutunlainen (Keinänen & Järvinen 2014, 9). Keinänen ja Järvinen (2014, 9) kuitenkin muistuttaa, että mittatulosta käsiteltäessä on huomioitava mittaukseen vaikuttaneet seikat, jotka ovat mahdollisesti muuttaneet mittatulosta.

Yleisesti käytössä oleva mittasuureet ja niiden yksiköt on standardisoitu SI-järjestelmässä. Esimerkiksi pituuden yksikkö metri määritellään seuraavasti: ”Metri on sellaisen matkan pituus, jonka valo kulkee tyhjiössä  $1/299\,792\,458$  sekunnissa” (Keinänen & Järvinen 2014, 17).

## 6.1 Mittavirheet

Mittauksissa keskeisimpinä tekijöinä ovat mittauksen tarkkuus sekä luotettavuus. Kuitenkaan mitään mittausta ei voida suorittaa ilman, että siinä ei olisi jonkin asteista virhettä. Virhetyyppejä, joita mittauksissa voi ilmetä ovat satunnainen, systemaattinen tai karkeavirhe. Näitä virheitä kutsutaan yleisesti mittavirheeksi. Ne kertovat kuinka paljon mitattu tulos eroaa todellisesta mitasta. (Keinänen & Järvinen 2014, 95)

Satunnaisvirhe on virhetyyppi, jota ei voida poistaa mittaustuloksista ja se ilmenee aina mittauksissa. Se voi olla vaihtelua molempiin suuntiin. Mitä tarkempi mittausta on, sitä enemmän virheitä ilmenee mittaustuloksissa. Satunnaisvirheeseen voi vaikuttaa niin, että mittaukset toistetaan monta kertaa ja tulokset analysoidaan huolella. Näin saadaan jonkinlainen keskiarvo sille, missä mittatulokset ovat jollain varmuudella luotettavia. (Keinänen & Järvinen 2014, 95; Measurements and Error Analysis n.d.).

Systemaattinen virhe on mittalaitteesta tai mittaustavasta johtuva virhe. Nämä mittavirheet aiheuttavat tuloksiin aina jatkuvan, yhtä suuren systemaattisen virheen. Virheitä voi olla vaikea huomata. Virheet voi johtua esimerkiksi lämpötilan vaikutuksesta mittalaitteeseen. Virhe on mahdollista korjata kalibroimalla mittalaite. (Keinänen & Järvinen 2014, 95; Measurements and Error Analysis n.d.)

Karkealla virheellä tarkoitetaan esimerkiksi tilannetta, jossa mittaaja lukee mitta-asteikkoa väärin. Virhe voi johtua myös mittalaitteen toimimattomuudesta. Tällaisessa tilanteessa saadut mitat tulla hylät. (Keinänen & Järvinen 2014, 95)

Mittatulokseen vaikuttavat kaikki mittaustilanteessa olevat tekijät, kuten ympäristö, mittalaite, mittaaja sekä myös mitattava kappale. Ympäristössä vaikuttaa jokin tietty lämpötila ja puhtaus

sekä joissain tilanteissa on huomioitava myös ympäristössä vaikuttava värinä ja valoisuus. Mittalaite voi olla huonokuntoinen tai toimia väärin. Mittaaja voi suorittaa mittauksen kiireellä tai olla muuten vain huolimaton. Mitattava kappale voi olla muodoltaan haastava mitattava tai se voi olla esimerkiksi joustavaa materiaalia. (Keinänen & Järvinen 2014, 96)

## 6.2 Mittausepävarmuus

Kuten aikaisemmassa kappaleessa todettiin, mikään mittaus ei ole täysin oikein. Tähän vaikuttaa erityyppiset virheet, joita mittauksissa tapahtuu. Mittausepävarmuudella tarkoitetaan arviota mitattavirheen suuruudesta. Mitä tarkempi mittaus on, sitä suurempi merkitys mittausepävarmuudella on. Sillä pyritään antamaan tietyt rajat mittaustulosten vaihteluun. (Keinänen & Järvinen 2014, 98)

Koska mittausepävarmuus koostuu monista asioista, ei sen tarkkaan määrittämiseen ole yhtä tiettyä sääntöä tai ohjetta (Keinänen & Järvinen 2014, 98). Mittaajan tulee huomioida ja arvioida mittaukseen vaikuttavia eri seikkoja. Esimerkiksi mittalaitteissa ilmoitetaan yleensä mitta-asteikon varmuus, josta tulee epävarmuutta mittatulokseen.

Yhdeksi yleisimmäksi tavaksi arvioida mittausepävarmuutta on esitetty useiden mittauksien teko ja sen perusteella tehtävä selvitys hajontaluvusta. Tämä tapahtuu käytännössä niin, että ensin lasketaan mittatulosten keskiarvo. Tämän jälkeen keskiarvo vähennetään jokaisesta mittatuloksesta, joista saadaan hajonta. Laskemalla alla olevan kaavan mukaan saadaan selville hajontaluku  $s$ , joka on 68 % varmuusalueella. Kaavassa  $x$  on hajonta ja  $N$  on mittausten lukumäärä. (Measurements and Error Analysis n.d.).

$$s = \sqrt{\frac{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}{(N - 1)}}$$

## 7 Työn toteutus

### 7.1 Testattava laite

Testattava toimilaite (ks. kuvio 21) toimii suoravetoisella askelmoottorilla, joka pyörittää kuulamutteria. Kuularuuvin kierteen nousu on 4 mm ja ruuviosan päässä on kara, jonka pyöriminen on lukittu. Karan liikealue on noin 25 mm ja sen mekaanisen tarkkuuden odotetaan olevan  $\pm 4\mu\text{m}$ . Anturointi on toteutettu inkrementaalisella pulssianturilla ja magneettinauha-anturilla. Toimilaitteen toimiessa inkrementaalisilla antureilla, asematieto häviää aina virtakatkon yhteydessä ja uudelleenkäynnistyttyä se on ajettava "kotiasemaan" eli referenssi pisteeseen.



Kuvio 21. Testattava toimilaite

Toimilaitteen käyttökohde on toimia korkeapainepumppuna, jossa paine voi vaihdella 100 bar ja 200 bar välillä. Kyseinen toimilaite on ensimmäinen prototyyppi. Tällä on tarkoitus selvittää, onko kaikki tekniset ratkaisut tähän mennessä riittäviä.

## 7.2 Mittaussuunnitelma

Ennen mittauksia oli tehtävä suunnitelma siitä, miten mittaukset käytännössä toteutettaisiin. Lähtökohtana suunnitelmalle oli se, miten toimilaitteen toimintaa voitaisiin arvioida käyttökohteessa. Koska laite on uusi, ei kaikkia käyttökohteessa vaikuttavia tekijöitä voitu kuitenkaan vielä ottaa huomioon. Tämän takia päädyttiin ensin testaamaan toimilaitteen perustoimintaa ja tarkkuutta. Käytännössä kuorman aiheuttama vaikutus toimintaan jää näistä mittauksista pois.

Toimeksiantajalla on oma käytäntö lineaaritoimilaitteiden mittaukseen. Mittaus tehdään siten, että ensiksi toimilaite ajetaan vähän matkaa eteen päin, kunnes taas palataan osa matkasta takaisin. Tätä edestakaista liikettä tehdään muutamia toistoja, kunnes on päästy liikeradan loppuun.

Toimilaitetta käytetään pumpun omaisesti, eli ensin toimilaite ajetaan ”kotiasemasta” vähän matkaa eteenpäin ja tämän jälkeen suoritetaan vain edestakaista liikettä. Toimilaitetta on tarkoitus myös käyttää pitkiä aikoja yhtäjaksoisesti. Tämän takia erityisesti toimilaitteen toistotarkkuus on todella tärkeä ominaisuus toiminnallisuuden kannalta. Paikoitustarkkuus on myös tärkeä ominaisuus, mutta yleisen toiminnallisuuden kannalta toissijainen.

Toistotarkkuutta on tarkoitus mitata toimilaitteen omalla anturilla, eli magneettinauha ja pulssianturilla. Tämä toteutetaan niin, että askelmoottoria pyöritetään ensin 50 askelta eteenpäin 25 kertaa ja tämän jälkeen 50 askelta 25 kertaa taaksepäin. Tällä tavoin toimilaite liikkuu koko liikeradan verran. Jokaisen tehdyn liikkeen jälkeen tallennetaan toimilaitteen antureilta saatu mittaustulos. Tätä kiertoa tullaan tekemään noin vuorokauden verran, jotta mahdollinen liikkeen poikkeama saadaan näkymään mittauksissa. Mittaustulokset koostetaan Excel tiedostoon, jonka avulla arvioidaan, kuinka hyvin sama liike on saavutettu eri toisto kerroilla.

Tämän jälkeen suoritetaan kertaluontoiset liikkeen tarkkuuden mittaukset Jyväskylän ammattikorkeakoulun kalibrointilaboratoriossa. Tällä pyritään selvittämään, kuinka tarkka liike toimilaitteella

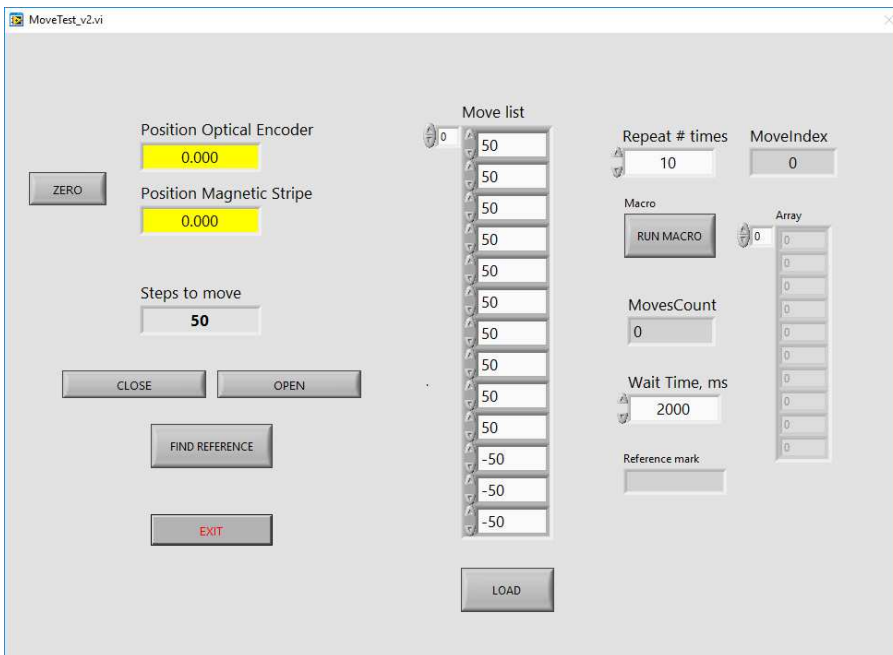
on mahdollista tuottaa. Nämä testit suoritetaan siten, että ensin askelmoottoria pyöritetään referenssi pisteestä 50 askelta eteenpäin, niin pitkään että päästään liikeradan loppuun. Tämän jälkeen palataan takaisin samalla askelmäärällä. Jokaisen liikkeen jälkeen suoritetaan mittaus, jossa kirjataan jokaisen anturin ja mittalaitteen lukema ylös.

### **7.3 Testilaitteisto**

Toimeksiantaja antoi testaamista ja mittaamista varten testilaitteiston. Laitteistoon sisältyi toimilaitte, ohjauselektronikka ja tietokone. Ohjauselektronikalla toimilaitetta voitiin ohjata ja antureilta saatua tietoa lukea. Tietokone sisälsi mittaus- ja ohjausohjelmiston.

Mittaus- ja ohjausohjelmiston käyttöliittymän kuva on esitetty kuviossa 22. Ohjelmisto on tehty LabView sovelluksella. Ohjelmalle voi määrittää kuinka monta askelta askelmoottoria ohjataan mihinkin suuntaan. Sillä voi myös määrittää magneettinauhasta löytyvän referenssipisteen. Ohjelmalla voi tehdä myös listan, mitä liikkeitä askelmoottori ajaa. Listalle voi määrittää, montako kertaa se suoritetaan. Liikkeiden välillä olevan ajan voi myös määrittellä, tällä pyritään stabiloimaan antureiden liikkeitä. Mikäli liike suoritetaan listan (eli makron) kautta, jokaisen tehdyn liikkeen jälkeen saatu mittatulos kirjautuu erilliseen tekstitiedostoon. Tiedosto sisältää mittaustuloksen pulssi- ja magneettinauha-anturilta.





Kuvio 22. Mittaus- ja ohjausohjelmiston käyttöliittymä

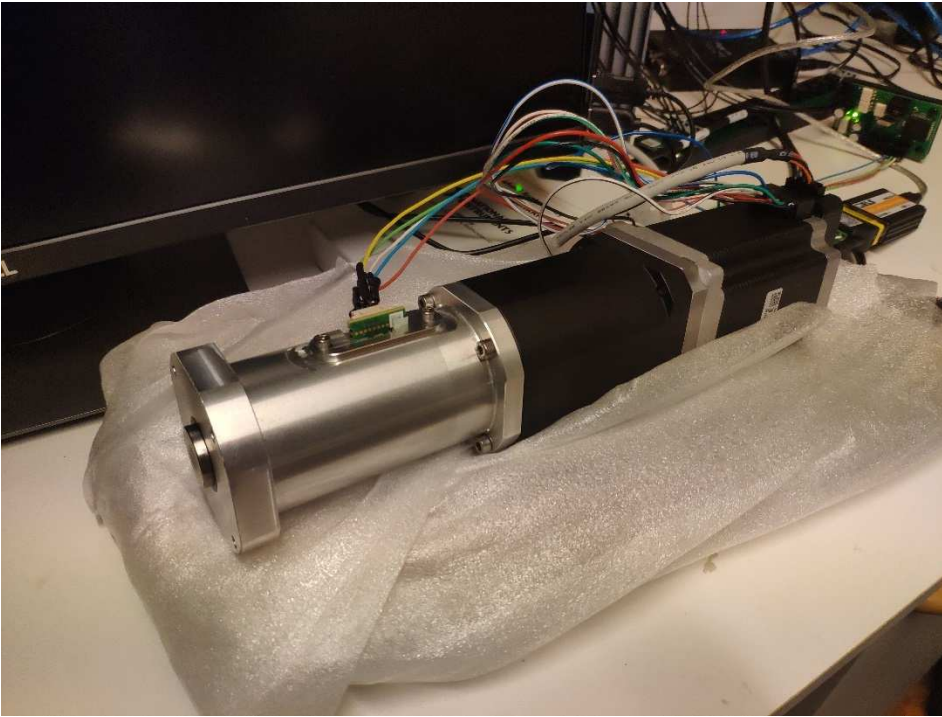
### 7.3.1 Mittavarmuus

Kuten kappaleessa kuusi todettiin, on mittaamisen kannalta tärkeää huomioida mittaustulokseen vaikuttavat tekijät. Erityisesti tässä tapauksessa mainittavimpina tekijöinä voidaan pitää moottorin tuottamaa lämpöä, ruuvin valmistustarkkuudesta johtuvaa virhettä sekä moottorin mekaniikan vaikutusta. Yksi vaikuttava tekijä on myös moottorin värinä, joka ilmenee toimilaitetta käyttäessä.

Mittauksissa on otettava huomioon myös mittauselektroniikan vaikutus, eli antureiden ja ohjaus-elektroniikan vaikutus mittaustulokseen. Esimerkiksi magneettinauhan valmistaja ilmoittaa tarkkuudeksi 0,001 mm. Nämä tekijät ovat erittäin marginaalisia, mutta tulee silti kuitenkin huomioida.

## 7.4 Mittauksien suoritus

Toistotarkkuus mittaukset suoritettiin lämpimässä varastohuoneessa, jonka lämpötila oli keskimäärin 20°C. Koska toimilaitte väräsi paljon eikä se pysynyt paikoillaan pöydällä, tuli se vaimentaa. Toimilaitteen alle laitettiin muutama kerros vaahtomuovia vaimentamassa värinää (ks. kuvio 23).

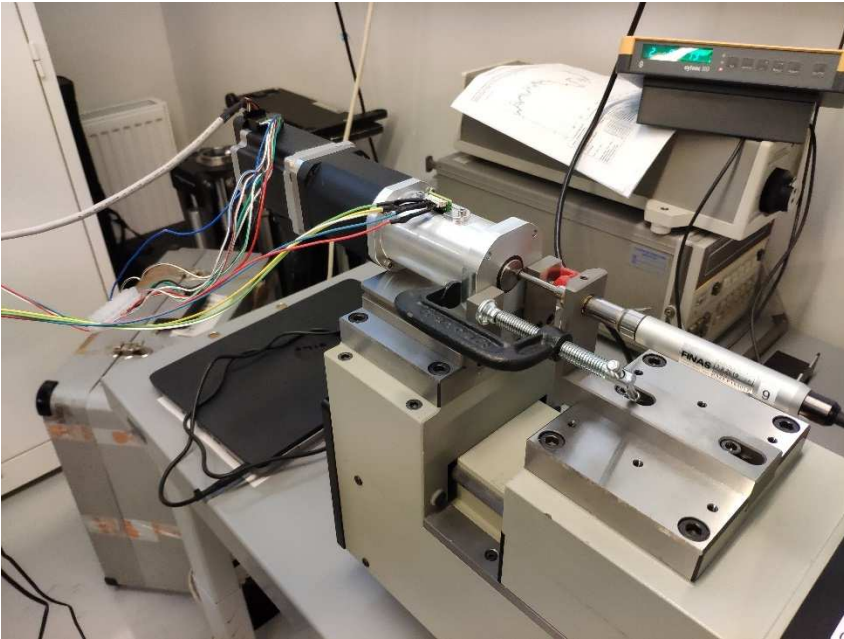


Kuvio 23. Toimilaitte toistotarkkuus mittauksessa

Ensimmäisenä suoritettiin liikettä, jossa toimilaitetta ajettiin 10 kertaa 50 askelta eteenpäin ja tämän jälkeen 10 kertaa 50 askelta taaksepäin. Tätä sykliä ajettiin 1500 kertaa. Näitä mittauksia tehtiin yhteensä kaksi kappaletta. Tällä mittauksella todettiin toimilaitteen perustoiminta lyhyellä liikeradalla.

Toisena tehtiin samanlainen mittaus, mutta askelia oli tällä kertaa 100. Tällä päästiin toteamaan koko liikeradan perustarkkuus. Kolmantena mittaus syklinä suoritettiin 25 kertaa 50 askelta eteen ja sama taaksepäin. Tämä sykli suoritettiin 1500 kertaa ja näitä mittauksia tehtiin viisi kappaletta.

Näitten mittauksien jälkeen tehtiin tarkkuuden mittaukset Jyväskylän ammattikorkeakoulun kalibrointilaboratoriossa. Laboratorio olosuhteissa vaikuttaa myös tasainen 20°C asteen lämpötila. Toimilaitte saatiin mittauspenkkiin ongelmitta kiinni (ks. kuvio 24.). Toimilaitteen moottorin ollessa ilmassa, ei tärinä vaikuttanut toimilaitteen paikalla pysymiseen.



Kuvio 24. Toimilaite JAMK kalibrointilaboratoriossa

Mittaukset suoritettiin kalibroidulla Sylvac P25 mittalaitteella, jonka mittausvarmuudeksi oli kalibroinnissa todettu  $\pm 0,4\mu\text{m}$ . Kalibrointi todistus on esitetty liitteessä 1. Mittalaite asetoitiin siten, että mittasauvan päässä oli pieni esijännitys. Tällä pyrittiin vähentämään jousikuorman vaikutuksesta johtuvaa virhettä.

Mittaukset suoritettiin käymällä koko liikealue läpi 50 askeleen välein. Jokaisen tehdyn liikkeen jälkeen kirjattiin pulssianturin ja magneettinauha-anturin ilmoittama tulos mittauspöytäkirjaan. Myös ulkoisen mittalaitteen ilmoittama tulos kirjattiin ylös. Näitä mittauksia tehtiin yhteensä viisi. Tämän lisäksi tehtiin mittaus, jossa liikealue käytiin läpi 10 askeleen välein tarkemman tuloksen saamiseksi.

## 8 Tulokset ja analysointi

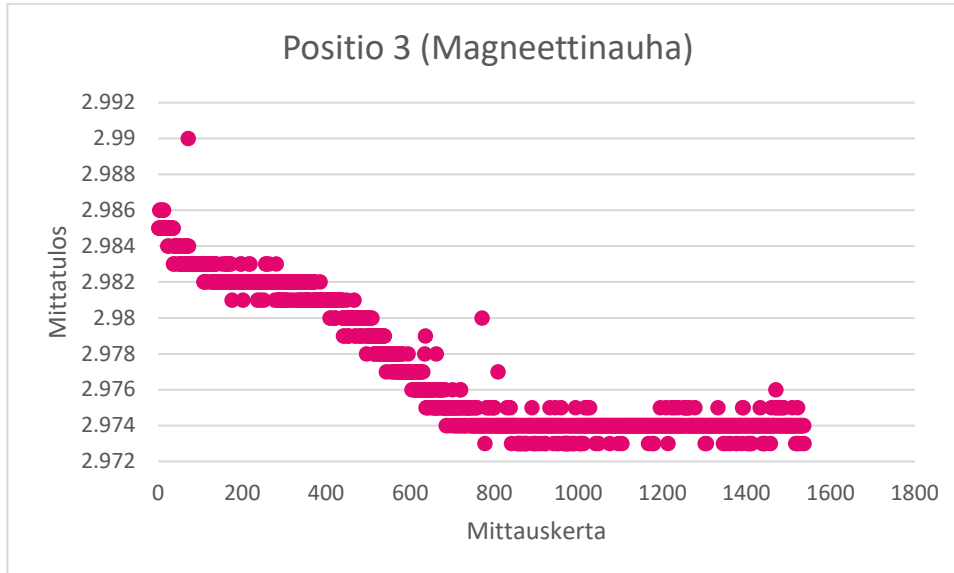
### 8.1 Toistotarkkuus

Toistotarkkuuden mittauksessa saadut tulokset koostettiin Exceliin niin, että aina samanlaisen tehdyn liikkeen jälkeen saadut mittatulokset listattiin allekkain. Tämän jälkeen eroteltiin jokaisen position osalta suurin ja pienin mittaus tulos ja näiden erotus laskettiin. Näin saatiin selville, kuinka

suurta heittoa liikkeessä on ilmennyt. Mittaustuloksia tutkittiin niin magneettinauhan kuin pulssianturin osalta. Kaikki mittaustulokset on esitetty liitteessä 2.

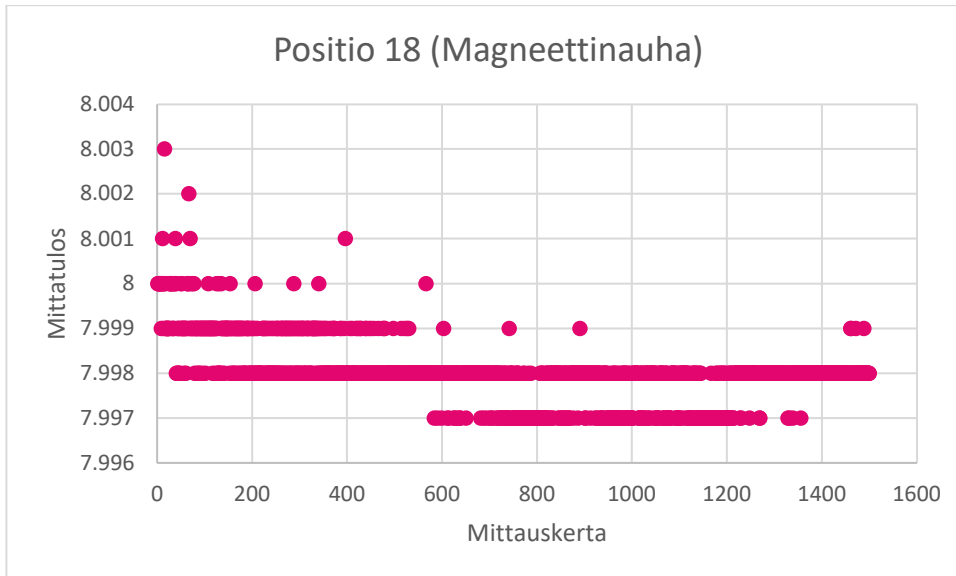
Mittaukset koostettiin myös kuvaajiksi, joissa vaaka-akselilla oli mittauskerta ja pystyakselilla oli mittaustulos. Tällä saatiin selville, miten mittaustulos on vaihdellut liikkeen edetessä ja onko mittauksessa satunnaista tai systemaattista virhettä. Pulssianturin toistotarkkuuden osalta huomattiin, että se vaihteli jokaisella testikerralla enintään vain 0,001 mm verran. Tämän takia pulssianturin tuloksista ei koostettu kuvaajia.

Ensimmäisessä mittauksessa toimilaitetta ajettiin 10 kertaa 50 askelta eteenpäin ja saman verran taakse päin. Tämä liikerata toistettiin 1500 kertaa. Mittauksessa ilmeni parhaimmillaan 0,017 mm heittoa paikoitustarkkuudessa magneettinauha anturin osalta. Kuviossa 25 on esitetty mittauksen etenemä jokaisella mittaus kerralla. Kuvioista voidaan myös huomata, että kyseisen heiton on todennäköisesti aiheuttanut satunnaisvirhe. Muuten mittaus siirtyi melko lineaarisesti alaspäin, jonka jälkeen tulokset tasaantuivat.



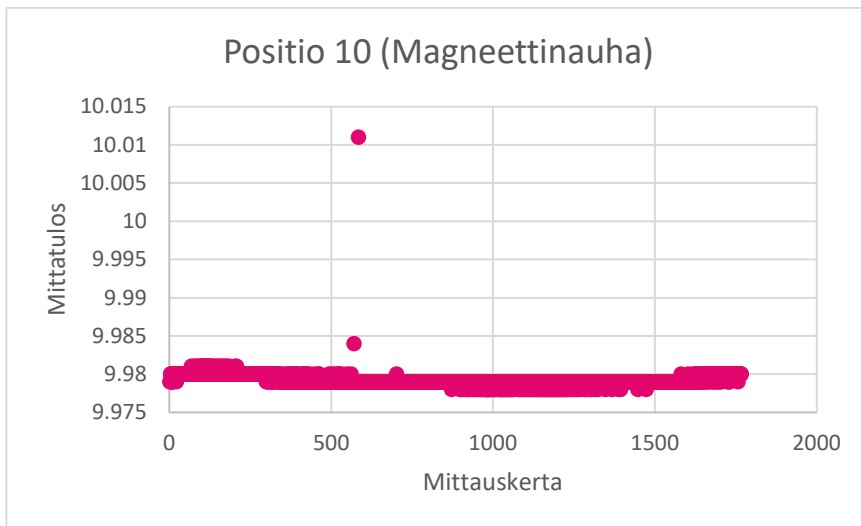
Kuvio 25. Kuvaaja kolmannen liikkeen jälkeen saaduista mittaustuloksista

Tämän jälkeen suoritettiin mittaus mikä oli muuten samanlainen, mutta ajettavia askelia oli 100. Tässä mittauksessa tulokset olivat huomattavasti tasaisempia ja suurin heitto oli 0,006 mm. Kuviossa 26 on esitetty tämän mittaustuloksen etenemä, joka on samalla tavalla lineaarinen alaspäin ja sisältää mahdollisesti muutamia satunnaisvirheitä.



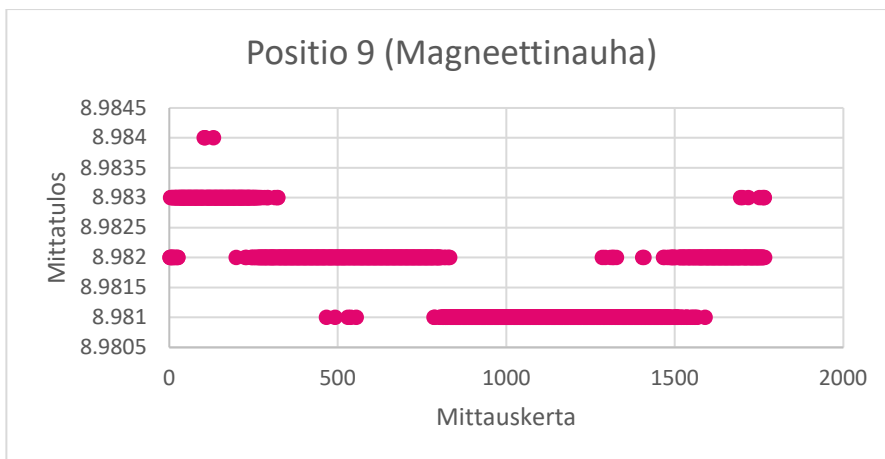
Kuvio 26. Mittaustuloksen etenemä

Tämän jälkeen tehtiin mittaukset, joissa ajettiin 25 kertaa 50 askelta eteen ja saman verran taaksepäin. Liikerataa toistettiin 1800 kertaa. Näitä mittauksia tehtiin yhteensä viisi kappaletta. Näistä ensimmäisessä mittauksessa ilmeni 0,033 mm heitto, mutta tutkiessa kuvaajaa kyse on ilmeisesti satunnaisvirheestä. Kuviossa 27 on esitetty mittaustulokset tämän kyseisen position osalta.



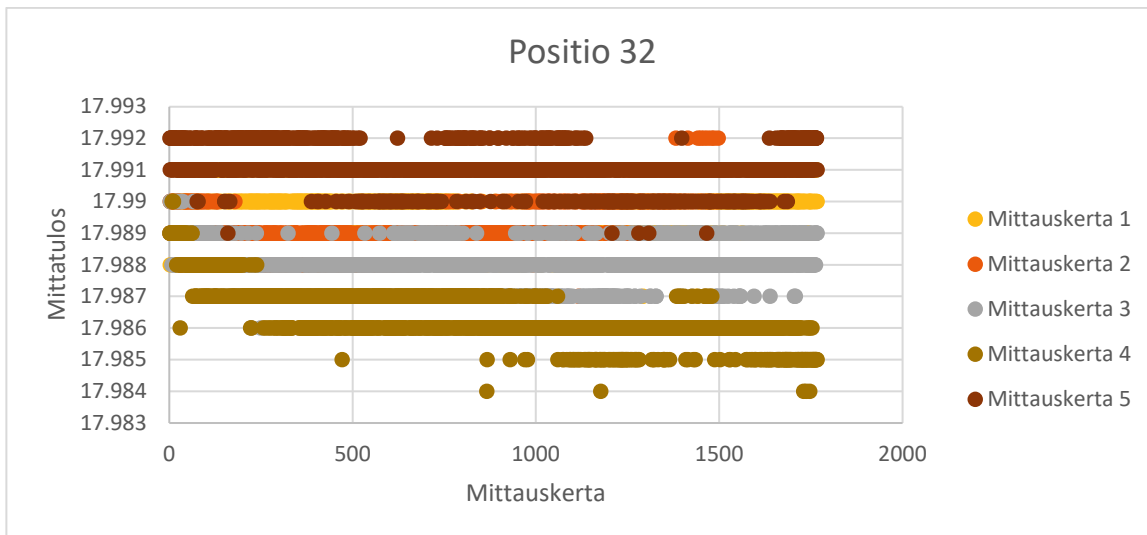
Kuvio 27. Satunnaisvirhe mittaustuloksissa

Mittauksissa kuvaajat noudattivat pääsääntöisesti samaa kaavaa kuten esimerkkinä kuviossa 28 on esitetty. Mittaus tekee "aaltomaista" kuviota, eli ensin tulos on laskeva ja sitten tulos alkaa taas nousemaan.



Kuvio 28. Mittaus etenee aaltomaisesti

Mittaustuloksia tarkasteltiin myös, niin että kaikki saadut mittaustulokset kasattiin yhteen kuvaajaan. Näin saatiin selville, millä alueella kaiken kaikkiaan mittaus vaihtelee. Kuviossa 29 on esitetty kuvaaja eräästä positiosta, joka oli tyypillinen koonti mittaustuloksista. Kuvaajasta voi huomata, että keskiverto vaihtelu on 0,008 mm.



Kuvio 29. Kaikki mittauskerrat koostettuna yhden mittapisteen osalta

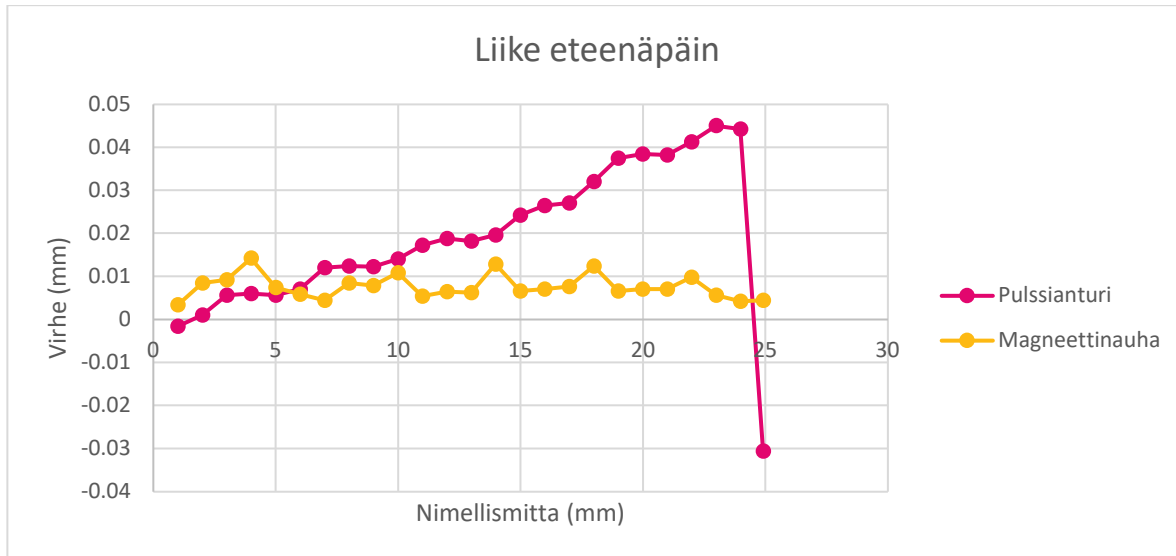
Saaduista tuloksista voidaan päätellä, että mittauksiin on vaikuttanut jokin mekaaninen seikka. Tuloksissa ei ole tarkkaa systematiikkaa, eikä ne toista täsmällisesti itseään. Myös moottorin aiheuttama tärinä on todennäköisesti vaikuttanut mittaustuloksiin.

## 8.2 Liikkeen tarkkuus

Mittaukset suoritettiin suunnitelman mukaisesti Jyväskylän ammattikorkeakoulun kalibrointilaboratoriossa. Jokaisen tehdyn liikkeen jälkeen kaikkien antureiden ja mittalaitteiden lukemat koostettiin mittauspöytäkirjaan. Ulkoisen mittalaitteen tulokset erotettiin magneettinauhan ja pulssi-anturin mittaustuloksista. Näin saatiin selville, paljonko virhettä kummallakin anturilla on ja onko se satunnaista vai systemaattista. Kaikki mittaustulokset on esitetty liitteessä 3.

Saaduista tuloksista tehtiin kuvaaja, jossa vaaka-akselilla on ulkoisen mittalaitteen tulos ja pystyakselilla virhe. Kuviossa 30 on otettu kaikista viidestä mittauksesta keskiarvo ja koostettu se kuvaajaksi. Kuvaajasta voi huomata, että pulssi-anturin virhe on lineaarisesti kasvava. Pulssi-anturi tekee kuitenkin viimeisen liikkeen kohdalla merkittävän heiton virheessä ja näyttää -0,03 mm liian vähän. Tämä voi johtua siitä, että liike alue loppuu ja ruuvi alkaa ottamaan mekaaniseen raja-kiinni.

Magneettinauha-anturin virhe on taas aaltoileva, mutta silti siinä on havaittavissa systematiikkaa. Magneettinauha-anturin virhe vaihtelee 0,014–0,003 mm välillä. Magneettinauhan virheessä näkyy siis suoraan mekaanisen tarkkuuksien aiheuttama virhe, joka koostuu siis ruuvista ja moottorin vaihteistosta.

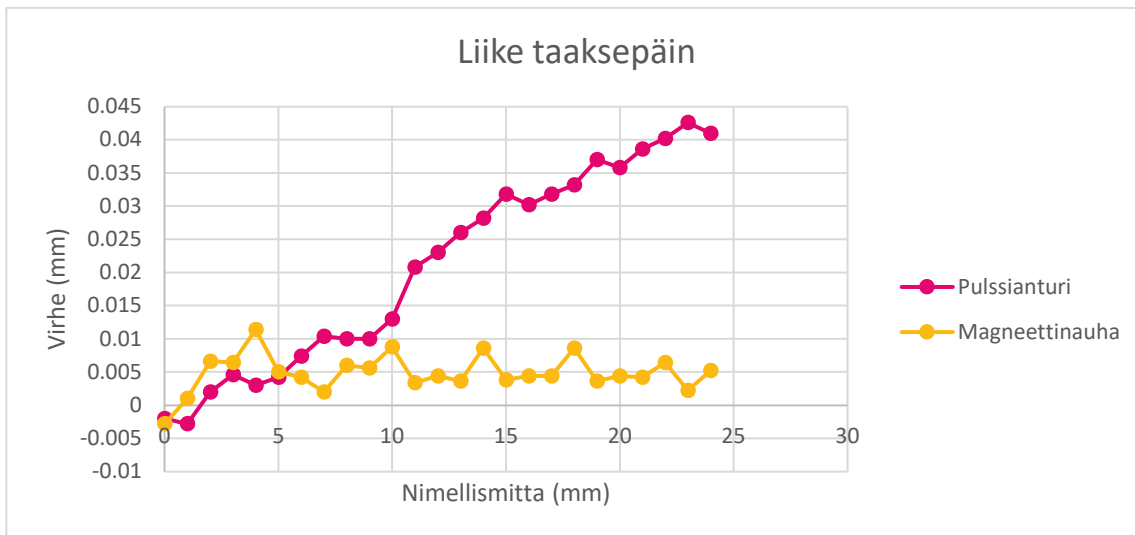


Kuvio 30. Tarkkuus mittausten keskiarvo eteenpäin tehdyssä liikkeessä

Takaisinpäin tehdyn liikkeen osalta tulokset on esitetty kuviossa 31. Kuvioon on koostettu samalla tavalla mittausten keskiarvo, kuten aikaisemmassakin kuviossa. Kuvioista voidaan huomata, että pulssianturin osalta virhe on kutakuinkin samanlainen kuin eteenpäin olevassa liikkeessä.

Magneettinauha-anturin osalta huomataan, että liikeradan loppupäässä virhe on paljon pienempi kuin alkupäässä. Aivan kuten eteenpäin olevassa liikkeessä. Virhe on kuitenkin paljon pienempi, suurin on 0,0114 mm ja pienin 0,001 mm. Eli keskiarvo virheeseen on noin  $\pm 0,004$  mm.

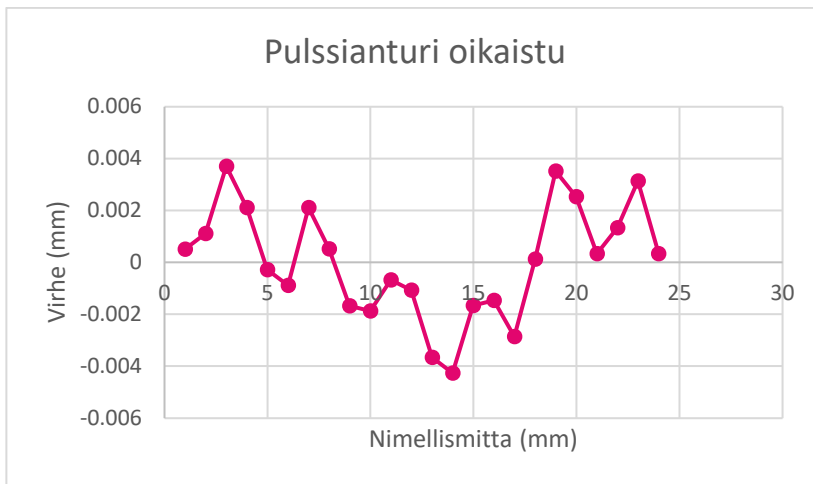




Kuvio 31. Tarkkuus mittausten keskiarvo palaavassa tehdyssä liikkeessä

Lineaarisen virheen lisäksi pulssianturissa on havaittavissa syklistä aaltoilua. Mekaaninen virhe ilmenee myös pulssianturin saaduista mittauksista. On syytä muistaa, että pulssianturin mittaustulos on saatu laskennallisesti. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että saatu pulssimäärä kerrotaan jollain kertoimella millä pyörivästä liikkeestä lasketaan lineaarisen liikkeen etenemä.

Mikäli aikaisemmin esitettyyn eteenpäin liikkeen kuvaajaan sijoitetaan suora ja selvitetään sen kulmakerroin, saadaan laskennallisesti korjattua lineaarinen virhe. Kuviossa 32 on esitetty pulssianturin virhe, ilman lineaarista virhettä. Näin saadaan selville, että pulssianturissa ilmenee noin  $\pm 0,004$  mm virhe. Tämä johtuu toimilaitteen mekaniikasta. Virhe on sama kuin magneettinauha anturissa, vaikkakin se ei ilmene saman muotoisena.



Kuvio 32. Pulssianturin tulos, josta lineaarinen virhe on korjattu

Virheen korjaus on kuitenkin laskennallinen ja kun ohjelmaan korjataan oikea kerroin, on syytä tehdä uudet mittaukset. Tällä tavoin voidaan varmistua lineaarisen virheen korjauksesta.

## 9 Pohdinta

Vaikka tulokset eivät ollutkaan täysin sitä mitä alussa toivottiin, niin ne silti auttoivat kertomaan tällä hetkellä tehtyjen ratkaisujen käytännön toiminnasta. Tulokset kertoivat myös sen, millä tarkkuus alueella tällä hetkellä ollaan. Yleisesti voidaan siis sanoa, että mittaustulokset olivat hyviä ja tuotekehitystä ohjaavia. Toistotarkkuus mittaukset toimivat myös eräänlaisena käyttötestinä ja sillä saatiin selvyttä laitteen kestävydestä.

Mittauksissa toimilaitetta ohjattiin pelkästään askeltamalla askelmoottoria, eikä suoranaista takaisinkytkentää ollut. Vaikkakin tällä tavoin oli mahdollista arvioida mekaniikan tarkkuutta, olisi mielenkiintoista tietää miten antureiden takaisinkytkentä vaikuttaa tarkkuuteen.

Tehtyjen mittausten jälkeen toimilaitetta tutkittiin ja jo silloin huomattiin huomattava välitys ruuvien pyörimistä estävän hammaspyörän välissä. Tämä aiheuttaa virhettä siinä, kun toimilaitte vaihtaa pyörimissuuntaa. Tähän on tarkoitus seuraavassa prototyypissä tehdä pienemmällä välilyksellä oleva hammaspyörä.

Tämän kaltaisen laitteen kehityksessä on huomioitava myös osien valmistusta. Vaikka tarkoilla osilla on vaikutusta lineaariliikkeen tarkkuuteen, on tarkkojen osien valmistaminen usein työlästä ja näin ollen kallista. Tästä syystä onkin mietittävä tarkasti mikä on riittävä tarkkuus ja saadaanko mahdollisia mekaanisia virheitä mahdollisesti kompensoitua ohjelmallisesti. Mutta kuten jo aiheen rajauksessa mainittiin, on takaisin kytkentä ja toimilaitteen ohjaus sitä kautta oma aihe käsiteltäväksi.

Jatkon kannalta olisi syytä vielä korjata pulssianturin kertoimen virhe ohjelmaan sekä asentaa tarkemmin valmistetut osat toimilaitteeseen ja tehdä saman testaukset uudelleen. Tällä tavoin saataisiin selville, miten tehdyt muutokset käytännössä vaikuttivat toimintaan. Vasta tämän jälkeen voitaisiin siirtyä käyttötestiin, jossa testattaisiin laitetta kuormitettuna ja todellisilla käyttönopeuksilla.

Mittaustulosten luotettavuuden osalta on huomioitava, että moni laitteen sisäinen ja ulkoinen asia vaikuttaa mittaustulokseen. Mitattaessa näin pieniä mittoja luottamus mittaustulosten oikeellisuudesta perustuu pääosin mittalaitteeseen. Vaikka mittalaite oli kalibroitu, on mahdollista, että kalibroinnissa on käynyt jokin virhe, jota ei ole huomattu. Tämän takia olisi voinut olla hyvä, että mittauksia olisi suoritettu myös muutamalla erilaisella ulkoisella mittalaitteella. Näin olisi voitu olla enemmän varmoja siitä, että mittaustulos on todenmukainen.

Lähteet, joita tietoperustassa käytettiin, on suurimmaksi osaksi englanninkielisiä. Tämän takia on mahdollista, että joidenkin asioiden kanssa on tapahtunut käänkövirheitä tai muita väärin ymmärryksiä. Lähteinä pyrittiin käyttämään eri yritysten kirjoituksia sekä alan uutisjulkaisuja, arvioiden kuitenkin, että ne olisivat mahdollisimman luotettavia.

## Lähteet

Adams, E. 2020. What's the difference between a ball screw and a lead screw?. Artikkele. DriveLines. Viitattu 6.1.2021. <https://drivelines.co.uk/ball-lead-screw/>

Airila, M. 1993. Mekatroniikka. Helsinki: Otatieto.

Analog Signals vs. Digital Signals. N.d. Artikkele. Monolithic power. Viitattu 14.2.2021. <https://www.monolithicpower.com/en/analog-vs-digital-signal>

Bell, S. 1999. A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement. Opas. National physical laboratory. Viitattu 4.2.2021 <https://www.dit.ie/media/physics/documents/GPG11.pdf>

BOOK 2, CHAPTER 6: Fluid power cylinders. 2008. Artikkele. Hydraulics & Pneumatics. Viitattu 10.1.2021. <https://www.hydraulicspneumatics.com/technologies/other-technologies/article/21884326/book-2-chapter-6-fluid-power-cylinders>

Capacitive Sensor Operation and Optimization. 2012. Artikkele. Lion Precision. Viitattu 14.2.2021 <https://www.lionprecision.com/capacitive-sensor-operation-and-optimization-how-capacitive-sensors-work-and-how-to-use-them-effectively/>

Collins, D. 2018. How do magnetic linear encoders differ from optical versions?. Artikkele. Linear Motion tips. Viitattu 11.2.2021. <https://www.linearmotiontips.com/how-do-magnetic-linear-encoders-differ-from-optical-versions/>

Collins, D. 2015. What are piezo actuator?. Artikkele. Linear motion tips. Viitattu 6.1.2021 <https://www.linearmotiontips.com/what-are-piezo-actuators/>

Collins, D. 2020. What are differential roller screws and how do they differ from planetary designs? Artikkel. Linear motion tips. Viitattu 15.1.2021. <https://www.linearmotiontips.com/what-are-differential-roller-screws-compared-to-planetary-roller-screws/>

Company Profile. N.d. Artikkel. TasoWheel Systems Oy. Viitattu 2.3.2021 <https://www.tasowheel.fi/tasowheel-systems/company-profile/>

Eddy current sensor: Operating principle and applications. 2018. Blogi kirjoitus. Bestech. Viitattu 14.2.2021. <https://www.bestech.com.au/blogs/eddy-current-sensor-principle/>

Eddy Current Sensors. 2014. PowerPoint -esitys. SlideServe. Viitattu 14.2.2021 [https://www.slide-serve.com/sugar/eddy-current-sensors](https://www.slideserve.com/sugar/eddy-current-sensors)

Eitel, L. 2019. Artikkel. Design World. Viitattu 2.3.2021 <https://www.designworldonline.com/new-technologies-and-applications-for-linear-motors/>

Electromechanical Actuator Products. N.d. Tekninen dokumentti. Parker. Viitattu 15.01.2021. <https://www.parker.com/parkerimages/automation/cat/English/1894intro.pdf>

Fonelius, J. Rininen, J. Vilenius, M. 1998. Servotekniikka. Helsinki: Edita

Gannon, M. 2017. The business end of hydraulics: the cylinder. Artikkel. Mobile Hydraulic Tips. Viitattu 10.1.2021. <https://www.mobilehydraulictips.com/business-end-hydraulics-cylinder/>

Hall Effect Sensor. N.d. Artikkel. Electronics Tutorials. Viitattu 14.2.2021 <https://www.electronicstutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>

High-Force Linear Actuators: Screw Types Explained. 2018. Artikkel. GCC. Viitattu 29.12.2020. <https://gcc-na.com/high-force-linear-actuators-screw-types-explained/>

HIWIN Ballscrews. N.d. Tekninen dokumentti. HIWIN. Viitattu 5.1.2021 [https://www.hiwin.com.tw/download/tech\\_doc/bs/Ballscrew-\(E\).pdf](https://www.hiwin.com.tw/download/tech_doc/bs/Ballscrew-(E).pdf)

Järvinen, M. Keinänen, T. 2014. Mittaustekniikka. Helsinki: Sanomapro.

Layosa, C. 2016. Mastering Ball Screws Pt. 1: Steel Ball Recirculation System and Characteristics.

Blogi kirjoitus. Misumi Mech Lab. Viitattu 15.1.2021 <https://blog.misumiusa.com/ball-screw-steel-ball-recirculation/>

Lewotsky, K. 2007. Choosing the Right Linear Actuator. Artikkel. Motion Control Online. Viitattu 2.3.2021. [https://www.motioncontrolonline.org/content-detail.cfm/Motion-Control-Technical-Features/Choosing-the-Right-Linear-Actuator/content\\_id/1051](https://www.motioncontrolonline.org/content-detail.cfm/Motion-Control-Technical-Features/Choosing-the-Right-Linear-Actuator/content_id/1051)

Linear Actuators. N.d. Artikkel. Basic Car Audio Electronics. Viitattu 29.12.2020.

<http://www.bcae1.com/actuator.htm>

Linear actuator guide. N.d. Artikkel. Anaheim Automation. Viitattu 29.12.2020 <https://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/linear-actuator-guide.php>

Linear Guide Guide. N.d. Artikkel. Anaheim Automation. Viitattu 29.12.2020. <https://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/linear-guide.php>

McNier, T. Johnson, J. 2011. How to Specify, Select and Apply Linear Ball Screw Drives. Artikkel.

Design World. Viitattu 5.1.2021. <https://www.designworldonline.com/how-to-specify-select-and-apply-linear-ball-screw-drives/>

Mini Linear Actuator. N.d. Tuotekuvaus. Progressive Automations. Viitattu 29.12.2020.

<https://www.progressiveautomations.com/products/mini-linear-actuator>

Measurements and Error Analysis. N.d. Artikkel. University of North Carolina. Viitattu 4.2.202.

[https://www.webassign.net/question\\_assets/unccolphysmech1/measurements/manual.html](https://www.webassign.net/question_assets/unccolphysmech1/measurements/manual.html)

Position Sensors. N.d. Artikkel. Electrocis Tutorials. Viitattu 11.2.2021 [https://www.electronicstutorials.ws/io/io\\_2.html](https://www.electronicstutorials.ws/io/io_2.html)

Pulssianturien teoriaa. N.d Artikkeli. OEM Finland. Viitattu 14.2.2021. <https://www.oem.fi/tuotteet/anturi/pulssianturit/inkrementtianturit-426721/pulssianturien-teoriaa-164972>

Rosengren, G. 2014. Artikkeli. Introduction to accuracy and repeatability in linear motion systems. Tolomatic. Viitattu 5.2.2021 [www.tolomatic.com/Portals/0/Resources/f11d591061bf4b789fcf29f308c1b966-orig.pdf](http://www.tolomatic.com/Portals/0/Resources/f11d591061bf4b789fcf29f308c1b966-orig.pdf)

Schweber. B. 2018. Rotary encoder basics and applications, Part 1: Optical encoders. Artikkeli. Analog IC Tips. Viitattu 14.2.2021. <https://www.analogictips.com/rotary-encoders-part-1-optical-encoders/>

Selecting the Optimal Screw Technology. N.d. Tekninen dokumentti. Tolomatic. Viitattu 15.1.2021. <https://www.tolomatic.com/Portals/0/Resources/74964fadba7e44cd86bc2e6df63d3342-orig.pdf>

The advantages and disadvantages of an encoder. 2016. Artikkeli. Roundss. Viitattu 14.2.2021 [https://www.roundssencoder.com/info\\_list.asp?id=1265](https://www.roundssencoder.com/info_list.asp?id=1265)

What is a linear actuator. N.d. Artikkeli. Industrial Devices. Viitattu 5.1.2021. <http://www.actuators-electric.co.uk/electric-linear-actuators-faqs/>





## Liitteet

### Liite 1. Kalibrointitodistus



JYVÄSKYLÄN AMMATTIKORKEAKOULU  
Teknologiayksikkö  
Kalibrointikeskus  
Rajakatu 35  
40200 Jyväskylä



## AKKREDITOITU KALIBROINTILABORATORIO K022 KALIBROINTITODISTUS

KALIBROINTITODISTUS nro K022 - P21077  
Certificate of Calibration no

Tilaaja - Customer	Jamk Teknologia Kalibrointikeskus K022 Rajakatu 35 40200 Jyväskylä
Kalibroitu laite – Item	Sähköinen pituudenmittauslaite
Valmistaja - Manufactured by	Sylvac
Tyyppi - Mode	Anturi Sylvac P25 (0-25 mm) ja näyttö Sylvac 80
Sarjanumero - Serial number	Anturi: 8208, Näyttö: 00199
Päiväys - Date	9.3.2021
Kalibrointipäivä – Date of calibr.	9.3.2021
Allekirjoitukset - Signatures	Juha Tuikkanen
Sivu - Page	1 ( 2 )
Liitteitä - Documents attached	1

Tämän todistuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain kalibrointilaboratorion antaman kirjallisen luvan perusteella. JAMK Kalibrointikeskus on FINAS-akkreditointipalvelun akkreditoima kalibrointilaboratorio (K022, SFS-EN ISO/IEC 17025:2017). Akkreditointi kuuluu Euroopan akkreditointielinten yhteistyöjärjestön, European Co-operation for Accreditation (EA) monenkeskiseen tunnustamissopimukseen EA MLA.

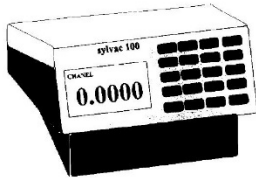
This Certificate may only be reproduced in full, except with the prior written permission by the issuing Laboratory. JAMK Calibration Laboratory is a calibration laboratory (K022, SFS-EN ISO/IEC 17025:2017) accredited by FINAS Finnish Accreditation Service. The accreditation is included in the Multilateral Agreement (EA MLA) of the European co-operation for Accreditation (EA).

**JYVÄSKYLÄN AMMATTIKORKEAKOULU, TEKNOLOGIAYKSIKKÖ, KALIBROINTIKESKUS**

Rajakatu 35, 40200 Jyväskylä.

puh. 040 637 6612 tai 040 637 4405

**PITUUDENMITTAUSLAITTEEN MITTAUSPÖYTÄKIRJA**



**Laite:** Sylvac anturi ja näyttö  
**Numero:** Anturi: P25 / 8208  
Näyttö: Sylvac 80 / 00199



Nollakohta on anturi ulkona.

**MITTAUSTULOKSET:**

Mittauskohta/anturin näyttämä [mm]	Poikkeama meno [ $\mu\text{m}$ ]	Poikkeama paluu [ $\mu\text{m}$ ]
0	0,005	0,15
2,5	0,803	0,918
5	0,691	0,776
7,5	0,56	0,399
10	0,874	0,814
12,5	0,751	0,769
15	0,418	0,378
17,5	0,923	0,985
20	0,852	0,867
22,5	0,101	0,063
25	0,162	0,188

**Päivämäärä:** 9.3.2021

**Mittaaja:** Juha Tuikkanen

**JYVÄSKYLÄN AMMATTIKORKEAKOULU, TEKNOLOGIAIKSIKKÖ, KALIBROINTIKESKUS**

Rajakatu 35, 40200 Jyväskylä.

puh. 040 637 6612 tai 040 637 4405

**Menetelmä**

Sähköiset pituudenmittauslaitteet kalibroidaan JAMK kalibrointiohjeen nro 2150 mukaisesti.

**Tarkistetut mitta-alueet**

Asteikko 0-25 mm mitattiin 2,5 mm:n välein molempiin suuntiin ja mittaavoima.

**Kalibrointivälineet ja jäljitettävyys**

Asteikko kalibroitiin pituudenmittauskoneeseen Trimos Telma 1000 (1013 ID8) yhdistetyllä laserinterferometrillä Agilent Technologies (US52140221). Mittausvoima mitattiin vaa'alla Casbee (254).

Kalibrointitulokset ovat jäljitettäviä SI-mittayksikköjärjestelmään kansallisten mittanormaalien kautta.

**Mittausolosuhteet**

Mittaukset suoritettiin Kalibrointikeskuksen mittaushuoneessa seuraavissa olosuhteissa:

Ilman lämpötila	19,99 ... 20,04 °C
Koneen lämpötila	20,00 ... 20,08 °C
Ilman paine	755,3 ... 755,5 mmHg
Ilman kosteus	38 ... 40 %
Lämpöpitenehkero	11,7 ppm/°C

**Akkreditoitu pätevyysalue**

Mittalaitteen kalibrointi kuuluu FINAS-akkreditointipalvelun (K022, SFS-EN ISO/IEC 17025:2017) mukaisesti akkreditoituun pätevyysalueeseemme, lukuun ottamatta voimanmittausta. Tutustu pätevyysalueeseemme tarkemmin [www.sivuillamme](http://www.sivuillamme): [www.jamk.fi/kalibrointi](http://www.jamk.fi/kalibrointi). Sivuilta voit ladata myös akkreditointitodistuksemme.

**Tulokset ja päätelmät**

Tulokset koskevat vain tämän kalibrointitodistuksen mittavälineitä.

Anturi on mitattu siten, että anturin nollakohta on kara ulkona. Mittaus on aloitettu nol-laamalla kara 0,8 mm:n kohdalle. Anturin 8208 asteikon kokonaisvirhe oli 0,98 µm välillä 0-25 mm. Max käännevirhe oli 0,16 µm. Mittausvoima oli välillä 0,70 – 1,10 N. Asteikon yksit-yiskohtaiset mittaustulokset ovat liitteessä 1.

**Mittausepävarmuus**

Mittausepävarmuus on laskettu EA-4/02:n mukaan. Mittausepävarmuus asteikkomittauksissa oli  $\pm 0,40 \mu\text{m}$  ( $= \pm Q[0,40; 6,6 \times L] \mu\text{m}$ , missä L = pituus metreinä). Voimanmittauksissa mittausepävarmuus oli 0,2 N. Mittaustulokselle annettu laajennettu epävarmuus on saatu standardiepävarmuudesta kertomalla se kattavuuskertoimella  $k=2$ , normaalihajonnalle laajennettu epävarmuus vastaa 95 % vaihteluväliä.

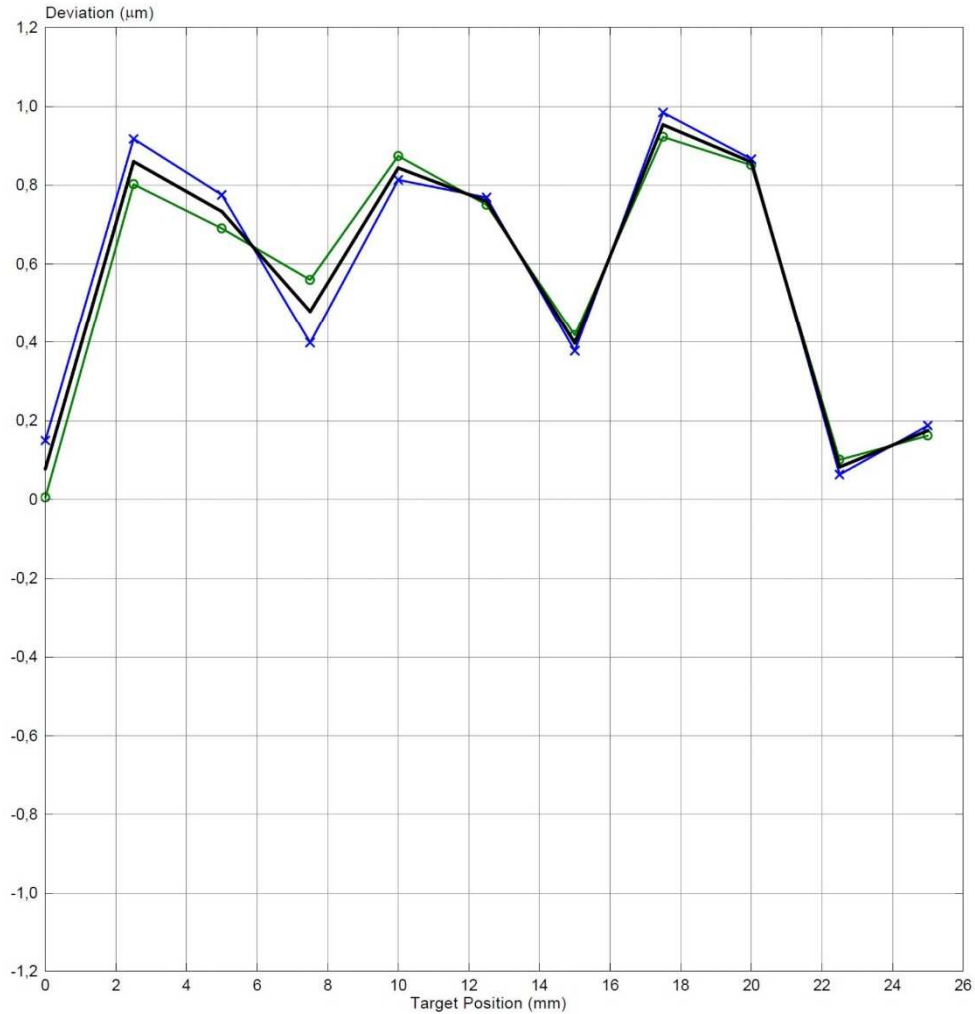
**JYVÄSKYLÄN AMMATTIKORKEAKOULU, TEKNOLOGIAIKSIKKÖ, KALIBROINTIKESKUS**

Rajakatu 35, 40200 Jyväskylä.

puh. 040 637 6612 tai 040 637 4405

**ASTEIKON MITTAUS**

Linear - Measurement Axis: X

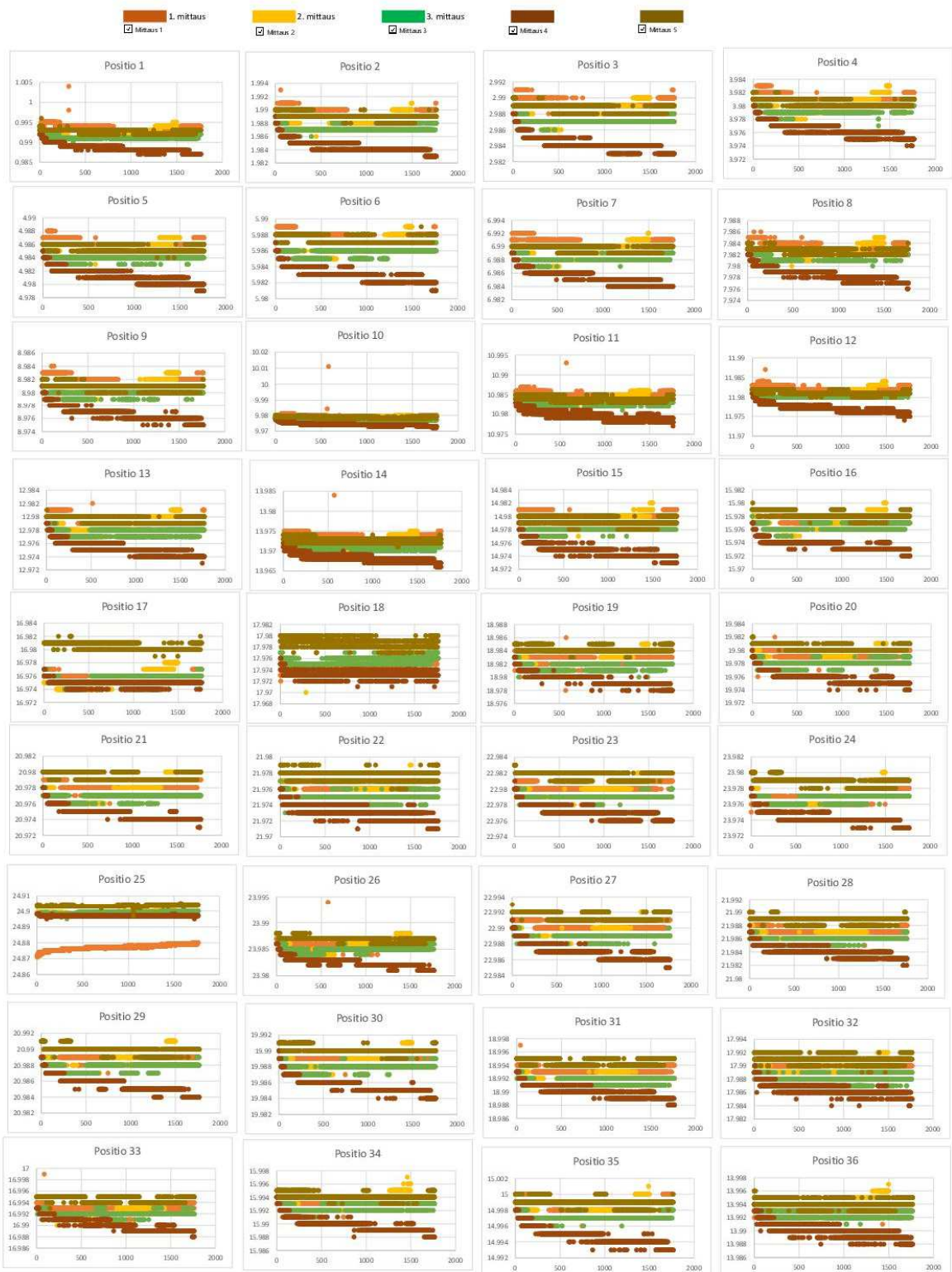


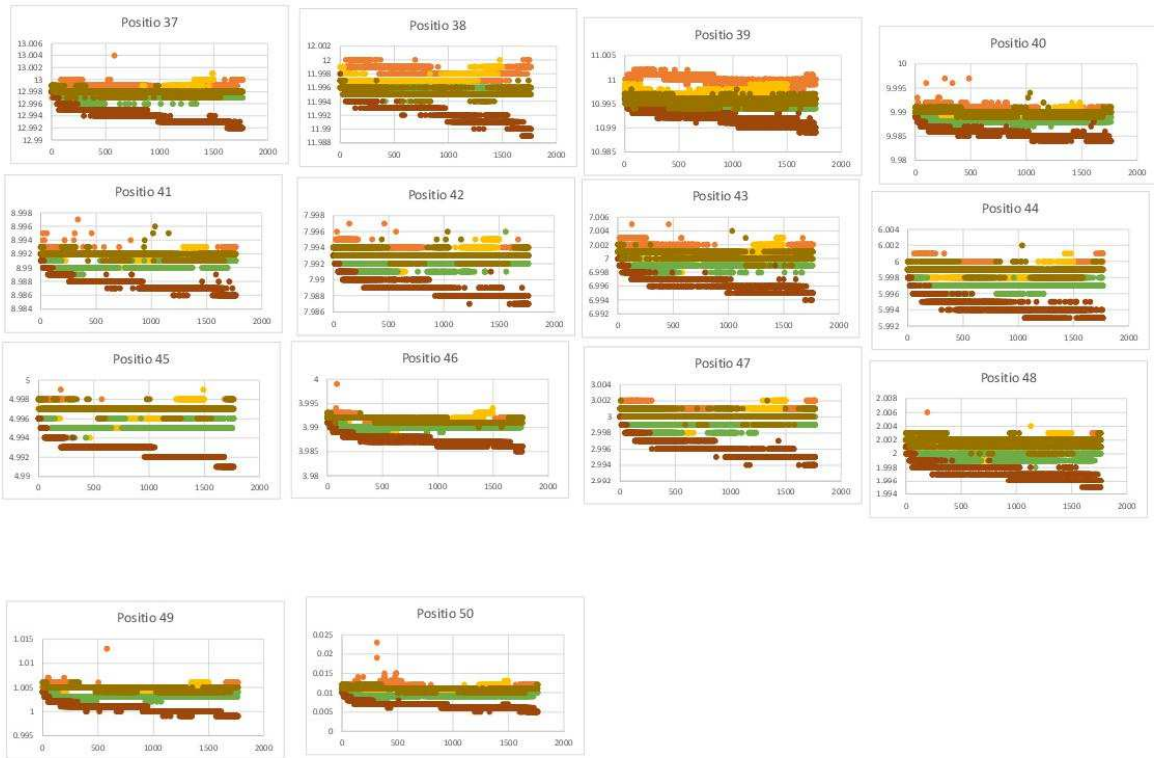
Numerical Analysis		Machine Information		Environmental Data			
Standards:	ISO 230-2 1997	Name of Inspector:	Juha Tuikkanen	AT (°C)	Max 20,04	Min 19,99	Mean 20,01
Error Sign Convention:	Algebraic	Machine Name:	Sylvac	AP (mmHg)	755,5	755,3	755,4
Coverage Factor (Sigma):	2	Machine Serial No.:	JAMK Kalibrintikeskus K022	RH (%)	40	38	39
Accuracy:	A = 0,980 µm	Date of Test:	9.3.2021 10.38.41	MT1 (°C)	20,08	20,07	20,07
	A↑ = 0,918 µm	Current Date:	9.3.2021 11.41.00	MT2 (°C)	20,02	20,00	20,01
	A↓ = 0,922 µm	Filename:	Metric_Lin_1_mittaus 1.Lin	MT3 (°C)			
Sys. Dev. Pos.:	E = 0,980 µm	Comments:	Kalibroitu Jamk:n tiloissa Jyväskylässä	Expans. Coeff.:			11,7 ppm/°C
	E↑ = 0,918 µm		Todistuksen numero: K022-P21077				
	E↓ = 0,922 µm						
Mean Bidir. Pos. Dev.:	M = 0,876 µm	Anturi:	8208				
Repeatability:	R = 0,161 µm	Näyttö:	00199				
Max Reversal Error:	B = 0,161 µm						
Mean Reversal Error:	B̄ = -0,015 µm						

**Liite 2. Toistotarkkuuden mittauspöytäkirja**

Positio	Mittaus 1			Mittaus 2			Mittaus 3			Mittaus 4			Mittaus 5		
	MAX	MIN	Erotus	MAX	MIN	Erotus	MAX	MIN	Erotus	MAX	MIN	Erotus	MAX	MIN	Erotus
1	1.004	0.992	0.012	0.995	0.991	0.004	0.993	0.99	0.003	0.993	0.987	0.006	0.996	0.992	0.004
2	1.993	1.988	0.005	1.991	1.986	0.005	1.989	1.986	0.003	1.989	1.983	0.006	1.989	1.988	0.002
3	2.991	2.988	0.003	2.99	2.986	0.004	2.989	2.986	0.003	2.989	2.983	0.006	2.989	2.988	0.002
4	3.983	3.98	0.003	3.983	3.978	0.005	3.981	3.977	0.004	3.981	3.974	0.007	3.982	3.98	0.002
5	4.988	4.985	0.003	4.987	4.983	0.004	4.986	4.983	0.003	4.985	4.979	0.006	4.986	4.984	0.002
6	5.989	5.986	0.003	5.989	5.985	0.004	5.987	5.985	0.002	5.987	5.981	0.006	5.989	5.987	0.002
7	6.992	6.989	0.003	6.992	6.987	0.005	6.99	6.987	0.003	6.989	6.984	0.005	6.99	6.989	0.001
8	7.986	7.982	0.004	7.985	7.98	0.005	7.983	7.98	0.003	7.983	7.976	0.007	7.984	7.982	0.002
9	8.984	8.981	0.003	8.983	8.979	0.004	8.981	8.979	0.002	8.981	8.975	0.006	8.982	8.98	0.002
10	10.011	9.978	0.033	9.98	9.976	0.004	9.978	9.976	0.002	9.978	9.972	0.006	9.98	9.978	0.002
11	10.993	10.983	0.01	10.986	10.982	0.004	10.985	10.981	0.004	10.984	10.977	0.007	10.985	10.983	0.002
12	11.987	11.981	0.006	11.984	11.98	0.004	11.982	11.98	0.002	11.981	11.974	0.007	11.982	11.98	0.002
13	12.982	12.978	0.004	12.981	12.976	0.005	12.979	12.977	0.002	12.98	12.973	0.007	12.981	12.979	0.002
14	13.984	13.972	0.012	13.975	13.969	0.006	13.973	13.969	0.004	13.972	13.966	0.006	13.974	13.971	0.003
15	14.981	14.979	0.002	14.982	14.977	0.005	14.98	14.977	0.003	14.979	14.973	0.006	14.98	14.978	0.002
16	15.979	15.976	0.003	15.98	15.975	0.005	15.978	15.975	0.003	15.977	15.972	0.005	15.98	15.977	0.003
17	16.977	16.974	0.003	16.978	16.974	0.004	16.977	16.974	0.003	16.977	16.974	0.003	16.982	16.979	0.003
18	17.977	17.972	0.005	17.979	17.97	0.009	17.977	17.974	0.003	17.976	17.971	0.005	17.98	17.977	0.003
19	18.986	18.978	0.008	18.985	18.98	0.005	18.983	18.98	0.003	18.983	18.978	0.005	18.985	18.983	0.002
20	19.982	19.976	0.006	19.981	19.977	0.004	19.979	19.977	0.002	19.98	19.974	0.006	19.982	19.98	0.002
21	20.979	20.976	0.003	20.978	20.976	0.002	20.978	20.975	0.003	20.978	20.973	0.005	20.98	20.979	0.001
22	21.978	21.974	0.004	21.979	21.974	0.005	21.977	21.973	0.004	21.976	21.971	0.005	21.979	21.976	0.003
23	22.981	22.978	0.003	22.982	22.978	0.004	22.98	22.978	0.002	22.981	22.976	0.005	22.983	22.981	0.002
24	23.978	23.975	0.003	23.98	23.975	0.005	23.977	23.976	0.001	23.978	23.973	0.005	23.98	23.978	0.002
25	24.88	24.871	0.009	24.901	24.897	0.004	24.9	24.895	0.005	24.898	24.895	0.003	24.905	24.897	0.008
26	23.994	23.984	0.01	23.988	23.984	0.004	23.986	23.984	0.002	23.986	23.981	0.005	23.988	23.986	0.002
27	22.992	22.988	0.004	22.992	22.988	0.004	22.99	22.988	0.002	22.991	22.985	0.006	22.993	22.991	0.002
28	21.989	21.984	0.005	21.989	21.985	0.004	21.987	21.985	0.002	21.988	21.982	0.006	21.99	21.988	0.002
29	20.99	20.987	0.003	20.991	20.987	0.004	20.989	20.987	0.002	20.989	20.984	0.005	20.991	20.989	0.002
30	19.99	19.987	0.003	19.991	19.987	0.004	19.989	19.987	0.002	19.99	19.984	0.006	19.991	19.989	0.002
31	18.997	18.991	0.006	18.995	18.991	0.004	18.993	18.991	0.002	18.993	18.988	0.005	18.995	18.994	0.001
32	17.992	17.986	0.006	17.992	17.987	0.005	17.99	17.986	0.004	17.99	17.984	0.006	17.992	17.989	0.003
33	16.999	16.99	0.009	16.995	16.99	0.005	16.993	16.99	0.003	16.993	16.988	0.005	16.995	16.993	0.002
34	15.995	15.991	0.004	15.997	15.991	0.006	15.994	15.991	0.003	15.994	15.988	0.006	15.995	15.993	0.002
35	15	14.996	0.004	15.001	14.997	0.004	14.999	14.996	0.003	14.999	14.993	0.006	15	14.998	0.002
36	13.995	13.991	0.004	13.997	13.991	0.006	13.994	13.99	0.004	13.994	13.988	0.006	13.996	13.993	0.003
37	13.004	12.997	0.007	13.001	12.996	0.005	12.999	12.996	0.003	12.998	12.992	0.006	12.999	12.997	0.002
38	12	11.996	0.004	12	11.995	0.005	11.997	11.994	0.003	11.998	11.989	0.009	11.997	11.994	0.003
39	11.002	10.997	0.005	10.999	10.995	0.004	10.997	10.993	0.004	10.997	10.989	0.008	10.998	10.994	0.004
40	9.997	9.988	0.009	9.992	9.987	0.005	9.99	9.987	0.003	9.99	9.984	0.006	9.994	9.989	0.005
41	8.997	8.991	0.006	8.993	8.99	0.003	8.992	8.989	0.003	8.992	8.986	0.006	8.996	8.991	0.005
42	7.997	7.992	0.005	7.995	7.991	0.004	7.996	7.991	0.005	7.993	7.987	0.006	7.996	7.992	0.004
43	7.005	7	0.005	7.003	6.998	0.005	7.001	6.997	0.004	7.001	6.994	0.007	7.004	6.999	0.005
44	6.001	5.997	0.004	6.001	5.996	0.005	5.999	5.996	0.003	5.999	5.993	0.006	6.002	5.998	0.004
45	4.999	4.996	0.003	4.999	4.994	0.005	4.996	4.994	0.002	4.996	4.991	0.005	4.998	4.996	0.002
46	3.999	3.99	0.009	3.994	3.989	0.005	3.992	3.989	0.003	3.992	3.985	0.007	3.993	3.99	0.003
47	3.002	2.999	0.003	3.002	2.998	0.004	3.001	2.998	0.003	3	2.994	0.006	3.002	2.999	0.003
48	2.006	2	0.006	2.004	1.998	0.006	2.001	1.998	0.003	2.002	1.995	0.007	2.003	2	0.003
49	1.013	1.004	0.009	1.006	1.002	0.004	1.004	1.002	0.002	1.004	0.999	0.005	1.006	1.004	0.002
50	0.023	0.01	0.013	0.013	0.009	0.004	0.011	0.008	0.003	0.011	0.005	0.006	0.012	0.01	0.002

Pulsianturi Mittaus1			Pulsianturi Mittaus2			Pulsianturi Mittaus3			Pulsianturi Mittaus4			Pulsianturi Mittaus5		
MAX	MIN	Erotus	MAX	MIN	Erotus	MAX	MIN	Erotus	MAX	MIN	Erotus	MAX	MIN	Erotus
0.998	0.998	0	0.998	0.998	0	0.998	0.998	0	0.998	0.998	0	0.998	0.998	0
1.997	1.997	0	1.996	1.996	0	1.996	1.996	0	1.996	1.996	0	1.996	1.996	0
2.993	2.993	0	2.992	2.992	0	2.992	2.992	0	2.992	2.992	0	2.992	2.992	0
3.99	3.99	0	3.989	3.989	0	3.989	3.989	0	3.989	3.989	0	3.989	3.989	0
4.988	4.988	0	4.987	4.987	0	4.987	4.987	0	4.987	4.987	0	4.987	4.987	0
5.987	5.986	0.001	5.986	5.986	0	5.986	5.986	0	5.986	5.986	0	5.986	5.986	0
6.983	6.982	0.001	6.982	6.982	0	6.982	6.982	0	6.982	6.982	0	6.982	6.982	0
7.98	7.98	0	7.979	7.979	0	7.979	7.979	0	7.979	7.979	0	7.979	7.979	0
8.978	8.977	0.001	8.977	8.977	0	8.977	8.977	0	8.977	8.977	0	8.977	8.977	0
9.976	9.976	0	9.975	9.975	0	9.975	9.975	0	9.976	9.975	0.001	9.976	9.975	0.001
10.973	10.973	0	10.972	10.972	0	10.972	10.972	0	10.972	10.972	0	10.972	10.972	0
11.97	11.969	0.001	11.969	11.969	0	11.969	11.969	0	11.969	11.969	0	11.969	11.969	0
12.968	12.968	0	12.967	12.967	0	12.967	12.967	0	12.968	12.967	0.001	12.968	12.967	0.001
13.966	13.965	0.001	13.965	13.965	0	13.965	13.965	0	13.965	13.965	0	13.965	13.965	0
14.962	14.962	0	14.962	14.962	0	14.962	14.962	0	14.962	14.962	0	14.962	14.962	0
15.959	15.959	0	15.958	15.958	0	15.958	15.958	0	15.959	15.958	0.001	15.959	15.958	0.001
16.957	16.957	0	16.957	16.957	0	16.957	16.957	0	16.957	16.957	0	16.957	16.957	0
17.956	17.956	0	17.955	17.955	0	17.955	17.955	0	17.955	17.955	0	17.955	17.955	0
18.953	18.952	0.001	18.952	18.952	0	18.952	18.952	0	18.952	18.952	0	18.952	18.952	0
19.949	19.949	0	19.948	19.948	0	19.948	19.948	0	19.948	19.948	0	19.948	19.948	0
20.947	20.947	0	20.947	20.947	0	20.947	20.947	0	20.947	20.947	0	20.947	20.947	0
21.946	21.945	0.001	21.945	21.944	0.001	21.945	21.944	0.001	21.945	21.945	0	21.945	21.945	0
22.942	22.942	0	22.941	22.941	0	22.941	22.941	0	22.942	22.941	0.001	22.942	22.941	0.001
23.939	23.938	0.001	23.938	23.938	0	23.938	23.938	0	23.938	23.938	0	23.938	23.938	0
24.936	24.936	0	24.935	24.934	0.001	24.935	24.935	0	24.935	24.935	0	24.935	24.934	0.001
23.947	23.946	0.001	23.947	23.947	0	23.948	23.947	0.001	23.948	23.947	0.001	23.948	23.947	0.001
22.951	22.95	0.001	22.95	22.95	0	22.95	22.95	0	22.95	22.95	0	22.95	22.95	0
21.954	21.954	0	21.954	21.954	0	21.954	21.954	0	21.954	21.954	0	21.954	21.954	0
20.956	20.956	0	20.956	20.955	0.001	20.956	20.955	0.001	20.956	20.955	0.001	20.956	20.955	0.001
19.958	19.958	0	19.958	19.958	0	19.958	19.958	0	19.958	19.958	0	19.958	19.958	0
18.962	18.961	0.001	18.96	18.96	0	18.96	18.96	0	18.961	18.96	0.001	18.96	18.96	0
17.965	17.964	0.001	17.965	17.965	0	17.965	17.965	0	17.965	17.965	0	17.965	17.965	0
16.968	16.966	0.002	16.966	16.966	0	16.966	16.966	0	16.966	16.966	0	16.966	16.966	0
15.969	15.968	0.001	15.969	15.968	0.001	15.968	15.968	0	15.969	15.968	0.001	15.969	15.968	0.001
14.972	14.971	0.001	14.971	14.971	0	14.971	14.971	0	14.971	14.971	0	14.971	14.971	0
13.975	13.975	0	13.975	13.975	0	13.975	13.975	0	13.975	13.975	0	13.975	13.975	0
12.977	12.977	0	12.977	12.976	0.001	12.977	12.976	0.001	12.977	12.976	0.001	12.977	12.976	0.001
11.979	11.979	0	11.979	11.979	0	11.979	11.979	0	11.979	11.979	0	11.979	11.979	0
10.982	10.982	0	10.981	10.981	0	10.981	10.981	0	10.981	10.981	0	10.981	10.981	0
9.986	9.985	0.001	9.985	9.985	0	9.985	9.985	0	9.985	9.985	0	9.985	9.985	0
8.988	8.987	0.001	8.987	8.987	0	8.987	8.987	0	8.987	8.987	0	8.987	8.987	0
7.99	7.989	0.001	7.99	7.989	0.001	7.989	7.989	0	7.99	7.989	0.001	7.99	7.989	0.001
6.993	6.992	0.001	6.992	6.992	0	6.992	6.992	0	6.992	6.992	0	6.992	6.992	0
5.996	5.995	0.001	5.996	5.995	0.001	5.996	5.995	0.001	5.996	5.995	0.001	5.996	5.995	0.001
4.998	4.998	0	4.998	4.997	0.001	4.998	4.997	0.001	4.998	4.997	0.001	4.998	4.997	0.001
4	4	0	4	4	0	4	4	0	4	4	0	4	4	0
3.004	3.003	0.001	3.003	3.002	0.001	3.003	3.002	0.001	3.003	3.002	0.001	3.003	3.002	0.001
2.007	2.005	0.002	2.006	2.005	0.001	2.006	2.005	0.001	2.006	2.005	0.001	2.006	2.005	0.001
1.009	1.008	0.001	1.008	1.008	0	1.008	1.008	0	1.008	1.008	0	1.008	1.008	0
0.01	0.01	0	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0



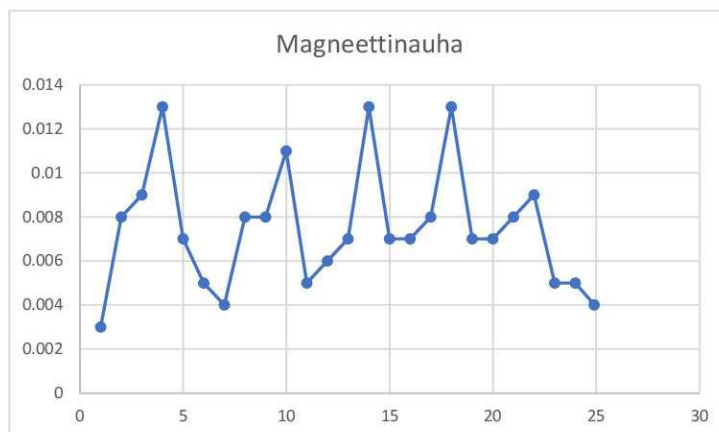
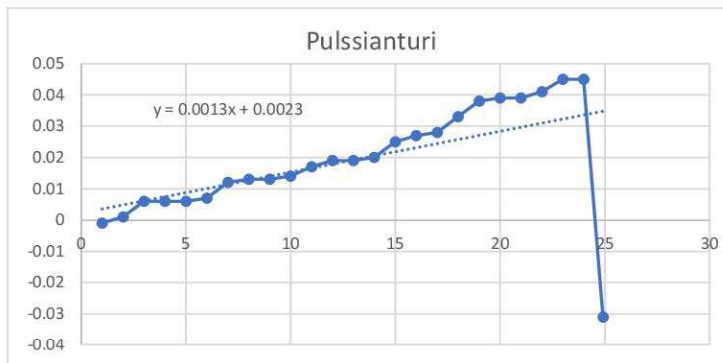




### Liite 3. Tarkkuuden mittauspöytäkirja

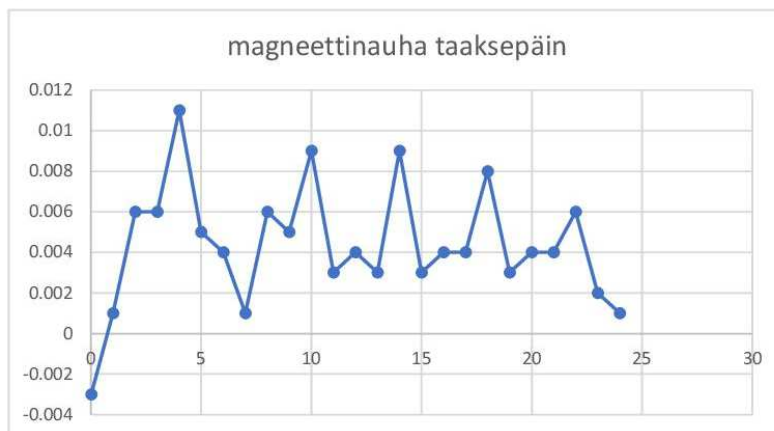
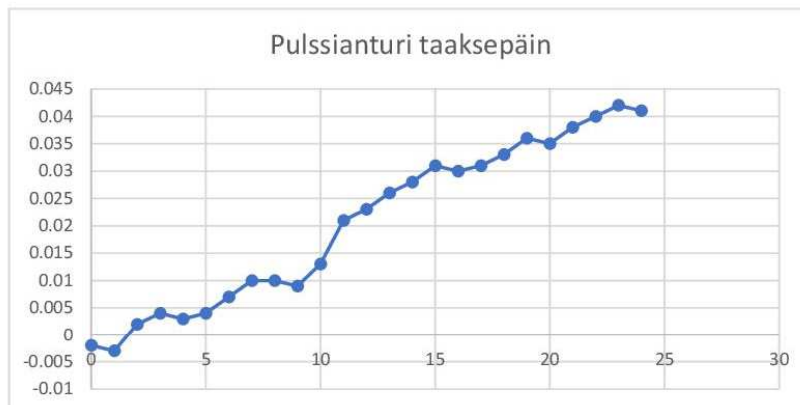
Mittaus\_1

Pulssi	Magneetti	Eteen +50	Mitattu	pulssi erotus	magneetti erotus
0.998	0.994		0.997	-0.001	0.003
1.996	1.989		1.997	0.001	0.008
2.992	2.989		2.998	0.006	0.009
3.989	3.982		3.995	0.006	0.013
4.987	4.986		4.993	0.006	0.007
5.986	5.988		5.993	0.007	0.005
6.982	6.99		6.994	0.012	0.004
7.979	7.984		7.992	0.013	0.008
8.977	8.982		8.99	0.013	0.008
9.975	9.978		9.989	0.014	0.011
10.972	10.984		10.989	0.017	0.005
11.969	11.982		11.988	0.019	0.006
12.967	12.979		12.986	0.019	0.007
13.965	13.972		13.985	0.02	0.013
14.962	14.98		14.987	0.025	0.007
15.958	15.978		15.985	0.027	0.007
16.957	16.977		16.985	0.028	0.008
17.955	17.975		17.988	0.033	0.013
18.952	18.983		18.99	0.038	0.007
19.948	19.98		19.987	0.039	0.007
20.947	20.978		20.986	0.039	0.008
21.945	21.977		21.986	0.041	0.009
22.941	22.981		22.986	0.045	0.005
23.938	23.978		23.983	0.045	0.005
24.935	24.9		24.904	-0.031	0.004



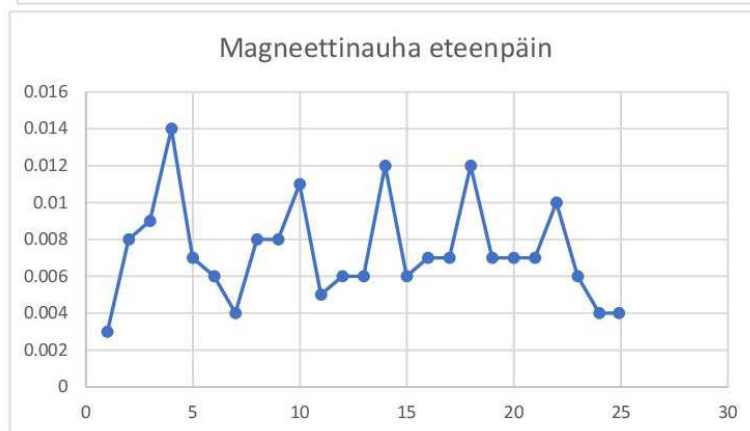
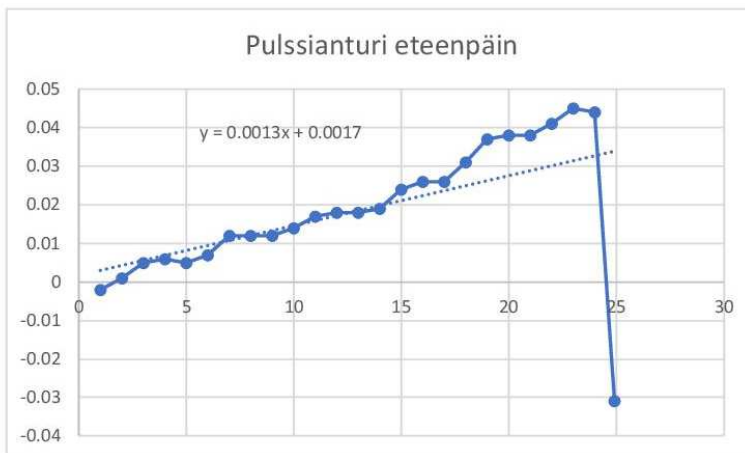
## Mittaus\_1

Pulssi	Magneetti Taakse	Mitattu	pulssi erot magneetti erotus	
23.947	23.987	23.988	0.041	0.001
22.95	22.99	22.992	0.042	0.002
21.954	21.988	21.994	0.04	0.006
20.955	20.989	20.993	0.038	0.004
19.958	19.989	19.993	0.035	0.004
18.96	18.993	18.996	0.036	0.003
17.965	17.99	17.998	0.033	0.008
16.966	16.993	16.997	0.031	0.004
15.968	15.994	15.998	0.03	0.004
14.971	14.999	15.002	0.031	0.003
13.975	13.994	14.003	0.028	0.009
12.976	12.999	13.002	0.026	0.003
11.979	11.998	12.002	0.023	0.004
10.981	10.999	11.002	0.021	0.003
9.985	9.989	9.998	0.013	0.009
8.987	8.991	8.996	0.009	0.005
7.989	7.993	7.999	0.01	0.006
6.992	7.001	7.002	0.01	0.001
5.995	5.998	6.002	0.007	0.004
4.997	4.996	5.001	0.004	0.005
4	3.992	4.003	0.003	0.011
3.002	3	3.006	0.004	0.006
2.006	2.002	2.008	0.002	0.006
1.008	1.004	1.005	-0.003	0.001
0.01	0.011	0.008	-0.002	-0.003



## Mittaus\_2

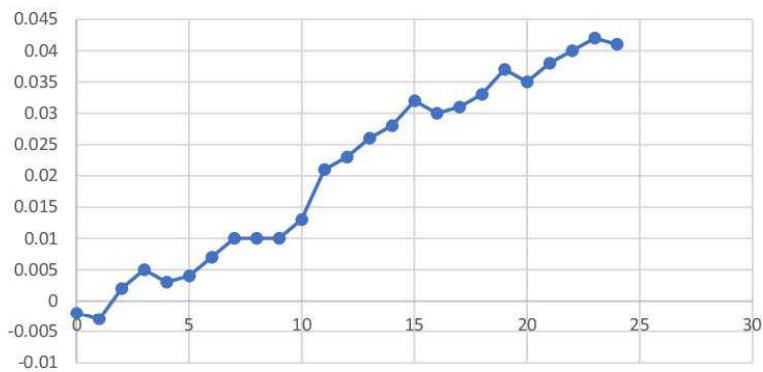
Pulssi	Magneetti	Eteen +50	Mitattu	pulssi erotus	magneetti erotus
0.998	0.993		0.996	-0.002	0.003
1.996	1.989		1.997	0.001	0.008
2.992	2.988		2.997	0.005	0.009
3.989	3.981		3.995	0.006	0.014
4.987	4.985		4.992	0.005	0.007
5.986	5.987		5.993	0.007	0.006
6.982	6.99		6.994	0.012	0.004
7.979	7.983		7.991	0.012	0.008
8.977	8.981		8.989	0.012	0.008
9.975	9.978		9.989	0.014	0.011
10.972	10.984		10.989	0.017	0.005
11.969	11.981		11.987	0.018	0.006
12.967	12.979		12.985	0.018	0.006
13.965	13.972		13.984	0.019	0.012
14.962	14.98		14.986	0.024	0.006
15.958	15.977		15.984	0.026	0.007
16.957	16.976		16.983	0.026	0.007
17.955	17.974		17.986	0.031	0.012
18.952	18.982		18.989	0.037	0.007
19.948	19.979		19.986	0.038	0.007
20.947	20.978		20.985	0.038	0.007
21.945	21.976		21.986	0.041	0.01
22.941	22.98		22.986	0.045	0.006
23.938	23.978		23.982	0.044	0.004
24.935	24.9		24.904	-0.031	0.004



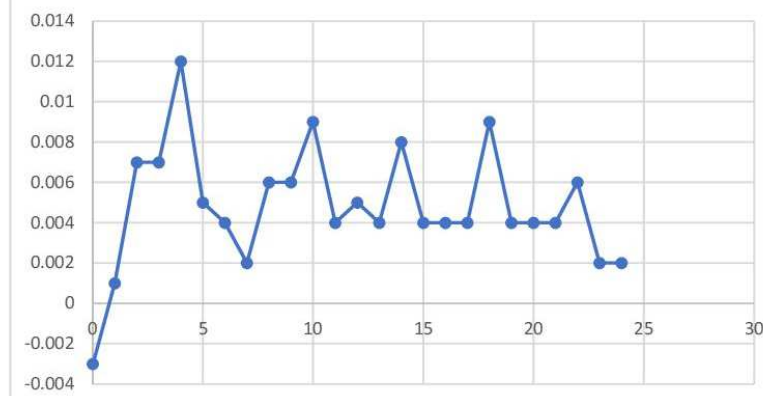
## Mittaus\_2

Pulssi	Magneetti	Taakse	Mitattu	pulssi erot magneetti erotus	
23.947	23.986		23.988	0.041	0.002
22.95	22.99		22.992	0.042	0.002
21.954	21.988		21.994	0.04	0.006
20.955	20.989		20.993	0.038	0.004
19.958	19.989		19.993	0.035	0.004
18.96	18.993		18.997	0.037	0.004
17.965	17.989		17.998	0.033	0.009
16.966	16.993		16.997	0.031	0.004
15.968	15.994		15.998	0.03	0.004
14.971	14.999		15.003	0.032	0.004
13.975	13.995		14.003	0.028	0.008
12.976	12.998		13.002	0.026	0.004
11.979	11.997		12.002	0.023	0.005
10.981	10.998		11.002	0.021	0.004
9.985	9.989		9.998	0.013	0.009
8.987	8.991		8.997	0.01	0.006
7.989	7.993		7.999	0.01	0.006
6.992	7		7.002	0.01	0.002
5.995	5.998		6.002	0.007	0.004
4.997	4.996		5.001	0.004	0.005
4	3.991		4.003	0.003	0.012
3.002	3		3.007	0.005	0.007
2.006	2.001		2.008	0.002	0.007
1.008	1.004		1.005	-0.003	0.001
0.01	0.011		0.008	-0.002	-0.003

Pulssianturi taaksepäin

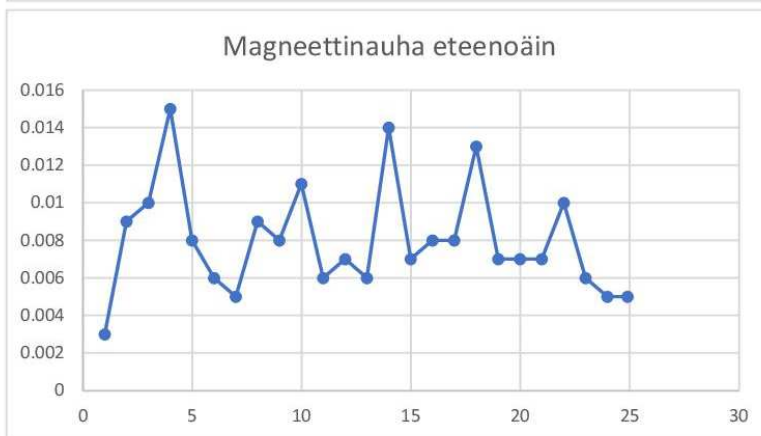
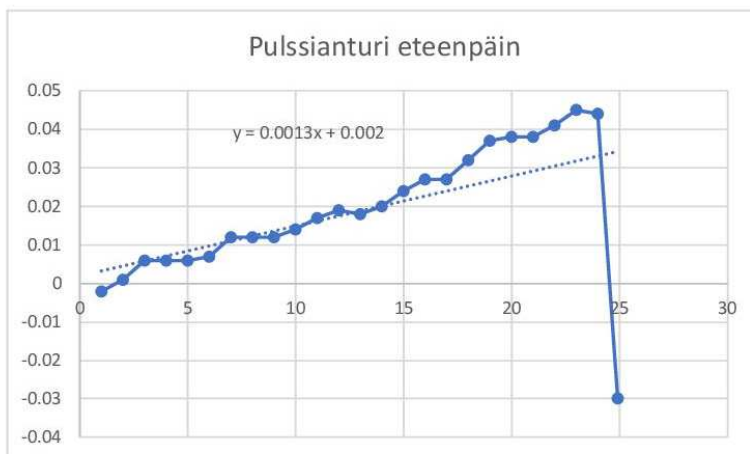


Magneettinauha taaksepäin



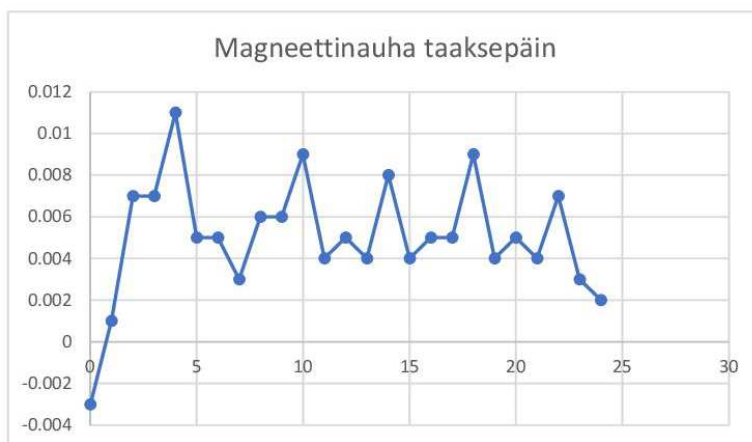
## Mittaus\_3

Pulssi	Magneetti	Pulssi	Magneetti	Eteen +50	Mitattu	pulssi erot magneetti €
0.998	0.993			0.996		-0.002
1.996	1.988			1.997		0.001
2.992	2.988			2.998		0.006
3.989	3.98			3.995		0.006
4.987	4.985			4.993		0.006
5.986	5.987			5.993		0.007
6.982	6.989			6.994		0.012
7.979	7.982			7.991		0.012
8.977	8.981			8.989		0.012
9.975	9.978			9.989		0.014
10.972	10.983			10.989		0.017
11.969	11.981			11.988		0.019
12.967	12.979			12.985		0.018
13.965	13.971			13.985		0.02
14.962	14.979			14.986		0.024
15.958	15.977			15.985		0.027
16.957	16.976			16.984		0.027
17.955	17.974			17.987		0.032
18.952	18.982			18.989		0.037
19.948	19.979			19.986		0.038
20.947	20.978			20.985		0.038
21.945	21.976			21.986		0.041
22.941	22.98			22.986		0.045
23.938	23.977			23.982		0.044
24.935	24.9			24.905		-0.03



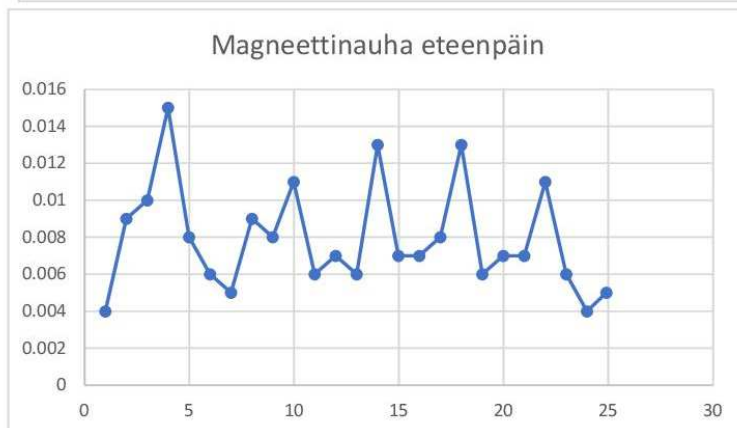
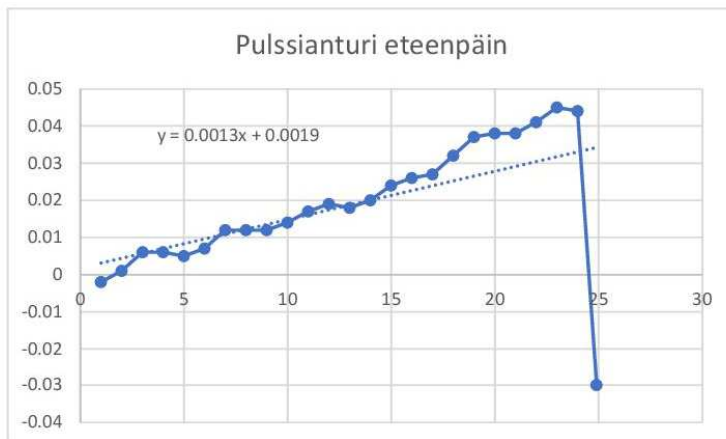
## Mittaus\_3

erotus	Magneetti Taakse	Mitattu	pulssi erotu magneetti erotus	
23.947	23.986	23.988	0.041	0.002
22.95	22.99	22.993	0.043	0.003
21.954	21.987	21.994	0.04	0.007
20.955	20.989	20.993	0.038	0.004
19.958	19.989	19.994	0.036	0.005
18.96	18.993	18.997	0.037	0.004
17.965	17.989	17.998	0.033	0.009
16.966	16.993	16.998	0.032	0.005
15.968	15.993	15.998	0.03	0.005
14.971	14.999	15.003	0.032	0.004
13.975	13.995	14.003	0.028	0.008
12.976	12.998	13.002	0.026	0.004
11.979	11.997	12.002	0.023	0.005
10.981	10.998	11.002	0.021	0.004
9.985	9.989	9.998	0.013	0.009
8.987	8.991	8.997	0.01	0.006
7.989	7.993	7.999	0.01	0.006
6.992	7	7.003	0.011	0.003
5.995	5.998	6.003	0.008	0.005
4.997	4.996	5.001	0.004	0.005
4	3.992	4.003	0.003	0.011
3.002	3	3.007	0.005	0.007
2.006	2.001	2.008	0.002	0.007
1.008	1.004	1.005	-0.003	0.001
0.01	0.011	0.008	-0.002	-0.003



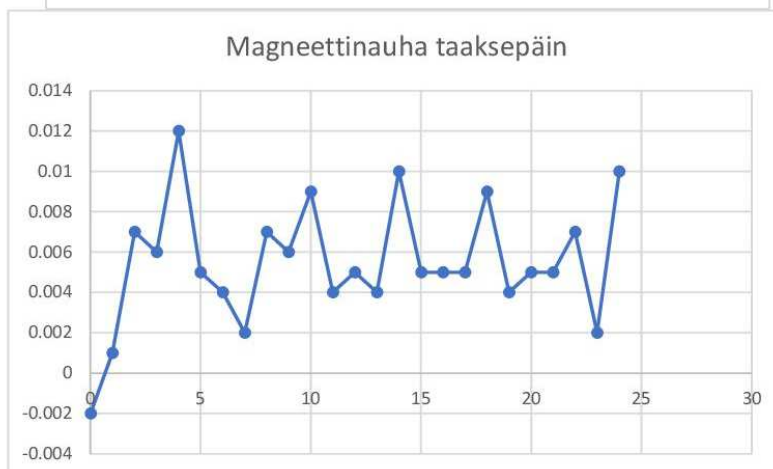
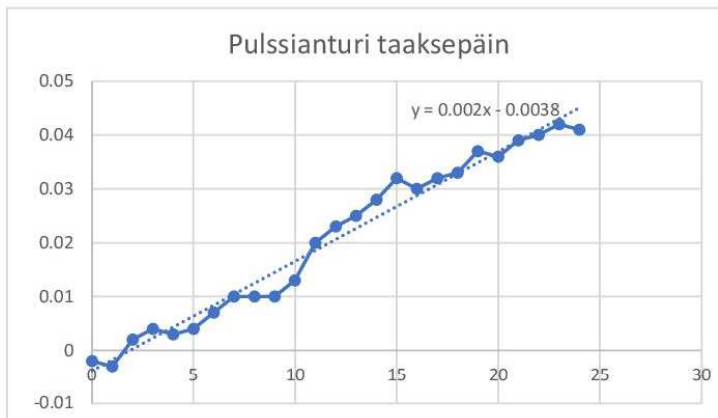
## Mittaus\_4

Pulssi	Magneetti	Eteen +50	Mitattu	pulssi erotus	magneetti erotus
0.998	0.992		0.996	-0.002	0.004
1.996	1.988		1.997	0.001	0.009
2.992	2.988		2.998	0.006	0.01
3.989	3.98		3.995	0.006	0.015
4.987	4.984		4.992	0.005	0.008
5.986	5.987		5.993	0.007	0.006
6.982	6.989		6.994	0.012	0.005
7.979	7.982		7.991	0.012	0.009
8.977	8.981		8.989	0.012	0.008
9.975	9.978		9.989	0.014	0.011
10.972	10.983		10.989	0.017	0.006
11.969	11.981		11.988	0.019	0.007
12.967	12.979		12.985	0.018	0.006
13.965	13.972		13.985	0.02	0.013
14.962	14.979		14.986	0.024	0.007
15.958	15.977		15.984	0.026	0.007
16.957	16.976		16.984	0.027	0.008
17.955	17.974		17.987	0.032	0.013
18.952	18.983		18.989	0.037	0.006
19.948	19.979		19.986	0.038	0.007
20.947	20.978		20.985	0.038	0.007
21.945	21.975		21.986	0.041	0.011
22.941	22.98		22.986	0.045	0.006
23.938	23.978		23.982	0.044	0.004
24.935	24.9		24.905	-0.03	0.005



## Mittaus\_4

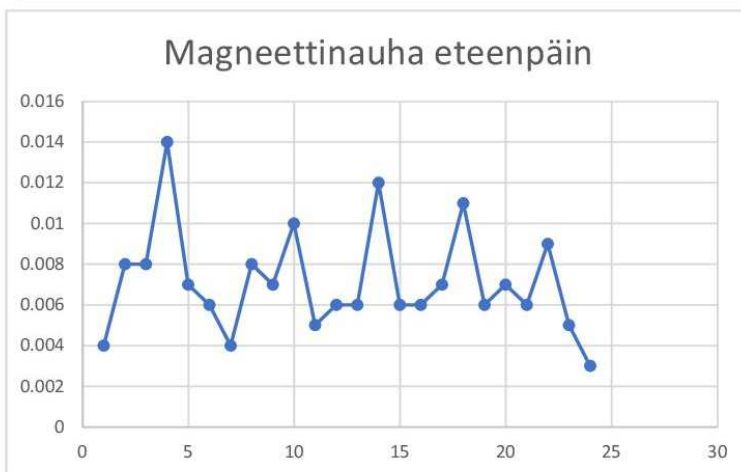
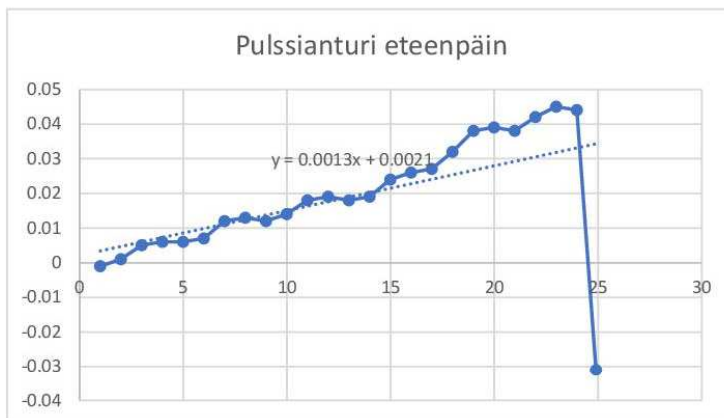
Pulssi	Magneetti Taakse	Mitattu	pulssi erot magneetti erotus	
23.947	23.978	23.988	0.041	0.01
22.95	22.99	22.992	0.042	0.002
21.954	21.987	21.994	0.04	0.007
20.955	20.989	20.994	0.039	0.005
19.958	19.989	19.994	0.036	0.005
18.96	18.993	18.997	0.037	0.004
17.965	17.989	17.998	0.033	0.009
16.966	16.993	16.998	0.032	0.005
15.968	15.993	15.998	0.03	0.005
14.971	14.998	15.003	0.032	0.005
13.975	13.993	14.003	0.028	0.01
12.977	12.998	13.002	0.025	0.004
11.979	11.997	12.002	0.023	0.005
10.981	10.997	11.001	0.02	0.004
9.985	9.989	9.998	0.013	0.009
8.987	8.991	8.997	0.01	0.006
7.989	7.992	7.999	0.01	0.007
6.992	7	7.002	0.01	0.002
5.995	5.998	6.002	0.007	0.004
4.997	4.996	5.001	0.004	0.005
4	3.991	4.003	0.003	0.012
3.002	3	3.006	0.004	0.006
2.005	2	2.007	0.002	0.007
1.008	1.004	1.005	-0.003	0.001
0.01	0.01	0.008	-0.002	-0.002





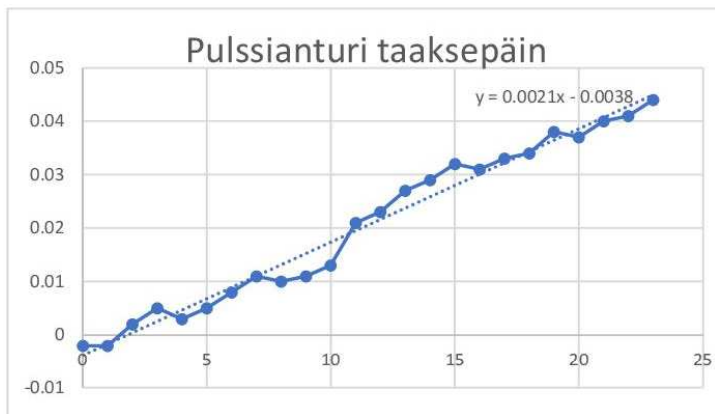
## Mittaus\_5

Pulssi	Magneetti	Eteen +50	Mitattu	pulssi erotus	magneetti erotus
0.998	0.993		0.997	-0.001	0.004
1.996	1.989		1.997	0.001	0.008
2.992	2.989		2.997	0.005	0.008
3.989	3.981		3.995	0.006	0.014
4.987	4.986		4.993	0.006	0.007
5.986	5.987		5.993	0.007	0.006
6.982	6.99		6.994	0.012	0.004
7.979	7.984		7.992	0.013	0.008
8.977	8.982		8.989	0.012	0.007
9.975	9.979		9.989	0.014	0.01
10.972	10.985		10.99	0.018	0.005
11.969	11.982		11.988	0.019	0.006
12.967	12.979		12.985	0.018	0.006
13.965	13.972		13.984	0.019	0.012
14.962	14.98		14.986	0.024	0.006
15.958	15.978		15.984	0.026	0.006
16.957	16.977		16.984	0.027	0.007
17.955	17.976		17.987	0.032	0.011
18.952	18.984		18.99	0.038	0.006
19.948	19.98		19.987	0.039	0.007
20.947	20.979		20.985	0.038	0.006
21.944	21.977		21.986	0.042	0.009
22.941	22.981		22.986	0.045	0.005
23.938	23.979		23.982	0.044	0.003
24.935	24.9		24.904	-0.031	0.004



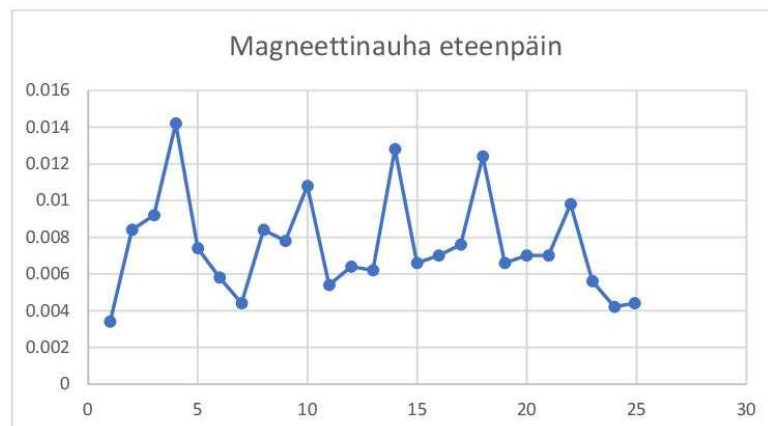
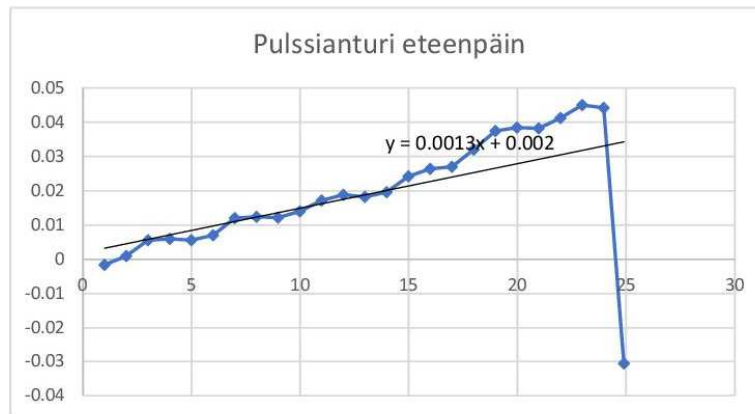
## Mittaus\_5

Pulssi	Magneetti Taakse	Mitattu	pulssi erot magneetti erotus	
23.947	23.977	23.988	0.041	0.011
22.95	22.992	22.994	0.044	0.002
21.954	21.989	21.995	0.041	0.006
20.955	20.991	20.995	0.04	0.004
19.958	19.991	19.995	0.037	0.004
18.96	18.995	18.998	0.038	0.003
17.965	17.991	17.999	0.034	0.008
16.966	16.995	16.999	0.033	0.004
15.968	15.995	15.999	0.031	0.004
14.971	15	15.003	0.032	0.003
13.975	13.996	14.004	0.029	0.008
12.976	13	13.003	0.027	0.003
11.979	11.999	12.002	0.023	0.003
10.981	11	11.002	0.021	0.002
9.985	9.99	9.998	0.013	0.008
8.987	8.993	8.998	0.011	0.005
7.989	7.994	7.999	0.01	0.005
6.992	7.001	7.003	0.011	0.002
5.995	5.999	6.003	0.008	0.004
4.997	4.997	5.002	0.005	0.005
4	3.992	4.003	0.003	0.011
3.002	3.001	3.007	0.005	0.006
2.005	2.001	2.007	0.002	0.006
1.008	1.005	1.006	-0.002	0.001
0.01	0.011	0.008	-0.002	-0.003



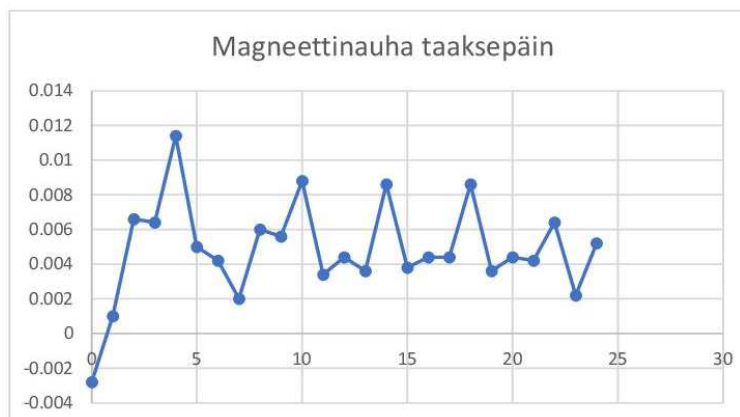
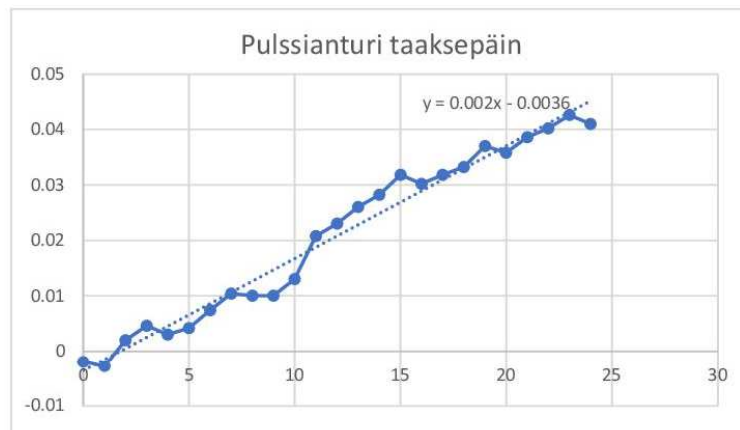
keskiarvo

Pulssi	Magneetti	Eteen +50 Mitattu	pulssi erotu magneetti erotus	
0.998	0.993	0.9964	-0.0016	0.0034
1.996	1.9886	1.997	0.001	0.0084
2.992	2.9884	2.9976	0.0056	0.0092
3.989	3.9808	3.995	0.006	0.0142
4.987	4.9852	4.9926	0.0056	0.0074
5.986	5.9872	5.993	0.007	0.0058
6.982	6.9896	6.994	0.012	0.0044
7.979	7.983	7.9914	0.0124	0.0084
8.977	8.9814	8.9892	0.0122	0.0078
9.975	9.9782	9.989	0.014	0.0108
10.972	10.9838	10.9892	0.0172	0.0054
11.969	11.9814	11.9878	0.0188	0.0064
12.967	12.979	12.9852	0.0182	0.0062
13.965	13.9718	13.9846	0.0196	0.0128
14.962	14.9796	14.9862	0.0242	0.0066
15.958	15.9774	15.9844	0.0264	0.007
16.957	16.9764	16.984	0.027	0.0076
17.955	17.9746	17.987	0.032	0.0124
18.952	18.9828	18.9894	0.0374	0.0066
19.948	19.9794	19.9864	0.0384	0.007
20.947	20.9782	20.9852	0.0382	0.007
21.9448	21.9762	21.986	0.0412	0.0098
22.941	22.9804	22.986	0.045	0.0056
23.938	23.978	23.9822	0.0442	0.0042
24.935	24.9	24.9044	-0.0306	0.0044



keskiarvo

Pulssi	Magneetti Taakse	Mitattu	pulssi erot magneetti erotus	
23.9828	23.988		0.041	0.0052
22.9904	22.9926		0.0426	0.0022
21.9878	21.9942		0.0402	0.0064
20.9894	20.9936		0.0386	0.0042
19.9894	19.9938		0.0358	0.0044
18.9934	18.997		0.037	0.0036
17.9896	17.9982		0.0332	0.0086
16.9934	16.9978		0.0318	0.0044
15.9938	15.9982		0.0302	0.0044
14.999	15.0028		0.0318	0.0038
13.9946	14.0032		0.0282	0.0086
12.9986	13.0022		0.026	0.0036
11.9976	12.002		0.023	0.0044
10.9984	11.0018		0.0208	0.0034
9.9892	9.998		0.013	0.0088
8.9914	8.997		0.01	0.0056
7.993	7.999		0.01	0.006
7.0004	7.0024		0.0104	0.002
5.9982	6.0024		0.0074	0.0042
4.9962	5.0012		0.0042	0.005
3.9916	4.003		0.003	0.0114
3.0002	3.0066		0.0046	0.0064
2.001	2.0076		0.002	0.0066
1.0042	1.0052		-0.0028	0.001
0.0108	0.008		-0.002	-0.0028



keskiarvo

